

## 温度电压双可控宽带太赫兹极化转换/吸收超表面

杨森<sup>1\*</sup>, 王佳云<sup>2</sup>, 张婷<sup>1</sup>, 于新颖<sup>1</sup><sup>1</sup>山西工程科技职业大学信息工程学院, 山西 晋中 030619;<sup>2</sup>中北大学仪器与电子学院, 山西 太原 030051

**摘要** 提出了一种基于二氧化钒( $\text{VO}_2$ )和石墨烯材料的温度电压双可控宽带极化转换/吸收超表面。通过调控超表面中  $\text{VO}_2$  和石墨烯的电导特性能够实现极化转换和吸收功能的控制。结果显示:当  $\text{VO}_2$  处于金属态且石墨烯处于绝缘态时,超表面工作在宽带极化转换模式,在 1.57~2.49 THz 范围内可实现线极化转换功能;当  $\text{VO}_2$  处于绝缘态且石墨烯处于金属态时,超表面的工作状态切换为吸收模式,在 1.56~2.99 THz 范围内的吸收率均大于 90%;极化转换和吸收性能可以分别通过控制  $\text{VO}_2$  的温度和石墨烯的偏置电压来调控。此外,通过本征模、阻抗匹配理论和电流磁场分布解释了该超表面的工作原理,并讨论了其工作性能在不同结构参数和入射角度下的稳定性。

**关键词** 表面光学; 超表面; 极化转换; 吸收; 二氧化钒; 石墨烯

中图分类号 O441

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0824001

## Temperature-Voltage Bi-Controllable Broadband Terahertz Polarization Conversion/Absorption Metasurface

Yang Sen<sup>1\*</sup>, Wang Jiayun<sup>2</sup>, Zhang Ting<sup>1</sup>, Yu Xinying<sup>1</sup><sup>1</sup> School of Information Engineering, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong, Shanxi 030619, China;<sup>2</sup> School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** A temperature-voltage bi-controllable broadband polarization conversion/absorption metasurface based on vanadium dioxide ( $\text{VO}_2$ ) and graphene is proposed. The control of the polarization conversion and absorption function can be realized by regulating the conductance properties of  $\text{VO}_2$  and graphene in the metasurface. The results show that when  $\text{VO}_2$  is in metal state and graphene is in insulating state, the metasurface operates in the broadband polarization conversion mode, achieving linear polarization conversion in the range of 1.57–2.49 THz. When  $\text{VO}_2$  is in insulating state and graphene is in metal state, the operation mode of the metasurface is switched to the absorption mode, and the absorptivity reaches 90% in the range of 1.56–2.99 THz. The polarization conversion and absorption performance can be controlled by regulating the temperature of  $\text{VO}_2$  and the bias voltage of graphene, respectively. Furthermore, the working principle of the metasurface is explained by eigenmodes, impedance matching theory, and current and magnetic field distributions. The stability of its performance under different structural parameters and incident angles is also discussed.

**Key words** optics at surfaces; metasurface; polarization conversion; absorption; vanadium dioxide; graphene

收稿日期: 2021-08-18; 修回日期: 2021-10-21; 录用日期: 2021-11-02

基金项目: 山西省自然科学基金(201801D221164)、山西省优秀研究生创新项目(2019BY015)

通信作者: \*475919749@qq.com

## 1 引言

电磁超表面是一种由人工亚原子排列而成的二维超材料,与传统的三维超材料相比,超表面具有厚度薄、重量轻、制作简单和成本低的优势。因此,超表面被广泛地应用于完美透镜<sup>[1]</sup>、全息<sup>[2-3]</sup>、传感器<sup>[4]</sup>、涡旋光束<sup>[5-6]</sup>、极化转换器<sup>[7-8]</sup>和吸收器<sup>[9-10]</sup>等领域中。其中,超表面极化转换器能够根据实际需求控制电磁波的极化模式,其极化转换功能包括线极化到线极化转换<sup>[11-12]</sup>、线极化到圆极化转换<sup>[13-14]</sup>和圆极化到圆极化转换<sup>[15]</sup>。

随着实际应用要求的提高,具有固定功能的传统极化转换超表面在一些应用场合中受到限制。近几年,研究人员在超表面中嵌入可调谐材料,如光敏硅<sup>[16-18]</sup>、二氧化钒<sup>[19-22]</sup>和石墨烯<sup>[23-29]</sup>等,以实现频率和幅度可调控的超表面。Zhao 等<sup>[16]</sup>在圆环谐振器中嵌入光敏硅材料,通过调节泵浦光照强度实现了光激发的可开关线极化转换器。Zheng 等<sup>[20]</sup>在 E 型谐振器的周围放置一层二氧化钒材料,通过改变超表面的工作温度实现了幅度可调的极化转换。Wang 等<sup>[23]</sup>基于石墨烯设计了一种多腔耦合波导系统,实现了频率可调的等离子体电磁诱导透明。Yadav 等<sup>[24]</sup>采用石墨烯材料设计的超表面具有宽带太赫兹交叉极化转换功能,可以通过石墨烯的电导率来调节其极化转换幅度。最近,具有吸收功能和极化转换可切换的超表面<sup>[28-31]</sup>受到研究者的广泛关注,由于其工作在吸收状态时能够将入射的电磁波完全屏蔽,故能够被应用于电磁极化屏蔽领域中<sup>[31]</sup>,这是与可开关和可调谐极化转换超表面的不同之处。He 等<sup>[32]</sup>通过在金属方环谐振器中嵌入二氧化钒材料,实现了在 1547 nm 波长处的吸收和在 1532~1567 nm 波长范围内的极化转换功能。Yan 等<sup>[33]</sup>在超表面结构中嵌入了一层二氧化钒环和二氧化钒薄膜,实现了 0.74~1.62 THz 处的宽带吸收和 1.47~2.27 THz 处的宽带圆极化转换功能。然而,上述具有吸收功能的极化转换超表面的吸收工作频段并不能完全覆盖极化转换频段。因此,吸收和极化转换功能在同一频段的可控宽带超表面具有一定的研究价值。

