

文章编号: 2095-4980(2021)06-0973-06

## 基于石墨烯超材料的宽频带可调太赫兹吸波体

胡 丹<sup>1</sup>, 付麦霞<sup>2</sup>, 朱巧芬<sup>3</sup>

(1. 安阳师范学院 物理与电气工程学院, 河南 安阳 455000; 2. 河南工业大学 信息科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 河北工程大学 数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘 要:** 基于二维材料石墨烯, 设计了一款宽频带可调谐超材料太赫兹吸波体。该吸波体由三层结构组成, 顶层为石墨烯超材料, 中间层为二氧化硅, 底层为金属薄膜。仿真结果表明, 当石墨烯的费米能级为 0.7 eV 时, 该吸波体在 1.11~2.61 THz 频率范围内吸收率超过 90%, 相对吸收带宽为 80.6%。当石墨烯的费米能级从 0 eV 增大到 0.7 eV 时, 该吸波体器件的峰值吸收率可以从 20.32% 增大到 98.56%。此外, 该吸波体器件还具有极化不敏感和广角吸收的特性。因此, 它在太赫兹波段的热成像、热探测、隐身技术等领域具有潜在的应用价值。

**关键词:** 超材料; 太赫兹; 吸波体; 石墨烯

中图分类号: TN29

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021248

## Tunable broadband terahertz absorber based on graphene metamaterial

HU Dan<sup>1</sup>, FU Maixia<sup>2</sup>, ZHU Qiaofen<sup>3</sup>

(1. School of Physics and Electrical Engineering, Anyang Normal University, Anyang Henan 455000, China;

2. College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou Henan 450001, China)

3. School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China)

**Abstract:** A tunable broadband terahertz absorber based on graphene metamaterial is proposed and numerically demonstrated. The absorber consists of three layers: the upper is the graphene metamaterial layer, the middle is the SiO<sub>2</sub> layer, and the bottom is the metallic layer. Simulation results demonstrate that the proposed absorber achieves over 90% absorption in 1.11–2.61 THz with a relative bandwidth of 80.6% when Fermi level  $\mu_c=0.7$  eV. The peak absorption rate of the proposed absorber can be tuned from 20.32% to 98.56% by changing the Fermi energy of graphene from 0 eV to 0.7 eV. Additionally, the proposed absorber is insensitive to polarization and has high absorbance to wide incidence angles. Such design may have some potential applications in thermal imaging, thermal detecting, and stealth technique.

**Keywords:** metamaterial; terahertz; absorber; graphene

超材料吸波体具有厚度薄、质量轻、吸收能力强、高度集成等优点, 并且可以“量需定制”。通过合理设计超材料的结构、形状、大小、分布等来实现所需要的电磁特性, 从而大大提高了超材料吸波体设计的灵活性。此外, 超材料吸波体在传感、成像、雷达、隐身等方面也具有潜在的应用价值, 使其成为太赫兹和超材料领域的一个研究热点。自 2008 年 Landy 等人提出第一个超材料吸波体以来<sup>[1]</sup>, 超材料吸波体便迅猛发展起来, 各式各样的超材料吸波体相继涌现。然而, 常规的超材料吸波体通过改变自身结构单元尺寸可以改变其工作频率或吸收强度, 但是结构单元和器件结构一旦制作完成则此器件就只有单一的功能, 这就限制了其实际应用。为此, 研究人员通过微机电系统、液晶、光、热、电等方法进行超材料吸波体的可控研究<sup>[2-6]</sup>。虽然这些方法能够在一定程度上实现超材料吸波体的动态调控, 但如何设计出结构简单且具备可控性的超材料吸波体仍是一个巨大的挑战。自 2004 年 Geim 等人发现并证实石墨烯可以在自然界中稳定存在以来<sup>[7]</sup>, 石墨烯因其独特的结构与性质引起了研究人员的强烈兴趣。例如石墨烯的光学特性: 石墨烯的电导率可以通过外加偏置电压或化学掺杂来改变<sup>[8]</sup>, 使得石墨烯在可控超材料吸波体的设计方面具有独特优势。石墨烯不仅可与金属或介质微结构结合, 还可通过自身微结构化, 实现对电磁波吸收的动态调控<sup>[9-12]</sup>。例如, Andryieuski 等人利用单层石墨烯与

