

基于石墨烯的双功能可切换太赫兹手性超表面

张艺心 邓仕杰 廖键 刘厚权

Dual-functional switchable terahertz chiral metasurface based on graphene

ZHANG Yi-xin, DENG Shi-jie, LIAO Jian, LIU Hou-quan

引用本文:

张艺心, 邓仕杰, 廖键, 刘厚权. 基于石墨烯的双功能可切换太赫兹手性超表面[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0076

ZHANG Yi-xin, DENG Shi-jie, LIAO Jian, LIU Hou-quan. Dual-functional switchable terahertz chiral metasurface based on graphene[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0076

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0076>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于太赫兹全介质超表面的独立双带连续域束缚态

Independent dual-band bound states in the continuum based on terahertz all-dielectric metasurfaces

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1230 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0004>

无源非厄密超构表面奇异点现象研究进展

Research progress in the phenomenon of exceptional point on passive non-Hermitian metasurfaces

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 17 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0119>

利用级联超构表面同时测量径向角位移和纵向线位移

Simultaneous measurement of radial angular displacement and longitudinal linear displacement with cascade metasurfaces

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1016 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0033>

面向偏振成像的超构表面研究进展

Recent advances in metasurfaces for polarization imaging

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 973 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0234>

二氧化钒辅助的可切换多功能超材料结构

A vanadium dioxide-assisted switchable multifunctional metamaterial structure

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 514 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0195>

基于狄拉克半金属的可调谐反射自旋解耦编码超表面

Tunable reflective spin-decoupled encoding metasurface based on Dirac semimetals

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 968 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0037>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-11

基于石墨烯的双功能可切换太赫兹手性超表面

张艺心^{1,2}, 邓仕杰^{1,2}, 廖 键^{4*}, 刘厚权^{1,2,3*}

- 广西光电子信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004;
- 桂林电子科技大学光电工程学院, 广西 桂林 541004;
- 广西人工智能学院, 广西南宁 530028;
- 桂林电子科技大学海洋工程学院, 广西北海 536000)

摘要:为满足太赫兹器件对多功能偏振调控与动态可调特性的需求,提出了一种基于石墨烯载流子调控的双功能可切换太赫兹手性超表面。通过改变入射波偏振态,并利用外加栅压连续调节石墨烯费米能级,该结构可分别表现出圆二色性(CD)和线二色性(LD)响应,从而实现不同偏振选择性吸收特性之间的切换。仿真结果表明,当石墨烯费米能级为1 eV时,超表面在2.65 THz处对左右旋圆偏振光产生显著选择性吸收,CD幅值达到0.89,在1.97至3.44 THz频段内CD幅值保持在0.6以上;当费米能级降至0.2 eV时,结构在1.91 THz处表现出明显的线二色性响应,LD幅值达到0.75。电场与表面电流分布分析表明,不同偏振态在谐振条件下激发的电共振强度差异是产生偏振选择性吸收的主要原因。此外,该结构对入射角和结构参数变化具有较好的稳定性,在圆/线二色性探测、偏振调控以及太赫兹光学器件等方面具有潜在应用价值。

关键词:超表面;圆二色性;线二色性;可调

中图分类号:TB34 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2026-0076 CSTR:32171.14.CO.2026-0076

Dual-functional switchable terahertz chiral metasurface based on graphene

ZHANG Yi-xin^{1,2}, DENG Shi-jie^{1,2}, LIAO Jian^{4*}, LIU Hou-quan^{1,2,3*}

- Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin 541004, Guangxi, China;
 - School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi, China;
 - Guangxi Academy of Artificial Intelligence, Nanning 530028, Guangxi, China;
 - College of Ocean Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Beihai 536000, Guangxi, China)
- * Corresponding author, E-mail: 13978983003@163.com; houquanliu@163.com

Abstract: To meet the demand for multifunctional polarization manipulation and dynamic tunability in ter-

收稿日期:2026-04-26; 修订日期:xxxx-xx-xx

基金项目:广西自然科学基金(No. 2024GXNSFDA010062, No. 桂科 AB23075134)、国家自然科学基金(No. 62364006, No. U23A20282)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划项目(No. 2025YCXS231)

Supported by Natural Science Foundations of Guangxi (No. 2024GXNSFDA010062, No. AB23075134); National Natural Science Foundation of China (No. 62364006, No. U23A20282); Innovation Project of GUET Graduate Education (No. 2025YCXS231)

hertz devices, a dual-functional switchable chiral metasurface based on graphene carrier modulation is proposed. By changing the polarization state of the incident wave and continuously tuning the Fermi level of graphene through an external gate voltage, the structure can exhibit circular dichroism (CD) and linear dichroism (LD) responses, enabling switching between different polarization-selective absorption characteristics. Simulation results show that when the graphene Fermi level is 1 eV, the metasurface exhibits pronounced selective absorption for left- and right-handed circularly polarized waves at 2.65 THz, with a CD value reaching 0.89, and maintaining CD values above 0.6 within the frequency range of 1.97–3.44 THz. When the Fermi level decreases to 0.2 eV, a significant linear dichroism response appears at 1.91 THz, with an LD value of 0.75. Analysis of the electric field and surface current distributions reveals that the difference in the strength of electric resonances excited under different polarization states is the primary mechanism responsible for polarization-selective absorption. In addition, the proposed structure demonstrates good robustness against variations in the incident angle and structural parameters, indicating its potential applications in circular/linear dichroism detection, polarization control, and terahertz photonic devices.

Key words: metasurfaces; circular dichroism; linear dichroism; tunability

1 引言

太赫兹波频率范围在 0.1~10 THz 之间, 波长介于微波与红外光之间。太赫兹波具有低光子能量、强穿透性及对分子振动转动的敏感性, 这使其在成像^[1]、传感^[2]、通信^[3]及生物医学检测^[4]等领域具备广阔应用前景。手性结构的几何特征表现为物体与其镜像无法通过平移或旋转重合^[5], 当电磁波与手性介质相互作用时, 左旋圆偏振光 (LCP) 和右旋圆偏振光 (RCP) 会产生不同响应, 进而表现出圆二色性、旋光性等光学现象^[6]。上述手性光学效应在手性分子识别^[7]、偏振成像^[8]及光学信息处理^[9]中发挥重要作用。但天然手性材料响应较弱, 作用距离受材料厚度限制, 难以用于亚波长器件^[10]。超表面由亚波长尺度人工微结构周期排列构成, 厚度远小于工作波长, 可在薄层范围内调控电磁波的幅度、相位及偏振^[11-12]。相较于三维超材料, 超表面加工简便、损耗较低^[13]。手性超表面通过破缺几何对称性或引入层间扭转, 能在亚波长尺度显著增强圆二色性^[14-15], 因而成为太赫兹波段的研究热点。近年来, 太赫兹功能器件在主动调控、结构场产生、无线通信及片上信号处理等方面取得了较快发展。例如, 液晶超表面可实现太赫兹波多维动态调控, 可编程自旋电子发射器可灵活产生结构化太赫兹场, 光子-电子协同技术推动了 300 GHz 以上太赫兹通信

