

光学学报

窄/宽带可切换的石墨烯-二氧化钒复合结构 太赫兹吸波器

黄成成¹, 张永刚^{1*}, 梁兰菊^{2**}, 姚海云², 刘文嘉¹, 邱福¹

¹安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;

²枣庄学院光电工程学院, 山东 枣庄 277160

摘要 提出一种动态可调谐的窄/宽带可切换的太赫兹吸波器, 它由可调谐材料石墨烯和二氧化钒(VO_2)、金和环烯烃类共聚物构成。通过热控 VO_2 产生相变, 吸波器可以在宽带和窄带间切换, 其开关幅度达到 98.9%。当 VO_2 为金属相时, 该吸波器具有很宽的吸收带宽, 通过进一步改变石墨烯的费米能级可以调节吸波器的带宽。该吸波器还呈现出对横电 (TE) 和横磁 (TM) 波都具有广角吸收的特点。当 VO_2 处于绝缘相时, 该器件切换为窄带吸波器, 可用于传感器, 其灵敏度可达 439 GHz/RIU。该太赫兹吸波器在调制、传感和电磁隐身等多功能器件方面有很多潜在的应用价值。

关键词 材料; 太赫兹吸波器; 石墨烯; 二氧化钒; 窄/宽带切换; 动态调谐

中图分类号 TB34

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1916001

Narrow/Broad Band Switchable Terahertz Absorber Based on Graphene and Vanadium Dioxide Composite Structure

Huang Chengcheng¹, Zhang Yonggang^{1*}, Liang Lanju^{2**}, Yao Haiyun², Liu Wenjia¹, Qiu Fu¹

¹School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China;

²School of Opto-Electronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, Shandong, China

Abstract This paper presents a dynamically tunable narrow/broad band switchable THz absorber. The absorber is composed of tunable materials, i. e., graphene and VO_2 , and gold and cycloolefin copolymers. When VO_2 is thermally induced to achieve insulator-to-metal transition, the absorber switches between broad bands and narrow bands. Its switching amplitude can reach 98.9%. When VO_2 is in metallic phase, the absorber has a wide absorption bandwidth. At that time, the bandwidth of the absorber can be adjusted by changing the Fermi level of graphene. The absorber also has characteristic of wide-angle absorption for transverse electric (TE) and transverse magnetic (TM) waves. When VO_2 is in insulating state, the device switches to a narrowband absorber with a sensitivity of 439 GHz/RIU, which can be used in sensor. The THz absorber has many potential applications in multi-functional devices such as modulation, sensing, and electromagnetic cloaking.

Key words materials; terahertz absorber; graphene; vanadium dioxide; narrow/wide band switching; dynamic tuning

1 引言

超材料是利用现有材料进行人工设计的周期性结构, 具有天然材料不具备的许多特性, 如负折射率^[1]、完美吸收^[2]、手性超材料^[3]和超透镜^[4]特性等。自 2008

年 Landy 等^[5]提出基于超材料的完美吸波器的概念以来, 有大量的后续研究, 如关于多频段、宽频带等各种特性的吸波器的研究。但此类吸波器功能单一, 在实际应用中有一定的限制。因此设计出工作频率可调或集多功能于一体的吸波器成为新的应用需求。

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-03-15; 录用日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(61701434, 61735010, 61675147)、国家重点研发计划(2017YFB1401203, 2017YFA0700202)、山东省自然科学基金(ZR2020FK008, ZR202102180769)、山东省青创团队科技计划团队(2019KJN001)、安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2021-YF61)、泰山学者青年专家(tsqn201909150)、安徽理工大学研究生创新基金(2021CX2067)

通信作者: *ygzhang2000@163.com; **lianglanju123@163.com

目前,陆续出现了石墨烯^[6]、二氧化钒(VO₂)^[7]和钙钛矿^[8]等可通过光、电和热进行调谐的材料,这些材料为设计可调谐的太赫兹多功能吸波器提供了新的思路。VO₂是一种可逆相变材料,常温下它为绝缘相,当温度达到 67°后转变为金属相^[9]。石墨烯是一种单层碳原子堆积而成的二维蜂窝状材料,它具有独特的电、机械及热性能,可以通过化学掺杂或施加偏置激励电压的方法调节石墨烯的费米能级,实现对吸波器的调谐,被认为是实现可调吸波器的完美选择^[10]。目前,很多研究人员已经利用石墨烯或 VO₂做了许多相关工作。2021 年, Liu 等^[11]利用 VO₂ 和石墨烯设计了可以在两个宽带之间互相转换的吸波器,2021 年 Wu 等^[7]利用 VO₂ 设计了吸收开关幅度达到 96% 的吸波器。

