

激光与光电子学进展

基于图形化石墨烯的可调谐宽光谱太赫兹吸收器的研究

薛钊^{1,2}, 张海婷^{1,2}, 杨茂生^{1,2}, 宋效先^{1,2,3*}, 张晶晶^{1,2}, 叶云霞^{1,2}, 任云鹏^{1,2}, 任旭东^{1,2}, 姚建铨^{1,2,3}

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²江苏大学微纳光电子与太赫兹技术研究院, 江苏 镇江 212013;

³天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072

摘要 设计了一种基于图形化石墨烯的太赫兹吸收器, 呈现出可调谐超宽频的吸收特性。其顶部为超薄石墨烯层, 中间为电介质层, 底部为金层。通过改变中介质层的厚度和顶层石墨烯的费米能级, 对太赫兹吸收器进行设计与仿真, 而石墨烯的费米能级可以通过改变栅极电压来调控。结果表明, 该吸收器在低频部分呈现超宽频吸收, 当吸收器的介质层厚度为 30 μm 时, 吸收特性达到最优, 并且通过改变石墨烯的费米能级, 能够动态调控吸收器的吸收特性, 使得吸收峰值点和带宽发生动态变化, 吸收峰值点在 431 GHz 区间内移动, 实现了吸收器的可调谐功能。当石墨烯的费米能级为 0.4 eV 时, 吸收率超过 90% 的频带宽度为 1.8744 THz, 吸收器峰值吸收率为 99.3357%, 达到了完美吸收。

关键词 光谱学; 太赫兹波; 吸收器; 图形化石墨烯; 可调谐宽光谱

中图分类号 TB34

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0530002

Tunable Broad-Spectral Terahertz Absorber Based on Graphic Graphene

Xue Zhao^{1,2}, Zhang Haiting^{1,2}, Yang Maosheng^{1,2}, Song Xiaoxian^{1,2,3*}, Zhang Jingjing^{1,2},
Ye Yunxia^{1,2}, Ren Yunpeng^{1,2}, Ren Xudong^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2,3}

¹College of Information Science and Engineering, Jiangsu University,
Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²Institute of Micro-Nano Optoelectronics and Terahertz Technology, Jiangsu University,
Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

³School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In this study, a terahertz absorber based on graphic graphene, which exhibited tunable ultra-wideband absorption characteristics, was designed. The top, middle, and bottom of the absorber comprised ultra-thin graphene, dielectric, and gold layers, respectively. The absorber was designed and simulated by changing the thickness of the middle layer and the Fermi energy level of the top layer; the Fermi level of graphene could be controlled by changing the gate voltage. The results show that the absorber exhibits ultra-wide frequency absorption

收稿日期: 2021-05-24; 修回日期: 2021-05-27; 录用日期: 2021-05-31

基金项目: 国家自然科学基金 (62005107, 62005074)、江苏省自然科学基金 (BK20180862)、中国博士后基金 (2019M651725)

通信作者: *songxiaoxian@ujs.edu.cn

in the low-frequency region, and the absorption characteristics are optimized when the thickness of the middle layer is $30\ \mu\text{m}$; the opening and closing of the absorber can be controlled by changing the Fermi energy level of graphene, while the frequency position and bandwidth of the absorption peak are adjusted to make the absorption peak move close to $431\ \text{GHz}$, thus realizing a tunable function of the absorber. When the Fermi energy level of graphene is $0.4\ \text{eV}$, the bandwidth with an absorption rate of more than 90% is $1.8744\ \text{THz}$ and the peak absorption rate is 99.3357% . The absorber achieves perfect absorption.