本文基于二氧化钒和石墨烯材料设计了一种温度电压双可控的太赫兹宽带极化转换/吸收超表面,可以利用二氧化钒的温度和石墨烯的偏置电压对极化转换和吸收功能进行控制。当二氧化钒处于金属态而石墨烯处于绝缘态时,所设计的超表面处于宽

带线极化转换模式。当二氧化钒处于绝缘态而石墨烯处于金属态时,所设计的超表面处于宽带吸收模式,并且吸收模式的频带能够完全覆盖极化转换模式的带宽,可以避免电磁信号的泄露和干扰。此外,所设计的超表面对入射角度具有一定的稳定性。

## 2 结构设计和仿真方法

所设计的极化转换/吸收超表面的结构如图 1 所示。图 1(a)是 4×4 的阵列示意图,其中  $E$  和  $H$  分别为入射电磁波的电场和磁场分量, $\mathbf{K}$  为入射电磁波的波矢, $\theta$  为入射角。单元结构如图 1(b)所示,该结构从上到下依次为六边形石墨烯谐振器、厚度为  $t_1$  的介质层 1、开口六边形环金属谐振器、厚度为  $t_2$  的介质层 2 和用来阻挡电磁波传输的金属接地板。其中,半径为  $r_1$  的六边形石墨烯谐振器由宽度为  $w_1$  的石墨烯线横向互连,并利用金属接地板为石墨烯谐振器提供偏置电压  $V_g$ 。在开口六边形环金属谐振器中嵌有 4 块二氧化钒材料,如图 1(d)所示,其中  $p$  为单元晶胞的周期长度, $g_1$  为二氧化钒块的长度, $g_2$  为开口六边形环金属谐振器开口长度, $r_2$  为开口六边形谐振器半径, $w_2$  为开口六边形谐振器线宽。结构中的金属材料为金,其电导率为  $4.56 \times 10^7$  S/m,二氧化硅的介电常数为 3.9,石墨烯和二氧化钒的建模和参数在将后文详细介绍。优化后的参数为: $t_1 = 5.9 \mu\text{m}$ ,  $t_2 = 10 \mu\text{m}$ ,  $p = 26 \mu\text{m}$ ,  $w_1 = 0.2 \mu\text{m}$ ,  $r_1 = 10.5 \mu\text{m}$ ,  $w_2 = 1.73 \mu\text{m}$ ,  $r_2 = 12 \mu\text{m}$ ,  $g_1 = 2.0 \mu\text{m}$ ,  $g_2 = 3.11 \mu\text{m}$ 。

为了研究所设计的极化转换/吸收超表面的性能,采用基于有限积分法(FIT)的电磁仿真软件 CST 对所设计的结构进行仿真。沿着  $X$  轴和  $Y$  轴方向设置为 unit cell 边界条件,沿着  $Z$  轴方向设置为 open (add space) 边界条件,沿  $Y$  轴方向极化的电磁波沿着  $Z$  轴方向入射到超表面。当入射光为横电(TE)波时,电场极化方向与入射面垂直。当入射光为横磁(TM)波时,电场极化方向与入射面平行,如图 1(a)所示。超表面的极化转换性能可通过极化转换率(PCR,  $M_{\text{RPC}}$ )衡量,PCR 的表达式为  $M_{\text{RPC}} = |r_{xy}|^2 / (|r_{xy}|^2 + |r_{yy}|^2)$ ,其中  $r_{yy}$  和  $r_{xy}$  分别为仿真提取的共面极化反射系数和交叉极化反射系数。吸收性能由吸收率来衡量,其表达式为  $A = 1 - |r_{yy}|^2 - |r_{xy}|^2$ 。

根据 Kubo 公式<sup>[34]</sup>,石墨烯的表面电导率  $\sigma_{\text{gra}}$  包括带内电导率  $\sigma_{\text{intra}}$  和带间电导率  $\sigma_{\text{inter}}$  两部分,三者的表达式为