宽带吸波器在电磁隐身等方面有很好的应用前景,而窄带吸波器在生物传感、光电探测等方面有很好的应用。本文基于石墨烯和 VO₂ 两种可调谐材料设计了一种可以在宽带和窄带之间进行切换并能对带宽进行进一步调谐的太赫兹吸波器。该吸波器实现宽带和窄带之间转换的开关幅度可以达到 98.9%。在 VO₂

为金属相且石墨烯费米能级为 1 eV 时,该吸波器能够实现 0.82~4.6 THz 的宽带吸收,通过调节石墨烯的费米能级还可以对吸波器的吸收带宽进行调节。当 VO₂ 为绝缘相且石墨烯费米能级为 1 eV 时,吸波器仅有一个窄带的吸收峰,计算得到该窄带吸波器的灵敏度为 439 GHz/RIU。本文设计的多功能吸波器有宽带和窄带之间可转换、吸收带宽可调谐等特点。该吸波器在调制、传感和电磁隐身等多功能器件方面有很多潜在的应用价值。

2 结构与方法

图 1 为 VO₂-石墨烯构成的滤波器单元结构示意图。其最上层是具有方环间隙的单层石墨烯结构,中间层是无损的环烯炔类共聚物(ToPaS),其相对介电常数 $\epsilon=2.35$ 。两层 ToPaS 介质中间为一层 VO₂ 膜^[12]。单元结构的底层衬底是厚度为 200 nm 的金膜^[13]。该太赫兹吸波器单元结构的几何尺寸如下: $P=60 \mu\text{m}$, $L=40 \mu\text{m}$, $S=3 \mu\text{m}$, $W=50 \mu\text{m}$, $W_1=7.5 \mu\text{m}$, $W_2=5 \mu\text{m}$, $T_1=0.2 \mu\text{m}$, $T_2=19 \mu\text{m}$, $T_3=0.06 \mu\text{m}$, $T_4=17 \mu\text{m}$ 。

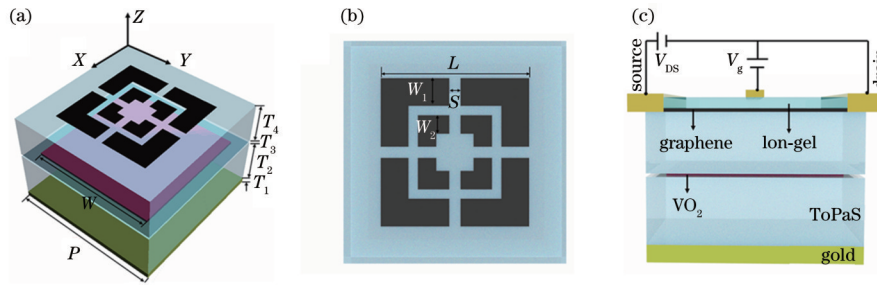


图 1 吸波器单元结构示意图。(a)结构侧视图;(b)结构俯视图;(c)对石墨烯加电压的示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of absorber unit cell. (a) Side view of unit cell; (b) top view of unit cell; (c) schematic of applying voltage to graphene

VO₂是热控系统的理想材料,温度的变化可以使其由绝缘相到金属相进行可逆变化。在绝缘相时,VO₂对 6.7 THz 以下的电磁波高度透明^[11]。金属相的 VO₂ 可以通过加热或者加电的方法获得,VO₂ 的电导率变化可以达到 5 个数量级。本文将金属相的 VO₂ 的电导率设为 $2 \times 10^5 \text{ S/m}$, 将绝缘相的 VO₂ 的电导率设为 0 S/m ^[11]。VO₂ 在太赫兹波段的性质可以用 Drude 模型导出^[14-15], 即

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

式中: $\epsilon(\omega)$ 为 VO₂ 的介电常数; 高频介电常数 $\epsilon_\infty=12$; 碰撞频率 $\gamma=5.75 \times 10^{13} \text{ rad/s}$; σ 为 VO₂ 材料的电导率; $\omega_p(\sigma)$ 为等离子体频率, $\omega_p^2(\sigma) = \frac{\sigma}{\sigma_0} \omega_p^2(\sigma_0)$, 其中 $\sigma_0=3 \times 10^5 \text{ S/m}$, $\omega_p(\sigma_0)=1.4 \times 10^{15} \text{ rad/s}$; ω 为入射电磁波的角频率。

石墨烯的表面电导率可以用 Kubo 公式^[16-18]描述:

$$\sigma_g(\omega, \tau, \mu_c) = \sigma_{\text{intra}}(\omega, \tau, \mu_c) + \sigma_{\text{inter}}(\omega, \tau, \mu_c), \quad (2)$$