Key words spectroscopy; terahertz wave; absorber; graphic graphene; tunable broad spectrum

1 引言

超材料是通过人工设计进行制作的一种复合型材料,其性质不仅仅与构成材料的物理特性有关,更与单元结构对波的作用有关。而超材料吸收器最典型的结构是三层结构,诸多在这个结构的基础上进行改动的吸收器也得到了深入的研究^[1-7]。

关于太赫兹吸收器的研究主要围绕宽频吸收和可调谐特性。就目前而言,能够实现超宽频吸收的吸收器还不是很多,而其需求是巨大的,在隐身方面有较为可观的应用前景,所以实现宽频吸收为当前的研究目标。可调谐功能对于吸收器而言也是非常重要的,可以借助外部条件来对吸收器本身的吸收特性进行动态调节,进而实现不同频率不同频带宽的太赫兹波吸收。目前,很多太赫兹吸收器都通过改变吸收器本身的结构尺寸来实现吸收器吸收性能改变的目的,但是这种器件的吸收性能是不会随着外部环境和需求的变化而变化的,它是固定不变的,对太赫兹波的吸收也就不灵活,而可调谐的太赫兹吸收器在现阶段有巨大的优势。随着石墨烯材料的特殊性质被发现,基于石墨烯的可调谐超材料吸收器^[8-13]出现了。而随着微结构加工技术的提高和完全吸收材料^[14-15]的出现,相信越来越多的可调谐宽光谱的太赫兹吸收器将出现。

本文提出了一种基于图形化石墨烯的可调谐宽光谱吸收器,在还没有对该结构进行分析和研究的情况下,对太赫兹吸收器的结构进行主动调控,得到了最优的结果。虽然类似的吸收器已有很多,但分析其结果,所设计的吸收器在宽频吸收和动态调控方面有巨大优势,大于 90% 的频带宽为 $1.8744\ \text{THz}$,峰值可以在 $431\ \text{GHz}$ 范围内调控,这是传统的吸收器很少能达到的吸收特性。另外,该吸收器采用了石墨烯材料,所以可以通过调控石墨烯的费米能级,影响吸收器的吸收性能,使得吸收器的吸收极值与频带宽发生动态变化,最后吸收器的吸收极值点可以在 $431\ \text{GHz}$ 宽区间内变化。利用石墨烯的电导率可以通过化学掺杂或外加电压来调谐这一特性,克服了传统吸收器只能固定在一个特定频率或者十分有限的频率范围内工作的缺点,通过改变石墨烯的费米能级,就可以达到完美的吸收效果,更重要的是,在不需要对结构参数进行任何改变的情况下,实现对吸收峰幅值与频率的动态控制。基于太赫兹波的诸多优异特性,该可调谐吸收器的研究将在成像、隐身、探测器件等领域具有重要价值^[16-20]。

2 太赫兹吸收器设计

图 1(a) 为基于石墨烯的太赫兹吸收器结构,可以看到,该结构还是沿用典型的三层结构,太赫兹

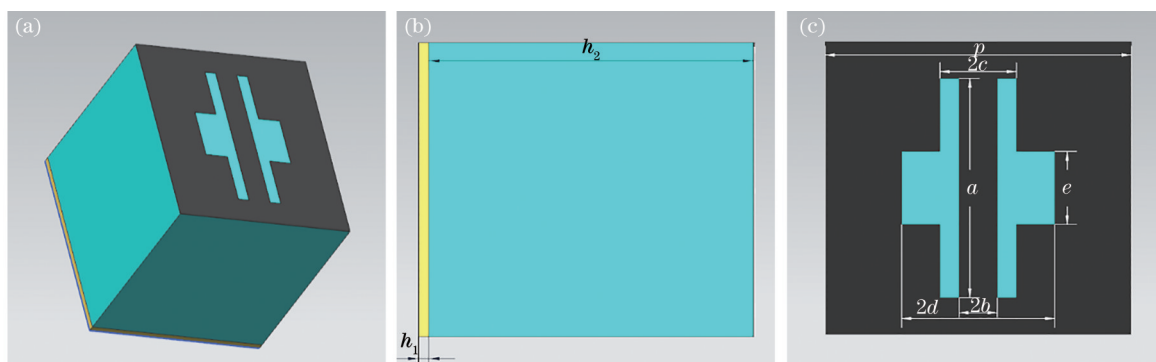


图 1 吸收器结构示意图。(a) 石墨烯宽频可调谐吸收器示意图; (b) 吸收器剖面图; (c) 吸收器表面结构图
Fig. 1 Schematic of absorber structure. (a) Schematic of graphene broadband tunable absorber; (b) absorber profile; (c) structural drawing of absorber surface