的发展, 全硅微环平台也为片上太赫兹信号处理提供了新思路^[16-19]。

传统手性超表面结构固定后功能难以改变, 限制了动态应用^[20]。为此, 研究者将可调材料集成到超表面中以实现动态响应。石墨烯作为典型二维材料, 其载流子浓度可通过栅压调节, 从而改变电导率, 这为太赫兹可调超表面提供了材料基础^[21-23]。Zhang 等人^[24]设计了石墨烯-金属开口环组合结构, 调节费米能级后在 1.181 THz 获得 0.85 的圆二色性响应。Liu 等人^[25]利用石墨烯手性超表面实现了太赫兹波前调控和全息成像。Qureshi 等人^[26]提出石墨烯基三波段结构用于太赫兹通信中的强圆二色性响应。Li 等人^[27]研究了基于石墨烯的各向异性超表面, 实现了太赫兹波的偏振依赖可调吸收及线二色性响应。这些工作显示出石墨烯在太赫兹手性响应调控中的应用潜力。此外, 石墨烯超表面在非线性太赫兹调控领域同样具有较大应用潜力。石墨烯较强的三阶非线性响应及可调等离激元特性, 有助于增强局域电场并提高非线性频率转换效率。近期研究表明, 石墨烯辅助非线性超材料可实现双频三次谐波产生, 并在片上太赫兹集成器件中展现出应用前景^[28]。因此, 石墨烯不仅适用于线性偏振调控, 也为可调非线性太赫兹器件提供了新的设计思路。

目前大部分研究集中于圆二色性 (CD) 或线

二色性 (LD) 单一响应的调控, 能在两者之间切换的超表面较少。圆二色性反映结构对左右旋圆偏振光的吸收差异, 线二色性则对应正交线偏振光的选择吸收, 两者在偏振探测、信息处理等应用中均有需求^[29-31]。已有可调手性超表面多实现圆二色性幅值连续调节, 但缺少圆、线二色性功能切换能力, 这限制了器件在复杂偏振任务中的灵活性。

因此, 本文设计了一种基于石墨烯调控的双功能可切换太赫兹手性超表面, 谐振结构由金属开口环与外侧石墨烯圆弧构成。通过改变入射波的偏振态, 并结合栅压对石墨烯费米能级的调控, 该结构可分别表现出圆二色性与线二色性特性, 从而实现不同偏振选择性吸收功能之间的切换。研究表明, 费米能级为 1 eV 时, 超表面在 2.65 THz 处 CD 幅值达 0.89; 费米能级降至 0.2 eV 时, 1.91 THz 处 LD 幅值为 0.75。通过连续调节石墨烯费米能级, CD 和 LD 响应强度均可实现动态调控。此外, 该结构在合理参数范围内性能稳定, 且在较宽入射角范围内仍能保持良好的二色性响应。这一工作在太赫兹偏振探测及调控器件等方面具有潜在应用。

2 结构设计与理论分析

2.1 结构设计

本文所提出的手性超表面单元结构如图 1(a) 所示, 由三层结构组成, 自上而下依次为顶层谐振结构、中介质层以及底层金属反射层。其中, 底层金属反射层采用连续金薄膜, 用于抑制入射太赫兹电磁波的透射作用。中介质层选用聚乙烯环烯烃共聚物 (Topas), 其相对介电常数取为 2.57, 该材料具有较高的透过率、热稳定性以及良好的太赫兹波段介电性能^[32], 在太赫兹器件中得到广泛应用。

顶层谐振结构由金属开口环谐振器与其外侧紧密贴合的石墨烯圆弧共同构成, 具体几何参数如图 1(b) 所示。该结构在平面内呈周期性排布, 晶胞周期为 $P = 50 \mu\text{m}$ 。金开口环的外径为 $r = 14 \mu\text{m}$, 环宽为 $w_1 = 8 \mu\text{m}$; 位于金属开口环外侧的石墨烯圆弧宽度为 $w_2 = 5 \mu\text{m}$, 用于引入可调电磁响应。中介质层厚度为 $h = 15 \mu\text{m}$, 顶层谐振结

构及底层金属反射层的厚度均为 $0.1 \mu\text{m}$ 。此外, 为了描述金属开口环与石墨烯圆弧之间的相对几何关系, 结构中定义了四个角度参数。其中, φ_1 表示石墨烯圆弧下边界与过圆心水平参考线之间的夹角; φ_2 表示石墨烯圆弧上边界与金属开口环左侧边界之间的夹角; φ_3 表示石墨烯圆弧上边界与过圆心垂直参考线之间的夹角; φ_4 表示金属开口环右侧边界与过圆心垂直参考线之间的夹角。对应参数分别取为 $\varphi_1 = 12.5^\circ$ 、 $\varphi_2 = 32.5^\circ$ 、 $\varphi_3 = 17.5^\circ$ 以及 $\varphi_4 = 45^\circ$ 。

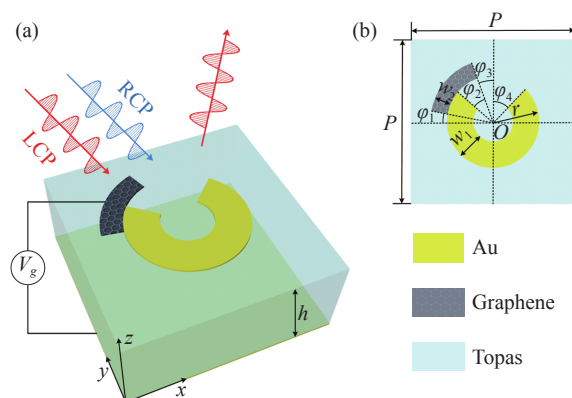


图 1 手性超表面单元结构示意图。(a) 三维原理图; (b) 俯视图及几何参数定义

Fig. 1 Schematic diagram of the chiral metasurface unit cell. (a) Three-dimensional schematic view; (b) top view with the definition of geometric parameters

