

文章编号: 2095-4980(2025)09-0935-07

基于手性超表面的圆极化复用太赫兹波振幅及波前控制

丁佳跃, 罗莉*, 邹雨欣, 吕媛媛, 陈成, 陈柏宇, 赵世超, 杨嘉琪, 李杰*

(成都信息工程大学 光电工程学院, 四川 成都 610225)

摘要: 圆极化太赫兹波的独立调控是太赫兹技术领域的重要课题, 超表面为其提供了便利的解决方案。本文提出一种基于手性超表面的圆极化太赫兹波振幅及波前控制新方案, 通过手性相位和 P-B 相位的杂化设计实现自旋解耦的功能, 同时 2 个波分量的反射效率均大于 70%。进一步利用超表面单元的旋转对称性破缺改变反射太赫兹波的幅度响应, 实现了波前、幅度的同时操控。分别设计超构反射器、选择性吸收器进行功能验证, 证明了所提方案的有效性。该方案为太赫兹波的多维度准光控制提供了新的技术路线和可能性。

关键词: 超表面; 自旋解耦; 太赫兹波; 混合相位

中图分类号: TN919

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2025158

Wavefront and amplitude control of circularly polarized terahertz waves based on chiral metasurface

DING Jialuo, LUO Li*, ZOU Yuxin, LYU Yuanyuan, CHEN Cheng, CHEN Boyu,
ZHAO Shichao, YANG Jiaqi, LI Jie*

(College of Optoelectronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan 610225, China)

Abstract: Independent manipulation of Circularly-Polarized(CP) terahertz waves is an important topic in the terahertz technology field, and metasurfaces provide a convenient solution for it. A new scheme is proposed for amplitude and wavefront control of Circularly-Polarized terahertz waves based on a chiral metasurface. By hybridizing chiral phase and Pancharatnam-Berry (P-B) phase, spin-decoupled functionality is realized, while the reflection efficiencies of the two wave components are both greater than 70%. Further exploiting of the broken rotational symmetry of the metasurface unit cells changes the amplitude response of the reflected terahertz waves, thereby enabling simultaneous manipulation of wavefront and amplitude. A metasurface reflector and a selective absorber are respectively designed for functional verification, proving the effectiveness of the proposed scheme. The scheme offers a new technical route and possibilities for multi-dimensional quasi-optical control of terahertz waves.

Keywords: metasurfaces; spin decoupling; terahertz waves; hybrid phase

电磁波的多维度操控具有极其重要的意义, 在通信、能量传输、医疗等多个领域都发挥着关键作用^[1], 如, 电磁波是无线通信的基础, 灵活操控电磁波能实现更高效的频谱利用、波束成形等, 从而增强信号传输的方向性和距离, 减少信号衰减和干扰^[2]。对电磁波的操控和利用主要包含信号生成与调制、发射与传输控制、信号接

收稿日期: 2025-05-12; 修回日期: 2025-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12404484); 四川省科技支撑计划(2025ZNSFSC0846; 2022Z091); 成都信息工程大学科研基金资助项目(KYTZ202245); 四川省气象光电传感器技术与应用工程研究中心开放项目(2024GCZX001)

*通信作者: 罗莉 email:rolly80218@163.com; 李杰 email:li_jie_d@tju.edu.cn

引用格式: 丁佳跃, 罗莉, 邹雨欣, 等. 基于手性超表面的圆极化复用太赫兹波振幅及波前控制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025,23(9):935-941. DOI:10.11805/TKYDA2025158.

Citation format: DING Jialuo, LUO Li, ZOU Yuxin, et al. Wavefront and amplitude control of circularly polarized terahertz waves based on chiral metasurface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025,23(9):935-941. DOI:10.11805/TKYDA2025158.

收等环节。无线通信的快速发展使微波、毫米波、太赫兹频段自由空间波束的灵活调控显得愈发重要,如分束、偏折、准直、极化转换、强度衰减等^[3-6]。传统方案中,采用体材料的聚合物或金属器件完成上述电磁功能。超表面作为一种新兴技术,已在平面化、集成化、多功能的电磁器件开发方面崭露头角^[7-11]。它利用亚波长的电磁局域共振或非局域效应,在极小的空间尺度上进行多维度的电磁波幅度、相位、极化、角动量操控^[12-17],具有丰富的物理内涵和全新的技术思想。

