

基于超表面的宽入射角双频太赫兹偏振选择器的设计与分析

马富鹏¹, 郝亚峰¹, 朱璞¹, 武慧嘉¹, 李仕奇^{2*}, 李腾腾^{1*}

(1. 中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 太原理工大学 人工智能微纳传感山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 目前的单频段太赫兹偏振选择器件已难以满足偏振成像、光谱探测及无线通信等应用场景对多功能集成与频谱复用的需求, 而现有双频段偏振选择超表面结构普遍存在入射角稳定性不足、不同工作频段独立性较差等问题, 限制了其在实际复杂工况下的应用性能。本文提出了一种双频段线二色性太赫兹超表面器件, 通过内部开口非对称亚波长单元结构, 实现了独立频段对正交线偏振太赫兹波的高效选择性调控。仿真结果表明, 该器件在 0.483 THz 和 0.72 THz 两个工作频段分别获得了高达 0.943 和 0.972 的线二色性, 两个工作频段相互独立可调, 其 3 dB 有效工作带宽分别为 0.475~0.490 THz 和 0.709~0.731 THz。场分布分析表明, 在 TE 极化下, 低频和高频分别由金属环内边缘主导的电偶极谐振模式和内外结构协同的耦合谐振模式主导, 而在 TM 极化下, 低频由金属环外边缘的磁偶极谐振主导, 高频由金属环内边缘的电流回路主导。阻抗分析说明, 两个共振频率处的归一化阻抗分别实现与自由空间的理想匹配, 该阻抗匹配特性使器件在两个工作频段分别对正交偏振太赫兹波产生显著吸收差异, 为实现双频段高线二色性提供了关键依据。角度扫描结果显示, 在 0°~35°入射角范围内, 器件的偏振选择效率始终维持在 90% 以上, 即使在 50°大角度入射条件下, 选择效率仍可保持在 80% 左右, 表现出良好的角度稳定性和实际应用潜力。本研究为高性能、多频段、宽角度太赫兹偏振调控器件的设计与应用提供了新的思路 and 实验依据。

关键词: 偏振调控; 超表面; 线二色性; 太赫兹

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.01.0017

引用格式: 马富鹏, 郝亚峰, 朱璞等. 基于超表面的宽入射角双频太赫兹偏振选择器的设计与分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.01.0017.

MA Fupeng, HAO Yafeng, ZHU Pu, et al. Design and Analysis of Wide-Angle Dual-Band Terahertz Polarization Selector Based on Metasurface[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.01.0017.

Design and Analysis of Wide-Angle Dual-Band Terahertz Polarization Selector Based on Metasurface

收稿日期: 2026-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62301509, 62405293); 山西省重点研发计划资助项目(202302030201001); 山西省基础研发计划资助项目(202303021212191); 中国博士后科学基金面上项目(2025M770537)

作者简介: 马富鹏(2000—), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹功能器件的研究。

*** 通信作者:** 李仕奇(1993—), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电子材料与器件、钙钛矿太阳能电池的研究。E-mail: lishiqi@tyut.edu.cn。
李腾腾(1993—), 男, 副教授, 博士, 主要从事微纳光电材料与器件(探测传感方向)、太赫兹功能器件、基于第三代半导体材料的功率半导体器件、激光产业化应用技术的研究。E-mail: litengteng@nuc.edu.cn。

MA Fupeng¹, HAO Yafeng¹, ZHU Pu¹, WU Huijia¹, LI Shiqi^{2*}, LI Tengpeng^{1*}

(1. State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Artificial Intelligence & Micro Nano Sensors,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In recent years, single-band terahertz polarization-selective devices have struggled to meet the demands for multifunctional integration and spectral multiplexing required by applications such as polarization imaging, spectral detection, and wireless communication. Meanwhile, existing dual-band polarization-selective metasurfaces suffer from issues like insufficient incident angle stability and poor independence between different operational bands, limiting their performance in real-world, complex conditions. This paper proposes and demonstrates a dual-band linear-dichroic terahertz metasurface. Using an internally open asymmetric sub-wavelength unit structure, the device achieves efficient and independent control of orthogonal linearly polarized terahertz waves at two distinct frequency bands. Simulation results show that the device reaches linear dichroism values of 0.943 and 0.972 at 0.483 THz and 0.72 THz, respectively, with independent tunability for both bands. The 3 dB effective operating bandwidths are 0.475-0.490 THz and 0.709-0.731 THz, respectively. Field distribution analysis reveals that under TE polarization, the low-frequency and high-frequency responses are dominated by electric dipole and coupled resonance modes, respectively. Under TM polarization, the low-frequency response is governed by magnetic dipole resonance, while the high-frequency response is dominated by a current loop in the metallic ring. Impedance analysis shows that the normalized impedances at the two resonant frequencies are ideally matched to free space. This matching property results in pronounced absorption contrast between orthogonal linearly polarized terahertz waves at the two operating bands, laying a critical foundation for dual-band high linear dichroism. Angle-dependent tests demonstrate that polarization-selective efficiency remains above 90% from 0° to 35° incident angles, and even at 50° incident angle, efficiency stays around 80%, showing excellent angle stability and practical application potential. This research provides new insights and experimental basis for the design and application of high-performance, multi-frequency, wide-angle terahertz polarization control devices.

Key words: polarization control; metasurface; linear dichroism; terahertz

0 引 言

太赫兹(Terahertz, THz)波段位于微波与红外之间^[1],通常覆盖的频率范围为0.1~10 THz,对应波长为30 μm~3 mm。与传统微波相比,太赫兹波具有更高的空间分辨率;与红外相比,其穿透能力更强,可在非金属或非极性材料中传播。此外,太赫兹波兼具电学和光学特性,可同时通过电子器件和光学器件实现调控,因此在通信^[2-4]、成像^[5-7]、光谱分析^[8-10]、安全检测^[11-13]以及生物医学探测^[14-16]等领域具有广泛应用。尤其在偏振成像和频谱探测中,通过精确控制太赫兹波的偏振态,可实现信息增强、噪声抑制和系统性能提升^[17-18]。

线二色性(Linear Dichroism, LD)是一种重要的

偏振选择机制,能够对正交线偏振波进行高效区分。在单频段太赫兹器件中,线二色性已经被广泛应用于偏振选择和信号处理。然而,随着太赫兹系统向多频段、多功能集成方向发展,单频段器件已难以满足频谱复用和多通道信息处理的需求。多频段二色性器件可以在不同频段独立实现偏振选择,从而提高太赫兹系统的利用效率,并支持更复杂的功能集成,这使其成为太赫兹系统中必不可少的部分。

