

## 宽带吸收与极化转换可切换的太赫兹超表面\*

王丹 李九生† 郭风雷

(中国计量大学太赫兹研究所, 杭州 310018)

(2024 年 4 月 15 日收到; 2024 年 5 月 9 日收到修改稿)

本文提出一种具有宽带吸收与极化转换可切换的太赫兹超表面, 通过调节二氧化钒电导率可实现太赫兹波吸收和极化转换功能灵活切换. 当二氧化钒处于金属状态时, 该超表面表现为宽带吸收器, 在 6.32—18.06 THz 范围吸收率大于 90%, 相对带宽为 96.3%. 当二氧化钒为绝缘状态时, 该结构在 2.41—3.42 THz, 4.78—7.48 THz 和 9.53—9.73 THz 频率范围表现为极化转换器, 极化转换率大于 90%. 该超表面结构可以用于太赫兹波探测、太赫兹通信以及太赫兹传感等领域应用.

**关键词:** 太赫兹, 超表面, 宽带吸收, 极化转换**PACS:** 87.50.U-, 74.25.Uv, 03.65.Vf**DOI:** 10.7498/aps.73.20240525

## 1 引言

超表面可以在波长量级尺寸实现对电磁波灵活调控. 然而, 当前文献报道的超表面通常功能单一, 不能满足当前技术发展日益增长的要求. 利用可调材料石墨烯<sup>[1-3]</sup>、Dirac 半金属<sup>[4-6]</sup>、光敏硅<sup>[7-9]</sup>和二氧化钒<sup>[10-13]</sup>组成复合超表面器件引起广泛关注, 可以实现功能动态调控的器件. 其中, 相变材料二氧化钒可以通过热、电或光激励实现从绝缘态到金属态转变, 而且该材料相变可逆. 2021 年 Liu 等<sup>[14]</sup>设计了石墨烯与二氧化钒复合超表面结构, 实现双宽带可切换太赫兹吸收器, 吸收率大于 90%. 2022 年 Jiang 等<sup>[15]</sup>构建了二氧化钒超表面实现反射和透射交叉极化转换功能. Niu 等<sup>[16]</sup>提出了二氧化钒双功能超表面, 改变二氧化钒的电导特性实现了吸收和极化转换. Peng 等<sup>[17]</sup>设计了二氧化钒超表面来实现宽带吸收和偏振转换之间的转换. 2023 年, Lian 等<sup>[18]</sup>提出了一种基于二氧化钒的多功能太赫兹超表面结构, 二氧化钒处于金属态时, 该结构在 1.97—4.63 THz 频率内实现太赫兹吸收;

二氧化钒处于绝缘态时, 该结构可以作为一个宽带线极化转换器.

本文提出了一种二氧化钒和金属复合的超表面结构实现宽带吸收和极化转换功能. 当二氧化钒处于金属态时, 该结构在 6.32—18.06 THz 频率范围内实现吸收率大于 90% 的宽带吸收, 带宽达到 11.74 THz, 相对吸收带宽为 96.3%. 当二氧化钒处于绝缘态时, 所设计的超表面在 2.41—3.42 THz, 4.78—7.48 THz 和 9.53—9.73 THz 频率范围内实现极化转换, 极化转换率大于 90%. 该太赫兹多功能超表面结构可以用于太赫兹波探测、太赫兹通信以及太赫兹传感等领域应用.

## 2 超表面结构

提出的超表面结构如图 1 所示, 该结构从下到上依次为底部金属层、 $\text{MF}_2$ (丙烯腈/丁二烯/苯乙烯共聚物) 介质层、 $45^\circ$  不对称十字形金带、 $\text{MF}_2$  介质层、 $135^\circ$  不对称十字形金带、无图案二氧化钒层、 $\text{MF}_2$  介质层、 $\text{MF}_2$  介质中镶嵌 4 个二氧化钒圆环 ( $\text{VO}_2\text{-R}$ )、 $\text{MF}_2$  介质中镶嵌 4 个二氧化钒方环

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62271460) 和浙江省自然科学基金 (批准号: LZ24F050005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lijsh2008@126.com