太赫兹波作为一种开发较晚的电磁波,近年来正引起人们越来越多的关注^[18]。太赫兹技术与系统在下一代无线通信^[19-21]、生物医学感知^[22-23]、天文观测与大气遥感^[24-25]等领域具有重要的应用前景。随着工作频率的逐渐提高,天线、金属波导、电路型传输线等部件需要更小的尺度,其加工难度和成本也随之提升^[26]。因此,在自由空间中完成更多的波束操控功能是诸多应用场景的首选,太赫兹准光技术应运而生^[27]。特别地,超表面为自由空间传输的太赫兹波束的相位、波前、偏振的高效操控发挥了重要作用,为无线通信、遥感等领域带来了全新的可能^[28-31],如,太赫兹智能反射表面可显著优化信号传输通道,在覆盖增强方面具有重要作用^[32];超表面偏折器可助力于多通道的太赫兹通信^[33-35];超构天线罩可实现高效的太赫兹轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)波束产生^[36]。这些功能的实现都依赖于超原子尺寸决定的共振相位或方位角决定的P-B相位(半波片)。线偏振或圆偏振复用的超构表面可在单个器件上完成偏振依赖的多通道波束赋形及多参数操控,提升器件的集成度^[37-39]。上述2种相位的联合设计可实现正交圆偏振太赫兹波的独立波前调控,但参数扫描计算量较大,且难以进行幅度等其他参量的同时操控。

本文提出一种基于手性超表面的圆偏振太赫兹波前及振幅操控新方案,以手性相位和P-B相位的杂化设计支撑自旋解耦的功能;以反射波束的自旋复用偏折作为展示实例,通过分析手性超原子在参数空间中的演化规律,获得了所需的相位轮廓设计;此外,利用超表面单元的旋转对称性破缺,进一步改变反射波束的幅度响应,实现波前、幅度的同时操控。

1 手性单元设计

提出的手性超表面方案如图1所示。超构反射器由不同尺寸的单元排列组合形成相位梯度,对左旋和右旋圆偏振波形成不同的反射角度。结构1通过参数空间路径积累形成的手性相位外加方位角决定的P-B相位,可在保持振幅几乎一致的同时实现自旋解耦的相位控制。进一步打破结构1二阶旋转对称性(旋转180°后能够与原结构重合)得到结构2,则可利用同时出现的手性相位和圆二色性(Circular Dichroism, CD)联合P-B相位控制反射波的相位和振幅。

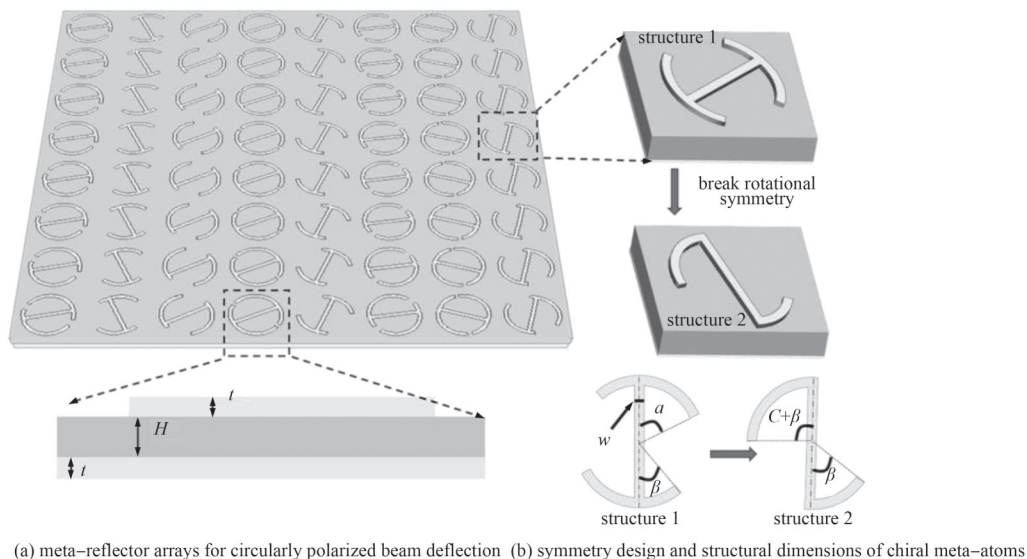


Fig.1 Schematic diagram of the function of a chiral meta-reflector

图1 手性超反射器的功能示意图

2种手性超原子的对称性设计与结构尺寸如图1(b)所示。结构单元周期 $P=180\ \mu\text{m}$,结构上下层均采用 $t=0.2\ \mu\text{m}$ 厚度的金属材料,中间介质层采用高度 $H=35\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺材料,该材料的介电常数 $\epsilon=3.0$,损耗角正切 $\tan\delta=0.03$ 。最上层圆弧的外径 $r_1=70\ \mu\text{m}$,内径 $r_2=60\ \mu\text{m}$,中间竖条的宽度 $w=10\ \mu\text{m}$ 。结构1的左上与右下突出角度为 β ,左下和右上突出角度为 α 。结构2的左上突出角度为 $c+\beta$,右下突出角度为 β 。

