

双频太赫兹圆极化吸波与异常反射手性超表面

张 航^{1,2,3}, 董 琳^{1,2}, 汤鹏程^{1,2}, 张庆乐^{1,2,4}, 孙厚军^{1,2}, 司黎明^{1,2,3}

(1. 北京理工大学集成电路与电子学院, 北京 100081; 2. 毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室, 北京 100081;
3. 北京理工大学长三角研究院, 浙江嘉兴 314019; 4. 香港城市大学太赫兹及毫米波国家重点实验室, 香港 999077)

摘 要: 本文提出了一种工作在太赫兹频段的双频圆极化手性吸波和异常反射手性超表面, 通过合理组合两种手性结构, 实现在两个频段相互独立的圆极化手性吸收和异常角度的圆极化转换功能. 该双频太赫兹手性超表面在 2.53 THz 处对左旋圆极化波的吸收率为 96.3%, 对右旋圆极化波实现同极化的反射; 在 3.43 THz 处对右旋圆极化波的吸收率为 90.9%, 而对左旋圆极化波表现为同极化反射功能. 本文进一步通过连续旋转单元图案引入几何相位, 实现了 2π 反射相位全覆盖. 组阵后的手性超表面在两个工作频段各自吸收特定旋向的圆极化波, 而对正交极化的圆极化波分别发生约 $\pm 20^\circ$ 的保手性异常反射. 这种基于手性超表面的双频太赫兹多功能器件有望应用于电磁能量收集、极化转换器、手性传感等领域.

关键词: 太赫兹; 手性超表面; 圆二色性; 超材料吸波器; 异常反射

基金项目: 国家重点研发计划(No.2022YFF0604801); 国家自然科学基金(No.62271056, No.61527805); 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金(No.L222042)

中图分类号: TN8

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)10-2690-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221118

Dual-Band Terahertz Chiral Metasurface with Circularly Polarized Absorbing and Anomalous Reflecting

ZHANG Hang^{1,2,3}, DONG Lin^{1,2}, TANG Peng-cheng^{1,2}, ZHANG Qing-le^{1,2,4}, SUN Hou-jun^{1,2}, SI Li-ming^{1,2,3}

(1. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Beijing 100081, China;

3. Yangtze Delta Region Academy, Beijing Institute of Technology, Jiaxing, Zhejiang 314019, China;

4. State Key Laboratory of Terahertz and Millimeter Waves, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Based on the theory of Jones matrix and the principle of Pancharatnam-Berry phase, a dual-band terahertz circularly-polarized (CP) absorbing and anomalous reflecting chiral metasurface is proposed in this paper. The CP chiral absorption and conversion function with anomalous reflection angles are realized independently in the two frequency bands. The metasurface unit consists of a combination of two chiral structures, which has an absorption rate of 96.3% for the incident left-hand circularly polarized (LHCP) waves, and realizes co-polarized reflection for the incident right-handed circularly polarized (RHCP) waves at a low frequency of 2.53 THz; meanwhile, the co-polarized reflection will be achieved for the LHCP waves at a high frequency of 3.43 THz, and the absorption rate of the RHCP waves is 90.9%. According to the principle of Pancharatnam-Berry phase, the full coverage of the 360° reflection phase can be realized by rotating the chiral metasurface unit. This chiral metasurface array can absorb the incident CP waves with specific handedness at two operating frequencies (low frequency 2.53 THz and high frequency 3.43 THz), and generate the handedness-preserving anomalous reflections with -26° and $+19^\circ$ angles for the corresponding orthogonal CP waves, respectively. This terahertz multi-function beam control device based on the chiral metasurface has numerous potential in electromagnetic energy harvesting, polarization converters, chiral sensing, radar and other fields.

Key words: Terahertz; chiral metasurface; circular dichroism; metamaterial absorber; anomalous reflection

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2022YFF0604801); National Natural Science Foundation of China (No.62271056, No.61527805); Beijing Natural Science Foundation of China (No.L222042)

1 引言

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 区间范围内的电磁波,在 6G 通信、安全监测、无损检测和空间态势感知等方面具有巨大的应用潜力^[1]. 太赫兹波处于电子学和光子学之间的过渡区,由于自然界材料很难产生有效太赫兹响应,太赫兹功能器件的发展受到限制,形成了电磁频谱中的“太赫兹空白”^[2]. 超表面是一种将亚波长人工电磁结构单元通过一定规则排列而成的二维超材料,对电磁波具有独特的电磁特性调控能力^[3],可实现吸波^[4-6]、超透镜^[7,8]、非对称传输^[9,10]、极化转换^[11]、涡旋波^[12]等多种电磁调控功能. 超材料与太赫兹技术的交叉融合,为太赫兹技术瓶颈的解决提供了一个重要途径.

手性是一种广泛存在于 DNA 双螺旋分子和蛋白质等结构中的几何特性^[13]. 在电磁领域,手性结构可以对左旋圆极化(Left-handed Circularly-Polarized, LCP)和右旋圆极化(Right-handed Circularly-Polarized, RCP)电磁波产生不同的响应,可以产生圆二色性(Circular Dichroism, CD)^[14]和圆双折射旋光效应^[15]. 人工设计而成的超材料/超表面,可以实现远大于自然界材料的手性效应^[16]. 手性超材料/超表面在电磁波幅相调控和极化转换中得到了相关应用. 有学者提出使用手性超表面来吸收圆极化波^[17],当 LCP/RCP 波入射到手性超表面时,仅高效吸收其中一种电磁波,反射或透射正交极化的电磁波,表现为圆二色性^[18-21]. Capasso 等人提出广义斯涅耳定律^[22],为相位调控超表面的设计奠定了理论基础. 通过谐振型相位单元^[23]和几何(Pancharatnam-Berry)相位单元^[24],电磁波异常反射和异常折射的电磁调控得以实现. 其中,几何相位是超表面调控太赫兹圆极化波的一种重要手段,通过旋转单元,能使反射或透射的圆极化波产生 2 倍旋转角度的相位差,从而实现圆极化波的异常反射或透射^[25,26]. 目前,太赫兹手性超表面的设计主要为单一功能或者单一频段,对太赫兹多频段多功能手性超表面的研究还有待深入.