收稿日期: 2021-06-14; 修回日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61805072); 河南省高等学校重点科研资助项目(22A140001)

金属超材料相结合,理论上实现了窄带和宽动态可调吸收<sup>[9]</sup>;Zhang 等人将双层石墨烯网格与金属十字形结构相结合,理论上实现了偏振无关的单频带动态可调吸收<sup>[10]</sup>。近几年来,研究人员的注意力主要集中在宽频带可调石墨烯超材料吸波体的研究。他们主要利用共平面组合结构或堆栈的多层结构,理论上实现了宽频带可调吸波体<sup>[13-18]</sup>。例如,Mou 等人研究了嵌套式石墨烯双圆环结构的宽频带可调吸收特性<sup>[13]</sup>;Xiao 等人利用双层石墨烯十字形结构实现了宽频带可调<sup>[14]</sup>。但这些器件仍存在一些不足:结构单元尺寸大,结构复杂,制作工艺难度大等,这在很大程度上限制了其实际应用。

本文基于石墨烯设计了一款太赫兹波段的宽频带可调谐超材料吸波体。利用仿真软件模拟了器件的结构参数、石墨烯的费米能级、极化角、斜入射角对该器件吸收性能的影响,分析了器件的电场分布,阐明了其电磁波吸收机理。该器件具有结构设计简单、极化无关、广角吸收等优良特性,在太赫兹成像、太赫兹隐身、太赫兹通信等领域具有巨大的潜在应用价值。

## 1 结构与物理模型

本文设计的超材料吸波体是由石墨烯超材料、二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、金属铜薄膜组成,如图 1 所示。底层铜薄膜的厚度为  $t=5\ \mu\text{m}$ ,远大于入射太赫兹波在铜薄膜中的趋肤深度,因此可看作是一面反射镜;中间介质层 SiO<sub>2</sub> 的相对介电常数为 3.9;顶层是方形石墨烯块,相邻方形石墨烯块之间通过细长的石墨烯条连接,这既保证了石墨烯薄膜的连续性,又有利于外加偏置电压来调控石墨烯的表面电导率。石墨烯的表面电导率( $\sigma_g=\sigma_{\text{intra}}+\sigma_{\text{inter}}$ )可由 Kubo 公式得到<sup>[19-20]</sup>:

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{je^2}{\pi\hbar^2(\omega - j2\Gamma)} \int_0^\infty \left( \frac{\partial f_d(\xi, \mu_c, T)}{\partial \xi} - \frac{\partial f_d(-\xi, \mu_c, T)}{\partial \xi} \right) \xi d\xi, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{je^2(\omega - j2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \int_0^\infty \frac{f_d(\xi, \mu_c, T) - f_d(-\xi, \mu_c, T)}{(\omega - j2\Gamma)^2 - 4\xi/\hbar^2} d\xi \quad (2)$$

式中:  $f_d(\xi, \mu_c, T) = (e^{(\xi - \mu_c)/k_B T} + 1)^{-1}$  是费米-狄拉克分布;  $\omega$  是角频率;  $\mu_c$  是费米能级;  $T$  是热力学温度;  $\Gamma = 2\tau^{-1}$  是载流子的散射率,  $\tau$  是弛豫时间;  $\xi$  是能量。  $e, \hbar, k_B$  分别为电子电荷、约化的普朗克常数和玻尔兹曼常数。由式(1)和式(2)可知,石墨烯的表面电导率可由费米能级来调控,而费米能级可通过外加偏置电压或化学掺杂的方法来调控。本文设定  $T=300\ \text{K}, \tau=0.1\ \text{ps}$ 。