2 圆极化波前控制

2.1 超表面反射特性

为验证手性结构 1 对反射的同极化圆偏振太赫兹波的相位和波前调控能力, 选取 $\beta=40^\circ$, $\alpha=25^\circ$ 的单元进行研究。利用商用电磁仿真软件对超表面进行频域求解仿真, 仿真频率设置为 0.5~1.1 THz, x 和 y 方向的边界条件设置为周期边界条件, z 方向的边界条件设置为 open(add space), 通过后处理观测反射波的反射率。超表面单元结构 1 的圆偏振反射率曲线如图 2(a) 所示, 在 0.5~1.1 THz 的频率范围内, 反射的同极化圆偏振波 R_{LL} 和 R_{RR} 的反射率曲线基本重合; 图 2(c) 单元结构的相位随频率的变化情况表明, 在 0.5~1.1 THz 的频率范围内, 单元结构反射的同极化圆偏振相位 φ_{LL} 和 φ_{RR} 存在相位差异。插图展示了 0.8 THz 工作频点下左旋圆偏振(Left-hand Circularly Polarized, LCP)波和右旋圆偏振(Right-hand Circular Polarized, RCP)波入射时各自的局域电场分布情况, 为相位差异提供了直观展示。

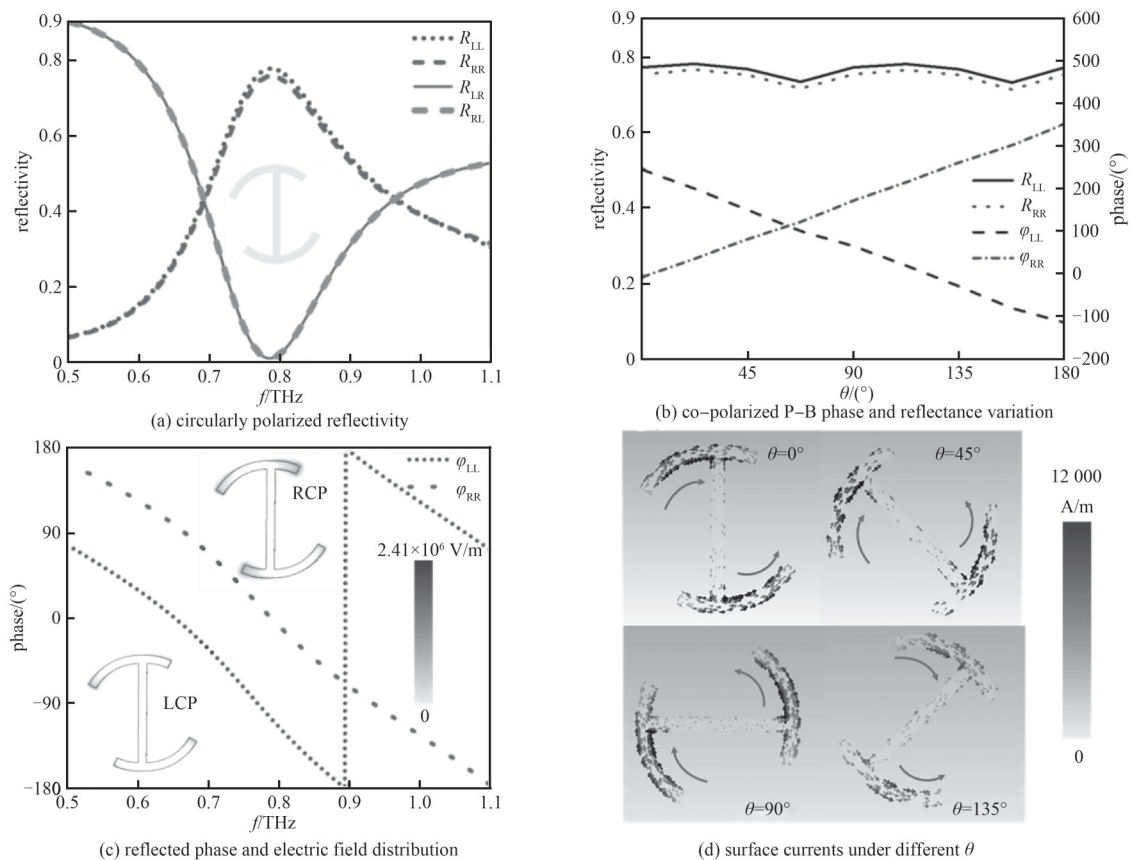


Fig.2 Reflective characteristics of chiral structure 1

图2 手性结构1反射特性

以 22.5° 的间隔, 对上层金属结构进行旋转。在图 2(b) 中, 反射波的反射率 R_{LL} 和 R_{RR} 基本保持不变, 且维持在较高水平。反射太赫兹波的相位 φ_{LL} 和 φ_{RR} 随引入旋转角度 θ 呈现出 $\pm 2\theta$ 的相位变化, 这为我们提供了很好的相位控制途径。图 2(d) 给出上层结构表面电流随旋转角度 θ 的变化情况, 对于入射太赫兹波, 圆弧部分有较强烈的电流分布, 中间竖条电流相对很小, 可以忽略不计。电流被束缚在圆弧上, 以特定的路径流动, 通过旋转结构可以改变电流的流动路径, 进而对同极化波束引入共轭的相位差异。