式中: τ 为弛豫时间; μ_c 为化学势能; $\sigma_{\text{inter}}(\omega, \tau, \mu_c)$ 和 $\sigma_{\text{intra}}(\omega, \tau, \mu_c)$ 分别为带内作用和带间作用, 可分别定义为

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega, \tau, \mu_c) \approx \frac{je^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - (\omega + j/\tau)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega + j/\tau)\hbar} \right], \quad (3)$$

$\sigma_{\text{intra}}(\omega, \tau, \mu_c) \approx$

$$j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + j\tau^{-1})} \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp \left(-\frac{\mu_c}{k_B T} \right) + 1 \right] \right\}, \quad (4)$$

式中: k_B 是玻尔兹曼常数; \hbar 是简化的普朗克常数; T 是开尔文中的温度。石墨烯的动态电导率可以通过调节 μ_c 来实现, 其 μ_c ^[19-20] 的定义为

$$\mu_c = \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_d V_g}{et}}, \quad (5)$$

式中: v_f 代表费米速度; t 代表正极和负极之间的距离; ϵ_0 为真空介电常数; $\epsilon_d=1.43$ 为离子胶(lon-gel)的介电常数。通过调节外部施加的偏置电压来实现对石墨烯费米能级的调节。图 2 给出了不同费米能级下的石墨

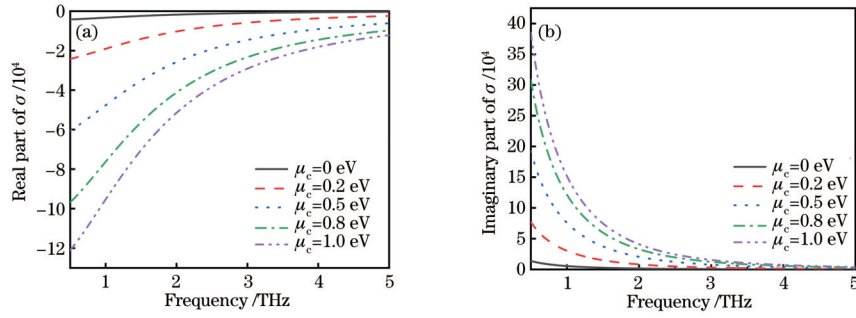


图 2 不同费米能级下石墨烯电导率的变化。(a)电导率实部;(b)电导率虚部

Fig. 2 Conductivity of graphene at different Fermi levels. (a) Real part of conductivity; (b) imaginary part of conductivity

烯电导率随频率的变化情况。

本文采用了有限元法对该太赫兹吸波器的吸波特性和进行了数值模拟。计算中, X 和 Y 方向采用周期性的单元边界条件(unit cell), Z 方向选择了开放性边界条件(add space)。吸波器的吸收率 $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$, 其中, S_{11} 和 S_{21} 分别为吸波器的反射系数和透射系数。由于衬底金膜的厚度(200 nm)大于太赫兹波的趋肤深度, 所以可以设吸波器的透射系数为 0。因此, 吸波器的吸收系数表达式为 $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$ 。

3 结果与讨论

根据 Drude 模型, VO_2 的电导率在相变的过程中, 介电常数会发生极大的变化, 而且石墨烯的表面电导率也会在不同的费米能级下发生很大的变化, 因此可以利用这两种材料的电导率可变的特点, 对吸波器的吸波频率进行调谐。当石墨烯的费米能级为 1 eV, VO_2 为金属相和绝缘相的吸收光谱如图 3 所示。可以看出, 当 VO_2 为金属相时, 从 0.82 THz 到 4.6 THz 吸波器的吸收效果达到了 90% 以上, 其相对带宽达到了 139.4%。当 VO_2 为绝缘相时, 只在 1.83 THz 有一个带宽较窄的吸收峰。以上特征说明该器件具有在宽带和窄带之间进行转换的特点。

这里运用阻抗匹配理论来进一步说明吸波器的原理。吸波器的相对阻抗^[21]可以表示为

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 + S_{21}^2}}, \quad (6)$$

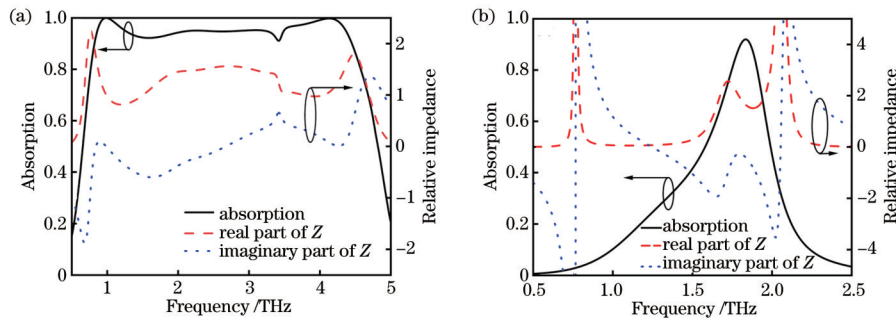


图 4 不同 VO_2 状态下吸波器的吸收光谱及相对阻抗。(a)金属相;(b)绝缘相

Fig. 4 Absorption spectra and relative impedance of absorbers under different VO_2 states. (a) Metallic state; (b) insulating state