金属-介质-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)三层夹层结构是太赫兹超表面的主流构型之一,其通过上层谐振单元与下层金属反射层的电磁耦合,可同时实现对电磁波振幅、相位和偏振态的灵活调控,且具有制备工艺简单、结构稳定性好、易于集成等优势。Li等^[19]基于MIM结构开发了可穿戴式柔性太赫兹超表面,通过将其贴合在圆柱形透镜表面,实现了太赫兹偏振分复用功能,同时集成了点聚焦、

贝塞尔束生成、相位全息等多种调控能力,实验测得总调制效率高达87%;该工作还验证了柔性MIM超表面可反复拆装于传统光学器件表面而不损失性能,且制备时采用了低成本印刷电路技术,为太赫兹多功能集成器件提供了新的实现途径。

近年来,基于MIM结构的双频段线二色性太赫兹超表面器件因其技术优势而受到了广泛关注。研究人员主要通过两种技术路线实现双频响应:1)叠加不同谐振单元实现双频响应,例如,Lü等^[20]设计了一种基于双层手性S形结构的太赫兹双频二色性非对称传输超构材料,分别在两个频率上对正交线偏振波实现了色散性二色性传输;Zhou等^[21]在基于光敏硅结构的双频线二色性超表面中,在约0.850 THz和1.094 THz实现了显著的线二色性响应,并通过嵌入光敏材料实现了偏振响应的动态调控,展现了双频段的深度调制能力;但双层结构间不可避免的强电磁耦合会导致两个工作频段相互串扰,无法实现独立调控。2)设计多模谐振结构来实现双频响应,例如Rong等^[22]设计了一种基于温度可调InSb的双频THz手性超表面吸收器,在1.65 THz和1.89 THz处分别获得高极化选择性吸收,并通过几何参数调节实现二色性光谱的调控;Yang等^[23]提出了一种工字形的双频THz超表面结构,可区分圆偏振光的旋向,在0.952 THz和1.03 THz处实现不同手性偏振检测,展示了多频偏振的操控能力;但高阶谐振模式的场分布对入射角高度敏感,大角度入射下会发生严重的模式畸变。

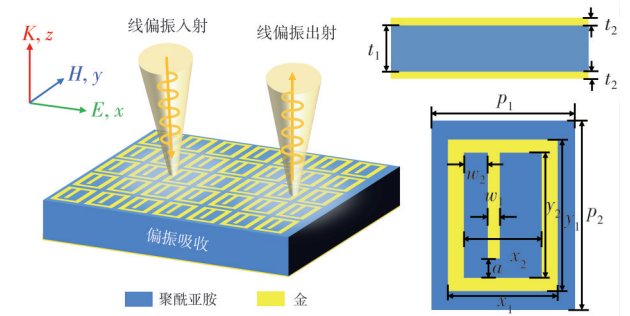
综上,现有双频段线二色性太赫兹超表面仍存在两大核心瓶颈:一是大角度入射下偏振选择效率急剧下降,角度稳定性不足;二是不同工作频段间存在较强的电磁耦合,频段独立性较差。因此,设计兼具高角度稳定性与频段独立性的双频段线二色性太赫兹超表面,仍是当前该领域亟待解决的重要挑战。针对以上问题,本文围绕双频段线二色性太赫兹超表面的结构设计与偏振调控机理展开系统研究,提出一种基于单层非对称内部开口亚波长单元的太赫兹超表面结构。该设计通过单元内部几何破缺,旨在从物理上激励空间分布解耦的谐振模式,以同时实现频段独立调控与宽角度稳定性。采用有限元积分电磁仿真方法(Finite Integration Technique, FIT)来研究结构参数对双频段线二色性响应的调控规律,明确不同几何参数在频段选择与独立调控中的作用机制,并进一步分析器件的偏振响应特性、入射角

稳定性及等效阻抗匹配特性,以揭示双频段线二色性响应的物理本质与实现途径。

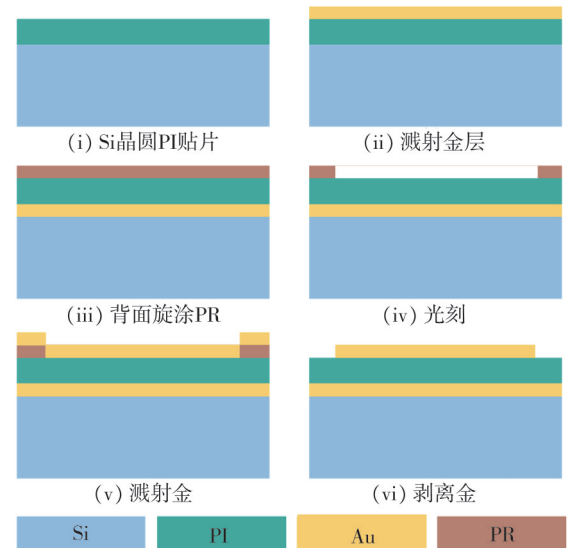
1 结构设计与理论分析

1.1 超表面单元结构设计

图1展示了所提出的双频段线二色性太赫兹超表面的结构示意图。器件采用MIM三层夹层构型,上为层周期排布的内部开口的非对称环-条复合金属结构,非对称设计旨在打破结构的对称性,从而激励出对特定线偏振敏感且空间局域性不同的谐振模式,这是实现双频段独立可调的关键。中间层为介质隔离层,底层为金属反射层,在太赫兹波段可有效抑制电磁波透射,使器件的电磁响应主要由反射和吸收过程决定,从而为实现高对比度的线二色性偏振选择提供了结构基础。



(a) 超表面结构示意图



(b) 超表面工艺制备流程图

图1 线二色性超表面结构及制备流程

器件上下金属层均采用金(Au)材料。由于金在太赫兹波段主要表现为由自由电子主导的Drude型

电磁响应,其高电导率特性使入射太赫兹波在金属表面产生显著的感生电流,从而支撑清晰且可控的谐振模式。中介质层选用聚酰亚胺(Polyimide, PI),其在太赫兹频段具有良好的介电稳定性和低损耗特性。器件结构参数如图1(a)所示,其中,介质层厚度设为 $t_1=100\text{ }\mu\text{m}$,金属层厚度 $t_2=200\text{ nm}$ 。该厚度在太赫兹波段已远大于金属趋肤深度,可近似视为理想导体,从而保证谐振行为主要由单元几何结构所决定。

