

基于石墨烯超材料的宽频带太赫兹吸收器

马栎敏^{1,2,3}, 徐晗^{1,2}, 刘禹煌^{1,2}, 徐贵力^{1,2}, 郭万林^{3,4*}¹南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211100;²南京航空航天大学高速载运设施的无损检测监控技术工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 211100;³南京航空航天大学纳智能材料器件教育部重点实验室, 江苏 南京 210016;⁴南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要 为了拓展太赫兹吸收器的相对吸收带宽,设计了一种基于石墨烯超材料的超薄、宽频带、可调谐的太赫兹吸收器,其由图案化石墨烯层、电介质层和金属反射底板层叠构成。仿真结果表明:该吸收器在 4.48 THz 频率处的吸收率为 99.98%,通过调节石墨烯的化学势可使该频点处的吸收率变化至 25.08%;同时,该吸收器表现出对入射波极化不敏感的吸收特性,且在太赫兹波倾斜入射的情况下仍能保持一定的宽频带吸收特性。在此基础上设计了基于三层图案化石墨烯的太赫兹吸收器,其可进一步拓展吸收频带宽度,仿真结果表明该吸收器在 1.90~5.49 THz 频率之间的吸收率高于 90%,相对吸收带宽为 97%。

关键词 光学器件; 石墨烯; 太赫兹吸收器; 宽频带可调谐吸收器; 超材料

中图分类号 O441

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0923001

Broadband Terahertz Absorber Based on Graphene Metamaterial

Ma Limin^{1,2,3}, Xu Han^{1,2}, Liu Yuhuang^{1,2}, Xu Guili^{1,2}, Guo Wanlin^{3,4*}¹College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, Jiangsu, China;²Non-Destructive Testing and Monitoring Technology for High-Speed Transport Facilities Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 211100, Jiangsu, China;³Key Laboratory for Intelligent Nano Materials and Devices of the Ministry of Education, Nanjing 210016, Jiangsu, China;⁴State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China

Abstract In order to expand the relative absorption bandwidth of terahertz absorber, an ultra-thin, wide-band, and tunable terahertz absorber based on graphene metamaterial is designed, which is composed of patterned graphene layer, dielectric layer, and metal reflection substrate. The simulation results show that the absorptivity of the absorber at 4.48 THz frequency is 99.98%, and the absorptivity at this frequency can be changed to 25.08% by adjusting the chemical potential of graphene. At the same time, the absorber shows the absorption characteristic of insensitive to the polarization of incident wave, and can still maintain a certain wide-band absorption characteristic when the terahertz wave is tilted. On this basis, a terahertz absorber based on three-layer patterned graphene is designed, which can further expand the absorption bandwidth. The simulation results show that the absorption rate of the absorber is higher than 90%, and the relative absorption bandwidth is 97% between 1.90 THz and 5.49 THz.

Key words optical devices; graphene; terahertz absorber; broadband and tunable absorber; metamaterial

收稿日期: 2021-10-21; 修回日期: 2021-11-16; 录用日期: 2021-12-06

基金项目: 中国博士后科学基金(2020TQ0152)、江苏省自然科学基金(BK20190405)、中央高校基本科研业务费专项资金(NJ2020014)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20200323,xcxjh20210339)

通信作者: *wlguo@nuaa.edu.cn

1 引言

太赫兹 (THz) 波在电磁频谱中位于微波频段和远红外频段之间^[1]。与 X 射线相比,太赫兹波对被检测物质的损害小^[2];与光学波段相比,太赫兹波对介电材料以及非极性物质具有较强的穿透性^[3];与微波相比,太赫兹波的传输速率快,成像精度高^[4]。影响太赫兹技术广泛应用的瓶颈之一是缺少高灵敏探测器,尤其缺乏具有宽带响应的高灵敏探测器。为了提高探测器的灵敏度,通常会在探头表层加上一层特定的吸收层以增强对太赫兹波的吸收,该吸收层的响应特性将直接影响探测器的灵敏度和响应范围^[5]。然而,自然界中极少有材料能与太赫兹波产生强烈的电磁效应以实现太赫兹波的强吸收^[6-7]。超材料太赫兹吸收器有利于提高传感器的灵敏度和响应范围^[8-10],在隐身^[11]、成像^[12-13]、传感^[14-15]等方面具有广泛的应用前景。然而,受到材料内禀弥散、结构谐振特性的影响,所激发的局域表面等离子体共振往往仅发生在纳米量级的区域^[16-17],这一窄带特性极大地制约了超材料吸收器的发展^[18-19]。为了使探测器在实际应用中满足高灵敏度以及宽响应范围的需要,亟须设计出一种宽频带、可调谐的太赫兹吸收器。

石墨烯具有柔韧性好、质量轻、带隙可调、响应速度快等特点,利用石墨烯制备超材料为实现可调谐的太赫兹吸收器提供了新的途径^[20]。在实际应用中,除了吸收强度和吸收带宽以外,吸收器的厚度也是十分重要的技术指标之一。Liu 等^[21]设计的开口环嵌套石墨烯超结构在太赫兹波段且吸收率 $A \geq 90\%$ 时的相对吸收带宽为 41%,该结构的整体厚度为 0.12λ (λ 为 $A \geq 90\%$ 所对应的波长上限)。Zhang 等^[22]在石墨烯超材料与金底板之间采用盛满水的介质容器作为间隔以构成多层结构,该结构在太赫兹波段且 $A \geq 90\%$ 时的相对吸收带宽为 66%,其整体厚度为 0.13λ 。Sun 等^[23]采用一系列非对称椭圆形的石墨烯超材料与聚酰亚胺、金底板组合构成 Salisbury 屏吸收器,该吸收器在太赫兹波段且 $A \geq 90\%$ 时的相对吸收带宽为 55%,吸收器的厚度为 0.10λ 。王慧等^[24]设计了一种基于多层石墨烯的红外吸收器,其中红外波段且 $A \geq 90\%$ 时的相对吸收带宽为 28%,整体厚度为 0.40λ 。You 等^[25]设计了基于单层石墨烯的十字形超材料,其与硅衬底和金底板构成的吸收器在太赫兹波段且 $A \geq 90\%$ 时的相对吸收带宽为 66%,吸收器的整体