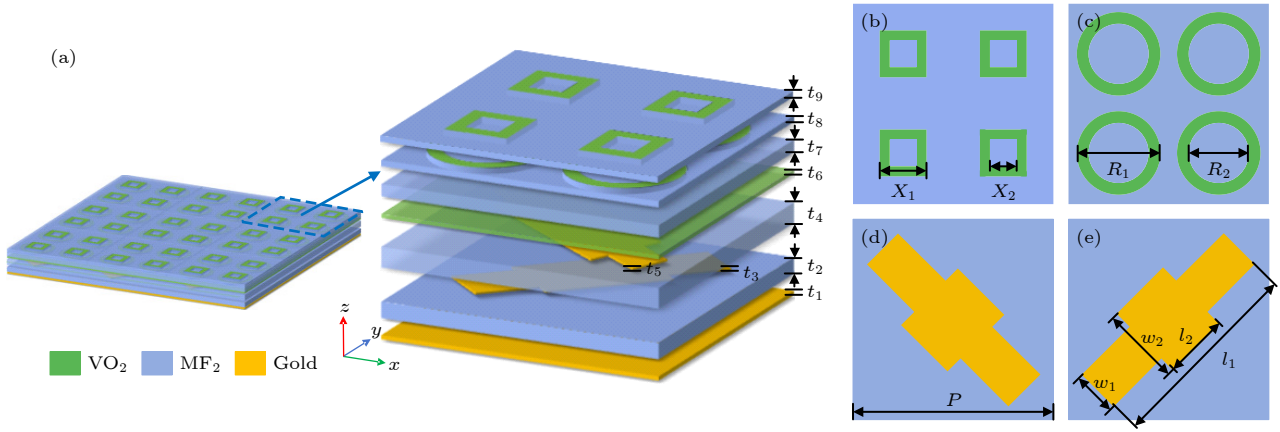


图 1 超宽带太赫兹吸收器与偏振转换器结构示意图 (a) 周期和单元结构; (b) VO<sub>2</sub>-QR 层俯视图; (c) VO<sub>2</sub>-R 层俯视图; (d) 135° 不对称十字形金带层俯视图; (e) 45° 不对称十字形金带层俯视图

Fig. 1. The schematic of the ultrabroadband terahertz absorber and polarization converter: (a) Unit cell; (b) top view of the VO<sub>2</sub>-QR layer; (c) top view of the VO<sub>2</sub>-R layer; (d) top view of the 135° asymmetrical cross-shaped gold strip; (e) top view of the 45° asymmetrical cross-shaped gold strip.

(VO<sub>2</sub>-QR). 金衬底、45°不对称十字形金带、135°不对称十字形金带、二氧化钒层以及谐振层 VO<sub>2</sub>-QR 厚度均为 0.2 μm, 谐振层 VO<sub>2</sub>-R 厚度为  $t_8 = 0.07 \mu\text{m}$ , 介质层 MF<sub>2</sub> 厚度分别为  $t_2 = 2 \mu\text{m}$ ,  $t_4 = 6 \mu\text{m}$ ,  $t_7 = 4.2 \mu\text{m}$ . 不对称十字形金带的几何参数为  $l_1 = 26 \mu\text{m}$ ,  $w_1 = 4 \mu\text{m}$ ,  $l_2 = 10 \mu\text{m}$ ,  $w_2 = 6 \mu\text{m}$ . 上面的谐振层 VO<sub>2</sub>-R 和 VO<sub>2</sub>-QR 的几何参数  $R_1 = 4.8 \mu\text{m}$ ,  $R_2 = 3.4 \mu\text{m}$ ,  $X_1 = 4.8 \mu\text{m}$ ,  $X_2 = 2.5 \mu\text{m}$ . 单元结构的周期  $P = 23 \mu\text{m}$ . CST 仿真过程中沿 X 轴和 Y 轴方向设置周期边界条件, 沿 Z 轴方向设置开放边界条件, 电磁波沿 Z 方向入射到超表面. MF<sub>2</sub> 相对介电常数为 1.9<sup>[19]</sup>. 通过改变温度来控制 VO<sub>2</sub> 光电性能, 室温下 VO<sub>2</sub> 为介质态其电导率为  $\sigma = 20 \text{ S/m}$ , 温度变化为 68 °C 时, VO<sub>2</sub> 为金属态其电导率  $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ . VO<sub>2</sub> 在 2—20 THz 范围内的相对介电常数可以通过 Drude 模型<sup>[20]</sup> 来表示:

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

式中  $\varepsilon_\infty$  为高频极限介电常数,  $\varepsilon_\infty = 12$ ;  $\gamma$  为碰撞频率,  $\gamma = 5.57 \times 10^{13} \text{ rad/s}$ , 等离子频率  $\omega_p(\sigma) = \omega_p(\sigma_0) \sqrt{(\sigma/\sigma_0)}$ , 其中  $\omega_p(\sigma_0) = 1.45 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ ,  $\sigma_0 = 3 \times 10^5 \text{ S/m}$ . 当  $\sigma = 20 \text{ S/m}$  时, VO<sub>2</sub> 为绝缘态. 当  $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$  时, VO<sub>2</sub> 处于金属态.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 宽带吸收

当温度为 68 °C 时, 二氧化钒处于金属状态

( $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ ), 太赫兹波沿  $-z$  方向入射, 二氧化钒层可以作为基板, 与二氧化钒层上部的 MF<sub>2</sub> 层、谐振 VO<sub>2</sub>-R 层和谐振 VO<sub>2</sub>-QR 层一起形成太赫兹波吸收器. 超表面的吸收率可表示为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (2)$$

式中,  $R(\omega) = |S_{11}|^2$ ;  $T(\omega) = |S_{21}|^2$ , 其中  $S_{11}$  和  $S_{21}$  分别为反射参数和透射参数, 透射率  $T(\omega) = 0$ , 吸收率的表达式简化为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega). \quad (3)$$

图 2 表示超表面的太赫兹波吸收响应曲线, 从图 2(a) 可以看出, 在 6.32—18.06 THz 频带范围内对入射太赫兹波的吸收率大于 90%, 吸收器的带宽为 11.74 THz.

根据阻抗匹配理论, 所设计超表面结构的等效阻抗<sup>[21]</sup> 为

$$Z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} = \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}. \quad (4)$$

计算得到该超表面结构的实部与虚部随频率变化的曲线如图 2(b) 所示. 在 6.5—18.8 THz 频率范围内, 超表面结构的等效阻抗实部和虚部基本保持在 1 和 0 附近, 良好的阻抗匹配对入射太赫兹波的有效吸收奠定了基础.