吸收器采用金-聚酰亚胺-石墨烯的结构,上层为石墨烯构成的图案。图 1(b)为石墨烯太赫兹吸收器的剖面图,金的厚度为 h_1 ,聚酰亚胺厚度为 h_2 ,介电常数 $\epsilon=3.1$,损耗正切角为 0.05,石墨烯的厚度为 1 nm。图 1(c)是宽频石墨烯太赫兹吸收器的表面结构图,整体呈现的是规则的长方体,并且该结构应用于太赫兹吸收器的研究尚未有分析。图中参数如表 1 所示。

表 1 基于石墨烯的太赫兹吸收器的结构尺寸
Table 1 Structural dimensions of graphene-based terahertz absorbers

Parameter	a	b	c	d	e	p	h_1	h_2
Value / μm	24	2	4	8	8	32	1	30

近年来,制备石墨烯的方法层出不穷。石墨烯材料的制备方法有机械剥离法、外延生长法、化学气相沉积法(CVD)、化学剥离法等。目前最具有前景的石墨烯的制备方式是 CVD,这种方式在铜薄膜上沉积石墨烯,要求的温度和压力较低。由于石墨烯的制备比较成熟,可以通过湿法转移工艺将 CVD 工艺生长的石墨烯转移至顶层,进而该结构的太赫兹吸收器可以实现加工。

3 太赫兹吸收器仿真与分析

在材料对光波的吸收中,通常使用符号 A 来表示吸收率,用 S_1 来表示反射系数, S_2 来表示透射系数。

$$A = 1 - R - T = 1 - |S_1|^2 - |S_2|^2. \quad (1)$$

吸收率为吸收的能量与入射能量之比。在实际中,由于吸收器底层为厚的金属衬底,该金属厚度大于入射波长的趋肤深度,所以透射率 T 为 0。因此,应用最小的吸收器反射率 R 就可以实现强吸收。将 $T=0$ 代入(1)式中,得到

$$A = 1 - R = 1 - |S_1|^2, \quad (2)$$

因此可以通过计算(2)式得到吸收率 A 。

对于太赫兹波段的吸收机理^[21-23],除了磁偶极子的振动耦合以外,在理论的不完善中,发现吸收与阻抗匹配理论也密切相关。

设外界环境空间的阻抗为 Z_0 , Z_1 为该吸收器的阻抗,所以很容易地将反射率表示为

$$R = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}. \quad (3)$$

(3)式中的 Z_0 和 Z_1 还可以写成

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}, Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \quad (4)$$

式中: μ 为磁导率; ϵ 为介电常数。由(4)式可知,当吸收器的阻抗 Z_1 等于外界环境空间的阻抗 Z_0 时,即 $\mu_1/\epsilon_1 = \mu_0/\epsilon_0$ 时,由(3)式可以得到 $R=0$,而金属厚度大于入射波长的趋肤深度,这时,吸收器实现对太赫兹波的完全吸收,即实现阻抗匹配。

一般在太赫兹范围内,电导率主要是带内跃迁造成的,所以石墨烯的电导率模型可以用 Drude 模型来表示:

$$\sigma \approx \sigma_{\text{intra}} = \frac{e^2 E_f}{\pi \hbar^2} \times \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}}, \quad (5)$$

式中: σ_{intra} 为带内跃迁所对应的电导率; ω 为角频率;一个电子的带电量为 e ; τ 是载流子弛豫寿命; \hbar 是普朗克常量; E_f 是费米能级。

由 Drude 模型可以看到,石墨烯的表面电导率可以随着石墨烯的费米能级 E_f 的变化而变化,石墨烯的介电常数可以表示为

$$\epsilon = 1 + j\sigma/\omega\epsilon_0. \quad (6)$$

另一方面,要想改变石墨烯的费米能级 E_f ,一种方式是外加栅极电压,采用这种方式可以直接从外部对吸收器的特性进行调控。而外加电压 V_g 与 E_f 可以表示为

$$E_f = \hbar V_f \sqrt{\pi \alpha V_g}, \quad (7)$$

式中: V_f 是费米速度; α 为一个常数。可以观察到,费米能级与外加电压之间的关系为一个根号的关系,通过改变电压 V_g ,进而改变石墨烯费米能级,最后改变电导率,实现对吸收器性能的调控。