本文提出了一种双频太赫兹圆极化吸波与异常反射手性超表面,能够根据圆极化波的旋向调控其幅度和相位,实现圆极化吸波和异常反射的双功能集成. 该超表面在低频 2.53 THz 处能够吸收 LCP 的入射波,同时以 -26° 的角度异常反射 RCP 的入射波并保持其手性;在高频 3.43 THz 处吸收 RCP 的入射波,且以 $+19^\circ$ 的角度异常反射 LCP 的入射波并保持其手性. 本文设计的超表面阵列结构简单,易于集成,在太赫兹电磁能量收集、极化转换器、手性传感、雷达等领域有较大的应用潜力.

2 理论分析

本文提出的双频太赫兹圆极化吸波与异常反射手

性超表面阵列,可实现双频段的圆极化波幅度、相位、极化的调控,功能如图 1(a)所示. 在太赫兹低频 2.53 THz 和 3.43 THz 处,分别吸收 LCP 和 RCP 的入射波,并对两个太赫兹频段的正交圆极化波(低频和高频处)分别实现 -26° 和 $+19^\circ$ 的保手性异常反射. 图 1(b)为超表面单元结构的俯视图和侧视图.

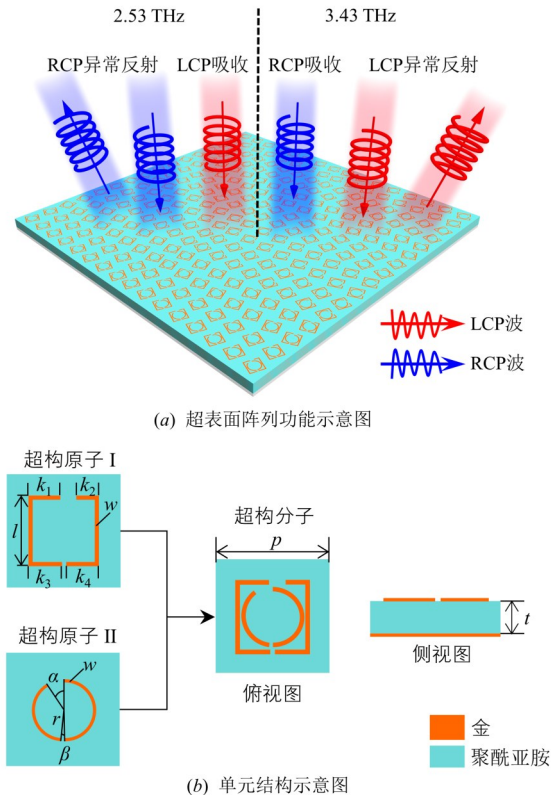


图1 双频太赫兹圆极化吸波与异常反射手性超表面阵列功能和单元结构示意图

单元为金属-介质-金属的“三明治”结构,顶层图案与地板材质采用电导率为 $4.56 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ 、厚度为 200 nm 的金,中介质层采用介电常数为 3.5、损耗角正切为 0.002 7 的聚酰亚胺^[27]. 单元可视为由周期都为 p 的超构原子 I 和超构原子 II 组合而成的超构分子. 其中,超构原子 I 是一个上、下不对称开口的手性矩形谐振环;超构原子 II 是一个上、下不同角度开口的手性圆形谐振环. 嵌套组成的超构分子是一个既没有旋转对称,也没有镜像对称的二维手性结构. 单元尺寸参数的具体数值如表 1 所示.

根据旋向选择吸波与反射理论^[28],二维手性超表面单元可用琼斯矩阵分析圆二色性.

在笛卡尔坐标系下,线极化电磁波入射电场和反射电场的关系可表示为

表 1 单元尺寸参数

参数名称	数值
p	33.5 μm
w	1.2 μm
l	21 μm
k_1	9 μm
k_2	5.5 μm
k_3	10 μm
k_4	10 μm
r	9 μm
α	30°
β	5°
t	10.5 μm

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_R^x \\ \mathbf{E}_R^y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_I^x \\ \mathbf{E}_I^y \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} \mathbf{E}_I^x \\ \mathbf{E}_I^y \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, \mathbf{E}_R 和 \mathbf{E}_I 分别代表反射电场和入射电场; r 代表反射系数, 其上、下标 x 和 y 表示线极化方向; \mathbf{R} 为由反射系数组成的反射矩阵. 通过矩阵变换, 将线极化基反射矩阵 \mathbf{R} 变为圆极化基反射矩阵 \mathbf{R}_{circ} :

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{\text{circ}} &= \begin{pmatrix} r_{LR} & r_{LL} \\ r_{RR} & r_{RL} \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{A}^{-1} \mathbf{R} \mathbf{A} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_{xx} + r_{yy} + i(r_{xy} - r_{yx}) & r_{xx} - r_{yy} - i(r_{xy} + r_{yx}) \\ r_{xx} - r_{yy} + i(r_{xy} + r_{yx}) & r_{xx} + r_{yy} - i(r_{xy} - r_{yx}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 变换矩阵 $\mathbf{A} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ i & -i \end{pmatrix}$, r_{LL} 和 r_{RR} 为单元的共极化反射系数, r_{RL} 、 r_{LR} 为交叉极化反射系数, 其下标“L”和“R”分别表示沿波矢方向看去的左旋圆极化(LCP)和右旋圆极化(RCP).

由于底层金属的存在, 单元的吸波性能仅与反射场有关, 考虑手性单元的交叉极化, 单元的左旋吸波率 A_{LCP} 和右旋吸波率 A_{RCP} 可表示为

$$A_{\text{LCP}} = 1 - |r_{LL}|^2 - |r_{RL}|^2 \quad (3)$$

$$A_{\text{RCP}} = 1 - |r_{RR}|^2 - |r_{LR}|^2 \quad (4)$$

式(3)和式(4)表明, 实现高效吸波的关键在于同时使共极化和交叉极化反射系数接近于0.