所提出的结构在实际加工中具有良好的可实现性。具体来说, 首先以硅衬底为基底, 通过热蒸发工艺沉积一层金薄膜^[33], 作为底层高反射金属层与背栅电极; 随后在金膜表面通过旋涂并经热固化制备介质中间层^[34]。顶层金开口环谐振器结构通过光刻及金属沉积工艺制备^[35]。在金属图案制备完成后, 通过化学气相沉积方法制备石墨烯薄膜, 并采用聚甲基丙烯酸甲酯辅助的湿法转移工艺转移至介质层表面, 之后结合光刻与等离子体刻蚀工艺对石墨烯进行图形化处理, 形成所需的手性超表面图案^[36]。这一工艺流程已在多个实验工作中得到验证^[37-38]。石墨烯的费米能级可通过静电栅极方式实现动态调控^[39-40]。通过在顶层石墨烯与底层金属之间施加直流偏置电压以调节石墨烯的载流子密度, 使费米能级在 0.2 eV 至 1 eV 范围内连续可调, 从而实现超表面在圆二色性与线二色性功能之间的动态切换。本文主要针对该双功能可切换太赫兹手性超表面的结构设计

与电磁响应特性开展研究, 相关结果均通过全波电磁仿真获得。

2.2 理论分析

在太赫兹频段, 石墨烯的电磁响应可等效为零厚度导电界面, 其表面电导率 $\sigma(\omega)$ 可由 Kubo 公式描述^[41], 总电导分解为带内跃迁与带间跃迁两部分, 太赫兹频段内通常满足 $\hbar\omega \ll 2|E_f|$ 且 $|E_f| \gg k_B T$, 此时带内项占主导, 电导可近似为 Drude 形式:

$$\sigma(\omega) \approx \frac{e^2 E_f}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i/\tau}, \quad (1)$$

其中, e 为元电荷, E_f 为石墨烯费米能级, \hbar 为约化普朗克常数, ω 为入射电磁波的角频率, τ 为载流子弛豫时间。本文中 τ 取 0.5 ps。通过调节费米能级 E_f , 可实现对石墨烯表面电导率的连续调节, 进而改变超表面的电磁响应特性。

为定量分析超表面的手性响应特性, 采用琼斯矩阵方法对反射系数进行描述^[42]。在圆偏振基下, 反射过程可由圆偏振基下的反射矩阵 \mathbf{R}_c 表示为:

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{R}_c \mathbf{E}_i, \mathbf{R}_c = \begin{pmatrix} r_{++} & r_{+-} \\ r_{-+} & r_{--} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{E}_i 和 \mathbf{E}_r 分别表示入射电场与反射电场, r_{++} 与 r_{--} 表示同极化反射系数, r_{+-} 与 r_{-+} 表示交叉极化反射系数。

CD 定义为左右旋圆偏振光吸收率之差。由于本文所设计的超表面底层采用连续金属反射层, 其厚度远大于太赫兹波在金属中的有效穿透深度, 因此在工作频段内的透射分量可以忽略不计。具体表达式为:

$$CD = A_+ - A_- = (1 - |r_{-+}|^2 - |r_{++}|^2) - (1 - |r_{+-}|^2 - |r_{--}|^2), \quad (3)$$

式中, A_+ 和 A_- 分别定义为 LCP 和 RCP 入射光的吸收率。此外, 当 $|r_{+-}|^2 = |r_{-+}|^2$ 时, CD 的公式可以简化为:

$$CD = |r_{--}|^2 - |r_{++}|^2, \quad (4)$$

此时, CD 的值主要取决于 LCP 和 RCP 光的共极化反射系数差异。

与圆二色性类似, 线二色性用于描述结构对正交线偏振光的差异吸收。在线偏振基下, 反射

过程可由线偏振基下的反射矩阵 \mathbf{R}_l 表示为^[43]:

$$\mathbf{R}_l \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中, E_x^i 、 E_y^i 分别表示入射电场在 x 、 y 方向上的分量, E_x^r 、 E_y^r 分别表示反射电场的 x 、 y 方向上的分量。 r_{xx} 和 r_{yy} 表示共偏振反射系数, r_{xy} 和 r_{yx} 表示交叉偏振反射系数。

LD 定义为 x 和 y 方向线偏振光吸收率之差。同样, 当 $|r_{xy}|^2 = |r_{yx}|^2$ 时, 交叉偏振反射系数相互抵消可进一步化简。其表达式为:

$$LD = A_x - A_y = (1 - |r_{xx}|^2 - |r_{yy}|^2) - (1 - |r_{yy}|^2 - |r_{xx}|^2), \quad (6)$$

该定义形式与圆二色性在数学表达上是一致的, 区别主要在于所采用的偏振基不同。圆二色性描述左右旋圆偏振之间的差异吸收, 线二色性描述正交线偏振之间的差异吸收。

3 结果与讨论

本文采用 CST Microwave Studio 软件对所设计的超表面单元进行全波电磁仿真。在仿真设置中, 结构在 x 和 y 方向上使用单元边界条件, 以模拟无限周期阵列, 在 z 方向上使用开放边界条件, 用于描述自由空间中的电磁辐射与传播行为。

在圆偏振波入射条件下, 图 2(a) 给出了石墨烯费米能级 $E_f = 1$ eV 时结构的反射特性。其中, $R_{++} = |r_{++}|^2$, $R_{+-} = |r_{+-}|^2$, $R_{-+} = |r_{-+}|^2$, $R_{--} = |r_{--}|^2$ 。由图所示, 交叉极化反射分量 R_{+-} 与 R_{-+} 在整个频段内基本保持一致, 而同极化反射分量 R_{++} 与 R_{--} 在共振频率处呈现出明显差异, 表明结构对不同旋向圆偏振波具有不同的电磁响应。由式 (3) 进一步计算出 LCP 与 RCP 波入射时的吸收谱及对应的圆二色性曲线, 如图 2(b) 所示。在 2.65 THz 处出现了一个明显的共振吸收峰, 此时 RCP 波的吸收率高达 99.48%, 而 LCP 波的吸收率仅为 10.4%。这表明在该共振频率处, 所设计的超表面对 LCP 波主要表现为反射行为, 而对 RCP 波则产生了近乎完全吸收, 从而形成了明显的手性选择性吸收差异。进而可计算得到在 2.65 THz 处左右旋圆偏振吸收率之差, 对应的 CD 幅值达到 0.89。此外, 在 1.97 THz 至 3.44 THz 的频率范围内, CD 幅值始

终保持在 0.6 以上, 对应带宽约为 1.47 THz, 表明该结构在该频段内具有较宽的单波段 CD 响应。

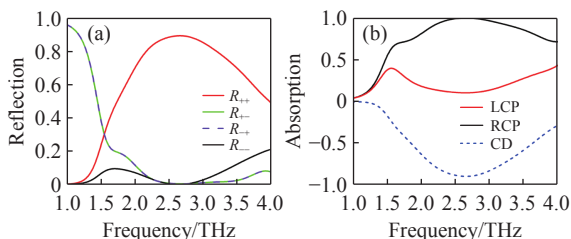


图 2 超表面对两种圆偏振光的电磁响应曲线。(a) 反射系数; (b) 吸收谱及 CD 谱

Fig. 2 Electromagnetic response curves of the metasurface to two types of circularly polarized light. (a) Reflection coefficients; (b) absorption spectrum and CD spectrum