式中: μ 代表磁导率; ϵ 代表介电常数。

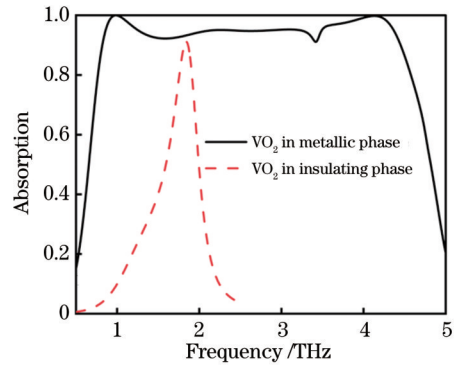


图 3 模拟得到的不同 VO_2 状态下吸波器的吸收光谱

Fig. 3 Simulated absorption spectra of absorber under different VO_2 states

图 4 给出了根据 S_{11} 和 S_{21} 计算出的吸波器相对阻抗的实部和虚部。可以看出, 无论 VO_2 为金属相还是绝缘相, 只要器件处于吸收工作状态, 其相对阻抗实部都近似等于 1, 而虚部接近于 0。当吸波器的等效磁导率和等效介电常数与自由空间相匹配时, 结构的反射系数为 0。这表明此时吸波器与自由空间实现阻抗匹配, 从而使入射的电磁波能量最大程度地进入结构内部, 并且在结构内部消耗掉。

计算了 VO_2 为金属相(频率分别为 0.99, 3.42, 4.14 THz)和绝缘相(频率为 1.83 THz)时 4 个频率点的结构表面电流和磁场分布, 如图 5 所示。图 5 中的第

一系列[图 5(a)、(e)、(i)、(m)]是石墨烯在 4 个频率点的电流分布;第二列[图 5(b)、(f)、(j)、(n)]是 VO_2 在 4 个频率点的电流分布;第三列[图 5(e)、(g)、(k)、(o)]是结构的金属衬底在 4 个频率点的电流分布;第四列[图 5(d)、(h)、(l)、(p)]是结构顶层石墨烯结构上方空气在 4 个频率点的磁场分布。

图 5(a)~(d)中 VO_2 为金属相时,石墨烯层和 VO_2 上的电流同向,石墨烯与 VO_2 上的电流和金属衬底上的电流相反,形成磁谐振。由图 5(d)可以看出 VO_2 和金属衬底之间的磁场较强,说明窄带吸波是由结构的磁谐振形成的。由图 5(e)~(l)可以看出,频

率为 3.42 THz 和 4.14 THz 处的电流主要分布在石墨烯层和衬底金属膜上, VO_2 上电流较弱。由于石墨烯和金属衬底的电流方向相反,此时吸收器以石墨烯和金属底面产生的磁谐振为主。在上述 3 个频率点上,结构上电流分布和磁场分布比较弱,形成宽带的吸波效果。

图 5(m)~(o)中 VO_2 为绝缘相时, VO_2 层的电流较弱,石墨烯层和金属衬底之间电流反向,也形成磁谐振。由图 5(m)可以看出石墨烯层电流最强,由图 5(p)可以看出磁场最强,所以此时磁谐振很强,形成一个窄带的谐振峰。

