

光学学报

基于石墨烯-二氧化钒的太赫兹双控可调宽带吸收器

朱华利¹, 张勇^{1*}, 叶龙芳^{2,3}, 党章¹, 徐锐敏¹, 延波¹

¹电子科技大学极高频复杂系统国防重点学科实验室, 四川 成都 611731;

²厦门大学电子科学与技术学院电磁声学研究院, 福建 厦门 361005;

³厦门大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

摘要 提出了一种基于石墨烯和二氧化钒(VO_2)混合材料的双控太赫兹超材料宽带吸收器,该吸收器具有结构简单、吸收/透射/反射状态可切换、调谐深度大等优点。吸收器的吸收率的调控可以通过改变 VO_2 的相变特性及石墨烯的费米能级来实现。当 VO_2 处于金属态时,该吸收器在1.07~2.59 THz频率范围内可实现吸收率大于90%的宽带吸收,且具有偏置无关和宽入射角不敏感特性,通过改变石墨烯的费米能级,可对带内吸收率进行动态调控,可调范围大于67.2%。当 VO_2 处于绝缘状态,该器件表现为由石墨烯费米能级调控的可调透射器,透射率可调范围大于40%。进一步地,同时控制 VO_2 相变特性和石墨烯费米能级,可将吸收器的带内吸收率的可调范围提升至90%以上,最大可调范围为99.7%@2.3 THz,实现了吸收率的完美开关特性。该吸收器通过两个独立可控的超材料实现了具有高调谐特性的太赫兹双控吸收器,在太赫兹智能器件(如衰减器、反射器和空间调制器等)领域具有潜在的应用价值。

关键词 光学器件; 超材料吸收器; 太赫兹; 可调节; 宽带

中图分类号 TB34

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1423002

Dual-Control and Tunable Broadband Terahertz Absorber Based on Graphene-Vanadium Dioxide

Zhu Huali¹, Zhang Yong^{1*}, Ye Longfang^{2,3}, Dang Zhang¹, Xu Ruimin¹, Yan Bo¹

¹Fundamental Science on EHF Laboratory, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China;

²Institute of Electromagnetics and Acoustics, Department of Electronic Science, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;

³Shenzhen Research Institute of Xiamen University, Shenzhen 518057, Guangdong, China

Abstract This paper proposes a dual-control adjustable terahertz metamaterial broadband absorber based on a mixed material of graphene and vanadium dioxide (VO_2). The absorber has the advantages of simple structure, switchable absorption/transmission/reflection, and large modulation depth. The absorptivity control of the absorber can be achieved by changing the phase transition characteristics of VO_2 and the Fermi energy level of graphene. When VO_2 is in a metallic state, the absorber can achieve broadband absorption with an absorptivity greater than 90% in the frequency range of 1.07–2.59 THz, and exhibits excellent absorption performance under a wide range of incident and polarization angles for TE and TM polarizations. By changing the Fermi energy of the graphene, the in-band absorptivity can be dynamically adjusted, and the modulation depth is greater than 67.2%. When VO_2 is in an insulating state, the device behaves as an adjustable transmission mode regulated by the graphene Fermi energy level, with a transmittance modulation depth greater than 40%. Furthermore, by controlling both the VO_2 phase transition characteristics and the graphene Fermi energy level, the in-band absorptivity modulation depth of the absorber can be increased to more than 90%, and the maximum modulation depth is 99.7%. The absorber realizes a terahertz dual-control absorber with good tuning characteristics through two independently controllable materials, and has potential applications in the field of terahertz smart devices (such

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-01-20; 录用日期: 2022-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(61871072)

通信作者: *yongzhang@uestc.edu.cn

as attenuators, reflectors, and spatial modulators).

Key words optical devices; metamaterial absorber; terahertz; tunability; broadband

1 引言

太赫兹超材料作为一种人工复合材料,具有常规材料所不具备的独特特性,在超透镜^[1-3]、完美吸收器^[4-7]、隐形斗篷^[8-9]等诸多领域具有广阔的应用前景。太赫兹吸收器是一种对入射电磁波具有高吸收率的器件,在无线安全、雷达通信和选择性收发器应用中具有迫切的需求^[10-14]。由于天然材料难以在太赫兹波段实现完美吸收,超材料吸收器成为这一领域的研究热点。基于电磁谐振的超材料吸收器在 2008 年被首次提出^[15],其在 11.5 GHz 时的吸收率大于 88%。随后,研究者们研究和设计了各种超材料吸收器^[16-19],但大多数吸收器的吸收率和相应的功能通常是固定的,这极大地限制了其应用范围。因此,可调谐的多功能超材料吸收器在太赫兹智能系统中具有很大的应用价值。

石墨烯是由碳原子组成的平面六角晶格形二维单层材料,其具有独特的特性,是可调谐器件的可行候选材料。石墨烯薄膜可以在中红外和太赫兹波段激发表面等离子体激元,在固定结构下通过外加偏置电压调节费米能级,进而对表面电导率进行调控^[20-21]。近年来,基于石墨烯的可调太赫兹吸收器得到了广泛的研究,各种基于石墨烯的具有周期性图案的窄带、宽带、多频吸收器被报道^[22-25]。然而,大多数仅采用石墨烯实现的太赫兹可调吸收器的调制深度有限,这一固有的缺点不利于许多智能系统的发展。