为了进一步揭示吸收器的吸收机制, 分别选取两个吸收峰处对应的频点 7.66 THz 和 16.00 THz, 并对这两个频点处两层二氧化钒图案的电磁场能量分布进行分析, 如图 3 所示. 由电场分布俯视图

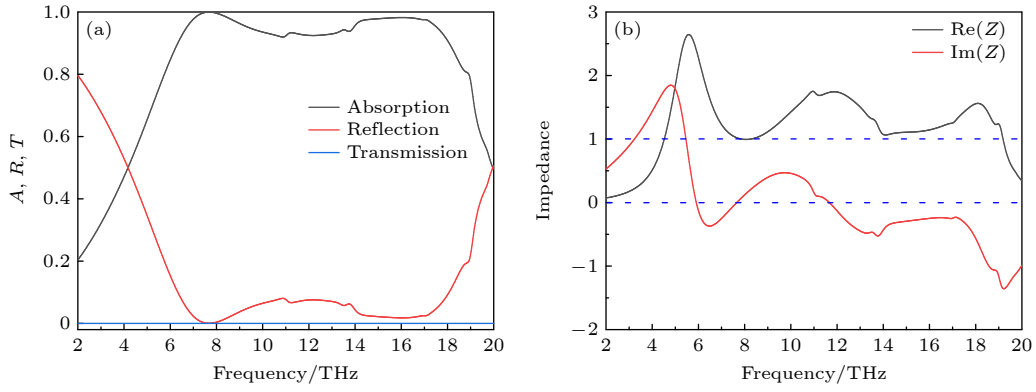


图 2 (a) 超表面结构的吸收、反射、透射曲线; (b) 超表面结构的等效阻抗实部和虚部曲线

Fig. 2. (a) Absorption, reflection, and transmission curves of the proposed metasurface; (b) equivalent impedance real and imaginary curves of the proposed metasurface.

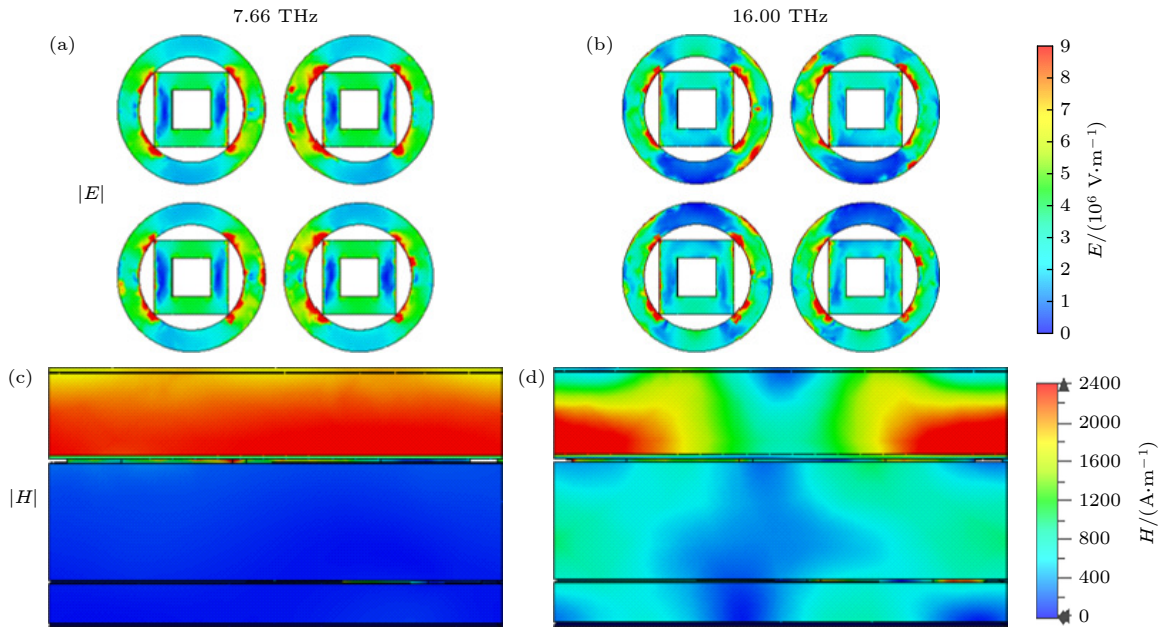


图 3 (a), (b) 电场分布俯视图; (c), (d) 磁场分布侧视图

Fig. 3. (a), (b) Top view of electric field distribution; (c), (d) side view of magnetic field distribution.

(图 3(a)) 和磁场侧视图 (图 3(c)) 可见, 共振频率 7.66 THz 处电场主要集中在圆环和方环相交处的圆环内侧, 两层谐振器相互耦合, 加强了吸收, 由于自由电子的集体振荡在顶部谐振器和介质层交界面上形成了局部等离子体共振, 导致了顶部谐振器和介质之间强耦合, 同时在靠近中间非图案二氧化钒层的介质层存在大量磁场分布, 这一现象可看作是表面等离子体共振所引起的. 同理, 图 3(b), (d) 所示的共振频率 16.00 THz 处电场主要集中在圆环和方环相交处的 4 个角处的圆环内侧, 谐振层之间相互耦合使吸收效果更佳, 大量磁场存在于单元结构之间的介质层中, 由表面等离子体共振所引起的. 因此局部等离子体共振和表面等离子体共振

共同作用实现了宽带吸收.