衡量超表面单元对左、右旋波吸收差异的圆二色性 CD 定义为

$$\text{CD} = A_{\text{LCP}} - A_{\text{RCP}} \quad (5)$$

CD 的取值可正可负, 分别表示对 LCP 波或 RCP 波的旋向选择性吸收.

3 单元圆极化吸波性能分析

使用全波仿真软件 CST Microwave Studio 对超构原子 I、超构原子 II 和超构分子进行分析, 主要获得这些手性单元结构的反射系数、吸波率和圆二色性等特性

参数. 分别利用垂直入射的左、右旋圆极化电磁波进行激励, 3 种结构的反射系数、吸波率和圆二色性仿真计算结果如图 2 所示. 图 2(a)和(b)的结果显示, 超构原子 I 能够在 2.59 THz 处高效吸收 LCP 波, 同时反射 RCP 波且保持其手性不变, LCP 波的吸收率达到 99.3%, 而 RCP 波的吸收率仅为 8.6%, 圆二色性达到 0.9. 这是因为超构原子 I 能够在 2.4~3.8 THz 频段内, 实现低于 0.3 的交叉极化反射, 以及高于 0.9 的共极化反射, 同时在 2.59 THz 处产生谐振, 使 r_{LL} 接近于 0. 图 2(c)和(d)的结果显示, 超构原子 II 在 3.49 THz 处, 对 RCP 波的吸收率为 54.6%, 对 LCP 的吸收率为 17.1%, 圆二色性为 -0.37. 超构原子 I 在较宽频段内优异的交叉极化抑制性能, 为拓展第二个手性谐振点提供了空间. 合理优化超构原子 II 的特征尺寸, 可使其手性谐振频点恰好在超构原子 I 交叉极化抑制最强的频点附近, 从而实现双频圆二色性复合. 图 2(e)和(f)显示了复合后的超构分子性能, 超构分子在 2.53 THz 和 3.43 THz 两个频率下, 分别对 LCP 波和 RCP 波具有强手性吸收的表现, 同时对另一旋向的圆极化波能够实现高效保持手性反射. 2.53 THz 时, 超构分子对 LCP 波的吸收率为 96.3%, 对 RCP 波的吸收率仅为 11.2%, 圆二色性达 0.85; 3.43 THz 时, 超构分子对 LCP 波的吸收率为 14.1%, 对 RCP 波的吸收率为 90.9%, 圆二色性为 -0.77. 也就是说, 超构分子在两个频段实现了相反的强圆二色性. 通过观察可发现, 超构分子的两个手性谐振频点, 分别与超构原子 I 和超构原子 II 的手性谐振点接近.

图 2 的仿真结果表明, 集成两种手性谐振环的设计方案, 能够在继承超构原子 I 低频强圆二色性的同时, 改善超构原子 II 的高频手性谐振响应. 其原因为, 在手性圆环外侧引入手性矩形环, 能够显著增强结构的手性特征, 并且使相邻金属结构之间的耦合效应得到加强.

为了进一步研究超构分子单元手性吸波的物理机理, 对 2.53 THz 和 3.43 THz 处超构分子单元的表面电流分布进行仿真. 图 3 为单元在 LCP/RCP 波正入射时, 两个谐振点处的表面电流分布情况.

如图 3(a)和(b)所示, 在 2.53 THz 时, LCP 波将在矩形环的两侧激发出一对幅度近似相等的反向平行电流, 这对电流振荡形成环形磁偶极子, 产生了垂直于超表面单元的磁矩, 这种磁偶极子模式会在单元表面束缚电磁能量, 使电磁能量通过金属的欧姆损耗效应和聚酰亚胺介质的吸收效应而被耗散, 从而实现 LCP 波的吸收; 而 RCP 波激发的是弱电流, 因此 RCP 波能够被高效反射. 图 3(c)和(d)的结果显示, 在 3.43 THz 时, RCP 波将在矩形环和圆形环的右侧激发一对强烈的流向相反的电, 其形成的环形磁偶极子也能实现对