2.2 自旋解耦参数库构建

在其他设置条件保持不变的情况下, 利用电磁仿真软件对超表面结构执行参数化扫描。 β 以 5° 为步长, α 以 5° 为步长, 由于上下 2 个圆弧的半径相同, 因此 α 和 β 两个突出角度之和不能超过 180° 。圆偏振反射相位在参数空间的分布情况如图 3(a) 所示, 可观察到 β 的改变对 RCP 波的相位 φ_{RR} 产生较大影响, 但对 LCP 波的相位 φ_{LL} 几乎没影响; α 的改变对 LCP 波的相位 φ_{LL} 产生较大影响, 但对 RCP 波的相位 φ_{RR} 几乎没影响。因此, 可通过 β 调节

RCP 波的相位 φ_{RR} , α 调节 LCP 波的相位 φ_{LL} 。圆偏振反射幅度在参数空间的分布情况如图 3(b) 所示, $\beta + \alpha$ 的角度和在 $60 \sim 100^\circ$ 、 $140 \sim 160^\circ$ 产生很强的反射率。在扫描结果中选取 16 个基本单元标注, 如图中所示, 单元相位差距显著且反射幅度 R_{RR} 、 R_{LL} 均保持在 0.7 以上。通过对这 16 个基本单元施加 P-B 相位, 利用手性相位和 P-B 相位得到包含 64 个具有 45° 相位梯度的自旋解耦合单元库。

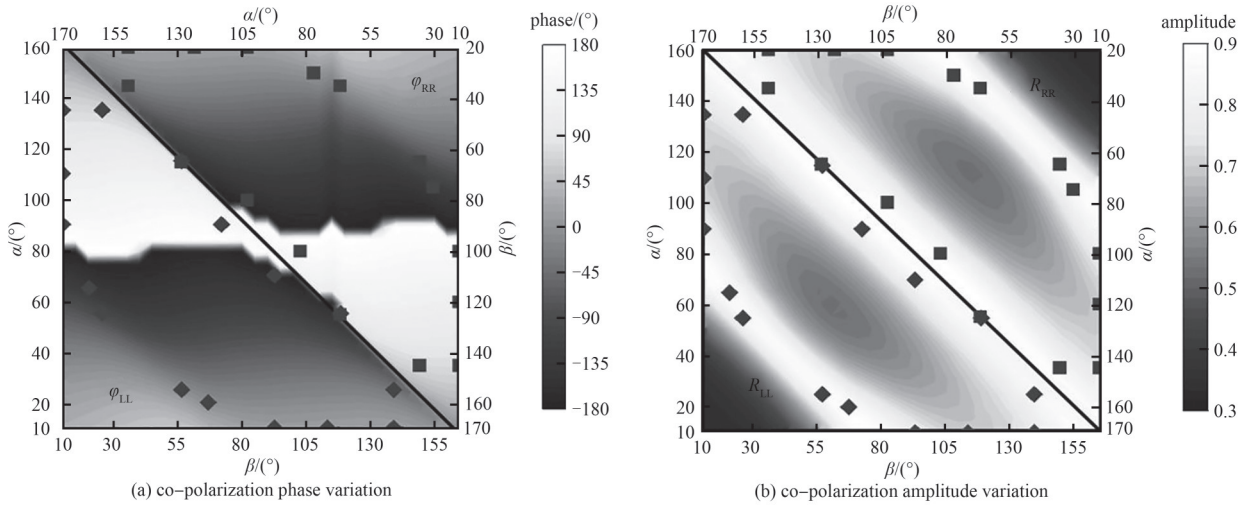


Fig.3 Structure 1
图3 结构 1

2.3 超表面功能验证

为进一步验证结构 1 对反射太赫兹波的自旋解耦相位控制功能, 从相位库中选取结构单元, LCP 波以 90° 为阶梯, RCP 波以 45° 为阶梯, 进行 x 方向的梯度排布, y 方向的重复排布。根据广义斯涅尔定律, 波束的反射角可由式(1)得到:

$$\theta = \arcsin(\lambda/\Gamma) \tag{1}$$

式中: λ 和 Γ 分别为自由空间波长和空间周期; θ 为器件的偏折角度。

对于所设计的超反射器, 将各参数代入式(1)得到 LCP 反射角为 29.4° , RCP 反射角为 19.5° , 远场方向图(图 4)中的结果与理论结果基本一致。

