

基于二氧化钒的太赫兹多/宽带可调谐超材料吸波器

张效实, 雷建国*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年11月25日; 录用日期: 2026年1月2日; 发布日期: 2026年1月12日

摘要

超材料吸波器作为近些年的热门研究课题, 在探测、光伏等领域取得了广泛应用, 但也存在着器件吸收频率固定的缺陷, 所以在频率可调谐方面存在迫切需求。本文提出了一种多/宽带可调谐的双功能太赫兹超材料吸波器。基于相变材料二氧化钒(VO_2), 通过调节温度, 改变电导率, VO_2 在绝缘态和金属态之间相互转换, 实现了吸波器的多/宽带可调谐吸收。仿真结果表明, 在2~8 THz频段范围内, 当 VO_2 处于绝缘态时, 该器件实现了四频带吸收, 吸收率均大于97%; 当 VO_2 处于金属态时, 实现了一条吸收率超过60%的宽带吸收。此外, 本文还讨论了结构参数对超材料吸波器吸收率的影响, 分析了该器件的极化不敏感特性以及广角入射吸收特性等。该研究对于设计新型可调谐超材料吸波器及其在传感中的应用具有重要意义。

关键词

超材料吸波器, 太赫兹, 可调谐, 二氧化钒

A Terahertz Multi-Band/Broadband Tunable Metamaterial Absorber Based on Vanadium Dioxide

Xiaoshi Zhang, Jianguo Lei*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: November 25, 2025; accepted: January 2, 2026; published: January 12, 2026

Abstract

Metamaterial absorbers, as a popular research topic in recent years, have been widely applied in fields

*通讯作者。

文章引用: 张效实, 雷建国. 基于二氧化钒的太赫兹多/宽带可调谐超材料吸波器[J]. 应用物理, 2026, 16(1): 25-35.
DOI: 10.12677/app.2026.161003

such as detection and photovoltaics. However, they also have the defect of fixed absorption frequency, so there is an urgent need for frequency tunability. A multi-/broadband tunable dual-function terahertz metamaterial absorber is proposed in this paper. Based on the phase-change material vanadium dioxide (VO_2), the absorber achieves multi-/broadband tunable absorption by adjusting temperature to vary conductivity, enabling VO_2 to transition between insulating and metallic states. Simulation results demonstrate that within the frequency range of 2~8 THz, the device exhibits quad-band absorption with each absorption rate exceeding 97% when VO_2 is in the insulating state, while achieving a broadband absorption with over 60% absorption efficiency when VO_2 is in the metallic state. Additionally, this paper discusses the influence of structural parameters on the absorption performance of the metamaterial absorber and analyzes its polarization-insensitive characteristics as well as wide-angle incidence absorption properties. This research is of great significance for designing novel tunable metamaterial absorbers and their applications in sensing.

Keywords

Metamaterial Absorber, Terahertz, Tunable, Vanadium Dioxide

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1~10 THz, 波长在 0.03~3 mm 范围内, 位于红外线和微波之间的电磁波[1]。与微波相比, 太赫兹波空间分辨率更高, 适合高精度成像; 与红外线相比, 太赫兹波穿透性更强, 故而在电磁隐身[2]、红外探测[3]、传感[4]等方面具有重要的应用价值。二氧化钒(VO_2)是一种热致相变材料[5], 在温度低于约 68°C (341 K)时 VO_2 呈现绝缘态, 高于 68°C 时会呈现金属态, 当温度发生变化或施加外部电压[6] [7], VO_2 会经历金属 - 绝缘体的转变, 这使其成为太赫兹波调控的理想材料。超材料是一种具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料[8], 而吸波器作为超材料的重要功能应用之一, 在太阳能光伏、传感、隐身等领域已取得广泛应用[9]。2008 年, Landy 等人[10]最早提出了一种单频带超材料吸波器, 采用开口谐振环结构实现了微波波段的近完美吸收; Wang 等人[11]提出了一种包含三个同心方环形金属谐振器的太赫兹超材料吸波器, 该吸波器能够在三个不同频段内实现有效吸波。经过多年的发展, 超材料吸波器已经涵盖单频带、多频带、宽频带及超窄带等多波段类型[12]-[14], 但也存在着器件吸收频率固定的缺陷, 所以在频率可调谐方面存在迫切需求。而 VO_2 材料因具备调谐功能而获得深入研究, 现已在超材料吸波器中广泛应用[15]-[17]。Song 等人[18]提出了一种基于 VO_2 的太赫兹宽带可调吸波器的设计, 当 VO_2 电导率从 10 S/m 变化至 2000 S/m 时, 宽频带吸收的效率可从 5%调整至 96%。2022 年, 高鹏等人[19]提出了一种基于 VO_2 的空心方环形吸波器, 该吸波器采用多层金属 - 电介质 - 金属结构, 实现了带宽约为 3 THz 的宽带吸收, 但当入射角超过 30°时, 吸收特性会发生明显变化。同年, 樊怡也提出了一种基于 VO_2 的圆环十字形超材料吸波器[20], 具有最大入射角为 45°的窄带吸收性能。上述文献中设计的吸波器, 在吸收性能和调谐幅度方面有了很大的提升, 但在吸收频带的调谐或转换研究方面还需要开展更深入研究, 来开拓更加广泛的应用场景。

本文提出了一种可调谐的太赫兹超材料吸波器, 将超材料结构与可调谐材料相结合, 实现“多频带 - 宽带”吸波功能的转换。通过改变 VO_2 材料的电导率, 实现了吸波器吸收频带的主动调控: 当 VO_2 处于绝缘态时, 在 2~8 THz 频段范围内, 该设计器件实现了吸收率高于 97%的四频带吸波; 当 VO_2 处于

金属态时, 实现了带宽 1.5 THz、吸收率超过 60% 的宽带吸收。本文设计的“多频带-宽带”可调谐双功能吸波器, 可为太赫兹和其它频段的多功能可调谐器件提供新的研究思路。

