

引用:刘恩博,王明红,吕太国. 基于二氧化钒的太赫兹超材料多功能吸收器[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39(3): 374-381.

Citation: LIU Enbo, WANG Minghong, LÜ Taiguo. Multifunctional terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide[J]. Journal of Liaocheng University (National Science Edition), 2026, 39(3): 374-381.

文章编号 1672-6634(2026)03-0374-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025050004

基于二氧化钒的太赫兹超材料多功能吸收器

刘恩博,王明红,吕太国

(聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)

摘要 基于二氧化钒(VO_2)的独特相变特性设计了一种具有吸收-传感功能的超材料太赫兹多功能器件。器件由五层结构组成,从上到下依次是 VO_2 图案层、PTFE 介质层、 VO_2 图案层、PTFE 介质层和底部金属层。结果表明,当 VO_2 处于全金属态时(电导率为 $200\,000\text{ S/m}$),器件具有吸收功能, $3.9\sim 14.8\text{ THz}$ 之间的频率范围内,吸收率超过 90% ,相对带宽达到 116.6% ,特别是在 6.4 、 9.8 和 11.0 THz 处吸收率超过 99% ,达到了完美吸收。当改变 VO_2 的电导率使 VO_2 处于绝缘态时,该设计结构可作为生物传感器,在 16.26 THz 处有一个窄带吸收峰。吸收率接近 90% ,其灵敏度达到 972 GHz/RIU ,品质因子 Q 值为 81.3 。

关键词 太赫兹;二氧化钒;吸收器;传感器

中图分类号 TB34

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Multifunctional terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide

LIU Enbo, WANG Minghong, LÜ Taiguo

(School of Physical Sciences and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: Based on the unique phase transition characteristics of vanadium dioxide (VO_2), a metamaterial terahertz multifunctional device with absorption-sensing function was designed. The device is composed of five layers, from top to bottom are VO_2 pattern layer, PTFE dielectric layer, VO_2 pattern layer, PTFE dielectric layer and the bottom metal layer. The results show that when VO_2 is in the all-metal state (conductivity is $200\,000\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$), the device has the absorption function, the absorption rate exceeds 90% and the relative bandwidth reaches 116.6% in the frequency range of $3.9\text{ THz}\sim 14.8\text{ THz}$. In particular, the absorption rate at 6.4 THz , 9.8 THz and 11.0 THz exceeds 99% , achieving perfect absorption. When the conductivity of VO_2 is changed so that VO_2 is in an insulating state, the design structure can be used as a biosensor with a narrow band absorption peak at 16.26 THz . The absorption rate is close to 90% , the sensitivity reaches 972 GHz/RIU , and the Q value is 81.3 .

Keywords Terahertz; vanadium dioxide; absorber; sensor;

收稿日期: 2025-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(11375081)资助

通信作者: 王明红,男,汉族,教授,研究方向: 光纤通信器件与系统, E-mail: minghongwang@163.com。

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波^[1]的频段是介于微波和红外线之间的一段波谱,属于电磁波的一部分。近年来,太赫兹波在生物检测、药品检验、质量控制等领域得到广泛应用。由于自然界中的大部分生物大分子(如蛋白质、病毒、核酸等)的共振频率和转动频率可以用太赫兹波检测到,进而可以通过特征频率对物质结构、物质进行分析和鉴定。此外,太赫兹波具有高分辨率、高穿透性等特性,使其能够穿透许多非极性材料,能够探测物质内部信息,且太赫兹波的光子能量较低,不会因电离而损伤需要检测的物质^[2-3]。随着研究人员对于太赫兹技术的不断研究,太赫兹波在传感领域的应用将得到进一步的发展。自然空间中传播的太赫兹波与物质的相互作用比较弱,物质在太赫兹频谱中的特征频率响应不够强,使得太赫兹传感系统检测物质的准确率和灵敏度存在一些问题,远远达不到检测微量生物物质的需求。因此,加强太赫兹波与物质的相互作用能力,提高传感器检测的灵敏度以及准确性,对于太赫兹传感系统检测微量物质具有重要的意义。随着微纳加工技术的发展,超材料(Metamaterials, MMs)为太赫兹波技术的发展提供了一种新方法。超材料^[4]作为一种新型的人工功能性材料,与自然中存在的物质相比,具有的一些特殊物理性质,如负折射率^[5],完美吸收^[6],逆多普勒效应^[7]。超材料可以对电磁波的振幅^[8],相位^[9],极化和频率实现灵活控制,广泛用于完美吸收^[10]、亚波长成像^[11]和极化转换^[12]。太赫兹超表面传感器因其能够增强局部区域的电场强度,对外界很小的环境变化都能表现出较高的灵敏度^[13],因此,可以实现对微量物质的高灵敏度检测,并突破现有传感器的灵敏度。超材料传感通过将待测物与超材料结构相互接触,并观察谐振频率振幅、频率等的变化,实现无标记检测^[14],并且易于操作,响应速度比较快。当需要在特定的频率处检测待测物质时,可以根据所需设计超材料结构,使其谐振频率在特定的频率点^[15]。因此,对太赫兹超表面传感器进行深入研究,对于生物检测、医学诊断、温度监控等领域具有非常重要的意义。