入射太赫兹波的偏振角和入射角对超表面结构的性能影响如图 4 所示. 图 4(a) 为  $0-90^\circ$  偏振角的吸收光谱. 当入射波从  $y$  极化 ( $\Phi = 0^\circ$ ) 变为  $x$  极化 ( $\Phi = 90^\circ$ ) 时, 宽带吸收器在 6.00—19 THz 频率范围内, 偏振角几乎没有影响, 吸收率也保持不变. 由于结构的中心对称性, 该宽带吸收器在垂直入射时偏振不敏感. 不同入射角 TE 和 TM 模式的吸收光谱如图 4(b), (c) 所示. 图 4(b) 表示 TE 模式下, 入射角  $0-30^\circ$  范围内, 吸收率高于 90%, 当入射角大于  $30^\circ$  时, 吸收带宽变宽, 并随入射角的增加而发生蓝移. 图 4(c) 表示 TM 模式下, 吸收带随入射角的增大而发生轻微蓝移且吸收带宽变宽,

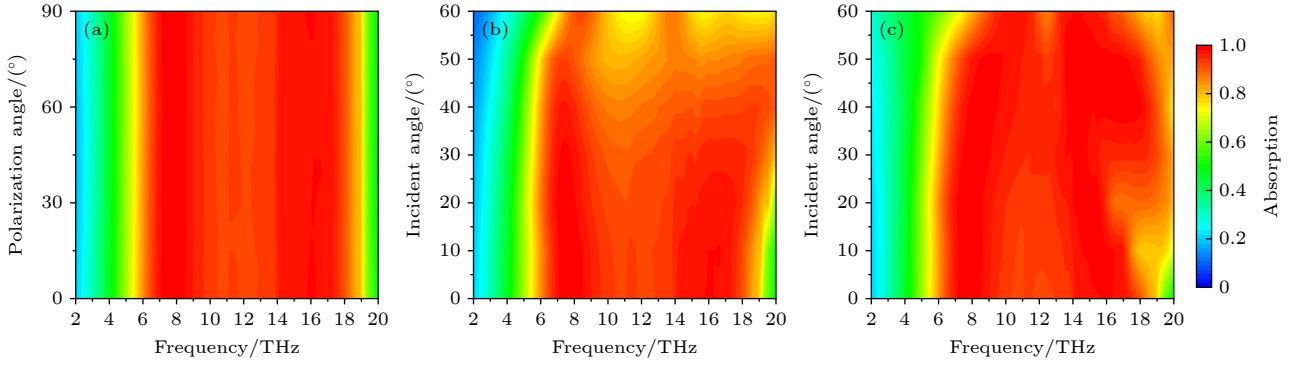


图 4 (a) 垂直入射下, 宽带吸收器在不同偏振角下的吸收光谱; (b) TE 模式下吸收器在不同入射角下的吸收光谱; (c) TM 模式下吸收器在不同入射角下的吸收光谱

Fig. 4. (a) Absorption spectra of ultra-broadband absorber at various polarization angles under normal incidence; (b) absorption spectra of absorber at various incidence angles in TE mode; (c) absorption spectra of absorber at various incidence angles in TM mode.

入射角在  $0^\circ$ — $50^\circ$  范围内时, 其吸收率始终高于 90%. 吸收器在 TM 和 TE 模式下的吸收率随入射角的增大而蓝移, 主要原因是电场的切向分量随着入射角的增大而减小. 再者, 随着入射角的增大, 吸收带宽变宽. 这是因为吸收峰在高频率处显著蓝移, 导致更宽的吸收带宽.

在 2—10.5 THz 频率范围内二氧化钒在不同电导率下的吸收曲线如图 5 所示. 二氧化钒为金属态 (电导率为  $2 \times 10^5$  S/m), 在 6.32—10.5 THz 内太赫兹吸收率大于 90%. 随着二氧化钒电导率的减小, 吸收率也逐渐减小, 当二氧化钒为绝缘态 (电导率变为 20 S/m), 在 2—10.5 THz 频带内吸收率可降到 21% 以下.

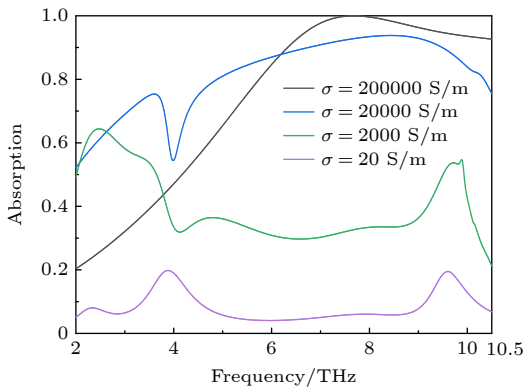


图 5 不同电导率二氧化钒的太赫兹波吸收曲线

Fig. 5. Terahertz wave absorption curves with different conductivities of  $\text{VO}_2$ .