在线偏振波入射条件下, 图 3(a) 给出了石墨烯费米能级为 $E_f=0.2\text{eV}$ 时, 结构的反射特性。其中 $R_{xx}=|r_{xx}|^2$, $R_{yy}=|r_{yy}|^2$, $R_{yx}=|r_{yx}|^2$, $R_{xy}=|r_{xy}|^2$ 。如图所示, 交叉偏振反射分量 R_{xy} 与 R_{yx} 在整个频段内基本重合, 而共偏振反射分量 R_{xx} 与 R_{yy} 则在共振频率处表现出明显差异, 表明结构对正交线偏振波具有不同的电磁响应。由式 (6) 进一步计算出 x 与 y 偏振波入射时的吸收谱及对应的线二色性曲线, 如图 3(b) 所示。在 1.91 THz 处出现了一个明显的共振吸收峰, 此时 y 偏振波入射下的吸收率高达 92.82%, 而 x 偏振波入射下的吸收率仅为 18.24%。这表明在该共振频率处, 所设计的超表面对 x 偏振波主要表现为反射行为, 而对 y 偏振波则产生了近乎完全吸收, 从而形成了明显的偏振选择性吸收差异。进而可计算得到在 1.91 THz 处 x 、 y 偏振入射波吸收率之差, 对应的 LD 幅值达到 0.75, 显示了在太赫兹 1-4 THz 频段中的单

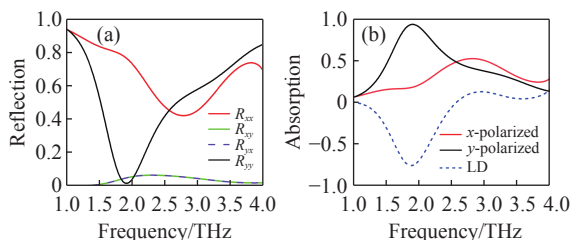


图 3 超表面对两种线偏振光的电磁响应曲线。(a) 反射系数; (b) 吸收谱及 LD 谱

Fig. 3 Electromagnetic response curves of the metasurface to two orthogonal linearly polarized light. (a) Reflection coefficients; (b) absorption spectra and LD spectra

波段 LD 响应特性。

为研究所提出结构在不同偏振条件下的动态调控能力, 本文分别计算了圆偏振与线偏振太赫兹波入射时, 不同石墨烯费米能级条件下的电磁响应, 具体仿真结果如图 4 所示。

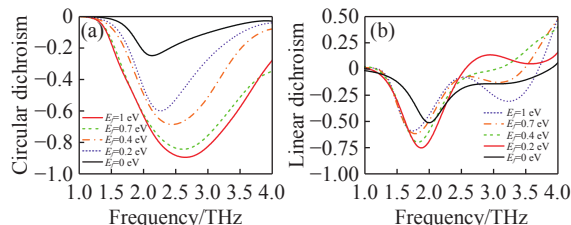


图 4 两种偏振条件下的动态调控特性。(a) 圆偏振光入射时的 CD 光谱; (b) 线偏振光入射时的 LD 光谱

Fig. 4 Dynamically tunable characteristics of the metasurface under two polarization conditions. (a) CD spectra under circularly polarized incidence; (b) LD spectra under linearly polarized incidence

在圆偏振波入射条件下, 如图 4(a) 所示, 随着石墨烯费米能级从 0 eV 逐渐增加至 1.0 eV, 单波段共振频率呈现出明显的蓝移趋势, 共振频率由 2.14 THz 连续移动至 2.65 THz。与此同时, 共振点处的圆二色性幅值随费米能级的增加而逐渐增强, CD 幅值由 0.24 提升至 0.89。因此, 通过调节石墨烯载流子浓度, 不仅可以实现对共振频率的调谐, 也能调控结构在圆偏振波入射条件下的手性响应强度。此外, 在线偏振入射条件下, 结构同样表现出明显的可调特性, 其结果如图 4(b) 所示。随着石墨烯费米能级从 0 eV 增加至 1.0 eV, 单波段共振频率由 2.01 THz 逐渐移动至 1.75 THz, 呈现出随费米能级升高而红移的趋势。在低费米能级区间 (0-0.2 eV) 内, 随费米能级增加共振点处 LD 幅值由 0.51 提升至 0.75; 而当费米能级继续提升至 1.0 eV 时, 共振点处 LD 幅值则逐渐减小至 0.58。因此, 石墨烯载流子调控不仅影响共振频率的位置, 同时也对线二色性响应强度具有调制作用。

为进一步理解所提出超表面结构在单一频段内的 CD 与 LD 形成机理。本文分别选取圆偏振与线偏振光入射条件下的共振频率进行分析。针对 CD 与 LD 响应, 对应选取不同石墨烯费米能级条件下的电场与表面电流分布进行对比, 具体仿真结果如图 5 所示。

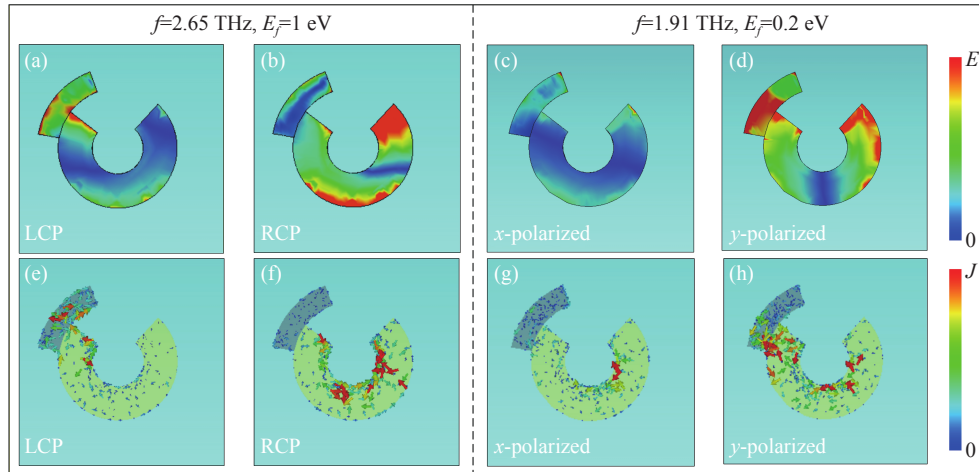


图5 石墨烯费米能级分别为 1 eV 与 0.2 eV 时, 对应谐振频率的电场与电流分布。(a)(e) LCP 光在 2.65 THz 入射; (b)(f) RCP 光在 2.65 THz 入射; (c)(g) x 偏振光在 1.91 THz 入射; (d)(h) y 偏振光在 1.91 THz 入射