自从2008年Landy等人提出三层超材料吸收器^[16]以来,各种超表面吸收器相继被提出。超材料吸收器的研究取得了显著进展,其工作频段已从单一频段^[17]扩展到多频段^[18-19]乃至宽频段^[20]等多个类型。然而,现有吸收器主要采用金属-介质-金属的三明治结构,这种刚性设计存在明显的局限性:由于介质属性固定不变且不受环境影响,导致其吸收特性缺乏可调性,从而严重制约了实际应用场景的适应性。针对这一技术瓶颈,Song研究团队^[21]创新性地开发了一种以二氧化钒为基础的新型可调谐宽带吸收器,其在太赫兹波段吸收率从5%到100%可调,吸收率高于90%的相对带宽为71%。Wang等人^[22]于2017年提出了一种创新性的三频段完美吸收器设计,该结构采用液晶材料结合金属圆盘与椭圆盘的复合构型,可以实现对吸收峰谐振频率的有效调节。这种基于电控调谐机制的设计方案,为可重构超材料吸收器的开发提供了新的技术路径^[23],从而实现了吸收性能的动态调节和优化。2022年,Yao等人^[24]提出了一种新型的集成图案化石墨烯的柔性太赫兹生物传感器。该传感器由电磁诱导超材料以及石墨烯图案巧妙组合而成,凭借其精巧的结构设计,能够达成对植物蛋白的超灵敏检测。制作时先在石英衬底上旋涂聚酰亚胺薄膜,通过光刻在薄膜上制备类电磁诱导透明(EIT)超表面结构,再旋涂PI薄膜,接着转移三层石墨烯长条结构,经处理后浸泡在氢氟酸中得到柔性太赫兹生物传感器。理论计算得出传感器理论灵敏度为516.9 GHz/RIU,表明其具备超灵敏检测能力。

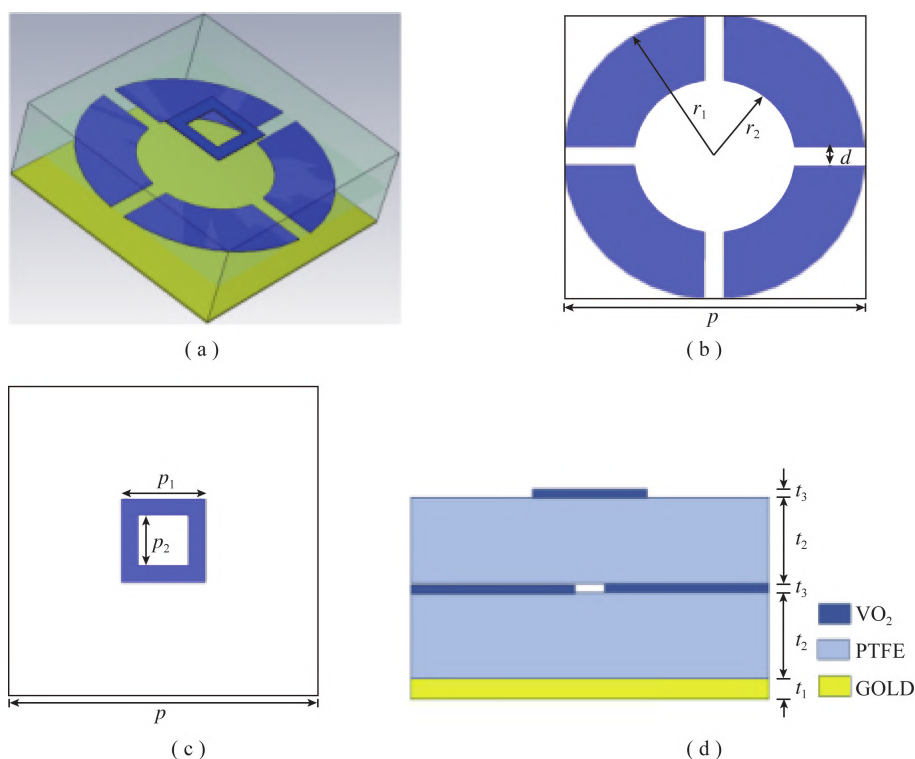
二氧化钒作为一种过渡金属氧化物,展现出与众不同的物理特性。它在自然界中较为罕见,常通过人工合成的方式获得。其晶体结构主要呈现出单斜晶系(低温相)和四方晶系(高温相)两种状态,在68℃时会从高温的四方晶系相变成低温的单斜晶系,且相变可逆,种结构的转变是其展现出诸多特殊性质的基础。然而,68℃的相变温度高于常规室温环境(25℃左右),限制了其在室温场景下的直接应用,通常在实际应用中引起二氧化钒发生相变的方式有电激发、热激发、光激发等^[25-27],在相变前后的电导率、磁化率、折射率等电磁特性均发生突变。

在本研究中,基于VO₂的相变特性,提出了一具有吸收—传感多功能的超材料太赫兹功能器件。当VO₂处于金属态时,器件在3.9~14.8 THz之间的频率范围内,吸收率超过90%,相对带宽达到116.6%,特别是在谐振频率6.4、9.8和11.0 THz处吸收率超过99%,达到了完美吸收。同时,通过调节VO₂的电

导率,可以实现器件吸收率的动态调节。此外,由于器件在结构上存在对称性,器件的吸收功能在太赫兹波垂直入射时具有极化不敏感的特性。当 VO_2 处于绝缘态时,吸收率曲线在 16.26 THz 处出现了一个窄带高吸收峰,吸收率达 90%,并且这个窄带高吸收峰随着上面待测物折射率不同出现红移现象,利用这个性质可以用于设计传感器件。其灵敏度达到 972 GHz/RIU, Q 值为 81.3。