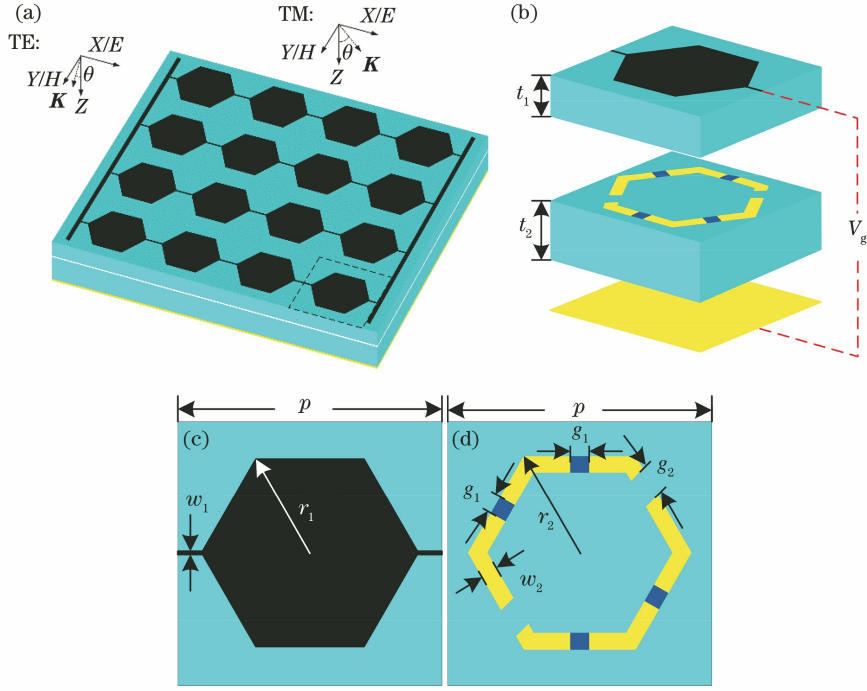


图 1 极化转换/吸收超表面结构示意图。(a)  $4 \times 4$  阵列图; (b) 单元晶胞结构图; (c) 六边形石墨烯谐振器; (d) 开口六边形环金属谐振器

Fig. 1 Structural diagram of polarization conversion/absorption metasurface. (a)  $4 \times 4$  array diagram; (b) structural diagram of unit cell; (c) hexagon-shaped graphene resonator; (d) split hexagonal-shaped metal resonator

$$\sigma_{gra} = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}, \quad (1)$$

$$\sigma_{intra} =$$

$$-j \frac{e^2 k_B T}{\pi t^2 (\omega - j2\Gamma)} \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left[ \exp \left( -\frac{\mu_c}{k_B T} \right) + 1 \right] \right\}, \quad (2)$$

$$\sigma_{inter} = \frac{j e^2}{4\pi t} \ln \left[ \frac{2 |\mu_c| - (\omega - j2\Gamma)t}{2 |\mu_c| + (\omega - j2\Gamma)t} \right], \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为入射电磁波的角频率;  $\mu_c$  为费米能级;  $T=300 \text{ K}$  为温度;  $e$  为电子电荷;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $\Gamma = \hbar/2\tau$  为散射率, 其中  $\hbar$  为普朗克常量,  $\tau$  为弛豫时间;  $t$  为介质层的厚度。一般来说, 石墨烯的带间电导率可以忽略不计<sup>[35]</sup>, 故石墨烯的表面电导率可简化为 Drude 模型<sup>[34]</sup>, 即

$$\sigma_{gra} \approx \frac{e^2 \mu_c}{\pi t^2} \frac{j}{\omega + j/\pi}. \quad (4)$$

因此, 石墨烯的表面电导率可以通过改变其费米能级来实现调节。石墨烯费米能级与外加偏置电压的关系<sup>[36,37]</sup>为

$$\mu_c \approx \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r V_g}{et}}, \quad (5)$$

式中:  $v_f = 1.1 \times 10^6 \text{ m/s}$  是费米速度;  $V_g$  是外加偏置电压;  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_r$  分别为真空和介质层的介电常数。

另外, 在太赫兹频段, 二氧化钒的电介质特性能够用 Bruggeman 有效媒质理论来描述<sup>[38-39]</sup>, 二氧化钒的介电常数为

$$\epsilon_{VO_2} = \frac{1}{4} \{ \epsilon_d (2 - 3V) + \epsilon_m (3V - 1) + \sqrt{[\epsilon_d (2 - 3V) + \epsilon_m (3V - 1)]^2 + 8\epsilon_d \epsilon_m} \}, \quad (6)$$

式中:  $\epsilon_d = 9$  和  $\epsilon_m = \epsilon_\infty + i \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i/\tau_V)}$  分别为二氧化钒处于绝缘态和金属态时的介电常数, 其中  $\epsilon_\infty$  为高频介电常数;  $\omega_p$  为碰撞频率;  $\tau_V = 2.27 \text{ fs}$  为弛豫时间;  $V$  为金属区域的体积分, 其表达式<sup>[39]</sup>为

$$V = 1 - \frac{1}{1 + \exp[(T - T_0)/\Delta T]}, \quad (7)$$

式中:  $T_0$  是相变温度, 当温度变化时, 二氧化钒将经历从绝缘态到金属态的转变;  $\Delta T$  为温度变化量。在绝缘态情况下, 二氧化钒的介电常数为 9, 电导率小于  $200 \text{ S/m}$ , 而在金属态情况下, 它的电导率将达到  $10^5 \text{ S/m}$  以上<sup>[34-35]</sup>。此外, 在二氧化钒工作温度范围内, 石墨烯的电导率几乎不会受到影响<sup>[40]</sup>, 因此该超表面能够在极化转换和吸收模式下稳定工作。

### 3 结果及分析

仿真得到的反射系数、极化转换率和吸收率曲

线如图 2 所示。从图 2(a)中可以发现,当石墨烯的费米能级为 0.1 eV 且二氧化钒的电导率为  $2.5 \times 10^5 \text{ S/m}$  时,石墨烯处于绝缘态,而二氧化钒处于金属态,此时所设计的超表面工作在宽带线极化转换模式,可以将 1.57~2.49 THz 频段内入射的共面极化电磁波转化为交叉极化电磁波,极化转换率均大于 90%。当石墨烯的费米能级为 0.9 eV 且二氧化钒的电导率为  $200 \text{ S/m}$  时,石墨烯处于金属态,而二氧化钒处于绝缘态,此时所设计的超表面工作在宽带吸收模式,在 1.56~2.99 THz 频段内的电磁波将被完全吸收,如图 2(b)所示。因此,该超表面能够通过调控二氧化钒和石墨烯的电导状态来实现极化转换功能和吸收功能的切换。可以注意到,

