

线极化与圆极化波均可吸收的太赫兹超表面*

吴柔兰 李九生†

(中国计量大学太赫兹技术与应用研究所, 杭州 310018)

(2022年9月20日收到; 2022年12月12日收到修改稿)

利用 VO₂ 嵌入超表面设计了一种实现不同频率, 且线极化和圆极化两种模式入射下均产生高效率吸收的太赫兹超表面. 当 VO₂ 为绝缘态时, 设计的超表面对圆极化波的旋向产生选择性吸收, 在 1.30 THz 处对左旋圆极化波产生的吸收率大于 95%, 对右旋圆极化波不吸收, 圆二色性为 0.85. 当 VO₂ 为金属态时, 在 1.95 THz 处, 该超表面对 TE 线极化入射波吸收率达到 98.5%. 结果表明, 在线极化和圆极化波入射下, 所设计的超表面结构具有良好的广角吸收性能. 由于它具有形态简单、易于加工等特点, 在太赫兹波传感、成像和通信领域具有广阔的应用前景.

关键词: 太赫兹复合超表面, 线极化, 圆极化, 圆二色性

PACS: 78.20.Ci, 81.05.Xj, 87.50.U-

DOI: 10.7498/aps.72.20221832

1 引言

近年来超快激光技术的发展为太赫兹波脉冲的产生提供了稳定、可靠的激光光源, 使太赫兹波研究获得长足发展^[1]. 超表面作为一种新型二维人工超材料, 可以有效控制电磁波的透射、反射与极化等参量, 因此备受各国研究人员关注. 另外, 利用 VO₂^[2,3]、石墨烯^[4,5] 和铋化锑^[6,7] 等构建复合超表面结构可以实现对微波、太赫兹波和光波的动力学调控^[8-10]. 最近, 可调太赫兹吸收器作为太赫兹波调控器件之一, 引起研究人员广泛关注^[11,12]. 2018年, Hu 等^[13] 利用石墨烯构建不对称分裂环图案层获得多重共振, 实现太赫兹波双宽带吸收器. Yang 等^[14] 利用 8 个尺寸渐变的单元组成光栅结构实现对 TM 和 TE 两种偏振波在不同频率的高效吸收. 2019年, Yan 等^[15] 采用不同尺寸石墨烯方环设计了可调谐的双频点太赫兹吸收超表面. 2020年,

Divdel 等^[16] 利用希尔伯特分形结构设计出拥有多个吸收波段的太赫兹超表面吸收器, 吸收率大于 90%. 上述报道的超表面主要针对线极化太赫兹波入射实现吸收, 没有对圆极化入射到该类型超表面结构产生何种效果进行研究分析. 最近, Zhao 等^[17] 提出基于阿基米德螺旋结构设计超表面实现对左旋圆极化 (left-handed circularly polarized, LCP) 波吸收的同时也对右旋圆极化 (right-handed circularly polarized, RCP) 波产生完全反射. 2022年, Liang 等^[18] 利用 VO₂ 和石墨烯构建复合超表面结构通过改变 VO₂ 相变状态, 实现对圆极化波的非选择性完美吸收与选择性完美吸收功能可切换. VO₂ 是一种典型的温控相变材料, 其电导率在相变过程中会发生巨大突变. 当低于临界温度 (68 °C) 时, VO₂ 具有高电阻率和良好的绝缘性能, 而高于临界温度时, 电阻由高阻态变为低阻态且表现出金属特性. 因此, 将 VO₂ 嵌入超表面中组成复合超表面结构, 实现工作频点可切换, 非常有必要研究

* 国家自然科学基金 (批准号: 61871355, 61831012)、浙江省科技厅人才工程 (批准号: 2018R52043) 和浙江省重点研发项目 (批准号: 2021C03153, 2022C03166) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lijsh2008@126.com

VO₂ 复合型超表面的太赫兹特性.

本文提出一种 VO₂ 复合型超表面实现对线极化和圆极化太赫兹波高效吸收. 当 VO₂ 绝缘态 ($\sigma = 0$ S/m) 时, 在频率 1.3 THz 处, 所设计超表面对 LCP 波吸收率达到 95%, 对 RCP 波产生完全反射, 圆二色性 (CD) 为 0.85. 当 VO₂ 金属态 ($\sigma = 2 \times 10^5$ S/m) 时, 在频率 1.95 THz 处, 所设计超表面对 TE 线极化入射波的吸收率达到 98.5%. 研究发现该结构对线极化和圆极化入射波均能实现广角吸收, 有望为太赫兹的新型探测器和传感器设计提供多样性的选择.