1 结构和研究方法

基于相变材料 VO_2 设计的具有吸收/传感多功能超材料太赫兹超材料器件的单元结构如图 1 所示,该器件的单元结构由 5 层组成,从上到下依次为 VO_2 图案层、聚四氟乙烯 PTFE 介质层、 VO_2 图案层、PTFE 介质层和底层的连续金膜反射层。通过优化结构的参数,我们得到器件的参数如下:单元结构周期 $p = 30 \mu\text{m}$,金反射层的厚度为 $t_1 = 0.2 \mu\text{m}$,金电导率为 $\sigma_{\text{Au}} = 4.56 \times 10^7 \text{ S/m}$, VO_2 图案层厚度为 $t_3 = 0.1 \mu\text{m}$,PTFE 介质层厚度为 $t_2 = 5 \mu\text{m}$,其介电常数为 2.1,损耗角正切值为 $\tan\delta = 0.0002$, $d = 2 \mu\text{m}$, $p_1 = 8 \mu\text{m}$, $p_2 = 4.8 \mu\text{m}$, $r_1 = 15 \mu\text{m}$, $r_2 = 8 \mu\text{m}$ 。



注:(a) 周期性单元的立体图;(b-c) 周期性单元中设计的两层 VO_2 结构的俯视图;(d) 周期性单元的侧视图。

图 1 吸收器的几何结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the geometric structure of the absorber

在 THz 频段范围内, VO_2 的介电常数 ϵ_∞ 可以由 Drude^[27] 模型表示为:

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

式中 VO_2 材料的高频极限介电常数 $\epsilon_\infty = 12$, ω_p 为等离子体频率; σ 为 VO_2 的电导率; ω 为 THz 波的角频率; 碰撞频率 $\gamma = 5.75 \times 10^{13} \text{ rad/s}$ 。 ω_p 可近似表示为 $\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0)$, 其中 $\sigma_0 = 3 \times 10^5 \text{ S/m}$, $\omega_p(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ 。

在仿真中,当结构处于室温环境下时, VO_2 的电导率设为 $\sigma = 200 \text{ S/m}$ 。当温度增加至 68°C 时, VO_2 为金属态,此时 VO_2 的电导率为 $\sigma = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 。通过基于频域的有限元法(FEM),能够在广泛的频率范

围内对吸收器进行全面的仿真研究,揭示其不同频段下的光学行为和性能表现。本文利用 CST Microwave Studio 仿真软件对设计的吸收器件进行了计算,分析了太赫兹超材料动态可调吸收器的光学特性。在仿真过程中,设置 $z=0$ 的平面位于底面金属板反射层底部,模拟电磁波垂直入射到吸收器上的情况,同时设定入射波的电场沿 y 方向极化,磁场沿着 x 轴方向,以模拟真实光照条件。 x 和 y 方向设定周期边界条件, z 方向则设置为开放边界条件,确保仿真结果的准确性和真实性,同时避免了边界效应对仿真结果的影响。THz 吸收器吸收率可以表示为:

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

式中 $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别表示反射率和透射率,且 $R(\omega) = |S_{11}|^2$, $T(\omega) = |S_{21}|^2$, $|S_{11}|$ 、 $|S_{21}|$ 分别表示反射系数和透射系数。由于结构中底层连续金属膜的厚度远大于 THz 波在其中的趋肤深度,入射的 THz 被全部反射,因此 $T(\omega)$ 始终为 0,式(2)可以直接简化成 $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ 。

2 结果与讨论

通过改变 VO_2 的电导率来改变 VO_2 的不同属性,当 $\sigma_{\text{VO}_2} = 2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时,即 VO_2 处于金属态时,器件的功能表现为宽带吸收。仿真计算结果表明,当 VO_2 电导率为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$ 时,其处于金属态,得到的吸收光谱如图 2 所示,在 $3.9 \sim 14.8 \text{ THz}$ 之间的频率范围内,器件表现出优异的宽带吸收性能,吸收率超过 90%,相对带宽达到 116.6%,特别是在谐振频率 6.4、9.8 和 11.0 THz 处吸收率超过 99%,近乎达到了完美吸收。

器件完美吸收的带宽明显增强,这离不开器件的五层结构相互作用。单层超材料通常仅在单一或少数频率点产生强共振(如局域表面等离子体共振、磁共振等),带宽较窄。而多层结构中,各层单元的几何参数(如尺寸、形状、间距)可通过独立调控,使每层对应不同的共振频率。当太赫兹波入射时,各层在各自共振频率下响应,形成多个共振峰的叠加,从而将单一窄带响应拓展为覆盖多个频段的宽带响应。

为了更加清晰的说明宽带吸收器完美吸收的物理机制,本文引入了阻抗匹配理论。吸收器的相对阻抗可以用公式(3)表示为:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 + S_{21}^2}}, \quad (3)$$

式(3)中, μ 和 ϵ 分别表示磁导率和介电常数。 S_{11} 和 S_{21} 可以通过软件仿真得到,所以吸收器相对阻抗的实部和虚部可通过 S 参数反演法得出。

由吸收率和相对阻抗的关系可表示为:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{Z_r - 1}{Z_r + 1} \right|^2, \quad (4)$$

式(4)中, Z_0 表示空气的有效阻抗, Z 表示吸收器的有效阻抗 $Z_r = Z/Z_0$ 则为吸收器和空气的相对阻抗。当吸收器的有效阻抗和空气的相对阻抗相匹配时,即相对阻抗 Z_r 为 1,吸收器可以实现完美吸收。