该极化转换/吸收超表面的吸收工作频带能够完全覆盖极化转换频段,即当其工作在吸收模式时,可以将电磁波完全吸收,进而避免信号干扰。图 2(c)为当保持石墨烯费米能级为 0.1 eV 时,在不同二氧化钒电导率下的极化转换率。可以发现,随着二氧化钒电导率的降低,极化转换率在逐渐下降,并且带宽在逐渐变窄。图 2(d)所示为当二氧化钒的电导率为  $2.5 \times 10^5 \text{ S/m}$  时,石墨烯费米能级处于不同值情况下的吸收率。可以发现:随着石墨烯费米能级的降低,吸收率逐渐降低;当费米能级为 0.1 eV 时,最大吸收率仅为 0.34。因此,该极化转换/吸收超表面的工作性能可以通过控制二氧化钒和石墨烯的状态来控制。

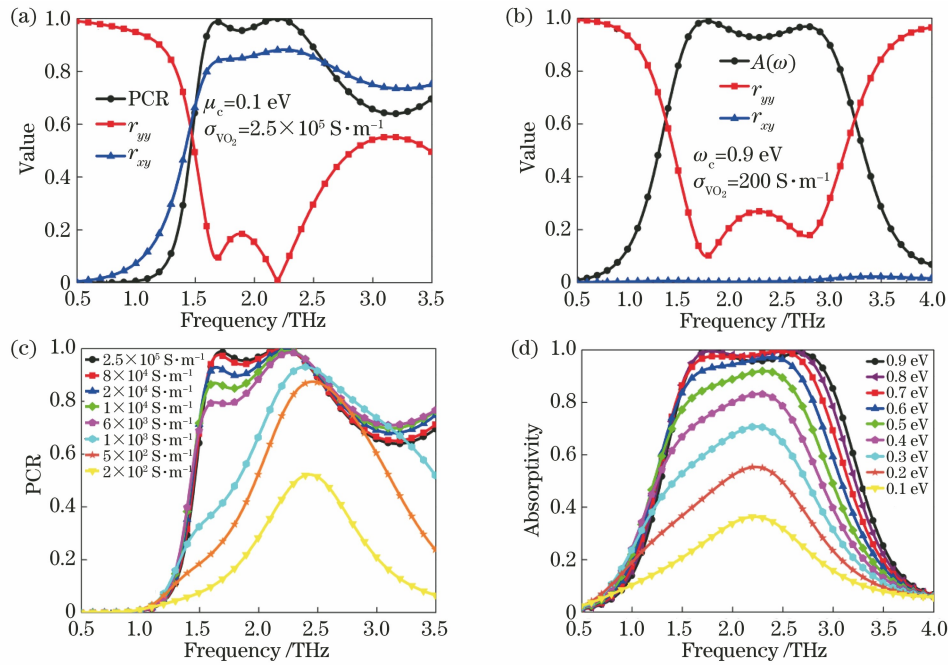


图 2 仿真得到的反射系数、PCR 和吸收率曲线。(a)极化转换模式的反射系数和 PCR;(b)吸收模式的反射系数和吸收率;(c)不同二氧化钒电导率下的 PCR;(d)石墨烯不同费米能级下的吸收率

Fig. 2 Reflection coefficient, PCR and absorptivity curves obtained by simulation. (a) Reflection coefficient and PCR of polarization conversion mode; (b) reflection coefficient and absorptivity of absorption mode; (c) PCR under different conductivities of vanadium dioxide; (d) absorptivity under different Fermi energies of graphene

所设计超表面的工作原理可以通过正交的本征模和归一化复阻抗来解释,如图 3 所示。电场沿着 Y 方向极化的入射电磁波的电场能够被分解为沿着 u 轴和 v 轴的两个分量,即  $E_i = uE_{i,u} \exp(j\phi) + vE_{i,v} \exp(j\phi)$ ,其中 u 和 v 为沿着 u 轴和 v 轴的单位向量。反射电磁波的电场分量同样能够被分解为  $E_r = ur_u E_{i,u} \exp[j(\phi + \phi_u)] + vr_v E_{i,v} \exp[j(\phi + \phi_v)]$ ,其中  $r_u$  ( $r_v$ ) 和  $\phi_u$  ( $\phi_v$ ) 分别为沿着 u 轴(v 轴)的反射系数和相位。由于结构中开口六边形金属谐振器在二氧化钒导通时存在不对称性,故在  $\phi_u$  和

$\phi_v$  之间存在相位差  $\Delta\phi_{uv}$ 。当  $r_u \approx r_v$  和  $\Delta\phi_{uv} \approx 180^\circ$  同时被满足时,  $E_{r,v}$  将被反转,而沿着 Y 方向偏振的入射电场将被旋转为沿着 X 轴方向偏振,实现线极化到交叉极化的转换。从图 3(a)中可以发现,在超表面的极化转换工作频段(1.57~2.49 THz)内,  $r_u$  和  $r_v$  近似相等,相位差  $\Delta\phi_{uv}$  接近  $180^\circ$ ,故在此频段内极化转换性能良好。对于吸收模式,吸收器的阻抗经过自由空间中波阻抗归一化后可以表示为  $Z_1 = \sqrt{\mu/\epsilon}$ <sup>[41-42]</sup>,其中  $\epsilon$  和  $\mu$  分别为相对等效介电常数和磁导率。当吸收器的阻抗与自由空间中的阻