利用基于有限元法的三维电磁场仿真软件 CST 的频域求解器对该超材料吸波体进行仿真优化。在  $x$  轴和  $y$  轴方向上设置周期性边界条件,在  $z$  轴方向上设置开放性边界条件,依此来模拟无限周期阵列。在仿真过程中,假定入射波沿着  $z$  轴负方向垂直入射到该超材料吸波体上。超材料吸波体的吸收率( $A$ )可由公式:  $A=1-T-R$  计算得出,其中,  $T=|S_{21}|^2$  和  $R=|S_{11}|^2$  分别是超材料吸波体的透射率和反射率,可由该软件的频域求解器仿真得出。石墨烯的费米能级可通过外加偏置电压进行调控,如图 1(a)所示。优化后的超材料吸波体的单元结构参数为:  $p=36\ \mu\text{m}, d=21\ \mu\text{m}, L=21\ \mu\text{m}, w=0.2\ \mu\text{m}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宽频带高吸收频谱与机理分析

首先研究在正入射的情况下(石墨烯费米能级为 0.7 eV 时),该吸波体的光学特性,仿真结果如图 2 所示。

从图 2(a)中可以看到,两种极化(TE 波和 TM 波)模式下吸波体的透射光谱、反射光谱和吸收光谱完全相同,这源于器件结构的旋转对称性。此外,该吸波体在 1.11~2.61 THz 频率范围内获得了 90% 以上的吸收率,相对吸收带宽为 80.6%<sup>[21]</sup>,同时在 1.27 THz( $f_1$ )和 2.36 THz( $f_2$ )处出现了谐振峰,其吸收率分别为 96.77% 和 98.56%,说明该吸波体具有超宽的吸收带宽且在谐振频率处的吸收率非常高。

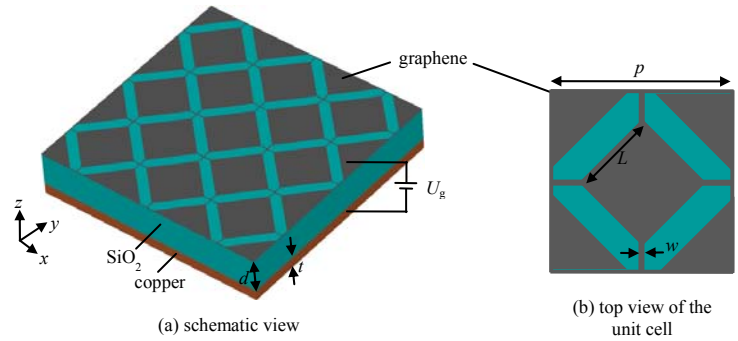


Fig.1 Schematic of the proposed THz absorber and the top view of the unit cell  
图 1 太赫兹吸波体的结构示意图及其单元结构的俯视图

宽带吸波机理可以用阻抗匹配原理来解释，当超材料吸波体结构的等效阻抗与空气阻抗相匹配时，入射的太赫兹波可以无反射地全部进入器件结构的内部，然后在吸波体的谐振作用下被转化为热量而耗散掉，材料的归一化复阻抗可表示为<sup>[22-23]</sup>：

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

由上述公式可知，在满足阻抗匹配条件时超材料吸波体的等效阻抗值为 1。从图 2(b)可知，该吸波体的等效阻抗在 1.11~2.61 THz 频带内其实部和虚部分别始终保持在 1 和 0 附近，这表明该吸波体在此频带内等效阻抗与自由空间的阻抗达到较好的匹配，从而实现了较宽频带的高吸收率。

### 2.2 吸波体电场分布

为了进一步揭示该吸波体的吸波物理机制，分别选取两个谐振频率  $f_1=1.27$  THz 和  $f_2=2.36$  THz(仅以 TM 波为例)，对谐振频率处的石墨烯超材料表面的电场分布进行描述，仿真结果如图 3 所示。对于第一个谐振频率  $f_1=1.27$  THz，电场主要沿水平方向集中在方形石墨烯块的左右顶点内侧，电场作用效果使方形石墨烯块的左右顶点内侧极性相反的电荷分布形成一对等效电偶极子。因此，该频率处的太赫兹波吸收源于电偶极子共振效应。对比图 3(a)和图 3(b)可知， $f_2=2.36$  THz 的谐振频率下极性相反的电荷沿水平方向分别集中在方形石墨烯块的左右边缘。因此，该频率处的太赫兹波吸收也是源于电偶极子共振效应。由于电场在方形石墨烯块表面聚集的位置不同，从而产生不同的谐振频率。

