

激光与光电子学进展

基于二氧化钒的太赫兹超材料动态可调宽带吸收器

龚江, 宗容*, 李辉, 段韬

云南大学信息学院, 云南 昆明 650500

摘要 在硅平面上设计了一种基于二氧化钒(VO_2)超材料的可调谐太赫兹 (THz) 宽带吸收器, 该吸收器由 VO_2 谐振层和被 SiO_2 介质隔开的金属反射层组成。数值仿真结果表明, 具有高电导率 (30000 S/m) 的 VO_2 表现为金属相, 其吸收率大于 90% 时吸收带宽达到了 2 THz, 并且分别在 4.5 THz 和 5.8 THz 处实现了吸收率为 99.3% 和 99.6% 的完美吸收。具有低电导率 (100 S/m) 的 VO_2 则表现为绝缘相, 其在相应的宽频吸收带内的峰值吸收率仅为 8%。因此, 通过改变吸收器结构中 VO_2 材料的电导率, 可以实现宽频带内吸收率的动态调谐以及吸收和反射功能的切换。此外, 由于结构的对称性, 所提出的吸收器在垂直入射条件下具有偏振不敏感特性, 并且在入射角度范围内保持着良好的吸收性能。

关键词 材料; 超材料; 太赫兹; 可调谐吸收器; 二氧化钒

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0316001

Dynamically Tunable Broadband Terahertz Metamaterial Absorber Based on Vanadium Dioxide

Gong Jiang, Zong Rong*, Li Hui, Duan Tao

School of Information, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract In this paper, a vanadium dioxide (VO_2) based tunable broadband terahertz (THz) absorber is designed on the silicon plane, which is composed of a VO_2 resonator and a metal layer, separated by a thin silicon dioxide (SiO_2) dielectric layer. Numerical simulation results show that VO_2 with high conductivity (30000 S/m) is at its metal phase, and when its absorptivity is greater than 90%, the 2.0 THz absorption bandwidth can be obtained. In addition, the perfect absorption is realized with absorptivity of 99.3% and 99.6% at 4.5 THz and 5.8 THz, respectively. In contrast, VO_2 with low conductivity (100 S/m) is at its insulation phase, and the peak absorptivity in the corresponding broad absorption band is only 8%. Therefore, by altering the conductivity of VO_2 in the absorber, one can switch between absorption and reflection and realize the dynamic tuning of absorptivity in a broad frequency band. In addition, the proposed absorber is polarization-insensitive under vertical incidence due to its structural symmetry. Moreover, the absorber maintains an excellent absorption performance over a wide incident angle range.

Key words materials; metamaterial; terahertz; tunable absorber; vanadium dioxide

OCIS codes 160.3918; 010.1030; 300.6495; 040.2235

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-07-15; 录用日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61162004)

*E-mail: zongrong@ynu.edu.cn

1 引言

THz是频率位于微波和红外之间(0.1~10 THz)的电磁波。近年来 THz 技术得到了越来越多的关注^[1]。THz 超材料吸收器(Metamaterial Absorbers)是一种对入射电磁波有高效吸收率的器件,在红外探测^[2]、电磁隐身^[3]和传感^[4]等领域展现出了广阔的应用前景。基于电磁谐振器的超材料吸收器在2008年由Landy等^[5]提出。随后出现了各种不同类型的超材料吸收器,包括单频带^[6]、多频带^[7-9]和宽频带^[10]吸收器。但是,大部分吸收器都是金属-介质-金属结构,这种吸收器的尺寸和形状比较固定,其吸收性能无法根据需求进行动态调节,因此其应用范围受到限制。随着微机电系统(MEMS)^[11]、石墨烯^[12-14]、液晶(LC)^[15]和VO₂^[16-17]等材料的出现,THz超材料吸收器迅速发展起来。通过改变温度、光和电刺激,THz超材料吸收器的电导率和介电特性可以被稳定调节。2016年,Yao等^[18]提出了一种由周期性石墨烯椭圆盘构成的吸收器,通过调节石墨烯的费米能级,实现了双频带完美吸收峰的波长偏移。2017年,Wang等^[19]在液晶材料上设计了金属圆盘和金属椭圆盘相组合的结构,实现了三频带的完美吸收,通过调节液晶材料上的电压,可以实现吸收峰频率的改变。

