

文章编号：2095-4980(2024)07-0695-08

基于双层 VO₂的可调谐宽带太赫兹超材料吸收器

董亮^a, 向环琦^a, 朱磊^{*a,b,c}

(齐齐哈尔大学 a.通信与电子工程学院; b.计算机与控制工程学院; c.大数据网络安全检测与分析重点实验室, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘要：基于 VO₂的相变特性，提出一种具有宽带特性的太赫兹超材料吸收器，包括 2 层 VO₂图案、2 层聚酰亚胺介电层和 1 层金属反射层，共 5 层结构。对吸收器的吸收特性、电场分布和可调谐特性进行仿真分析，结果表明，所设计的吸收器吸收率大于 90% 的带宽为 2.56 THz。该吸收器将 2 层结构相同但尺寸不同的周期单元堆叠，有效扩展了带宽；且通过控制 VO₂从绝缘态到金属态的相变，可以实现吸收率的连续调谐。通过研究不同偏振角及入射角条件下所设计超材料吸收器的吸收性能发现，该吸收器具有偏振无关、在较大入射角入射时吸收不敏感特性。所设计的吸收器有望在太赫兹通信、成像和探测器等领域得到广泛应用。

关键词：太赫兹；超材料吸收器；可调谐；宽频带

中图分类号：TN25

文献标志码：A

doi: 10.11805/TKYDA2023432

Tunable wideband terahertz metamaterial absorber based on double-layer VO₂

DONG Liang^a, XIANG Huanqi^a, ZHU Lei^{*a,b,c}

(a.Communication and Electronics Engineering Institute; b.School of Computer and Control Engineering; c.Heilongjiang Key Laboratory of Big Data Network Security Detection and Analysis, Qiqihar University, Qiqihar Heilongjiang 161006, China)

Abstract: A wideband terahertz metamaterial absorber is proposed based on the phase transition properties of VO₂, which consists of two VO₂ pattern layers, two polyimide dielectric layers and a metal reflector layer. The absorption characteristics, electric field distribution and tunability of the absorber are simulated and analyzed, and the results show that the bandwidth of the designed absorber with an absorption rate of more than 90% is 2.56 THz. The absorber stacks two layers of periodic cells with the same structure but different sizes, effectively extending the bandwidth. Moreover, by controlling the phase transition of VO₂ from the insulating state to the metallic state, the absorptivity can be continuously adjusted. In addition, by studying the absorption performance of the designed metamaterial absorber under different polarization angles and incident angles, it is found that the absorber is polarization independent and absorption insensitive at large incident angles. The designed absorber is expected to be widely used in areas of terahertz communication, imaging and detector.

Keywords: terahertz; metamaterial absorber; tunable; broadband

太赫兹波是指频率为 0.1~10 THz, 波长为 30~3 000 μm 的电磁波。太赫兹波在传感器^[1]、隐身技术^[2-3]、无线通信^[4]、太赫兹成像^[5]、探测技术^[6]等领域得到了广泛研究。超材料是一种人工设计的周期性结构材料，具有天然材料所不具备的物理属性，其奇异的光学特性由所设计的人工周期性结构决定^[7-8]。超材料通过其独特的电磁特性，使许多难以在天然材料中实现的奇异电磁现象成为可能，包括负折射率^[9]、完美透镜^[10]和电磁隐身^[11-13]等。自从 Landy 等^[14]在 2008 年设计了一种超材料完美吸收器(Metamaterial Perfect Absorber, MPA)以来，MPA 在

收稿日期：2023-12-25；修回日期：2024-01-19

基金项目：黑龙江省自然科学基金资助项目(LH2022F053); 国家自然科学基金资助项目(62075052); 中央财政引导地方科技发展资助项目(SBZY2021E076); 黑龙江省博士后科研基金资助项目(LBH-Q21195); 黑龙江省高校基本科研业务费专项资金资助项目(145209151)

*通信作者：朱磊 email:zhuzhubutterfly@163.com

微波和光学波段取得了重大进展，促进了太赫兹波段技术的发展。在太赫兹波段，关于吸收器已有了大量研究，如超宽带吸收器^[15~16]、宽带吸收器^[17]以及窄带吸收器^[18~20]等。但上述大多数的吸收器在功能上存在限制，即吸收器的吸收率是不可调节的，一旦设计完成，其功能就已固定。面对日益复杂的电磁应用环境，探索超材料吸收器的可调性是一个重要的研究方向。许多活性材料，如石墨烯、光导半导体、液晶和相变材料，已广泛用于太赫兹吸收器件。