2. 结构设计与计算方法

2.1. 超材料吸波器结构设计

本文提出的超材料吸波器结构如图 1 所示: 底层由连续的金薄膜构成, 中间是材料为聚酰亚胺(PI)的电介质层, 在两层介质层 PI 中间加有一层 VO₂ 薄膜, 顶层是金属谐振单元, 由十字形结构和两个开口圆环构成。金属薄膜和谐振单元材料均采用金属金(Au), 电导率为 $\sigma = 4.09 \times 10^7$ S/m, 中间介质层 PI 的介电常数 $\varepsilon(\omega) = 2.4 + 0.005i$ [21]。优化后的结构参数如下: 结构周期 $P = P_x = P_y = 42 \mu\text{m}$, 底层金属薄膜与顶层谐振单元的厚度相同, 均为 $h_g = 0.2 \mu\text{m}$ 。介质层 PI 的厚度分别为 $h_1 = 1 \mu\text{m}$ 和 $h_2 = 2 \mu\text{m}$, VO₂ 薄膜的厚度 $h_v = 0.1 \mu\text{m}$ 。十字形金属的长度 $L_g = 28 \mu\text{m}$, 宽度 $W_g = 5 \mu\text{m}$ 。开口外圆环的半径 $R_1 = 19 \mu\text{m}$, $R_2 = 16 \mu\text{m}$, 开口内圆环半径 $r_1 = 13 \mu\text{m}$, $r_2 = 10 \mu\text{m}$ 。内外圆环宽度相同, 均为 $3 \mu\text{m}$, 圆环开口间距都为 $S = 6 \mu\text{m}$ 。

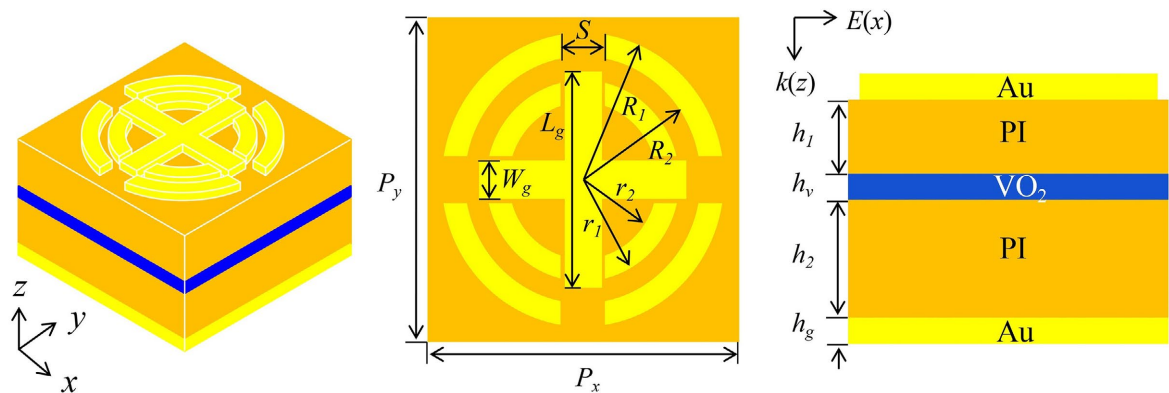


Figure 1. Schematic diagram of absorber unit structure. (a) Three-dimensional structure; (b) Top view; (c) Side view

图 1. 吸波器单元结构示意图。(a) 三维结构; (b) 俯视图; (c) 侧视图

2.2. 计算方法

基于时域有限差分(FDTD)算法, 使用电磁仿真软件 ANSYS Lumerical 对设计结构进行仿真。电磁波沿 $-z$ 方向垂直入射到吸波器表面, 电场 E 设为沿 x 轴方向。在模拟参数设置中, x 和 y 方向设置为周期性边界条件(Periodic), z 方向边界条件设为完美匹配层(PML)。VO₂ 作为一种具有相变特性的材料, 在不同的热、电和光条件下, 能够从绝缘态过渡到金属态, 其介电常数可以通过 Drude 公式来表示[12]:

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

式中 $\varepsilon_{\infty} = 12$, $\gamma = 5.75 \times 10^{13}$ rad/s。等离子体频率 $\omega_p(\sigma)$ 和电导率 σ 的关系如下[12]:

$$\omega_p^2(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) \omega_p^2(\sigma_0) \quad (2)$$

其中, $\sigma_0 = 3 \times 10^5$ S/m, $\omega_p(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{15}$ rad/s。基于介电常数和 VO₂ 电导率之间的关系, 可得到 VO₂ 电导率 σ 和温度的关系[12]:

$$\sigma = -i\varepsilon_0\omega(\varepsilon_c - 1) \quad (3)$$

上式中, ε_c 是温度相关函数, 通过改变电导率来表示不同的温度。在模拟过程中, 可直接改变 σ 的值来模拟 VO₂ 的相变特性, 相变前后电导率的变化范围大约为 $2 \times 10^2 \text{ S/m} \sim 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ [22]。

根据电磁吸收特性及能量守恒可知, 超材料吸波器的吸收率 A 可以表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$, 其中反射率 $R(\omega) = |S_{11}|^2$, 透射率 $T(\omega) = |S_{21}|^2$ 。鉴于底层金属薄膜所用材料为金, 其在太赫兹频段的趋肤深度约为 28 nm [23], 故吸波器底层薄膜远大于太赫兹波的趋肤深度, 所以吸波器的透射率几乎等于 0, 因而透射率 $T(\omega)$ 可以忽略不计, 最终吸收率的公式可简化为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$, 当反射率足够小时可以实现完美吸收。模拟结果显示, 吸波器在温度 300 K 和 390 K 时的吸收曲线如图 2 所示。当设置 VO₂ 电导率 $\sigma = 2 \times 10^2 \text{ S/m}$ 时(对应 300 K), 吸波器在频率 2~8 THz 范围内有四个共振吸收峰, 吸收率均大于 97%, 峰值频率分别位于 $f_1 = 3.404 \text{ THz}$ 、 $f_2 = 4.267 \text{ THz}$ 、 $f_3 = 6.294 \text{ THz}$ 、 $f_4 = 6.956 \text{ THz}$ 。当设置 VO₂ 电导率 $\sigma = 2 \times 10^4 \text{ S/m}$ (对应 390 K)时, 吸波器实现了带宽 1.5 THz、吸收率超过 60% 的宽带吸收。