### 3.2 极化转换

室温下, 二氧化钒处于介质态, 其电导率为 20 S/m 时, 入射的电磁波可以通过中间无图案二氧化钒层, 到达器件的金衬底层, 并被反射回来,

因此, 设计的超表面结构可以作为反射型偏振转换器, 实现线-线 (LP-LP) 极化转换功能.  $x$  偏振波垂直入射到该超表面结构, 在特定频率范围内反射  $y$  偏振波, 实现 LP-LP 转换. 通常 LP-LP 转换效率, 用极化转换率 (PCR)<sup>[22]</sup> 来评估,

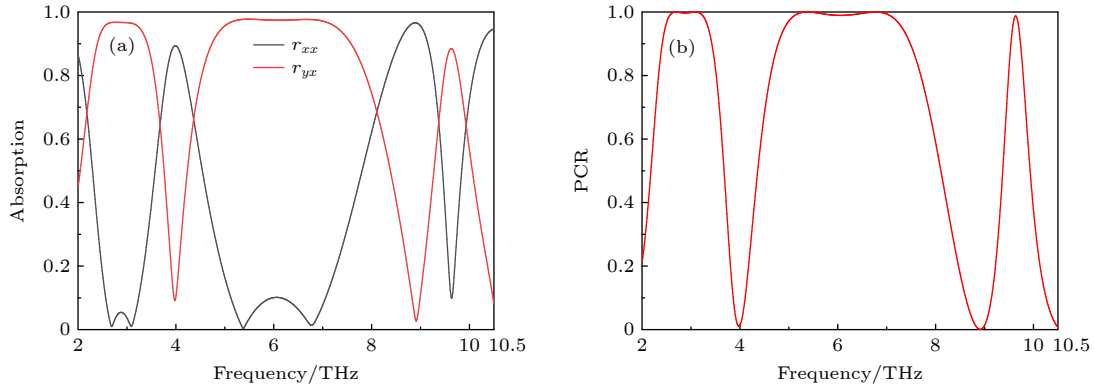
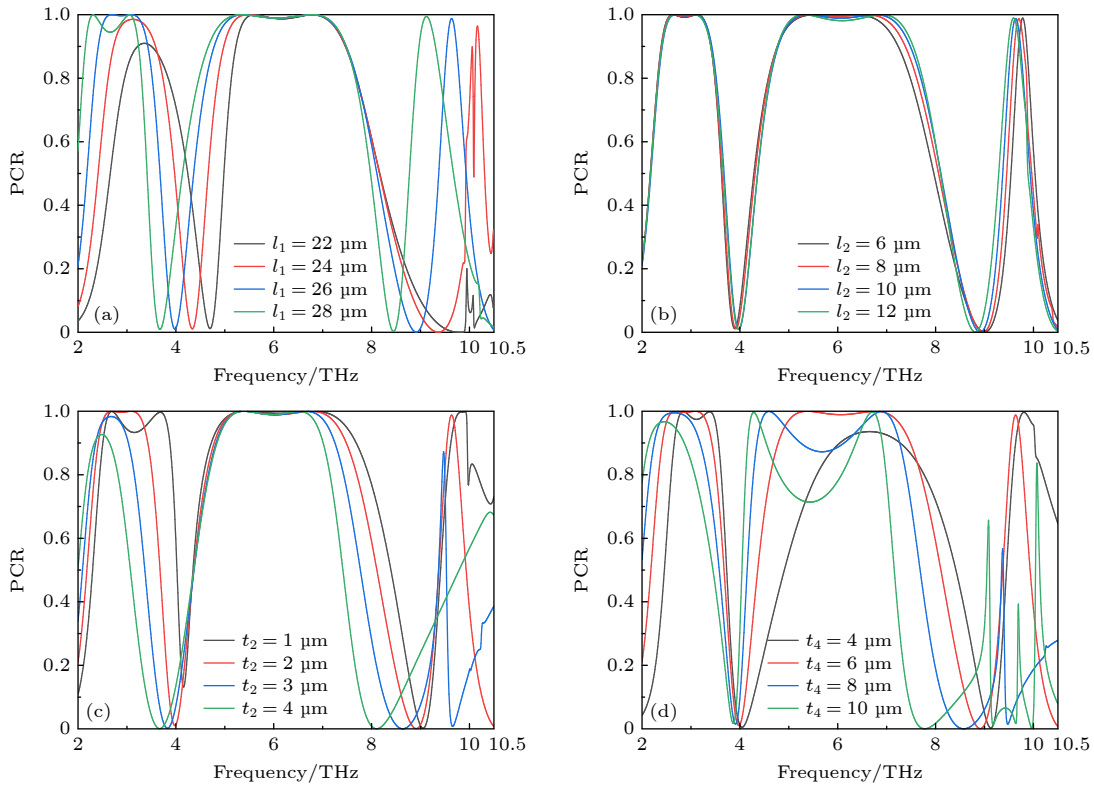
$$\text{PCR} = \frac{|r_{yx}|^2}{|r_{yx}|^2 + |r_{xx}|^2}. \quad (5)$$

该超表面结构的反射振幅  $|r_{yx}|$  和  $|r_{xx}|$  如图 6(a) 所示, 在 2.41—3.42 THz 和 4.78—7.48 THz 范围内,  $|r_{yx}|$  大于 0.9,  $|r_{xx}|$  小于 0.35, PCR 大于 0.9. 在 9.53—9.73 THz 频段, PCR 大于 0.9, 如图 6(b) 所示, 表明使用设计的多功能超表面可以实现线极化转换.

研究了不对称十字形金带的几何参数和介质  $\text{MF}_2$  厚度对该超表面极化转换特性的影响, 如图 7 所示. 图 7(a) 显示  $l_1$  对 PCR 的影响,  $l_1$  增大, PCR 表现出红移, 工作带宽随着  $l_1$  的增大而变宽. 图 7(b) 为  $l_2$  对 PCR 的影响, 第一频带几乎没有变化, PCR 在第二频带出现轻微蓝移, 而在第三频带出现轻微的红移, 工作带宽几乎不受  $l_2$  增大的影响. 图 7(c), (d) 分别显示了介质  $\text{MF}_2$  厚度  $t_2$  和  $t_4$  对 PCR 的影响, 随着  $t_2$  的增大, 第一频带和第二频带变窄, 第三频带消失.  $\text{MF}_2$  厚度  $t_4$  影响着极化转换器的 PCR, 由图 7(d) 可以看出, 当  $t_4 = 6 \mu\text{m}$  时, PCR 最佳.