为了展示所提双频段线二色性太赫兹超表面结构在实际制备中的可操作性,本文补充了器件的制备工艺流程示意,如图1(b)所示,具体如下:首先将聚酰亚胺(PI)柔性薄膜贴附在硅片上以获得支撑;在PI表面溅射底层金属层,溅射金厚度为 200 nm ,溅射功率设为 50 W ,时间 10 min ;反面贴片旋涂光刻胶(型号AZ6130),匀胶参数为 $3\text{ }000\text{ r/min}$, 1 min ;旋涂完成后进行光刻,曝光剂量为 100 mJ/cm^2 ;显影采用体积比为 $1:10$ 的四甲基氢氧化氨(TMAH)与去离子水的混合液,显影时间 12 s ;随后通过溅射上层金属形成超表面结构,再剥离光刻胶,得到最终的双频段线二色性超表面。

1.2 电磁谐振机理分析

在入射太赫兹波激励下,上层金属环及连接金属条中将产生明显的感生电流分布,并在金属结构边缘及间隙区域形成显著的局域电磁场增强。该超表面结构可等效为由电感和电容共同组成的谐振单元,由此形成的等效LC谐振^[24]决定了结构在特定频率处对正交偏振入射太赫兹波的反射和吸收特性,从而表现出明显的偏振选择性响应。

从宏观电磁响应角度看,反射型超表面对入射电磁波的响应可用式(1)^[25]表示。

$$\begin{bmatrix} E_r^x \\ E_r^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_i^x \\ E_i^y \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} E_i^x \\ E_i^y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: E_i^x , E_i^y 分别为入射电场的两个偏振分量; E_r^x , E_r^y 为对应的反射分量; R 为反射矩阵。在正入射条件下,入射平面可任意选取,因此本文将两种正交线偏振分别定义为 x 偏振和 y 偏振,并分别对应TE与TM极化。对于理想线二色性结构,期望器件在 x 偏振入射下表现为强反射,而在 y 偏振入射下表现出强吸收时,反射矩阵 R 用式(2)^[26]表示。

$$R \approx \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{bmatrix} = e^{i\alpha} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: α 为由结构电磁响应引起的相位延迟。反射到 x 与 y 偏振的功率分别为 $|r_{xx}|^2$ 与 $|r_{yy}|^2$,该入射条件下的吸收为^[27]

$$A_x = 1 - (|r_{xx}|^2 + |r_{yx}|^2). \quad (3)$$

同理,入射为 y 偏振的吸收为

$$A_y = 1 - (|r_{yy}|^2 + |r_{xy}|^2). \quad (4)$$

线二色性(Linear Dichroism, LD)可定义为两种偏振吸收之差^[28],即

$$LD = A_x - A_y. \quad (5)$$

偏振选择效率(Polarization Selective Efficiency, PSE)定义为器件对目标偏振的吸收与对正交偏振的吸收之差与总入射能量的比值,其计算公式为

$$PSE = \left| \frac{A_x - A_y}{A_x + A_y} \right| \times 100\%. \quad (6)$$

结合上述微观谐振机理与宏观反射模型可以看出,器件结构在不同频率处分别由金属环和连接金属条相关的感生电流分布所主导,形成具有不同空间分布特征的谐振响应,使不同频率处的反射矩阵元素对偏振的敏感性不同,从而在两个工作频段内均产生显著的偏振相关吸收差异,最终实现双频段线二色性响应。

2 仿真分析与参数优化

2.1 仿真模型与参数设置

本文采用CST Microwave Studio软件对所提出的双频段线二色性太赫兹超表面进行数值仿真分析,仿真过程中选用有限积分法的频域求解器计算结构在太赫兹波段下的电磁响应特性。超表面单元模型置于周期性边界条件下, x 和 y 方向设置为周期性边界(Unit Cell), z 方向采用开放边界(Open with Added Space)以模拟平面波正入射情形。入射电磁波沿 z 轴负方向传播,电场极化方向分别设置为TE和TM极化方式,用以分析结构对不同线偏振入射波的选择性响应。

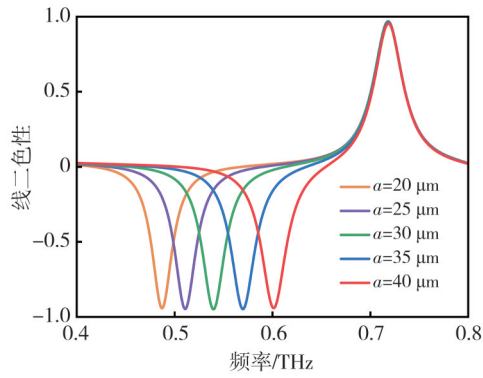
金属结构材料选用金(Au),其电磁特性采用CST内置的金属材料模型;基底材料为聚酰亚胺(Polyimide, PI),其相对介电常数设为 $\epsilon_r=3.4$,损耗角正切设为 $\tan \delta=0.002$ 。仿真频率范围设置为 $0.4\sim 0.8\text{ THz}$,以完整覆盖器件的双频段线二色性工作区间。网格划分采用自适应加密策

略,在金属边缘及开口等电磁场强烈变化区域进行局域细化,以保证计算结果的精度与数值收敛性。

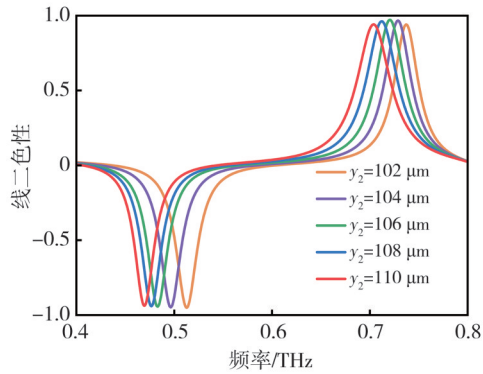
在上述仿真模型与参数设置基础上,对超表面关键几何参数进行系统扫描,分析其对双频段线二色性响应频率位置及偏振选择特性的影响,从而为后续性能优化及物理机理分析提供依据。