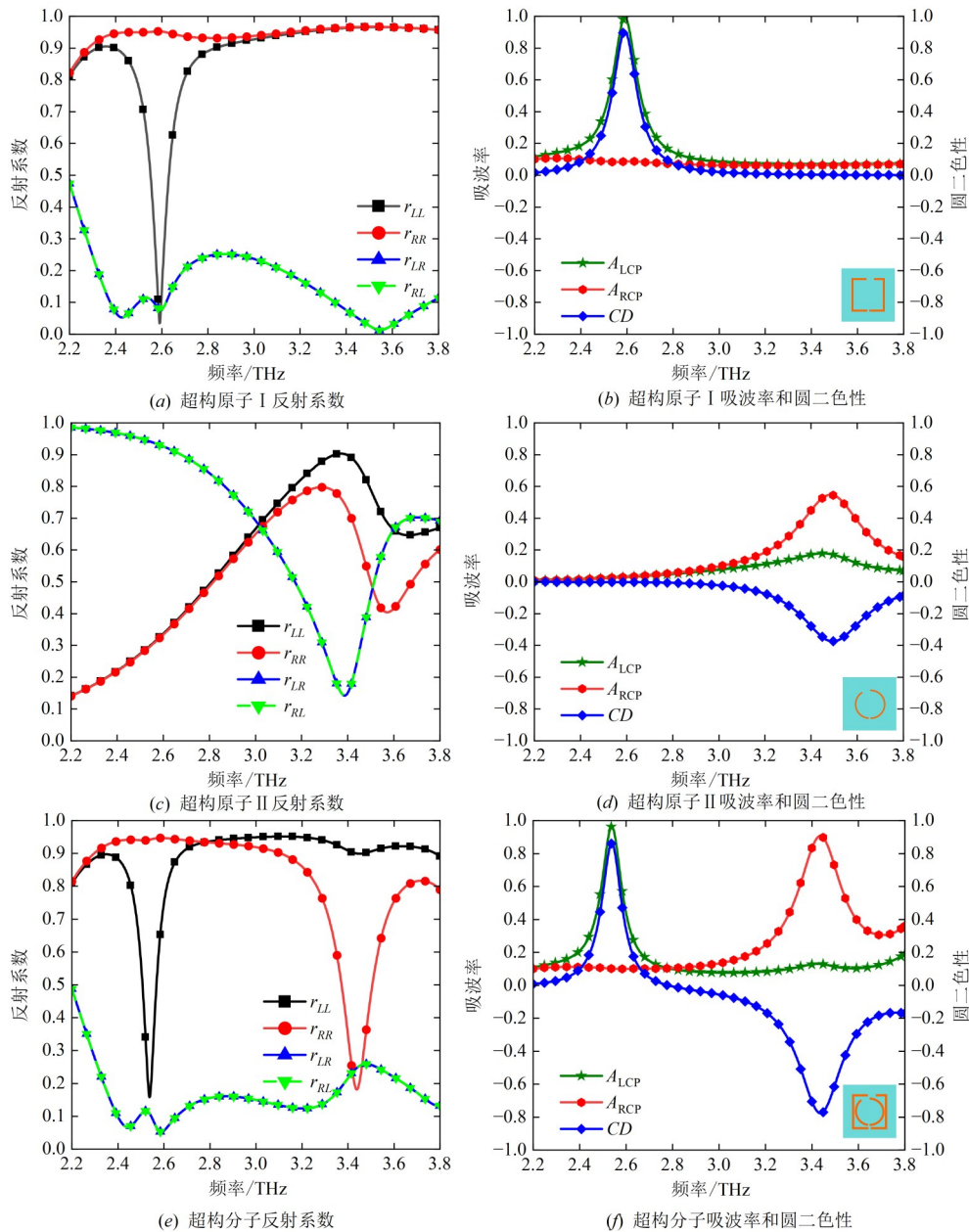


图2 单元反射系数、吸波率和圆二色性仿真结果

RCP波的强吸收,而LCP波只能激发微弱表面电流,因此被高效反射.

超表面单元的结构参数对圆二色性的影响如图4所示.根据对图2和图3结果的分析,分别调整超构原子 I 和超构原子 II 的特征尺寸,可以实现对低频和高频圆二色性工作频点的独立操纵.图4(a)的结果显示,当尺寸参数 k_1 在 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 范围内变化时,超构分子在低频的圆二色性始终保持高于0.6的强圆二色性特征,低频手性谐振频点可在 $2.48\sim 2.58\ \text{THz}$ 范围内进行调整,单元的高频圆二色性几乎不受尺寸参数 k_1 的影响.图4(b)的结果显示,当尺寸参数 β 从 5° 增大至 17° 时,超构

分子的高频手性谐振频点可在 $3.43\sim 3.76\ \text{THz}$ 范围内进行调整,并始终保持高于 -0.7 的强圆二色性,单元的低频圆二色性几乎不受尺寸参数 β 的影响.另外,根据麦克斯韦方程组的可扩展性,还可以应用缩比法则增大或减小单元的结构尺寸,同时调控两个手性谐振点向更大范围频谱拓展.

图5为不同入射角 θ 下超表面单元的LCP吸收率和RCP吸收率.因为所设计的超表面单元是各向异性结构,在不同方位角斜入射时的情况会有不同,因此本文分别研究了波矢被限制在 xOz 平面和 yOz 平面时的两种斜入射情况.当波矢限制在 xOz 平面时,从图5(a)

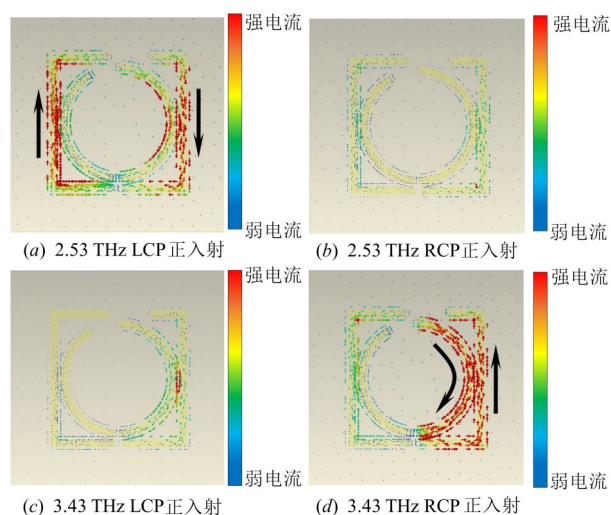


图3 超构分子单元表面电流分布

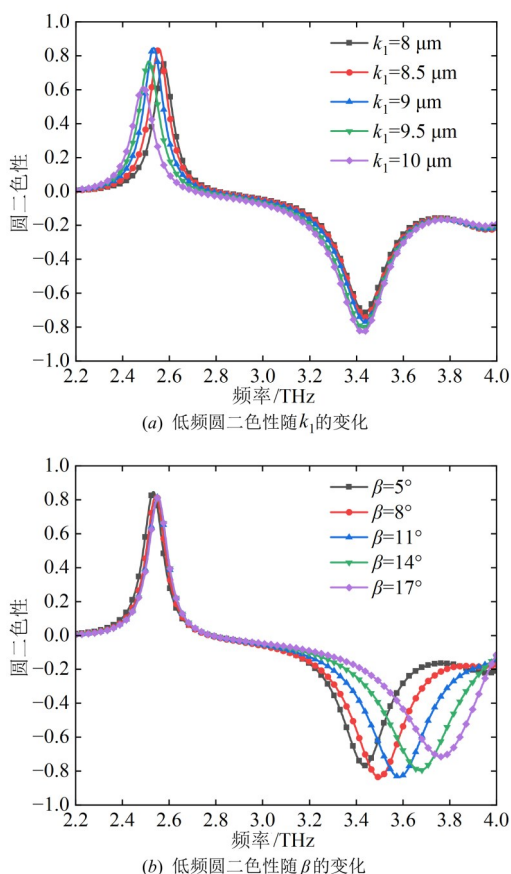


图4 超构分子单元结构参数对双频圆二色性的影响

中可以看出,随着入射角 θ 增大至 45° 时,单元对LCP波的吸收率保持在74.4%,伴随有轻微的蓝移现象;而图5(b)中,RCP吸收峰随入射角 θ 的增大几乎不发生变化,并且在 θ 增大至 45° 时仍具有83.9%的RCP吸收率.当波矢限制在 yOz 平面时,图5(c)的结果显示,

入射角 θ 增大至 45° 时,单元对LCP波的吸收率为76.1%;图5(d)的结果则显示RCP吸收峰随入射角 θ 增大至 45° 时,单元对RCP的吸收率大于80.1%.

