

透反双模态极化转换与超宽带吸收功能 可调控太赫兹超表面理论设计*

王丹 李九生[†] 熊日辉

(中国计量大学太赫兹研究所, 杭州 310018)

(2024年12月24日收到; 2025年3月17日收到修改稿)

本文提出一种新型超表面结构, 通过改变工作温度能够实现透反双模态极化转换与超宽带吸收等功能切换. 当二氧化钒 (VO_2) 为金属态且碲化锗 (GeTe) 为晶态时, 太赫兹波沿 $-z$ 方向入射, 该超表面在 7.96—17.76 THz 频带表现为超宽带吸收器, 吸收率大于 90%. 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射, 该超表面在 2.04—4.44 THz 频带表现为对 x - y -偏振波的反射极化转换, 极化转换率大于 0.9. 当 VO_2 为介质态且 GeTe 为非晶态时, 该超表面在 0.65—5.07 THz 频带表现为对 x 偏振波的透射极化转换, 极化转换率大于 0.9. 研究表明, 该超表面结构对太赫兹波操控具有双向、可切换和多功能特点, 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: 反射极化转换, 透射极化转换, 超宽带吸收, 超表面**PACS:** 87.50.U-, 74.25.Uv, 03.65.Vf**DOI:** 10.7498/aps.74.20241762**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241762

1 引言

太赫兹超表面可以灵活地调节电磁波的频率、偏振、振幅和相位^[1,2], 被广泛应用于各种功能器件. 具有固定谐振频率和单一功能的太赫兹超表面未能满足当前技术发展日益增长的要求. 因此, 由活性材料组成的可切换多功能太赫兹超表面引起了广泛关注. 为了实现多种功能的集成, 可调材料如石墨烯^[3]、光敏硅^[4]、二氧化钒 (VO_2)^[5] 和碲化锗 (GeTe)^[6] 等被引入超表面中. 2022年, Chen等^[7] 提出石墨烯超表面结构, 通过控制石墨烯费米能级实现宽带与三频点吸收功能. 2023年 Jiang等^[8] 设计了一种石墨烯和光敏硅复合超表面, 改变光敏硅电导率实现宽带吸收与透射式极化转换等功能. 2024年, Phan等^[9] 构建了一种水基超表面, 实现

宽带吸收和反射式极化转换. 同年, Zhang等^[10] 利用 VO_2 介质设计了一种具有宽带吸收和反射式极化转换功能的太赫兹超表面, 当 VO_2 为金属态时, 在 1.485—3.575 THz 范围内, 该超表面的吸收率大于 90%; 当 VO_2 为介质态时, 在 1.1—3.2 THz 范围内, 反射式极化转换率超过 90%. 上述研究成果主要关注于单向传输太赫兹波极化转换与宽带吸收功能.

本文提出一种 VO_2 和 GeTe 复合超表面, 通过改变工作温度使 VO_2 和 GeTe 的相态发生变化, 实现超宽带吸收和透反双模态的双偏振转换功能. 当 VO_2 为金属态且 GeTe 为晶态时, 太赫兹波沿 $-z$ 方向入射, 该超表面可作为宽带吸收器, 在 7.96—17.76 THz 频段范围内吸收率大于 90%, 吸收带宽达到 9.8 THz; 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射, 该超表面表现为反射型极化转换器, 在 2.04—4.44 THz 频

* 国家自然科学基金 (批准号: 62271460, 62435017) 和浙江省自然科学基金重点项目 (批准号: LZ24F050005) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lijsh2008@126.com

段内, x 和 y 偏振波的极化转换率超过 0.9, 带宽为 2.4 THz. 当 VO_2 为介质态且 GeTe 为非晶态时, 该超表面可作为透射型极化转换器, 在 0.65—5.07 THz 频段内, 极化转换率 PCR_x 大于 0.9. 在不同电磁波入射角下, 该超表面也可以保持良好的吸收和极化转换稳定性, 可在太赫兹光开关、电磁隐身技术、调制器和通信系统等方面具有广泛的应用前景.

2 超表面结构

图 1 为 VO_2/GeTe 复合超表面结构示意图, 从上到下依次为 VO_2/Gold 复合图案层-PCS(光子晶体)介质层-光栅层-二氧化硅 (SiO_2) 介质层- GeTe/Gold 复合图案层, 中间光栅层由 GeTe 和 Gold 间隔组成. GeTe 为非晶态时, 介电常数和电导率分别设置为 63 S/m 和 10 S/m, GeTe 为晶态时, 介电常数和电导率分别设置 1 S/m 和 4.1×10^5 S/m^[11]. 仿真优化计算得到超表面结构参数为: $l_1 = 25 \mu\text{m}$, $l_2 = 17 \mu\text{m}$, $l_3 = 11.5 \mu\text{m}$, $w_1 = 2.5 \mu\text{m}$, $w_2 = 0.2 \mu\text{m}$, $w_3 = 3 \mu\text{m}$, $w_4 = 18 \mu\text{m}$, $R_1 = 13 \mu\text{m}$, $R_2 = 9 \mu\text{m}$, 金电导率为 4.561×10^7 S/m, VO_2/Gold 复合图案层厚度为 $0.1 \mu\text{m}$, 中间光栅层厚度和底部 GeTe/Gold 复合图案层厚度均为 $0.2 \mu\text{m}$, PCS 介质厚度为 $5.2 \mu\text{m}$, 介电常数为 1.56^[12], SiO_2 介质层厚度为 $10 \mu\text{m}$, 介电常数为 3.75, 损耗正切值为 0.0004^[13]. VO_2 在太赫兹频段内的相对介电常数可以通过 Drude 模型^[14] 来表示:

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

式中, 高频极限介电常数 $\varepsilon_\infty = 12$, 碰撞频率 $\gamma = 5.75 \times 10^{13}$ rad/s, $\omega_p(\sigma)$ 是依赖于电导率 σ 的等离子体频率, $\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0)$, $\sigma_0 = 3 \times 10^5$ S/m, $\omega_p(\sigma_0) = 1.45 \times 10^{15}$ rad/s. 当 $\sigma = 20$ S/m 时, VO_2 为介质态; 当 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m 时, VO_2 为金属态.