2 结构设计与理论分析

本文提出的太赫兹吸收器结构, 如图 1 所示, 其工作频率可切换, 对线极化和圆极化入射的太赫兹波均产生完美吸收. 该复合超表面由嵌入 VO₂ 的金属图案层, 石英基体和金属底板组成. 利用 CST Microwave Studio 软件优化后复合超表面结构尺寸: 周期为 60 μm , $w_1 = 4$ μm , $w_2 = 1$ μm , 方环长度为 44 μm , 圆环外半径为 15 μm , $\theta = 70^\circ$, 石英基体厚度为 18.5 μm . VO₂ 的相对介电常数利用 Drude 模型可表示为^[19]

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \omega_p^2(\sigma)/(\omega^2 + i\gamma\omega), \quad (1)$$

式中, $\varepsilon_\infty = 12$, 碰撞频率 $\gamma = 5.75 \times 10^{13}$ rad/s, $\omega_p(\sigma)$ 为等离子体频率.

$$\mathbf{R}_{\text{circ}} = \begin{pmatrix} r_{++} & r_{+-} \\ r_{-+} & r_{--} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_{xx} + r_{yy} + i(r_{xy} - r_{yx}) & r_{xx} - r_{yy} - i(r_{xy} + r_{yx}) \\ r_{xx} - r_{yy} + i(r_{xy} + r_{yx}) & r_{xx} + r_{yy} - i(r_{xy} - r_{yx}) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中, r_{xx} (r_{yy}) 和 r_{xy} (r_{yx}) 分别为线性波入射下的共极化和交叉极化反射系数. 若所设计结构对 LCP 入射波完全吸收并对 RCP 入射波完全反射, 此时反射系数满足条件为 $r_{-} = r_{-} = r_{+-} = 0$, $r_{+} = 1$, 则线极化反射系数可表示为

$$\begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{yx} & r_{yy} \end{pmatrix} = \frac{e^{i\alpha}}{2} \begin{pmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中, α 为任意相. 若所设计的复合超表面结构要实现旋向吸波, 则该结构需满足

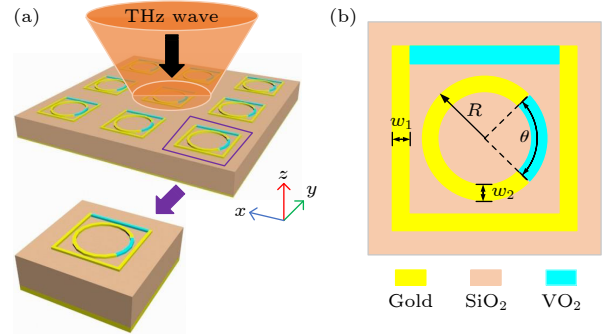


图 1 所设计的工作频率可切换, 对线极化和圆极化入射波均产生完美吸收的太赫兹吸收器结构示意图 (a) 三维结构图; (b) 单元俯视图

Fig. 1. Schematic diagram of the designed terahertz absorber with switchable operating frequency and perfect absorption for both linearly polarized and circularly polarized waves incidence: (a) 3D structure diagram; (b) top view of the unit.

当圆极化太赫兹波垂直入射到超表面结构时, 连接入射场 (E_R^i , E_L^i) 和反射场 (E_R^r , E_L^r) 的 Jones 矩阵可表示为^[20]

$$\begin{pmatrix} E_R^r \\ E_L^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{++} & r_{+-} \\ r_{-+} & r_{--} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_R^i \\ E_L^i \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{\text{circ}} \begin{pmatrix} E_R^i \\ E_L^i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中, r_{++} 和 r_{-+} 分别为右圆极化波入射下的共极化和交叉极化反射系数, r_{-} 和 r_{+} 为左圆极化波入射下的共极化和交叉极化反射系数. \mathbf{R}_{circ} 为圆极化的反射矩阵, 该矩阵由线极化反射系数表示为

$$\sin \varphi \begin{pmatrix} r_{xy} + r_{yx} & r_{yy} - r_{xx} \\ r_{yy} - r_{xx} & -r_{xy} - r_{yx} \end{pmatrix} = 0, \quad (5)$$

式中, φ 代表单元结构旋转一圈后出现与原始结构重合的角度. $\varphi = m\pi$ ($m = 0, \pm 1, \dots$), 说明只有二重对称结构才能实现对旋向入射波吸波. 除旋转对称结构外, 镜像对称结构若想实现旋向吸收性能, 需满足如下条件:

$$\sin(2\varphi)(r_{xx} - r_{yy}) + 2 \cos \varphi r_{xy} = 0. \quad (6)$$

由 (4) 式可知, 若 $(r_{xx} - r_{yy})/r_{xy}$ 为虚数, 将无法满 (6) 式中的镜像对称条件. 因此, 实现旋向选择吸收结构的同时必须打破旋转对称与镜像对称.

3 仿真结果分析

3.1 VO₂ 为绝缘态

图 2 表示 VO₂ 为绝缘态 ($\sigma = 0$ S/m) 时, LCP 波和 RCP 波入射到复合超表面结构时产生的电磁响应下曲线. 从图 2(a) 可以看出, LCP 波的共极化反射曲线 (r_{--}) 与 RCP 波的共极化反射曲线 (r_{++}) 一致, LCP 波的交叉极化反射 (r_{+-}) 与 RCP 波的交叉极化反射曲线 (r_{-+}) 有较大差别. 在频率 1.30 THz 处, $r_{+-} > 0.9$, 而 $r_{-+} < 0.1$, 结果表明在该频点处所设计超表面反射了大部分 RCP 波, 对 LCP 波不反射. 为了更加清楚地解释不同圆极化波之间的吸收差, 引入 CD 进行描述, 定义圆极化吸收率为