Fig. 5 Electric field and surface current distributions at the corresponding resonance frequencies for graphene Fermi levels of 1 eV and 0.2 eV. (a)(e) LCP incidence at 2.65 THz; (b)(f) RCP incidence at 2.65 THz; (c)(g) x -polarized incidence at 1.91 THz; (d)(h) y -polarized incidence at 1.91 THz

在圆偏振光入射条件下, 当 $f=2.65$ THz、 $E_f=1$ eV 时。如图 5(a) 与图 5(e) 所示, 可以观察到, 在 LCP 光法向入射条件下, 谐振结构内部的整体电场分布相对均匀, 场强变化幅度较小, 相应的表面电流密度也整体较低, 表明入射电磁波与谐振结构之间的耦合较弱, 电磁能量主要以反射形式存在。相对地, 如图 5(b) 与图 5(f) 所示, 在 RCP 光法向入射条件下, 结构内部场强变化幅度相对更高, 电场的共振效应激发了电子流动, 对应的表面电流密度显著提高, 导致超表面对 RCP 光的吸收率高达 99.48%。该电共振作用的增强导致结构对 RCP 光的吸收明显高

于 LCP 光, 从而产生对两种旋向圆偏振光的差异化响应。进一步结合表面电流分布可以发现, 在 RCP 光入射条件下, 表面电流主要集中在金属开口环内侧区域, 表明该偏振态与金属谐振结构之间的耦合作用更强, 从而增强电磁能量耗散, 并形成圆二色性响应。由此可见, 左右旋圆偏振光在谐振条件下激发的电共振强弱差异, 是导致该结构在 2.65 THz 处产生显著圆二色性响应的主要原因。

在线偏振光入射条件下, 当 $f=1.91$ THz、 $E_f=0.2$ eV 时, 其物理机制与圆偏振入射条件下的情况具有相似特征。如图 5(c)、(d) 及图 5(g)、(h) 所示, 不同线偏振方向入射时, 谐振结构中激发的电场分布与表面电流强度存在明显差异。其中, 与

谐振结构耦合较强的 y 偏振入射条件下, 结构内部电场变化更明显, 电共振使得表面电流密度更高, 进而导致对 y 偏振入射电磁能量耗散更大; 而在 x 偏振入射条件下, 电场变化幅度与电流强度均相对较小, 电磁能量主要以反射形式存在。此外, 结合表面电流分布可以发现, y 偏振入射时表面电流主要集中在金属开口环及石墨烯圆弧附近, 说明该偏振态能够更充分地激发结构中的局域电磁耦合共振, 进而导致更强的电磁能量耗散和吸收响应。这种不同线偏振态下所激发的电共振强度差异, 导致了超表面在 1.91 THz 处产生显著线二色性响应。

研究谐振单元结构几何参数变化对器件电磁响应的影响, 对于评估超表面在实际加工过程中的容差能力以及性能优化具有重要意义。对于所设计的手性超表面, 其 CD 与 LD 响应主要受晶胞周期 P 、金开口环的外径为 r 及环宽 w_1 、石墨烯圆弧宽度 w_2 四个几何参数的影响。因此, 在仿真中采用了单变量控制方法, 即每次仅改变其中一个结构参数, 其余参数保持不变。对照结构的几何参数取为 $P=50$ μm 、 $r=14$ μm 、 $w_1=8$ μm 、 $w_2=5$ μm 。

在石墨烯费米能级 $E_f=1$ eV 条件下, 对结构的 CD 响应进行分析, 仿真结果如图 6 所示。由图 6(a) 可见, 随着晶胞周期 P 从 48 μm 增加至 51 μm , 超表面的工作频率呈现出随 P 增大而升

高的趋势, 而共振频点处的 CD 幅值则表现出先增加后减小的变化特征。图 6(b) 中, 当金开口环外径 r 从 $12\ \mu\text{m}$ 增加至 $15\ \mu\text{m}$ 时, 器件的工作频率发生明显红移, 同时共振点处的 CD 幅值同样呈现出先增加后减小的趋势。如图 6(c) 所示, 随着金开口环宽度 w_1 从 $6\ \mu\text{m}$ 增加至 $9\ \mu\text{m}$, 工作频率先降低后升高, 而对应的 CD 幅值也表现出先增加后减小的变化规律。对于石墨烯圆弧宽度 w_2 , 如图 6(d) 所示, 当 w_2 从 $3\ \mu\text{m}$ 增加至 $6\ \mu\text{m}$ 时, 超表面的工作频率整体呈现出蓝移趋势, 同时共振点处的 CD 幅值同样呈现出先增加后减小的变化过程。

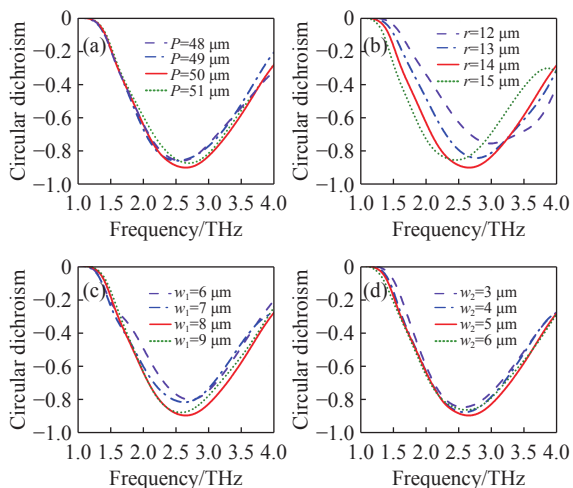


图 6 改变结构参数对 CD 的影响。(a) 晶胞周期 P ; (b) 金开口环外径 r ; (c) 金开口环宽度 w_1 ; (d) 石墨烯圆弧宽度 w_2

Fig. 6 The effect of structural parameter variations on CD. (a) Unit-cell period P ; (b) outer radius r of the gold split ring; (c) width w_1 of the gold split ring; (d) width w_2 of the graphene arc