3 结果与讨论

3.1 超宽带吸收功能

当 VO_2 为金属态 ($\sigma_{\text{VO}_2} = 2 \times 10^5$ S/m) 且 GeTe 为晶态 ($\sigma_{\text{GeTe}} = 4.1 \times 10^5$ S/m), 太赫兹波沿 $-z$ 方向入射, 中间光栅层均为金属, 与上面的 PCS 介质层和 VO_2/Gold 复合图案层一起形成太赫兹波吸收器. 超表面的吸收率可表示为: $A = 1 - R - T$, 式中, $R = |S_{11}|^2$; $T = |S_{21}|^2$, 其中 S_{11} 和 S_{21} 分别为反射系数和透射系数. 当太赫兹波透射率为 $T = 0$ 时, 吸收率的表达式可以简化为: $A = 1 - R$. 根据阻抗匹配理论超表面结构的等效阻抗可以表示为^[15]

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}. \quad (2)$$

计算得到该超表面的太赫兹波吸收响应曲线与阻抗特性如图 2 所示. 图 2(a) 中的实线和虚线分别代表吸收器在 x -/ y -偏振波入射下的吸收曲线, 可以看到在 7.96—17.76 THz 频带范围内, 该超表面对 x -/ y -偏振波的透射均为 0, 而对太赫兹波的

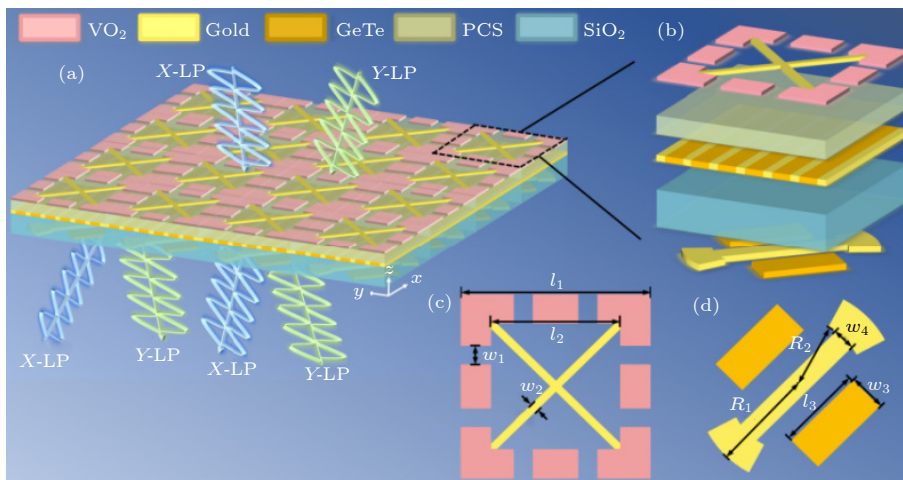


图 1 太赫兹超表面阵列示意和单元结构图 (a) 超表面结构示意图; (b) 单元结构; (c) 顶层图案俯视图; (d) 底层图案俯视图
Fig. 1. Schematic of the array and cell structure of terahertz metasurface: (a) Schematic of the terahertz metasurface; (b) cell structure; (c) top view; (d) bottom view.

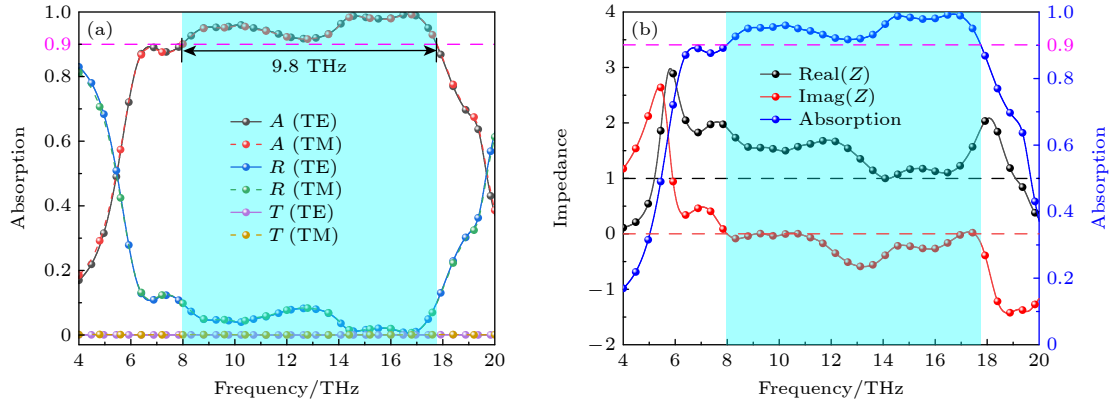


图 2 太赫兹波沿 $-z$ 方向入射时超表面电磁响应曲线 (a) 吸收、反射和透射曲线; (b) 等效阻抗实部和虚部曲线

Fig. 2. Electromagnetic response curves of the metasurface for terahertz waves incident along the $-z$ direction: (a) Absorption, reflection, and transmission curves; (b) equivalent impedance real and imaginary curves.

反射小于 0.1, 从而在该频段内超表面对太赫兹波的吸收大于 0.9, 吸收带宽可达到 9.8 THz, 相对带宽为 76.2%. 超表面结构对这两种偏振态太赫兹波的吸收效果完全相同, 表明该结构具有极化不敏感特性. 从图 2(b) 可看出, 在 7.96—17.76 THz 范围内, 阻抗实部接近 1, 虚部接近 0, 表明该吸收器的阻抗与自由空间的阻抗相匹配, 并且在该频段范围内, 该超表面吸收器对入射电磁波的反射接近于零, 实现近乎完美的吸收.

为了探究超表面结构各个组成部分对太赫兹波吸收性能影响, 分别对四角、四边以及十字架等各种组合图案的太赫兹波吸收特性进行仿真, 结果见图 3. 在 5.28—8.55 THz 和 13.97—16.15 THz 范围内, 图中蓝色曲线 (四角图案) 的吸收率较高; 而在 8.55—13.97 THz 范围内, 图中红色曲线 (四边图案) 的吸收率较高, 单独使用这两个结构都无法满足超宽带和高吸收率要求, 如果对这两个图案进行组合 (绿色曲线) 时, 从绿色曲线可以看出该组合结构表现出对太赫兹波超宽带吸收, 但吸收效率偏低. 在组合结构的中间增加十字架结构, 通过共振效应来提高吸收效率. 从黑色曲线可以看出, 吸收率在 90% 以上的带宽达到了 9.8 THz, 对应的相对带宽达到了 76.2%. 同时, 可以看到在 10.08, 14.61 和 16.70 THz 频率处有 3 个吸收峰, 它们的吸收率分别为 95.95%, 98.78% 和 99.34%.

图 4 为本文设计的新型超表面在 TE 和 TM 模式下不同谐振频点的电磁场能量分布. 图 4(a)—(c) 为 TE 模式下在频率 10.08, 14.61 和 16.70 THz 处超表面结构的电场分布俯视图. 从图 4 可以看出, 在 10.08 THz 频点处, 电场主要集中在上下边

矩形谐振器的内侧以及四角谐振器内侧, 还有少部分能量分布在中间十字架谐振器上. 这意味着第 1 个谐振频点是由上下边矩形谐振器、四角谐振器以及中间十字架谐振器之间的相互作用引起. 在 14.61 THz 频点处, 超表面结构在四角谐振器内侧表现出较强的电场, 少部分能量分布在上下边矩形谐振器内侧, 从而产生较强的太赫兹波吸收, 表明该谐振频点主要是由四角谐振器内侧 4 个角激发的电偶极子共振引起. 在 16.70 THz 频点处, 电场主要集中在各个谐振器的边缘, 这主要是由于两个相邻单元之间和各个谐振器之间耦合效应引起.