$$A_{\text{LCP}} = 1 - (r_{--})^2 - (r_{+-})^2, \quad (7)$$

$$A_{\text{RCP}} = 1 - (r_{++})^2 - (r_{-+})^2, \quad (8)$$

则 CD 表示为

$$\text{CD} = A_{\text{LCP}} - A_{\text{RCP}}. \quad (9)$$

从图 2(b) 可以明显观察到, 在频率 1.30 THz 处所设计的超表面结构对 LCP 入射波吸收率达到 95%, 但是对 RCP 入射波吸收率仅为 10%, 它的 CD 值为 0.85, 表明几乎所有入射 LCP 太赫兹波被吸收, 同时大部分入射 RCP 太赫兹波被反射. 图 3 是在 LCP 波和 RCP 波入射下, 顶层金属结构在 1.30 THz 处的电场和电流分布图. 由图 3(a) 和图 3(b) 可以看出, 当 RCP 太赫兹波入射时, 在方形缺口环和圆形缺口环的一侧存在单极共振, 但

是当 LCP 太赫兹波入射时, 圆形缺口环产生明显的偶极共振. 同样地, 从图 3(c) 和图 3(d) 可以看出, RCP 太赫兹波入射时圆环表面电流非常微弱, 而 LCP 太赫兹波入射时表面电流得到显著增强.

选取超表面结构参数线宽 w_1 , w_2 和间隙 θ 研究其对所设计超表面器件 CD 值的影响情况, 结果如图 4 所示. 图 4(a) 表示 w_1 从 2 μm 增加至 4 μm 时, 所设计超表面结构的 CD 只有微小变化, 这是由于 LCP 入射超表面时方形缺口环的电场能量较弱, 对 CD 值影响较小. 图 4(b) 表示随着 w_2 增加, 所设计超表面的 CD 峰值频率出现蓝移, 且峰值迅速减小, 在 $w_2 = 5 \mu\text{m}$ 处 CD 值接近于 0. 这是由于所设计的超表面结构谐振频率与缺口环等效的电容和电感成反比, 增加线宽会减小表面电流密度和等效电感, 从而使峰值频率发生蓝移. 图 4(c) 表示所设计超表面的 CD 峰值对应的频率同样随着 θ 增加发生明显蓝移, 这是因为圆环缺口可等效成电容, 当缺口角度不断增加时等效电容不断减小, 使得峰值频率向更高频方向移动.

图 5 讨论了太赫兹波斜入射角度对所设计超表面结构的圆极化吸收性能影响. 当太赫兹波以入射角 70° 入射时, 在频率 1.30 THz 处入射的 LCP 太赫兹波吸收率大于 80%, 如图 5(a) 所示, 结果表明所设计的超表面具有良好的广角圆极化吸收性能. 图 5(b) 表示当入射角为 70° 时, 在频率 1.30 THz 处, 所设计超表面的 CD 大于 0.7, 表明该超表面在大入射角情况下依旧能够保持着良好的旋向吸收性能.

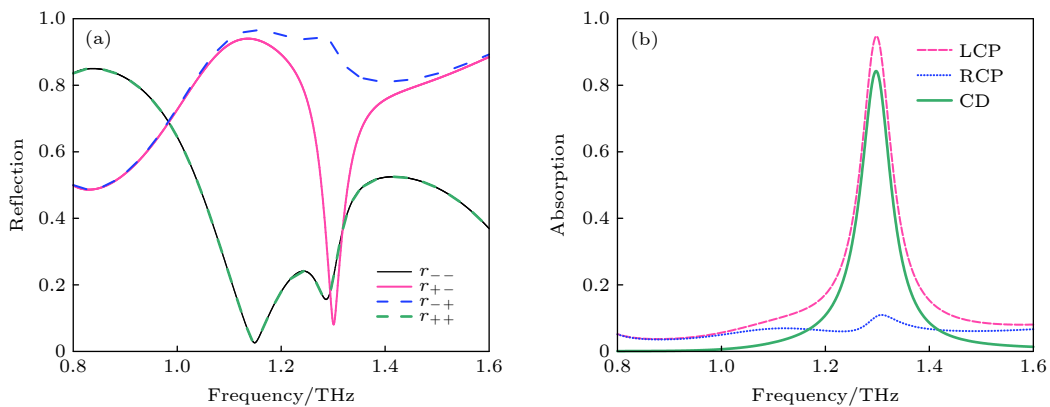


图 2 LCP 波和 RCP 波入射下所设计超表面结构的电磁响应曲线 (a) 反射系数; (b) 吸收率及圆二色性

Fig. 2. Electromagnetic response curves of the designed metasurface structures under the incident of LCP and RCP waves: (a) Reflection coefficient; (b) absorption and circular dichroism.