VO₂是一种相变材料,当环境温度在67℃左右时,其电导率可以发生5个数量级的巨大突变(40~4×10⁵ S/m),同时发生绝缘态到金属态的可逆相变^[20],因此其常被运用到各种超材料中。2012年,Wen等^[21]提出了VO₂混合超材料吸收器,VO₂薄膜基于热触发发生了由绝缘体到金属的相变,阻抗匹配条件被破坏,并实现了约63.3%的深度调制。Liu等^[22]提出了一种基于VO₂亚波长结构的超宽带吸收器,可以在宽带范围内实现5%~80%吸

收率的调制。由于大多数的超宽带吸收器^[23-26]都是通过堆叠多层材料来实现宽带吸收效果的,而这种多层结构的吸收器在调制速度和结构复杂程度上会存在一些缺陷,因此宽带、超薄且动态可调吸收器的研究是一种可行的发展趋势。

基于超薄、宽带以及动态可调的特点,本文提出了一种具有单层VO₂结构的动态可调宽带吸收器,在4.25~6.25 THz的宽频带内实现了吸收率在90%以上的完美吸收性能。通过改变电导率,可实现该吸收器吸收率的主动调控。当电导率在100~30000 S/m之间改变时,能够在宽频吸收带内切换吸收器的吸收和反射属性。同时,该吸收器还具有极化不敏感以及宽范围入射角度不敏感的特性,这降低了吸收器在实际应用中的局限性。本文所提的超薄宽带可调谐吸收器为太赫兹和其他频段的宽带可调器件的研究提供了新的思路。

2 结构与方法

本文所提出的基于VO₂相变材料的太赫兹可调谐宽带吸收器的单元结构示意图如图1所示,其中周期 $p=50\mu\text{m}$ 。接地面是厚度(t_4)为4μm的Si材料,其上方厚度(t_3)为0.2μm的金是吸收器的反射层,中间由介电常数为3.75、厚度(t_2)为8μm的SiO₂介质层构成,顶部厚度(t_1)为2μm且具有开口“田”字形结构的VO₂是谐振层。图1中谐振结构的其余参数分别为 $l_1=43\mu\text{m}$, $l_2=37\mu\text{m}$,VO₂的宽度均为2μm。在THz频段范围内,VO₂的介电常数 $\epsilon(\omega)$ 可以由Drude模型^[27]表示为

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

式中:VO₂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VO₂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

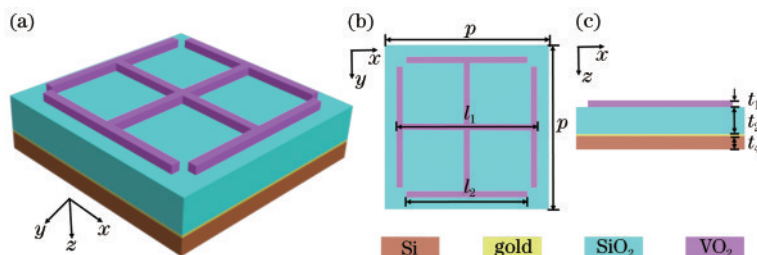


图1 吸收器的几何结构示意图。(a)周期性单元的三维立体图;(b)周期性单元的俯视图;(c)周期性单元的侧视图

Fig. 1 Geometric structure of absorber. (a) Three-dimensional view of periodic unit cell; (b) top view of periodic unit cell; (c) side view of periodic unit cell

为 $\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0)$, 其中 $\sigma_0 = 3 \times 10^3 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\omega_p(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{15} \text{ rad/s}$.

为了研究本文所提出的太赫兹超材料动态可调吸收器的光学特性, 利用商用仿真软件 CST Microwave Studio, 通过基于频域的有限元法 (FEM), 在 3.5~7.5 THz 频段内对吸收器进行了仿真。在仿真时, $z=0$ 的平面位于 Si 接地平面的底部, 平面电磁波沿 z 轴的负方向垂直入射到吸收器上, 入射波的电场沿 x 方向极化, 磁场沿 y 方向极化, 在 x 和 y 方向选择周期性边界条件, 在 z 方向选择开放性边界条件。根据 Zhang 等^[20] 对 VO₂ 相变性质的研究, 经过模拟仿真, 可以得出不同电导率下吸收器的吸收光谱。在本文的模型中, 吸收率可以表示为

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

式中: $A(\omega)$ 、 $R(\omega)$ 和 $T(\omega)$ 分别表示吸收率、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。由于结构中底层金属的存在, 电磁波被全部反射, 因此 $T(\omega)$ 始终为 0, (2) 式可以直接简化成 $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ 。