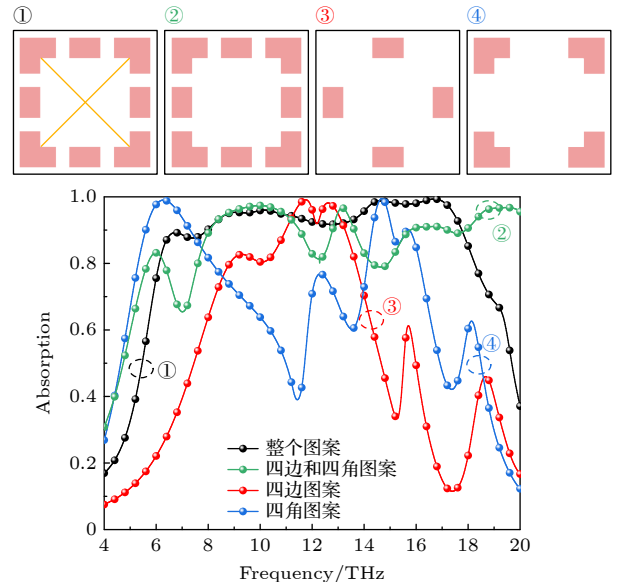


图 3 太赫兹波沿 $-z$ 方向入射时不同组合图案对应的太赫兹波吸收曲线

Fig. 3. Terahertz wave absorption curves corresponding to different combinations of patterns when terahertz waves are incident along the $-z$ direction.

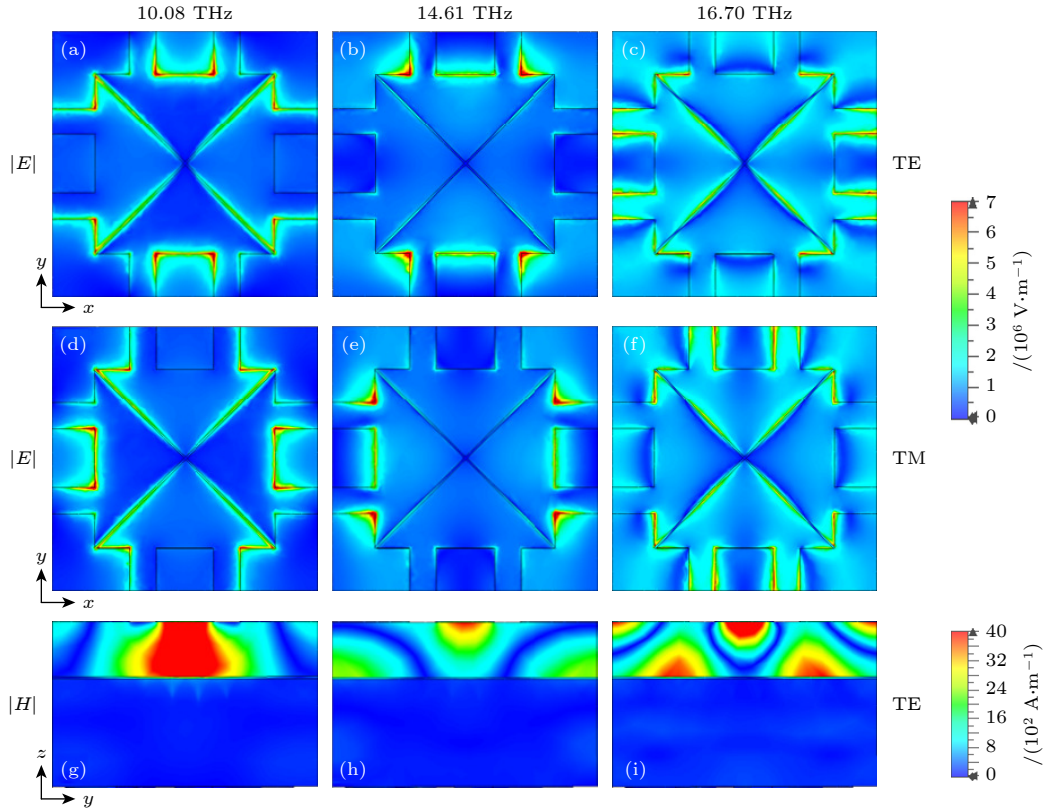


图 4 太赫兹波沿 $-z$ 方向入射吸收器谐振频点处的电磁场分布 (a)–(c) TE 模式和 (d)–(f) TM 模式下, 谐振频点处的电场分布俯视图; (g)–(i) TE 模式下, 谐振频点处的磁场分布侧视图

Fig. 4. Electromagnetic field distribution at the resonant frequency points of the absorber for a terahertz wave incident along the $-z$ direction. Top view of the electric field distribution at the resonant frequency point in (a)–(c) TE mode and (d)–(f) TM mode; (g)–(i) side view of the magnetic field distribution at the resonant frequency point in TE mode.

图 4(d)–(f) 为吸收器在 10.08, 14.61 和 16.70 THz 频点处 TM 模式的电场分布图, 与 TE 模式下的电场分布相似, 只是旋转了 90° . 图 4(g)–(i) 表示 TE 模式下 10.08, 14.61 和 16.70 THz 处超表面结构的磁场分布侧视图. 10.08 THz 处的磁场主要分布在 PCS 介质中, 由局域表面等离子体共振引起. 14.61 THz 和 16.70 THz 频点处大量磁场存在顶层图案和 PCS 介质之间以及光栅层和 PCS 介质层之间, 由传播表面等离子体共振引起. 结果表明, 入射的太赫兹波激发谐振层的电偶极子共振和表面等离子体共振 (局域表面等离子体共振和传播表面等离子体共振), 并以欧姆损耗的形式转化为热能, 从而增强了吸收器内部的吸收, 使其成为完美的宽带吸收器.

太赫兹波沿 $-z$ 方向入射, 所设计超表面结构对太赫兹波吸收随工作频率和入射角变化关系如图 5(a), (b) 所示. 当 x 偏振波入射时, 0° – 40° 入射角范围内该超表面具有相对稳定的吸收率和吸收带宽, 吸收率保持大于 80%. 随着入射角的增大,

工作带宽逐渐变宽并向高频移动, 但吸收峰值逐渐降低. 这是由于当入射角增至一定值时, 沿 x 轴方向的电磁场分量逐渐减弱, 最后不再引起电偶极子共振和表面等离子体共振所造成的. 当 y 偏振波入射角从 0° 增至 60° 时, 超表面仍具有较稳定的吸收性能, 在 7.96–17.76 THz 范围内吸收性能大于 80%. 图 5(c) 为 x 偏振波吸收率随太赫兹频率和极化角变化关系, 在极化角 0° – 90° 变化时该超表面结构对太赫兹波的吸收保持不变. 这表明所设计超表面具有较宽的入射角特性和极化不敏感特性.