分别根据 S_{11} 和 S_{21} 计算了 VO_2 在金属态和绝缘态不同相态下吸收器相对阻抗的实部和虚部,如图 3 所示。由图 3 可以看到,当 VO_2 处于金属态时,相对阻抗的实部接近于 1,而虚部接近于 0。说明在 $3.9 \sim 14.8 \text{ THz}$ 之间的频率范围内,实现了吸收器和空气之间的阻抗匹配,吸收器能够最大程度地吸收入射太赫兹波,达到高吸收性能。而当 VO_2 处于绝缘态时,相对阻抗的实部和虚部接近于 0,这说明了吸收器和空气之间的阻抗不再匹配,器件不再具备吸收功能。

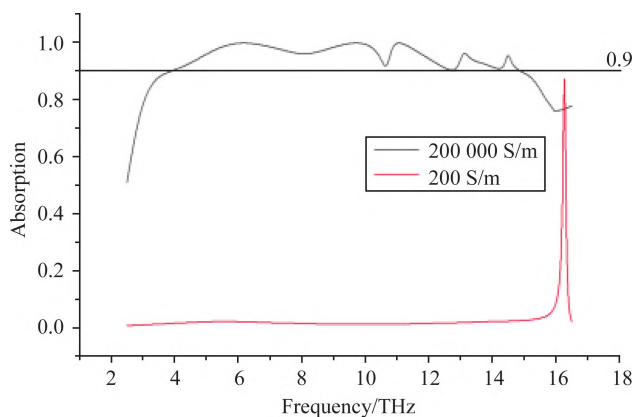
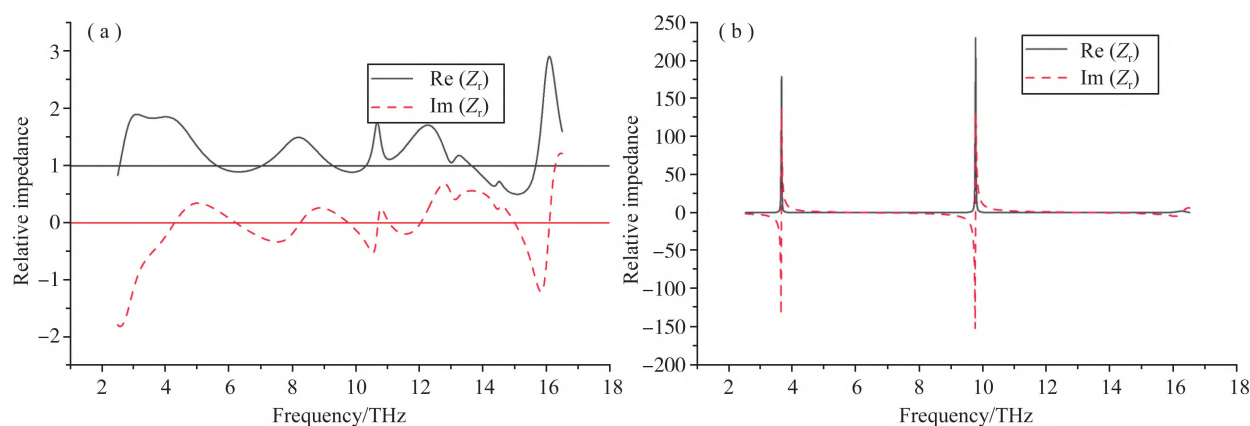


图 2 不同 VO_2 状态下的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectra under different VO_2 states



注:(a) VO₂ 为金属态;(b) VO₂ 为绝缘态。

图3 不同条件下吸收器的相对阻抗

Fig. 3 Shows the relative impedance of the absorber under different conditions

由于 VO₂ 的电导率会随温度产生不同变化,可充分利用这一特性对吸波宽带实施调谐操作。在此设定入射波为 x 极化波,通过改变 VO₂ 的电导率来观察吸波宽带的变化情况。实验数据表明,当 VO₂ 电导率从 200 S/m 提升至 2×10^5 S/m 时,该器件在 3.9~14.8 THz 频率范围内吸收超过了 90%,这种宽频带吸收特性使其成为太赫兹波段理想的功能器件。如图 4 所示,可以看到在 3.9~14.8 THz 频率范围内,随着电导率的增加,吸收器的吸收能力也在逐步增加。这说明器件的吸收率可以实现主动精准控制,在吸收带宽内,可以根据不同工作要求实现吸收率的即时切换,在实际应用中提供了更大的灵活性和适应性,提高了器件的多功能性。

为了进一步分析吸收器的吸收机理,我们通过软件计算仿真了 VO₂ 分别处于金属态和绝缘态时在谐振频率 6.4、9.8、16.26 THz 处两层 VO₂ 图案层的电场分布,如图 5 所示。图 5(a~c)为 VO₂ 处于金属态时的 VO₂ 层的电场分布;图 5(d~f)是吸收器在绝缘态时的电场分布。在图 5(f)可知,VO₂ 方环处的电场虽然较强,但分布不均匀,左右两边较强,前后两边相对较弱,VO₂ 层出现法布里-珀罗共振。所以在谐振频率 16.26 THz 处的窄带吸收峰是由 VO₂ 方环层发生法布里-珀罗共振引起的。法布里-珀罗共振的发生,与 VO₂ 方环层的结构特性以及其中的电磁相互作用紧密相关,当电磁信号与 VO₂ 方环层相互作用时,在满足一定条件下引发共振,进而导致在 16.26 THz 这个特定频率处,对入射的电磁波产生了强烈的吸收效应,形成了明显的窄带吸收峰。在图 5(a~b)可以看出,两层 VO₂ 层都有较强的电场,且电场强的位置基本对称。因此在谐振频率 6.4 和 9.8 THz 处形成宽带吸收峰。而图 5(c)中,虽然也有电场较强的地方,但只集中在一小部分,不足形成吸收峰。整体来看,无论 VO₂ 处于何种状态,能够达到完美吸收点时,中间方环处的电场分布都明显强于外圆环,这是由于中间方环的结构对称性相比于外部圆环更加完全且其被入射波照射更为直接导致。