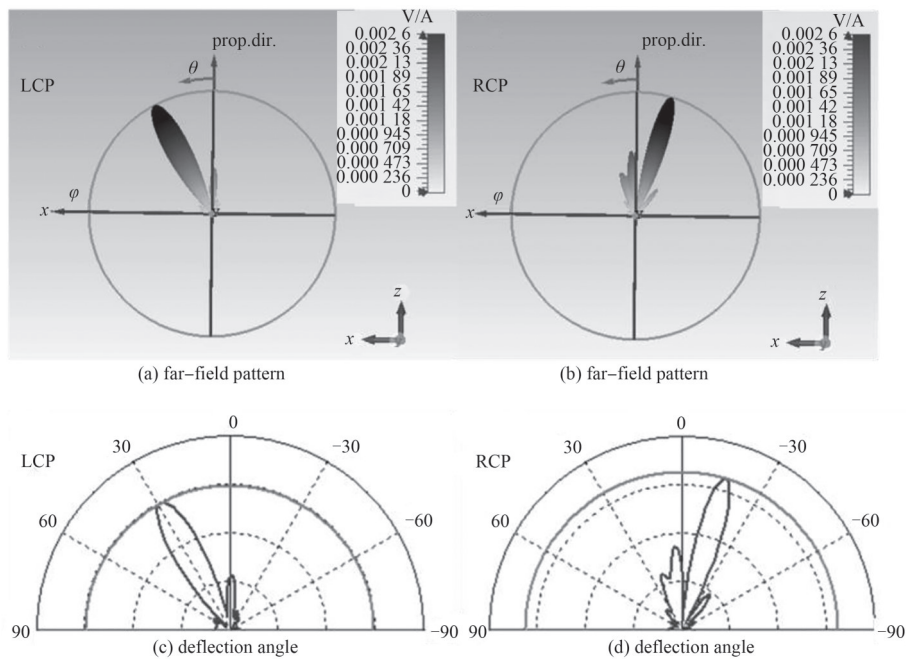


Fig.4 Beam deflection far-field pattern for structure 1
图4 结构 1 波束偏转远场方向图

3 幅度-波前联合控制

为进一步对反射光束的幅度进行调控, 在结构 1 的基础上打破旋转对称性, 得到图 1 中的结构 2。利用电磁仿真软件进行结构的参数扫描, β 、 c 以 5° 为步长, $c+\beta$ 两个突出角度之和不能超过 180° 。图 5(a) 为 $c=35^\circ$, $\beta=70^\circ$ 时的 4 个圆偏振分量在 0.9~1.2 THz 频率范围内的反射率。可以发现, 该结构在 1.08 THz 处表现出明显的圆二色性, CD 值高达 0.632。对该单元结构施加 P-B 相位并微调 β , 使波峰波谷汇聚到一点, 得到图 5(b) 所示的结果。从图 5(b) 中可以观察到, LCP 波相位随旋转角度的改变而变化, 其变化量为角度值的 2 倍, 且结构单元可以高效吸收 RCP 波, 同时反射 LCP 波。对 LCP 波以 45° 为阶梯进行反射光束的偏折, 同时抑制 RCP 波, 在 1.08 THz 处, LCP 波理论偏折角度为 14.3° , 图 5(c)、图 5(e) 所示的 LCP 波偏折角度仿真结果与理论计算基本符合。从图 5(b)、图 5(f) 中可以观察到存在微弱的 RCP 波, 这是由于超单元结构的交叉偏振反射系数 (R_{RL} 和 R_{LR}) 不等于 0, 这些分量不能引起自旋偏振的分离, 于是出现了图中所示的微弱串扰。