为了探讨该结构作为极化转换器工作的物理机制, 还研究了两个不对称十字形金带结构在几个特定频点处的表面电流和磁场分布, 如图 8 所示. 如图 8(a), (d) 所示, 磁场主要分布于  $135^\circ$  金带中, 则在 2.69 THz 频点处  $135^\circ$  金带中间部位的上边缘



图6 (a)  $x$  偏振波入射下的反射系数; (b) 极化转换率 PCRFig. 6. (a) Reflection coefficients under  $x$ -polarized wave normal incidence; (b) polarization conversion rate PCR.图7 当二氧化钒电导率为 20 S/m 时, 不对称十字形金带的几何参数  $l_1$  (a),  $l_2$  (b) 和介质  $\text{MF}_2$  的厚度  $t_2$  (c),  $t_4$  (d) 对 PCR 的影响Fig. 7. Geometrical parameters influence on polarization conversion rate (PCR) when the conductivity of  $\text{VO}_2$  is  $\sigma = 20 \text{ S/m}$ : (a)  $l_1$ ; (b)  $l_2$ ; (c)  $t_2$ ; (d)  $t_4$ .

和下边缘表面电流方向相同, 在入射周围产生电偶极子, 引起强烈的电共振, 产生与入射电场方向垂直的感应电场, 实现交叉极化的转换. 图 8(b), (e) 显示了 5.38 THz 处的电流和磁场分布, 磁场主要集中于  $45^\circ$  金带和  $135^\circ$  金带中, 可以把  $45^\circ$  金带的表面电流分解为  $+x$  和  $+y$  两个方向的电流, 则  $135^\circ$  金带的表面电流分解为  $-x$  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, 这两者相互作用, 共同实现了交叉极化转换. 在 9.64 THz 处的磁场主要分布在  $135^\circ$  金带中, 如图 8(f) 所示, 而在该频点处的电流分布如图 8(c) 所示, 从图中可以看出,  $135^\circ$  金带左上角以及右下角处的上边缘和下边缘电流方向相同, 产生了电共振, 实现极化转换.

### 3.3 所设计超表面的制造工艺

所设计的超表面可以通过磁控溅射技术<sup>[23]</sup>和

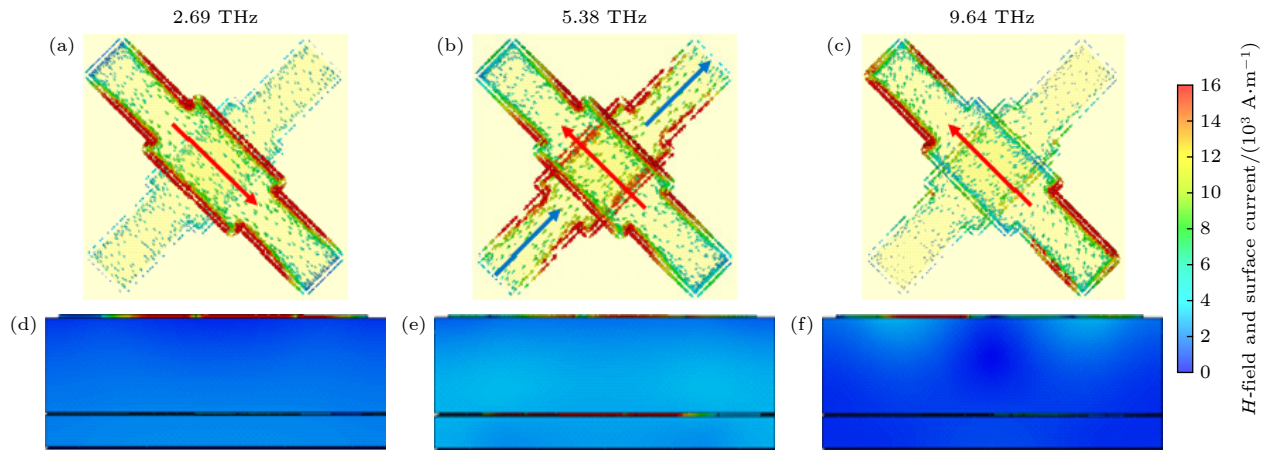


图 8 (a)–(c) 极化转换器的表面电流分布; (d)–(f) 极化转换器的磁场分布

Fig. 8. (a)–(c) Surface current distribution of the polarization converter; (d)–(f) magnetic field distribution of the polarization converter.