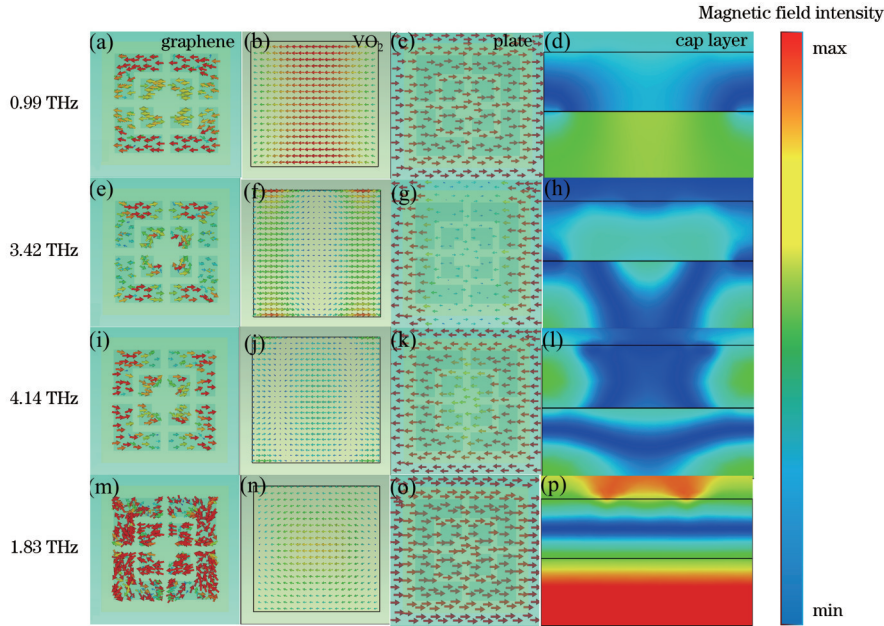


图 5 结构表面电流分布和 YOZ 面磁场分布。(a)(e)(i)(m)石墨烯在 4 个频率点的电流分布;(b)(f)(j)(n) VO_2 在 4 个频率点的电流分布;(c)(g)(k)(o)结构的金属衬底在 4 个频率点的电流分布;(d)(h)(l)(p)结构顶层石墨烯结构上方空气在 4 个频率点的磁场分布

Fig. 5 Distributions of surface current and magnetic field of YOZ plane. (a)(e)(i)(m) Current distributions of graphene at four frequency points; (b)(f)(j)(n) current distributions of VO_2 at four frequency points; (c)(g)(k)(o) current distributions of metal substrate of structure at four frequency points; (d)(h)(l)(p) magnetic field distributions of air above graphene structure at four frequency points

石墨烯的表面电导率在不同的费米能级下有不同的值,可以利用这种特性对吸波器带宽进行调谐。图 6 给出了吸波器随费米能级和 VO_2 电导率变化时的吸收谱。从图 6(a)可以看出,随着石墨烯费米能级 E_f 的增加,吸波器的相对带宽也随之增加。计算了不同费米能级下吸波器的吸波特性,如表 1 所示,可以看出吸波器的相对带宽由 131.6% 增加到 139.4%。图 6(b)给出了吸波器的吸收幅度随着 VO_2 电导率调节的变化情况。当 VO_2 的电导率由 0 S/m 变为 2×10^5 S/m,吸收峰强度由 0.01 增大到 1.0。图 6(c)给出了同时改变 VO_2 电导率和石墨烯费米能级的吸收光谱,从图中看到其吸收开关幅度达到 98.8%,这说明该吸波器能够在窄带和宽带之间快速地进行切换。

对偏振不敏感并具有广角吸收特点的吸波器才具有广阔的应用前景。分析了不同偏振和不同入射角下吸波器的吸波性能,如图 7 和图 8 所示。由于吸波器的

结构是对称的,从图 7 可以看到:随着偏振角 φ 的增加,该吸波器的吸收特性几乎没有改变。图 8 给出了 TE 和 TM 两种极化模式斜入射时的吸收光谱。在 TE 波入射时,当入射角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 之间变化时,该吸收带宽略微增加,但在 60° 带宽开始减小。在 TM 波入射时,入射角在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 之间变化时,都具有很宽的吸收谱。

通过吸波器内部磁场分布来分析不同极化波以及不同入射角的吸波性能。吸波器的工作原理是把电磁场能量束缚在底层金属衬底和表面结构之间并最终使其损耗在介质中,从而减少反射。图 8(c)给出了频率为 0.99 THz 时 TE 波和 TM 波在不同入射角下 YOZ 面的磁场分布。在 TE 波入射时,随着入射角的增加,可以看出:当入射角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的范围内,介质内部都分布着较强的磁场;当入射角增加到 70° 后,磁场分布开始减弱,这是因为磁场切向分量随着入射角的增加