2.2 参数优化分析

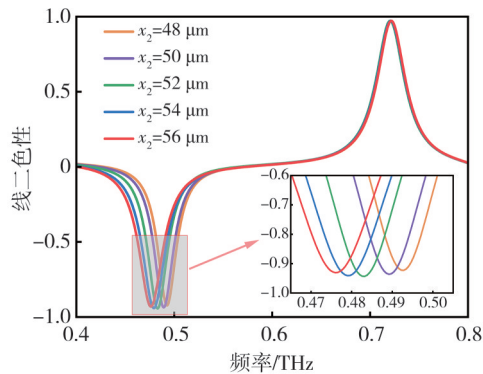
图 2 为对超表面单元的关键结构参数进行系统扫描分析的结果,用以明确器件几何参数对双频段线二色性响应的调控作用。



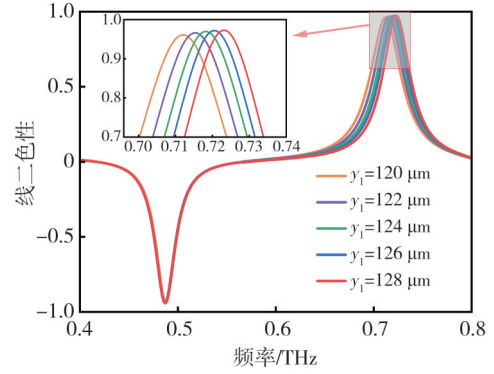
(a) 参数 a 线二色性扫描结果



(b) 参数 y_2 线二色性扫描结果



(c) 参数 x_2 线二色性扫描结果



(d) 参数 y_1 线二色性扫描结果

图 2 太赫兹线二色性响应对结构参数的依赖关系

Fig. 2 The dependence of terahertz linear dichroism response on structural parameters

图 2(a) 给出了参数 a 变化时器件线二色性谱的仿真结果。可以看出,随着参数 a 的增大,低频工作频段对应的线二色性峰值位置逐渐向高频方向移动,表现出明显的蓝移特征,而高频线二色性工作频段的位置不发生偏移。同时,两个频段内线二色性的峰值强度基本不变,表明参数 a 主要用于调控低频共振的频率位置,而对高频共振模式及其偏振选择性没有影响。图 2(b) 展示了参数 y_2 对器件线二色性响应的影响。仿真结果表明,随着 y_2 的增大,低频和高频两个线二色性工作频段均发生明显红移,说明该参数同时参与调控双频段谐振模式的等效电磁特性。在此过程中,低频线二色性峰值强度基本保持稳定,而高频线二色性强度则对 y_2 的变化更为敏感,当 $y_2 = 106 \mu\text{m}$ 时,高频频段获得最强的偏振相关吸收响应。综合参数 a 与 y_2 的扫描结果可知,这两个参数在调控双频段线二色性响应中分别承担不同功能,其中参数 a 主要用于低频工作点的精细调节,而参数 y_2 则可实现双频段频率位置的整体调控并对高频偏振选择性进行优化。通过二者的协同设计,可在较大范围内实现双频段线二色性工作频率的灵活选择,而无需牺牲器件的响应强度。图 2(c) 给出了参数 x_2 变化时器件线二色性响应的仿真结果。可以看出,随着参数 x_2 的增大,低频线二色性工作频段的共振位置发生缓慢红移,而高频线二色性响应基本保持不变,在此过程中,低频线二色性强度随 x_2 的变化呈现先增强后减弱的趋势,当 $x_2 = 52 \mu\text{m}$ 时取得最大值。图 2(d) 展示了参数 y_1 对器件线二色性响应的影响。仿真结果表明,随着 y_1 的增大,高频线二色性工作频段的共振位置逐渐向高频方向移动,表现为缓慢蓝移,而低频线二色性响应几乎不受影响。与此同时,

高频线二色性强度同样随 y_1 的变化呈现先增强后减弱的趋势,当 $y_1=126\text{ }\mu\text{m}$ 时达到最大值。上述结果表明,参数 x_2 主要参与调控低频谐振模式,参数 y_1 主要作用于高频谐振模式,合理调整参数不仅可以实现工作频段的精细调控,还能够在对应频段内实现优异的偏振选择性能。

基于上述参数扫描结果,选取各关键几何参数的最优取值,对器件在双频段下的反射、吸收及线二色性响应进行进一步分析,结构参数如表1所示。

表1 器件结构参数
Tab. 1 Structural parameters of the device

ρ_1	ρ_2	w_1	w_2	x_1	x_2	y_1	y_2	a
100	150	9	21	80	52	126	106	20

所设计超表面在TE极化与TM极化太赫兹波正入射条件下的反射、吸收与透射特性以及二色性响应结果如图3所示。

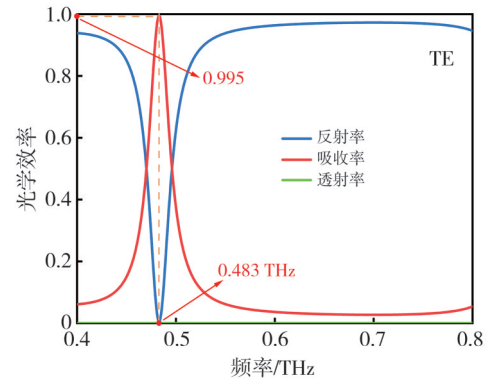
如前所述,下层连续金属反射层在太赫兹波段有效抑制了电磁波透射,因此在整个工作频段内器件的透射率均接近于0,入射能量主要通过反射与吸收过程进行重新分配。

图3(a)给出了TE极化入射条件下的吸收谱,可以看出,在低频工作点0.483 THz处器件表现出强烈的吸收特性,其吸收率达到0.995,而在图3(b)中相同频率下,TM极化入射对应的吸收显著较低。

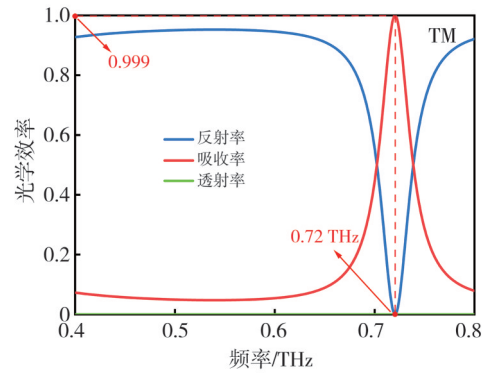
图3(b)所示的TM极化入射结果表明,在高频工作点0.72 THz处器件同样呈现出近乎完全的吸收,其吸收率高达0.999,与图3(a)中相同频率下的TE极化吸收形成鲜明对比,这种在同一频率下对正交线偏振产生的显著吸收差异,正是线二色性效应的直接体现。