需要注意的是,在波矢限制在 $x-z$ 平面的情况下, θ 接近 45° 时该单元会在2.6 THz附近产生一条近似28%的RCP吸收带.这条RCP吸收带所处的频点与LCP吸收带频率相近,会影响单元在这种斜入射情况下的圆二色性,图6(a)直观地显示了这种影响.随着 $x-z$ 平面内的入射角 θ 的增大,单元在2.53 THz处的圆二色性减弱并发生蓝移, $\theta=45^\circ$ 时圆二色性将降低至0.45.而单元在3.43 THz附近的圆二色性受入射角的影响较小,工作频点几乎不会发生偏移,且当 $\theta=45^\circ$ 时仍具有-0.72的强圆二色性.而当波矢被限制在 yOz 平面时,与第一种斜入射情况相比,单元结构的不对称程度有更大的降低,因此圆二色性的性能恶化较为严重.图6(b)的结果显示,当 yOz 平面内的入射角 θ 增大至 45° 时,单元的双频圆二色性将分别降至0.42和-0.51.因此,这种斜入射情况下结构的旋向选择吸收性能并不稳定,在实际应用中需要注意这一问题.

图7为单元圆二色性随着 φ 和仿真频率的变化关系,插图为图案旋转角 φ 的示意.随着 φ 的增大,单元仍能保持在两个频点具有相反强圆二色性的特点.负责低频圆二色性的外部矩形环结构与相邻单元的耦合较强,正圆二色性的工作频点在2.53~2.65 THz范围内随 φ 呈周期性波动;负责高频负圆二色性的内部圆环结构与相邻单元的耦合非常小,因此对于任何旋转角度 φ ,单元都能在3.43 THz处维持-0.77的强圆二色性.

4 圆极化吸波与异常反射手性超表面阵列设计

几何相位超表面产生的附加相移只受单元旋转角度的控制,其附加相移一般为单元旋转角的二倍,这种相位调控方法理论上具有宽频带的特性^[29],因此整体旋转单元图案能够实现双频反射相位的同时调控.为克服单元旋转时正圆二色性的工作频点周期性变化的特点,本文选取了 φ 分别为 $22.5^\circ, 67.5^\circ, 112.5^\circ$ 和 157.5° 的4种单元单独进行仿真验证.4种单元的共极化反射系数的相位和幅度如图8所示.在2.53 THz和3.43 THz两个谐振点处,随着旋转角度的增加,4种单元的反射相位出现了断层,这是因为单元在谐振点处的手性吸波特性和相位变化模糊.在非谐振频率处,LCP波的反射相位随旋转角度的增大逐渐减小,RCP波的反射相位随旋转角度的增大逐渐增大,其相位变化趋势恰好相反,并且都能实现接近 360° 的相位全覆盖.进一步观察还可发现,相邻单元的反射相位差绝对值约为 90° ,恰好是旋转角度增量 45° 的2倍,并且这种相位变化是无