在石墨烯费米能级 $E_f = 0.2\ \text{eV}$ 条件下, 对结构的 LD 响应进行参数分析, 其结果如图 7 所示。由图 7(a) 可见, 当晶胞周期 P 从 $48\ \mu\text{m}$ 增加至 $51\ \mu\text{m}$ 时, 超表面的工作频率呈现出先增加后趋于稳定的变化趋势, 而共振点处的 LD 幅值则表现为先增后减并再次增加的非单调变化行为。图 7(b) 表明, 随着金开口环外径 r 的增大, 器件的工作频率发生明显红移, 同时共振点处的 LD 幅值持续增加。由图 7(c) 可以观察到, 当金开口环宽度 w_1 从 $6\ \mu\text{m}$ 增加至 $9\ \mu\text{m}$ 时, 工作频率整体呈现蓝移趋势, 而共振点处的 LD 幅值则逐渐减小。对于石墨烯圆弧宽度 w_2 , 如图 7(d) 所

示, 在共振点附近, 器件的工作频率及共振点处的 LD 幅值整体变化较为平缓稳定, 但在较高频段下, LD 随 w_2 的增加呈现出先增加后趋于稳定的趋势。

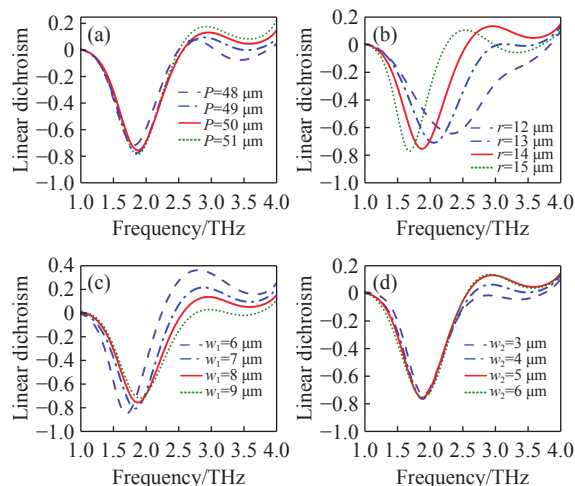


图 7 改变结构参数对 LD 的影响。(a) 晶胞周期 P ; (b) 金开口环外径 r ; (c) 金开口环宽度 w_1 ; (d) 石墨烯圆弧宽度 w_2

Fig. 7 The effect of structural parameter variations on LD. (a) Unit-cell period P ; (b) outer radius r of the gold split ring; (c) width w_1 of the gold split ring; (d) width w_2 of the graphene arc

综合图 6 与图 7 可以看出, 所提出的超表面对几何参数变化具有一定鲁棒性。在参数偏离初始设计值的情况下, 器件的主要共振频率虽存在一定漂移, 但 CD 与 LD 峰值整体仍保持较高水平, 未出现明显性能退化。其中, 晶胞周期 P 、金开口环外径 r 、金属环宽度 w_1 以及石墨烯圆弧宽度 w_2 在约 $\pm 1\ \mu\text{m}$ 的加工误差范围内变化时, 器件仍能够保持较稳定的圆二色性与线二色性响应。上述结果表明, 该结构对常规微纳加工误差具有一定容错能力, 在实际加工实现中具备较好的工程可行性。

在实际应用环境中, 入射电磁波通常难以始终保持严格的法向入射, 因此器件对入射角变化的响应稳定性是评估其实际应用潜力的重要指标之一。为此, 本文进一步分析了入射角变化对所设计超表面 CD 与 LD 性能的影响。如图 8 所示, 在保持其他结构参数不变的条件下, 分别考察了石墨烯费米能级为 $E_f = 1\ \text{eV}$ 与 $E_f = 0.2\ \text{eV}$ 时, 入射角 θ 在 -40° 至 40° 范围内变化时器件的偏振响应特性。

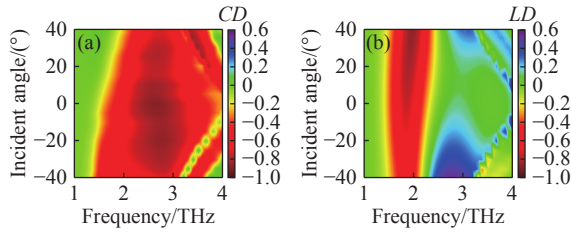


图 8 入射角对 CD 与 LD 影响。(a)CD 响应的等值线分布; (b)LD 响应的等值线分布

Fig. 8 Influence of the incidence angle on the CD and LD. (a) Contour map of the CD response; (b) Contour map of the LD response

当石墨烯费米能级 $E_f = 1 \text{ eV}$ 时, 其 CD 响应随入射角 θ 变化的仿真结果如图 8(a) 所示。可以观察到, 随着 θ 逐渐增大, 器件的整体工作带宽呈现出先增大后减小的变化趋势, 而共振频率始终稳定在约 2.75 THz 附近, 未出现明显漂移。在整个角度变化范围内, 共振频点处的 CD 幅值均保持在 0.7 至 0.9 之间, 未出现明显衰减, 表明该结构在圆偏振光入射条件下对入射角变化具有较好的鲁棒性。当石墨烯费米能级降低至 $E_f = 0.2 \text{ eV}$ 时, 对应的 LD 响应仿真结果如图 8(b) 所示。随着 θ 由 -40° 增加至 40° , 共振频率呈现出逐渐蓝移的趋势, 由 1.86 THz 增加至 1.98 THz。同时, 共振频率处的 LD 幅值整体呈现持续增强的趋势, 由 0.58 增加至 0.88。需要指出的是, 在较高频段范围内, 当 θ 变化较大时, LD 响应会出现一定程度的波动, 甚至表现出符号反转的现象。

然而, 在主要共振频率附近, 器件的 LD 响应仍保持相对稳定。

从器件集成角度看, 所提出的石墨烯基双功能手性超表面可作为太赫兹偏振探测系统中的前端偏振选择层, 与太赫兹探测器阵列或焦平面成像芯片集成。当石墨烯费米能级调节至 1 eV 并用于圆偏振检测时, 器件可利用 LCP 与 RCP 入射时的吸收差异实现左右旋圆偏振信号区分; 当石墨烯费米能级调节至 0.2 eV 并用于线偏振检测时, 器件可利用 x 偏振与 y 偏振入射时的吸收差异实现正交线偏振信号识别。已有研究表明, 将超表面偏振调控单元与探测器或成像芯片集成, 可实现片上偏振探测和多维光场信息获取, 为本文结构的进一步器件化提供了可行参考^[44]。