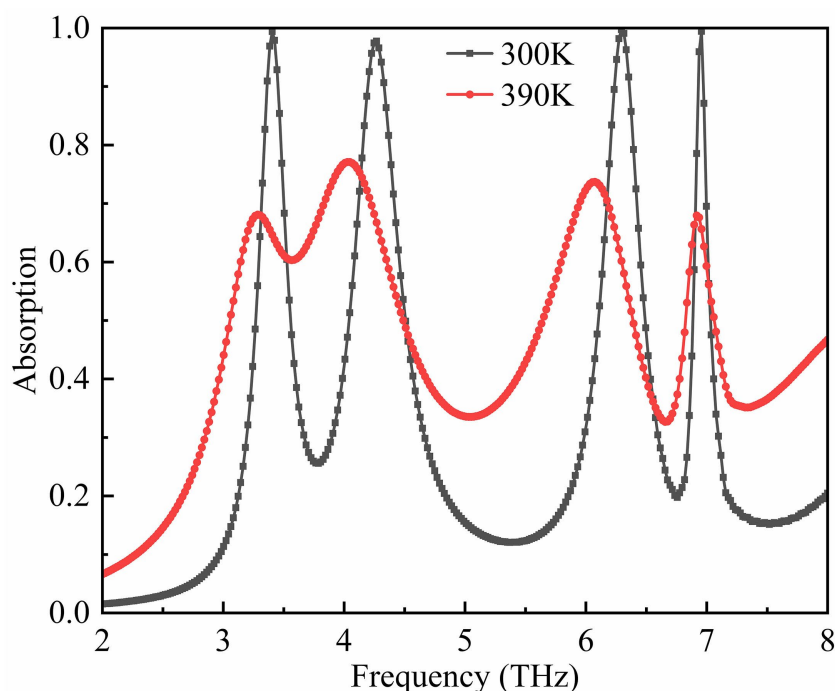


Figure 2. Absorption spectra of terahertz metamaterial absorber at different temperatures

图 2. 不同温度时太赫兹超材料吸波器的吸收谱

3. 结果分析

3.1. 吸收机制分析

首先对设计的吸波器结构的吸收谱进行了仿真, 如图 2 所示, 并对介质层材料分别为损耗介质和非损耗介质时的结果进行了对比。由图 3 可以看出, 无论介质层材料有无损耗, 吸波器在 $f_1 \sim f_4$ 处均出现高吸收峰, 且介质层为损耗材料时, 四个谐振峰的吸收率均超过 97%。该器件的单元结构, 将电磁场能量主要集中在顶层金属结构上, 减少了介质层的影响。从图 3 中可得, 非损耗介质时的吸收谱线和损耗介质时几乎相同, 所以损耗介质对该器件的吸收贡献不大, 在共振频率处, 入射的太赫兹波几乎都通过顶层金属谐振单元进行吸收。

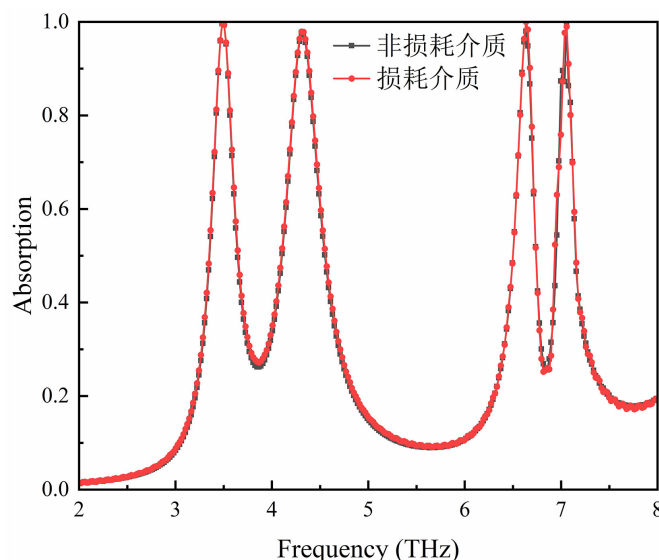


Figure 3. Absorption curves corresponding to the lossy and non lossy dielectric materials
图 3. 介质材料分别为损耗介质和非损耗介质时对应的吸收曲线