通过 CST 软件对该模型进行模拟仿真,所设计的吸收器边界条件设为 X-Y 平面的结构边缘处,太赫兹波沿着 Z 轴负方向垂直射入,吸收器则采用频域求解器进行仿真,石墨烯初始费米能级设置为 0.4 eV。

4 分析与讨论

4.1 介质层厚度变化对吸收率的影响规律

通过设置频率区间为 0.1~2.5 THz,仿真上述结构,得到如图 2 所示的吸收率曲线。

通过观察图 2 所示的吸收率曲线,发现吸收率显示出超宽范围内的吸收,大于 90% 的频率为 0.1~1.9744 THz,频率宽为 1.8744 THz,并且在 1.53 THz 频率点处,达到了 99.3357% 几乎完美吸收的性能。

在以上结构的基础上,通过改变介质层厚度进

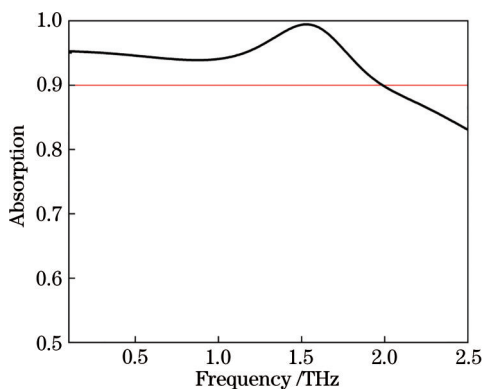


图 2 石墨烯太赫兹宽频吸收器的吸收谱
Fig. 2 Absorption spectrum of graphene terahertz broadband absorber

行模拟仿真,得到如图 3 所示的吸收率曲线。

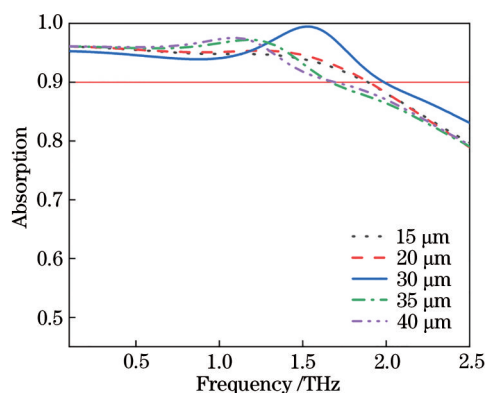


图 3 吸收率随介质层厚度变化曲线
Fig. 3 Absorption versus thickness of the dielectric layer

从图 3 可以观察到,随着介质层厚度的变化,都呈现了宽频吸收效果,当增大介质层厚度时,峰值先增大后减小,并且吸收率大于 90% 的频谱先变宽后变窄。当介质厚度为 30 μm 时,峰值达到最高,并且此时吸收率大于 90% 的频谱最宽,频谱宽达到了 1.8832 THz,峰值吸收率高达 99.45%。取介质厚度为 30 μm 的结果为最优结果。

4.2 石墨烯费米能级变化对吸收率的影响规律

在上述最优结构的条件下,在石墨烯费米能级为 0.4 eV 的基础上减小石墨烯的费米能级,得到如图 4 所示的吸收率曲线。

当减小石墨烯费米能级时,大于 90% 的频带宽是逐渐减小的,极大值点出现小范围的红移,石墨烯费米能级达到 0.1 eV 时,红移了 75 GHz 左右。为了找到更优的频带,将石墨烯的费米能级逐渐增大进行仿真,得到如图 5 所示的吸收率曲线。

通过观察图 5 可以发现,当增大石墨烯的费米

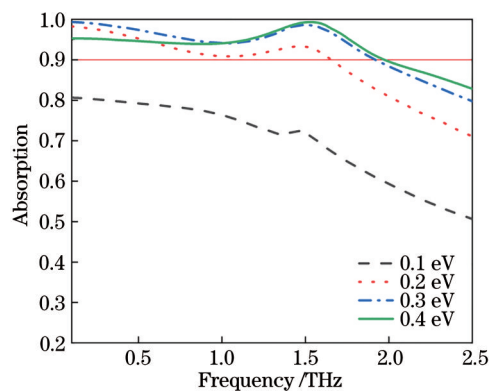


图 4 石墨烯费米能级为 0.1~0.4 eV 时的吸收曲线
Fig. 4 Absorption curve of Fermi energy level of 0.1~0.4 eV in graphene