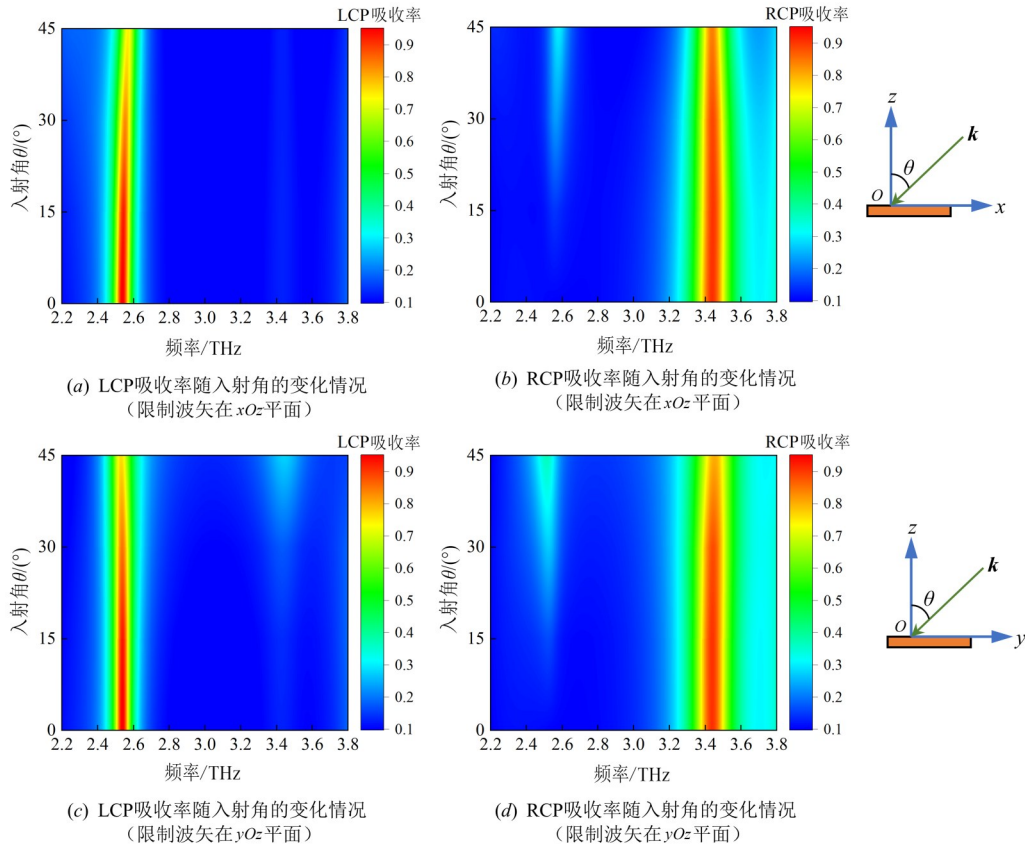


图5 两种不同方位角斜入射下单元的吸波率

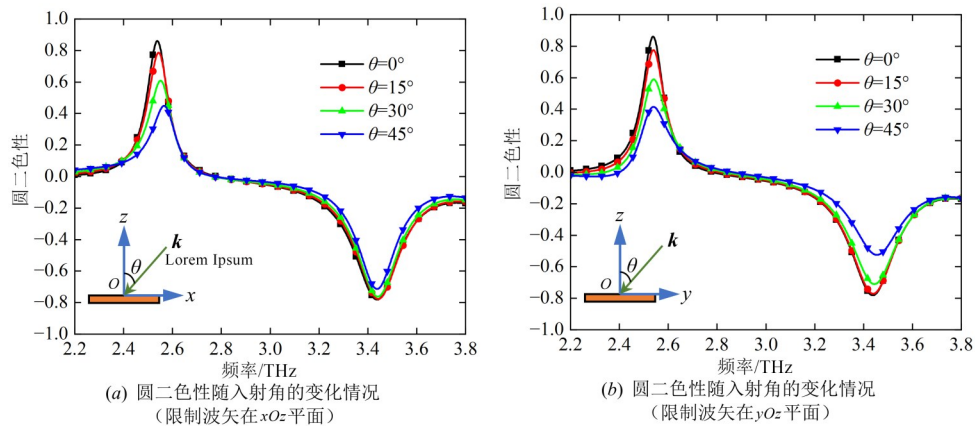


图6 两种不同方位角斜入射情况下超表面单元的圆二色性

色散的,符合几何相位理论.而观察反射系数的幅度可知,4种单元的共极化反射幅度在2.2~3.8 THz的宽频段内基本保持一致,在非谐振点处具有较高的反射幅度.基于这一出色的反射系数无色散性能,这4种超构分子单元能够用于设计圆极化吸波与异常反射超表面阵列.

对于上述4种反射相位相差90°的超构分子单元,可以用数字编码代表其相位响应,以设计合理的编码策略^[30,31].本文以数字“0”“1”“2”“3”表示这4种单元,

使用反射相位梯度排布的编码策略构建了一款2 bit强圆二色性的圆极化幅相调控超表面,以期同时实现双频圆极化手性吸波、圆极化转换和异常反射三种功能,超表面编码排布策略如图9(a)所示.在x方向,4种单元以“00112233”编码方式构成一个周期 $L=8 \times p$ 的超构晶胞,并在x方向以周期L延拓;在y方向,超构晶胞以周期p延拓.最终构建的16×16超表面阵列如图9(b)所示.

具备梯度相位的超表面能够改变电磁波的反射方

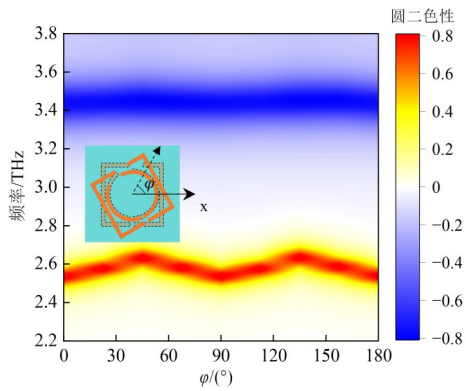


图7 旋转单元图案对圆二色性的影响

向,即实现电磁波的异常反射,异常反射的反射角度 θ_r 可由广义斯涅耳定律计算:

$$\theta_r = \pm \sin^{-1}(\sin \theta_i + \lambda_0/L) \quad (6)$$

其中, θ_i 为入射角, λ_0 为工作波长, L 为超晶胞周期长度.本文构建的超表面阵列中, θ_i 固定为 0° , $L=268 \mu\text{m}$.反射角的符号规定:对于LCP波取“+”,对于RCP波取“-”.利用式(6)计算出2.53 THz和3.43 THz两个谐振点的LCP/RCP理论反射角度分别为 -26° 和 $+19^\circ$.

分别使用LCP/RCP平面波垂直入射激励超表面进行全波仿真,超表面阵列的一维归一化远场方向图如图10所示,其中插图三维远场方向图.在2.53 THz处,LCP波被高度吸收,RCP波发生保手异常反射,反射角度为 -26° ;在3.43 THz处,RCP波被高度吸收,LCP波发生保手异常反射,反射角度为 $+19^\circ$.实验结果与理论分析结果一致.仿真结果表明,该超表面阵列分别在两个频段同时具备圆极化手性吸波和保手性异常反射两