3.2 极化转换功能

3.2.1 x/y 双偏振波反射模态极化转换

当 VO_2 为金属态 ($\sigma_{\text{VO}_2} = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$) 且 GeTe 为晶态 ($\sigma_{\text{GeTe}} = 4.1 \times 10^5 \text{ S/m}$), 中间光栅层均为金属. 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射, 电磁波穿过底部的 GeTe/Gold 复合图案层和 SiO_2 介质层, 到达中间光栅层并被反射回来, 转化为另一模式极化波. 因此, 该超表面可实现线-线 (LP-LP) 反射

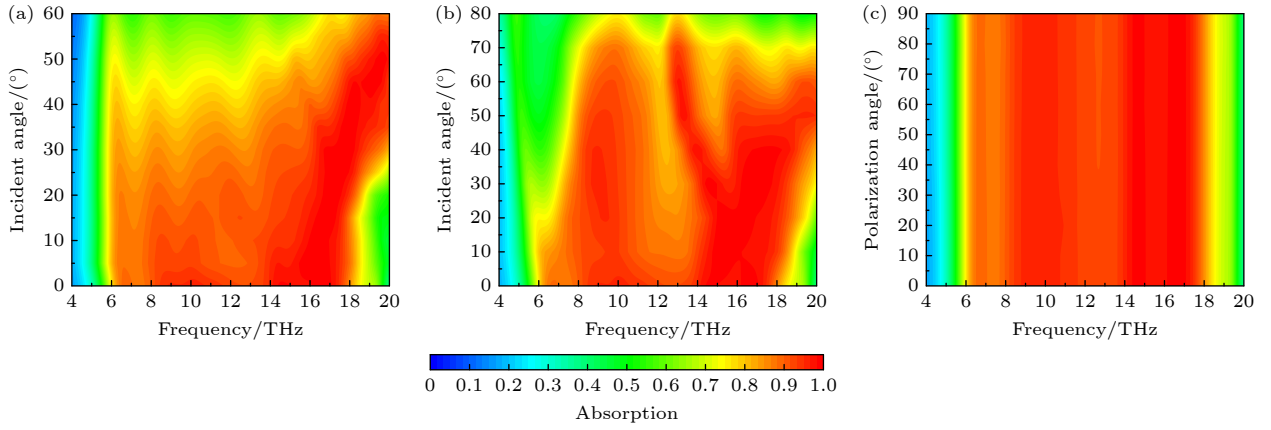


图5 太赫兹波沿 $-z$ 方向入射时入射角与极化角对吸收性能的影响 (a) TE模式和(b) TM模式下,不同入射角对吸收性能的影响;(c)不同极化角对吸收性能的影响

Fig. 5. Effect of incidence angle and polarization angle on absorption performance for terahertz waves incident along $-z$ direction: Effect of different incidence angles on the absorption performance in (a) TE mode and (b) TM mode; (c) effect of different polarization angles on the absorption performance.

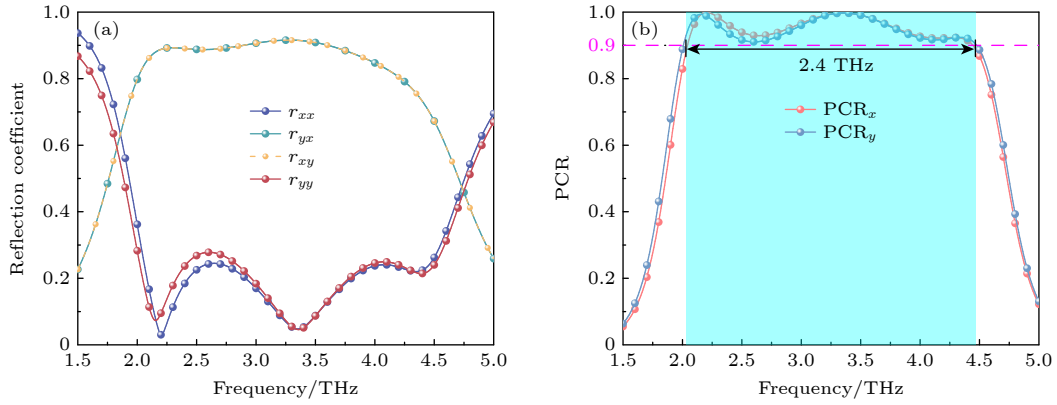


图6 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射下超表面的电磁响应曲线 (a) 反射系数;(b) 极化转换率 PCR

Fig. 6. Electromagnetic response curves of the metasurface under the incidence of terahertz waves along the $+z$ direction: (a) Reflection coefficient; (b) polarization conversion rate PCR.

极化转换功能. 通常反射型 LP-LP 转换效率用极化转换率 (PCR) 表示为^[16]

$$\text{PCR}_x^r = \frac{|r_{yx}|^2}{|r_{yx}|^2 + |r_{xx}|^2}, \quad \text{PCR}_y^r = \frac{|r_{xy}|^2}{|r_{xy}|^2 + |r_{yy}|^2}, \quad (3)$$

式中, r_{xx} 和 r_{yy} 为共极化反射系数, r_{xy} 和 r_{yx} 为交叉极化反射系数.

图6(a)表示太赫兹波沿 $+z$ 方向入射到超表面结构的交叉极化反射曲线和共极化反射曲线. 从图6可以看出,在2.04—4.44 THz频段内,交叉极化反射系数(r_{yx} 和 r_{xy})的幅值大于0.8,共极化反射系数(r_{xx} 和 r_{yy})小于0.3. 计算得到极化转换率PCR如图6(b)所示. 可见,在2.04—4.44 THz频段内, x 和 y 偏振波入射下该结构的极化转换率 PCR_x 和 PCR_y 大于0.9,相对带宽为74.1%. 其中,在频

点2.20 THz和3.35 THz, PCR_x 高达1;在2.16 THz和3.35 THz处, PCR_y 可达到1. 结果表明,该超表面实现了 x 偏振波和 y 偏振波的高效极化转换调控.