抗相匹配时,即  $Z_1 \approx Z_0$ ,此时反射率  $R = (Z_1 - Z_0)/(Z_1 + Z_0)$  将接近于 0,进而可以得到良好的吸收性能。从图 3(b)中可以发现,在吸收模式工作频段(1.56~2.99 THz)内,归一化复阻抗的实部接近于 1 而虚部接近于 0,即  $Z_1 \approx Z_0$ ,能够实现很好的阻抗匹配,进而得到了良好的吸收性能。

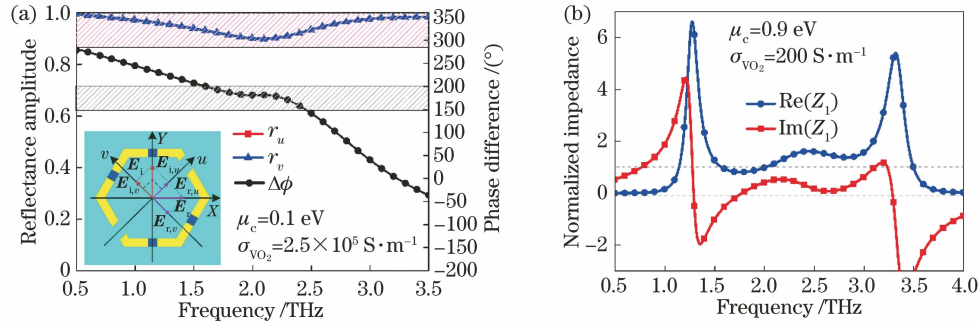


图 3 正交本征模和归一化复阻抗。(a)极化转换模式下入射电磁波电场沿着  $u$  轴和  $v$  轴的幅度和相位差;(b)吸收模式下归一化复阻抗

Fig. 3 Orthogonal eigenmodes and normalized complex impedance. (a) Amplitudes and phase difference when the electric field of incident electromagnetic wave along  $u$ -axis and  $v$ -axis in polarization conversion mode; (b) normalized complex impedance in absorption mode

为更好地阐明所设计超表面的工作机制,图 4 和图 5 分别绘制了超表面工作在两种模式下谐振频率处的表面电流和磁场分布。从图 4(a)~(f)中可以发现,当超表面工作在极化转换模式时,在六边形石墨烯谐振器上的表面电流十分微弱,表面电流主要分布在开口六边形金属谐振器和金属接地板上并且方向相反,此时可激励产生磁偶极子  $m_1$  和  $m_2$ ,随后会激发一个感生磁场  $H$ 。由于感应磁场  $H$  沿着  $Y$  轴方向上的分量  $H_y$  与入射电磁波的电场分量  $E_i$  平行,因此  $H_y$  和  $E_i$  之间会发生交叉耦合,实现共极化波向交叉极化波的极化转换<sup>[12]</sup>。此外,对比图 4(b)、(e)可以发现,该超表面在 1.68 THz 处的表面电流在开口六边形金属谐振器的两条臂上平行分布,而在 2.19 THz 处的电流分布可以看作被分割为两个部分,这类似于多模高阶谐振,此时的表面电流流经的等效长度较短,故谐振器工作的频段较

高。当超表面工作在吸收模式时,低频 1.79 THz 处的表面电流主要分布在石墨烯谐振器和金属底板上,在开口六边形金属谐振器上的电流非常微弱,这说明此处谐振是以石墨烯和底层金属底板产生的磁谐振为主。高频 2.72 THz 处的表面电流在石墨烯、开口六边形谐振器和金属接地板上均有分布,并且在石墨烯上的表面电流方向与开口六边形谐振器相反,而六边形谐振器上的电流方向又与金属接地板上的相反,这就意味着在石墨烯层和开口六边形谐振器之间,以及开口六边形谐振器与金属接地板之间均存在磁响应。因此,此处谐振为这几个部分产生的混合谐振,正是由于结构的叠加,故在低频 1.79 THz 和 2.72 THz 处产生不同的谐振模式使两个工作频段相互联合在一起,进而形成宽带吸收。图 5 为沿着  $XOZ$  平面在单元晶胞中间截取的磁场分布。从图 5(a)、(b)中可以发现,极化转换

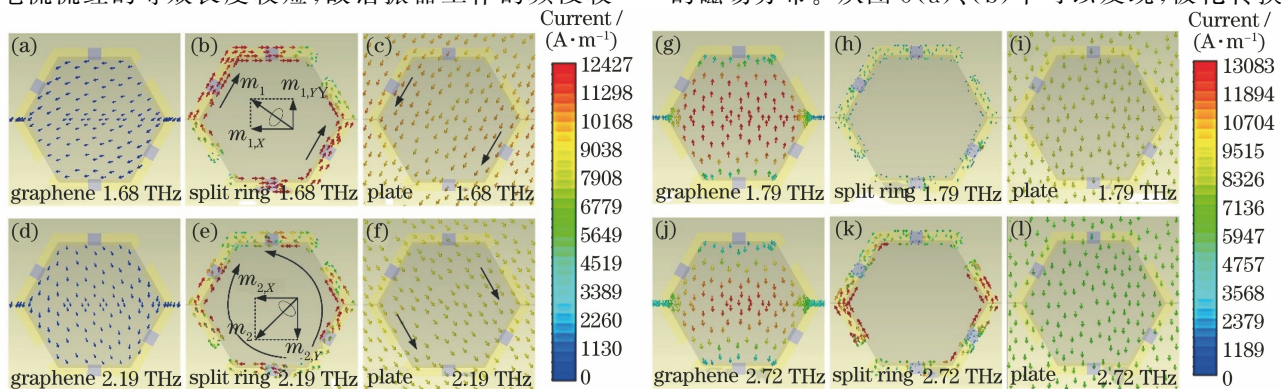


图 4 表面电流分布。(a)~(f)极化转换模式;(g)~(l)吸收模式

Fig. 4 Surface current distribution. (a)~(f) Polarization conversion mode; (g)~(l) absorption mode