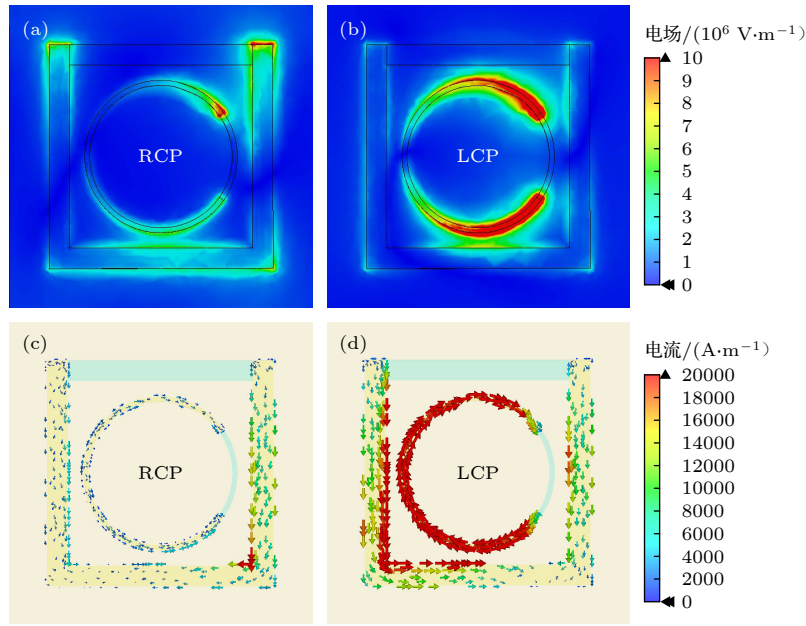


图3 LCP和RCP太赫兹波入射下的电场分布图与电流分布图 (a) RCP入射下的电场分布; (b) LCP入射下的电场分布; (c) RCP入射下的电流分布; (d) LCP入射下的电流分布

Fig. 3. Electric field distribution diagram and current distribution diagram under the LCP and RCP waves incidence: (a) Electric field distribution under RCP incidence; (b) electric field distribution under LCP incidence; (c) current distribution under RCP incidence; (d) current distribution under LCP incidence.

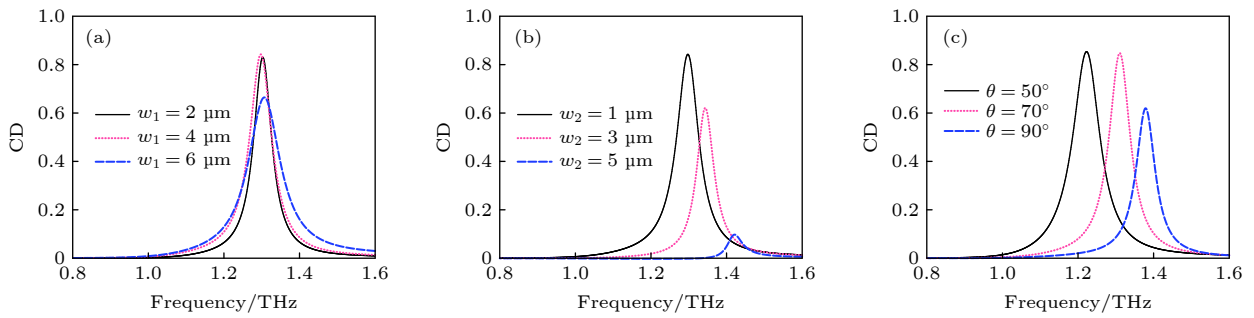


图4 不同结构参数对所设计超表面的CD影响情况 (a) 线宽 w_1 ; (b) 线宽 w_2 ; (c) 间隙 θ

Fig. 4. Influence of different structural parameters on the CD of the designed metasurface: (a) Line width w_1 ; (b) line width w_2 ; (c) angle θ .

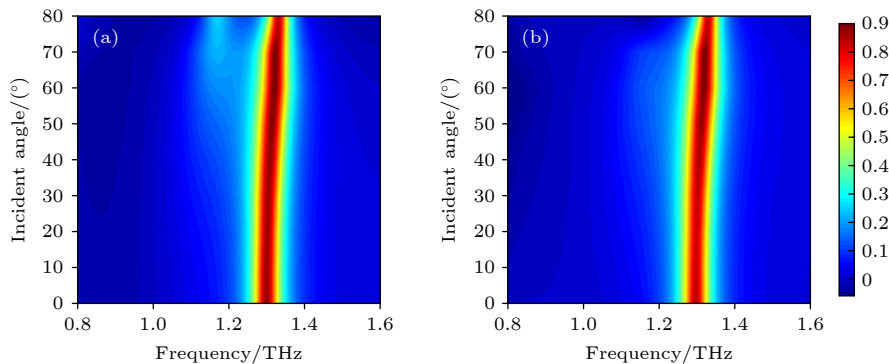


图5 入射角对所设计超表面的吸收特性影响 (a) LCP; (b) CD

Fig. 5. Incident angle *vs.* absorption properties of the designed metasurface: (a) LCP; (b) CD.

研究分析在频率 0.8—1.6 THz 内, 线性太赫兹波 (TE 极化波与 TM 极化波) 入射到所设计超

表面结构产生的吸收特性如图 6 所示. 从图 6(a) 可看出, TE 波入射下产生的共极化反射曲线 (r_{yy})

与 TM 波入射下产生的共极化反射曲线 (r_{xx}) 变化趋势一致, TE 波入射下产生的交叉极化反射 (r_{xy}) 与 TM 波入射下产生的交叉极化反射 (r_{yx}) 重叠. 在频率 1.30 THz 处, $r_{xx} = 0.35$, $r_{yy} > 0.53$. 如图 6(b) 所示, 所设计超表面结构在频率 1.30 THz 处对 TE 和 TM 入射波的吸收率分别为 43.86% 和 58.40%.