为进一步讨论吸波器的电磁吸收机制, 分别在顶层金属与上层介质交界面、下层 PI 介质中间处的 xy 截面以及 $y = 0$ 截面(即图 1(b)中十字形水平金属条中间处)设置监视器, 对四个谐振频率处的电磁场进行了分析。如图 4 所示, 第一行分别为顶层金属与介质交界面处的电场分布图, 从左到右分别对应频率 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 , 第二行分别为下层电介质内的电场分布, 第三行为 $y = 0$ 截面的磁场分布, 最后一行对应下层电介质内的磁场分布。当电磁波入射时, 吸波器顶层金属结构在电场作用下可看作电偶极子谐振器, 电场在顶层金属结构发生局域分布和强共振吸收。对共振峰 f_1 而言, 从图 4(a)、图 4(e)分析可得, f_1 的电场主要集中在金属十字形结构的左右两侧, 开口圆环几乎没有强电场分布, 磁场则主要集中分布在水平金属条下方的介质层内。当太赫兹波垂直照射到金属表面时, 金属中的自由电子会集体振荡, 与电磁波发生共振, 将入射能量转化为自由电子的振动能量。由于电场振动方向沿水平 x 方向, 所以在电场作用下, 金属表面的电荷发生重新分布, 正负电荷分别聚集在十字形金属左右两端, 形成电偶极共振。十字形金属表面的偶极共振与底板金属耦合, 形成电流回路, 并在顶部金属层和底部金属层之间产生磁共振, 形成结构的共振吸收峰 f_1 。对于共振峰 f_2 , 从图 4(b)、(f) 可以看到, f_2 的电场主要集中在外圆环, 并且开口外圆环的各分段金属两侧电场较强。从磁场图 4(n) 也可以看出, 磁场主要分布于开口外圆环下方的电介质层中, 而且从顶层到底层整体表现为逐渐减弱的趋势(可参考图 4(i) 的分布)。磁谐波在介质层中呈对称分布, 由分布在外圆环两侧的正负电荷对引起, 形成电流回路, 产生磁谐波[24]。根据 f_3 和 f_4 的电磁场分布可知, 如图 4(c)、图 4(d) 所示, 两吸收峰均由开口内圆环谐振产生, 电场分布主要集中在开口内圆环的各分段金属两侧, 且电场分布强度相当。从图 4(o)、图 4(p) 可以清楚地看到, f_3 和 f_4 的磁场都主要分布于开口内圆环下方的电介质层中, 不过 f_3 表现为上下稍强的对称分布, 而 f_4 表现为左右稍强的对称分布, 这刚好与图 4(g) 和图 4(h) 的电场分布对称性相反。由此可见, 吸波器顶层金属图案结构, 通过金属结构间的共振吸收实现了较为完美的四频带太赫兹吸收。

3.2. 不同电导率对吸收性能的影响

当电磁波垂直入射时, 数值仿真得到不同电导率时的吸收光谱如图 5 所示。当 VO_2 的电导率为 $1 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时, 吸收率在 2~8 THz 范围内是一条多吸收带, 吸收率在 50% 上下浮动; 当 VO_2 的电导率变为 $5 \times 10^3 \text{ S/m}$ 时, 其相应频带内是四条高吸收窄带, 吸收率均超过 90%。当电导率调谐到 200 S/m 时, 吸收

效果最佳, 吸收效率均高于 97%。通过观察曲线变化的总体趋势, 可以看出: 当电导率为 $2 \times 10^4 \text{ S/m}$ 时, 有一条吸收率超过 60%、带宽为 1.5 THz 的宽带吸收, 能同时兼顾吸收效率和带宽的要求。通过改变 VO_2 材料的电导率, 实现了动态调控吸波器的窄/宽带吸收功能, 可满足超材料吸收功能的主动可调。

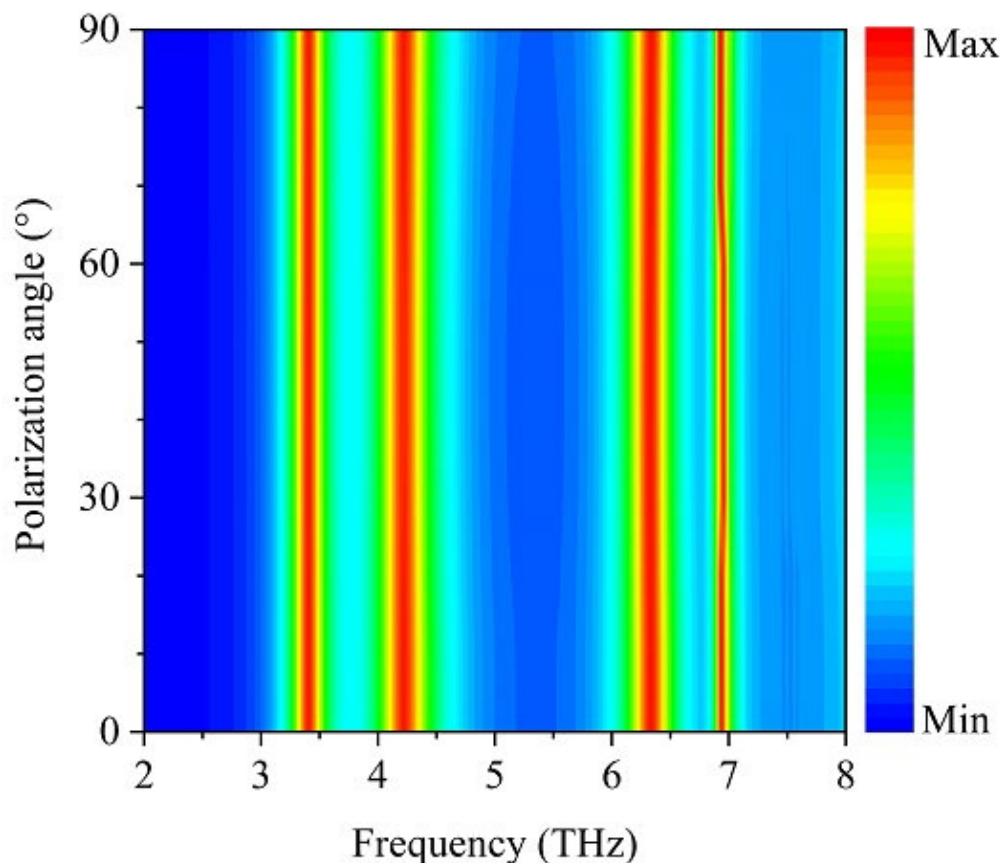


Figure 4. The distribution of the electromagnetic field at the resonant frequency. The first row is the electric field distribution of the top layer metal; The second row shows the electric field distribution within the lower layer of the dielectric; The third row is the magnetic field distribution on the $y = 0$ plane; The fourth row corresponds to the magnetic field distribution within the lower dielectric layer

图 4. 共振频率处的电磁场分布图。第 1 行为顶层金属的电场分布图; 第 2 行为下层电介质内的电场分布; 第 3 行为 $y = 0$ 面的磁场分布; 第 4 行对应下层电介质内的磁场分布