除石墨烯外,二氧化钒(VO_2)薄膜具有独特的绝缘-金属相变特性^[26]。2006 年,Jeepsen 等^[27]发现在环境温度约为 340 K 时, VO_2 的电导率会发生 5 个数量级的显著突变,实现绝缘态与金属态之间的转换。最近,基于混合 VO_2 超材料,研究者们提出了吸收-传输转换器^[28]、宽带吸收器^[29]、吸收-极化转换器^[30]、宽带-窄带转换吸收器^[31]等。但若仅采用 VO_2 来调控太赫兹器

件,其功能往往是单一的。因此,为了实现太赫兹超材料器件的功能和调制手段多样化、增大太赫兹器件的调制深度,可将可调超材料石墨烯和 VO_2 结合在一个超材料器件中,这为推动太赫兹智能系统的进一步发展提供新的思路和方法。

本文提出了一种由混合圆形石墨烯和二氧化钒组成的具有高调谐性的宽带太赫兹吸收器。该吸收器可通过对石墨烯和二氧化钒的独立控制,在 1.07~2.59 THz 频率范围内实现吸收率大于 90% 的宽带吸收,且带内吸收率的可调范围均大于 90%,最大的可调范围为 99.7%。总体而言,与仅基于单一可调石墨烯或 VO_2 材料的传统吸收器相比,本文提出的吸收器可大大提高吸收率的可调深度且具备吸收-透射-反射功能可切换特性,在各种太赫兹智能光电器件中具有潜在的应用前景。

2 结构设计与分析

2.1 双控可调宽带吸收器的结构设计

基于石墨烯- VO_2 的双控可调太赫兹宽带吸收器的结构示意图如图 1 所示。该吸收器的单元结构由三层组成:双圆形石墨烯图案、聚乙烯环烯烃共聚物 (Topas) 衬底和 VO_2 薄膜,与传统“MIM 三明治”结构不同的是,本结构采用相变材料 VO_2 代替背面的金属反射器。Topas 是一种透明、坚硬的非晶热塑性共聚物,具有优异的耐热性、近零吸湿性和高稳定性,适用于太赫兹器件。在仿真中,Topas 衬底的相对介电常数设置为 2.35^[10,32],厚度 h_{Topas} 为 27 μm ,周期 p 为 44 μm , VO_2 薄膜的厚度 h_{VO_2} 为 0.2 μm 。石墨烯层由 1 个圆心居中的半径 $r_1=18 \mu\text{m}$ 的圆和 4 个分布在矩形角的半径 $r_2=10 \mu\text{m}$ 的 1/4 圆组成,二者之间通过宽度 $w=0.2 \mu\text{m}$ 的矩形系带连接起来,以实现连续的电压控制。

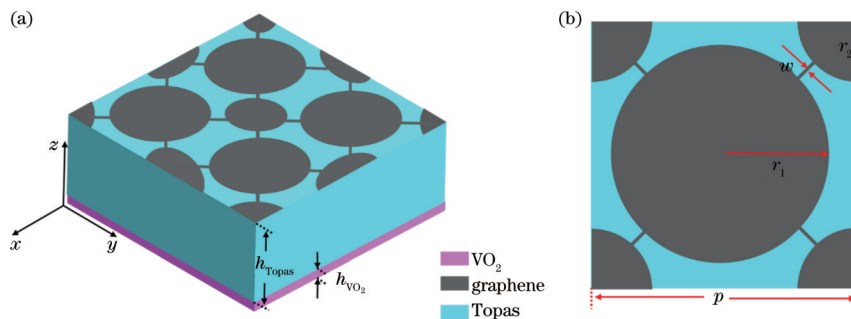


图 1 基于石墨烯-二氧化钒的双控可调太赫兹宽带吸收器结构示意图。(a) 三维结构示意图;(b) 单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of proposed broadband terahertz absorber with dual-control adjustable property based on graphene- VO_2 metamaterial. (a) Three-dimensional schematic of proposed absorber; (b) structure schematic of absorber unit

利用有限积分法对所设计吸收器的性能进行数值计算和分析。原则上,石墨烯的表面电导率可由基于

带内跃迁电导率和带间跃迁电导率的 Kubo 公式(单位:S)来确定:

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{je^2}{\pi\hbar^2(\omega - j2\Gamma)} \int_0^\infty \left[\frac{\partial f_d(\xi, \mu_c, T)}{\partial \xi} - \frac{\partial f_d(-\xi, \mu_c, T)}{\partial \xi} \right] \xi \partial \xi, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{je^2(\omega - j2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \int_0^\infty \frac{f_d(\xi, \mu_c, T) - f_d(-\xi, \mu_c, T)}{(\omega - j2\Gamma)^2 - 4\xi^2/\hbar^2} \partial \xi, \quad (2)$$