模式的磁场主要分布在开口六边形谐振器上,这说明极化转换模式由开口六边形谐振器主导。在图 5(c)、(d)中,吸收模式的磁场在石墨烯、开口六

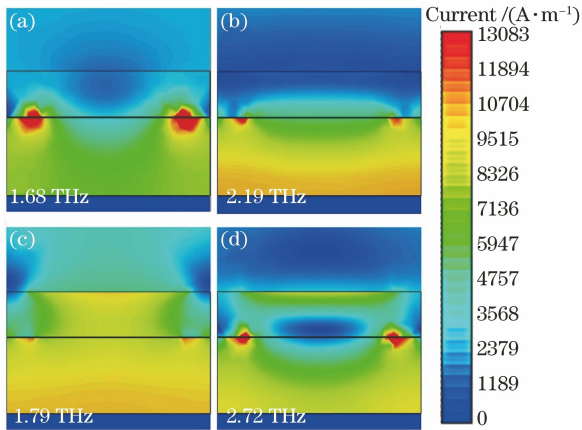


图 5 谐振频率处的磁场分布。(a)(b)极化转换模式;  
(c)(d)吸收模式

Fig. 5 Magnetic field distribution at resonant frequencies.

(a)(b) polarization conversion mode; (c)(d) absorption mode

边形谐振器和金属接地板上均有分布,说明吸收模式由石墨烯和开口六边形谐振器共同产生,这进一步证明了上述电流分布的分析。

当超表面应用到实际场合中时,需要考虑结构参数对性能的影响。图 6 给出了所设计的极化转换/吸收超表面在不同的结构参数( $r_1$ 、 $r_2$  和  $w_2$ )时的性能。图 6(a)、(b)为该超表面工作在极化转换模式下,当选择开口六边形谐振器不同的半径  $r_2$  和线宽  $w_2$  且保持其他参数不变时的 PCR。可以发现:随着  $r_2$  的增大,极化转换带宽在逐渐变大,PCR 在 1.75 THz 处有明显降低, $r_2$  的最优值为  $12 \mu\text{m}$ ;  $w_2$  对 PCR 的影响较小,PCR 能够保持较好的稳定性。图 6(c)为当该超表面工作在吸收模式时,不同六边形石墨烯谐振器半径  $r_1$  对吸收率的影响。可以发现,吸收带宽随着半径的增大逐渐增大,此时吸收率有所降低。因此,在保证 90% 以上吸收率的情况下,选取  $r_1$  的值为  $10.5 \mu\text{m}$ 。

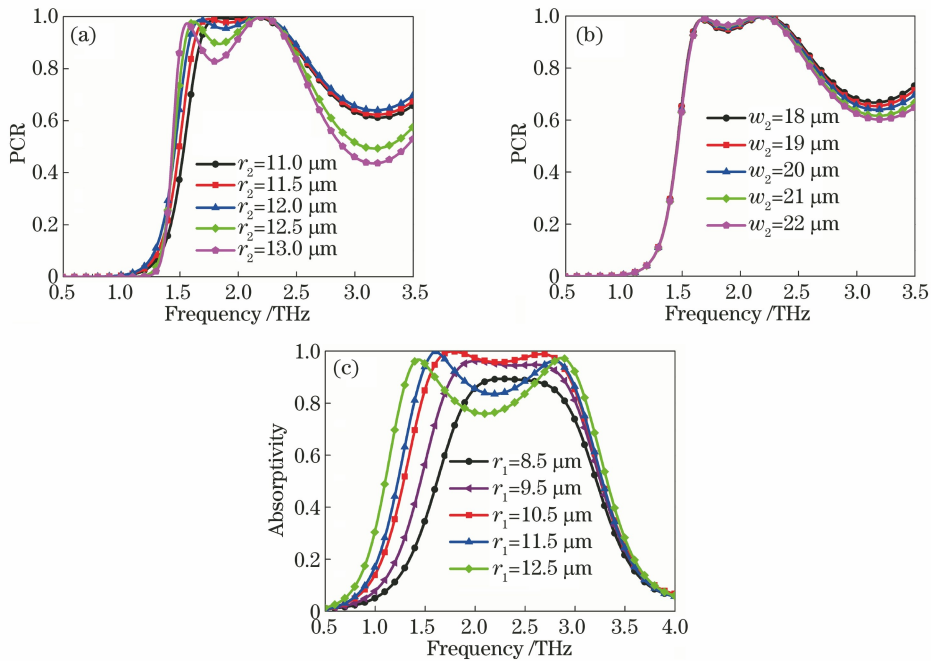


图 6 不同结构参数下的 PCR 和吸收率。(a)不同开口六边形环半径下的 PCR;(b)不同开口六边形环线宽下的 PCR;(c)不同六边形石墨烯半径下的吸收率

Fig. 6 PCR and absorptivity under different structure parameters. (a) PCR at different radii of split hexagon-shaped ring; (b) PCR at different widths of split hexagon-shaped ring; (c) absorptivity at different radii of hexagon-shaped graphene

通常来说,电磁波不能完全垂直于超表面入射,故超表面对于入射角度的稳定性是需要考虑的因素。此外,吸收器能否对所有极化模式的电磁波实现良好的吸收也是一个重要指标。图 7 给出了超表面在不同入射角下的性能和极化角对吸收率的影