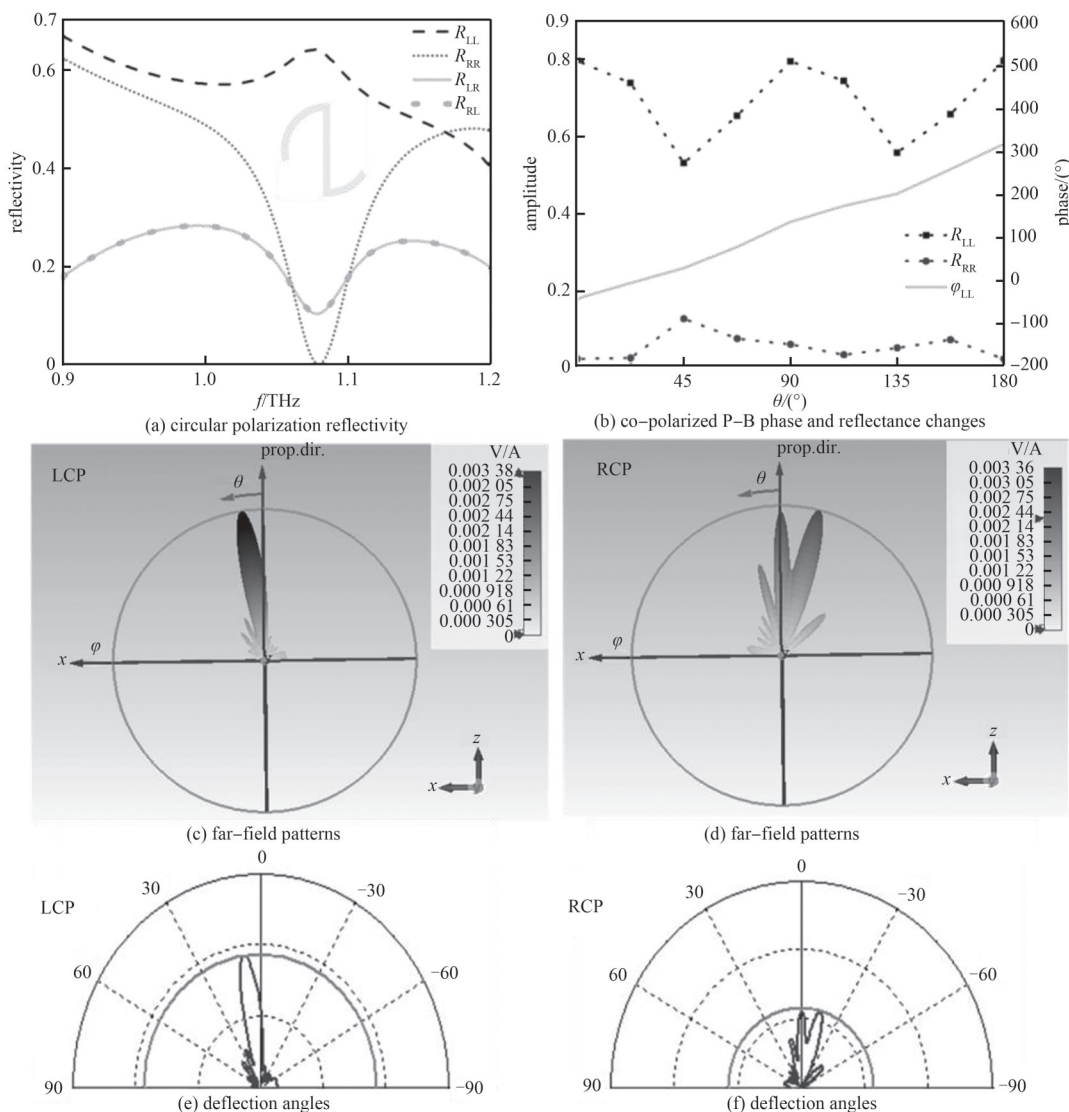


Fig.5 Reflection characteristics of structure 2 and its selection absorption far-field pattern
图5 结构2反射特性及其选择吸收远场方向图

4 结论

本文提出基于手性超表面的圆偏振太赫兹波前操控方案, 利用参数空间路径积累形成的手性相位联合方位角决定的 P-B 相位的杂化设计, 实现了圆偏振太赫兹波的自旋解耦合。通过分析手性超原子在参数空间中的演化规律, 获得所需的相位轮廓设计。引入 P-B 相位后, 实现高效率的正交圆偏振相位控制, 进而设计所需的反

射波前。打破旋转对称性后,手性超原子同时表现出强烈的圆二色性和明显的手性相位,赋予器件对于圆偏振反射波的振幅和相位的控制能力,实现波前、幅度的同时操控。分别分析 2 种手性单元的反射频谱,以及在工作频率处单元特性随旋转角度的变化情况,利用上述结果设计超反射器、选择吸收器进行功能验证。提出的方案和验证结果理清了手性超表面对称性与反射波相位、振幅响应的对应关系,为太赫兹波的多维度准光操控提供了新的技术路径。

参考文献:

- [1] DĂNILĂ O, MĂNĂILĂ-MAXIMEAN D, BĂRAR A, et al. Non-layered gold-silicon and all-for potential mid-infrared sensing applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(16):5600. DOI:10.3390/S21165600.
- [2] KAZUTOSHI K. Photonics-assisted terahertz-wave beam steering and its application in secured wireless communication[J]. *Photonics*, 2021, 9(1):9. DOI:10.3390/PHOTONICS9010009.
- [3] PENG S, SONG A, BAI Y Z, et al. Reconfigurable frequency-selective acoustic coding metasurface for multifunctional wavefront manipulation[J]. *Applied Acoustics*, 2025(235):110658. DOI:10.1016/J.APACOUST.2025.110658.
- [4] JIN Ke, LIU Yongqiang, LIU Xinghong, et al. Research on tunable beam deflection technology based on metasurface[J]. *Optik*, 2025(323):172226. DOI:10.1016/J.IJLEO.2025.172226.
- [5] RANGULA G M, PAUL P, MAJUMDER B, et al. An ultra-broadband polarization conversion metasurface for enhanced stealth and RCS mitigation in MIMO configurations[J]. *AEUE-International Journal of Electronics and Communications*, 2025(196):155793. DOI:10.1016/J.AEUE.2025.155793.
- [6] 王玥, 姚震宇, 崔子健, 等. 基于超表面的超宽带线极化转换特性研究[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(12):4116-4124. (WANG Yue, YAO Zhenyu, CUI Zijian, et al. Research on ultra-wideband linear polarization conversion characteristics based on metasurfaces[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(12):4116-4124.) DOI:10.11999/JEIT220447.
- [7] KIM I, MARTINS J R, JANG J, et al. Nanophotonics for light detection and ranging technology[J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(5):508-524. DOI:10.1038/s41565-021-00895-3.
- [8] FAN Haihao, CAO Qian, LIU Xin, et al. Perfect spatiotemporal optical vortices[J]. *Photonics Research*, 2025, 13(6):1776-1782. DOI:10.1364/PRJ.555236.
- [9] MARTINS RJ, MARINOV E, YOUSSEF MAB, et al. Metasurface-enhanced light detection and ranging technology[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1):5724. DOI:10.48550/arXiv.2204.04208.
- [10] ZHANG Chao, CHENG Jingxuan, ZHANG Jiawei, et al. Multi-bit coding polarization conversion metasurface for RCS reduction[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2025, 67(4):70199. DOI:10.1002/mop.70199.
- [11] KHERADIYA V, PANDEY P G, DESAI A. Metasurface integrated dual polarized all textile antenna for WBAN application[J]. *Physica Scripta*, 2025, 100(3):035536. DOI:10.1088/1402-4896/ADB27E.
- [12] DING Guowen, CHEN Ke, LUO Xinyao, et al. Dual-helicity decoupled coding metasurface for independent spin-to-orbital angular momentum conversion[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4):044043. DOI:10.1103/PhysRevApplied.11.044043.
- [13] GUO Wenlong, WANG Guangming, JI Wenye, et al. Broadband spin-decoupled metasurface for dual-circularly polarized reflector antenna design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(5):3534-3543. DOI:10.1109/TAP.2020.2963945.
- [14] KITA S, TAKATA K, ONO M, et al. Coherent control of high efficiency metasurface beam deflectors with a back partial reflector[J]. *APL Photonics*, 2017, 2(4):046104. DOI:10.1063/1.4978662.
- [15] GAO Zhanjie, ZHAO Wannian, GAO Xinyue, et al. Broadband full polarization control using a staggered arrangement of metamolecules[J]. *Nano Letters*, 2025, 25(14):5565-5571. DOI:10.1021/ACS.NANOLETT.4C05273.
- [16] CHEN Shu, ZENG Qingji, WU Haisheng, et al. Off-axis dispersion-managed metasurface for routing orbital angular momentum mode and wavelength multiplexing channels[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2025(93):46-55. DOI:10.1016/J.CJPH.2024.11.011.
- [17] WANG Yue, YAO Zhenyu, CUI Zijian, et al. Orbital angular momentum multiplexing holography based on multiple polarization channel metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(23):4339-4349. DOI:10.1515/nanoph-2023-0550.
- [18] MENEZES D B, REYER A, YÜKSEL A, et al. Introduction to Terahertz Raman spectroscopy[J]. *Spectroscopy Letters*, 2018, 51(8):438-445. DOI:10.1080/00387010.2018.1501704.
- [19] JBARI M E, MOUSSAOUI M. RT-SVM: channel modeling and analysis for indoor terahertz communication scenarios[J]. *Nano Communication Networks*, 2025(43):100551. DOI:10.1016/J.NANCOM.2024.100551.
- [20] LANGDE P, JAIN K T, PARATE M, et al. A journey of terahertz communication: an IRS integration perspective[J]. *Physical Communication*, 2025(68):102572. DOI:10.1016/j.phycom.2024.102572.