式中: $f_d(\xi, \mu_c, T) = \left\{ \exp\left[\frac{(\xi - \mu_c)/(k_B T)}{T}\right] + 1 \right\}^{-1}$ 表示费米能级狄拉克分布; $\Gamma = 2\tau^{-1}$ 表示散射率, τ 为石墨烯弛豫时间; \hbar 为普朗克常数; k_B 为玻尔兹曼常数; ω 、 ξ 、 μ_c 和 T 分别代表石墨烯的角频率、能量、费米能级和相对温度。在吸收器设计中, 石墨烯带内跃迁电导率起主要作用, 带间跃迁电导率可以忽略不计。通过外加偏置电压来改变石墨烯的费米能级, 这会直接导致石墨烯电导率的改变, 进而实现对石墨烯的动态调谐。使用商业仿真软件 CST 微波工作室对石墨烯进行建模, 在仿真中, 设定石墨烯的厚度为 1 nm, 弛豫时间为 0.1 ps, 相对温度为 300 K, 初始费米能级 $\mu_c = 0.6$ eV。

在太赫兹频段, VO_2 薄膜的介电常数可由 Drude 模型表示:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2(\sigma)}{\omega^2 + i\gamma\omega}, \quad (3)$$

式中: ϵ_∞ 为高频介电常数, $\epsilon_\infty = 12$; γ 为碰撞频率, $\gamma = 5.75 \times 10^{13}$ rad/s; $\omega_p(\sigma)$ 表示与电导率 σ_0 相关的等离子频率, 满足 $\omega_p^2(\sigma) = (\sigma/\sigma_0)\omega_p^2(\sigma_0)$, $\sigma_0 = 3 \times 10^5$ S/m, $\omega_p(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{15}$ rad/s。为了模拟 VO_2 的绝缘-金属相变特性, 用不同的电导率 σ 来模拟 VO_2 的光电特性。在仿真中, 设置 $\sigma = 2 \times 10^5$ S/m 和 $\sigma = 10$ S/m 分别代表金属态和绝缘态。二氧化钒的不同电导率可通过不同环境温度获得, 且频率依赖特性可忽略不计。其中, 低温状态下的二氧化钒电导率为 10 S/m, 高温状态下的二氧化钒电导率为 2×10^5 S/m^[10, 32]。

2.2 太赫兹宽带吸收器的性能分析

为了验证所提出的基于石墨烯-二氧化钒的双控可调宽带吸收器的性能, 在 CST 微波工作室中对该器件的传输系数进行了仿真。在模型设计中, 将两个距离吸收器表面约 10 倍衬底厚度的 Floquet 端口分别设置在 z 方向的正负两端, 一个作为源端口, 另一个作为接收端口。此外, x 和 y 方向上设置为周期性边界条件来模拟无限的周期阵列。通过 FIT 数值仿真可得到透射系数 S_{21} 和反射系数 S_{11} , 并以此计算吸收器的吸收率 A 。吸收率的计算公式为 $A = 1 - R - T$, 其中 $R = |S_{11}|^2$, $T = |S_{21}|^2$ 。

当二氧化钒电导率 σ_{VO_2} 为 2×10^5 S/m、石墨烯费米能级 μ_c 为 0.6 eV 时, 二氧化钒薄膜表现为金属态, 此时该吸收器可视为传统石墨烯-介质-背金结构吸收器。该吸收器在正入射 TE 极化、TM

极化波下的反射光谱、透射光谱和吸收光谱如图 2 所示。明显地, 该吸收器在两种不同极化下的传输光谱是完全重叠的, 表明了该吸收器具有极化无关特性, 这种极化无关特性归功于单元结构的中心对称性。从吸收率光谱中可以得出, 该吸收器在 1.02~2.63 THz 宽频带范围内的吸收率大于 90%, 相对带宽为 88.2%, 实现了宽带吸收器的设计。由于 VO_2 在金属状态下可以视为金属反射板, 因此该吸收器的透射率趋近于 0。

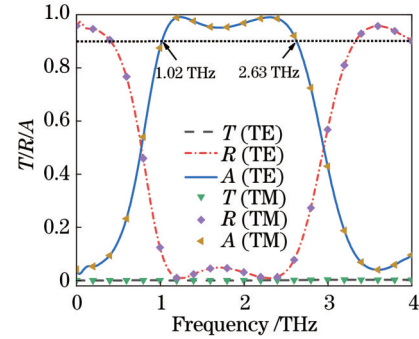


图 2 当二氧化钒的电导率 σ_{VO_2} 为 2×10^5 S/m、石墨烯的费米能级 μ_c 为 0.6 eV 时吸收器的透射率 T 、反射率 R 与吸收率 A 的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of transmittance T , reflectance R , and absorbance A when Fermi energy level of graphene $\mu_c = 0.6$ eV and conductivity of VO_2 $\sigma_{\text{VO}_2} = 2 \times 10^5$ S/m