研究太赫兹波极化角对极化转换率PCR影响如图7所示,可以看出 $x(y)$ 偏振波极化角从 0° 变化到 90° 时极化转换率 PCR_x (PCR_y)的变化. 当入射 $x(y)$ 偏振波的极化角从 0° 增至 90° 时,太赫兹波的极化特性由 $x(y)$ 偏振变为 $y(x)$ 偏振. 由于设计的超表面对称特性,该结构对具有 x 偏振和 y 偏振的入射太赫兹波具有相同的响应. 图8表示太赫兹波入射角对极化转换率PCR影响. 从图8(a)可以看到,在2.04—4.44 THz频段内, x 偏振波入射角从 0° 增至 45° 时, PCR_x 值大于80%,当入射角增至 60° , PCR_x 值逐渐降低,但在频点2.26 THz

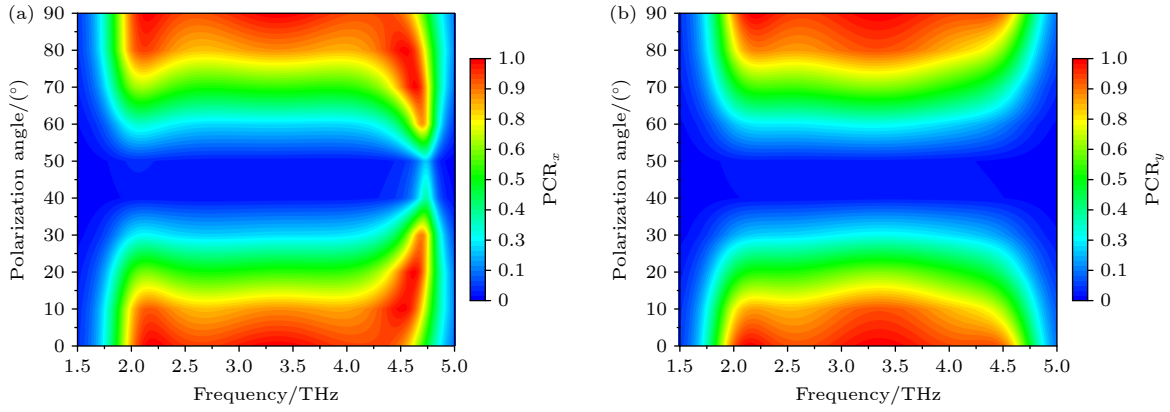


图 7 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射下,不同极化角对 PCR 影响 (a) x 偏振波入射下,不同极化角对 PCR 影响; (b) y 偏振波入射下,不同极化角对 PCR 影响

Fig. 7. Effect of different polarization angles on PCR under the incidence of terahertz waves along the $+z$ direction: (a) Effect of different polarization angles on PCR under x -polarized wave incidence; (b) the effect of different polarization angles on PCR under y -polarized wave incidence.

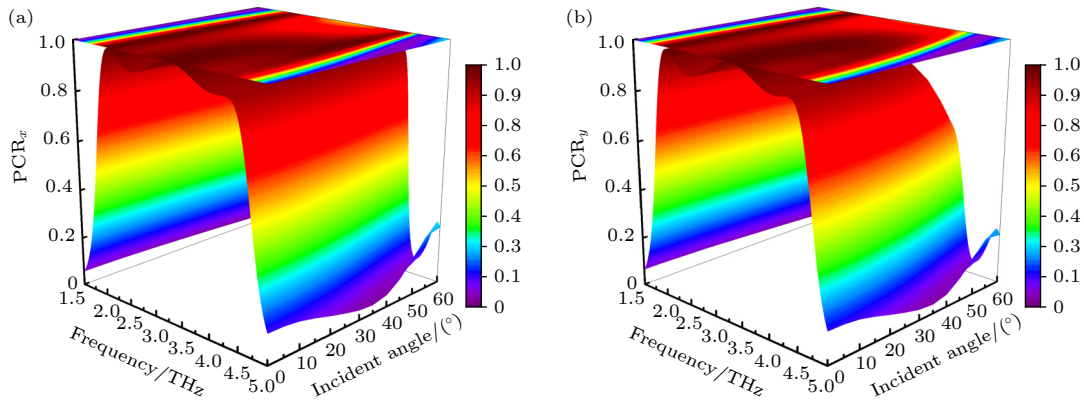


图 8 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射下,不同入射角对 PCR 影响 (a) x 偏振波入射下,不同入射角对 PCR 影响; (b) y 偏振波入射下,不同入射角对 PCR 影响

Fig. 8. Effect of different incidence angles on PCR under the incidence of terahertz waves along the $+z$ direction: (a) Effect of different incidence angles on PCR under x -polarized wave incidence; (b) the effect of different incidence angles on PCR under y -polarized wave incidence.

和 4.26 THz 处 PCR_x 仍然大于 90%. 图 8(b) 表示在 2.04—4.44 THz 范围内, y 偏振波入射角在 0° — 50° 范围内, 极化转换率 PCR_y 仍大于 80%, 甚至在频点 2.23 THz 处, PCR_y 接近于 1. 结果表明所设计超表面结构对入射角不敏感, 具有良好的宽入射角特性.

以 x 偏振波入射为例, 研究超表面结构参数对极化转换率 PCR_x 影响, 选取超表面结构底层图案中的矩形谐振器宽度 w_3 , w_4 和圆环外内环半径 R_1 , R_2 四个参数进行讨论. 图 9(a) 表示随着 w_3 的增大, 低频段内 PCR_x 值逐渐变高, 而相对较高频段内 PCR_x 值逐渐变低, 当 $w_3 = 3 \mu\text{m}$ 时, PCR_x 在整个工作频段内都大于 90%. 当 w_4 从 $1 \mu\text{m}$ 增至 $5 \mu\text{m}$, 工作带宽向高频段展宽, PCR_x 值先升高

后降低 (见图 9(b)). 图 9(c) 表示外环半径 R_1 从 $10 \mu\text{m}$ 增至 $14 \mu\text{m}$ 时, PCR_x 值逐渐升高, 并且工作带宽向低频段展宽, 要保证性能和工作带宽最优, 选取 R_1 为 $13 \mu\text{m}$ 最佳. 从图 9(d) 可以看出, 随着内环半径 R_2 从 $7 \mu\text{m}$ 增至 $11 \mu\text{m}$, PCR_x 值几乎不受影响, 工作带宽也不变. 最终优化后选取超表面参数: $w_3 = 5 \mu\text{m}$, $w_4 = 3 \mu\text{m}$, $R_1 = 13 \mu\text{m}$, $R_2 = 9 \mu\text{m}$.

3.2.2 x 偏振波透射模态极化转换

当 VO_2 为介质态 ($\sigma_{\text{VO}_2} = 20 \text{ S/m}$) 且 GeTe 为非晶态 ($\sigma_{\text{GeTe}} = 10 \text{ S/m}$), 中间层为金属光栅. 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射, 电磁波穿过底部的 GeTe/Gold 复合图案层和 SiO_2 介质层, y 偏振波