3 结果与讨论

当电磁波垂直入射时, 数值仿真得到的吸收和反射光谱分别如图 2(a)、(b) 所示。当 VO₂ 的电导率为 30000 S/m 时, 吸收率在 90% 以上的带宽达到了最大 (4.25~6.25 THz), 此结构适合作为高性能 THz 宽带吸收器结构, 且在 4.5 THz 和 5.8 THz 处达到了吸收率分别为 99.3% 和 99.6% 的完美吸收。当 VO₂ 的电导率变为 100 S/m 时, 其相应宽频带内的反射率可达到 92% 以上, 反射率为 8%, 此结构适合作为反射器结构。因此, 通过观察曲线变化的总体趋势, 可以看出, 当电导率为 100~30000 S/m 时, 吸收带内的吸收率和反射率可以得到精准控制。基于以上特性, 通过改变电导率, 可以动态调控器件的吸收和反射功能, 进而实现整个宽频带内吸收和反射功能的主动切换。

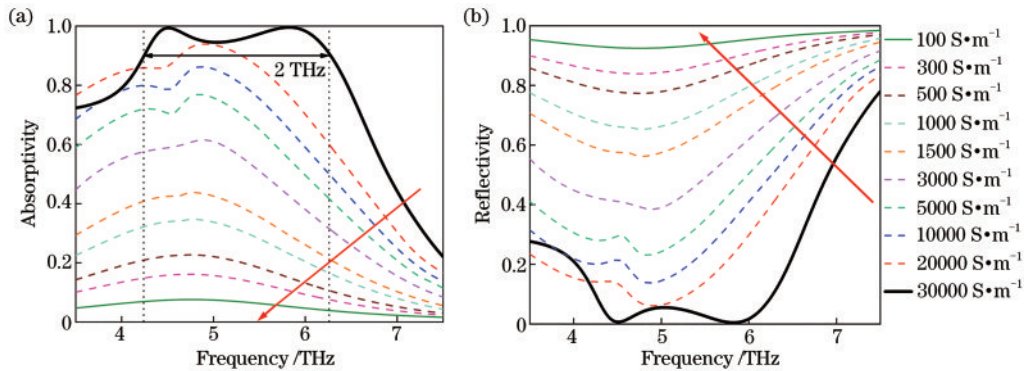


图 2 电磁波垂直入射时, 不同电导率下的数值结果。(a) 吸收光谱; (b) 反射光谱

Fig. 2 Numerical results under different conductivities when electromagnetic wave is vertically incident. (a) Absorption spectra; (b) reflection spectra

为了研究宽带吸收的物理来源, 引入了阻抗匹配理论。吸收器的相对阻抗的实部和虚部均可由 S 参数反演法导出, 可定义为

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

式中: Z_r 为吸收器的相对阻抗。

如图 3 所示, 当 VO₂ 处于金属相时, 在 4.25~6.25 THz 的宽频吸收带内, 结构的相对阻抗的实部接近于 1 而虚部接近于 0, 意味着此时吸收器的有效阻抗与自由空间的有效阻抗相匹配, 并且由于底层金属板的存在, 入射的太赫兹波被最大程度

地吸收, 从而实现了高吸收性能。相反, 当 VO₂ 处于绝缘相时, 结构的相对阻抗在对应的频率范围内的实部接近 0, 即结构的有效阻抗与自由空间的有效阻抗不在匹配, 从而实现了高反射和低吸收的性能。同时也意味着通过改变 VO₂ 电导率 (电导率和阻抗在数值上互为倒数关系), 可以改变结构的属性。

为了进一步研究电导率对吸收率影响的物理机理, 模拟了电导率分别为 100, 1000, 5000, 30000 S/m 时吸收带宽中心频率处的电场, 结果如图 4 所示。可以看到, 当电导率为 100 S/m 时, 谐振层上基本没有电场分布, 说明此时的 VO₂ 处于绝缘