二氧化钒(VO₂)是一种常见的相变材料，在接近室温(68 °C)时会发生从绝缘态到金属态的转变(Insulator-Metal Transition, IMT)，这种转变伴随着电导率数值有大约3~5个数量级的增加。正是因为相变温度接近室温，给人操控带来了很大的便利，VO₂的IMT可以直接通过热控制或光激励实现^[21~23]。近年来，针对宽带可调太赫兹超材料吸收器已有不少研究，如CHENG等^[24]提出了一种基于方环光敏硅阵列的可开关太赫兹超材料吸收器，通过改变光敏硅的电导率实现宽带吸收；WANG等^[25]基于VO₂设计了一种吸收带宽为0.75 THz且吸收率在30%~98%的可调吸收器；SONG等^[26]基于VO₂提出了一种金属交叉/SiO₂间隔层/VO₂薄膜的复合超材料吸收器，获得了吸收率超过90%的0.33 THz带宽和30%~100%的可调谐范围；DAO等^[27]设计了一种基于VO₂的可调吸收器，通过改变外部温度可在吸收器和反射器之间切换；BAI等^[28]将VO₂嵌入吸收体结构中，在4.32~5.57 THz范围内吸收率达到90%；张婷等^[29]基于VO₂设计了吸收带宽为1.06 THz以及吸收率在4%~99.5%之间可调的超材料吸收器；HUANG等^[30]基于VO₂设计了一种吸收率在80%以上，吸收带宽分别为0.88 THz和0.77 THz的可调双宽带吸收器；LIU等^[31]提出了一种基于VO₂裂环谐振器的可调谐超材料吸收器，当VO₂从绝缘态转变为金属态时可实现宽带吸收。

基于以上分析，目前对于超材料吸收器的研究主要集中在拓宽工作带宽、实现可调谐以及提高吸收率和吸收性能等方面。目前的吸收器实现了可调谐的吸收性能，但存在窄带吸收或结构复杂等缺陷。因此，仍需要设计一种结构简单、对偏振不敏感且具有广角吸收的宽带可调谐吸收器。本文提出一种基于VO₂的宽带太赫兹超材料吸收器，其单元由结构相同但尺寸不同的椭圆形结构堆叠而成。通过控制VO₂从绝缘态到金属态的相变，可以连续调节吸收器的吸收率。该吸收器具有结构简单、宽带可调谐吸收、偏振无关以及大入射角吸收不敏感特性，在太赫兹波段具有广泛的应用前景。

1 太赫兹超材料吸收器的结构设计

提出的宽带太赫兹超材料单元结构示意图如图1所示，该结构包括5层，分别为2层相互垂直的VO₂椭圆形结构、2层聚酰亚胺介电层和底部的金属反射层，其中金的电导率为4.56×10⁷ S/m，聚酰亚胺的相对介电常数为3.5+0.2i^[32]。具体结构参数设置如下：单元结构周期p=30 μm，金属反射层厚度t₁=0.2 μm，第1层聚酰亚胺电介质层厚度t₄=5.0 μm，第2层VO₂图案层厚度t₃=0.2 μm，第2层聚酰亚胺电介质层厚度t₂=2.6 μm，第1层VO₂图案层厚度t₅=0.5 μm，第2层VO₂椭圆的长轴a=16 μm，短轴b=4 μm，第1层VO₂椭圆长轴c=14.4 μm，短轴d=3.6 μm。使用CST MICROWAVE STUDIO软件，通过有限元方法进行全波电磁仿真，仿真过程中采用频域求解器，x和y方向采用unit cell边界条件，z方向采用open add space边界条件。

由于VO₂的相变是从绝缘态到金属态，因此采用Drude模型描述VO₂在太赫兹波段的相变过程。该结构中VO₂的光学介电常数可由Drude模型^[33~35]描述：

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

式中： $\varepsilon_{\infty}=12$ 为高频介电常数； $\gamma=5.75 \times 10^{13}$ rad/s为碰撞频率； σ 处的等离子体频率 $\omega_p^2(\sigma)=\sigma\omega_p^2(\sigma_0)/\sigma_0$ ， $\omega_p(\sigma_0)=1.4 \times 10^{15}$ rad/s， $\sigma_0=3 \times 10^5$ S/m。在热控制下，VO₂可发生由绝缘态到金属态的可逆相变，其电导率 σ 由2×10 S/m变化到2×10⁵ S/m。当VO₂处于电导率为2×10⁵ S/m的金属态时，吸收器的反射光谱和吸收光谱如图2所示。从图2可以看出，在电磁波垂直入射时，在4.12~6.68 THz范围内，吸收率大于90%，吸收带宽宽度高达2.56 THz。吸收器有2个吸收峰，分别位于4.72 THz和6.21 THz。图3为VO₂处于金属态时，不同极化电磁波垂直入射时的超材料吸收曲线图。从图中可以看出，当极化角度在0°~75°之间变化时，所设计的吸收器的吸收曲线几乎没有发生变化。这是由于吸收器结构具有中心对称和轴对称特性，吸收器对入射波极化角度不敏感。

当电导率由2×10 S/m变化到2×10⁵ S/m时，吸收器的吸收率和反射率会发生相应的变化，如图4(a)~(b)所示。根据式(1)，本文利用Matlab软件计算了VO₂介电常数随电导率的变化情况，结果如图4(c)~(d)所示。从图4(c)~(d)可以看出，不同电导率下介电常数实部的变化远小于虚部，当电导率为2×10 S/m时，表现为绝缘体特性；当