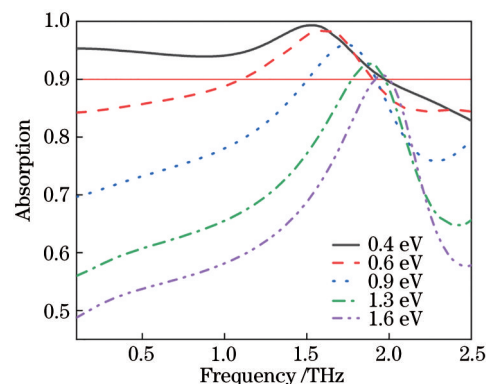


图 5 石墨烯费米能级为 0.4~1.6 eV 时的吸收曲线
Fig. 5 Absorption curve of Fermi energy level of 0.4~1.6 eV in graphene

能级时,大于 90% 的吸收率频带逐渐减小,并且峰值点出现明显的蓝移。从 0.4 eV 变化至 1.6 eV,峰值频率点从 1.53 THz 变化至 1.961 THz,大约移动了 431 GHz,则最优费米能级为 0.4 eV。

综上可以得到,当逐渐增大费米能级至 1.6 eV,1.57 THz 峰值由弱变强再变弱,其整体峰值点出现蓝移的特性,最终取 0.4~1.6 eV 的费米能级范围,得到了随石墨烯费米能级变化的吸收率曲线。可以知道,通过外加电压,通过改变电压,首先对石墨烯的费米能级进行调控,进而对吸收率峰值点和频带宽度进行调控,即得到了基于石墨烯的宽频可调谐的太赫兹吸收器的理想宽频曲线,最大频带宽为 1.8744 THz。

4.3 仿真结果分析

基于以上太赫兹吸收器的仿真结果,分别研究了石墨烯宽频可调谐吸收器的电场分布以及上下两层的电流分布情况。

选择频率点为 1.53 THz,石墨烯费米能级为

0.4 eV 和 1.6 eV, 监控其电场分布, 结果如图 6 所示。

当入射波进入吸收器时, 先与顶层发生电耦合, 进而在介质层内产生的感应磁场与入射波发生磁耦合。从图 6 可以看出, 当费米能级为 0.4 eV 时, 图案呈现强电场, 这时石墨烯层与介质层界面产生强烈的局部等离子共振, 当费米能级为 1.6 eV 时, 图案呈现弱电场, 而等离子共振这时是减弱的状况。而出现不同吸收率是因为石墨烯费米能级的变化能够影响石墨烯的电导率, 进而影响吸收器的吸收; 而石墨烯的表面阻抗与外界空间的阻抗相匹配时, 也调节了吸收性能, 实现对入射太赫兹波的高效吸收; 当再增大费米能级时, 载流子振荡没有那么强烈, 造成吸收器吸收性能减弱, 所以只能吸收部分电磁波。

石墨烯等离子体色散关系^[24]为

$$k_{\text{spp}} = \hbar\omega_r / (2\alpha_0 E_f c) = \frac{2\pi^2 \hbar c}{\alpha_0 E_f \lambda_r^2}, \quad (8)$$

式中: 石墨烯的结构常数 $\alpha_0 = e^2 / (\hbar c)$; λ_r 为石墨烯的共振波长; 石墨烯表面等离子激元的共振频率 $f_r \propto \sqrt{k_{\text{spp}} \alpha_0 E_f / 2\pi^2 \hbar c}$ 。可以看出, 共振频率与石墨烯的费米能级存在着根号的关系, 当费米能级变大, 共振频率也变大, 进而出现蓝移现象。随着费米能级的增大, 共振吸收先增加后降低, 这是因为当费米能级增大时, 石墨烯与自由空间的阻抗相匹