为了进一步揭示吸收器的吸收机制, 分别选取三个不同吸收率的频点 2 THz、3 THz 和 3.5 THz 对各频点处石墨烯-衬底接触面的电场能量分布进行分析。在电场能量仿真中, 不同频率处的相位固定为 90° , 电场能量范围为 $0 \sim 2 \times 10^6$ V/m。如图 3(a) 所示, 石墨烯超构表面激发的局域型表面等离子体激元共振导致入射的绝大部分电场能量被强束缚在圆形图案石墨烯薄膜的边缘, 从而在频带内的 2 THz 处实现了吸收率大于 95% 的强场吸收。如图 3(b) 和图 3(c) 所示, 电场束缚能力在 3 THz 处显著减小, 且在 3.5 THz 处已几乎无明显的场共振现象。这是由于: 随着频率逐渐远离吸收通带, 石墨烯超构表面所激发的表面等离子体激元的共振强度将逐渐下降直至消失, 这与图 2 所示的太赫兹吸收率光谱曲线相吻合。

接下来分析该宽带吸收器与偏振方向及入射角的关系。图 4(a) 为所提出的宽带吸收器在入射角 $\theta = 0^\circ$ 下不同偏振角的吸收光谱, 仿真结果表明, 该吸收体具有绝对的偏振无关特性。这种偏振无关特性主要归因于所设计的超构表面的对称结构, 以及圆形石墨烯表面对不同偏振角度的谐振响应相同性。图 4(b) 和图 4(c) 分别显示了 TE 极化和 TM 极化下宽带吸收器对不同入射角 θ 的吸收光谱。可以看到, 当入射角度小于 30° 时, 该吸收器在 1.02~2.63 THz 工作频带内仍具有高于 90% 的宽带吸收特性。随着入射角度逐渐增

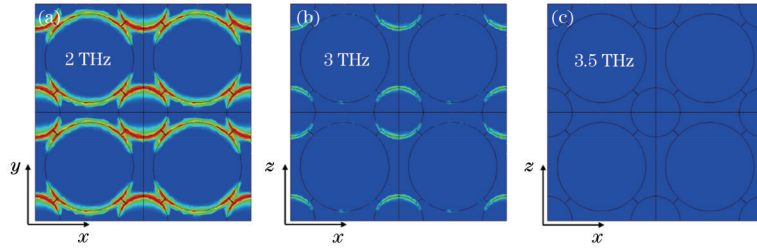


图 3 各频率点下的电场能量分布图对比。(a) 2 THz; (b) 3 THz; (c) 3.5 THz

Fig. 3 Comparison of simulated electric field distributions at each frequency. (a) 2 THz; (b) 3 THz; (c) 3.5 THz

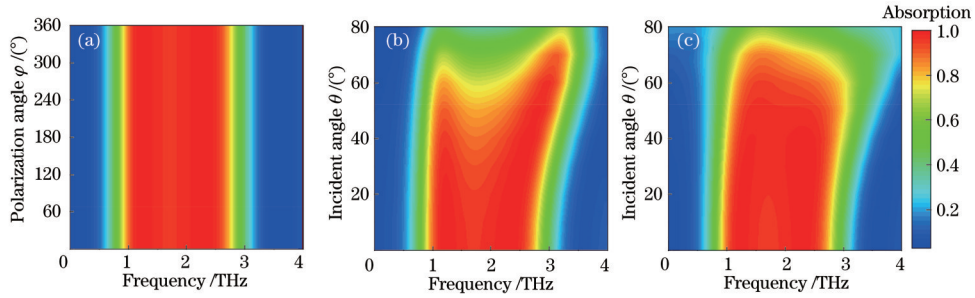


图 4 不同偏振角 φ 及入射角 θ 下的吸收器吸收光谱分布仿真结果图。(a) 不同偏振角对应的吸收曲线; (b) TE 极化下不同入射角度对应的吸收曲线; (c) TM 极化下不同入射角度对应的吸收曲线

Fig. 4 Simulated absorption spectra of broadband absorber for different polarization angle φ and incident angle θ . (a) Absorption curves under different polarization angles φ ; (b) absorption curves for different incident angle θ under TE polarization; (c) absorption curves for different incident angle θ under TM polarization

加至 60° 时, TE 极化和 TM 极化下的带内吸收率仍在 80% 以上; 当入射角大于 60° 时, 吸收光谱对入射角将变得敏感。故所设计的宽带吸收器在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的宽入射角范围内仍表现出稳定的吸收性能和工作带宽, 具有优异的角度不敏感特性。超材料吸收器的入射角度不敏感特性主要与亚波长结构产生的共振有关, 而对入射角的依赖较小。亚波长结构可以补偿石墨烯超构表面与自由空间太赫兹波之间的动量失配, 从而表现出优异的广角特性。

同时, 对 Topas 衬底厚度与吸收光谱之间的关系进行了分析。如图 5 所示, 随着 Topas 衬底厚度的增加, 吸收器的中心频点逐渐往低频段移动。这是由于, 当二氧化钒为金属态时, VO_2 可视为金属反射板。从