图3(c)给出了器件的线二色性谱,在0.483 THz与0.72 THz处分别获得0.943与0.972的线二色性值,表明所设计超表面在双频段内均实现了高对比度的偏振相关吸收响应。

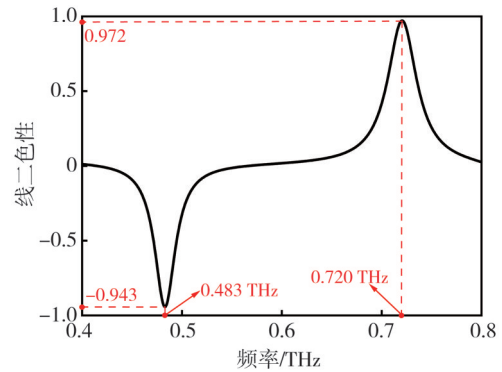
图3(d)为线二色性谱的3 dB带宽标注图,基于该图计算得到,两个工作频段的3 dB有效工作带宽分别为0.475~0.490 THz和0.709~0.731 THz。可满足多数太赫兹实时偏振成像(5~20 GHz)和单频点偏振光谱检测(5~25 GHz)等主流应用的带宽需求。



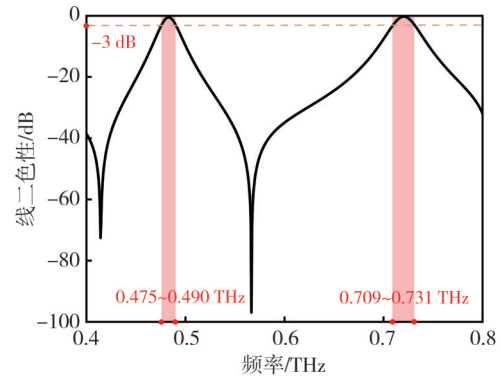
(a) TE极化下光谱特性



(b) TM极化下光谱特性



(c) 线二色性



(d) 3 dB带宽标注

图3 太赫兹超表面在TE和TM偏振下的反射、吸收及线二色性特性
Fig. 3 Reflection, absorption, and linear dichroism characteristics of the terahertz metasurface under TE and TM polarizations

2.3 电磁场分布与表面电流分析

为揭示不同偏振态和工作频率下超表面谐振模式的形成机理,进一步从电磁场分布与表面电流分布角度对器件的偏振选择特性进行分析。通过考察共振频点处的局域电场增强特征及金属结构表面的电流分布形式,明确不同谐振模式的物理来源及其与结构几何特征之间的内在联系。

图4展示了最优参数条件下不同偏振入射时的电场分布情况。

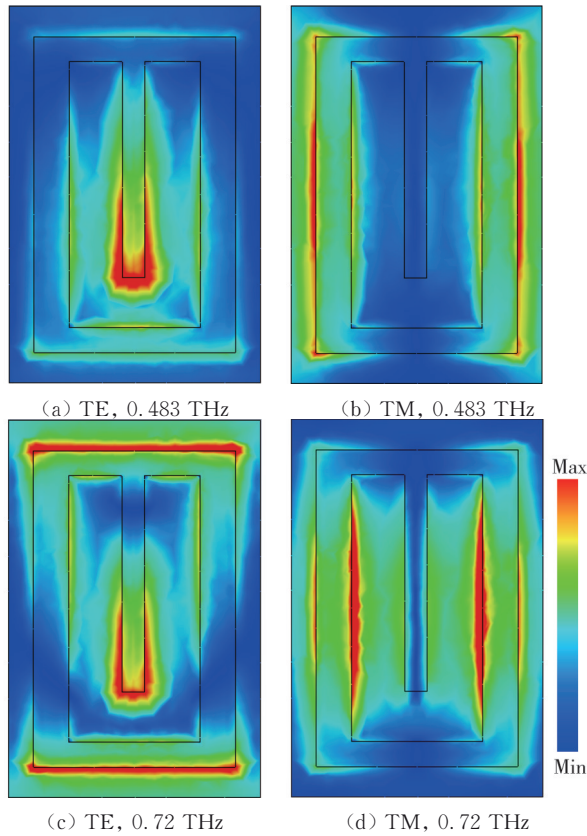


图4 电场分布图

Fig. 4 Electric field distribution

图4(a)对应TE极化入射下的低频工作点0.483 THz,此时入射电场方向与金属条开口方向高度匹配,电场主要驱动金属条与相邻金属环之间的电荷积累,在开口区域形成显著的局域增强,表明该频率下谐振行为主要受局域电容效应控制。图4(b)为TM极化入射下的0.483 THz,电场主要分布在金属环左右两侧外边缘区域,金属条开口处的电场明显较弱,说明该偏振条件下金属条与金属环之间的电容耦合参与程度较低。在高频工作点0.72 THz下,图4(c)给出了TE极化入射时的电场分布情况,可以观察到电场主要集中在金属环上下外边缘以及

金属条开口处,但增强区域相对分散,未形成单一、集中的局域热点。相比之下,图4(d)所示的TM极化入射下,电场主要聚焦在金属环左右两侧内边缘,表现出更加集中的局域增强特征,表明该频率下TM极化能够更有效地激发与金属环相关的谐振模式。