电导率为 2×10^5 S/m时, 表现为金属特性。

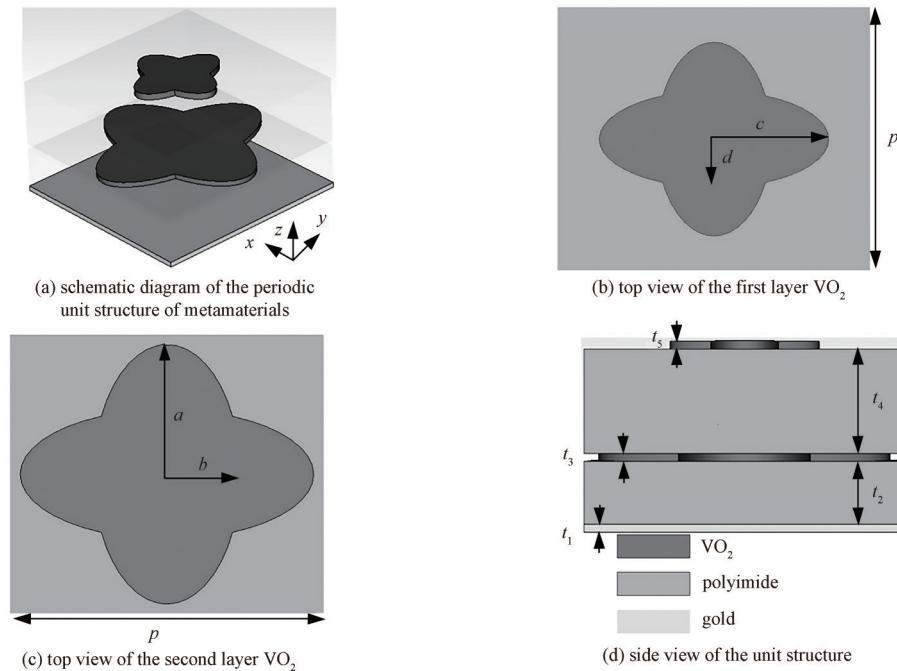


Fig.1 Schematic diagram of broadband terahertz unit structure of metamaterial

图1 宽带太赫兹超材料单元结构示意图

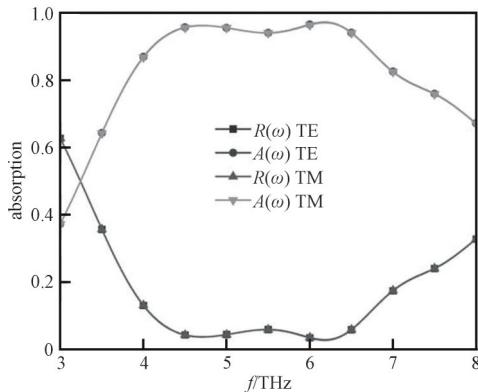


Fig.2 Absorption and reflectance of the absorber when VO₂ is in the metallic state

图2 VO₂处于金属态时吸收器的吸收率和反射率

2 太赫兹超材料吸收器的性能分析

本文将吸收率定义为^[36]: $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2 - |S_{21}(\omega)|^2$, 其中 $A(\omega)$ 、 $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别表示吸收率、反射率和透射率, $S_{11}(\omega)$ 和 $S_{21}(\omega)$ 分别为反射系数和透射系数。由于底部金属反射层的厚度远大于入射电磁波的趋肤深度, 入射电磁波无法透过该金属层继续传播, 因此 $T(\omega) = 0$ 。吸收器的吸收率可进一步简化为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}(\omega)|^2$ 。

为更好地理解吸收器的吸收性能, 引入阻抗匹配理论, 在垂直入射时, 太赫兹波的相对阻抗可描述为:

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

式中 $Z_r = Z/Z_0$, Z 和 Z_0 分别为吸收器的有效阻抗和自由空间阻抗。当 $Z_r = Z/Z_0 = 1$ 时, 吸收器有效阻抗与自由空间阻抗匹配, 吸收率最大。当相对阻抗的实部为 1, 虚部为 0 时, 可实现阻抗匹配。图 5 为吸收器处于金属态时相

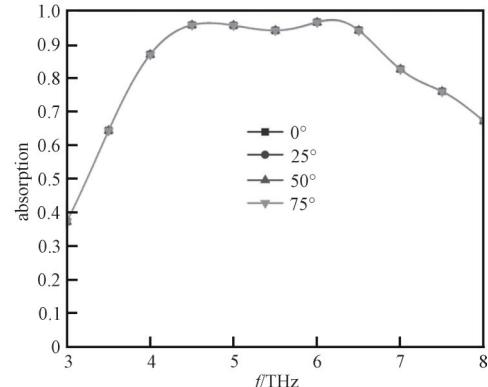


Fig.3 Plot of polarization angle versus absorption curve when VO₂ is in the metallic state

图3 VO₂处于金属态时吸收器的偏振角与吸收曲线关系图

对阻抗实部和虚部的变化情况。可以看出，当 VO_2 电导率为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ (金属态)时，在 4.12~6.68 THz 范围内，相对阻抗的实部接近于 1，虚部接近于 0，即吸收器实现了阻抗匹配。