3.2 VO₂ 为金属态

当 VO₂ 为金属态 ($\sigma = 2 \times 10^5$ S/m) 时, LCP 和 RCP 太赫兹波入射到所设计的超表面结构时产生的电磁响应曲线见图 7. 图 7(a) 表示在 LCP 和 RCP 太赫兹波入射下所设计超表面结构产生的交叉极化反射和共极化反射曲线. 可见, 在频段 1.6—2.4 THz 内, 两种圆极化波对应的交叉极化和共极化反射曲线完全一致. 图 7(b) 为 LCP 与 RCP

太赫兹波入射到所设计超表面结构获得的电磁波吸收率, 在频率 1.95 THz 处吸收率大于 90%, 圆二色性 CD 值为 0, 此时所设计超表面结构表现为对不同偏振态的太赫兹波没有选择性吸收.

图 8 表示 TE 和 TM 波垂直入射所设计的超表面结构时产生的太赫兹波反射和吸收谱. 图 8(a) 中 TE 与 TM 极化波入射所设计的超表面结构的交叉反射系数 $r_{xy} = r_{yx} = 0$, 且在 1.95 THz 处, TM 极化波的共极化反射系数 $r_{xx} > 0.42$, TE 极化波的共极化系数 $r_{yy} = 0.12$. 图 8(b) 表示 TE 和 TM 波入射到所设计的超表面结构产生的吸收曲线, 在 1.95 THz 处, 吸收率分别为 98.5% 和 82.0%.

所设计的复合超表面结构对太赫兹波吸收率为 $A = 1 - RT = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$, 式中 R 和 T 分别为反射率和透射率, S_{11} 与 S_{21} 是超表面太赫兹波反射参数与透射系数. 由于该复合超表面结构的底

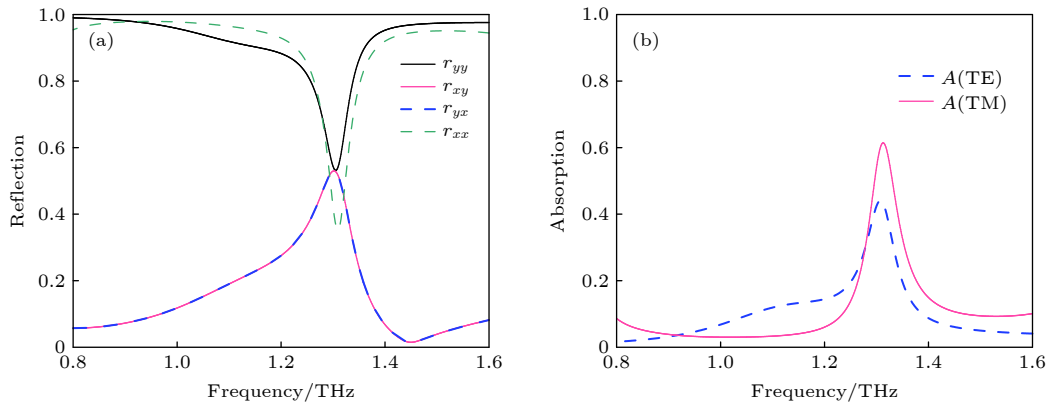


图 6 TE 波和 TM 波入射下所设计结构的电磁响应曲线 (a) 反射系数; (b) 吸收率

Fig. 6. Electromagnetic response curves of the designed structures under the incident of TE and TM waves: (a) Reflection coefficient; (b) absorption.

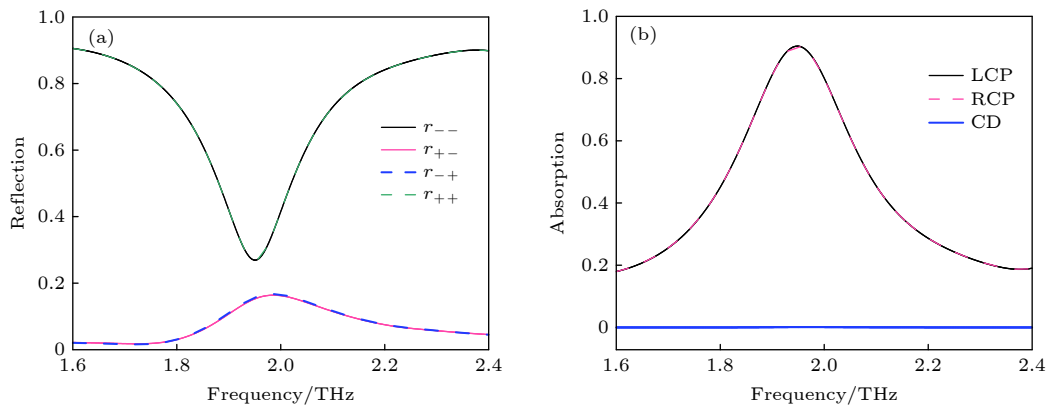


图 7 LCP 和 RCP 太赫兹波入射到所设计超表面结构产生的电磁响应曲线 (a) 反射系数; (b) 吸收率及圆二色性

Fig. 7. Electromagnetic response curves of the designed structures under LCP and RCP waves incidence: (a) Reflection coefficient; (b) absorption and circular dichroism.