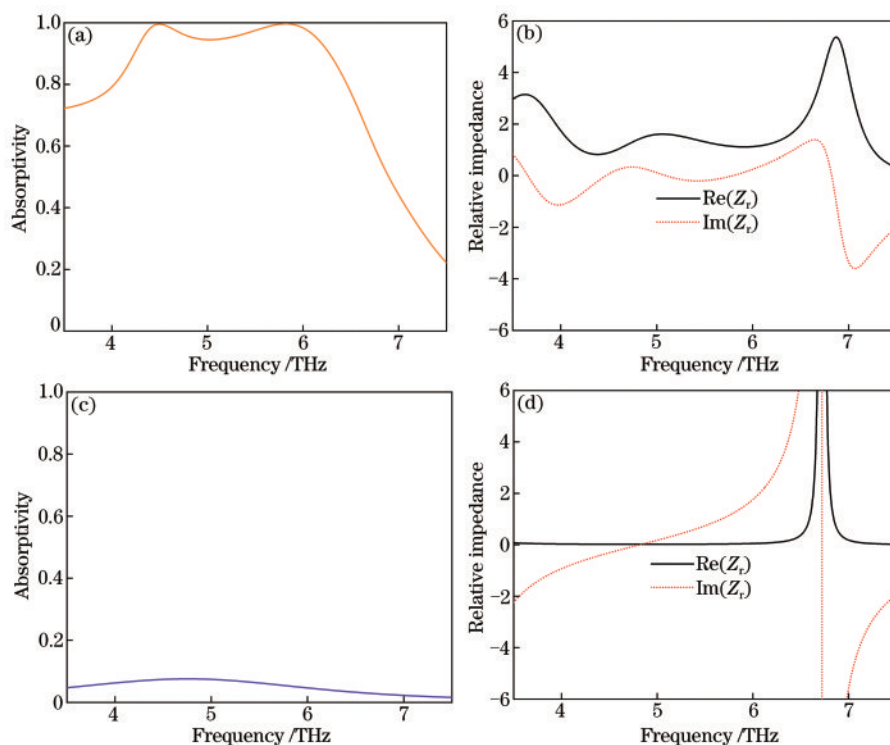


图 3 不同条件下吸收器的吸收率和相对阻抗。(a)(b)VO₂为金属相;(c)(d)VO₂为绝缘相

Fig. 3 Absorptivity and relative impedance of absorber under different conditions. (a) (b) VO₂ at metal phase; (c) (d) VO₂ at insulation phase

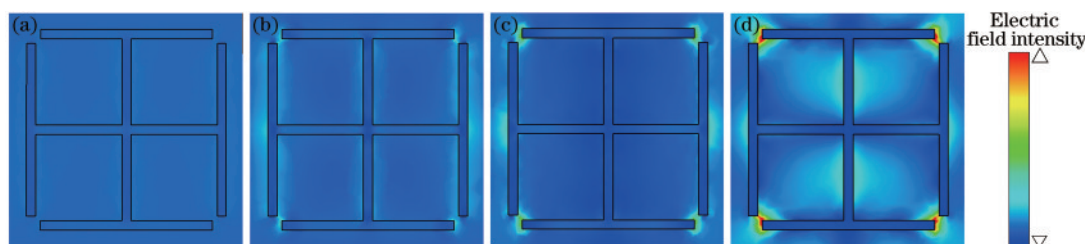


图 4 不同电导率下的电场图。(a)100 S/m;(b)1000 S/m;(c)5000 S/m;(d)30000 S/m

Fig. 4 Electric field diagrams at different conductivities. (a) 100 S·m⁻¹; (b) 1000 S·m⁻¹; (c) 5000 S·m⁻¹; (d) 30000 S·m⁻¹

相。这是由于电磁波入射到超材料结构中时,几乎可以完全穿透谐振层,而反射层和绝缘相的 VO₂对 THz 波几乎没有影响,因此出现了低的吸收率。当电导率较高时,由于 VO₂ 逐渐转变成金属特性,VO₂ 结构开口处的电场逐渐增强,因此谐振层和反射层对 THz 波的影响增强^[27],并最终实现了吸收率的提高。由于 VO₂ 材料对温度的变化非常敏感^[20],因此可通过改变温度来间接控制 VO₂ 的电导率,最终实现本文所提出的宽带吸收器动态调控的效果,而这一特点在金属结构的吸收器中是无法实现的。同时,本文所提出的基于相变材料 VO₂ 的宽带吸收器还可以实现吸收和反射功能的主动切换,为多功能的 THz 器件提供了研究思路。

通过以上分析可以发现,吸收器谐振层的电场主要集中在四个“开口”处。因此,当改变开口大小时,吸收器的电场会发生变化,进而影响吸收器的吸收率。当参数 l_2 的大小发生变化时,模拟了不同电导率下结构所对应的吸收光谱,结果如图 5 所示。当电导率为 30000 S/m 时,随着 l_2 的减小,结构的“开口”逐渐变大,但宽带吸收器的吸收率呈现出整体下降的趋势。这是由于“开口”变大后,该处的电场强度逐渐降低,吸收器对入射 THz 波的耦合响应减弱。但是,当电导率为 100 S/m 时,VO₂ 处于绝缘相,谐振层几乎没有电场分布,此时开口的大小对吸收率几乎没有影响。