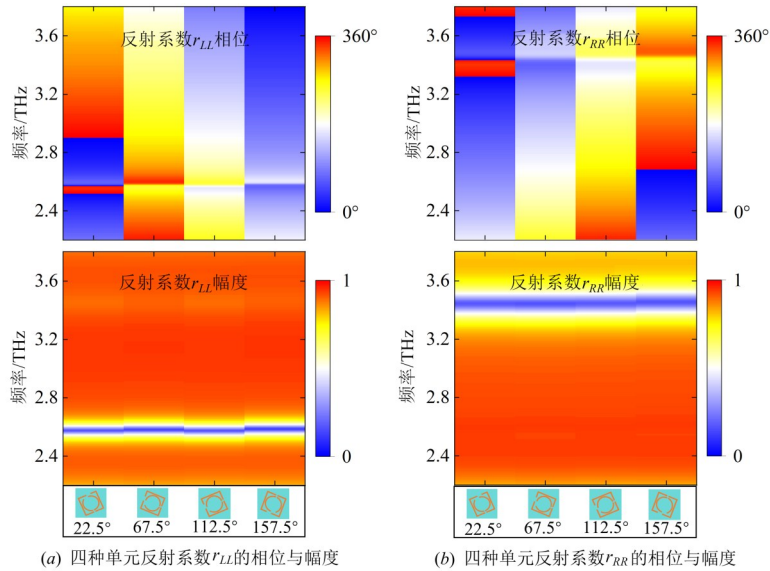
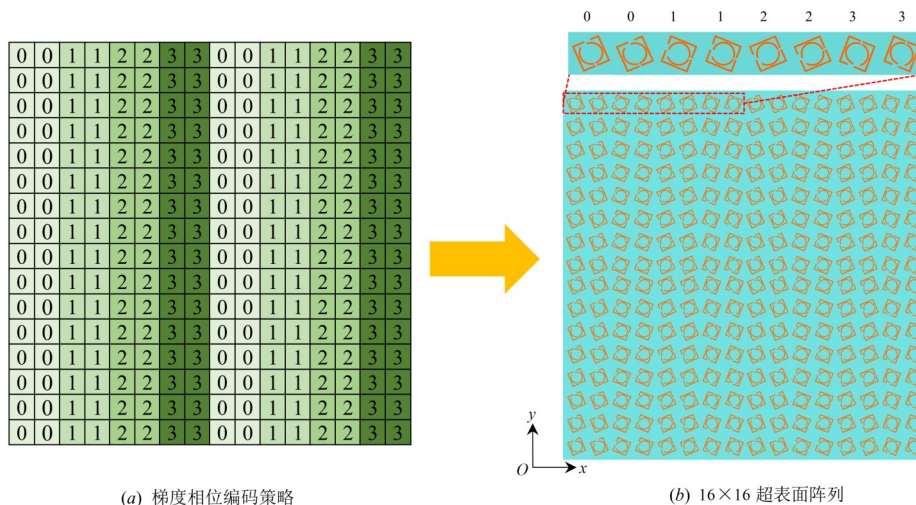


图8 几何相位超表面编码单元的共极化反射系数相位与幅度



(a) 梯度相位编码策略

(b) 16×16 超表面阵列

图9 圆极化吸波与异常反射手性超表面阵列编码排布示意图

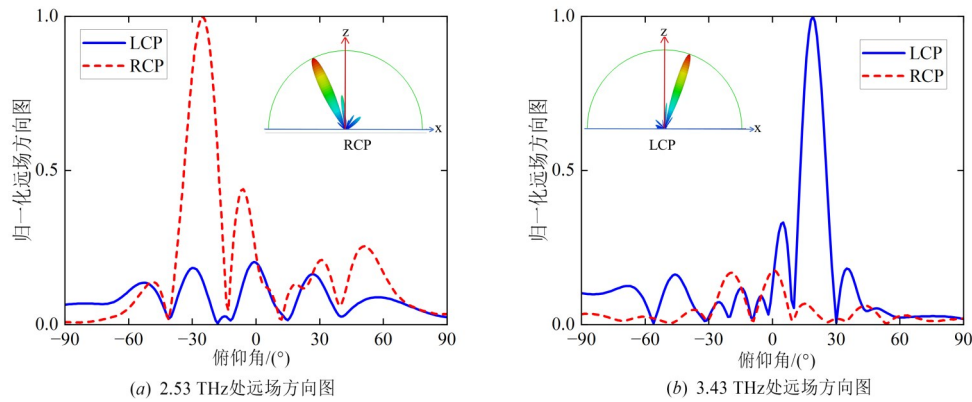


图 10 编码手性超表面阵列归一化远场方向图

种功能,能够同时调控圆极化波的幅度和相位。

表 2 列出了本文与近年来圆二色性超表面工作的对比情况。目前,大多数具有强圆二色性的太赫兹手性超表面通常只能工作在单一频段。从表 2 可以看出,本文的工作不但将工作频段拓展到了两个,并且在双频圆二色性峰值和多功能集成方面具有优势。

表 2 本文与近年来工作的对比

数据来源	工作频段	吸波率	圆二色性峰值	功能
文献[32]	太赫兹 (单频)	97%	0.87	圆极化吸波
文献[33]	微波 (双频)	95.18%(低频)	0.78(低频)	圆极化吸波
		91.77%(高频)	0.69(高频)	
文献[34]	微波 (双频)	92%(低频)	-0.79(低频)	圆极化吸波+ 异常反射
		94%(高频)	0.75(高频)	
文献[35]	中红外 (双频)	64%(低频)	0.40(低频)	圆极化吸波
		89%(高频)	0.58(高频)	
本文工作	太赫兹 (双频)	96.3%(低频)	0.85(低频)	圆极化吸波+ 异常反射
		90.9%(高频)	-0.77(高频)	

5 结论

本文利用琼斯矩阵理论和几何相位调控原理,设计了一种双频太赫兹圆极化吸波与异常反射手性超表面阵列。该超表面在两个太赫兹频段实现了相反的圆二色性;与普通金属板相比,其能够对特定旋向的圆极化波进行保手反射,具备良好的圆极化转换的能力;同时,单元具备几何相位调控能力,可以通过梯度相位排布,实现既定角度的圆极化波异常反射。本文通过分析超表面单元的表面电流分布,解释了手性超表面单元圆极化吸波机理;通过相位梯度排布设计了一种同时具备手性吸波、极化转换和异常反射功能的手性超表面集成阵列,实现了在两个工作频点吸收特定旋向的圆极化波,同时使正交极化圆极化波分别发生 -26° 和