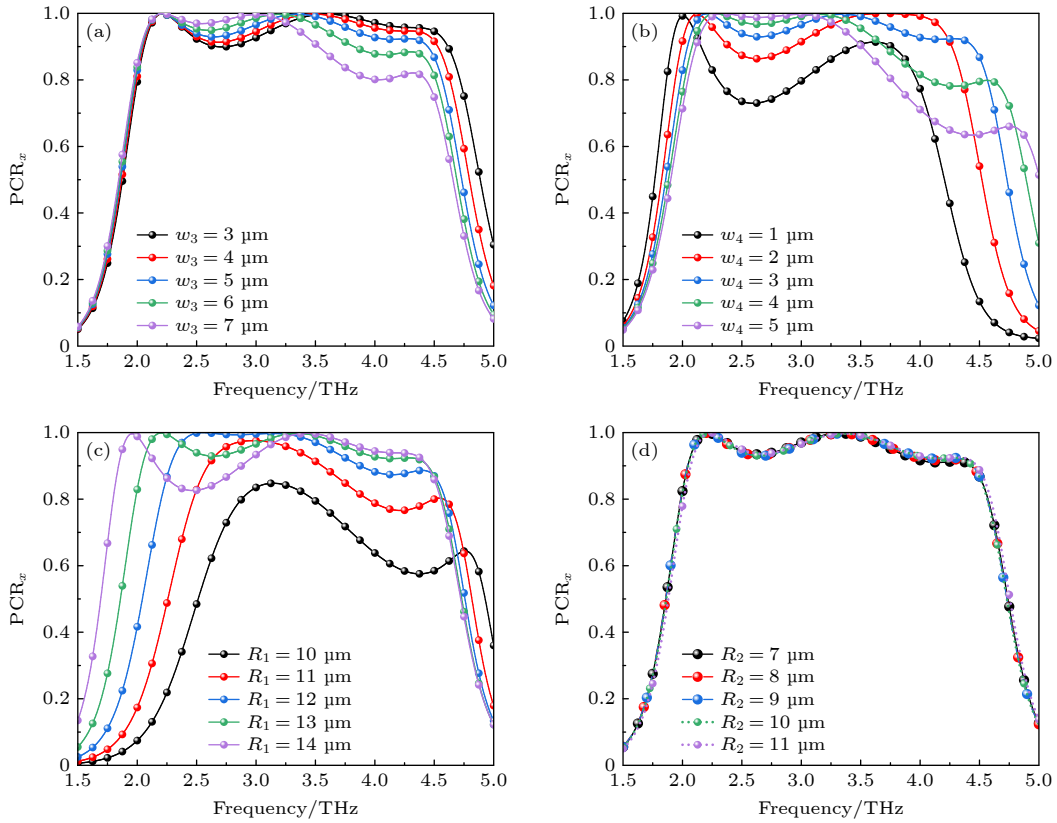


图9 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射下, 不同结构参数对 PCR_x 影响 (a) 两边矩形谐振器宽度 w_3 ; (b) 中间条形谐振器宽度 w_4 ; (c) 外环半径 R_1 ; (d) 内环半径 R_2

Fig. 9. Effect of different structural parameters on PCR_x under the incidence of terahertz wave along $+z$ direction: (a) Width of the rectangular resonator on both sides w_3 ; (b) width of the strip resonator in the middle w_4 ; (c) outer ring radius R_1 ; (d) inner ring radius R_2 .

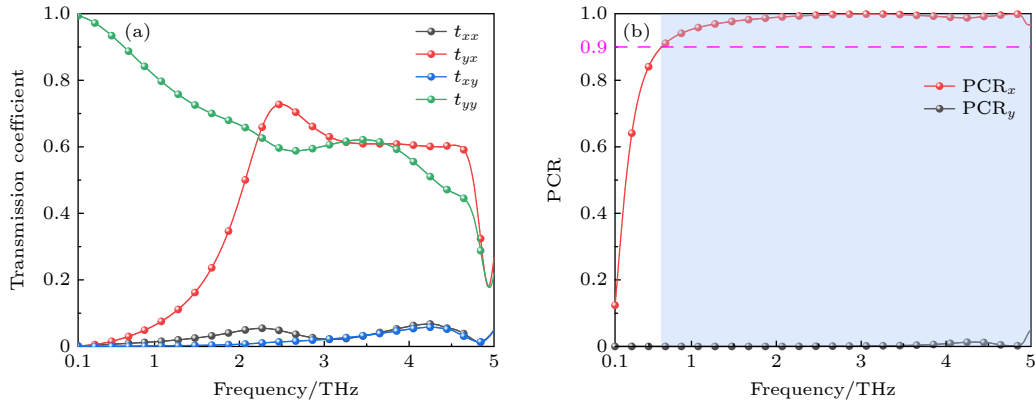


图10 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射下超表面的太赫兹电磁响应曲线 (a) 透射系数; (b) 极化转换率 PCR

Fig. 10. Electromagnetic response curves of the metasurface under the incidence of terahertz waves along the $+z$ direction: (a) Transmission coefficient; (b) polarization conversion rate PCR.

被中间光栅层滤除, 只有 x 偏振波通过并转换为 y 偏振波. 因此, 该超表面可实现线-线 (LP-LP) 透射极化转换功能. 通常透射型 LP-LP 转换效率用极化转换率 (PCR) 表示为^[17]

$$\text{PCR}_x^t = \frac{|t_{yx}|^2}{|t_{yx}|^2 + |t_{xx}|^2}, \quad \text{PCR}_y^t = \frac{|t_{xy}|^2}{|t_{xy}|^2 + |t_{yy}|^2}, \quad (4)$$

式中, t_{xx} 和 t_{yy} 为共极化透射系数, t_{xy} 和 t_{yx} 为交叉极化透射系数.

图10为太赫兹波沿 $+z$ 方向入射下该超表面结构的交叉极化和共极化透射系数与极化转化率曲线. 可以看出, 在 2.19—4.60 THz 范围内, 交叉极化透射系数 t_{yx} 大于 0.6, 则共极化透射系数 t_{xx}

小于 0.1, 可实现 x 偏振波到 y 偏振波的转换; 而在相同频段内, t_{yy} 值较高, 则 t_{xy} 小于 0.1, 不能实现 y 偏振波的转换, 如图 10(a) 所示. 计算得出 x/y 偏振波的极化转换率 PCR 见图 10(b). 在 0.65—5.07 THz 频段内, 极化转换率 PCR_x 大于 0.9, 则在 2.05—4.90 THz 范围内 PCR_x 近似为 1. 而在相同频段内 PCR_y 近似为 0. 结果表明该超表面 x 偏振波可实现透射模态极化转换. 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射时, PCR 随入射角 0° — 85° 变化关系如图 11 所示. 从图 11 可以看到, 当入射角从 0° 增至 70° 时, 在 0.65—5.07 THz 范围内 PCR 值大于 90%, 这表

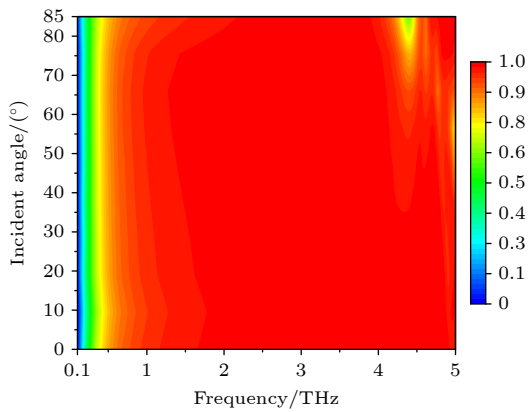


图 11 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射下入射角变化对极化转换率 PCR 影响

Fig. 11. Effect of variation of incidence angle on polarization conversion rate PCR under terahertz wave incidence along $+z$ direction.