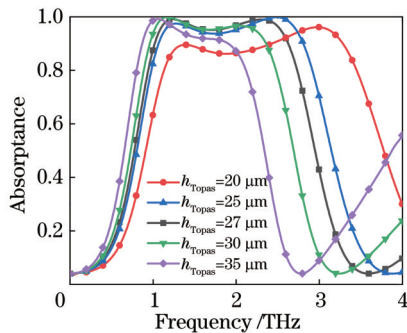


图 5 不同 Topas 衬底厚度下的吸收器吸收率仿真结果图

Fig. 5 Simulated absorptance curves of broadband absorber for different thickness of Topas h_{Topas}

物理上看, 此时的结构是一种法布里-珀罗谐振腔, VO_2 反射的电磁波在石墨烯与空气的接触面发生干涉现象。当 Topas 衬底厚度为中心频率点的 $1/4$ 波长时, 电磁波在分界面满足干涉相消条件, 实现完美吸收。因此, 衬底厚度决定了该吸收器的中心频率。

2.3 石墨烯费米能级调控下的性能分析

接下来对宽带吸收器的动态可调特性进行了研究。如图 6 所示, 通过控制石墨烯的外加偏置电压, 可以改变石墨烯的费米能级 μ_c , 进而动态调节吸收器的吸收率。可以看出, 随着石墨烯的费米能级 μ_c 从 0 eV 增加到 0.6 eV, 频带内的吸收率逐渐增加。两个完美吸收点 1.2 THz 和 2.3 THz 处的吸收率分别从 21.3% 和 17.2% 增加到接近 100%, 对应的吸收率可调范围分别达到了 79.7% 和 82.8%。此外, 在 1.02~2.63 THz 的宽带范围内, 吸收率的可调范围均大于 67.2%。

当二氧化钒电导率 σ_{VO_2} 为 10 S/m 时, 二氧化钒薄膜表现为绝缘态, 此时入射的太赫兹波可低损耗地穿过 VO_2 薄膜, 通过改变石墨烯的费米能级 μ_c 可实现对透射率的实时调控, 该吸收器可视为可调透射器。如图 7 所示, 随着石墨烯的费米能级 μ_c 从 0 eV 增加到 0.6 eV, 频带内的透射率逐渐降低。这是由于: 随着石墨烯费米能级的增大, 石墨烯的电导率将会相应增加, 导致石墨烯薄膜的表面等离子体激元共振效应增强, 从而降低了太赫兹波的透射率。仿真结果表明, 当石墨烯薄膜的费米能级为 0 eV 时, 该器件在 0~4 THz 全频段范围内的透射率均大于 80%, 随着费米能级增加至 0.6 eV, 在 1.02~2.63 THz 的频带范围内, 透射

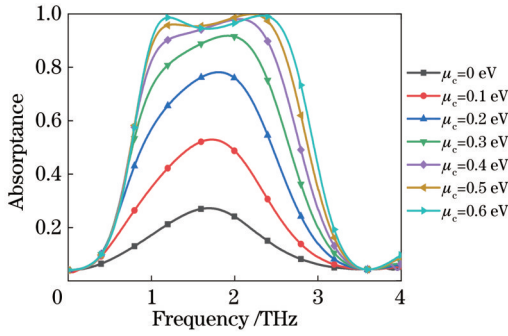


图 6 当二氧化钒电导率 σ_{VO_2} 为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时吸收器的吸收率与石墨烯费米能级 μ_c 之间的关系

Fig. 6 Simulated absorbance of proposed metamaterial absorber for different Fermi energy level μ_c of graphene under conductivity of VO_2 $\sigma_{\text{VO}_2} = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$

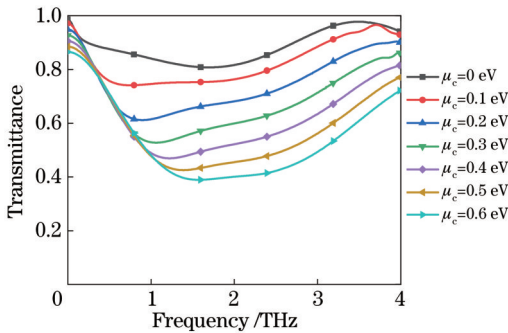


图 7 当二氧化钒电导率 σ_{VO_2} 为 10 S/m 时吸收器的透射率与石墨烯费米能级 μ_c 之间的关系

Fig. 7 Simulated transmittance of proposed metamaterial absorber for different Fermi energy level μ_c of graphene under conductivity of VO_2 $\sigma_{\text{VO}_2} = 10 \text{ S/m}$

率的可调范围大于 40%。

因此,在室温环境下,VO₂薄膜表现为金属态,该器件表现为宽带吸收器;在高温状态下,VO₂薄膜表现为绝缘态,该器件表现为宽带透射器。通过外加偏置电压对石墨烯的费米能级进行控制,可实现对吸收率和透射率的实时调控。该器件在吸收模式和透射模式上都表现出良好的性能,在各种智能可调太赫兹光电器件中具有潜在的应用前景。