$+19^\circ$ 的保手性异常反射。未来,将推进其在太赫兹能量收集、极化转换、传感、成像等领域的应用。

参考文献

- [1] SHEN S L, LIU X D, SHEN Y C, et al. Recent advances in the development of materials for terahertz metamaterial sensing[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(1): 2101008.
- [2] KLEINER R. Filling the terahertz gap[J]. *Science*, 2007, 318(5854): 1254-1255.
- [3] YU N F, CAPASSO F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [4] WAN C L, HO Y, NUNEZ-SANCHEZ S, et al. A selective metasurface absorber with an amorphous carbon interlayer for solar thermal applications[J]. *Nano Energy*, 2016, 26: 392-397.
- [5] 任英楠, 曹斌照, 李禹蓉, 等. 基于 VO₂ 圆环结构的温控宽带超材料吸波器[J]. *电子学报*, 2021, 49(1): 171-176.
REN Y N, CAO B Z, LI Y R, et al. A temperature-controlled broadband metamaterial absorber based on the vanadium dioxide rings[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(1): 171-176. (in Chinese)
- [6] DONG L, SI L M, XU H Y, et al. Rapid customized design of a conformal optical transparent metamaterial absorber based on the circuit analog optimization method[J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 8303.
- [7] MA W, JIA D L, YU X M, et al. Reflective gradient metasurfaces for polarization-independent light focusing at normal or oblique incidence[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(7): 071111.
- [8] CHEN X Z, HUANG L L, MÜHLENBERND H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1198.
- [9] STOLAREK M, YAVORSKIY D, KOTYSKI R, et al.

- Asymmetric transmission of terahertz radiation through a double grating[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 839-841.
- [10] STEPHEN L, YOGESH N, SUBRAMANIAN V. Broad-band asymmetric transmission of linearly polarized electromagnetic waves based on chiral metamaterial[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(3): 033103.
- [11] CHENG G, SI L M, TANG P C, et al. Study of symmetries of chiral metasurfaces for azimuth-rotation-independent cross polarization conversion[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5722.
- [12] PU M B, LI X, MA X L, et al. Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, 1(9): e1500396.
- [13] EIDELSHTEIN G, FARDIAN-MELAMED N, GUTKIN V, et al. Synthesis and properties of novel silver-containing DNA molecules[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(24): 4839-4844.
- [14] HUANG Y J, XIE X, PU M B, et al. Dual-functional metasurface toward giant linear and circular dichroism[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(11): 1902061.
- [15] LIU M, PLUM E, LI H A, et al. Temperature-controlled optical activity and negative refractive index[J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(14): 2010249.
- [16] CUI Y H, KANG L, LAN S F, et al. Giant chiral optical response from a twisted-arc metamaterial[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(2): 1021-1025.
- [17] PLUM E, ZHELUDEV N I. Chiral mirrors[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(22): 221901.
- [18] QU Y, LEI L, YU Y, et al. Coexistence of circular dichroism and asymmetric transmission in Babinet-complementary metamaterials[J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 30394.
- [19] LIU Z G, XU Y, JI C Y, et al. Fano-enhanced circular dichroism in deformable stereo metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(8): 1907077.
- [20] FRESE D, WEI Q S, WANG Y T, et al. Nonreciprocal asymmetric polarization encryption by layered plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(6): 3976-3980.
- [21] HUANG Y J, XIAO T X, XIE Z W, et al. Single-layered reflective metasurface achieving simultaneous spin-selective perfect absorption and efficient wavefront manipulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(5): 2001663.
- [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] WANG Z C, DING X M, ZHANG K A, et al. Huygens metasurface holograms with the modulation of focal energy distribution[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(12): 1800121.
- [24] JIA M, WANG Z, LI H T, et al. Efficient manipulations of circularly polarized terahertz waves with transmissive metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 16.
- [25] LUO W J, XIAO S Y, HE Q, et al. Spin Hall effect: Photonic spin Hall effect with nearly 100% efficiency[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(8): 1126.
- [26] LUO W J, SUN S L, XU H X, et al. Transmissive ultrathin pancharatnam-berry metasurfaces with nearly 100% efficiency[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(4): 044033.
- [27] 王鑫, 王俊林. 太赫兹波段电磁超材料吸波器折射率传感特性[J]. *物理学报*, 2021, 70(3): 038102.
- WANG X, WANG J L. Refractive index sensing characteristics of electromagnetic metamaterial absorber in terahertz band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(3): 038102. (in Chinese)
- [28] WANG Z J, JIA H, YAO K, et al. Circular dichroism metamirrors with near-perfect extinction[C]//2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Piscataway: IEEE, 2016: 2662.
- [29] JING L Q, WANG Z J, MATURI R, et al. Gradient chiral metamirrors for spin-selective anomalous reflection[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(6): 1700115.
- [30] WANG L Y, LAN F, ZHANG Y X, et al. A fractional phase-coding strategy for terahertz beam patterning on digital metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6395.
- [31] 崔铁军. 电磁超材料: 从等效媒质到现场可编程系统[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(10): 1427-1461.
- CUI T J. Electromagnetic metamaterials—From effective media to field programmable systems[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(10): 1427-1461. (in Chinese)
- [32] CUI Y, WANG X S, JIANG H A, et al. High-efficiency and tunable circular dichroism in chiral graphene metasurface[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(13): 135102.
- [33] WANG L L, HUANG X J, LI M H, et al. Chirality selective metamaterial absorber with dual bands[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25983.
- [34] GOU Y E, MA H F, WANG Z X, et al. Dual-band chiral metasurface for independent controls of spin-selective re-

flections[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12775.

- [35] TANG H T, ROSENMANN D, CZAPLEWSKI D A, et al. Dual-band selective circular dichroism in mid-infrared chiral metasurfaces[J]. Optics Express, 2022, 30(11): 20063.

作者简介



张 航 男,1998年出生,云南玉溪人.现为北京理工大学集成电路与电子学院在读硕士研究生.主要研究方向为电磁场与微波技术.
E-mail: 3220210799@bit.edu.cn



司黎明(通讯作者) 男,1981年出生,湖北襄阳人.北京理工大学集成电路与电子学院副教授,副院长.主要研究方向为电磁场与微波技术.中国电子学会会员编号:E190009223M.
E-mail: lms@bit.edu.cn