明所设计结构具有较宽的人射角特性.

图 12 为 3.08 THz 和 4.84 THz 两个谐振频点处超表面顶层结构、中间光栅层以及底层结构的电流分布图. 从图 12(a)—(c) 可以看出在 3.08 THz 处超表面的顶层结构表面电流主要集中在十字架中间, 正斜率条形结构上的表面电流可以分解为 $-x$ 和 $-y$ 两个方向的电流, 则负斜率条形结构上的表面电流分解为 $+x$ 和 $-y$ 两个方向的电流, 此时, x 轴上的电流方向相反, 形成磁偶极子, 产生与入射电场方向平行的磁场, y 轴上的电流方向相同, 形成电偶极子, 引起了电共振. 超表面的中间光栅层电流均沿 $+y$ 方向分布, 此时, 电流方向相同, 形成电偶极子, 产生电共振. 超表面底层“工”形结构电流主要分布在中间条形谐振器上, 可分解为 $-x$ 和 $+y$ 两个方向的电流, 与顶层结构和中间光栅层电流方向形成同向平行和反向平行, 分别产生电谐振和磁谐振. 因此, 这两者相互作用共同实现透射型极化转换. 同理, 从图 12(d)—(f) 可以看出在 4.84 THz 频点处, 超表面 3 层金属结构表面电流方向沿 x 轴和 y 轴分解之后同样可以互相形成同向平行和反向平行, 引起电共振和磁共振, 它们的共同作用实现对 x 偏振波的极化转换.

最后, 将之前报道的基于可调材料的宽带吸收与极化转换超表面结构设计 [10,18–20] 与本文结构进行比较, 如表 1 所示. 其中, 大多宽带吸收超表面结构工作频段窄且不能兼具透射结合式极化转换

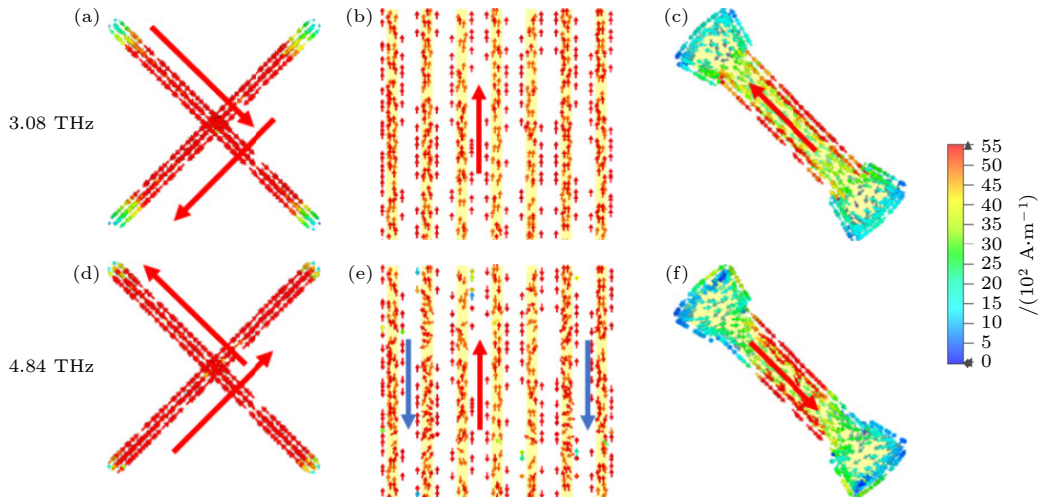


图 12 不同谐振频率下, 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射下, 顶层、中间和底层结构在谐振频点处的电流分布图 (a), (d) 顶层十字架结构; (b), (e) 中间光栅层; (c), (f) 底层“工”形结构

Fig. 12. Current distributions of the top, intermediate and bottom layers of the structure at the resonance frequencies under terahertz wave incidence along the $+z$ direction, current distributions at different resonant frequencies: (a), (d) The top cross structure; (b), (e) the intermediate grating layer; (c), (f) the bottom “工” structure.

表 1 本文提出结构与其他文献报道成果对比

Table 1. Comparison of the proposed structure in this paper with previously reported works.

文献	可调材料	功能	性能	带宽
[18]	Graphene	宽带吸收和极化转换	1.74—3.52 THz: $A \geq 90\%$ 1.54—2.55 THz: $PCR^r \geq 90\%$	吸收1.78 THz 反射极化转换1.01 THz
[19]	VO ₂ 和Si	宽带吸收和极化转换	0.68—1.60 THz: $A \geq 90\%$ 0.82—1.60 THz: $PCR^r \geq 90\%$	吸收0.92 THz 反射极化转换0.78 THz
[20]	VO ₂	宽带吸收和极化转换	3.33—5.62 THz: $A \geq 90\%$ 2.54—4.55 THz: $PCR^r \geq 90\%$	吸收2.29 THz 反射极化转换2.01 THz
[10]	VO ₂	宽带吸收和极化转换	1.49—3.58 THz: $A \geq 90\%$ 1.1—3.2 THz: $PCR^r \geq 90\%$	吸收2.09 THz 反射极化转换2.1 THz
本文	VO ₂ 和GeTe	宽带吸收和极化转换	7.96—17.76 THz: $A \geq 90\%$ 2.04—4.44 THz: $PCR^r \geq 90\%$ 0.65—5.07 THz: $PCR^r \geq 90\%$	吸收9.8 THz 反射极化转换2.4 THz 透射极化转换4.42 THz

功能, 本文所设计超表面能够实现超宽带吸收和透反结合式极化转换功能的灵活切换, 吸收带宽达到 9.8 THz, 反射式和透射式极化转换带宽分别为 2.4 THz 和 4.42 THz.

4 结 论

本文提出一种 VO₂ 和 GeTe 复合的超表面, 通过控制温度使 VO₂ 和 GeTe 的电导率变化, 从而实现超宽带吸收、反射型极化转换和透射型极化转换等功能的灵活切换. 当 VO₂ 为金属态且 GeTe 为晶态时, 太赫兹波沿 $-z$ 方向入射, 该超表面在 7.96—17.76 THz 频段范围内吸收率大于 90%, 吸收带宽达到 9.8 THz, 相对带宽为 76.2%, 此外, 所设计的吸收器极化不敏感, 并且在较大入射角下表现出良好的吸收性能; 太赫兹波沿 $+z$ 方向入射, 该超表面在 2.04—4.44 THz 频段内对 x/y 偏振波的极化转换率大于 0.9, 相对带宽为 74.1%. 当 VO₂ 为介质态且 GeTe 为非晶态时, 该超表面在 0.65—5.07 THz 频段内可作为透射型极化转换器, 完成对 x 偏振波的极化转换, PCR_x 可达到 0.9 以上, 并且在较大的入射角范围内可以保持高极化转换性能. 该太赫兹超表面在成像、隐身技术、雷达探测等领域具有潜在的应用价值.