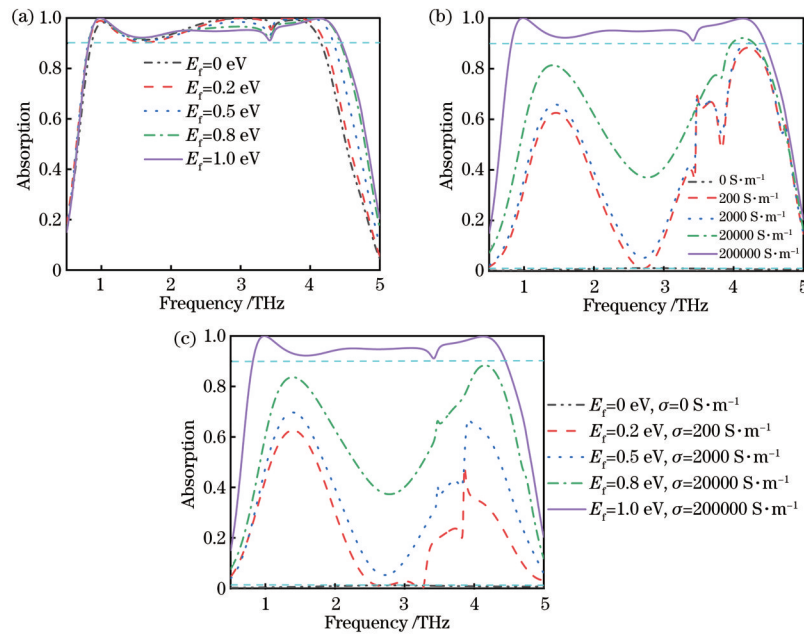


图 6 吸波器在石墨烯不同费米能级和 VO₂ 不同电导率下的吸收光谱。(a) 石墨烯在不同费米能级下的吸收光谱; (b) VO₂ 在不同电导率下的吸收光谱; (c) 同时改变 VO₂ 的电导率和石墨烯的费米能级的吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectra of absorber under different Fermi levels of graphene and different conductivity of VO₂. (a) Absorption spectra under different Fermi levels of graphene; (b) absorption spectra under different conductivities of VO₂; (c) absorption spectra for varying both conductivity of VO₂ and Fermi levels of graphene

表 1 不同费米能级下吸波器的吸波特性和

Table 1 Absorption characteristics of absorber under different Fermi levels

E_f / eV	Absorption	Absorption band / THz	Relative bandwidth / %
0	0.9	3.298 (0.858-4.156)	131.6
0.2	0.9	3.388 (0.821-4.209)	134.7
0.5	0.9	3.528 (0.810-4.338)	137.1
0.8	0.9	3.616 (0.817-4.433)	137.8
1.0	0.9	3.779 (0.821-4.600)	139.4

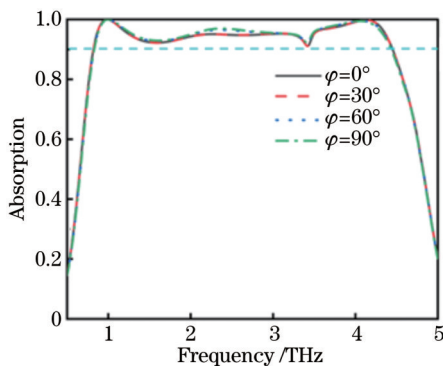


图 7 不同偏振角时吸波器的吸收光谱

Fig. 7 Absorption spectra of absorber with different polarization angles

而减小,束缚在内部介质中的电磁场能量及其损耗也随之减少,吸波效果减弱。在 TM 波入射时,可以看

出:入射角为 50° 时吸波器介质内部的磁场分布仍然较强,入射角为 70° 左右时减弱。同样地,介质内部电磁场分布及其能量损耗也随之减少,导致吸波效果减弱。总之,无论是 TE 波还是 TM 波,该吸波器都能保持良好的吸收特性。

窄带吸波器的一个典型应用是传感器。为了研究该吸波器在 VO₂ 为绝缘相时的传感性能,将厚度为 6 μm 的不同折射率的待测物覆盖在吸波器表面,对吸收特性曲线进行分析。图 9(a) 中,当待测物的折射率由 1.0 变化到 1.9 时,其吸收光谱出现明显的红移。灵敏度 S 和高灵敏值 F_{FOM} 是评价传感器性能的重要参数^[22-23],定义 $S = \Delta f / \Delta n$, $F_{\text{FOM}} = S / W_{\text{FWHM}}$,其中 Δf 表示频率的变化, Δn 表示折射率的变化, W_{FWHM} 表示半峰全宽。由图 9(b) 可得到该太赫兹吸波器的灵敏度为 439 GHz/RIU, $F_{\text{FOM}} = 0.98$ 。这说明该吸波器在传感方面有较好的性能。

表 2 给出了该吸波器与最近报道的吸波器之间关键的性能比较。在吸收率大于 0.9 时,本文设计的吸波器的相对带宽远大于之前所提出的各种吸波器。

4 结 论

提出了基于石墨烯和 VO₂ 的宽/窄带可切换的且其宽带可动态可调的太赫兹吸波器。当 VO₂ 处于金属相、石墨烯的费米能级为 1 eV 时,其吸波频率为 0.821~4.600 THz,其相对带宽为 139.4%,最大吸收率为 1.0,同时可以通过调节石墨烯的费米能级对吸波的带宽进行调节。石墨烯的费米能级由 0 eV 变化到 1.0 eV 时,其相对带宽由 131.6% 变为 139.4%。