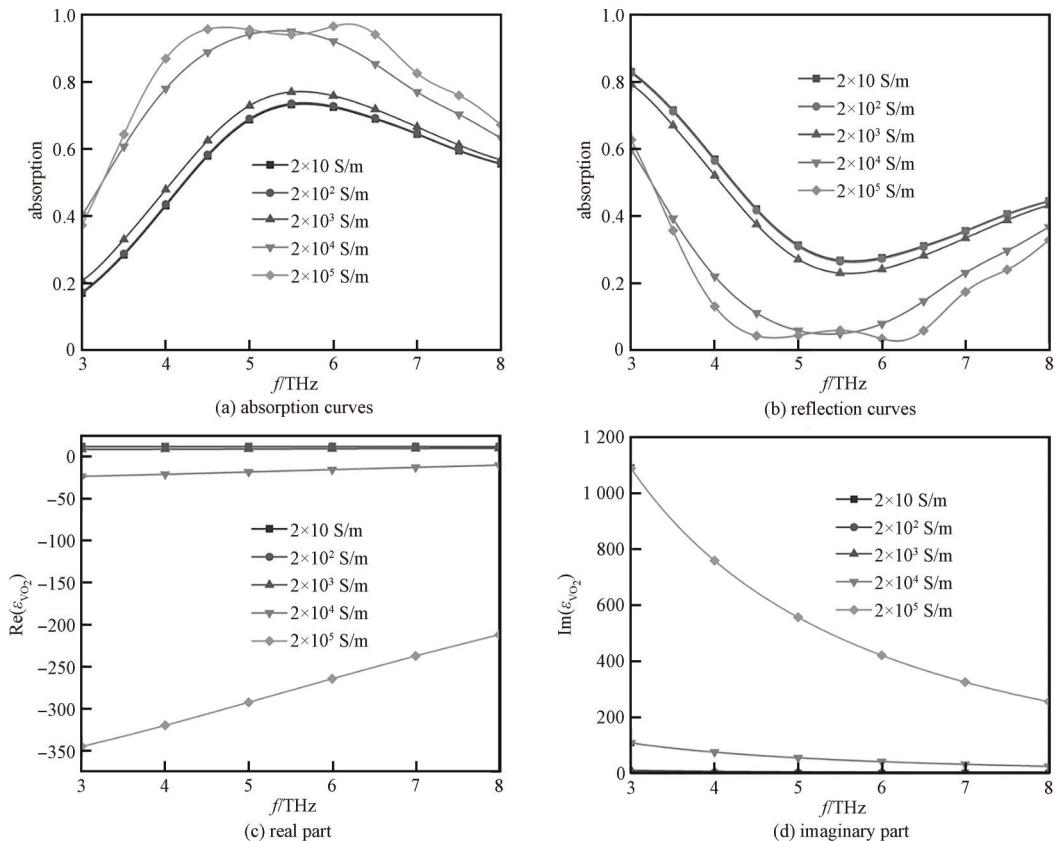


Fig.4 Absorption and reflection curves and the real and imaginary parts of the dielectric constant of VO_2 at different conductivities
图 4 VO_2 在不同电导率下的吸收和反射曲线以及在不同电导率下介电常数的实部和虚部

为阐述超材料吸收器产生宽频带吸收的物理机制，本文分析了超材料吸收器在 y 极化电磁波激励时，在不同吸收峰频率处的电场分布。当 VO_2 的电导率为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时，在 4.72 THz 和 6.21 THz 两个吸收峰处，吸收器的电场分布如图 6 所示。图 6(a)和图 6(c)为吸收器第 1 层和第 2 层的 VO_2 谐振环在 4.72 THz 处的电场分布。图 6(b)和图 6(d)为吸收器第 1 层和第 2 层的 VO_2 谐振环在 6.21 THz 处的电场分布图。在图 6(a)和图 6(c)中，电场主要集中分布在与 y 轴平行的上半椭圆和下半椭圆处。在图 6(b)中，大量的电场集中在与 y 轴平行的上半部分和下半部分椭圆里。图 6(d)中与 y 轴平行的上下部分椭圆也有电场分布，但电场强度没有图 6(c)中明显。上述结果表明，由于 2 层堆叠结构产生的强耦合效应，保证了宽带的高效吸收，增强了吸收器的吸收能力。

为说明结构参数对吸收器性能影响的重要性，本文分析了几何结构参数对吸收器的影响。第 1 层椭圆长轴半径 c 、第 2 层椭圆长轴半径 a 、第 1 层介质层厚度 t_4 和第 2 层介质层厚度 t_2 对超材料吸收光谱的影响如图 7 所示。图 7(a)中，第 2 层椭圆长轴半径 a 对吸收器的带宽和吸收效率的影响并不明显。图 7(b)中，随着第 1 层椭圆长轴半径 c 的增大，吸收效率变化不很明显，但随着 c 的增大，谐振频率发生轻微红移。图 7(c)中，当第 2 层介质层厚度 t_2 增加时，谐振频率发生轻微红移。图 7(d)中，随着第 1 层介质层厚度 t_4 增加，吸收峰逐渐向低频移动。同时，吸收峰开始下降，带宽变窄。当聚酰亚胺厚度减小时，吸收峰逐渐向高频方向移动，带宽变大。共振峰的位置和整个吸收器的吸收率受聚酰亚胺和 VO_2 的影响较大。随着共振峰位置的改变，吸收率和带宽也会发生变化。上述结果表明，调整几何结构参数对提高吸收器的吸收性能具有重要意义。经过精心的设计与优化，最终得到了具有超宽带吸收效果的吸收器。