图5展示了对应条件下的磁场分布,用以分析感生电流回路的形成情况。

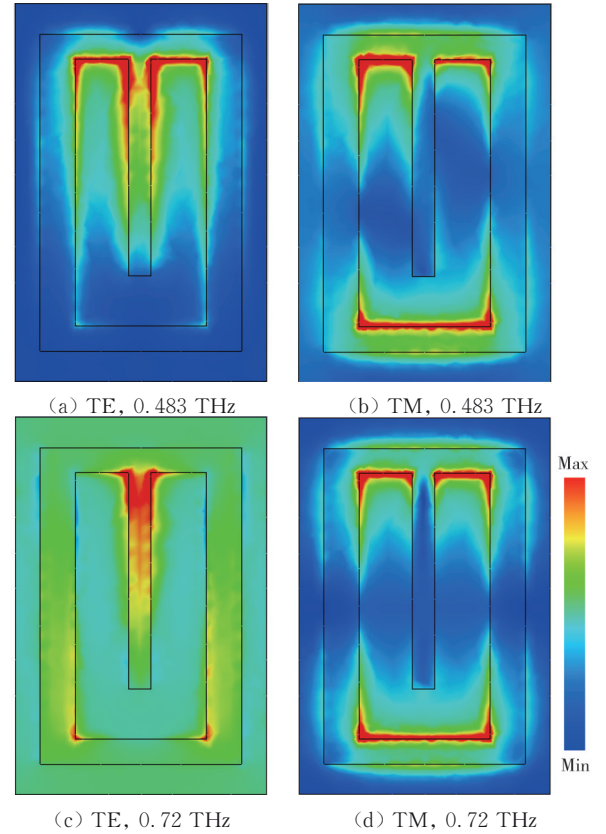


图5 磁场分布图

Fig. 5 Magnetic field distribution

图5(a)为低频0.483 THz、TE极化入射条件下的磁场分布,磁场主要聚集在上方金属环的上侧内边缘以及金属条上端两侧区域,说明感生电流主要局限于金属条与上部金属环之间,形成以局域电容效应为特征的谐振回路。相比之下,图5(b)中,同一频率下的TM极化入射中,除金属环的上侧内边缘以及金属条上端两侧区域外,磁场还分布于金属环下侧内边缘,表明感生电流可沿金属环形成更大尺度的回路,但该回路与金属条之间的耦合程度有限,未形成以吸收为主导的集中谐振通道。在高频0.72 THz下,如图5(c)所示,TE极化入射时的磁场主要集中在金属条与金属环的连接位置,而其余区域磁场强度分布较为均匀,显示该偏振条件下虽可激发局域磁响应,但缺乏清晰、集中的主导回路。如图5(d)所示,在TM极化入射条件下,主要

集中在金属环内边缘区域,说明该频率下TM极化能够稳定激发由金属环主导的谐振模式,并与下层金属反射层形成有效的电磁耦合。

图6给出了对应频率和极化条件下的表面电流分布。

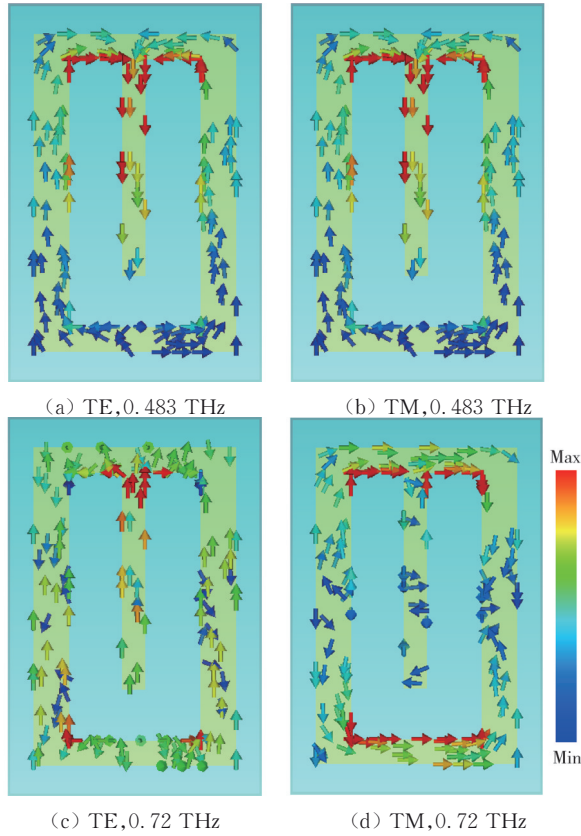


图6 表面电流分布图

Fig. 6 Surface current distribution

如图6(a)所示,在0.483 THz、TE极化入射时,电流整体呈现自下而上的主导方向,左右两个金属环分别以相反的旋向参与电流分布,并最终在金属条处汇聚并向下回流,形成清晰、闭合的局域电流回路,表明金属条在该频率下是谐振回路中的关键组成部分。相比之下,如图6(b)所示,在同一频率下的TM极化入射中,电流主要沿水平方向自右向左分布,上下两侧电流分别由右侧金属环流向左侧金属环,金属条仅弱参与电流传输,未形成以其为核心的闭合回路。在高频0.72 THz下,如图6(c)所示,TE极化入射时的电流分布相对分散,尽管整体仍以自下而上的方向为主,且金属条中存在一定电流强度,但缺乏明确、集中的闭合路径,表明该偏振条件下未形成主导吸收模式。相反,如图6(d)所示,在TM极化入射条件下,尽管电流方向相较低频发生反转,但电流主要集中分布于金属环区域,且与下

层金属反射层共同构成稳定的电流回路,体现出典型的金属环主导谐振特征。

综合电场、磁场及表面电流分布可以看出,低频0.483 THz的吸收主要来源于TE极化选择性激发的、由金属条参与的局域电容型电偶极主导谐振,而高频0.72 THz的吸收则主要由TM极化激发的、金属环主导的电-磁混合谐振模式贡献。器件的偏振选择吸收本质上源于非对称开口结构对闭合电流回路的选择性激发,当入射波的偏振方向与结构谐振模式匹配时,才能形成集中的闭合电流回路,产生焦耳热损耗并实现强吸收;反之则电流分散,能量几乎全部反射。

3 角度稳定性与等效阻抗分析

3.1 入射角扫描分析

器件抑制大角度偏振耦合的核心机制可概括为以下两方面:1)非对称开口将双频段谐振模式完全解耦并空间局域化,入射电场可分解为平行于超表面的切向分量和垂直于超表面的法向分量。由于上述两种谐振模式均为面内谐振,仅能被电场切向分量激发,而法向分量无法有效耦合至谐振回路,从根源上避免了正交偏振间的能量串扰。2)亚波长单元使超表面等效为各向异性稳定的均匀介质,大角度入射时,等效介质的各向异性张量保持不变,不会出现对称结构中常见的角度诱导各向异性反转现象,从而保证了正交偏振的响应差异在宽角度范围内稳定存在。

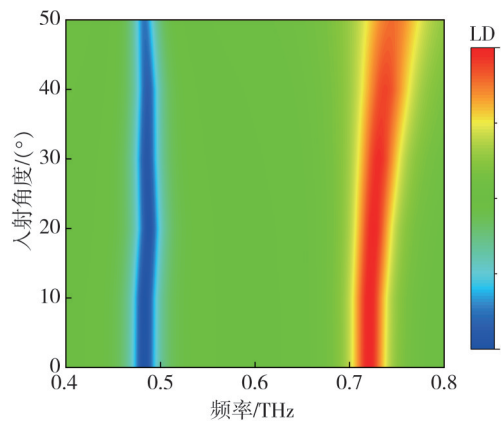


图7 0°~50°入射角的线二色性性能图

Fig. 7 Linear dichroism performance at incident angles from 0° to 50°

为了评估器件在实际应用条件下的角度稳定性,对TE和TM极化入射下的双频段线二色性能进行了0°~50°的入射角扫描。如图7所示,在0°~35°入射角范围内,无论低频0.483 THz还是