厚度为 0.10λ 。Yi 等^[26]设计了一种基于单层石墨烯的宽频段、可调谐的太赫兹吸收器,其由石墨烯超材料层、介质层和金底板构成,该太赫兹吸收器在 $A \geq 90\%$ 时的相对吸收带宽为 77%,吸收器的厚度为 0.10λ 。

虽然上述太赫兹吸收器均实现了较宽频带的太赫兹吸收效果(其中最宽的相对吸收带宽为 77%),但吸收器的厚度较厚,整体厚度均超过了 0.1λ ,故如何设计出同时具有超薄结构、宽频段、强吸收的太赫兹吸收器是目前研究的热点与难点。为了减小太赫兹吸收器的整体厚度、进一步拓展太赫兹吸收器的相对吸收带宽,本文设计了一种基于石墨烯超材料的可调谐太赫兹吸收器。该吸收器由图案化石墨烯层、电介质层和金属反射底板层叠构成,其中图案化石墨烯层由周期性排布的圆环阵列构成。仿真结果表明,该吸收器可在 4.48 THz 的频率处实现 99.98% 的吸收率,而且可通过外加偏置电压使其吸收率在 25.08%~99.98% 之间发生变化。同时,该吸收器具有极化不敏感特性,以及对倾斜入射的太赫兹波具有宽频带吸收特性。在此基础上,所设计的基于三层图案化石墨烯的太赫兹吸收器,可在 $1.90 \sim 5.49 \text{ THz}$ 的频率之间实现 $A \geq 90\%$,相对吸收带宽为 97%,且太赫兹吸收器的整体厚度仅为 0.08λ 。

2 太赫兹波段石墨烯表面阻抗特性

石墨烯具有独特的线性能量、动量色散关系和可调谐的光电特性,且工作频率极为宽广,涵盖了紫外、可见光、红外乃至太赫兹波段和微波波段^[27-29],这为实现宽频带、可调谐的电磁强吸收提供了新的思路^[30-31]。在太赫兹波段,根据 Kubo 公式,单层石墨烯的表面电导率 σ_g 由带内电导率 σ_{intra} 和带间电导率 σ_{inter} 组成^[32],表达式为

$$\sigma_g(\omega, \tau, \mu_c, T) = \sigma_{\text{intra}}(\omega, \tau, \mu_c, T) + \sigma_{\text{inter}}(\omega, \tau, \mu_c, T), \quad (1)$$

其中

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega, \tau, \mu_c, T) \approx \frac{je^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2\mu_c - (\omega - j\tau^{-1})\hbar}{2\mu_c + (\omega - j\tau^{-1})\hbar} \right], \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega, \tau, \mu_c, T) \approx \frac{je^2 k_B T}{\pi\hbar^2 (\omega + j\tau^{-1})} \left\{ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left[\exp\left(-\frac{\mu_c}{k_B T}\right) + 1 \right] \right\}, \quad (3)$$

式中: ω 表示入射电磁波的角频率; k_B 表示玻尔兹曼常数; $\hbar = h/2\pi$ 表示约化普朗克常数,其中 h 表

示普朗克常数; e 表示电子电量; $T = 300\text{ K}$ 表示室温条件下热力学温度; τ 表示弛豫时间, 表征掺杂所引起的等离子体衰变, 仿真计算中设为 0.1 ps ; μ_c 表示化学势, 当 $k_B < \mu_c$ 时, $\mu_c = E_f$, 其中 E_f 表示石墨烯的费米能级, 其与载流子浓度呈正相关, 而石墨烯的载流子浓度可以通过设置偏置电压和化学掺杂的方式进行连续调节。石墨烯的电导率 σ_g 与其表面阻抗 Z_g 之间的关系^[33]为

$$Z_g = R_g + jX_g = 1/\sigma_g, \quad (4)$$

式中: R_g 和 X_g 分别表示石墨烯表面阻抗的实部和虚部。在频率为 $1 \sim 8\text{ THz}$ 时, 石墨烯表面阻抗随化学势 μ_c 的变化规律如图 1 所示。从图 1 可以看到: 石墨烯表面阻抗的虚部 X_g 随着频率的增加而增大, 实部 R_g 基本不随频率的变化而变化; 石墨烯表面阻抗的实部 R_g 和虚部 X_g 均随着化学势 μ_c 的增大而减小。综上可知, 通过调节石墨烯的费米能级可以调节石墨烯在太赫兹波段的表面阻抗, 进而调节其对太赫兹的传输特性。

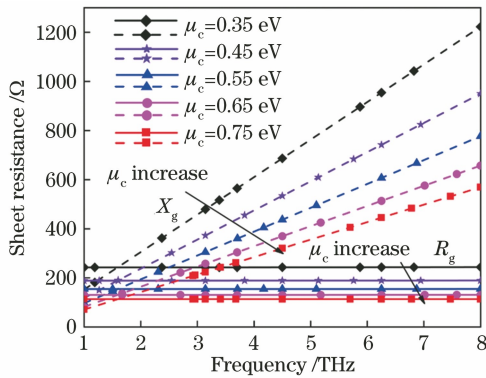


图 1 石墨烯表面阻抗与化学势及频率的关系

Fig. 1 Relationship among surface impedance, chemical potential, and frequency of graphene