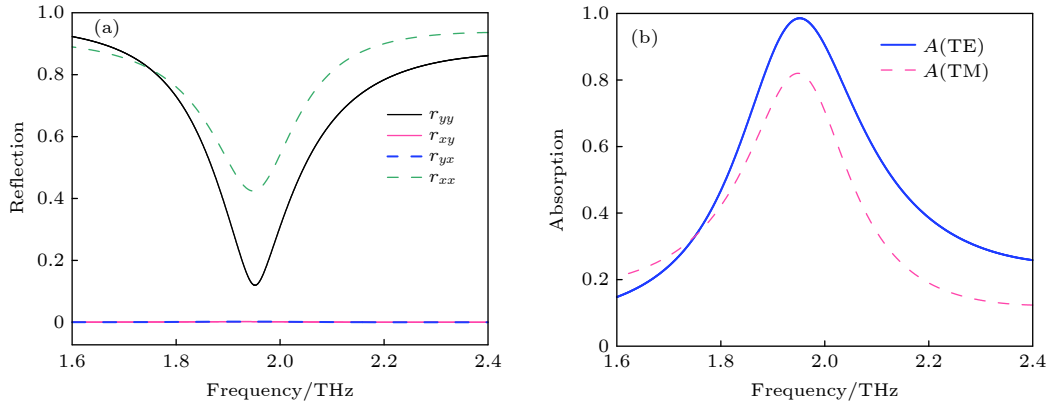


图 8 TE 和 TM 极化太赫兹波入射到复合超表面结构产生的电磁响应曲线 (a) 反射谱; (b) 吸收谱

Fig. 8. Electromagnetic response curves of TE and TM polarized terahertz wave is incident on the designed composite metasurface structure: (a) Reflection coefficient; (b) absorption coefficient.

层金属板厚度为 $1 \mu\text{m}$, 这远大于太赫兹波的趋肤深度, 因此太赫兹波的透射率为 0. 引入阻抗匹配理论^[21] 分析该复合超表面结构对太赫兹波的吸收特性:

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} = Z_1/Z_0, \quad (10)$$

式中, Z_1 表示复合超表面结构等效阻抗, $Z_0 = 120\pi \Omega$ 表示自由空间阻抗. 当等效阻抗与自由空间阻抗匹配时, $Z \approx 1$, 此时该结构可以实现完美吸收. 图 9 表示 TE 极化波入射到复合超表面时产生的吸收谱与等效阻抗特性. 在频率 1.95 THz 处, 复合超表面的等效阻抗实部为 1.29, 趋近于 1, 表明复合超表面在该频率可以实现太赫兹波的完美吸收. 由图 10 可见, 频率 1.95 THz 处 TE 极化波入射到所设计的复合超表面结构时产生的电场能量主要集中在圆环和方环上下侧间隙处, 此频率处的太赫兹波吸收峰是由方环和圆环的偶极共振效应叠加产生.

图 11 为线极化波入射下超表面复合结构的不同结构参数对太赫兹吸收性能影响情况. 图 11(a) 显示当 w_1 从 $2 \mu\text{m}$ 增加至 $6 \mu\text{m}$ 时, 复合超表面结构的太赫兹吸收峰出现轻微蓝移, 吸收率仍大于 90%. 图 11(b) 表示随着 w_2 增加, 复合超表面结构的太赫兹吸收峰出现蓝移, 吸收率逐渐降低. 由图 11(c) 可见, 复合超表面结构的吸收峰随着 R 增加产生红移现象. 研究表明当太赫兹波入射角从 0° 变化到 70° 时, 该复合超表面结构的太赫兹吸收率均大于 90%, 具有完美的广角吸收性能. 如图 12

所示, 当入射角大于 30° 时, 在更高频处产生了另外一个吸收峰, 并且随着入射角度继续增加, 该谐振频率也发生轻微红移, 这主要由超表面结构产生高阶模式共振所致.

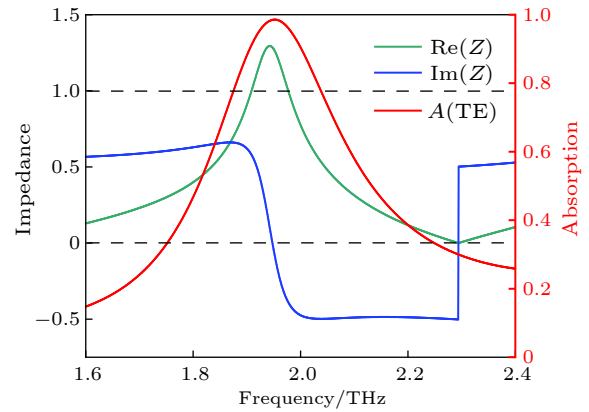


图 9 TE 波入射到复合超表面结构产生的等效阻抗实部与虚部

Fig. 9. Real and imaginary parts of the equivalent impedance of the designed composite metasurface structure under the TE wave incidence.

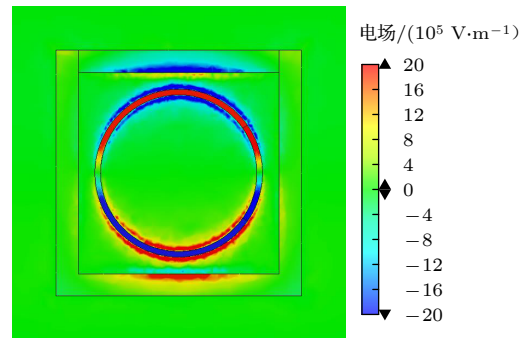


图 10 TE 波入射下, 复合超表面结构电场分布

Fig. 10. Electric field distribution of the designed composite metasurface structure under TE wave incidence.