- [21] 何俊岩,赖海光,赵鑫杰,等. 智能超表面辅助低轨卫星通信技术综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024,22(3):240–248. (HE Junyan, LAI Haiguang, ZHAO Xinjie, et al. Overview of reconfigurable intelligent surface for low earth orbit satellite communication[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024,22(3):240–248.) DOI:10.11805/TKYDA2023419.
- [22] XIN Shanshan, LUO Siyuan, LUO Yi, et al. Dual-band flexible plasmonic metasensors for ultrasensitive terahertz biomedical sensing[J]. Sensors and Actuators:B.Chemical, 2025(432):137480. DOI:10.1016/J.SNB.2025.137480.
- [23] BANERJEE S, NATH U, DUTTA P, et al. A theoretical terahertz metamaterial absorber structure with a high quality factor using two circular ring resonators for biomedical sensing[J]. Inventions, 2021,6(4):78. DOI:10.3390/INVENTIONS6040078.
- [24] HOU Mingdong, ZHU Yutong, SHENG Siyang, et al. Rapid calculation of atmospheric molecular absorption characteristics in the terahertz band based on wideband K-distribution method[J]. Infrared Physics and Technology, 2023(134):104911. DOI:10.1016/J.INFRARED.2023.104911.
- [25] MA Jianjun, SONG Yuheng, ZHANG Mingxia, et al. Terahertz channels in atmospheric conditions: propagation characteristics and security performance[J]. Fundamental Research, 2025,5(2):526–555. DOI:10.1016/J.FMRE.2024.09.012.
- [26] ZHANG Xiaojun, WANG Yue, CUI Zijian, et al. Design, fabrication, and sensing applications of MWCNT/PET terahertz metasurface[J]. Optics and Laser Technology, 2024(170):110204. DOI:10.1016/J.OPTLASTEC.2023.110204.
- [27] XIAO Dongyang, WANG Qian, WANG Zhaosong, et al. Real-time THz beam profiling and monitoring via flexible vertically aligned carbon nanotube arrays[J]. Advanced Optical Materials, 2022,10(21):220136. DOI:10.1002/ADOM.202201363.
- [28] YAGI Y, SASAKI H, YAMADA T, et al. 200 Gb/s wireless transmission using dual-polarized OAM-MIMO multiplexing with uniform circular array on 28 GHz band[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021,20(5):833–837. DOI:10.1109/LAWP.2021.3065098.
- [29] SU Xinzhou, ZHOU Huibin, ZOU Kaiheng, et al. Demonstration of 8-channel 32-Gbit/s QPSK wireless communications at 0.28–0.33 THz using 2-frequency, 2-polarization, and 2-mode multiplexing[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition(OFC). San Francisco, CA, USA: IEEE, 2021:1–3.
- [30] AHMAD M, LI J N, MA H W, et al. Ultrathin metasurface for super multi-view 3D display with linear and circular polarization control[J]. Displays, 2024(85):102848. DOI:10.1016/J.DISPLA.2024.102848.
- [31] ZHANG Ying, ZHOU Xingtong, LI You, et al. Silicon-assisted multifunctional metasurface for broadband absorption, polarization conversion and wavefront manipulation in the terahertz region[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2024(184):108783. DOI:10.1016/J.MSSP.2024.108783.
- [32] CHEN Kai, SONG Wenju, LI Zhaolin, et al. Chalcogenide phase-change material advances programmable terahertz metamaterials: a non-volatile perspective for reconfigurable intelligent surfaces[J]. Nanophotonics, 2024, 13(12): 2101–2105. DOI: 10.1515/NANOPH-2023-0645.
- [33] LI Nan, ZHENG Shilie, YANG Hang, et al. A broadband dual-polarized reflective metasurface for THz OAM communication[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2024,72(2):1302–1311. DOI:10.1109/TMTT.2023.3300193.
- [34] LI Nan, ZHENG Shilie, HE Tong, et al. A broadband transmissive metasurface for non-diffractive THz OAM multiplexing and communication[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2024,72(3):2161–2170. DOI:10.1109/TAP.2024.3362374.
- [35] ELLOUZI C, AGHDASI F, ZABIHI A, et al. Versatile standing wave generation between arbitrarily oriented surfaces using acoustic metasurface deflectors and retroreflectors[J]. Advanced Intelligent Systems, 2024, 7(3): 2400474. DOI: 10.1002/aisy.202400474.
- [36] WU Gengbo, CHAN Kafai, QU Shiwei, et al. Orbital Angular Momentum(OAM) mode-reconfigurable discrete dielectric lens operating at 300 GHz[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020,10(5):1. DOI:10.1109/tthz.2020.2984451.
- [37] LI Jie, LU Xueguang, LI Hui, et al. Racemic dielectric metasurfaces for arbitrary terahertz polarization rotation and wavefront manipulation[J]. Opto-Electronic Advances, 2024,7(10):43–53. DOI:10.29026/oea.2024.240075.
- [38] CHENG J R, INAMPUDI S, MOSALLAEI H. Optimization-based dielectric metasurfaces for angle-selective multifunctional beam deflection[J]. Scientific Reports, 2017,7(1–4):12228. DOI:10.1038/s41598-017-12541-x.
- [39] LI Zhancheng, LIU Wenwei, CHENG Hua, et al. Spin-selective full-dimensional manipulation of optical waves with chiral mirror[J]. Advanced Materials, 2020,32(26):e1907983. DOI:10.1002/adma.201907983.