

激光与光电子学进展

具有狭缝结构的石墨烯超宽带吸收器

刘涛, 程星鑫, 周自刚*, 杨永佳**

西南科技大学数理学院, 四川 绵阳 621010

摘要 提出了一种基于圆形与 L 形耦合的可调谐的太赫兹宽带吸收器。其主要结构由顶层的电可调石墨烯材料、中间的介质材料 SiO_2 和底层的金组成。通过 COMSOL 软件和多重反射干涉理论对器件的吸收光谱进行研究。结果表明: 模拟与理论的吸收光谱高度重合。在保持狭缝的前提下, 改变中央位置的石墨烯形状并不会改变吸收器的性能。当石墨烯的费米能级通过外加电压调节到 0.95 eV 时, 器件处于强吸收(吸收率 $>90\%$)的频谱宽度超过了 4.1 THz, 且具有极化无关的特性。本设计在光开关、调制器和能量收集等领域具有潜在的应用价值, 也给太赫兹宽带吸收器的设计提供更多的灵感。

关键词 光学器件; 石墨烯; 狭缝结构; 太赫兹吸收器; 偶极子共振

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230572

Graphene Ultra-Broadband Perfect Absorber with Slit Structure

Liu Tao, Cheng Xingxin, Zhou Zigang*, Yang Yongjia**

School of Mathematics and Science, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010, Sichuan, China

Abstract We propose a tunable terahertz broadband absorber based on circular and L-shaped couplings. Its main structure is composed of an electrically tunable graphene material at the top, a dielectric material SiO_2 in the middle, and gold at the bottom. The absorption spectra of this device are studied using the COMSOL software and the multiple reflection interference theory. The results show that the simulated and theoretical absorption spectra significantly overlap. On the premise of keeping the slit, changing the shape of the central graphene will not change the performance of the absorber. When the Fermi energy level of graphene is regulated to 0.95 eV by an applied voltage, the device is polarization independent and exhibits a strong absorption of more than 90% with a spectral width of more than 4.1 THz. This study will therefore have potential applications in optical switching, modulators, and energy harvesting, and it will provide further inspiration for the design of terahertz broadband absorbers.

Key words optical device; graphene; slit structure; terahertz absorber; dipole resonance

1 引言

太赫兹波段位于可见光和红外光之间, 具备丰富的频谱资源, 在通信^[1]、生物医疗^[2]和光谱检测^[3]等领域有着重大的战略意义。但缺乏有效的太赫兹功能器件是限制太赫兹技术发展的重要因素之一^[4-5]。太赫兹吸收器在成像^[6]、传感^[7]和隐身^[8]等领域被广泛关注。在实际运用中, 传统的太赫兹吸收器一旦被制造, 其结构大小被固定, 只能对特定频率的太赫兹波进行吸收^[9-10]。因

此, 设计一种可调谐的高性能太赫兹吸收器尤为重要。

为了适应更复杂的电磁环境, 不少学者使用了温度敏感、光敏感和磁敏感的材料^[11-13]。其中, 石墨烯作为一种典型的电可调材料, 其由呈六角形分子结构的 6 个碳原子所结合组成^[14]。石墨烯拥有独特的高迁移率的载流子, 且费米能级可以通过添加电极来实现精确控制^[15-16], 从可见光到太赫兹波段都具有超快的响应^[17]。因此, 石墨烯材料的性质与可调太赫兹吸收器要求十分符合, 利用石墨烯与超材料相结合来设计灵

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-17; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 四川省教研教改项目(JG2021-901)、国家自然科学基金(11875228)、西南科技大学省级大学生创新创业训练计划(S202210619105)、西南科技大学创新基金精准专项(JZ22-087)、西南科技大学数理学院创新基金(LX20210045, LX20210038)

通信作者: *zhouzigang1973@163.com; **Yangyong.jia@163.com

活调谐的太赫兹吸收器。

不同图案的石墨烯激发不同谐振频率的等离子激元,实现多峰或宽带吸收的设计方法主要有 2 种:一是顶层平面设计^[18-19],即在顶层设计不同形状大小的结构单元来产生共振模式,并相互耦合叠加实现宽带吸收;二是垂直耦合设计^[20-21],即多层结构之间进行杂交融合形成多级共振。2020 年,Shen 等设计了一种顶层为环状多孔石墨烯的 3 层吸收器,模拟结果表明,在 0.91~1.86 THz 范围内吸收率达到 90% 以上,此外通过增加一层环状多孔的石墨烯,吸收带宽增加 0.2 THz^[22]。2021 年 Xie 等^[23]提出了一种由不同几何谐振器结构组合的吸收器,该吸收器具有较宽的吸收带宽,实现 1.26 THz 的宽带范围(吸收>80%)。同年,一种由圆环和交叉结构组合的石墨烯层吸收器被提出,在 1.23 THz 到 1.68 THz 波段存在四级共振和表面等离子激元共振,其吸收率达到 99% 以上^[24]。但截至目前,基于石墨烯的超宽带完美吸收器的吸收效果和宽度仍有待提高,器件结构需要更加简化。