为了进一步展示所提出手性超表面的性能优势, 表 1 从工作波段、可调性、调控方式、器件结构、响应带宽以及 CD/LD 幅值方面, 将本文工作与近年来相关研究进行了对比。从表中可看出, 近年来已有部分研究实现了 CD 或 LD 的动态调控, 也有少数工作能够同时实现 CD 与 LD 响应^[45-50]。然而, 部分结构主要依赖固定几何设计, 缺少主动调控能力; 部分可调结构则需要引入 VO_2 、InSb 等温度敏感材料, 其响应调节通常依赖热相变或温度控制过程, 器件集成时需要考虑额外的热激励或控温条件。此外, 已有双功能结构在 CD/LD 幅值、响应带宽或工作频段方面仍存在一定限制。

表 1 与近年来报道的超表面的比较

Tab. 1 Comparison with recently reported metasurfaces

Ref.	Working band	Tunability	Modulation method	Device structure	Response bandwidth	CD	LD
[45]	Near-infrared	No	Fixed geometrical design	Au rectangular-hole array / SiO_2 spacer / Au mirror	CD peak near 880 nm	0.76	-
[46]	THz	Yes	VO_2 phase-transition modulation	VO_2 -integrated double-aperture metasurface	Switching at 2.68 THz; dual-band polarization-selective absorption	-	0.86
[47]	THz	Yes	Temperature-tunable InSb	Double-layer InSb chiral resonators / dielectric spacer / metal ground plane	CD peaks at 2.31 and 5.68 THz	0.89	-
[48]	Microwave	No	Fixed geometrical design	G-shaped split-ring resonator metasurface	CD peaks at 7.7, 8.3, 11.5 GHz; LD peak at 17.3 GHz	0.90	0.52
[49]	THz	Yes	Thermally driven VO_2 phase-transition modulation	VO_2 -filled Au split-ring resonator / polyimide spacer / Au ground plane	CD > 0.40: 0.60–0.72 THz; LD > 0.30: 0.61–0.74 THz	0.64	0.54
[50]	THz	Yes	VO_2 temperature modulation and graphene electrical modulation	Two-layer graphene metasurfaces / VO_2 film / Au substrate	PCR > 0.9: 2.89–4.02 THz; ellipticity > 0.9: 2.32–2.69 THz	0.71	0.60
This work	THz	Yes	Electrical modulation by tuning the graphene Fermi level	Graphene arc–Au split-ring resonator / Topas spacer / Au ground plane	CD > 0.6: 1.97–3.44 THz; LD peak at 1.91 THz	0.89	0.75

相比之下, 本文提出的石墨烯-金属混合超表面主要通过调节石墨烯费米能级实现电磁响应调

控, 不依赖热相变材料或机械重构过程。在不同入射偏振条件下, 该结构可分别表现出 CD 与 LD

响应, 其中 $CD > 0.6$ 的响应带宽达到 1.47 THz。同时, 器件采用三层平面反射型结构, 构型相对简洁, 易于加工实现。因此, 所提出结构的优势主要体现在电调控方式、双功能偏振响应、响应带宽和结构复杂度之间的综合平衡。

4 结 论

综上所述, 我们提出了一种基于石墨烯的双功能可切换太赫兹手性超表面结构, 并通过数值仿真分析了超表面在圆偏振与线偏振光入射条件

下的偏振响应特性。仿真结果表明, 在石墨烯费米能级为 1 eV 时, 该结构在 2.65 THz 表现出明显的圆二色性, 对应的 CD 幅值达到 0.89; 而在费米能级降至 0.2 eV 时, 结构在 1.91 THz 处则表现出明显的线二色性, 对应的 LD 幅值为 0.75。利用石墨烯载流子浓度的可调特性, 实现了对相应共振频率位置及偏振响应强度的连续调控。此外, 结合电场与电流分布对单波段偏振响应的物理机制进行了分析。最后, 通过结构参数变化及入射角条件下的响应分析, 验证了在一定参数范围内该结构的稳定性。

参考文献:

- [1] LI X R, LI J X, LI Y H, *et al.*. High-throughput terahertz imaging: progress and challenges[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 233.
- [2] VALUŠIS G, LISIAUSKAS A, YUAN H, *et al.*. Roadmap of terahertz imaging 2021[J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4092.
- [3] SONG H J, LEE N. Terahertz communications: challenges in the next decade[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2022, 12(2): 105-117.
- [4] GONG A P, QIU Y T, CHEN X W, *et al.*. Biomedical applications of terahertz technology[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2020, 55(5): 418-438.
- [5] WANG Z J, CHENG F, WINSOR T, *et al.*. Optical chiral metamaterials: a review of the fundamentals, fabrication methods and applications[J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(41): 412001.
- [6] TANG Y Q, COHEN A E. Optical chirality and its interaction with matter[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(16): 163901.
- [7] HENDRY E, CARPY T, JOHNSTON J, *et al.*. Ultrasensitive detection and characterization of biomolecules using superchiral fields[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(11): 783-787.
- [8] DENG Q M, LI X, HU M X, *et al.*. Advances on broadband and resonant chiral metasurfaces[J]. *npj Nanophotonics*, 2024, 1(1): 20.
- [9] GEORGI P, WEI Q S, SAIN B, *et al.*. Optical secret sharing with cascaded metasurface holography[J]. *Science Advances*, 2021, 7(16): eabf9718.
- [10] OVERVIG A C, SHRESTHA S, MALEK S C, *et al.*. Dielectric metasurfaces for complete and independent control of the optical amplitude and phase[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 92.
- [11] MA Q, HONG Q R, GAO X X, *et al.*. Smart sensing metasurface with self-defined functions in dual polarizations[J]. *Nanophotonics*, 2018, 9(10): 3271-3278.
- [12] VENKATESH S, LU X Y, SAEIDI H, *et al.*. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(12): 785-793.
- [13] 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.
- [14] YAN X F, XIE Y J, CHEN S, *et al.*. Brillouin zone folding metasurface for near perfect circular dichroism[J]. *Advanced Optical Materials*, 2024, 12(26): 2401027.
- [15] TANG H T, ROSENMAN D, CZAPLEWSKI D A, *et al.*. Dual-band selective circular dichroism in mid-infrared chiral metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 20063-20075.
- [16] 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 CH, 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).
- [17] WANG S J, QIN W T, GUAN T Y, *et al.*. Flexible generation of structured terahertz fields via programmable exchange-biased spintronic emitters[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 11.