高频0.72 THz, 器件的偏振选择效率始终维持在90%以上, 线二色性保持稳定。当入射角进一步增大至50°时, 尽管偏振耦合发生一定变化, 低频和高频的偏振选择效率仍可保持在80%左右, 显示出良好的角度稳定性。这表明, 所提出的超表面结构在不同入射条件下均能维持显著的偏振相关吸收差异, 从而保证双频段线二色性响应在宽角度范围内稳定可用, 为实际太赫兹偏振调控器件应用提供了可靠基础。

3.2 等效阻抗与物理机制

对于TE极化入射, 超表面的反射特性可通过共偏振和交偏振反射系数 R_{xx} 与 R_{xy} 来描述。由于下层存在厚金属基底, 透射波被完全抑制, 因此该器件可视为反射型超表面。基于有效介质理论, 可通过反射系数反求法计算器件的有效归一化阻抗 $Z(w)$, 计算公式为

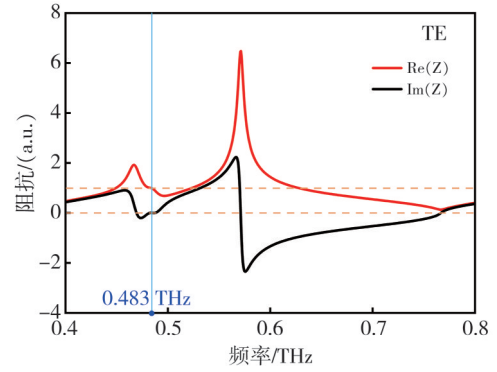
$$Z(w) = \frac{Z}{Z_0} = \sqrt{\frac{(1 + R_{xx})^2 - R_{xy}^2}{(1 - R_{xx})^2 - R_{xy}^2}}, \quad (7)$$

式中: Z 与 Z_0 分别为吸收器的有效阻抗与自由空间阻抗。计算过程充分考虑实际结构存在的交叉耦合效应, 将正交偏振反射系数 R_{xy} 纳入计算体系, 以保证阻抗提取结果的准确性。

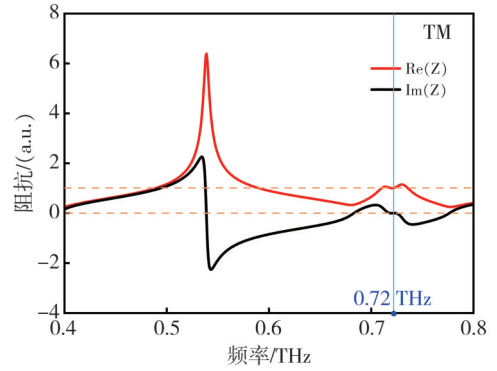
阻抗提取的具体步骤为: 首先通过数值仿真分别获取TE、TM极化下的共偏振反射系数; 随后将不同频率点的反射系数代入式(7), 得到对应频段的归一化阻抗; 最后分离阻抗的实部与虚部, 用以判断结构与自由空间的阻抗匹配状态。由图8(a)可以看出, 在TE极化下, 低频共振(0.483 THz)时等效LC参数满足谐振条件, 阻抗的实部接近1、虚部约为0, 表明结构与自由空间阻抗匹配良好, 从而实现了理想的吸收特性^[28]; 高频共振(0.72 THz)时, 无有效LC谐振, 阻抗失配导致吸收极弱。高频共振(0.72 THz)TM极化的归一化阻抗如图8(b), 阻抗实部同样为1, 虚部为0, 对应完美阻抗匹配并产生强吸收效应。低频共振(0.483 THz)阻抗严重失配, 入射能量几乎全部被反射。两个谐振回路之间的过渡区无任何寄生谐振, 从根本上避免了频段间的电磁耦合, 保证了双频段的独立可调性。

该方法的误差主要来源于两个方面: 聚酰亚胺采用恒定介电常数, 与真实色散存在微小差异; 网格划分的数值误差。本文通过采用亚波长单元、精确的Drude金属模型和自适应加密网格, 能将阻抗

提取的相对误差控制在5%以内。根据阻抗匹配原理, 将超表面的有效阻抗调节至与自由空间匹配可以抑制反射, 实现近乎完美的吸收。



(a) TE极化下太赫兹吸收阻抗匹配



(b) TM极化下太赫兹吸收阻抗匹配

图8 不同极化的太赫兹超表面的归一化阻抗

Fig. 8 Normalized impedance of terahertz metasurfaces for different polarizations

3.3 与已有工作的性能对比分析

表2总结了本工作的线二色性超表面与之前报道的圆形和线性二色性超表面的性能对比。

表2 本工作与其他工作的二色性性能对比

Tab. 2 Dichroism performance comparison between this work and other studies

文献	频率/THz	极化类型	二色性值	入射角
[21]	0.85	线	0.99	<20°
	1.049		0.98	
[26]	1.00	线	0.84	<30°
	1.16	圆	0.81	
	7.62		0.9	
[29]	8.96	线	0.84	—
	—		0.88	
[30]	0.45	圆	0.44	—
	0.63		0.515	
[31]	0.76	线	0.73	—
	1.89	圆	0.88	
本文	0.483	线	0.943	<50°
	0.72		0.972	

从表2中可以看出,所提出的双频段线二色性太赫兹超表面在两个工作频段均实现了高线二色性(LD分别为0.943和0.972),已具有性能优势。同时,器件在宽入射角范围($0^{\circ}\sim 50^{\circ}$)内保持80%以上的偏振选择性能,展现出优异的角度稳定性。相比前人工作,本设计在保证二色性性能的同时兼顾了双频段独立性和频率可调性,使其在太赫兹偏振调控、偏振成像和多频段信息处理等场景中具有更广阔的应用前景。