3.3. 结构参数对吸收性能的影响

通过分析吸波器的结构参数对吸收性能的影响, 可以更好地优化结构设计以提升吸收效果。这里主要分析的结构参数包括: 十字形金属长度 L_g 、宽度 W_g 、 VO_2 层厚度 h_v 以及介质上下层厚度 h_1 、 h_2 等, 仿真结果如图 6 所示。图 6(a) 为十字形金属不同长度 L_g 对吸波器的吸收性能影响。增加十字形金属 L_g 的长度, 吸收峰发生红移, 逐渐从四个减少到三个; 减少十字形金属长度到 $24 \mu\text{m}$, 吸收峰同样从四个变为三个。经过多次仿真分析, L_g 长度为 $28 \mu\text{m}$ 时吸收效果最好。图 6(b) 展示了十字形金属宽度 W_g 对吸波器吸收性能的影响。分析结果表明, 无论增大或减小十字形金属宽度, 吸收峰均会往高频方向移动, 吸收效果会明显变差。根据图 6(c) 可知, 增加 VO_2 层厚度 h_v , 会破坏吸波器整体的阻抗匹配, 导致吸收效果变差。图 6(d) 讨论了吸波器上、下介质层厚度对吸收的影响, 调节介质层的厚度可以有效改变电磁波的传播路径, 从而影响吸收效率。从图 6(d) 可看出, 通过适当调整两电介质层的厚度, 对吸收效率的影响并不大, 只是共振频率

发生了偏移, 且对 f_3 和 f_4 较明显。所以通过调整电介质层厚度可实现不同的四频带吸收, 这也是一种获得其它四频带共振吸收的有效方案。然而, 介质层过厚可能会导致介质损耗增大, 进而降低整体吸波效率[25]。设计介质层的厚度时, 需综合考虑其对电磁波传播的影响, 同时确保在一定带宽频带内仍能保持良好的吸收性能。通过对图 6(d)的分析, 最终确定了上层介质厚度为 $1\ \mu\text{m}$, 下层介质厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 。

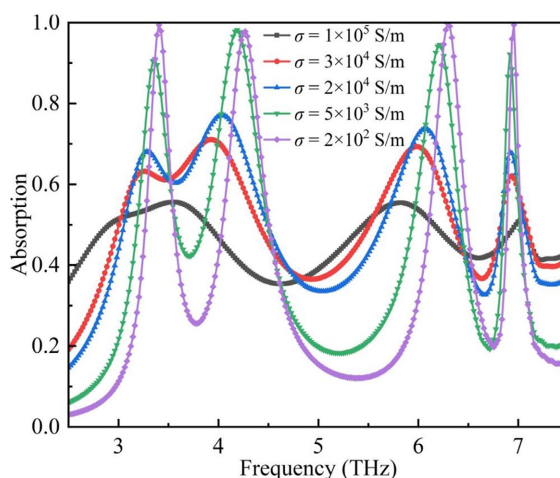


Figure 5. The influence of different electrical conductivities on absorption performance
图 5. 不同电导率对吸收性能的影响

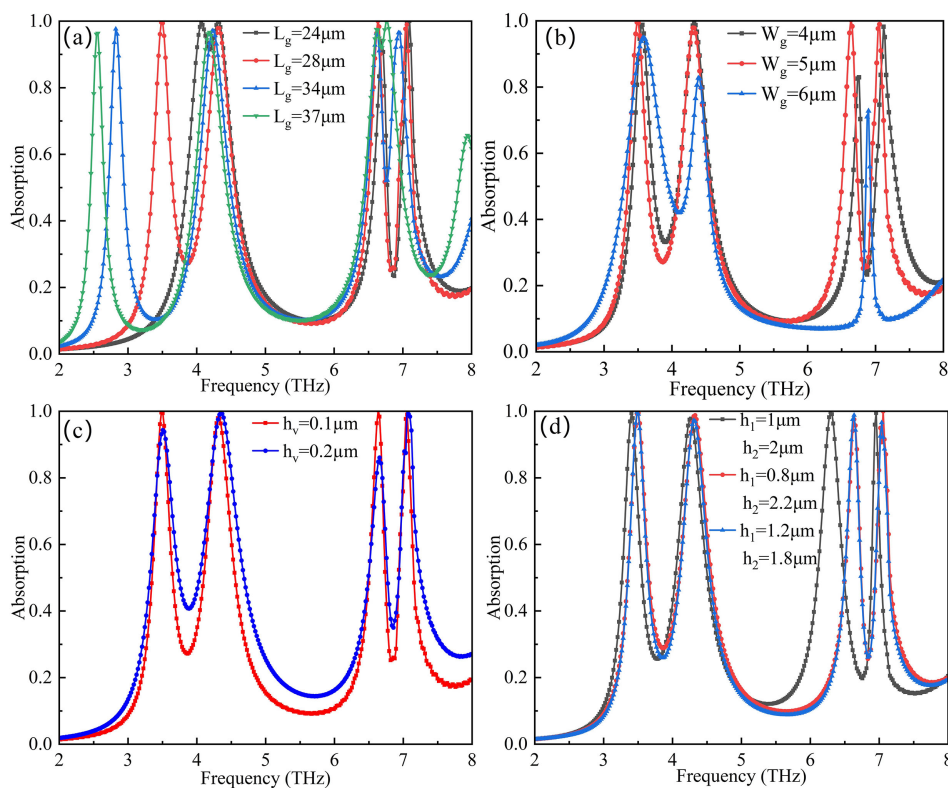


Figure 6. The influence of structural parameters on absorption performance. (a) The length of a cross shaped metal; (b) The width of a cross shaped metal; (c) The thickness of VO_2 layer; (d) The thickness of upper and lower dielectric layers