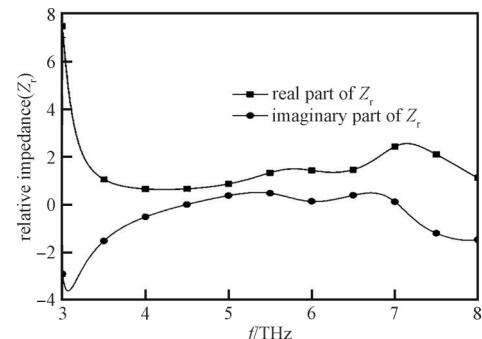


Fig.5 Changes of the real and imaginary parts of the relative impedance when the VO_2 conductivity is $2 \times 10^5 \text{ S/m}$
图 5 当 VO_2 电导率为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时，相对阻抗实部和虚部的变化

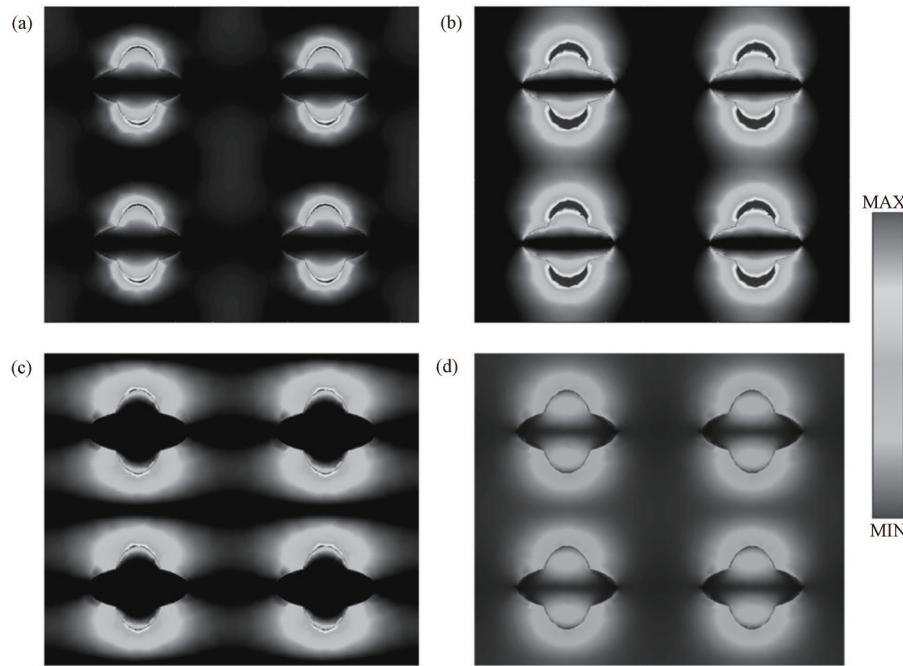


Fig.6 Electric field distributions of the first and second layers of the absorber at 4.72 THz, 6.21 THz when y -polarized electromagnetic waves are excited
图6 y 极化电磁波激励时,吸收器第一层和第二层在4.72 THz、6.21 THz处的电场分布图

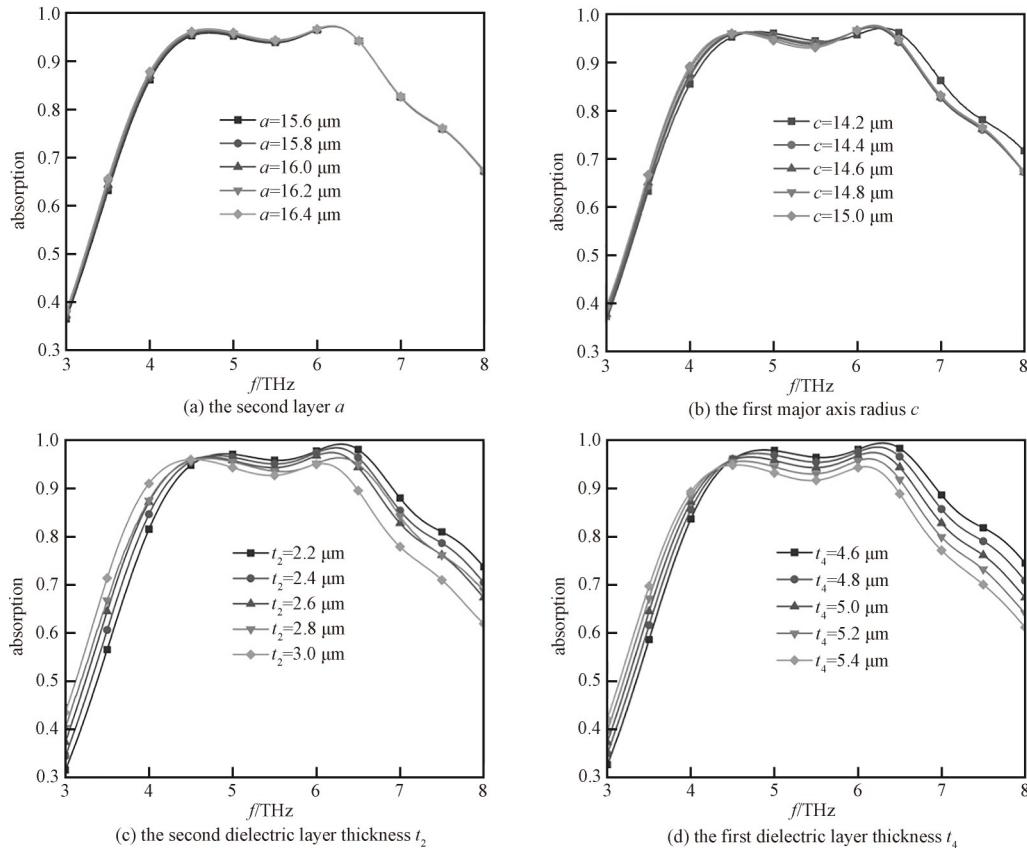


Fig.7 Absorptivity of the absorber under different parameters when the conductivity is 2×10^5 S/m
图7 电导率为 2×10^5 S/m时不同参数条件下吸收器的吸收率