2.4 VO₂薄膜电导率调控下的性能分析

基于 VO₂ 薄膜绝缘态-金属态相变特性,可以通过改变温度实现对背面 VO₂ 薄膜电导率的控制,进而实现对吸收器吸收率的实时调控。从图 8 可以看出,当石墨烯费米能级固定为 0.6 eV 时,随着 VO₂ 电导率的增加,该吸收器的吸收率逐渐增加。在 VO₂ 薄膜的电导率从 10 S/m 提高到 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 的相变过程中,两个完美吸收点 1.2 THz 和 2.3 THz 处的吸收率分别从 25.6% 和 27.1% 增加到接近 100%,对应的吸收率可调范围分别达到了 74.6% 和 72.8%。此外,在 1.02~2.63 THz 的宽带范围内,吸收率的可调范围均大于 60.5%。当 VO₂ 电导率分别为 $5 \times 10^4 \text{ S/m}$ 、 $1 \times 10^5 \text{ S/m}$

和 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时,吸收器的吸收率没有明显变化。这是由于:当 VO₂ 电导率大于 $5 \times 10^4 \text{ S/m}$,可将 VO₂ 视为完全的金属状态。此时 VO₂ 表现为金属反射板,其与石墨烯和 Topas 衬底之间组成传统的三明治结构,电场能量将无法穿过 VO₂,只能反射后被石墨烯薄膜和 Topas 衬底吸收。

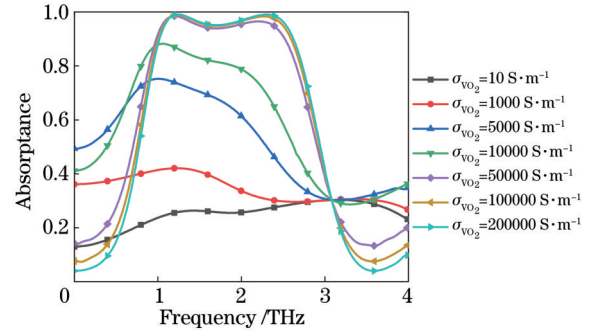


图 8 当石墨烯费米能级 μ_c 为 0.6 eV 时吸收器的吸收率与二氧化钒电导率 σ_{VO_2} 之间的关系

Fig. 8 Simulated absorbance of proposed metamaterial absorber for different conductivity of VO_2 σ_{VO_2} under the graphene Fermi energy level $\mu_c = 0.6 \text{ eV}$

接下来分析当石墨烯费米能级固定为 0 eV 时,VO₂ 电导率对该吸收器吸收率的调控能力。如图 9 所示,当 VO₂ 电导率为 10 S/m 时,吸收率接近 0,该器件表现为透射状态。当 VO₂ 电导率为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时,吸收率低于 30%,该器件表现为反射状态。金属态 VO₂ 的吸收率相较于绝缘态 VO₂ 的吸收率得到了略微的提升,这主要是由于:此时 VO₂ 表现为金属反射板,入射的太赫兹波无法透射过 VO₂,进而被反射,光在反射过程中经过 Topas 衬底被第二次路径损耗。因此,当石墨烯费米能级固定为 0 eV 时,该器件可在透射状态和反射状态之间切换。

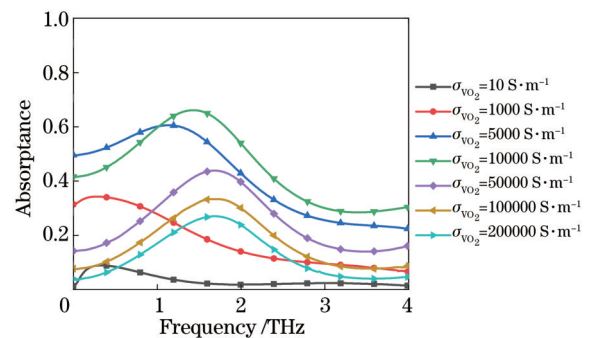


图 9 当石墨烯费米能级 μ_c 为 0 eV 时吸收器的吸收率与二氧化钒电导率 σ_{VO_2} 之间的关系

Fig. 9 Simulated absorbance of proposed metamaterial absorber for different conductivity of VO_2 σ_{VO_2} under graphene Fermi energy level $\mu_c = 0 \text{ eV}$

最后,通过改变 VO₂ 电导率和石墨烯费米能级这两个独立可控的参数,研究了所提出的宽带吸收器的吸收可调性,以实现更大的吸收率可调范围。如图 10 所示,将石墨烯费米能级和 VO₂ 电导率分别设置为

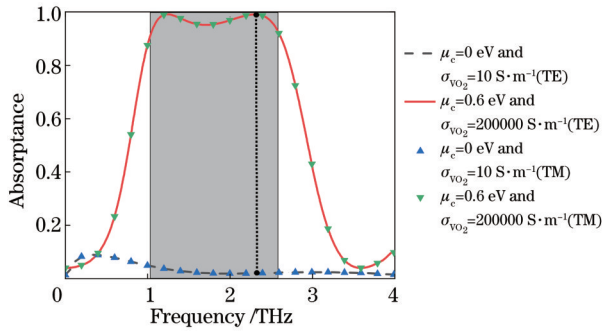


图 10 不同石墨烯费米能级 μ_c 和二氧化钒电导率 σ_{VO_2} 情况下吸收器的吸收率仿真结果图

Fig. 10 Simulated absorptance of proposed metamaterial absorber for different graphene Fermi energy level μ_c and conductivity of VO_2 σ_{VO_2}