在实际应用中,吸收器件的性能评估需重点考察其对电磁波极化状态和入射角度的适应性。在工程实践中,吸收器件的性能评估需重点考察其对电磁波极化状态和入射角度的适应性。我们针对入射太赫兹波在不同偏振方向以及不同入射角时,对吸收器的吸收性能展开了深入研究。相关结果如图 6(a)所示,当极

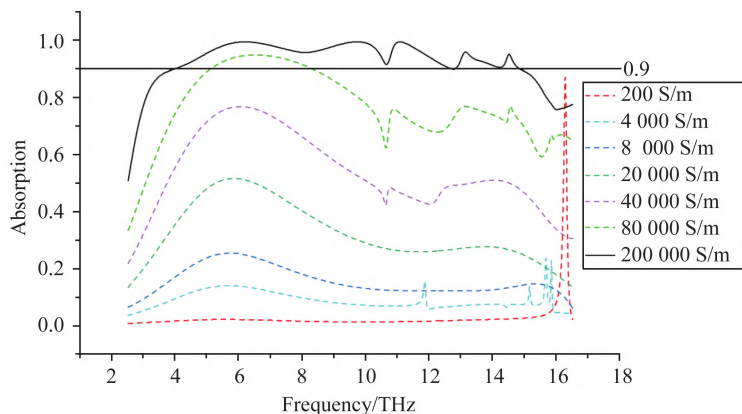
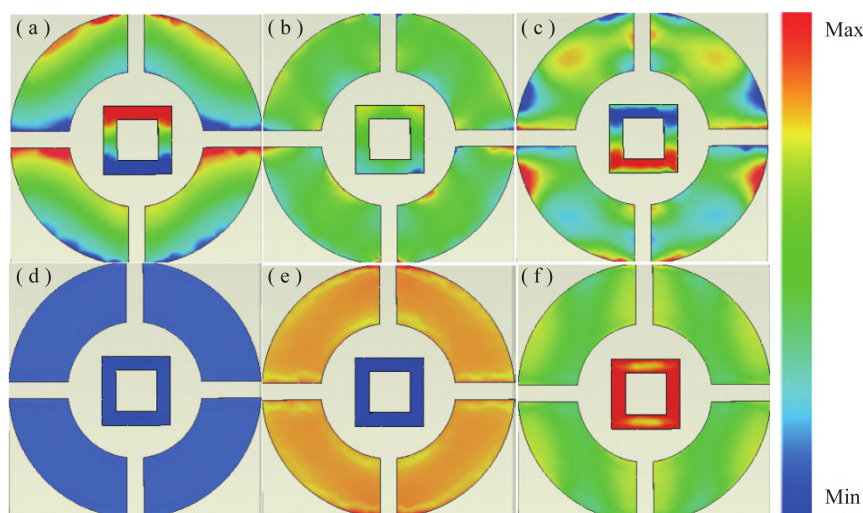


图4 电磁波垂直入射时,不同电导率下的吸收光谱

Fig. 4 Shows the absorption spectra at different electrical conductivities when electromagnetic waves are incident perpendicularly

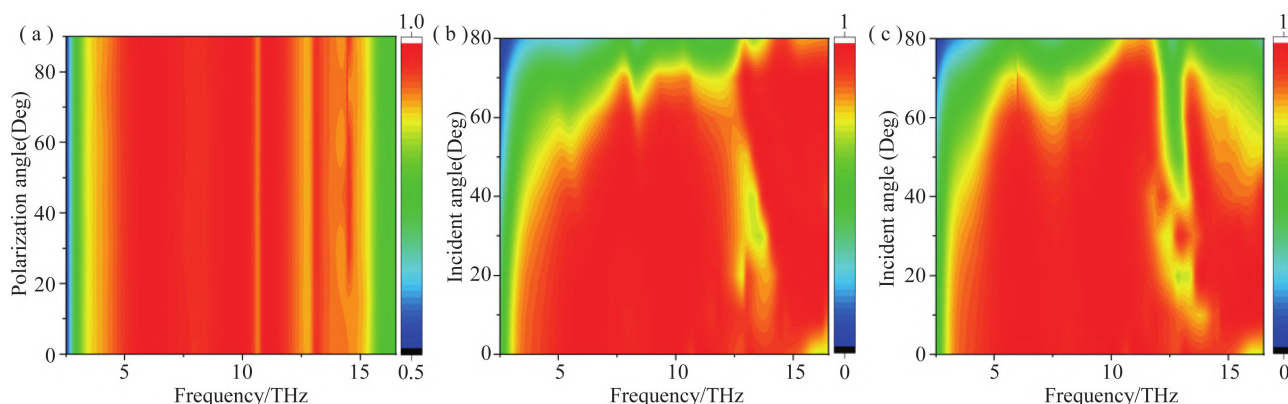
化角从 0° 增加至 90° 的过程中,吸收谱线在不同极化角度下保持高度一致性,这一实验结果明确验证了该器件具有优异的极化不敏感特性。这种卓越的极化稳定性主要归因于器件结构的完美对称设计,这种对称性保证了吸收器在面对不同电场极化角度时,不会受到电场极化角度变化的干扰,对于处理复杂极化状态的太赫兹波具有重要实用价值。鉴于实际应用中电磁波往往以非垂直方式入射,研究斜入射条件下吸收器的角度适应性具有重要工程意义。我们通过改变 THz 波的入射角度,分别对 TE 偏振模式和 TM 偏振模式下吸收光谱随入射角度的变化情况进行了研究,从图 6(b)中可以观察到,在 TE 偏振模式下,随着 THz 波入射角的不断增大,吸收器在大部分情况下依然能够保持良好的吸收状态。只有当入射角度大于 60° 时,低频处的吸收率才出现了轻微的衰减,而高频处的吸收率基本保持不变。再看图 6(c),在 TM 偏振模式下,当入射角小于 40° 时,吸收带宽基本维持不变,吸收器依旧能保持较高的吸收率。然而,随着入射角的进一步增大,在 $12.5 \sim 13.5$ THz 这一频段处出现了一小段吸收率大幅降低的情况,不过低频和高频处的吸收率仍然保持在较好的水平。基于上述实验结果与分析,该超材料多功能器件具备极化不敏感以及在大入射角情况下性能稳定的显著特性。这些特性使得该吸收器在太赫兹相关的实际应用中,如太赫兹通信、太赫兹成像等领域,具有更广阔的应用前景和更高的实用价值。