配, 使得入射波进入吸收器后, 在石墨烯层与介质层产生等离子共振。再增加石墨烯费米能级时, 阻抗逐渐与自由空间阻抗失配, 造成入射波吸收减弱的情况, 最后导致等离子共振吸收降低, 进而幅值下降, 达到最高吸收时的费米能级为 0.4 eV。

图 7 为吸收器的上下两层的电流分布。从图 7 (a) 与图 7 (b) 可以看到, 石墨烯层表面的电流方向在 XOY 平面内为 X 轴正方向, 而下层基板上的电流方向为 X 轴负方向, 上下表面形成相反的电流, 会产生电流环, 两个金属层上形成的电流环会在介质层产生感应磁场, 进而会激发出结构内的不同频率的磁偶极子共振。可以判断出, 电流环感应出的磁场方向是 Y 轴的正方向, 此时入射波朝 Z 轴负方向入射, 该太赫兹波的电磁场是在 XOY 平面内的, 从而使得感应磁场与入射太赫兹波相互共振耦合, 最终实现吸收。

在石墨烯的费米能级较低时, 等效阻抗相匹配, 在与磁偶极子共振的共同作用下, 使得电磁波吸收, 并且呈现宽频谱, 但是电导率较小, 在石墨烯层产生的极化电流较微弱, 产生的偶极子共振较弱; 当费米能级变大时, 石墨烯电导率增大, 进而石墨烯表面的等离子浓度增加, 引起了等离子共振。另一方面下金属板产生的极化电流与入射波进行磁耦合共振, 加强了对入射波的吸收, 所以峰值幅度增加明显。当石墨烯的费米能级增大到一定程度时, 石墨烯的性质逐渐接近金属, 这时石墨烯对

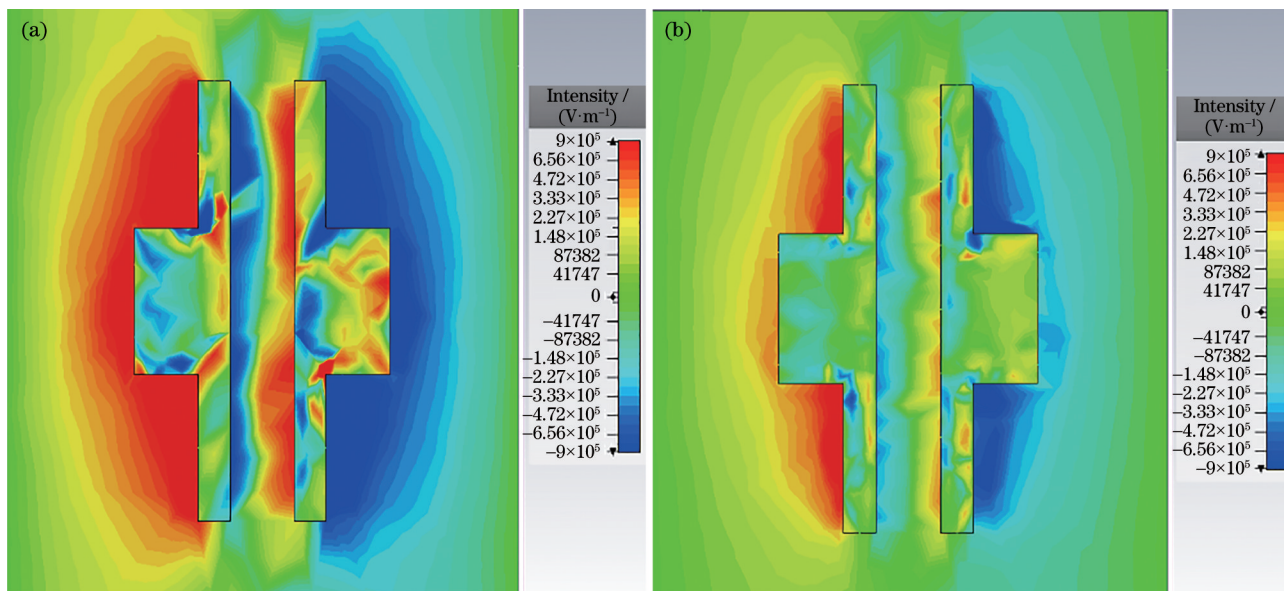


图 6 宽频太赫兹吸收器在 1.53 THz 处的电场分布。(a) 石墨烯费米能级为 0.4 eV; (b) 石墨烯费米能级为 1.6 eV
Fig. 6 Electric field distribution of broadband terahertz absorber at 1.53 THz. (a) Fermi energy level of graphene is 0.4 eV; (b) Fermi energy level of graphene is 1.6 eV