图 6. 结构参数对吸收性能的影响。(a) 十字形金属的长度; (b) 十字形金属的宽度; (c) VO_2 层的厚度; (d) 上下介质层厚度

3.4. 光源特性对吸收性能的影响

偏振无关性是指对光源偏振角度的不敏感特性, 是衡量吸波器性能的又一指标。鉴于电磁波入射时不仅存在入射角度的偏差, 也存在不同的偏振角度, 为探究偏振角度对设计的超材料吸波器的影响, 需要对不同偏振角度下的吸收曲线进行分析。如图 7 展示了吸收率随偏振角度的变化关系, 此时电磁波为垂直入射。随着偏振角度从 0° 增至 90° , 4 个共振峰的吸收率和半高宽两方面指标均未发生明显变化。仿真结果表明该吸波器具有良好的偏振不敏感特性, 适应各种偏振角度的电磁波入射, 这有利于实际应用, 具有更广泛的应用场景。究其原因, 可以从吸波器的设计结构进行分析。不同的偏振角度是指入射电磁波的电场和磁场分量的方向不同, 这个方向是在 xy 平面上的不同。而本文提出的吸波器结构在 xy 平面具有很好的对称性, 偏振角度的改变对入射电磁波在金属圆环上激发偶极子谐振不会产生任何影响, 因此不同偏振角度的电磁波入射产生的吸收曲线基本一致。所以在考虑使吸波器具有偏振不敏感特性时, 常见的方法就是在设计时考虑结构的对称性。

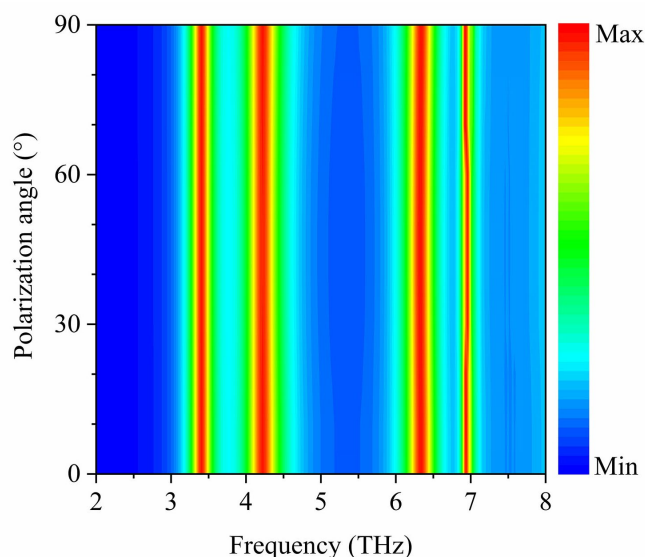


Figure 7. The influence of different polarization angles on absorption performance
图 7. 不同偏振角度对吸收性能的影响

除了分析光源偏振对器件吸收性能的影响外, 本文还讨论了光源入射角度对吸收的影响。因为通常情况下入射光源和器件之间都具有一定的角度, 所以广角入射也是吸波器件的一个重要指标。仿真结果如图 8 所示, 分别显示了 TM 和 TE 情形下入射角度对吸收性能的影响。从图中可看出, 光源入射角在 0° 到 50° 范围内, 吸收峰 f_1 、 f_2 均未发生明显变化, 入射角度的变化对吸收结果的影响不大, 表明该吸波器具有较宽的入射角度性能。对于吸收峰 f_3 和 f_4 , 入射角度变化对后两个吸收峰具有较大的影响, 除了吸收效率发生变化外, 共振频率也发生了偏移。整体而言, 由于前两个吸收峰具有较好的广角入射特性, 所以这一特点有利于该吸波器件的应用和推广。

3.5. 吸波器传感特性分析

吸波器在传感领域具有典型的应用价值。其工作原理是通过监测样品参数变化, 引起吸收谱线特征位移, 从而定量表征吸波器对特定参数的传感灵敏度。为研究 VO_2 处于绝缘态时该吸波器的传感性能, 采用 $1\ \mu\text{m}$ 厚度的不同折射率待测物作为覆盖层, 系统分析其吸收特性曲线的变化规律。如图 9 所示, 当

待测物的折射率 n 由 1.0 变化到 2.0 时, 其吸收光谱出现明显的红移, 吸收率大小未发生显著变化。这是由于当折射率 n 增大时, 待测物中的电磁波传播速度降低, 导致通过该介质传播的太赫兹波的波长增大, 波长增大会导致吸波器的谐振频率降低, 从而表现为吸收光谱的红移。图 9 中所展现出来的吸收特性有利于该器件在传感方面的应用。

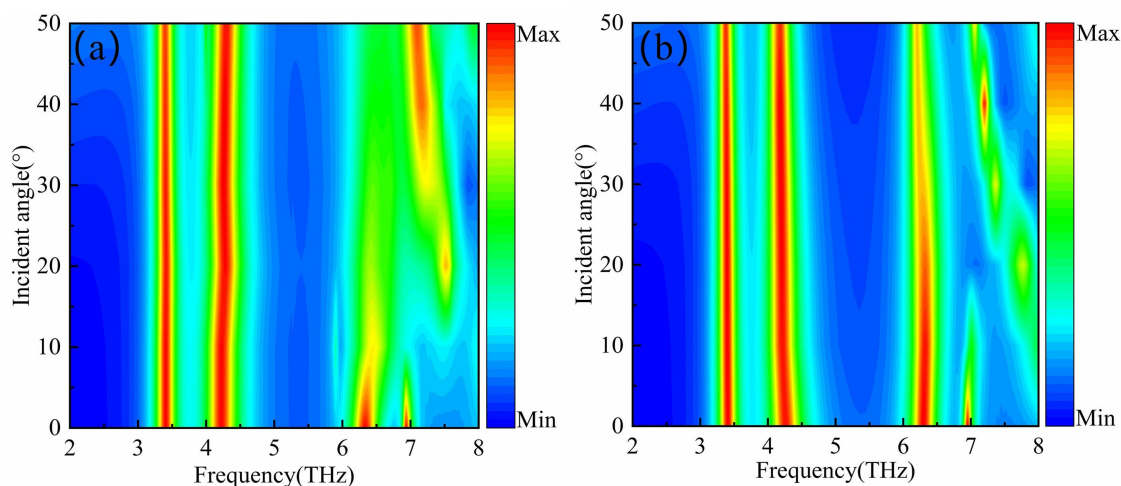


Figure 8. The influence of different incident angles on absorption performance. (a) TM wave; (b) TE wave