$\mu_c=0$ eV 和 $\sigma_{VO_2}=10$ S/m 时, 该吸收器的吸收率接近

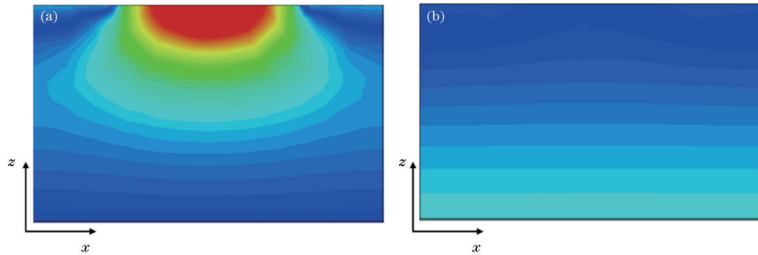


图 11 2 THz 时不同石墨烯费米能级和 VO_2 电导率下电场能量分布侧视图。(a) $\mu_c=0.6$ eV, $\sigma_{VO_2}=2 \times 10^5$ S/m; (b) $\mu_c=0$ eV, $\sigma_{VO_2}=10$ S/m

Fig. 11 Side views of electric field distributions for different conductivity of VO_2 and graphene Fermi energy level μ_c at 2 THz.

(a) $\mu_c=0.6$ eV, $\sigma_{VO_2}=2 \times 10^5$ S/m; (b) $\mu_c=0$ eV, $\sigma_{VO_2}=10$ S/m

接下来讨论该结构在实验上的潜在可行性。可能的制备步骤如下: 1) 利用化学气相沉积法在铜膜上生成石墨烯, 利用磁控溅射技术制备 VO_2 ; 2) 将 Topas 溶液旋涂在金属上形成 Cu-Topas 晶片; 3) 在石墨烯-铜样品上涂上聚甲基丙烯酸甲酯胶 (PMMA), 用 $FeCl_3$ 溶液将铜从 Cu-石墨烯-PMMA 样品中溶解, 得到石墨烯-PMMA 薄膜; 4) 将石墨烯-PMMA 样品转移到 Cu-Topas 衬底上, 然后用丙酮溶液去除 PMMA 胶, 得到 Cu-Topas-石墨烯晶片; 5) 用 $FeCl_3$ 溶液将铜从 Cu-Topas-石墨烯样品中溶解, 得到 Topas-石墨烯薄膜; 6) 利用反应离子刻蚀系统刻蚀石墨烯, 得到圆形图案化石墨烯, 最后在 Topas 背面利用磁控溅射技术生长 VO_2 薄膜, 形成所述吸收器结构。

3 结 论

提出了一种混合石墨烯和 VO_2 超材料的宽带太赫兹吸收器, 该吸收器具有极化无关和对角度不敏感特性。通过改变石墨烯费米能级, 该吸收器的吸收率可从 17.2% 增加到 99.7%; 通过改变 VO_2 的电导率, 吸收率可从 27.1% 增加到 99.7%。更重要的是, 通过在太赫兹范围内采用双重控制, 该吸收器的吸收率可在 2.3 THz 实现 0% 和 99.7% 的完美开关特性。此外,

当 VO_2 的电导率 $\sigma_{VO_2}=2 \times 10^5$ S/m、石墨烯费米能级 $\mu_c=0.6$ eV 时, 吸收器的吸收率在宽频带范围内表现出大于 90% 的吸收。因此, 可以通过同时控制这两个独立的参数来实现 1.07~2.59 THz 范围内 0%~90% 的高调谐范围的吸收器。此外, 器件在完美吸收点 2.3 THz 达到了最高 99.7% 的吸收率调谐范围, 表现为完美的开关型吸收器。

图 11 给出了石墨烯费米能级和 VO_2 电导率分别在 $\mu_c=0.6$ eV、 $\sigma_{VO_2}=2 \times 10^5$ S/m 和 $\mu_c=0$ eV、 $\sigma_{VO_2}=10$ S/m 时 2 THz 下的电场能量分布侧视图。从图 11 可以得出, 电场能量主要集中在衬底和石墨烯的接触面, 表现为石墨烯等离子体激元共振增强吸收, 与图 3 中的电场能量分布正视图相呼应。相反地, 当 $\mu_c=0$ eV、 $\sigma_{VO_2}=10$ S/m 时, 入射的太赫兹波将完全透过吸收器, 仅存在很小的介质传输路径损耗。这种具有高调谐特性的太赫兹吸收器的应用价值很大。