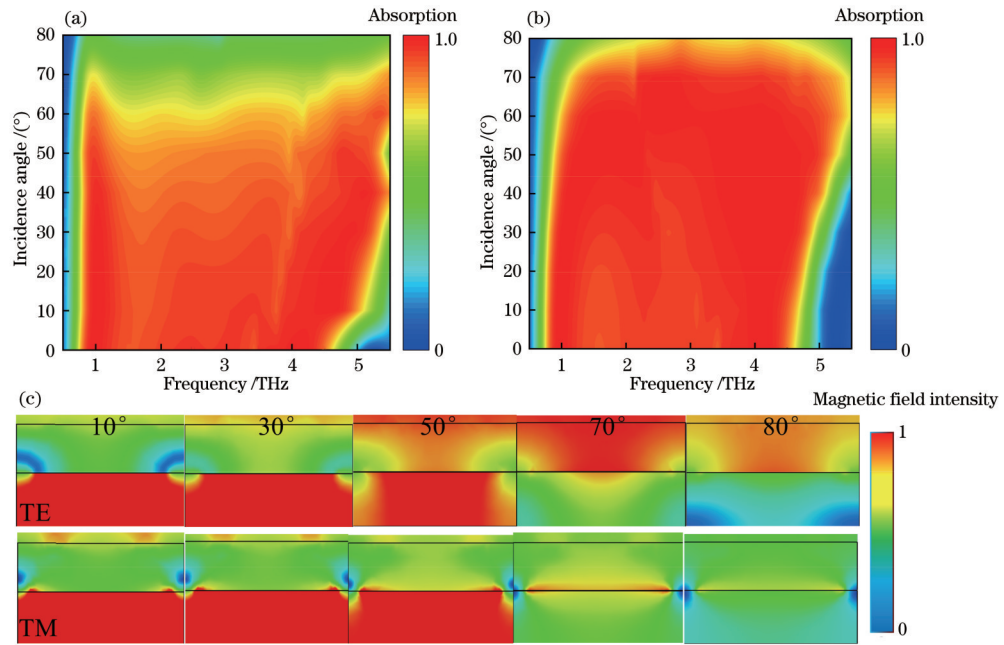


图 8 不同入射角下吸波器的吸收光谱,以及 0.99 THz 时不同极化模式和不同入射角的 YOZ 面磁场分布。(a) TE 极化时的吸收光谱;(b) TM 极化时的吸收光谱;(c) 0.99 THz 时不同极化模式和不同入射角的 YOZ 面磁场分布
 Fig. 8 Absorption spectra of absorber at different incident angles, and distributions of magnetic field on YOZ plane with different polarization modes and different incident angles at frequency of 0.99 THz. (a) Absorption spectrum for TE polarization; (b) absorption spectrum for TM polarization; (c) distributions of magnetic field on YOZ plane with different polarization modes and different incident angles at frequency of 0.99 THz

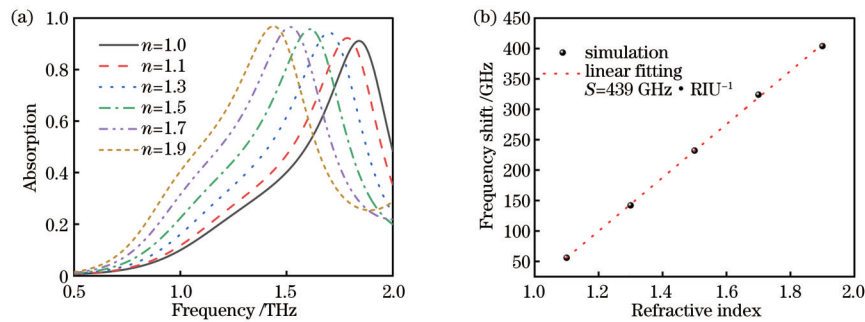


图 9 不同折射率待测物的吸收特性曲线和吸波器的灵敏度。(a)不同折射率待测物的吸收特性曲线;(b) 吸波器的灵敏度
 Fig. 9 Absorption characteristics for different refractive indices of object to be measured and absorber sensitivity; (a) Absorption characteristics for different refractive indices of object to be measured; (b) absorber sensitivity

表 2 不同吸波器间的性能比较

Table 2 Performance comparison between different absorbers

Ref. No	Absorption	Absorption band /THz	Relative bandwidth /%	Adjusting range /%
[7]	0.9	3.3 (2.34-5.64)	82.7	4-100
[24]	0.9	2.6 (2.12-4.72)	76	—
[25]	0.9	0.55 (1.05-1.6)	41.5	26-99.2
[26]	0.9	1.25 (4.32-5.57)	25.3	15-96
[27]	0.9	2.01 (1.44-3.45)	82.2	3.4-100
[28]	0.9	3.43 (0.93-4.36)	129.7	8-100
This paper	0.9	3.779 (0.821-4.6)	139.4	1.1-100