图 8. 不同入射角度对吸收性能的影响。(a) TM 波; (b) TE 波

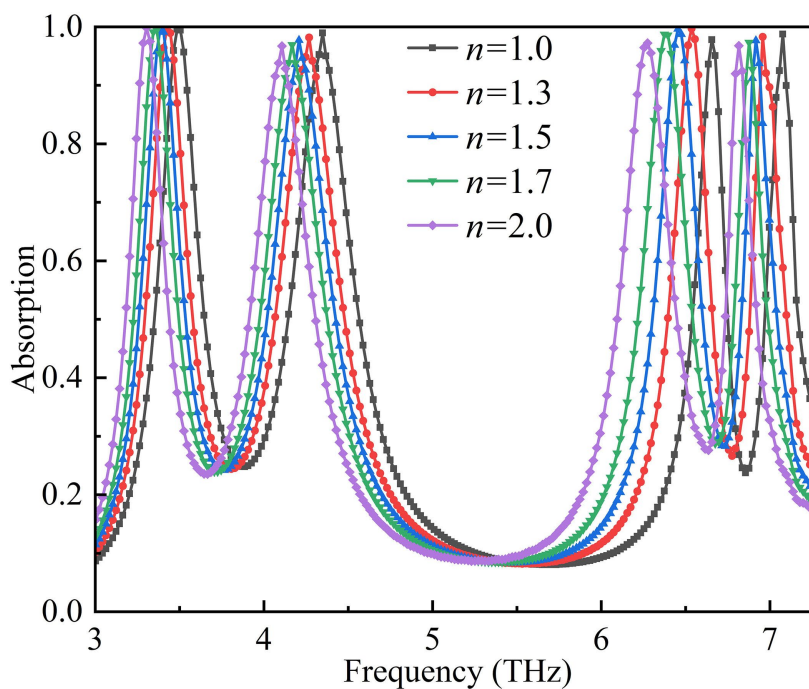


Figure 9. Absorption characteristic curves of analytes with different refractive indices

图 9. 不同折射率待测物的吸收特性曲线

4. 结论

本文设计了一种具有多带 - 宽带特性的可调谐双功能超材料吸波器, 该吸波器由十字形金属与开口

谐振环构成的顶层图案、上层 PI 介质层、VO₂ 薄膜、下层 PI 介质层和底部金属薄膜。通过控制温度, 改变电导率, 可以使 VO₂ 发生绝缘态 - 金属态可逆相变过程, 从而可以实现不同功能之间的转换。本文利用 FDTD 算法对该可调谐结构在 2~8 THz 频段内进行数值模拟, 结果表明: 当 VO₂ 处于绝缘态时, 吸波器可以实现太赫兹四频带吸收, 且所有吸收带均具有 97% 以上的高效吸收。当 VO₂ 从绝缘态转换为金属态时, 此结构可以调谐为太赫兹宽带吸收, 吸收率超过 60% 的带宽为 1.5 THz。此外, 还讨论了结构参数对吸收性能的影响。该吸波器件由于结构对称具备偏振不敏感性能, 在宽角度入射时也表现出良好的吸收性能。本文提出的超材料吸波器具有完美吸收和可调谐功能等特性, 可应用于太赫兹光电开关、调制和传感等领域。

5. 展望

本文以二氧化钒(VO₂)的相变特性为核心理论基础, 围绕可调谐超材料吸波器展开了系统性研究工作并取得一定进展, 但仍存在很多不足, 主要体现在以下方面:

(1) 本文针对超材料吸波器的结构设计及其吸收性能、传感性能的研究, 均基于电磁仿真软件的模拟分析, 虽然具有理论支撑, 但缺乏实验数据验证, 无法充分考虑到实验环节中潜在的干扰, 例如: 吸波器结构制备过程中的尺寸偏差、实验环境中电磁噪声与温度的干扰波动等, 均可能导致仿真结果与实际应用效果存在差异。

(2) 可调谐吸收是超材料吸波器的研究热点, 本文提出的可调谐吸波器虽已实现了 4 条高吸收带及 1.5 THz 带宽的动态切换, 但在宽吸收带仍有优化空间。后续的研究可以考虑进一步拓宽吸收带, 优化吸收性能, 可以采用的方法包括: 其一, 通过改变谐振单元的结构, 利用多阶吸收峰的叠加效应实现宽带吸收特性的改善; 其二, 设计多层结构的吸波器, 借助各层谐振单元与入射电磁波的耦合作用生成连续的吸收带。需要注意的是, 多层结构方案虽然能强化宽频效果, 但会增加器件厚度, 对制备工艺的精度提出更高要求。因此, 后续研究要依据技术优势, 设计出结构简单、吸收效率高与调制性能优异的新型超材料吸波器结构。