参考文献

[1] Zheng C L, Li J, Yue Z, Li J T, Liu J Y, Wang G C, Wang S L, Zhang Y T, Zhang Y, Yao J Q 2022 *Laser Photonics Rev.*

16 2200051
[2] Huang X J, Cao M, Wang D Q, Li X W, Fan J D, Li X Y 2022 *Opt. Mater. Express* **12** 811
[3] Bader A D, Saghaei H 2023 *Opt. Express* **31** 12653
[4] Luo B, Qi Y P, Zhou Z H, Shi Q, Wang X X 2024 *Nanotechnology* **35** 195205
[5] King J, Wan C H, Park T J, Deshpande S, Zhang Z, Ramanathan S, Kats M A 2024 *Nat. Photonics* **18** 74
[6] Zeng Y, Wang J Q, Yang X S, Yao J Q, Li P N, He Q, Xu M, Miao X S 2023 *Opt. Mater.* **136** 113447
[7] Chen Z, Chen J J, Tang H W, Shen T, Zhang H 2022 *Opt. Express* **30** 6778
[8] Jiang X X, Xiao Z Y, Wang X W, Cheng P 2023 *Appl. Opt.* **62** 3519
[9] Phan H L, Nguyen T Q H, Nguyen T M, Nguyen N H, Le D T, Bui X K, Vu D L, Kim J M, 2024 *Opt. Mater.* **154** 115682
[10] Zhang Y, Xue W R, Du Y D, Liang J L, Li C Y 2024 *Opt. Mater.* **149** 114984
[11] Lin Q W, Wong H, Huitema L, Crunteanu A 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2101699
[12] Li W X, Yi Y T, Yang H, Cheng S B, Yang W X, Zhang H F, Yi Z, Yi Y G, Li H L 2023 *Commun. Theor. Phys.* **75** 045503
[13] Nguyen H Q, Nguyen T Q H, Nguyen T M 2024 *Phys. Scr.* **99** 115534
[14] Zhang P Y, Chen G Q, Hou Z Y, Zhang Y Z, Shen J, Li C Y, Zhao M L, Gao Z Z, Li Z Q, Tang T T 2022 *Micromachines* **13** 669
[15] Zhang R Y, Luo Y A, Xu J K, Wang H Y, Han H Y, Hu D, Zhu Q F, Zhang Y 2021 *Opt. Express* **29** 42989
[16] Li N C, Mei J S, Gong D G, Shia Y C 2022 *Opt. Commun.* **521** 128581
[17] Jiang X Q, Fan W H, Qin C, Chen X 2021 *Nanomaterials* **11** 2895
[18] Li Z H, Yang R C, Wang J Y, Zhao Y J, Tian J P, Zhang W M 2021 *Opt. Mater. Express* **11** 3507
[19] Zhang H, He X C, Zhang D, Zhang H F 2022 *Opt. Express* **30** 23341
[20] Niu J H, Yao Q Y, Mo W, Li C H, Zhu A J 2023 *Opt. Commun.* **527** 128953

Theoretical design of tunable terahertz metasurfaces with dual-mode polarization conversion and ultra-broadband absorption functionality*

WANG Dan LI Jiusheng[†] XIONG Rihui*(Center for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)**(Received 24 December 2024; revised manuscript received 17 March 2025)*

Abstract

In this paper, we propose a vanadium dioxide and germanium telluride composite metasurface. The conductivity of vanadium dioxide and germanium telluride is varied by changing the temperature, which enables the switching of functions such as ultra-broadband absorption, reflective-type polarization, and transmissive-type polarization. When vanadium dioxide is metallic and germanium telluride is crystalline, the terahertz wave is incident along the $-z$ direction, and the metasurface can be used as a broadband absorber, with an absorption rate greater than 90% in a frequency range of 7.96–17.76 THz, and the absorption bandwidth reaches 9.8 THz, with a relative bandwidth of 76.2%. In addition, the designed metasurface absorber is polarization-insensitive and exhibits good absorption performance at large incidence angles. Terahertz waves are incident along the $+z$ direction, and this metasurface can be used as a reflective polarization converter with a polarization conversion ratio greater than 0.9 for x - and y -polarized waves in the frequency band from 2.04 to 4.44 THz. The effects of incidence angle and structural parameters on polarization conversion performance are also investigated. When vanadium dioxide is in the dielectric state and germanium telluride is in the amorphous state, the metasurface can be used as a transmissive polarization converter, with a polarization conversion rate of greater than 0.9 in a frequency band of 0.65–5.07 THz. And the high polarization conversion performance can be maintained in a wide range of incidence angles. Finally, the physical mechanism of polarization conversion is analyzed using surface currents. The results show that the metasurface structure has bi-directional, switchable and multi-functional characteristics for terahertz wave manipulation, and has broad application prospects in terahertz wave sensing, imaging and communication.

Keywords: reflective polarization conversion, transmissive polarization conversion, ultra-broadband absorption, metasurface

PACS: 87.50.U-, 74.25.Uv, 03.65.Vf

DOI: [10.7498/aps.74.20241762](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241762)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241762](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241762)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62271460, 62435017) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LZ24F050005).

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

透反双模态极化转换与超宽带吸收功能可调控太赫兹超表面理论设计

王丹 李九生 熊日辉

Theoretical design of tunable terahertz metasurfaces with dual-mode polarization conversion and ultra-broadband absorption functionality

WANG Dan LI Jiusheng XIONG Rihui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 138701 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241762

CSTR: 32037.14.aps.74.20241762

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241762>

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

宽带吸收与极化转换可切换的太赫兹超表面

Switchable ultra-broadband absorption and polarization conversion terahertz metasurface

物理学报. 2024, 73(14): 148701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240525>

基于双开缝环结构的半反射和半透射超宽带超薄双偏振太赫兹超表面

Double-split-ring structure based ultra-broadband and ultra-thin dual-polarization terahertz metasurface with half-reflection and half-transmission

物理学报. 2023, 72(15): 158701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230471>

动态可调谐的频域多功能可重构极化转换超表面

Dynamically tunable frequency-domain multifunctional reconfigurable polarization conversion metasurface

物理学报. 2022, 71(22): 224102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221256>

单壁碳纳米管太赫兹超表面窄带吸收及其传感特性

Narrow band absorption and sensing properties of the THz metasurface based on single-walled carbon nanotubes

物理学报. 2024, 73(2): 026102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231357>

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>

基于剪纸方法的一种可重构线极化转换空间序构超表面

Reconfigurable linear polarization conversion based on spatial-order kirigami metasurfaces

物理学报. 2021, 70(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210188>