- [18] CAI Y CH, ZHANG L, ZHANG J, *et al.*. Surpassing kilometer-scale terahertz wireless communication beyond 300 GHz enabled by hybrid photonic–electronic synergy[J]. *Light: Science & Applications*, 2026, 15(1): 228.
- [19] RUI Y J, ZHOU SH Y, TU X C, *et al.*. All-silicon low-loss THz temporal differentiator based on microring waveguide resonator platform[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2024, 5(2): 168-177.
- [20] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al.*. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666-669.
- [21] BONACCORSO F, SUN Z, HASAN T, *et al.*. Graphene photonics and optoelectronics[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(9): 611-622.
- [22] 宋效先, 张宇, 郭学文, 等. 双层石墨烯手性超表面实现圆二色性及其动态调控研究[J]. *光通信技术*, 2024, 48(5): 108-112.
SONG X X, ZHANG Y, GUO X W, *et al.*. Research on circular dichroism and dynamic control of bilayer graphene chiral metasurfaces[J]. *Optical Communication Technology*, 2024, 48(5): 108-112. (in Chinese).
- [23] KIM K H, CHO M C. Tunable multiband circular dichroism and asymmetric transmission enabled by chiral quasi-BICs in dielectric metasurfaces covered with graphene[J]. *Optical Materials*, 2024, 148: 114798.
- [24] ZHANG Y D, LIU H Q, XU R H, *et al.*. Tunable circular dichroism based on graphene-metal split ring resonators[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 21020-21030.
- [25] LIU H, DUAN S H, CHEN C, *et al.*. Graphene-enabled chiral metasurface for terahertz wavefront manipulation and multiplexing holographic imaging[J]. *Optical Materials*, 2024, 147: 114654.
- [26] QURESHI U U R, HU B, AHMAD M, *et al.*. Graphene-based triple-band tunable metasurface with strong circular dichroism for THz communication[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(24): 1375-1378.
- [27] LI J, ZHENG CH L, LI J T, *et al.*. Polarization-dependent and tunable absorption of terahertz waves based on anisotropic metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 3284-3295.
- [28] XU M J, YAN D X, WANG Y, *et al.*. Graphene-assisted dual-frequency third harmonic generation in nonlinear metamaterials for high-efficiency on-chip terahertz integration[J]. *Frontiers of Physics*, 2026, 21(4): 044201.
- [29] 余辰浩, 蒋豪光, 王逸论, 等. 线、圆二色性双功能可调谐全介质手征超表面设计[J]. *光学学报*, 2025, 2(22): 2201001.
YU CH H, JIANG H G, WANG Y L, *et al.*. Design of linear and circular dichroism dual-function tunable all-dielectric chiral metasurface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 2(22): 2201001. (in Chinese).
- [30] LI J, LI J T, YANG Y, *et al.*. Metal-graphene hybrid active chiral metasurfaces for dynamic terahertz wavefront modulation and near field imaging[J]. *Carbon*, 2020, 163: 34-42.
- [31] 张艺心, 邓仕杰, 刘厚权. 温控二氧化钒双波段太赫兹手性超表面吸收器[J]. *光学学报*, 2025, 45(9): 0926002.
ZHANG Y X, DENG SH J, LIU H Q. Thermally controlled vanadium dioxide dual-band terahertz chiral metasurface absorber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(9): 0926002. (in Chinese).
- [32] ZHU H L, ZHANG Y, YE L F, *et al.*. Switchable and tunable terahertz metamaterial absorber with broadband and multi-band absorption[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38626-38637.
- [33] WANG Q, PLUM E, YANG Q L, *et al.*. Reflective chiral meta-holography: multiplexing holograms for circularly polarized waves[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 25.
- [34] LIU SH, ZHANG H CH, ZHANG L, *et al.*. Full-state controls of terahertz waves using tensor coding metasurfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(25): 21503-21514.
- [35] LI X K, TANG SH W, DING F, *et al.*. Switchable multifunctional terahertz metasurfaces employing vanadium dioxide[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5454.
- [36] CABRAL P D, DOMINGUES T, MACHADO G, *et al.*. Clean-room lithographical processes for the fabrication of graphene biosensors[J]. *Materials*, 2020, 13(24): 5728.
- [37] SONG L ZH, SQUIRES A, VAN DER LAAN T, *et al.*. THz graphene-integrated metasurface for electrically reconfigurable polarization conversion[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(13): 2349-2359.
- [38] SQUIRES A D, GAO X, DU J, *et al.*. Electrically tuneable terahertz metasurface enabled by a graphene/gold bilayer structure[J]. *Communications Materials*, 2022, 3(1): 56.
- [39] LEE S H, CHOI M, KIM T T, *et al.*. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(11): 936-941.

- [40] 王俊瑶, 樊俊鹏, 舒好, 等. 基于石墨烯超表面的效率可调太赫兹聚焦透镜[J]. 光电工程, 2021, 48(4): 200319.
WANG J Y, FAN J P, SHU H, *et al.*. Efficiency-tunable terahertz focusing lens based on graphene metasurface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(4): 200319. (in Chinese).
- [41] GUSYNIN V P, SHARAPOV S G, CARBOTTE J P. AC conductivity of graphene: from tight-binding model to 2+1-dimensional quantum electrodynamics[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2007, 21(27): 4611-4658.
- [42] RUBIN N A, SHI ZH J, CAPASSO F. Polarization in diffractive optics and metasurfaces[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2021, 13(4): 836-970.
- [43] ARTEAGA O, CANILLAS A. Pseudopolar decomposition of the Jones and Mueller-Jones exponential polarization matrices[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(4): 783-793.
- [44] BAEK J, KIM J, SEOL J H, *et al.*. All-dielectric polarization-sensitive metasurface for terahertz polarimetric imaging[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 7544.
- [45] WU B Y, WANG M J, SUN Y S, *et al.*. Near-infrared chirality of plasmonic metasurfaces with gold rectangular holes[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2022, 5(3): 2527-2535.
- [46] JIANG H, WANG J Y, ZHAO S L, *et al.*. Active optical switch and polarization-selective absorption in a VO₂ based metasurface in THz region[J]. *Optics Communications*, 2023, 536: 129380.
- [47] RONG CH G, CAI B, CHENG Y ZH, *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.
- [48] QURESHI U U R, BASIR S. Dual-functional multiband metasurface for efficient circular and linear dichroism[J]. *Optical Materials*, 2024, 149: 115044.
- [49] QURESHI U U R, GUIZANI S, FARAZ F, *et al.*. Multifunctional THz chiral metasurfaces for optical dichroism and wavefront shaping[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2026, 154: 106394.
- [50] ZHANG X ZH, SUN A H, JIANG ZH L, *et al.*. Tunable and switchable multifunctional terahertz meta-mirror based on graphene and vanadium dioxide[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2024, 26(18): 13915-13922.

作者简介:



刘厚权 (1990—), 男, 广西桂林人, 博士, 副研究员, 2017年毕业于中山大学光学专业获理学博士学位。主要从事自由空间、单轴晶体、超表面和光纤端面等光场调控平台的新颖结构光场调控研究, 以及光纤传感研究。

E-mail: houquanliu@163.com