可以通过改变石墨烯费米能级实现该吸收器的工作状态从吸收态到透射态的切换; 通过改变 VO_2 电导率实现从透射态到反射态的切换。基于以上优点, 该吸收器在太赫兹智能器件如可调传感器和调制器等领域具有很大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [2] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens[J]. Science, 2005, 308(5721): 534-537.
- [3] Taubner T, Korobkin D, Urzhumov Y, et al. Near-field microscopy through a SiC superlens[J]. Science, 2006, 313(5793): 1595.
- [4] 江孝伟, 武华. 双通道窄带宽超材料吸收器[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1416002.
Jiang X W, Wu H. Dual-channel narrow bandwidth metamaterial absorber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1416002.
- [5] 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.
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.
- [6] 伍铁生, 王学玉, 张慧仙, 等. 一种多层 Zr/SiO₂ 结构的超宽带完美吸波体[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0516001. Wu T S, Wang X Y, Zhang H X, et al. Ultra-broadband perfect absorber based on multilayered Zr/SiO₂ film[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0516001.
- [7] 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. Yang S, Yuan S, Wang J Y. Light-excited and switchable dual-band terahertz metamaterial absorber[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0216001.
- [8] Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. Science, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- [9] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. Science, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [10] Zhang M, Song Z Y. Terahertz bifunctional absorber based on a graphene-spacer-vanadium dioxide-spacer-metal configuration[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 11780-11788.
- [11] Liu J J, Fan L L, Ku J F, et al. Absorber: a novel terahertz sensor in the application of substance identification[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(2): 80.
- [12] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, et al. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for terahertz imaging[J]. Physical Review B, 2009, 79(12): 125104.
- [13] Escorcia I, Grant J, Gough J, et al. Uncooled CMOS terahertz imager using a metamaterial absorber and pn diode[J]. Optics Letters, 2016, 41(14): 3261-3264.
- [14] Ye L F, Chen X, Zeng F, et al. Ultra-wideband terahertz absorption using dielectric circular truncated cones[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 18920769.
- [15] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [16] 刘媛媛, 刘唤, 刘坤, 等. 一种矩形层叠结构的超宽带完美吸收器[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2323001. Liu Y Y, Liu H, Liu K, et al. Ultra-broadband perfect absorber with rectangular multilayer structure[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2323001.
- [17] 王鑫, 王俊林. 基于三维开口谐振环阵列和微流通道的太赫兹超材料吸收体传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1904001. Wang X, Wang J L. Terahertz metamaterial absorber sensor based on three-dimensional split-ring resonator array and microfluidic channel[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1904001.
- [18] 王杨, 轩雪飞, 朱路, 等. 宽波段高吸收的多层齿轮形超材料吸收器设计[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1823001. Wang Y, Xuan X F, Zhu L, et al. Design of multi-layer gear-shaped metamaterial absorber with broadband and high absorption[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1823001.
- [19] 王杨, 轩雪飞, 朱路, 等. 多层矩形宽波段超材料吸收器[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1523001. Wang Y, Xuan X F, Zhu L, et al. Multilayer rectangular broadband metamaterial absorber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1523001.
- [20] Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L, et al. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene[J]. Nature, 2005, 438(7065): 201-204.
- [21] Ju L, Geng B S, Horng J, et al. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials[J]. Nature Nanotechnology, 2011, 6(10): 630-634.
- [22] Chen P Y, Alù A. Terahertz metamaterial devices based on graphene nanostructures[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(6): 748-756.
- [23] Dayal G, Ramakrishna S A. Design of multi-band metamaterial perfect absorbers with stacked metal-dielectric disks[J]. Journal of Optics, 2013, 15(5): 055106.
- [24] Fardoost A, Vanani F G, Amirhosseini A, et al. Design of a multilayer graphene-based ultrawideband terahertz absorber[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2017, 16(1): 68-74.
- [25] Wei M L, Song Z Y, Deng Y D, et al. Large-angle mid-infrared absorption switch enabled by polarization-independent GST metasurfaces[J]. Materials Letters, 2019, 236: 350-353.
- [26] Koza J A, He Z, Miller A S, et al. Resistance switching in electrodeposited VO₂ thin films[J]. Chemistry of Materials, 2011, 23(18): 4105-4108.
- [27] Jepsen P U, Fischer B M, Thoman A, et al. Metal-insulator phase transition in a VO₂ thin film observed with terahertz spectroscopy[J]. Physical Review B, 2006, 74(20): 205103.
- [28] Ye L F, Chen X E, Zhu C H, et al. Switchable broadband terahertz spatial modulators based on patterned graphene and vanadium dioxide[J]. Optics Express, 2020, 28(23): 33948-33958.
- [29] 任英楠, 曹斌照, 李禹蓉, 等. 基于 VO₂ 圆环结构的温控宽带超材料吸波器[J]. 电子学报, 2021, 49(1): 171-176. Ren Y N, Cao B Z, Li Y R, et al. A temperature-controlled broadband metamaterial absorber based on the vanadium dioxide rings[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(1): 171-176.
- [30] Song Z Y, Zhang J H. Achieving broadband absorption and polarization conversion with a vanadium dioxide metasurface in the same terahertz frequencies[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 12487-12497.
- [31] 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.
- [32] 王岩, 陈哲, 崔琦. 基于二氧化钒的可调谐太赫兹宽带通滤波器[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2023002. Wang Y, Chen Z, Cui Q. Tunable terahertz broadband bandpass filter based on vanadium dioxide[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2023002.