3 基于单层石墨烯超材料的太赫兹吸收器

3.1 结构设计及优化

基于单层石墨烯超材料的太赫兹吸收器的结构如图 2(a) 所示, 其由图案化石墨烯层、电介质层和金属反射底板三层结构组成, 最终构成 Salisbury 屏结构。太赫兹波由顶层图案化石墨烯层入射, 经过底层金属反射底板的全反射后由顶层图案化石墨烯层出射。电介质层所用的材料为聚酰亚胺, 其相对介电常数 $\epsilon = 3.5$, 厚度为 t 。金属反射底板所用的材料为金, 其电导率 $\sigma_{\text{gold}} = 4.7 \times 10^7\text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, 厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 厚度远大于太赫兹波在金属中的趋肤深度, 当太赫兹波入射到金属底板表面时可以实现全反射。图案化石墨烯层由周期性排布的圆环构成, 如图 2(b) 所示, 其中 p 和 r_1, r_2 分别为阵列单元的周期以及圆环的内、外半径。

为了实现可调谐的太赫兹吸收器, 须对石墨烯的费米能级进行调制, 调制方式主要有两种。其一, 通过对石墨烯圆环阵列外加偏置电压的方式在各石墨烯圆环处引入电极, 并将其与金属全反射底板分别接入电源的正负两极, 如图 2(a) 所示, 通过调节电压值的大小来实现对石墨烯费米能级的调制。其二, 通过对石墨烯化学掺杂的方式来实现对费米能级的调制, 如将制备好的石墨烯圆环阵列结构置于 HNO_3 环境中, 并通过放置时间来控制 HNO_3 的掺杂浓度, 进而实现对石墨烯费米能级的调制。

受到图案化石墨烯制备工艺的限制, 本文未能通过实验来制备所设计的吸收器, 但仍有望通过化学气相沉积的方法来制备基于石墨烯超材料的太赫兹吸收器^[34]。具体制备过程: 首先通过机械切割或

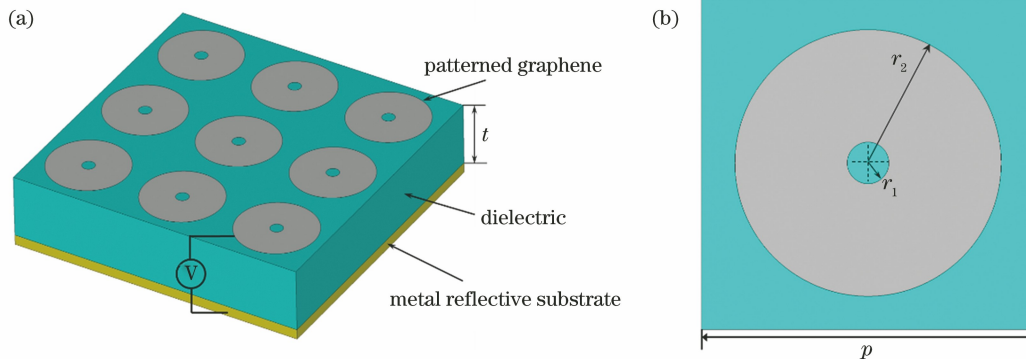


图 2 基于单层石墨烯超材料的太赫兹吸收器。(a) 三维结构示意图; (b) 单元俯视图

Fig. 2 Terahertz absorber based on monolayer graphene metamaterial. (a) Three-dimensional structure diagram; (b) top view of unit

光刻技术来制备图案化铜箔;将图案化铜箔置于体积分数为 5% 的盐酸溶液中 5 min 以去除铜箔表面的氧化铜;将图案化铜箔放入管式炉内,通入气体流量为 70 sccm (1 sccm = 1 mL/min) 的氢气约 3 h 并将炉内温度加热到 1045 °C,随后通入气体流量为 30 sccm 的甲烷气体约 10 min 以生长单层石墨烯,在同时通入氢气和甲烷气体的情况下使炉内温度逐渐冷却至室温,将覆盖石墨烯的铜箔从管式炉中取出;利用导热凝胶将覆盖在铜箔上的石墨烯直接转移至聚酰亚胺衬底上,采用机械切割的方式来去除圆环阵列之间的连接;将制备好的样品浸泡于体积分数为 65% 的 HNO₃ 溶液中 20 min 以去除铜箔,之所以采用 HNO₃ 溶液而非传统方法中的氯化铁溶液是由于 HNO₃ 溶液不仅可以加快铜箔腐蚀的速度,还会同时进行石墨烯的掺杂;最后将覆盖石墨烯超材料的聚酰亚胺衬底置于金属底板上,即构成本文所设计的太赫兹吸收器。

为了在较宽的频带内实现太赫兹波的强吸收,须对所设计的太赫兹吸收器的结构参数进行优化。吸收率 A 可以表示为

$$A = 1 - R - T' = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2, \quad (5)$$

式中: R 表示反射率; T' 表示透射率; S_{11} 和 S_{21} 分别表示反射系数和透射系数。考虑到金属底板对入射电磁波的全反射,因此透射率 $T' = 0$, 则式(5)可以进一步简化为

$$A = 1 - |S_{11}|^2. \quad (6)$$

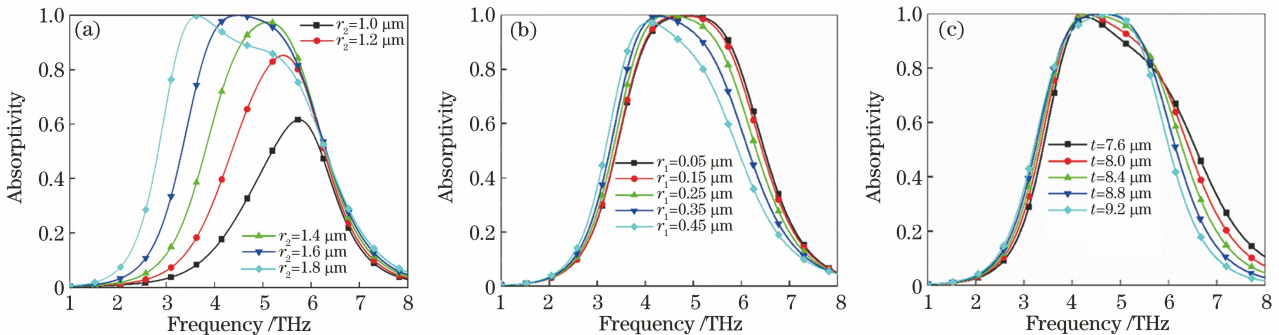


图 3 不同结构参数下超材料吸收器的吸收谱。(a) 石墨烯圆环外半径 r_2 在 1.0~1.8 μm 之间取值; (b) 石墨烯圆环内半径 r_1 在 0.05~0.45 μm 之间取值; (c) 电介质厚度 t 在 7.6~9.2 μm 之间取值