响,其中 TE 波对应电场方向垂直于入射面的情况, TM 波对应电场方向平行于入射面的情况,如图 1 中图例所示。从图 7(a)~(c)中可以发现:入射角在  $40^\circ$  内的 PCR 和吸收率均能保持在 90% 左右,所设计的超表面具有一定的角度稳定性;对于不同极

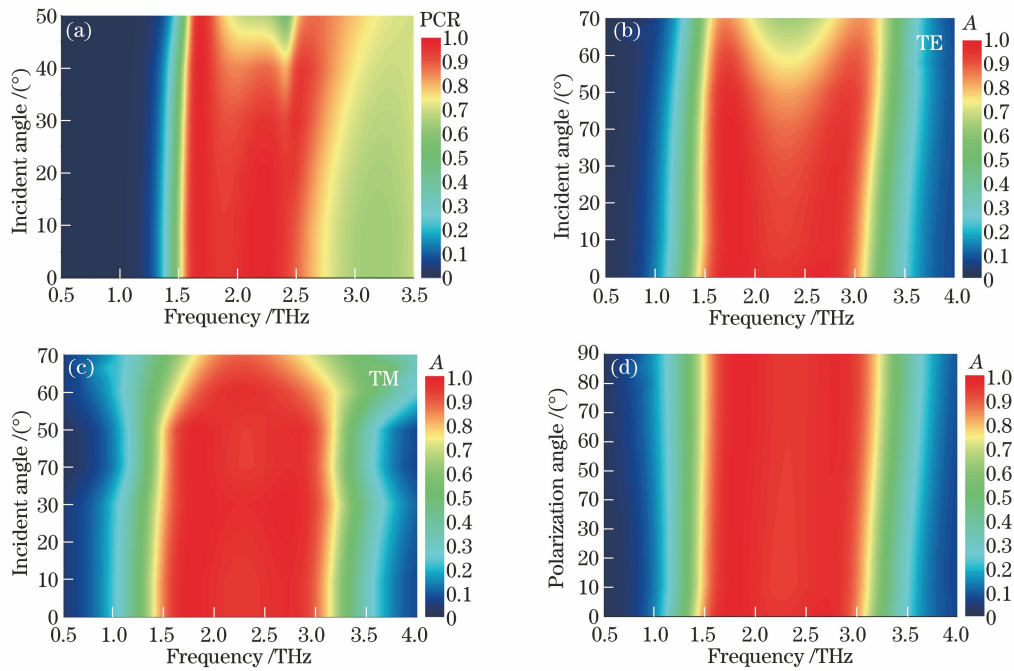


图 7 超表面在不同入射角下的性能和极化角对吸收率的影响。(a)不同入射角下的 PCR;(b)不同入射角下 TE 模的吸收率;(c)不同入射角下 TM 模的吸收率;(d)不同极化角下的吸收率

Fig. 7 Performance of metasurface at different incident angles and effect of polarization angle on absorptivity. (a) PCR under different incident angles; (b) absorptivity of TE mode under different incident angles; (c) absorptivity of TM mode under different incident angles; (d) absorptivity under different polarization angles

化方向入射的电磁波,所设计的超表面均能够实现很好的吸收效果,石墨烯馈电线对吸收峰仅有轻微的影响。

## 4 结 论

通过在超表面中嵌入二氧化钽和石墨烯材料,设计了一种温度电压双可控的太赫兹宽带极化转换/吸收超表面。同时,通过调控二氧化钽的温度和石墨烯的偏置电压能够实现对极化转换和吸收功能的控制。当二氧化钽的电导率为  $2.5 \times 10^5$  S/m 且石墨烯的费米能级为 0.1 eV 时,超表面工作在宽带极化转换模式,在 1.57~2.49 THz 范围内可实现线极化转换功能。当二氧化钽的电导率为 200 S/m 且石墨烯的费米能级为 0.9 eV 时,超表面的工作状态切换为吸收模式,在 1.56~2.99 THz 范围内的吸收率均大于 90%。此外,可以分别通过二氧化钽的温度和石墨烯的偏置电压来控制极化转换和吸收性能。通过分析超表面的本征模、等效阻抗和电流磁场分布对其工作原理进行了解释,并讨论了其工作性能在不同结构参数和入射角度下的稳定性。

### 参 考 文 献

- [1] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. Nature Communications, 2013, 4: 2808.
- [2] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. Nature Nanotechnology, 2015, 10(4): 308-312.
- [3] Li L L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 197.
- [4] Tao H, Strikwerda A C, Liu M K, et al. Performance enhancement of terahertz metamaterials on ultrathin substrates for sensing applications[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(26): 261909.
- [5] Cheng K X, Hu Z D, Wang Y Q, et al. High-performance terahertz vortex beam generator based on square-split-ring metasurfaces[J]. Optics Letters, 2020, 45(21): 6054-6057.
- [6] Bai T R, Li Q, Wang Y Q, et al. Terahertz vortex beam generator based on bound states in the continuum[J]. Optics Express, 2021, 29(16): 25270-25279.
- [7] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [8] Chiang Y J, Yen T J. A composite-metamaterial-based terahertz-wave polarization rotator with an