极化角度不敏感和入射角度不敏感性是吸收

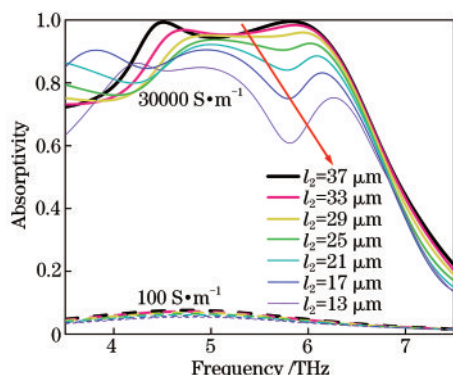


图 5 吸收器的电导率分别为 100 S/m 和 30000 S/m 时, 开口大小对吸收器的影响

Fig. 5 Influence of opening size on absorber when absorptivity is $100 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ and $30000 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, respectively

器十分重要的特性,可降低其在实际中的局限性。当入射的 THz 波垂直入射到器件表面时,不同极化角度下吸收器的吸收光谱如图 6(a) 所示。可以看到,当 THz 波的极化角度由 0° 变化到 90° 时,所提出

的宽带吸收器的吸收曲线是高度重合的。极化角度不敏感性与超材料单元结构在 x 和 y 方向上的对称性有着很大的关系^[28],这是结构具有极化不敏感特性的内在原因。图 6(b)、(c) 中分别显示了在横电 (TE) 偏振和横磁 (TM) 偏振下太赫兹波斜入射时的吸收光谱图。对于 TE 偏振模式而言,随着入射角度的不断增大,宽带吸收器的吸收带宽逐渐变窄,但是在入射角度小于 50° 的范围内,其吸收率大于 90% 的带宽仍保持在 $4.7\sim 6.3 \text{ THz}$ 的宽频范围内。随着入射角度的进一步增大,中心频率处的峰值吸收率出现了低于 90% 的情况。对于 TM 偏振模式,随着入射角度的不断增大,宽带吸收器的带宽逐渐变宽,而吸收率出现了下降的趋势。当入射角度在 62° 以内时,宽带吸收器的峰值吸收率仍能保持在 90% 以上,当继续增加入射角度时,吸收率将逐渐减小。因此,可以得出,所提出的吸收器在 50° 的宽入射角度范围内对 TE 和 TM 波均可以保持良好的吸收性能。

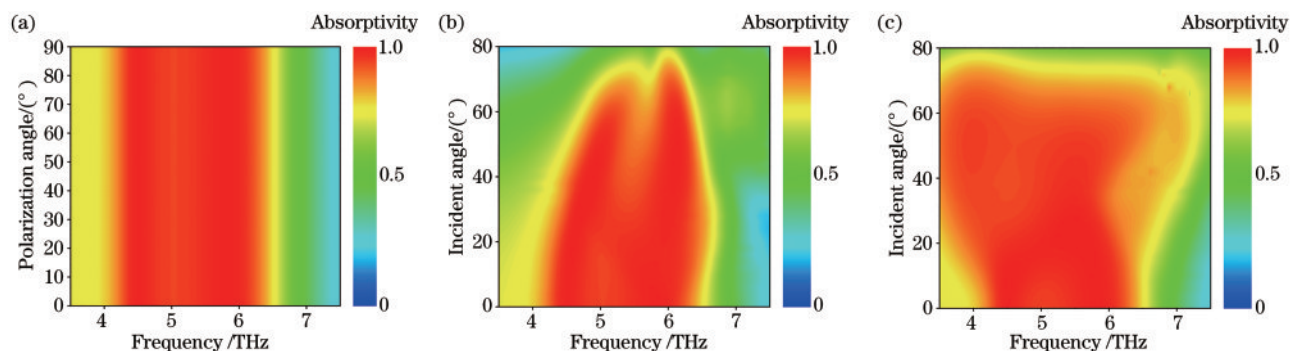


图 6 不同条件下的吸收光谱。(a) 不同极化角度; (b) TE 波, 不同入射角; (c) TM 波, 不同入射角

Fig. 6 Absorption spectra under different conditions. (a) Different polarization angles; (b) TE wave, different incident angles; (c) TM wave, different incident angles