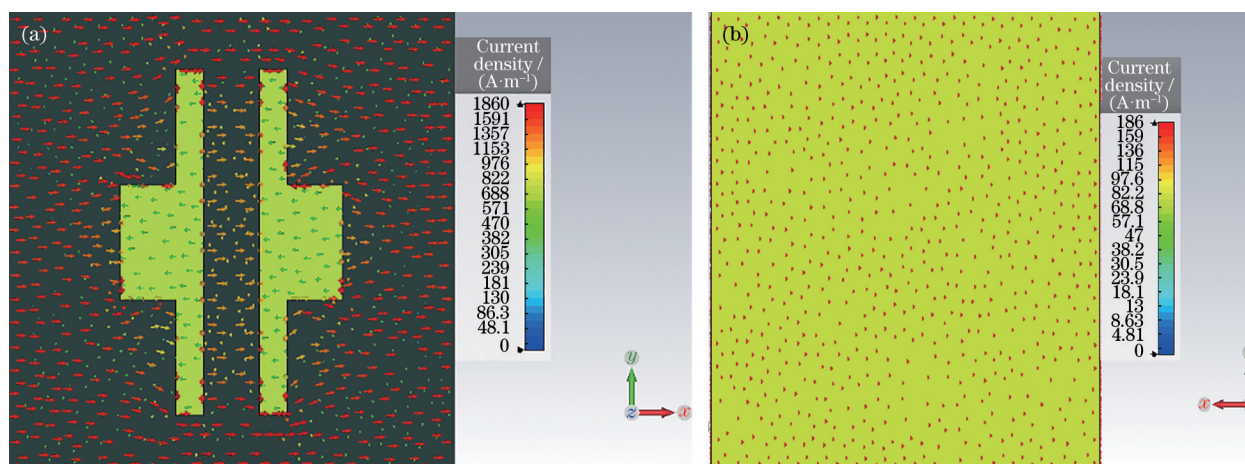


图7 宽频可调谐吸收器在石墨烯费米能级为0.4 eV时1.53 THz频率点的上下表面的电流分布情况。(a)上表面;(b)下表面
Fig. 7 Current distribution on upper and lower surfaces of terahertz tunable broadband absorber at 1.53 THz frequency point when the Fermi energy level of graphene is 0.4 eV. (a) Upper surface; (b) lower surface

入射电磁波的损耗较小,起主要作用的是上下表面的反向电流形成的磁偶极子耦合吸收。由于石墨烯的费米能级可以通过外加电压来调控,当改变石墨烯的费米能级时,太赫兹波的强吸收峰值点发生改变,且实现不同范围的宽频吸收,即通过调节石墨烯的费米能级实现了对吸收器的动态调谐与开关切换。

5 结 论

根据太赫兹吸收机理,设计了一种基于图形化石墨烯的太赫兹吸收器,实现了超宽频可调谐的特性。通过研究介质层厚度对吸收率的变化关系,取较优的情况。另外可以通过对石墨烯外加电压,调控石墨烯的费米能级,最后达到调节吸收器吸收带和峰值的目的。仿真结果表明:当石墨烯的费米能级为0.4 eV时,吸收带宽达到最大,为1.8744 THz,同时最大吸收率为99.3357%;当石墨烯的费米能级从0.4 eV增大到1.6 eV时,吸收峰出现在了431 GHz范围内的明显蓝移,即可以对吸收器进行该范围内的动态调谐,这对可调谐的太赫兹器件具有参考意义。基于以上特性,所提基于图形化石墨烯的太赫兹吸收器在传感、成像、隐身等领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [2] Chen J, Yang M S, Li Y D, et al. Tunable terahertz

wave broadband absorber based on metamaterial[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(24): 20191216.