4 结 论

本文设计并实现了一种基于非对称内部开口亚波长单元的双频段线二色性太赫兹超表面器件。器件在0.483 THz和0.72 THz两个频段分别实现了高线二色性(LD分别为0.943和0.972),3 dB有效工作带宽分别为0.475~0.490 THz和0.709~0.731 THz,且两个工作频段互不干扰,通过调节结构参数可实现频率的灵活选择。电磁场、表面电流及阻抗匹配分析表明,低频主要由TE极化选择性激发的电偶极型谐振贡献吸收,高频则由TM极化激发的电-磁混合谐振模式主导,正是不同频段由不同偏振选择性参与的谐振方式差异形成了双频段线二色性响应。入射角扫描显示,器件在 $0^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 范围内的偏振选择效率保持90%以上,即使在 50° 大角度入射下仍可保持约80%,表现出优异的角度稳定性。性能对比表明,该设计在双频段高线二色性、频段独立性以及宽角度稳定性方面具有优越性,为太赫兹波段偏振调控、成像及多频段信息处理等应用提供了新的理论指导和实验依据。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 李腾腾,朱璞,郝亚峰,等.微结构太赫兹调制技术研究进展[J].测试技术学报,2024,38(5):455-466.
Li Tengting, Zhu Pu, Hao Yafeng, et al. Advances in microstructured terahertz modulation techniques[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 455-466. (in Chinese)
- [2] Tian Y X, Dong B Y, Li Y X, et al. Photonics-assisted

THz wireless communication enabled by wide-bandwidth packaged back-illuminated modified uni-traveling-carrier photodiode[J]. Opto-Electronic Science, 2024, 3(7): 230051.

- [3] Li W B, Zeng H X, Huang L, et al. A review of terahertz solid-state electronic/optoelectronic devices and communication systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2025, 34(1): 26-48.
- [4] Huang Y, Shen Y, Wang J. From terahertz imaging to terahertz wireless communications[J]. Engineering, 2023, 22: 106-124.
- [5] Yu C, Fan S T, Sun Y W, et al. The potential of terahertz imaging for cancer diagnosis: a review of investigations to date[J]. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 2012, 2(1): 33-45.
- [6] Malhotra I, Jha K R, Singh G. Terahertz antenna technology for imaging applications: a technical review[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2018, 10(3): 271-290.
- [7] Yang Z B, Tang D Y, Hu J, et al. THz near-field imaging: near-field nanoscopic terahertz imaging of single proteins (small 3/2021)[J]. Small, 2021, 17(3): 2170008.
- [8] Peng Y, Shi C J, Zhu Y M, et al. Terahertz spectroscopy in biomedical field: a review on signal-to-noise ratio improvement[J]. Photonix, 2020, 1: 12.
- [9] Fu X J, Liu Y J, Chen Q, et al. Applications of terahertz spectroscopy in the detection and recognition of substances[J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 869537.
- [10] Zhang T Y, Cheng L, Liu Y F, et al. Non-destructive testing of silicone rubber formulations for composite insulators based on terahertz spectral analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2026, 33(1): 217-226.
- [11] Ikari T, Sasaki Y, Otani C. Development of a two-beam terahertz fmcw walk-through body scanner for seamless security screening[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2025, 15(5): 771-780.
- [12] Guo Z J, Wu H, Luo S J, et al. Hidden dangerous object detection for terahertz body security check images based on adaptive multi-scale decomposition convolution[J]. Signal Processing: Image Communication, 2025, 137: 117323.
- [13] Hossain M A, Hossain M A, Kabir M A, et al. Advanced THz optical sensor for ethanol and benzene detection: a step towards safer industrial and environ-

- mental monitoring [J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2025, 49: 100846.
- [14] Jin Z W, Lou J, Shu F Z, et al. Advances in nanoengineered terahertz technology: generation, modulation, and bio-applications[J]. *Research*, 2025, 8: 562.
- [15] Wang R D, Hao R, Li D X, et al. Multifunctional terahertz biodetection enabled by resonant metasurfaces [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(16): 2418147.
- [16] Duan X L, Han S C, Yuan Y, et al. Application of terahertz spectroscopy and imaging techniques in biomedicine[J]. *iScience*, 2025, 28(12): 113990.
- [17] Watanabe S. Terahertz polarization imaging and its applications[J]. *Photonics*, 2018, 5(4): 58.
- [18] Fan J Y, Chen Y S, Huang J K, et al. Terahertz meta-polarizers for simultaneous control of the amplitude, phase, and polarization [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 168: 110014.
- [19] Li J Q, Zhang L, Zhang M, et al. Wearable conformal metasurfaces for polarization division multiplexing [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8 (13) : 2000068.
- [20] Lü T T, Chen X Y, Dong G H, et al. Dual-band dichroic asymmetric transmission of linearly polarized waves in terahertz chiral metamaterial [J]. *Nanophotonics*, 2018, 9(10): 3235-3242.
- [21] Zhou Q G. Dual-band tunable terahertz linear dichroism metasurface based on photosensitive silicon [J]. *Journal of Applied Physics*, 2025, 138(20): 203104.
- [22] Rong C G, Cai B, Cheng Y Z, et al. Dual-band terahertz chiral metasurface absorber with enhanced circular dichroism based on temperature-tunable InSb for sensing applications[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2024, 26(6): 5579-5588.
- [23] Yang B W, Ouyang M Z, Ren H, et al. A dual-frequency terahertz metasurface capable of distinguishing the handedness of circularly polarized light [J]. *Coatings*, 2022, 12(6): 736.
- [24] Audu E E, Eteng A A, Uchendu I, et al. Equivalent circuit technique for designing split ring resonator based metasurfaces [J]. *Engineering Research Express*, 2024, 6(3): 035362.
- [25] Amin M, Siddiqui O, Farhat M. Linear and circular dichroism in graphene-based reflectors for polarization control[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(2): 024046.
- [26] Tian Y, Yin Z F, Zhao X C, et al. Multi-polarization selective absorber based on terahertz metasurface [J]. *Results in Physics*, 2023, 54: 107134.
- [27] Teber A. Dual-band terahertz metamaterial absorber based on LC resonance and dipolar response and its applications [J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2024, 7(4): 2300918.
- [28] Asgari S, Fabritius T. Multi-band terahertz anisotropic metamaterial absorber composed of graphene-based split square ring resonator array featuring two gaps and a connecting bar[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 7477.
- [29] Zhuang L Y, Liu J T, Jiang Z X, et al. Switchable terahertz chiral metasurface for linear and circular dichroism [J]. *Opt Express*, 2025, 33 (9) : 19282-19294.
- [30] Tao X, Ouyang C M, Qi L M, et al. Terahertz chiral metasurface for dual-band spin-selective absorption with strong circular dichroism [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2023, 13(1): 74-81.
- [31] Wu R L, Li J S. Circular/linear dichroism and anisotropy based on tunable terahertz metasurfaces[J]. *Journal of Computational Electronics*, 2024, 23 (2) : 348-357.