注:(a) 金属态 6.4 THz; (b) 金属态 9.8 THz; (c) 金属态 16.26 THz; (d) 绝缘态 6.4 THz; (e) 绝缘态 9.8 THz; (f) 绝缘态 16.26 THz。

图5 VO₂ 分别处于金属态和绝缘态时,器件在 6.4 THz、9.8 THz、16.26 THz 处的电场分布

Fig. 5 Shows the electric field distribution of the device at 6.4 THz, 9.8 THz, and 16.26 THz when VO₂ is in the metallic state and the insulating state respectively



注:(a) 不同极化角度下的吸收光谱;(b) 不同入射角 TE 波吸收光谱;(c) 不同入射角 TM 波吸收光谱。

图6 不同条件下的吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectra under different conditions.

为了更好地研究结构几何参数对偏振转换性能的影响,我们改变器件的不同参数研究结构参数对吸收性能的影响,得到结果如图 7 所示。令 VO_2 处于金属态,改变器件的几何参数(VO_2 方环的内环大小 p_2 与介质层厚度 t_2)。由图 7(a)可以看出,随着参数 p_2 的不断增大,吸收率在 3~6.5、10~10.9 及 13 THz 后出现不同幅度的下降,当 $p_2=4.8 \mu\text{m}$ 时,吸收率曲线达到了最佳的效果。由图 7(b)可以看到,当介质层厚度 t_2 以 $0.5 \mu\text{m}$ 的间隔逐渐增加时,吸收带宽变得越来越小,且吸收率随着 t_2 的增加呈下降趋势。由此可见,二氧化钒方环的大小对于该器件的吸收率的影响不大,介质层厚度的改变对吸收率的影响较大。为了实现最佳效果的吸收功能,该器件最终选择 $p_2=4.8 \mu\text{m}$, $t_2=5 \mu\text{m}$,这也是器件各个参数的优化的结果。

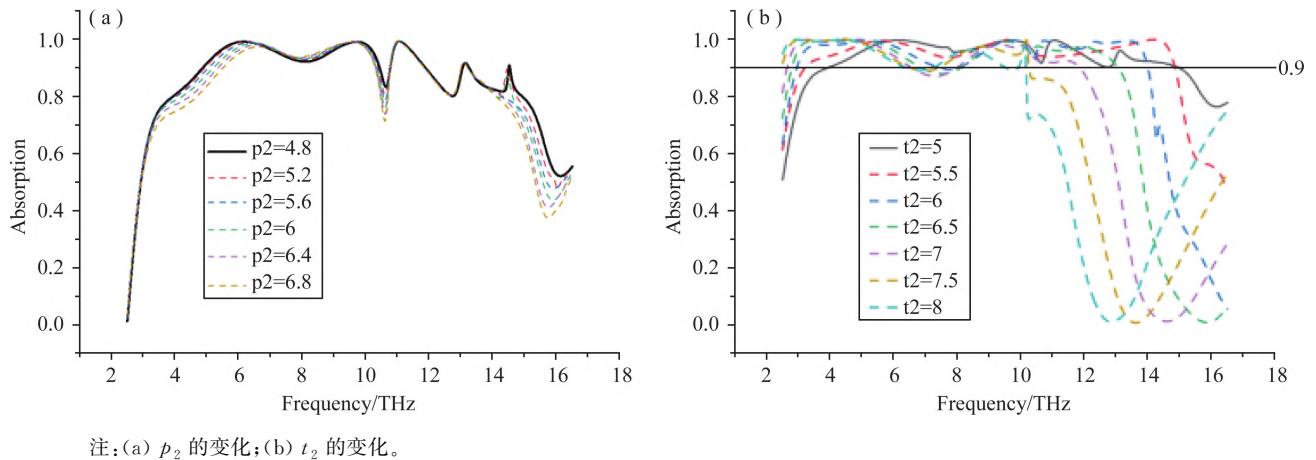


图 7 器件吸收率随结构参数的模拟变化

Fig. 7 Simulation variation of device absorption rate with structural parameters

由图 2 可知,当 VO_2 处于绝缘相时,在谐振频率 16.26 THz 处出现一个窄带高吸收峰。并且由图 5(f) 通过仿真得到的电磁场分布可以得到,在该器件的谐振频率为 16.26 THz 这一特定频率点上, VO_2