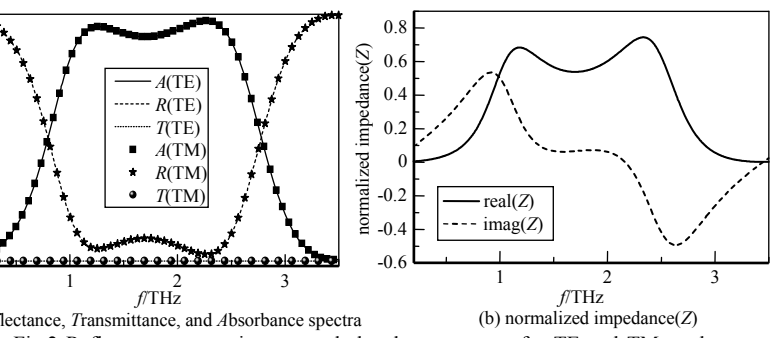


Fig.2 Reflectance, transmittance, and absorbance spectra for TE and TM modes; and the normalized impedance(Z) of the proposed THz absorber  
图 2 太赫兹吸波体的反射谱、透射谱和吸收谱；太赫兹吸波体的归一化阻抗

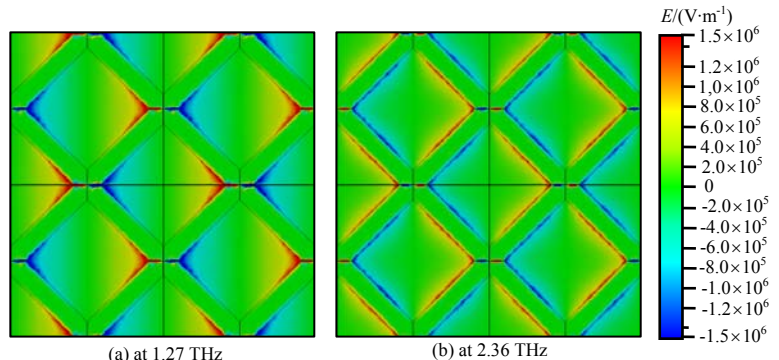


Fig.3 Calculated electric field distributions on the top graphene of the proposed THz absorber at 1.27 THz and 2.36 THz, respectively  
图 3 太赫兹吸波体顶部石墨烯层在 1.27 THz 和 2.36 THz 处的电场分布

### 2.3 相关几何结构参数对吸波体的影响

图 4 为石墨烯费米能级为 0.7 eV 时，改变吸波体的几何结构参数得到的吸收频谱。

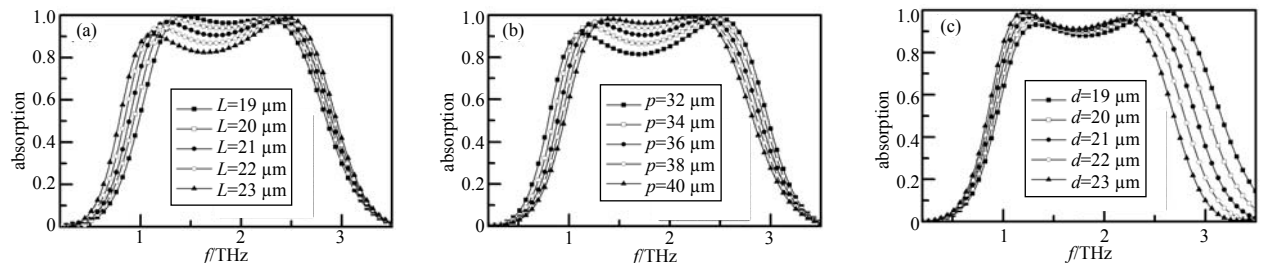


Fig.4 Absorption spectra of the proposed THz absorber with different geometric parameters: (a) the length of the square graphene  $L$ ; (b) the period of the unit cell  $p$ ; (c) the thickness of dielectric layer  $d$   
图 4 不同几何参数的太赫兹吸波体的吸收频谱：(a) 方形石墨烯的边长  $L$ ；(b) 单元结构的周期  $p$ ；(c) 介质层厚度  $d$