4 结 论

提出了一种基于二氧化钽的太赫兹超材料动态可调宽带吸收器结构。数值仿真结果表明,当电导率控制为 30000 S/m 时,结构吸收率大于 90% 的吸收带宽可达 2 THz,并分别在 4.5 THz 和 5.8 THz 处实现了吸收率为 99.3% 和 99.6% 的完美吸收。当电导率控制为 100 S/m 时,相应宽频带内结构的反射率达到了 92% 以上,可认为此时结构处于反射状态。因此,随着电导率的变化,吸收器的吸收率和反射率是动态可调的,所提出的结构在吸收和反射功能之间可实现主动切换。此外,由于结构上的对称性,吸收器在 THz 波垂直入射时具有

极化不敏感的特性。当 THz 波斜入射时,该吸收器在 50° 的入射角度范围内对 TE 和 TM 波保持良好的吸收性能。这些优良的特性使得所提出的结构能广泛应用到光电开关、电磁隐身和成像等方面。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Ryzhii V, Otsuji T, Ryzhii M, et al. Graphene terahertz uncooled bolometers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(6): 065102.
- [3] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801): 977-980.

- [4] Wang Y, Cui Z J, Zhu D Y, et al. Multiband terahertz absorber and selective sensing performance [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14133.
- [5] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [6] 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.
- [7] Meng Q L, Zhang Y, Zhang B, et al. Characteristics of optically tunable multi-band terahertz metamaterial absorber [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 101603.
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.
- [8] 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): 1-7.
- [10] 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.
- [11] Alves F, Grbovic D, Kearney B, et al. Microelectromechanical systems bimaterial terahertz sensor with integrated metamaterial absorber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 1886-1888.
- [12] Yuan Y H, Chen X Y, Hu F R, et al. Terahertz amplitude modulator based on metasurface/ion-gel/graphene hybrid structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614016.
袁莹辉, 陈懿宇, 胡放荣, 等. 基于人工超表面/离子凝胶/石墨烯复合结构的太赫兹调幅器件[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614016.
- [13] Wu J J, Zhao H X, Gao J X. Enhancing light absorption of graphene using magneto-optical photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0403003.
武继江, 赵浩旭, 高金霞. 基于磁光光子晶体的石墨烯光吸收增强[J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0403003.
- [14] Weis P, Garcia-Pomar J L, Rahm M. Towards loss compensated and lasing terahertz metamaterials based on optically pumped graphene [J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8473-8489.
- [15] Wu Y, Ruan X Z, Chen C H, et al. Graphene/liquid crystal based terahertz phase shifters [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21395-21402.
- [16] Park J T, Oh I H, Lee E, et al. Structure and magnetism in VO₂ nanorods [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(15): 153112.
- [17] Qin Y, Li Y, Fang B Y, et al. Fabrication and optical properties of vanadium dioxide thin films doped by tungsten-vanadium Co-sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1231002.
覃源, 李毅, 方宝英, 等. 钨钒共溅掺杂二氧化钒薄膜的制备及其光学特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1231002.
- [18] Yao G, Ling F R, Yue J, et al. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1518-1527.
- [19] 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.
- [20] Zhang K, Zhang L, Duan D, et al. Wide band terahertz switch of undulated waveguide with VO₂ film coated inner wall [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4401-4407.
- [21] Wen Q Y, Zhang H W, Yang Q H, et al. A tunable hybrid metamaterial absorber based on vanadium oxide films [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(23): 235106.
- [22] Liu H, Wang Z H, Li L, et al. Vanadium dioxide-assisted broadband tunable terahertz metamaterial absorber [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5751.
- [23] Chen Y F, Xue W R, Zhao C, et al. Grating-type mid-infrared absorber based on hexagonal boron nitride material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1005001.
陈岳飞, 薛文瑞, 赵晨, 等. 基于六方氮化硼材料的光栅型中红外线吸收器[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1005001.
- [24] Chen X, Xue W R, Zhao C, et al. Ultra-broadband infrared absorber based on LiF and NaF [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0123002.
陈曦, 薛文瑞, 赵晨, 等. 基于 LiF 和 NaF 的超宽带红外吸收器[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0123002.
- [25] Kong X R, Dao R N, Zhang H F. A tunable double-decker ultra-broadband THz absorber based on a phase change material [J]. *Plasmonics*, 2019, 14(5): 1233-1241.
- [26] Dao R N, Kong X R, Zhang H F, et al. A tunable broadband terahertz metamaterial absorber based on

- the vanadium dioxide[J]. *Optik*, 2019, 180: 619-625.
- [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.
- [28] 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.