陈俊, 杨茂生, 李亚迪, 等. 基于超材料的可调谐的太赫兹波宽频吸收器[J]. 物理学报, 2019, 68(24): 20191216.

- [3] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. Nature Photonics, 2009, 3(3): 148-151.
- [4] Cheng Y Z, Zuo X, Huang M L, et al. Design of a photo-excited broadband tunable terahertz absorber [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(1): 97-102.
程用志, 左轩, 黄木林, 等. 光驱动宽频带可调谐太赫兹吸波器设计[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(1): 97-102.
- [5] Xu Z C, Gao R M, Ding C F, et al. Photoexcited switchable metamaterial absorber at terahertz frequencies [J]. Optics Communications, 2015, 344: 125-128.
- [6] Wang C S, Jiang D F, Jiang X W. Polarization independent high absorption efficiency wide absorption bandwidth metamaterial absorber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 031601.
王超素, 江达飞, 江孝伟. 偏振无关高吸收效率宽吸收带宽超材料吸收器[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 031601.
- [7] Gong J, Zong R, Li H, et al. Dynamically tunable broadband terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0316001.
龚江, 宗容, 李辉, 等. 基于二氧化钒的太赫兹超材料动态可调宽带吸收器[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0316001.

- [8] Xu Z H. Research and design of terahertz metamaterials based on graphene[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019.
徐增辉. 基于石墨烯太赫兹超材料的研究与设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [9] Hu N, Wu F L, Bian L A, et al. Dual broadband absorber based on graphene metamaterial in the terahertz range[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(12): 3899-3909.
- [10] Ding F, Dai J, Chen Y, et al. Broadband near-infrared metamaterial absorbers utilizing highly lossy metals[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39445.
- [11] Zhang Y, Shi Y, Liang C H. Broadband tunable graphene-based metamaterial absorber[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(9): 3036-3044.
- [12] Fu P. Research on metamaterial terahertz absorber based on graphene[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019: 15-18.
付盼. 基于石墨烯的超材料太赫兹吸收器研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019: 15-18.
- [13] 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.
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.
- [14] Huang L, Chen H T. A brief review on terahertz metamaterial perfect absorbers[J]. *Terahertz Science and Technology*, 2013, 6: 26-39.
- [15] Low T, Avouris P. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1086-1101.
- [16] Wang T, Zhang Y. Dynamically tunable terahertz metasurface[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(3): 368-372.
王腾, 张岩. 动态可调的太赫兹超构表面[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(3): 368-372.
- [17] Cheng W, Li J S. Design of an optically tunable terahertz wave absorber[J]. *Electronic Components and Materials*, 2013, 32(7): 34-36, 53.
程伟, 李九生. 一种光可调太赫兹波吸收器的设计[J]. *电子元件与材料*, 2013, 32(7): 34-36, 53.
- [18] Ferguson B, Zhang X C, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. *Nature Materials*, 2002, 1(1): 26-33.
- [19] Williams G P. Filling the THz gap-high power sources and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2006, 69(2): 301-326.
- [20] Yan H T, Deng C, Guo L T, et al. Design of terahertz rapid standoff imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 183-186.
闫海涛, 邓朝, 郭澜涛, 等. 太赫兹远距离快速扫描成像系统的设计[J]. *应用光学*, 2016, 37(2): 183-186.
- [21] Piper J R, Fan S H. Total absorption in a graphene monolayer in the optical regime by critical coupling with a photonic crystal guided resonance[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(4): 347-353.
- [22] Chen M, Fan F, Yang L, et al. Mechanically tunable terahertz plasmonic waveguide filter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0411001.
陈猛, 范飞, 杨磊, 等. 机械可调谐太赫兹等离子体波导滤波器[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0411001.
- [23] Cui Z J, Wang Y, Zhu D Y, et al. Perfect absorption conditions and absorption characteristics of terahertz metamaterial absorber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614023.
崔子健, 王玥, 朱冬颖, 等. 太赫兹超材料吸收器的完美吸收条件与吸收特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614023.
- [24] Koppens F H, Chang D E, García de Abajo F J. Graphene plasmonics: a platform for strong light-matter interactions[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(8): 3370-3377.