由图 4(a)可知，在保持其他参数不变的情况下，随着  $L$  的增大，谐振频率  $f_1$  将发生红移，这是因为  $f = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \propto 1/L$ <sup>[24]</sup>，即谐振频率  $f$  与  $L$  成反比，所以  $L$  增大，谐振频率  $f_1$  发生红移；对于谐振频率  $f_2$  来说，则是随着  $L$  增大，其发生蓝移，原因在于：随着  $L$  的增大，电偶极子共振使其发生红移，而单元结构之间距离变小，电磁相互作用增强，则使其发生蓝移，综合作用效果是谐振频率  $f_2$  发生蓝移。由图 4(a)可以看到，随着  $L$  的增大，谐振频率  $f_2$  的移动速度小于谐振频率  $f_1$ ，也证实了这一原因。为了进一步证实这一原因，研究结构

单元的周期  $p$  对吸收谱的影响, 仿真结果如图 4(b)所示。从图 4(b)可知, 随着  $p$  的减小, 单元结构之间距离变小, 结构之间的电磁相互作用增强, 谐振频率  $f_2$  发生蓝移; 对于谐振频率  $f_1$  来说, 随着  $p$  的减小, 单元结构之间距离变小, 单元结构左右顶点内侧电荷减少, 单元结构间的电磁相互作用减弱, 则谐振频率  $f_1$  发生红移<sup>[25-26]</sup>。图 4(c)为介质层厚度  $d$  对吸波体性能的影响。从图 4(c)可以看出, 随着  $d$  的增大, 吸波体的两个谐振频率  $f_1$  和  $f_2$  皆发生红移。原因在于随着  $d$  的增大, 吸波体结构中的顶层石墨烯与底层金属铜薄膜之间的距离增大, 即吸波体结构的等效电容变大, 根据公式  $f=1/(2\pi\sqrt{LC})$ , 谐振频率将会减小。

## 2.4 费米能级对吸波性能的影响

超材料吸波体不同费米能级的吸收频谱如图 5(a)所示。当费米能级从 0 eV 增大到 0.7 eV 时, 吸波体由窄带吸收转变为宽带吸收, 且峰值吸收率从 20.32%增大到 98.56%。从图 5(a)中还可看出, 当石墨烯费米能级为 0.7 eV 时, 吸收率大于 90%的频带范围最大, 其带宽达到 1.5 THz, 更加符合实际应用的需求。其调制深度  $\eta_A$  可由公式  $\eta_A=(A_{\text{on}}-A_{\text{off}})/A_{\text{on}}$  获得<sup>[27]</sup>。吸收调制深度曲线如图 5(b)所示, 在 1.11~2.61 THz 频率范围内调制深度  $\eta_A$  可达 77%以上。这表明该吸波体具有良好的宽带振幅调制功能, 因此在可调谐太赫兹光电子器件方面具有潜在的应用价值。

## 2.5 极化角和入射角对吸波性能的影响

对于吸波体而言, 在不同极化模式、不同极化角度和不同入射角度下, 能否始终保持良好的性能是评价其性能的重要指标, 因此, 在 TE 和 TM 极化模式下, 不同极化角度、不同入射角度吸波体吸收率的仿真结果如图 6 所示。从图 6(a)和图 6(b)中可以看出, 在 TE 和 TM 极化模式下, 极化角度  $\varphi$  在  $0^\circ\sim 45^\circ$  范围内变化时, 吸波体的吸收率曲线几乎没有变化, 这表明该吸波体具有很好的极化不敏感特性。从图 6(c)和图 6(d)中可以看出, 在 TE 模式下, 磁场强度随着入射角的增大而减小, 吸波体的吸收性能受磁场分量的影响较大; 对于 TM 模式, 电场强度随着入射角增大而减小, 而吸波体的吸收性能对电场的变化不敏感。虽然两种模式下的吸收情况有一定差异, 但从整体看, 入射角  $\theta$  在  $0^\circ\sim 40^\circ$  范围内变化时, 两种极化模式下吸波体在 1.09~2.70 THz 频率范围内皆能保持 80%以上的吸收率, 表明其具有广角吸收的特性, 该特性对实际应用具有非常重要的意义。