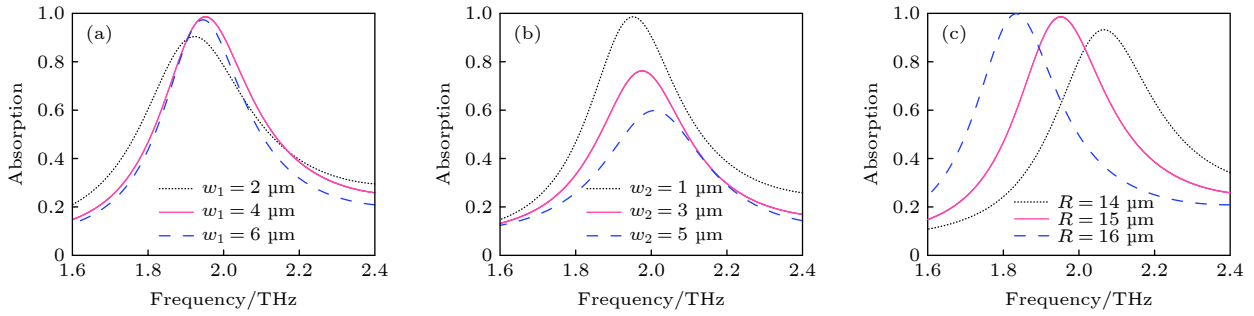


图 11 不同结构参数对线极化吸收影响 (a) w_1 ; (b) w_2 ; (c) R

Fig. 11. Influence of different structural parameters on linear polarization absorption: (a) w_1 ; (b) w_2 ; (c) R .

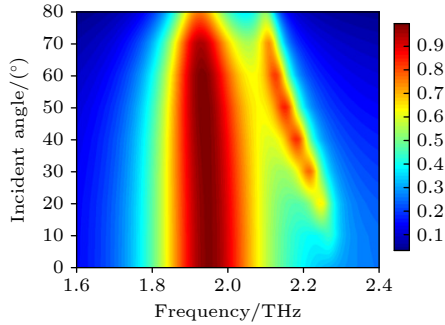


图 12 线极化太赫兹波入射条件下, 不同入射角对复合超表面结构吸收性能的影响

Fig. 12. Different incident angles *vs.* absorption performance of the designed metasurface composite structure under the linearly polarized terahertz wave incidence.

4 结 论

本文设计了一种 VO_2 嵌入式复合超表面结构, 可以实现对多个频率点的线极化和圆极化入射波完美吸收. 当 VO_2 绝缘态时, 该超表面能够在 1.30 THz 处实现对入射 LCP 太赫兹波的吸收, 同时对入射的 RCP 太赫兹波产生反射. 当 VO_2 为金属态时, 线极化波入射到超表面, 在频率 1.95 THz 处实现太赫兹波的完美吸收. 该结构对 TE 极化和 LCP 太赫兹波均具有良好的广角吸收性能. 该复合超表面结构能实现不同频率、不同偏振态的太赫兹波产生良好吸收效应, 所以该复合超表面结构的设计构思可用于其他超表面太赫兹器件设计, 而且由于对不同偏振信号的响应特征不同, 可以用于太赫兹成像与传感系统.

参考文献

- [1] Chen L, Liao D G, Guo X G, Zhao J Y, Zhu Y M, Zhuang S L 2019 *Front Inform. Technol. Electron. Eng.* **20** 591
- [2] Xu B L, Zhong R B, Liang Z K, et al. 2022 *Front Mater* **9** 881229
- [3] Zheng Z P, Luo Y, Yang H, et al. 2022 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **24** 8846
- [4] Zhang Y G, Qiu F, Liang L J, Yao H Y, Yan X, Liu W J, Huang C C, Yao J Q 2022 *Opt. Express* **30** 24703
- [5] Tang B, Ren Y 2022 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **24** 8408
- [6] Luo H, Wang X, Qian H 2021 *J. Opt. Soc. Am. B* **38** 2638
- [7] Aghili S, Amini A, Dizaj L S, Dolgaleva K 2022 *Opt. Commun.* **508** 127805
- [8] Zhu L, Zhao X, Miao F J, Ghosh B K, Dong L, Tao B R, Meng F Y, Li W N 2019 *Opt. Express* **27** 12163
- [9] Zhang Y D, Liu H Q, Xu R G, Qin Z J, Teng C X, Deng S J, Chen M, Cheng Y, Deng H C, Yang H Y, Qu S L, Yuan L B 2021 *Opt. Express* **29** 21020
- [10] Wang X Y, Ma C, Xiao L H, et al. 2022 *Appl. Opt.* **61** 1646
- [11] Li R, Pan M, Yi Z, Yu J X, Shi P C, Luo H, Wu P H, Yang H, Wang S F, Gao G C 2022 *Opt. Laser Technol.* **153** 108284
- [12] Chen X Y, Tian Z, Lu Y C, Xu Y H, Zhang X Q, Ouyang C M, Gu J Q, Han J G, Zhang W L 2020 *Adv. Optical Mater.* **8** 1900660
- [13] Hu N, Wu F L, Bian L A, Liu H Q, Liu P G 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 3899
- [14] Yang P, Han T C 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 107801 (in Chinese) [杨鹏 韩天成 2018 *物理学报* **67** 107801]
- [15] Yan D X, Li J S 2019 *Laser Phys.* **29** 046203
- [16] Divdel H, Taghipour-Farshi H, Saghai H R, Jahani M A T G 2020 *Opt. Eng.* **59** 127108
- [17] Zhao Y, Zeng L, Zhang X L, Ye H N, Zhang H F 2021 *J. Opt.* **23** 085102
- [18] Liang S, Zhu Z B, Jiang L Y 2022 *Eng. Res. Express* **4** 035006
- [19] Li Z W, Li J S 2021 *Appl. Opt.* **60** 2450
- [20] Mutlu M, Akosman A E, Serebryannikov A E, Ozbay E 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 213905
- [21] Wang T L, Zhang Y P, Zhang H Y, Cao M Y 2020 *Opt. Mater. Express* **10** 369