Fig. 3 Absorption spectra of metamaterial absorber under different structural parameters. (a) Outer radius r_2 of graphene ring is between 1.0 μm and 1.8 μm ; (b) inner radius r_1 of graphene ring is between 0.05 μm and 0.45 μm ; (c) dielectric thickness t is between 7.6 μm and 9.2 μm

3.2 吸收机理分析

为了进一步说明所设计的吸收器的太赫兹波吸收机理,仿真分析了太赫兹波在电介质层材料的聚酰亚胺中的传输情况。仿真结果表明,在 1~8 THz

利用式(5)和式(6)及 CST Studio Suite 电磁仿真软件仿真计算、分析电介质层厚度 t 、圆环阵列单元的周期 p 、内外半径 r_1 和 r_2 对太赫兹吸收器吸收效果的影响,令石墨烯的化学势 $\mu_c = 0.55$ eV, 弛豫时间 $\tau = 0.1$ ps。如图 3(a) 所示,随着圆环的外半径 r_2 由 1.0 μm 增加至 1.8 μm ,吸收峰的位置逐渐向低频的方向移动,当 $r_2 = 1.6 \mu\text{m}$ 时,90% 以上的吸收率所对应的吸收带宽最大。如图 3(b) 所示,固定 $r_2 = 1.6 \mu\text{m}$,改变石墨烯圆环的内半径 r_1 ,随着圆环的内半径 r_1 由 0.45 μm 减小至 0.25 μm ,吸收峰的位置逐渐向高频的方向移动,且吸收峰的宽度随着 r_1 的减小而增加,随后 r_1 继续减小到 0.05 μm ,虽然吸收峰的位置继续向高频的方向移动,但吸收峰的宽度基本保持不变。因此,将圆环的内半径 r_1 设为 0.25 μm 。如图 3(c) 所示,石墨烯超材料与金属底板之间的电介质层的厚度 t 不仅会影响吸收峰的位置,还会影响吸收峰的带宽以及最大吸收率,当电介质层的厚度 $t = 8.4 \mu\text{m}$ 、石墨烯圆环的内半径 $r_1 = 0.25 \mu\text{m}$ 、外半径 $r_2 = 1.6 \mu\text{m}$ 、阵列单元周期 $p = 4 \mu\text{m}$ 时,在 4.48 THz 频率处吸收率为 99.98%,说明此时实现了太赫兹的完美吸收,且吸收率 A 超过 90% 所对应的吸收带宽最大为 1.6 THz。根据相对吸收带宽 $x_{\text{BW}} = 2(f_{\text{H}} - f_{\text{L}}) / (f_{\text{H}} + f_{\text{L}}) \times 100\%$ (其中 f_{H} 和 f_{L} 分别表示上限频率和下限频率),本文初步实现了宽频带的太赫兹吸收效果。

频率之间聚酰亚胺的太赫兹波吸收率均小于 0.36%,其对吸收器吸收损耗的贡献可以忽略不计。仿真分析了该吸收器在高吸收频点 4.48 THz 处的电场分布,结果如图 4 所示,其中 E 为电场强度。

从图 4 可以看到,在图案化石墨烯层中产生了强烈的表面等离子体共振,而且主要发生在圆环的边缘处,共振方向与入射波的电场方向一致。电场被强烈地约束在石墨烯表面,绝大部分的入射太赫兹波被石墨烯层吸收,使得吸收器在谐振频率为 4.48 THz 处产生了完美吸收效果。由于圆环阵列的边缘是渐变的,所以在谐振频率附近的较宽频带内产生了表面等离子体共振,最终实现宽频带吸收。

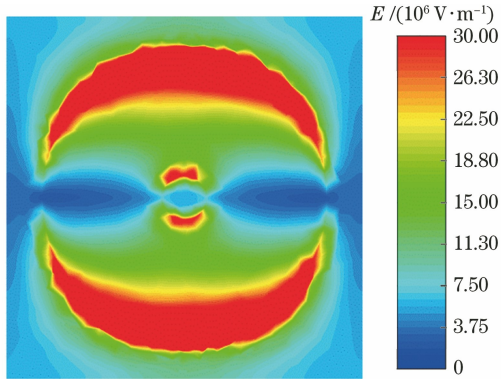


图 4 太赫兹吸收器在 4.48 THz 频率处的电场强度分布情况
Fig. 4 Electric field intensity distribution of terahertz absorber at 4.48 THz frequency

3.3 太赫兹吸收特性分析

通过外加偏置电压或者化学掺杂的方式可以改变石墨烯的化学势,调节其电导率和电磁波传输特性,实现可调谐的太赫兹波吸收特性。通过改变石墨烯的化学势 μ_c 可以得到吸收率随频率的变化曲线,结果如图 5 所示。从图 5 可以看到:当化学势 μ_c 由 0.15 eV 增加至 0.55 eV 时,超材料吸收器的最大吸收率显著提升,吸收峰出现蓝移,且吸收频带不断展宽,在 4.48 THz 频率处吸收率由 25.08% 提高至 99.98%;随后化学势 μ_c 继续增加至 0.75 eV,超材料吸收器的最大吸收率没有发生显著变化,但吸收峰继续蓝移,吸收频带有所收缩。

另外,由于超材料吸收器的阵列单元结构及二维排布具有高度对称性,这可以推断出该吸收器对极化角是不敏感的。为了验证吸收器对极化角的不敏感特性,通过 CST Studio Suite 电磁仿真软件来数值分析超材料吸收器在电磁波正入射的条件下,极化角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化的太赫兹吸收率频谱,结果如图 6 所示。从图 6 可以看到,随着极化角的变化,该吸收器的吸收率保持不变,表明该吸收器具有极化不敏感特性。