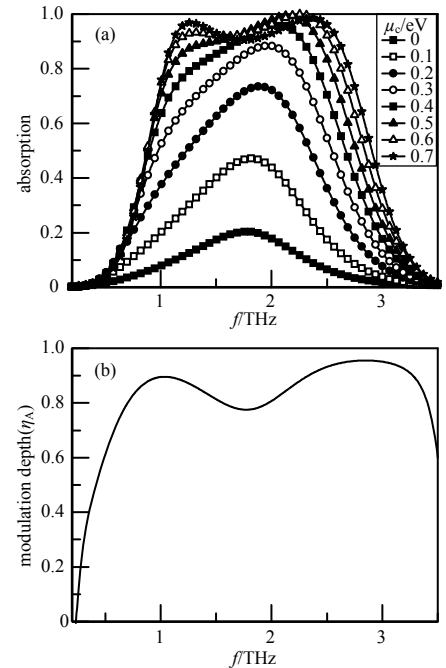


Fig.5 Absorption spectra of the proposed THz absorber with different Fermi energies

图 5 不同费米能级的太赫兹吸波体吸收频谱

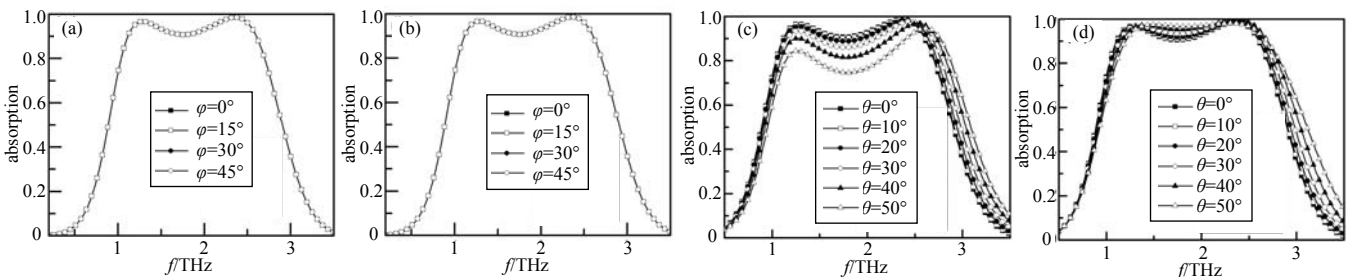


Fig.6 Absorption spectra of the proposed THz absorber with different polarization angles  $\varphi$  for TE (a) and TM (b) modes, respectively; absorption spectra of the proposed THz absorber with different incidence angles  $\theta$  for TE (c) and TM (d) modes, respectively

图 6 TE(a)和 TM(b)模式下不同极化角度  $\varphi$  的太赫兹吸波体的吸收频谱; TE(c)和 TM(d)模式下不同入射角度  $\theta$  的太赫兹吸波体的吸收频谱

## 3 结论

综上所述, 本文提出的基于石墨烯宽频带太赫兹吸波体在 1.11~2.61 THz 频率范围内获得了 90%以上的吸收率, 相对吸收带宽为 80.6%, 同时在 1.27 THz 和 2.36 THz 处产生了 96.77%和 98.56%的高吸收率。根据太赫兹吸波体谐振频率的电场分布图, 分析了这两个吸收峰的谐振机理, 其谐振的原因是由于电偶极子共振。根据偏置电压可以改变石墨烯费米能级的特性, 实现了吸波体吸收率的动态调谐, 在 1.11~2.61 THz 频率范围内调制深度达 77%以上。此外, 仿真得到的太赫兹吸波体在不同极化角和不同入射角下的吸收率表明, 该吸波体器件具有极化不敏感和广角吸收的特性。