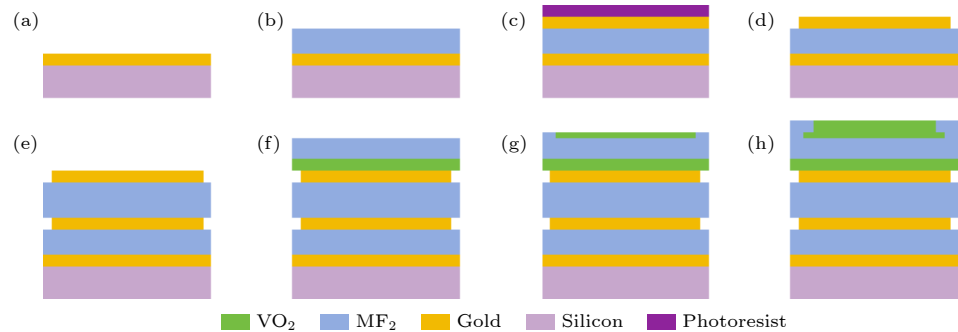


图 9 该超表面结构的潜在制造工艺流程图

Fig. 9. Flow chart of potential fabrication process of the proposed metasurface structure.

表 1 本文工作与先前报道成果对比

Table 1. Comparison of the work with previously reported results.

| 文献   | 可调材料 | 功能        | 性能                                                                                                 | 带宽                          |
|------|------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| [25] | 二氧化钒 | 宽带吸收      | 5.8—17.2 THz: $A \geq 90\%$                                                                        | 吸收11.4 THz                  |
| [26] | 二氧化钒 | 极化转换      | 1.08—3.22 THz: PCR $\geq 90\%$                                                                     | 极化转换2.14 THz                |
| [27] | 二氧化钒 | 窄带吸收、极化转换 | 1.6 THz: $A \approx 100\%$ ;<br>0.67—1.99 THz: PCR $\geq 90\%$                                     | 单频点吸收<br>极化转换1.32 THz       |
| [28] | 二氧化钒 | 宽带吸收、极化转换 | 0.78—1.81 THz: $A \geq 90\%$ ;<br>0.51—1.45 THz: PCR $\geq 90\%$                                   | 吸收1.03 THz<br>极化转换0.94 THz  |
| 本文   | 二氧化钒 | 宽带吸收、极化转换 | 6.32—18.06 THz: $A \geq 90\%$ ;<br>2.41—3.42 THz, 4.78—7.48 THz<br>和9.53—9.73 THz: PCR $\geq 90\%$ | 吸收11.74 THz<br>极化转换3.91 THz |

电子束光刻<sup>[24]</sup>进行制备. 制备过程如图9所示, 具体步骤如下. 图9(a)利用磁控溅射技术在硅衬底上沉积金层; 图9(b)通过旋涂和固化工艺在金层上沉积一层  $\text{MF}_2$  介电层; 图9(c)在  $\text{MF}_2$  层的正上方沉积另一层金膜; 图9(d)通过电子束光刻技术得到  $45^\circ$  不对称十字形图案; 图9(e)重复步骤图9(b)–(d), 得到  $135^\circ$  不对称十字形图案; 图9(f)在金图案层上旋涂预先制备的  $\text{VO}_2$  胶体, 形成所

需厚度的  $\text{VO}_2$  薄膜, 用旋涂法在其上涂覆  $\text{MF}_2$  层; 图9(g)在  $\text{MF}_2$  层上沉积  $\text{VO}_2$  薄膜, 通过光刻和金属化工艺形成  $\text{VO}_2$ -R 图案, 并在  $\text{VO}_2$ -R 层覆盖一层  $\text{MF}_2$  介质; 然后再沉积  $\text{VO}_2$  薄膜 (图9(h)), 通过光刻得到  $\text{VO}_2$ -QR 图案, 最后旋涂  $\text{MF}_2$  介质层.

从表1可以看出, 本文设计的超表面作为吸收器时, 吸收带宽达到 11.74 THz, 作为极化转换器带宽达到 3.91 THz.

## 4 结 论

本文提出了一种二氧化钒与金属复合结构超表面, 可以实现宽带吸收和极化转换功能. 当二氧化钒处于金属状态时, 超表面表现为宽带吸收器, 在 6.32—18.06 THz 频率范围内吸收率大于 90%, 相对带宽为 96.3%. 此外, 所设计的吸收器对偏振不敏感, 在较大入射角下表现出良好的吸收性能. 当二氧化钒处于绝缘状态时, 所设计的超表面结构可以作为一个极化转换器, 在 2.41—3.42 THz, 4.78—7.48 THz 和 9.53—9.73 THz 的范围内实现线-线极化转换, 且极化转换率大于 90%.