进一步仿真了该吸收器对 TE (Transverse

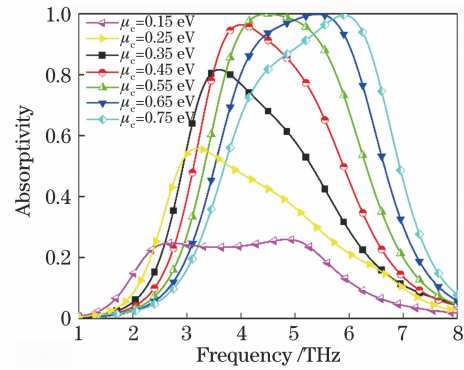


图 5 石墨烯化学势 μ_c 在不同取值下吸收率随频率的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of absorptivity with frequency under different values of graphene chemical potential μ_c

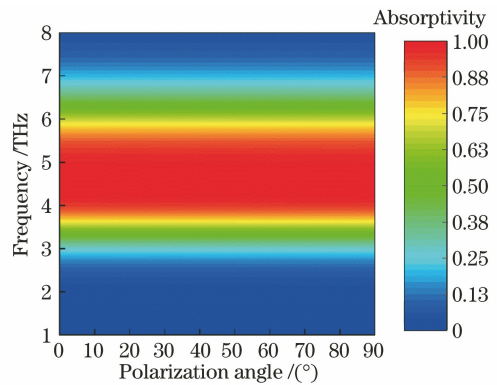


图 6 不同极化角下超材料吸收器的吸收率

Fig. 6 Absorptivity of metamaterial absorbers at different polarization angles

Electric)和 TM (Transverse Magnetic) 模式下太赫兹波的吸收率,结果如图 7 所示。从图 7 可以看到,入射角从 0° 增至 20° 的过程中,TE 和 TM 模式下的吸收频谱均基本保持不变;当入射角为 20° 时,吸收率大于 90% 的带宽为 1.47 THz,说明吸收器仍然保持相对可观的吸收带宽;随着入射角由 20° 继续增大至 60° ,TE 和 TM 模式下的吸收频谱差异逐渐显现,即在 TE 模式下,随着入射角的增大,最大吸收强度几乎不变,吸收带宽进一步展宽,但在整个吸收频带内会有部分频段吸收强度下降而出现双吸收峰的现象,而在 TM 模式下,最大吸收率和吸收带宽都随着入射角的增大而减小;当入射角增大到 50° 时,吸收器的最大吸收率下降至 94.63%,而 90% 以上的吸收带宽下降至 0.68 GHz。

4 基于双层及三层石墨烯超材料的太赫兹吸收器

在基于单层石墨烯超材料的太赫兹吸收器的基

基础上,通过增加图案化石墨烯的层数、调整石墨烯超材料阵列单元的结构参数,能够使各层超材料所对应的谐振频率相互靠近,可以产生多个谐振模式的耦合效果,进一步拓展电磁响应的频带宽度,最终达

到拓宽吸收带宽的目的。基于双层石墨烯超材料的吸收器的整体结构如图 8 所示,其中 G1 和 G2 分别为上层和下层图案化石墨烯层,二者阵列单元的结构均为圆环状。

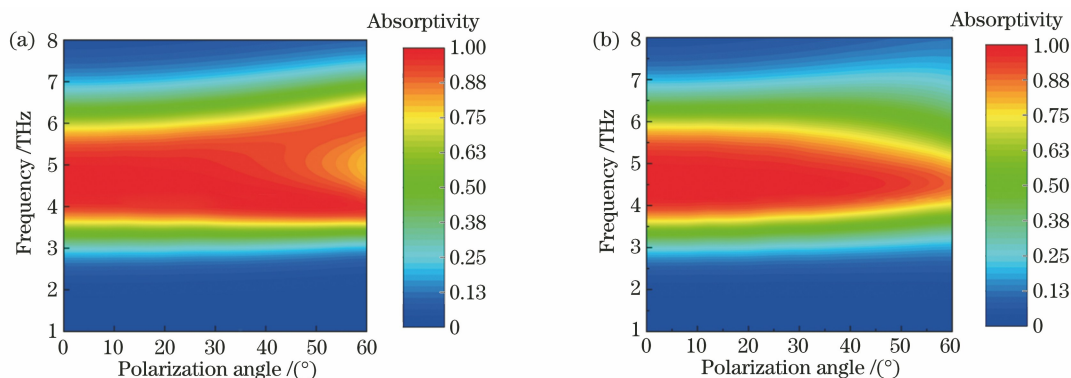


图 7 不同模式下太赫兹波的吸收谱。(a) TE 模式;(b) TM 模式

Fig. 7 Absorption spectra of terahertz waves in different modes. (a) TE mode; (b) TM mode