基金项目

吉林省科技发展计划项目(YDZJ202501ZYTS603)。

参考文献

- [1] Wei, X.K., Ren, C.L., Liu, B.W., *et al.* (2025) The Theory, Technology, and Application of Terahertz Metamaterial Biosensors: A Review. *Fundamental Research*, **5**, 571-585. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2024.11.008>
- [2] Che, Z., Zhang, G.M., Ren, P.P., *et al.* (2022) Narrow Bandpass Filter Based on Vanadium Dioxide Can Be Used for Terahertz Stealth. *Journal of Optics*, **51**, 336-342. <https://doi.org/10.1007/s12596-021-00764-1>
- [3] Wang, D., Yang, L., Hu, Z., Wang, F., Yang, Y., Pan, X., *et al.* (2025) Antiferromagnetic Semimetal Terahertz Photodetectors Enhanced through Weak Localization. *Nature Communications*, **16**, Article No. 25. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55426-0>
- [4] Ma, L., Fan, F., Feng, J., Shen, P., Song, C., Ji, Y., *et al.* (2025) Terahertz Asynchronous Twin-Comb for Prefiguring Hypersensitivity Beyond Spectrum Domain. *Nature Communications*, **16**, Article No. 8503. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63513-z>
- [5] Li, Z., Zhang, Z. and Zhou, X. (2023) Chemical Modulation of Metal-Insulator Transition toward Multifunctional Applications in Vanadium Dioxide Nanostructures. *Small*, **19**, 230-234. <https://doi.org/10.1002/sml.202305234>
- [6] Yan, D.X., Meng, M., Li, J.S., *et al.* (2020) Vanadium Dioxide-Assisted Broadband Absorption and Linear-to-Circular Polarization Conversion Based on a Single Metasurface Design for the Terahertz Wave. *Optics Express*, **28**, Article 29843. <https://doi.org/10.1364/oe.404829>
- [7] Hu, F.R., Wang, H., Zhang, X.W., *et al.* (2019) Electrically Triggered Tunable Terahertz Band-Pass Filter Based on VO₂ Hybrid Metamaterial. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **25**, 1-7.

- <https://doi.org/10.1109/jstqe.2018.2885476>
- [8] Lu, D., Malof, J.M. and Padilla, W.J. (2025) An Agentic Framework for Autonomous Metamaterial Modeling and Inverse Design. *ACS Photonics*, **12**, 6071-6080. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.5c01514>
 - [9] Feng, Y.S., Liang, M.S., Zhao, X.G., *et al.* (2025) Fabrication and Modulation of Flexible Electromagnetic Metamaterials. *Microsystems & Nanoengineering*, **11**, Article No. 14. <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00806-1>
 - [10] Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R. and Padilla, W.J. (2008) Perfect Metamaterial Absorber. *Physical Review Letters*, **100**, Article 207402. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.207402>
 - [11] Wang, J.F., Lang, T.T., Hong, Z., *et al.* (2021) Design and Fabrication of a Triple-Band Terahertz Metamaterial Absorber. *Nanomaterials*, **11**, Article 1110. <https://doi.org/10.3390/nano11051110>
 - [12] 杨宏艳, 支文龙, 肖功利, 等. 太赫兹全频段主动调谐多功能超材料吸波器[J/OL]. <https://doi.org/10.3788/AOS251306>, 2025-08-15.
 - [13] Parveen, A., Tyagi, D., Laxmi, V., Ullah, N., Ahmad, F., Irshad, A., *et al.* (2025) Next-Generation Light Harvesting: MXene (Ti₃C₂Tx)-Based Metamaterial Absorbers for a Broad Wavelength Range from 0.3 μm to 18 μm . *Materials*, **18**, Article 3273. <https://doi.org/10.3390/ma18143273>
 - [14] Chen, Y.X., Sun, G.T., Wei, J., *et al.* (2024) Ultrahigh-Q Polarization-Independent Terahertz Metamaterial Absorber Using Pattern-Free Graphene for Sensing Applications. *Nanomaterials*, **14**, Article 605. <https://doi.org/10.3390/nano14070605>
 - [15] Niu, J.H., Zhang, C.B., Mo, W., *et al.* (2025) Polarization-insensitive and Ultra-Bandwidth Terahertz Metamaterial Absorber Based on Vanadium Dioxide. *Applied Optics*, **64**, 2772-2779. <https://doi.org/10.1364/ao.557664>
 - [16] Geng, J.Q., Deng, X.H., Xiong, Z.P., *et al.* (2024) Ultra-Wideband Terahertz Absorber with Switchable Multiple Modes Based on Graphene and Vanadium Dioxide Metamaterials. *Chinese Journal of Physics*, **92**, 1312-1324. <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2024.10.037>
 - [17] Peng, W.L., Xie, Y.L., Luo, J.L., *et al.* (2024) Polarization-Insensitive Ultra-Wideband Tunable Perfect Absorber Based on a Vanadium Dioxide Metasurface. *Applied Optics*, **63**, 8973-8979. <https://doi.org/10.1364/ao.544937>
 - [18] Song, Z.Y., Chen, A.P. and Zhang, J.H. (2020) Terahertz Switching between Broadband Absorption and Narrowband Absorption. *Optics Express*, **28**, 2037-2044. <https://doi.org/10.1364/oe.376085>
 - [19] 高鹏, 陈聪, 刘海. 基于二氧化钒相变的可调谐超材料吸收器设计[J]. 量子光学学报, 2022, 28(1): 37-45.
 - [20] Fan, Y. and Yang, R.C. (2022) Temperature-Tunable Dual-Band Ultra-Thin Terahertz Metamaterial Absorber Based on Vanadium Dioxide. *Journal of Quantum Optics*, **28**, 46-54.
 - [21] Wang, B.X., Wang, L.L., Wang, G.Z., *et al.* (2014) Tunable Bandwidth of the Terahertz Metamaterial Absorber. *Optics Communications*, **325**, 78-83. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.04.005>
 - [22] Liu, H., Wang, Z.H., Li, L., *et al.* (2019) Vanadium Dioxide-Assisted Broadband Tunable Terahertz Metamaterial Absorber. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 5751. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42293-9>
 - [23] 郭起帆, 董云霞. 基于石墨烯和二氧化钒的太赫兹宽带超材料吸收器[J]. 量子光学学报, 2025, 31(1): 105-115.
 - [24] Lou, F.Y., Lei, J.G. and Lin, J.Q. (2021) A Simple Triple-Band Terahertz Metamaterial Absorber Based on Multi-Mode Resonance for Sensing Applications. *Nano LIFE*, **11**, Article 2150004. <https://doi.org/10.1142/s1793984421500045>
 - [25] 罗文, 罗萍. 基于二氧化钒的宽入射角吸收的超宽带太赫兹吸收器研究[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1182.O4.20250418.1714.022>, 2025-04-21.