## 参考文献

- [1] Chen Z, Chen J J, Tang H W, Shen T, Zhang H 2022 *Opt. Express* **30** 6778
- [2] Wu C Y, Fang Y Q, Luo L B, Guo K, Guo Z Y 2020 *Mod. Phys. Lett. B* **34** 2050292
- [3] Barkabian M, Sharifi N, Granpayeh N 2021 *Opt. Express* **29** 20160
- [4] Wu X L, Zheng Y, Luo Y, Zhang J G, Yi Z, Wu X W, Cheng S B, Yang W X, Yu Y, Wu P H 2021 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **23** 26864
- [5] He X Y, Liu F, Lin F T, Shi W Z 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 235103
- [6] Yi N N, Zong R, Qian R R 2022 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **146** 106682
- [7] Wang J Y, Yang R C, Li Z H, Tian J P 2022 *Opt. Mater.* **124** 111953
- [8] Xu J, Tang J, Cheng Y, Chen M, Wang H X, Xiong J F, Wang T R, Wang S Z, Zhang Y D, Wen H, Qu S L, Yuan L B 2022 *Opt. Express* **30** 17008
- [9] Gao J J, Zhao L, Zhang Z Y, Liu S H, Li R M, Mu K J, Zhang B, Wang J Q 2024 *Phys. Scr.* **99** 065565
- [10] Liu W W, Xu J S, Song Z Y 2021 *Opt. Express* **29** 23331
- [11] Niu J H, Hui Q, Mo W, Tian R F, Zhu A J 2024 *Phys. Scr.* **99** 075916
- [12] Zhao Y J, Yang R C, Wang Y X, Zhang W M, Tian J P 2022 *Opt. Express* **30** 27407
- [13] Li C Q, Song Z Y 2023 *Opt. Laser Technol.* **157** 108764
- [14] Liu L, Huang R, Ouyang Z B 2021 *Opt. Express* **29** 20839
- [15] Jiang Y Y, Zhang M, Wang W H, Song Z Y 2022 *Phys. Scr.* **97** 015501
- [16] Niu J H, Yao Q Y, Mo W, Li C H, Zhu A J 2023 *Opt. Commun.* **527** 128953
- [17] Peng Z, Zheng Z S, Yu Z S, Lan H T, Zhang M, Wang S X, Li L, Liang H W, Su H 2023 *Opt. Laser Technol.* **157** 108723
- [18] Lian X J, Ma M T, Tian J P, Yang R C, Wu X T 2023 *AEU-Int. J. Electron. C* **170** 154784
- [19] Zhu W, Rukhlenk I D, Premaratn M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 241914
- [20] Kang L, Wu Y H, Werner D H 2021 *Opt. Express* **29** 8816
- [21] Ma W Y, Yu S L, Zhao T G 2021 *Opt. Commun.* **493** 127037
- [22] Yu F Y, Zhu J B, Shen X B 2022 *Opt. Mater.* **123** 111745
- [23] Kharintsev S S, Battalova E I, Mukhametzhanov T A, Pushkarev A P, Scheblykin I G, Makarov S V, Potma E O, Fishman D A 2023 *ACS Nano* **17** 9235
- [24] Lian M, Su Y, Liu K, Zhang S J, Chen X Y, Ren H A, Xu Y H, Chen J J, Tian Z, Cao T 2023 *Adv. Opt. Mater.* **11** 2202439
- [25] Zhang P S, Deng X H, Tao L Y, Li P, Lu M, Guo F M, Song Y M, Yuan J R 2023 *Opt. Mater.* **138** 113716
- [26] Feng Z J, Ni B, Ni H B, Zhou X Y, Yang L S, Chang J H 2023 *J. Opt. Soc. Am. B* **40** 2174
- [27] Miao X, Xiao Z Y, Cui Z T, Zheng T T, Wang X Y 2023 *Optik* **281** 170810
- [28] Dong T L, Zhang Y, Li Y, Tang Y P, He, X J 2023 *Results Phys.* **45** 106246

# Switchable ultra-broadband absorption and polarization conversion terahertz metasurface<sup>\*</sup>

Wang Dan    Li Jiu-Sheng<sup>†</sup>    Guo Feng-Lei

(Center for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(Received 15 April 2024; revised manuscript received 9 May 2024)

## Abstract

Metasurfaces can realize flexible modulation of electromagnetic waves at the wavelength level. However, the reported functions of metasurface are usually fixed and cannot be changed, once its structural design is completed. The designed metasurface cannot meet the requirements for flexible regulation of terahertz waves. We find that the phase change material of vanadium dioxide can achieve a transition from insulating state to metallic state through thermal, electrical, or light excitation, and the phase transition of this material is reversible. Therefore, using vanadium dioxide to form a composite metasurface can achieve dynamic modulation of terahertz waves. In this study, we propose a terahertz metasurface with switchable broadband absorption and polarization conversion. The proposed metasurface is composed of a 9-layer structure stacked from bottom to top with a combination pattern of different dielectric layers. By adjusting the conductivity of vanadium dioxide, the designed metasurface can achieve flexible switching between terahertz wave absorption function and polarization conversion function. When the vanadium dioxide is in the metal state, the designed metasurface behaves as a broadband absorber with an absorption rate of more than 90% in a range of 6.32–18.06 THz and a relative bandwidth of 96.3%. When the vanadium dioxide is in the insulated state, the designed structure acts as a polarization converter in a frequency range of 2.41–3.42 THz, 4.78–7.48 THz, and 9.53–9.73 THz, respectively, with a polarization conversion rate of over 90%. We believe that this metasurface structure will have good applications in the fields of terahertz wave detection, terahertz switches, terahertz filtering, terahertz communication, and terahertz sensing.

**Keywords:** terahertz, metasurface, broadband absorption, polarization conversion

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

**DOI:** [10.7498/aps.73.20240525](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240525)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62271460) and the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LZ24F050005).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lijsh2008@126.com](mailto:lijsh2008@126.com)



## 宽带吸收与极化转换可切换的太赫兹超表面

王丹 李九生 郭风雷

### Switchable ultra-broadband absorption and polarization conversion terahertz metasurface

Wang Dan Li Jiu-Sheng Guo Feng-Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 148701 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240525

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240525>

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

#### 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>

#### 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>

#### 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>

#### 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>

#### 基于相变材料的慢光和吸收可切换多功能太赫兹超材料

Switchable multifunctional terahertz metamaterial with slow-light and absorption functions based on phase change materials

物理学报. 2023, 72(8): 084202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222336>

#### 基于纳米印刷技术的双螺旋太赫兹可调超表面

Nano-printing technology based double-spiral terahertz tunable metasurface

物理学报. 2022, 71(11): 117801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212408>