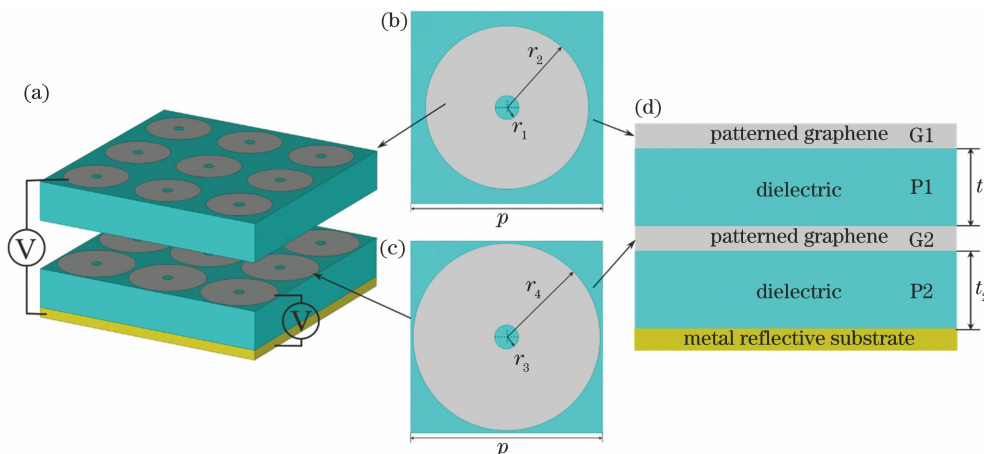


图 8 基于双层石墨烯超材料的吸收器的结构示意图。(a)三维立体图;(b)上层石墨烯超材料的单元俯视图;(c)下层石墨烯超材料的单元俯视图;(d)侧视图

Fig. 8 Structure diagram of absorber based on two-layer graphene metamaterial. (a) Three-dimensional view; (b) unit top view of upper graphene metamaterial; (c) unit top view of lower graphene metamaterial; (d) side view

为了使所设计的基于双层石墨烯超材料的吸收器与自由空间实现阻抗匹配,分别对石墨烯超材料阵列单元的结构参数和电介质层的厚度进行优化设计。G1 层阵列单元圆环的内半径 $r_1 = 0.25 \mu\text{m}$,外半径 $r_2 = 1.8 \mu\text{m}$;G2 层阵列单元圆环的内半径 $r_3 = 0.25 \mu\text{m}$,外半径 $r_4 = 1.95 \mu\text{m}$;G1 和 G2 同心且阵列单元的周期 p 均为 $4 \mu\text{m}$;电介质层 P1 的厚度 $t_1 = 5.5 \mu\text{m}$,电介质层 P2 的厚度 $t_2 = 6.5 \mu\text{m}$,材质均为聚酰亚胺,相对介电常数 $\epsilon = 3.5$;底层金属底板的厚度为 $1 \mu\text{m}$ 。基于双层石墨烯超材料的太赫兹吸收器的吸收率曲线如图 9 所示。从图 9 可以看到:经过结构优化后,基于双层石墨烯超材料的吸收器的吸收频带展宽效果明显,吸收率超过 90%的

频率范围为 $2.28 \sim 5.16 \text{ THz}$,所对应的频带宽度为 2.88 THz ,相对吸收带宽高达 78%;峰值吸收率分别在 3.05 THz 和 4.75 THz 频率处取得,峰值吸收率分别为 99.97%和 99.09%,表现出接近完美吸收的太赫兹波吸收能力。

为了探究石墨烯超材料的层数对吸收器谐振模式的影响,分别仿真石墨烯超材料 G1 层和 G2 层在 3.05 THz 和 4.75 THz 谐振频率处的电场分布,结果如图 10 所示。从图 10 可以看到,入射的太赫兹波所激发的表面等离子激元具有很强的区域性,频率为 3.05 THz 的入射波所产生的电场能量主要集中在下层石墨烯超材料 G2 层圆环的边缘处,而频率为 4.75 THz 的入射波所产生的电场能量主要

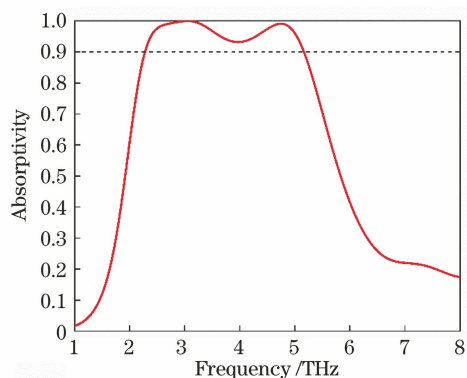


图 9 基于双层石墨烯超材料太赫兹吸收器的吸收率曲线
Fig. 9 Absorptivity curves of terahertz absorber based on two-layer graphene metamaterial

集中在上层石墨烯超材料 G1 层圆环的边缘处。由此可见,宽频吸收效果中的低频谐振由下层石墨烯

超材料 G2 层产生,高频谐振则由上层石墨烯超材料 G1 层产生,两种谐振模式相互叠加可以使吸收频带进一步展宽。

通过增加图案化石墨烯的层数可以有效拓展吸收带宽,在此基础上对基于三层石墨烯超材料的太赫兹吸收器进行结构设计和优化,如图 11 所示。三层石墨烯超材料 G1、G2 和 G3 层阵列单元圆环的内半径均为 $0.25 \mu\text{m}$,石墨烯超材料 G1 和 G2 层阵列单元圆环的外半径均为 $1.96 \mu\text{m}$;石墨烯超材料 G3 层阵列单元圆环的外半径为 $1.78 \mu\text{m}$;G1、G2 和 G3 同心且阵列单元的周期 p 均为 $4 \mu\text{m}$;电介质层 P1 的厚度 $t_1 = 4.8 \mu\text{m}$,电介质层 P2 的厚度 $t_2 = 4.5 \mu\text{m}$,电介质层 P3 的厚度 $t_3 = 3 \mu\text{m}$,材质均为聚酰亚胺,相对介电常数 $\epsilon = 3.5$;金属反射底板的厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

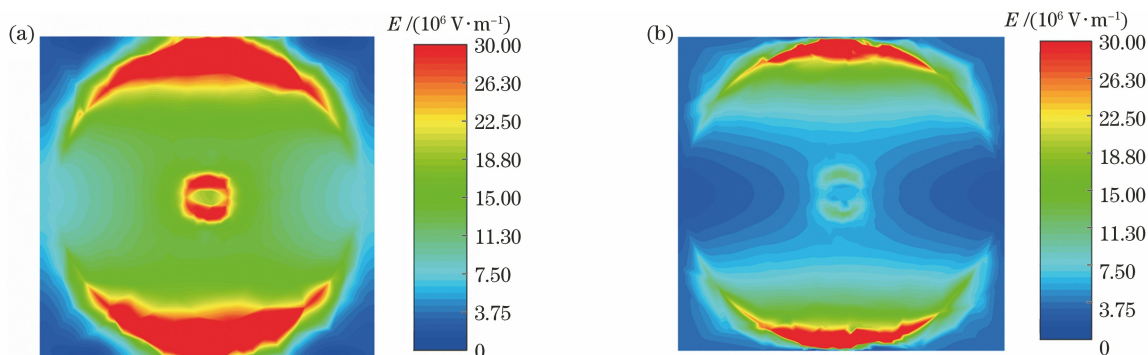


图 10 基于双层石墨烯超材料的吸收器的电场强度分布情况。(a) G1 层在 4.75 THz 频率处的电场分布;
(b) G2 层在 3.05 THz 频率处的电场分布