本文进一步研究了横电(Transverse Electric, TE)偏振和横磁(Transverse Magnetic, TM)偏振两种偏振方式下不同入射角对吸收器吸收性能的影响,如图8所示。TE偏振入射时(图8(a)),当入射角小于50°时,吸收器能够保持良好的吸收性能;入射角继续增大,吸收器的吸收率急剧下降,宽带的中心频率出现蓝移现象,且带宽逐

渐变窄。在 TM 偏振入射时(图 8(b)), 当入射角小于 50° 时, 吸收器能够保持良好的吸收性能; 入射角进一步增大, 吸收器的吸收率显著降低。

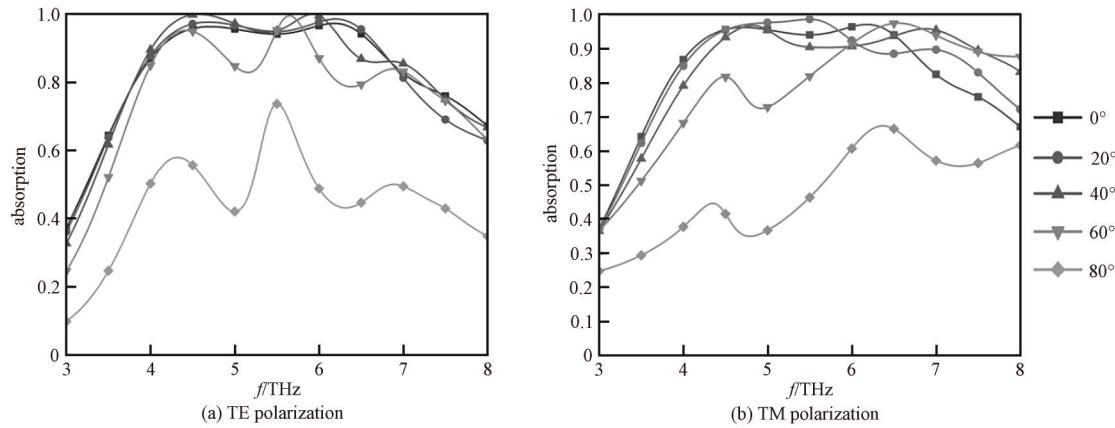


Fig.8 Absorption curves for TE and TM polarization at different incidence angles

图 8 TE 偏振和 TM 偏振在不同入射角下的吸收曲线

本文设计的吸收器厚度为 $8.5 \mu\text{m}$, 与参考文献[25]和[26]中设计的吸收器厚度 $66 \mu\text{m}$ 、 $140.52 \mu\text{m}$ 相比, 本文所设计的吸收器厚度更小, 更利于与现有的 THz 器件及系统集成。

3 结论

本文提出了一种由 2 层结构相同、尺寸不同的 VO_2 图案层、2 层聚酰亚胺介质层和 1 层金属反射层组成的宽带太赫兹超材料吸收器。数值仿真结果表明, 在垂直入射时, 当 VO_2 电导率为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时, 该结构吸收率大于 90% 的吸收带宽可达 2.56 THz , 并分别在 4.72 THz 和 6.21 THz 两个吸收峰处的吸收率分别为 96.6% 和 97.5%。基于阻抗匹配理论, 本文分析了吸收器的电场分布, 探讨了吸收器产生宽带吸收的机理, 结果表明, 由于 2 层堆叠结构产生的强耦合效应, 有效扩展了吸收器的带宽。此外, 该吸收器具有极化不敏感特性, 并能够在较宽入射角度范围内仍保持良好的吸收效果。本文提出的动态可调宽带太赫兹吸收器在太赫兹通信、成像和探测器等方面具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] FEDERICI J F,SCHULKIN B,HUANG Feng,et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs[J]. Semiconductor Science and Technology, 2005,20(7):S266–S280. doi:10.1088/0268-1242/20/7/018.
- [2] SATO Y,IZUI K,YAMADA T,et al. Robust topology optimization of optical cloaks under uncertainties in wave number and angle of incident wave[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2020,121(17):3926–3954. doi:10.1002/nme.6393.
- [3] LIU Baiyang,GIDDENS H,LI Yin,et al. Design and experimental demonstration of Doppler cloak from spatiotemporally modulated metamaterials based on rotational Doppler effect[J]. Optics Express, 2020,28(3): 3745–3755. doi: 10.1364/OE.382700.
- [4] HUANG Kaocheng,WANG Zhaocheng.Terahertz terabit wireless communication[J]. IEEE Microwave Magazine, 2011,12(4):108–116. doi:10.1109/MMM.2011.940596.
- [5] DEAN P,MITROFANOV O,KEELEY J,et al. Apertureless near-field terahertz imaging using the self-mixing effect in a quantum cascade laser[J]. Applied Physics Letters, 2016,108(9):091113-1–4. doi:10.1063/1.4943088.
- [6] LUO Liang,CHATZAKIS I,WANG Jigang,et al. Broadband terahertz generation from metamaterials[J]. Nature Communications, 2014,5(1):1–6. doi:10.1038/ncomms4055.
- [7] WITHAYACHUMNANKUL W,ABBOTT D. Metamaterials in the terahertz regime[J]. IEEE Photonics Journal, 2009,1(2):99–118. doi:10.1109/JPHOT.2009.2026288.
- [8] KOSCHNY T,KAFESAKI M,ECONOMOU E N,et al. Effective medium theory of left-handed materials[J]. Physical Review Letters, 2004,93(10):107402. doi:10.1103/PhysRevLett.93.107402.
- [9] SHELBY R A,SMITH D R,SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001,292(5514): 77–79. doi:10.1126/science.1058847.
- [10] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Physical Review Letters, 2000,85(18): 3966–3969. doi: 10.1103/