还可以利用 VO₂ 对吸收幅度进行调节,调制范围为 1.1%~100%。当 VO₂ 为绝缘相时,该吸波器呈现为窄带吸波效果,在 1.84 THz 处有一个 0.91 的吸收峰,

将其作为传感器时灵敏度可达到 439 GHz/RIU。该吸波器还有对偏振不敏感、大入射角的优点,在可调传感器、调制器和光学隐身等方面具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Yoo S, Lee S, Park Q H. Loss-free negative-index metamaterials using forward light scattering in dielectric meta-atoms[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(4): 1370-1374.
- [2] Rhee J Y, Yoo Y J, Kim K W, et al. Metamaterial-based perfect absorbers[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2014, 28(13): 1541-1580.
- [3] Han C R, Yang L C, Ye P, et al. Three dimensional chiral plasmon rulers based on silver nanorod trimers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10315-10325.
- [4] Zhang X, Liu Z W. Superlenses to overcome the diffraction limit[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(6): 435-441.
- [5] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [6] Zamzam P, Rezaei P, Khatami S A. Quad-band polarization-insensitive metamaterial perfect absorber based on bilayer graphene metasurface[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2021, 128: 114621.
- [7] Wu G Z, Jiao X F, Wang Y D, et al. Ultra-wideband tunable metamaterial perfect absorber based on vanadium dioxide[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2703-2711.
- [8] Zhou J H, Hu Y Z, Jiang T, et al. Ultrasensitive polarization-dependent terahertz modulation in hybrid perovskites plasmon-induced transparency devices[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 994-1002.
- [9] 李辉, 余江, 陈哲. 基于混合石墨烯-二氧化钒超材料的太赫兹可调宽带吸收器[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0903001.
Li H, Yu J, Chen Z. Broadband tunable terahertz absorber based on hybrid graphene-vanadium dioxide metamaterials[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0903001.
- [10] Yao H Y, Yan X, Yang M S, et al. Frequency-dependent ultrasensitive terahertz dynamic modulation at the Dirac point on graphene-based metal and all-dielectric metamaterials[J]. *Carbon*, 2021, 184: 400-408.
- [11] Liu Y, Huang R, Ouyang Z B. Terahertz absorber with dynamically switchable dual-broadband based on a hybrid metamaterial with vanadium dioxide and graphene[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20839-20850.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Liu M K, 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.
- [15] Wang S X, Kang L, Werner D H. Hybrid resonators and highly tunable terahertz metamaterials enabled by vanadium dioxide (VO₂) [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 4326.
- [16] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P. Magneto-optical conductivity in graphene[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2007, 19(2): 026222.
- [17] Vakil A, Engheta N. Transformation optics using graphene[J]. *Science*, 2011, 332(6035): 1291-1294.
- [18] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Kelly M M, et al. Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 780.
- [19] Lü Y S, Tian J P, Yang R C. Multiband tunable perfect metamaterial absorber realized by different graphene patterns[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(8): 2409-2418.
- [20] Xu H, Li H J, Chen Z Q, et al. Novel tunable terahertz graphene metamaterial with an ultrahigh group index over a broad bandwidth[J]. *Applied Physics Express*, 2018, 11(4): 042003.
- [21] Smith D R, Schultz S, Markoš P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. *Physical Review B*, 2002, 65(19): 195104.
- [22] Shen H Y, Liu C Y, Liu F X, et al. Multi-band plasmonic absorber based on hybrid metal-graphene metasurface for refractive index sensing application[J]. *Results in Physics*, 2021, 23: 104020.
- [23] 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.
- [24] Liu W, Lü Y S, Tian J P, et al. A compact metamaterial broadband THz absorber consists of graphene crosses with different sizes[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2021, 159: 107038.
- [25] Wang T L, Zhang Y P, Zhang H Y, et al. Dual-controlled switchable broadband terahertz absorber based on a graphene-vanadium dioxide metamaterial[J]. *Optical Materials Express*, 2020, 10(2): 369-386.
- [26] Bai J J, Zhang S S, Fan F, et al. Tunable broadband THz absorber using vanadium dioxide metamaterials[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 292-295.
- [27] Song Z Y, Jiang M W, Deng Y D, et al. Wide-angle absorber with tunable intensity and bandwidth realized by a terahertz phase change material[J]. *Optics Communications*, 2020, 464: 125494.
- [28] Zhang H, Ling F, Zhang B. Broadband tunable terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide and Fabry-Perot cavity[J]. *Optical Materials*, 2021, 112: 110803.