Fig. 10 Electric field intensity distribution of absorber based on bilayer graphene metamaterial. (a) Electric field distribution of G1 layer at 4.75 THz frequency; (b) electric field distribution of G2 layer at 3.05 THz frequency

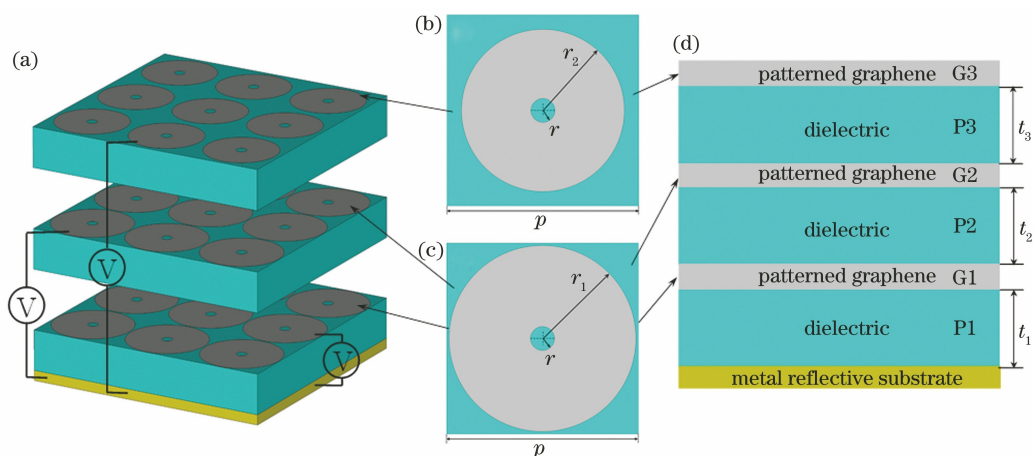


图 11 基于三层石墨烯超材料的吸收器的结构示意图。(a)三维立体图;(b)上层石墨烯超材料的单元俯视图;
(c)夹层及下层石墨烯超材料的单元俯视图;(d)侧视图

Fig. 11 Structure diagram of absorber based on three-layer graphene metamaterial. (a) Three-dimensional view; (b) unit top view of upper graphene metamaterial; (c) unit top view of interlayer and lower graphene metamaterial; (d) side view

基于三层石墨烯超材料的太赫兹吸收器的吸收率曲线如图 12 所示。从图 12 可以看到,与基于双

层石墨烯超材料的吸收器相比,基于三层石墨烯超材料的吸收器的吸收带宽得到进一步展宽,在 1.90~5.49 THz 的频率之间实现了 90% 以上的吸收率,其吸收频带宽度为 3.59 THz,相对吸收带宽为 97%,存在三个明显的吸收峰,分别出现在 2.13, 3.38, 5.05 THz 处,峰值吸收率分别为 99.41%、96.01% 和 99.49%。基于三层石墨烯超材料的吸收器的总厚度仅为 0.8λ ($\lambda=c/f_L$, 其中 c 为光速)。吸收器在实验制备过程中往往存在结构误差,因此仿真分析了制作容差对基于三层石墨烯超材料的吸收器性能的影响,结果表明当该吸收器结构参数的制作误差达到 2% 时,其仍能保持 97% 的相对吸收带宽。

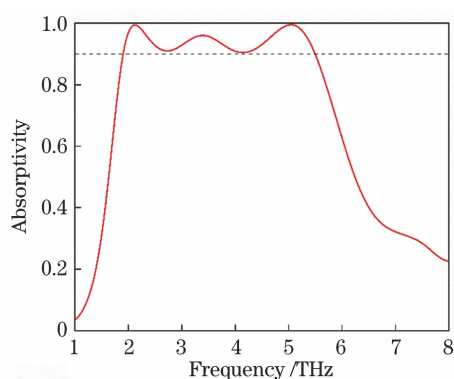


图 12 基于三层石墨烯超材料的太赫兹吸收器的吸收率曲线
Fig. 12 Absorptivity curve of terahertz absorber based on three-layer graphene metamaterial