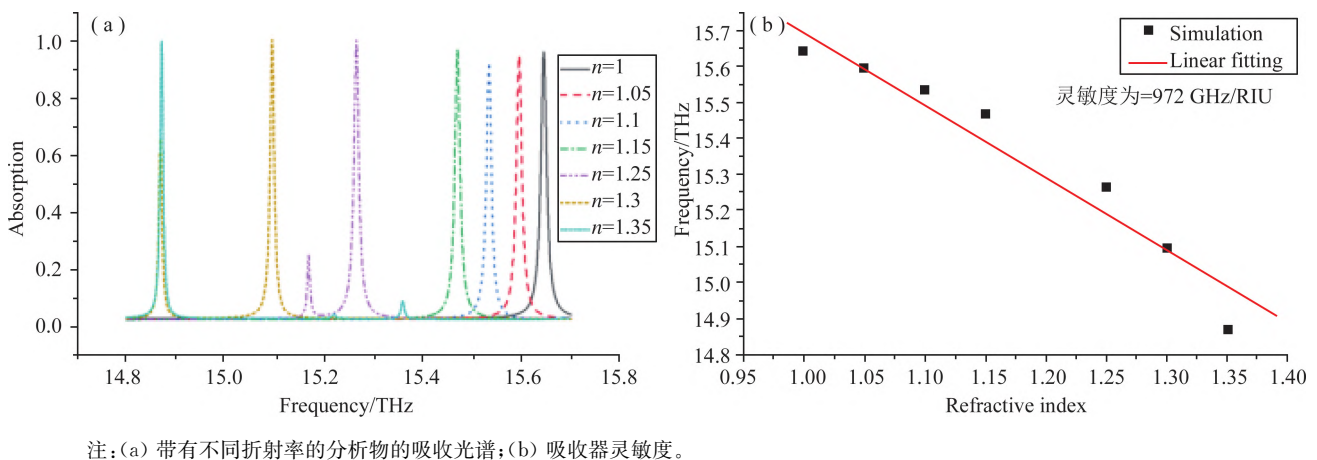


图 8 吸收光谱图与灵敏度

Fig. 8 Absorption spectrum and sensitivity

方环结构处的电场强度相对较强。这种较强的电场分布特性,使得该器件对于周围环境的变化表现出较高的敏感度。一旦器件结构上所使用的材料的介电常数发生改变,其谐振频率以及振幅也会随之产生相应的变化。基于这一独特的特性,该器件具备了作为生物传感器的潜力,能够实现对不同物质的检测。具体操作过程如下:将厚度为 $15 \mu\text{m}$ 的待测样品置于超材料器件表面,通过调控样品折射率(1.0~1.35)观察吸收特性变化。如图 8 所示,随着待测物折射率的不断增加,会改变 VO_2 周围环境的介电常数,进而削弱结构内自由电子的局域表面等离子体共振(LSPR)效应,使得共振条件所需的电磁波能量减小,所以传感器的吸收频率出现了红移现象。根据公式 $S = \Delta f / \Delta n$ (S 表示灵敏度, Δf 为频率的偏移, Δn 表示折射率的变化) 计算得到传感器的灵敏度为 972 GHz/RIU, Q 值计算的结果为 81.3,具有较高的 Q 值,表明该器件在 VO_2 处

于绝缘相时可以作为生物传感器。

3 结论

本文基于 VO_2 设计了一种具有吸收和传感多功能的太赫兹超材料器件。当 VO_2 处于金属相时,器件对太赫兹波具有吸收功能,结果表明在 3.9~14.8 THz 之间的频率范围内,吸收率超过 90%,相对带宽达到 116.6%,在谐振频率点 6.4、9.8 和 11.0 THz 处吸收率超过 99%,达到了近乎完美吸收。同时,通过调节 VO_2 的电导率,可以实现器件吸收率的动态调节。此外,由于在结构上存在对称性,器件在 THz 波垂直入射时具有极化不敏感的特性。当 VO_2 处于介质相时,器件对太赫兹波具有传感功能。研究发现,在吸收率曲线上谐振频率点 16.26 THz 处出现了一个窄带高吸收峰,吸收率达到 90%以上,利用这种特性设计了一种传感器,该传感器灵敏度达到 972 GHz/RIU,其 Q 值达到 81.3。