- ultrathin thickness, an excellent conversion ratio, and enhanced transmission[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(1): 011129.
- [9] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [10] Wang J Y, Yang R C, Tian J P, et al. A dual-band absorber with wide-angle and polarization insensitivity [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(7): 1242-1246.
- [11] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, et al. Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99 (6): 063908.
- [12] Gao X, Han X, Cao W P, et al. Ultrawideband and high-efficiency linear polarization converter based on double V-shaped metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(8): 3522-3530.
- [13] Wu X X, Meng Y, Wang L, et al. Anisotropic metasurface with near-unity circular polarization conversion[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108 (18): 183502.
- [14] Fahad A K, Ruan C, Ali S A K M, et al. Triple-wide-band ultra-thin metasheet for transmission polarization conversion[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 8810.
- [15] Wang S Y, Liu W, Geyi W. A circular polarization converter based on in-linked loop antenna frequency selective surface[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124 (6): 126.
- [16] Zhao J C, Cheng Y Z, Cheng Z Z. Design of a photo-excited switchable broadband reflective linear polarization conversion metasurface for terahertz waves[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 4600210.
- [17] Yuan S, Yang R C, Xu J P, et al. Photoexcited switchable single-/dual-band terahertz metamaterial absorber[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6 (7): 075807.
- [18] Yang S, Yuan S, Wang J Y. Light-excited and switchable dual-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0216001.  
杨森, 袁苏, 王佳云. 一种光激发可切换的双频太赫兹超材料吸收器 [J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0216001.
- [19] Xiao Z Y, Zou H L, Zheng X X, et al. A tunable reflective polarization converter based on hybrid metamaterial[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(12): 401.
- [20] Zheng X X, Xiao Z Y, Ling X Y. A tunable hybrid metamaterial reflective polarization converter based on vanadium oxide film [J]. *Plasmonics*, 2018, 13 (1): 287-291.
- [21] Lei L, Lou F, Tao K Y, et al. Tunable and scalable broadband metamaterial absorber involving VO<sub>2</sub>-based phase transition [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(7): 734-741.
- [22] Yang Z H, Jiang M Z, Liu Y C, et al. Tunable-bandwidth terahertz polarization converter based on a vanadium dioxide hybrid metasurface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1714001.  
杨朝晖, 江明珠, 刘永琛, 等. 基于二氧化钒复合超表面的太赫兹带宽可调极化转换器 [J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1714001.
- [23] Wang J C, Wang X S, Shao H Y, et al. Peak modulation in multicavity-coupled graphene-based waveguide system[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 9.
- [24] Yadav V S, Ghosh S K, Bhattacharyya S, et al. Graphene-based metasurface for a tunable broadband terahertz cross-polarization converter over a wide angle of incidence [J]. *Applied Optics*, 2018, 57 (29): 8720-8726.
- [25] Wang Y, Leng Y B, Dong L H, et al. Design of tunable metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0716001.  
王越, 冷雁冰, 董连和, 等. 基于石墨烯-金属混合结构的可调超材料吸波体设计 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0716001.
- [26] Li H, Yu J, Chen Z. Polarization-independent and incident-angle-insensitive switchable broadband absorber/reflector based on single-layer graphene [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0803001.  
李辉, 余江, 陈哲. 基于单层石墨烯的偏振无关和入射角度不敏感的可切换宽带吸收器/反射器 [J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0803001.
- [27] Li D M, Yuan S, Yang R C, et al. Dynamical optical-controlled multi-state THz metamaterial absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0816001.  
李达民, 袁苏, 杨荣草, 等. 动态光调控多态太赫兹超材料吸收器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0816001.
- [28] Quader S, Zhang J, Akram M R, et al. Graphene-based high-efficiency broadband tunable linear-to-circular polarization converter for terahertz waves[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 19347012.
- [29] Han J Z, Chen R S. Tunable broadband terahertz absorber based on a single-layer graphene metasurface



- [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30289-30298.
- [30] Zhou Y L, Cao X Y, Gao J, et al. Reconfigurable metasurface for multiple functions: magnitude, polarization and phase modulation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29451-29459.
- [31] Karman T. Microwave shielding with far-from-circular polarization [J]. *Physical Review A*, 2020, 101(4): 042702.
- [32] He H R, Shang X J, Xu L, et al. Thermally switchable bifunctional plasmonic metasurface for perfect absorption and polarization conversion based on VO<sub>2</sub> [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 4563-4570.
- [33] Yan D X, Meng M, Li J S, et al. Vanadium dioxide-assisted broadband absorption and linear-to-circular polarization conversion based on a single metasurface design for the terahertz wave [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29843-29854.
- [34] Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(6): 064302.
- [35] Huang X, He W, Yang F, et al. Polarization-independent and angle-insensitive broadband absorber with a target-patterned graphene layer in the terahertz regime [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 25558-25562.
- [36] Ju L, Geng B S, Horng J, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials [J]. *Nature Nanotechnology*, 2011, 6(10): 630-634.
- [37] Yan H G, Li X S, Chandra B, et al. Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks [J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(5): 330-334.
- [38] Lü T T, Li Y X, Ma H F, et al. Hybrid metamaterial switching for manipulating chirality based on VO<sub>2</sub> phase transition [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23186.
- [39] Fan F, Hou Y, Jiang Z W, et al. Terahertz modulator based on insulator-metal transition in photonic crystal waveguide [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4589-4596.
- [40] Mao M, Liang Y Y, Liang R S, et al. Dynamically temperature-voltage controlled multifunctional device based on VO<sub>2</sub> and graphene hybrid metamaterials: perfect absorber and highly efficient polarization converter [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(8): 1101.
- [41] Smith D R, Schultz S, Markoš P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients [J]. *Physical Review B*, 2002, 65(19): 195104.
- [42] Chen X D, Grzegorzczak T M, Wu B I, et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials [J]. *Physical Review E*, 2004, 70(1): 016608.