5 结 论

本文设计了一种基于石墨烯超材料的宽频带、可调谐的太赫兹吸收器,并仿真分析了其对太赫兹波的吸收特性及吸收机理。仿真结果表明:基于单层石墨烯超材料的吸收器在 4.48 THz 频率处产生了 99.98% 的吸收率,实现了对该频率太赫兹波的完美吸收;随着入射角由 0° 增大至 60° ,该吸收器仍能保持可观的吸收性能;此外,通过调节石墨烯的化学势,可实现吸收率在 25.08%~99.98% 之间动态调节。在单层石墨烯圆环的基础上,增加石墨烯圆环的层数并通过结构优化可以使各层石墨烯圆环的谐振模式耦合,最终达到拓宽吸收频带宽度的目的。基于三层石墨烯超材料的吸收器的吸收率在 90% 以上的频率范围为 1.90~5.49 THz,吸收带宽为 3.59 THz,相对吸收带宽为 97%。所设计的宽频带、可调谐的太赫兹吸收器在太赫兹隐身、太赫兹成像、开关及传感器等领域具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Wang M Y, Li H L, Dong Y L, et al. Propagation matrix method study on THz waves propagation in a dusty plasma sheath [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(1): 286-290.
- [2] Talataisong W, Gorecki J, van Putten L D, et al. Hollow-core antiresonant terahertz fiber-based TOPAS extruded from a 3D printer using a metal 3D printed nozzle [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(8): 1513-1521.
- [3] 朱亦鸣, 施辰君, 吴旭, 等. 生物医学检测中太赫兹光谱技术的算法研究 [J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0130001.
Zhu Y M, Shi C J, Wu X, et al. Terahertz spectroscopy algorithms for biomedical detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0130001.
- [4] Zhang Y X, Qiao S, Liang S X, et al. Gbps terahertz external modulator based on a composite metamaterial with a double-channel heterostructure [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(5): 3501-3506.
- [5] 刘毅, 彭晓昱, 王作斌, 等. 基于超材料的太赫兹波吸收材料 [J]. *红外技术*, 2015, 37(9): 756-763.
Liu Y, Peng X Y, Wang Z B, et al. Terahertz-wave absorber based on metamaterial [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 756-763.
- [6] Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. *Science*, 2004, 303(5663): 1494-1496.
- [7] Wang Y, Cui Z J, Zhu D Y, et al. Composite metamaterials for THz perfect absorption [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2019, 216(6): 1800940.
- [8] Ghosh S, Lim S. Fluidically switchable metasurface for wide spectrum absorption [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 10169.
- [9] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [10] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [11] Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, et al. Active terahertz metamaterial devices [J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [12] Grant J, Escorcía-Carranza I, Li C, et al. A monolithic resonant terahertz sensor element comprising a metamaterial absorber and microbolometer [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(6): 1043-1048.
- [13] Li S Q, Ma J L, Wu X J, et al. Double-slit diffraction of terahertz wave generated by tilted-pulse-front pumping [J]. *Chinese Optics of Letters*, 2021,

- 19(5): 051901.
- [14] He Z H, Li L Q, Ma H Q, et al. Graphene-based metasurface sensing applications in terahertz band [J]. *Results in Physics*, 2021, 21: 103795.
- [15] Wang J, Hu C P, Tian Q, et al. Ultrahigh-Q and polarization-independent terahertz metamaterial perfect absorber [J]. *Plasmonics*, 2020, 15 (6): 1943-1947.
- [16] Fan R H, Xiong B, Peng R W, et al. Constructing metastructures with broadband electromagnetic functionality [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32 (27): e1904646.
- [17] Jin Q, E Y W, Gao S H, et al. Preference of subpicosecond laser pulses for terahertz wave generation from liquids [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(1): 015001.
- [18] Zhang H F, Wang Z L, Hu C X, et al. A tailored broadband terahertz metamaterial absorber based on the thermal expansion feature of liquid metal [J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102937.
- [19] Zhou Y S, Xia H, Zhang L M, et al. Temperature insensitive ultra-broadband THz metamaterial absorber based on metal square ring resonators [J]. *Results in Physics*, 2021, 22: 103915.
- [20] 杨飒, 周仁龙, 刘丹, 等. 基于表面电流边界的石墨烯等离子体调制特性和传感特性 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1124001.
- Yang S, Zhou R L, Liu D, et al. Modulation and sensing properties of graphene plasma based on surface electric current boundary condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1124001.
- [21] Liu C, Qi L M, Zhang X. Broadband graphene-based metamaterial absorbers [J]. *AIP Advances*, 2018, 8 (1): 015301.
- [22] Zhang H, Ling F, Wang H, et al. A water hybrid graphene metamaterial absorber with broadband absorption [J]. *Optics Communications*, 2020, 463: 125394.
- [23] Sun J Z, Li J S. Broadband adjustable terahertz absorption in series asymmetric oval-shaped graphene pattern [J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8: 245.
- [24] 王慧, 刘立英, 安泽琳, 等. 基于多层石墨烯的高性能宽带红外吸收器 [J/OL]. *激光与光电子学进展*. [2021-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20210924.1034.006.html>.
- Wang H, Liu L Y, An Z L, et al. A high-performance broadband infrared absorber based on multilayer graphene [J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*. [2021-02-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20210924.1034.006.html>.
- [25] You B, Zhang R, Wang S C, et al. A high-performance broadband terahertz absorber based on single layer cross-shaped graphene [J]. *Optik*, 2021, 241: 167249.
- [26] Yi N N, Zong R, Gong J, et al. Dynamically tunable broadband absorber with a single ultra-thin layer of graphene in the terahertz regime [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, 136: 106161.
- [27] Lü H L, Guo Y H, Zhao Y, et al. Achieving tunable electromagnetic absorber via graphene/carbon sphere composites [J]. *Carbon*, 2016, 110: 130-137.
- [28] Ansell D, Radko I P, Han Z, et al. Hybrid graphene plasmonic waveguide modulators [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8846.
- [29] Zhang Y P, Li Y, Cao Y Y, et al. Graphene induced tunable and polarization-insensitive broadband metamaterial absorber [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 281-287.
- [30] Yi D, Wei X C, Xu Y L. Tunable microwave absorber based on patterned graphene [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(8): 2819-2826.
- [31] Emani N K, Chung T F, Ni X J, et al. Electrically tunable damping of plasmonic resonances with graphene [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(10): 5202-5206.
- [32] Lu Z G, Ma L M, Tan J B, et al. Transparent multilayer graphene/polyethylene terephthalate structures with excellent microwave absorption and electromagnetic interference shielding performance [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(37): 16684-16693.
- [33] 姜彦南, 王扬, 葛德彪, 等. 一种基于石墨烯的超宽带吸波器 [J]. *物理学报*, 2016, 65(5): 054101.
- Jiang Y N, Wang Y, Ge D B, et al. An ultra-wideband absorber based on graphene [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(5): 054101.
- [34] Lu W B, Wang J W, Zhang J, et al. Flexible and optically transparent microwave absorber with wide bandwidth based on graphene [J]. *Carbon*, 2019, 152: 70-76.