- PhysRevLett.85.3966.
- [11] MA Hua, QU Shaobo, XU Zhuo, et al. The open cloak[J]. Applied Physical Letters, 2009, 94(10):103501. doi:10.1063/1.3095436.
- [12] CUMMER S A, POPA B I, SCHURIG D, et al. Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures[J]. Physical Review E, 2006, 74(3):036621. doi:10.1103/PhysRevE.74.036621.
- [13] PAQUAY M, IRIARTE J C, EDERRA I N, et al. Thin AMC structure for radar cross-section reduction[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(12):3630–3638. doi:10.1109/TAP.2007.910306.
- [14] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20):207402. doi:10.1103/PhysRevLett.100.207402.
- [15] ZHU Jianfei, MA Zhaofeng, SUN Wujiang, et al. Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2):021102. doi:10.1063/1.4890521.
- [16] RI K J, RI C H, RI Songyun. Ultra-broadband terahertz metamaterial absorber using a simple design method[J]. Optics Communications, 2022(515):128191. doi:10.1016/j.optcom.2022.128191.
- [17] 张向, 王玥, 张晓菊, 等. 可用于农药传感的多带太赫兹超材料吸收器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(11):1107–1112. (ZHANG Xiang, WANG Yue, ZHANG Xiaoju, et al. Multiband terahertz metamaterial absorber for pesticide sensing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(11):1107–1112.) doi:10.11805/TKYDA2021393.
- [18] HU Dan, MENG Tianhua, WANG Hongyan, et al. Ultra-narrow-band terahertz perfect metamaterial absorber for refractive index sensing application[J]. Results in Physics, 2020(19):103567. doi:10.1016/j.rinp.2020.103567.
- [19] WANG Yue, YUE Lisha, CUI Zijian, et al. Optically tunable single narrow band all-dielectric terahertz metamaterials absorber[J]. AIP Advances, 2020, 10(4):045039. doi:10.1063/5.0003817.
- [20] CHEN Fu, CHENG Yongzhi, LUO Hui. Temperature tunable narrow-band terahertz metasurface absorber based on InSb micro-cylinder arrays for enhanced sensing application[J]. IEEE Access, 2020(8): 82981–82988. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991331.
- [21] REN Yi, ZHOU Tianle, JIANG Chun, et al. Thermally switching between perfect absorber and asymmetric transmission in vanadium dioxide-assisted metamaterials[J]. Optics Express, 2021, 29(5):7666–7679. doi:10.1364/OE.418273.
- [22] ZHU Lei, LI Haodong, DONG Liang, et al. Dual-band Electromagnetically Induced Transparency(EIT) terahertz metamaterial sensor[J]. Optical Materials Express, 2021, 11(7):2109–2121. doi:10.1364/OME.425126.
- [23] ZHU Lei, RONG Miaoxin, LI Haodong, et al. High-sensitivity metamaterial sensor based on Electromagnetically Induced Transparency(EIT) effect[J]. Laser Physics, 2022, 32(11):116203. doi:10.1088/1555-6611/ac967e.
- [24] CHENG Yongzhi, LIU Jiaqi, CHEN Fu, et al. Optically switchable broadband metasurface absorber based on square ring shaped photoconductive silicon for terahertz waves[J]. Physics Letters, A, 2021(402):127345. doi:10.1016/j.physleta.2021.127345.
- [25] WANG Shengxiang, CAI Chengfeng, YOU Menghan, et al. Vanadium dioxide based broadband THz metamaterial absorbers with high tunability: simulation study[J]. Optics Express, 2019, 27(14):19436–19447. doi:10.1364/OE.27.019436.
- [26] SONG Zhengyong, WANG Kai, LI Jiawen, et al. Broadband tunable terahertz absorber based on vanadium dioxide metamaterials[J]. Optics Express, 2018, 26(6):7148–7154. doi:10.1364/OE.26.007148.
- [27] DAO Rina, KONG Xinru, ZHANG Haifeng, et al. A tunable broadband terahertz metamaterial absorber based on the vanadium dioxide[J]. Optik, 2019(180):619–625. doi:10.1016/j.ijleo.2018.12.004.
- [28] BAI Jinjun, ZHANG Shusheng, FAN Fei, et al. Tunable broadband THz absorber using vanadium dioxide metamaterials[J]. Optics Communications, 2019(452):292–295. doi:10.1016/j.optcom.2019.07.057.
- [29] 张婷, 杨森, 于新颖. 基于二氧化钒的可调宽带太赫兹完美吸收器设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21):250–256. (ZHANG Ting, YANG Sen, YU Xinying. Tunable broadband terahertz perfect absorber design based on vanadium dioxide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(21):250–256.) doi:10.3788/LOP202158.2116002.
- [30] HUANG Jin, LI Jining, YANG Yue, et al. Active controllable dual broadband terahertz absorber based on hybrid metamaterials with vanadium dioxide[J]. Optics Express, 2020, 28(5):7018–7027. doi:10.1364/OE.387156.
- [31] LIU Yongchen, QIAN Yixian, HU Fangrong, et al. A dynamically adjustable broadband terahertz absorber based on a vanadium dioxide hybrid metamaterial[J]. Results in Physics, 2020(19):103384. doi:10.1016/j.rinp.2020.103384.
- [32] 郝梦真, 延凤平, 王伟, 等. 基于超材料的太赫兹偏振不敏感宽带吸波器[J]. 中国激光, 2019, 46(12):289–297. (HAO Mengzhen, YAN Fengping, WANG Wei, et al. Metamaterial-based terahertz polarization-insensitive broadband absorber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12):289–297.) doi:10.3788/CJL201946.1214002.
- [33] WANG Shengxiang, KANG Lei, WERNER D H. Hybrid resonators and highly tunable terahertz metamaterials enabled by vanadium dioxide(VO₂) [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):4326. doi:10.1038/s41598-017-04692-8.