参 考 文 献

- [1] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] ZHANG X C, XU J Z. Introduction to THz wave photonics[M]. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [3] 边明明, 王世涛, 雷利华, 等. 太赫兹技术及空间应用国内外发展现状研究[J]. *空间电子技术*, 2013, 10(4): 80-84.
- [4] LIANG S R, XU F, YANG H, et al. Ultra long infrared metamaterial absorber with high absorption and broad band based on nano cross surrounding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 158: 108789.
- [5] ESFANDIYARI M, LALBAKSHI A, JARCHI S, et al. Tunable terahertz filter/antenna-sensor using graphene-based metamaterials[J]. *Materials & Design*, 2022, 220: 110855.
- [6] ZHU J, WU C S. Detection of amino acid with metamaterial perfect absorbers in the terahertz band[J]. *Measurement*, 2022, 192: 110738.
- [7] KADIC M, MILTON G W, VAN HECKE M, et al. 3D metamaterials [J]. *Nature Reviews Physics*, 2019, 1(3): 198-210.
- [8] ZHANG Y X, ZHAO Y C, LIANG S X, et al. Large phase modulation of THz wave via an enhanced resonant active HEMT metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2018, 8(1): 153-170.
- [9] SENSAL-RODRIGUEZ B, YAN R S, KELLY M M, et al. Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions[J]. *Nature Communications*, 2012, 3(1): 780.
- [10] ZHANG Y B, WU P H, ZHOU Z G, et al. Study on temperature adjustable terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 85154-85161.
- [11] LI K, GUO Y H, PU M B, et al. Dispersion controlling meta-lens at visible frequency[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21419-21427.
- [12] LIU W J, ZHANG Y G, LIANG L J, et al. Ultra-efficiency broadband terahertz polarization converter based on a cross-shaped metamaterial[J]. *AIP Advances*, 2022, 12(8): 085101.
- [13] 高喜, 张燕. 太赫兹频段高折射率超材料的设计和特性研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2019, 32(5): 19-23.
- [14] ZHOU Q H, ZHA S, BIAN L A, et al. Independently controllable dual-band terahertz metamaterial absorber exploiting graphene[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(25): 255102.
- [15] 李倩文, 周晓英, 王彤灵, 等. 基于狄拉克半金属超材料的太赫兹吸波体研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2020, 33(2): 35-42.
- [16] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [17] HUANG X, YANG F, GAO B, et al. Metamaterial absorber with independently tunable amplitude and frequency in the terahertz regime[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25902-25911.
- [18] 孟庆龙, 张艳, 张彬, 等. 光控可调谐多频带太赫兹超材料吸收器的特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 101603.
- [19] HU D, WANG H Y, TANG Z J, et al. Design of four-band terahertz perfect absorber based on a simple #-shaped metamaterial resonator[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(9): 826.
- [20] MENG W W, LV J, ZHANG L W, et al. An ultra-broadband and polarization-independent metamaterial absorber with bandwidth of 3.7 THz[J]. *Optics Communications*, 2019, 431: 255-260.
- [21] SONG Z Y, WEI M L, WANG Z S, et al. Terahertz absorber with reconfigurable bandwidth based on isotropic vanadium dioxide metasurfaces[J]. *IEEE Photonics*, 2019, 11(2): 4600607.

(下转第 390 页)

- and through-the-wall imaging[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(6): 3177-3192.
- [8] FU Q F, LIU L L, LUO G Q. A flexible millimeter-wave endfire antenna based on spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(1): 29-33.
- [9] XIAO M R, RASHID A K, LIU B Y, et al. Design of high-gain single-layer endfire antenna using phase-reversed asymmetric spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(3): 641-644.
- [10] PAN Y S, DONG Y D. Dual-polarized printed endfire antenna based on spoof surface plasmon polariton[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(5): 1129-1133.
- [11] LIAO Z, CHE Y Z, LUO G Q, et al. Enhanced radiation characteristics for Vivaldi antenna using spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(9): 2730-2736.
- [12] WANG H Z, ZHOU Y G, YANG H M, et al. High gain ultra-wideband Vivaldi antenna using spoofing surface plasmons polaritons [C]//Proceedings of International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium IEEE, 2022:1-3.
- [13] QI H H, LIU H W. Wideband high-gain filtering Vivaldi antenna design based on MS and herringbone SSPP structure[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(8): 1798-1802.
- [14] ZHOU W L, LIU J H, LONG Y L. A broadband and high gain planar complementary yagi array antenna with circular polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(3): 1446-1451.
- [15] ZU H R, WU B, ZHAO Y T, et al. Dual-band antenna with large beam steering angle incorporating endfire and frequency scanning modes using double-layer SSPPs structure[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(1): 46-55.
- [16] YANG L, XU F, JIANG T, et al. A wideband high-gain endfire antenna based on spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(12): 2522-2525.
- [17] AN G T, ZHU C H, ZHANG Y, et al. A wideband endfire antenna incorporating modified antipodal Vivaldi resonator and spoof surface plasmon polaritons[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(6): 1874-1878.
- [18] PHAM D A, LEE M, SARKAR A, et al. High-gain elevational-scanning multibeam planar SSPP antenna array with large ground-clearance for millimeter-wave UAM applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4): 5139-5149.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 381 页)

- [22] WANG R X, LI L, LIU J L, et al. Triple-band tunable perfect terahertz metamaterial absorber with liquid crystal[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32280-32289.
- [23] 王若星, 薛喻宸, 龚瑞, 等. 基于环形电磁超材料的可调谐太赫兹吸收器[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, 32(6): 14-20.
- [24] YAO H Y, YANG M S, YAN X, et al. Patterned graphene and terahertz metasurface-enabled multidimensional ultra-sensitive flexible biosensors and bio-assisted optical modulation amplification[J]. Results in Physics, 2022, 40: 105884.
- [25] CHO C R, CHO S I, VADIM S, et al. Current-induced metal-insulator transition in VOx thin film prepared by rapid-thermal-annealing [J]. Thin Solid Films, 2006, 495(1/2): 375-379.
- [26] 王昌雷, 武帅, 栗岩峰, 等. 二氧化钒薄膜光致绝缘体-金属相变的太赫兹时域光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(11): 3046-3049.
- [27] SONG Z Y, WEI M L, WANG Z S, et al. Terahertz absorber with reconfigurable bandwidth based on isotropic vanadium dioxide metasurfaces[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(2): 1-7.

(责任编辑:赵海军)