## 参考文献：

- [ 1 ] LANDY N I,SAJUJIGBE S,MOCK J J,et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008,100(20): 207402-1-6.
- [ 2 ] HU F R,QIAN Y X,LI Z,et al. Design of a tunable terahertz narrowband metamaterial absorber based on an electrostatically actuated MEMS cantilever and split ring resonator array[J]. *Journal of Optics*, 2013,15(5):055101-1-7.
- [ 3 ] SHREKENHAMER D,CHEN W C,PADILLA W J. Liquid crystal tunable metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2013,110(17):177403-1-5.
- [ 4 ] SEREN H R,KEISER G R,CAO L Y,et al. Optically modulated multiband terahertz perfect absorber[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014,2(12):1221-1226.
- [ 5 ] LEI L,LOU F,TAO K Y,et al. Tunable and scalable broadband metamaterial absorber involving VO<sub>2</sub>-based phase transition. *Photonics Research*, 2019,7(7):734-741.
- [ 6 ] ZHAO J,CHENG Q,CHEN J,et al. A tunable metamaterial absorber using varactor diodes[J]. *New Journal of Physics*, 2013,15(4):043049-1-11.
- [ 7 ] NOVOSELOV K S,GEIM A K,MOROZOV S V,et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004,306(5696):666-669.
- [ 8 ] GUSYNIN V P,SHARAPOV S G,CARBOTTE J P. Magneto-optical conductivity in graphene[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2006,19(2):026222-1-28.
- [ 9 ] ANDRYIEUSKI A,LAVRINENKO A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach[J]. *Optics Express*, 2013,21(7):9144-9155.
- [ 10 ] ZHANG Y P,LI T T,CHEN Q,et al. Independently tunable dual-band perfect absorber based on graphene at mid-infrared frequencies[J]. *Scientific Reports*, 2015,5(1):18463-1-8.
- [ 11 ] ZHANG Y,FENG Y J,ZHU B,et al. Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency[J]. *Optics Express*, 2014,22(19):22743-22752.
- [ 12 ] 王越,王丽,董连和,等. 基于石墨烯光电特性的多功能超材料吸波体设计[J]. *中国科学:物理学力学天文学*, 2018,48(4): 66-72. (WANG Yue,WANG Li,DONG Lianhe,et al. Design of multifunctional metamaterial absorber based on electro-optic properties of graphene[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018,48(4):66-72.)
- [ 13 ] MOU N L,SUN S L,DONG H X,et al. Hybridization-induced broadband terahertz wave absorption with graphene metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2018,26(9):11728-11736.
- [ 14 ] XIAO B G,GU M Y,XIAO S S. Broadband, wide-angle and tunable terahertz absorber based on cross-shaped graphene arrays[J]. *Applied Optics*, 2017,56(19):5458-5462.
- [ 15 ] QI L M,LIU C,SHAH S M A. A broad dual-band switchable graphene-based terahertz metamaterial absorber[J]. *Carbon*, 2019,153:179-188.
- [ 16 ] ZHOU Q H,ZHA S,LIU P G. Graphene based controllable broadband terahertz metamaterial absorber with transmission band[J]. *Materials*, 2018,11(12):2409-1-8.
- [ 17 ] YE L F,CHEN Y,ZHOU J L,et al. Actively tunable broadband terahertz absorption using periodically square-patterned graphene[J]. *Applied Physics Express*, 2018,11(10):102201-1-4.
- [ 18 ] CAI Y J,XU K D. Tunable broadband terahertz absorber based on multilayer graphene-sandwiched plasmonic structure[J]. *Optics Express*, 2018,26(24):31693-31705.
- [ 19 ] ZENG F,YE L,LI L,et al. Tunable mid-infrared dual-band and broadband cross-polarization converters based on U-shaped graphene metamaterials[J]. *Optics Express*, 2019,27(23):33826-33839.
- [ 20 ] HANSON G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008,103(6):064302-1-18.
- [ 21 ] DING F,CUI Y,GE X,et al. Ultra-broadband microwave metamaterial absorber[J]. *Applied Physics Letters*, 2012,100(10): 103506-1-4.
- [ 22 ] 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):195104-1-5.
- [ 23 ] SMITH D R,VIER D C,KOSCHNY T,et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005,71(3):036617-1-11.