- [34] ZHU Yanhan,ZHAO Yong,HOLTZ M,et al. Effect of substrate orientation on terahertz optical transmission through VO₂ thin films and application to functional antireflection coatings[J]. Journal of the Optical Society of America B—Optical Physics, 2012,29(9):2373–2378. doi:10.1364/JOSAB.29.002373.
- [35] LIU Mengkun, HWANG H Y, TAO H, et al. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial[J]. Nature, 2012,487(7407):345–348. doi:10.1038/nature11231.
- [36] CHE Zonge,LI Zhongxian,ZHANG Guanmao,et al. Active controllable broadband absorber based on vanadium dioxide[C]// 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium(PIERS). Hangzhou, China: IEEE, 2021: 604–608. doi: 10.1109/PIERS53385.2021.9694733.

作者简介：

董亮(1979–),男,博士,教授,主要研究方向为超材料、无线通信与信息安全.email:dongliang@163.com.

朱磊(1982–),女,博士,教授,主要研究方向为电磁和光学超材料、天线和微波器件.

向环琦(1992–),男,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹超材料吸收器和太赫兹极化转换器.

(上接第694页)

- [16] TANAKA M,MIYAMARU F,HANGYO M,et al. Effect of a thin dielectric layer on terahertz transmission characteristics for metal hole arrays[J]. Optics Letters, 2005,30(10):1210–1212. doi:10.1364/OL.30.001210.
- [17] LIU Dejun,YU Xi,WU Feng,et al. Terahertz asymmetric metallic hole arrays with polarization-independent quasi-bound states in the continuum for membrane sensing[J]. Optics Express, 2023,31(14):23608–23620. doi:10.1364/OE.494306.
- [18] BAHK Y M,HAN S,RHIE J,et al. Ultimate terahertz field enhancement of single nanoslits[J]. Physical Review B, 2017,95(7):075424.
- [19] WANG Lele,CAO Jun,LI Xiaowen,et al. Quasi-BICs enabled proximity sensing based on metal complementary H-shaped arrays at terahertz frequencies[J]. IEEE Photonics Journal, 2022,14(5):1–8. doi:10.1109/JPHOT.2022.3207172.
- [20] KOSHELEV K,LEPESHOV S,LIU Mingkai,et al. Asymmetric metasurfaces with high-Q resonances governed by bound states in the continuum[J]. Physical Review Letters, 2018,121(19):193903. doi:10.1103/PhysRevLett.121.193903.
- [21] LYU J,HUANG Lihao,CHEN Lin,et al. Review on the terahertz metasensor: from featureless refractive index sensing to molecular identification[J]. Photonics Research, 2024,12(2):194–217. doi:10.1364/prj.508136.
- [22] LYU J,SHEN S,CHEN L,et al. Frequency selective fingerprint sensor: the terahertz unity platform for broadband chiral enantiomers multiplexed signals and narrowband molecular AIT enhancement[J]. PhotonX, 2023,4(1):28. doi:10.1186/s43074-023-00108-1.
- [23] 牛昭然,蔡志鹏,张岩. 太赫兹表面等离激元的研发与应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(1):1–15. (NIU Zhaoran, CAI Zhipeng,ZHANG Yan. Design and applications of terahertz surface plasmon polaritons[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(1):1–15.) doi:10.11805/TKYDA2022018.

作者简介：

赵正韬(2003–),男,本科,主要研究方向为太赫兹超表面.email:18001907096@qq.om.

肖中银(1964–),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为手征特异材料、光波导表面模特性等.

张亚倩(1999–),女,在读硕士研究生,主要研究方向为亚毫米波超导谐振器.

刘德君(1990–),男,博士,副研究员,主要研究方向为太赫兹器件、亚毫米天文技术.