Terahertz metasurface absorbed by both linearly and circularly polarized waves^{*}

Wu Rou-Lan Li Jiu-Sheng[†]*(Center for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)**(Received 20 September 2022; revised manuscript received 12 December 2022)*

Abstract

In recent years, the development of ultrafast laser technology has provided a stable and reliable terahertz source for generating terahertz wave pulses, and the great research progress of terahertz wave has been made. As a new type of two-dimensional artificial metamaterial, metasurface can effectively control the transmission, reflection and polarization of electromagnetic waves, which has attracted the extensive attention. Most of the reported terahertz absorbers so far are based on metasurfaces with linear polarization incidence, and few studies have been conducted on terahertz metasurfaces that can produce efficient absorption at both linear and circular polarization incidence, which limits the practical application areas. Therefore, it is necessary to explore an efficient absorber which can realize both linear polarization and circular polarization. We propose a vanadium dioxide composite metasurface structure. The vanadium dioxide is a typical temperature-controlled phase change material, and its conductivity will undergo a huge mutation in the phase change process. When the temperature is lower than the critical temperature (68 °C), the vanadium dioxide has high resistivity and good insulation performance. When the temperature is higher than the critical temperature, the resistance changes from high resistance state to low resistance state, showing metal characteristics. By changing the external temperature, the phase of vanadium dioxide is changed, the free switching frequency is achieved and both the linear polarization and circular polarization incident efficient absorption are realized. When the vanadium dioxide is insulated, its conductivity is 0 S/m, the metasurface can absorb left-handed circularly polarized wave at 1.30 THz and reflect the incident right-handed circularly polarized wave, and the circular dichroism is 0.85. When the vanadium dioxide is metallic, its conductivity is 2×10^5 S/m and it possesses linearly polarized incident metasurface, the absorption rate of TE linearly polarized incident wave by metasurface reaches 98.5% at 1.95 THz, and the perfect absorption of terahertz wave is realized. The structure has good wide-angle absorption performance for both TE polarization wave and left-handed circularly polarized wave. This composite metasurface structure can achieve the good absorption effect of terahertz waves with different frequencies and different polarization states. Therefore, the design concept of the composite metasurface structure can be used for designing other metasurface terahertz devices, and also for implementing the terahertz imaging and sensing systems due to different response characteristics to different polarization signals.

Keywords: terahertz composite metasurface, linearly polarized, circularly polarized, circular dichroism

PACS: 78.20.Ci, 81.05.Xj, 87.50.U-

DOI: [10.7498/aps.72.20221832](https://doi.org/10.7498/aps.72.20221832)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61871355, 61831012), the Talent Project of Zhejiang Provincial Department of Science and Technology, China (Grant No. 2018R52043), and the Zhejiang Key R & D Project of China (Grant Nos. 2021C03153, 2022C03166).

[†] Corresponding author. E-mail: lijsh2008@126.com



线极化与圆极化波均可吸收的太赫兹超表面

吴柔兰 李九生

Terahertz metasurface absorbed by both linearly and circularly polarized waves

Wu Rou-Lan Li Jiu-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 057802 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221832

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221832>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平面复合金属微纳结构的圆二色性研究

Studies of circular dichroism of planar composite metal nanostructure arrays

物理学报. 2020, 69(10): 107802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200130>

基于复合超构表面的宽带圆极化双功能器件设计

Wideband circularly-polarized bifunction devices employing composite metasurfaces

物理学报. 2021, 70(2): 027803 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201150>

蜂窝状椭圆孔洞吸收器圆二色性研究

Circular dichroism of honeycomb-shaped elliptical hole absorber

物理学报. 2020, 69(20): 207101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200843>

相变材料与超表面复合结构太赫兹移相器

Terahertz phase shifter based on phase change material-metasurface composite structure

物理学报. 2021, 70(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201495>

超精细结构效应对辐射光谱圆极化特性的影响

Hyperfine structure effect on circular polarization of X-ray radiation

物理学报. 2018, 67(19): 193401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180322>

基于超表面的多波束多模态太赫兹涡旋波产生

Multi-beam multi-mode vortex beams generation based on metasurface in terahertz band

物理学报. 2021, 70(18): 188701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210897>