本研究工作设计了一个基于石墨烯的偏振不敏感的宽带太赫兹吸收器,其主要结构从上到下依次为圆盘形与 L 形石墨烯、SiO₂和金属金。通过理论和模拟的方法进行计算,发现器件的吸收率超过 90% 的范围达到 4.14 THz 的频谱宽度。然后,利用电磁场分布来具体分析宽带吸收的产生机理,研究器件结构的几何参数变化对吸收性能的影响。总之,设计的器件有着极大的应用潜力,包括智能开关、能量收集、调制器和滤波器等领域。

2 结构设计与理论分析

设计的吸收器与传统的吸收器结构保持一致,主要由 3 层结构组成,如图 1(a)所示。其中,顶层的石墨烯图案如图 1(b)所示,主要由 L 形和圆形组合而成,其优化后的结构参数为 $P=4\ \mu\text{m}$ 、 $L=1.9\ \mu\text{m}$ 、 $R=1.35\ \mu\text{m}$;中间层为 SiO₂材料,介电常数 $\epsilon_s=3.8$,厚度 $d=7.5\ \mu\text{m}$;下层采用金属金,厚度 $t=2\ \mu\text{m}$,电导率 $\sigma=4.09\times 10^7\ \text{S/m}$ ^[25]。

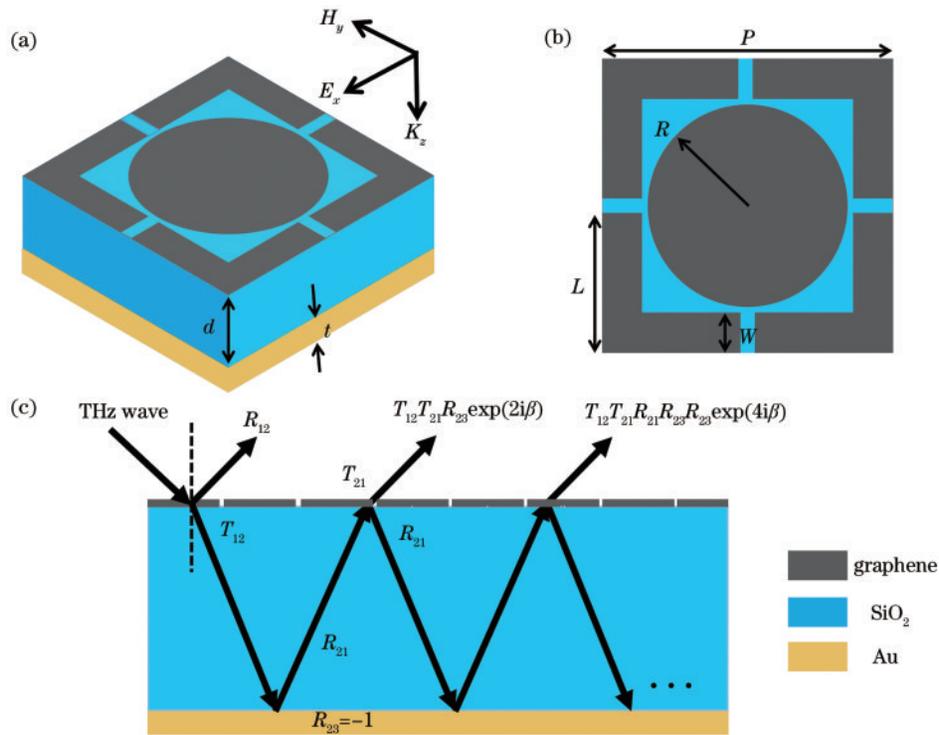


图 1 超宽带完美吸收器的结构示意图。(a) 三维整体结构;(b) 俯视平面;(c) 传播路径

Fig. 1 Structure schematic diagram of the ultra wideband perfect absorber. (a) Three-dimensional overall structure; (b) top view plane; (c) propagation path

通过 COMSOL 仿真软件对吸收器进行模拟并优化其结构参数。器件的吸收率 $A=1-R-T$ ^[26-27], R 、 T 分别为器件的反射率和透射率。为了使器件达到完美吸收,需要最大限度地减少 R 、 T , 所设计的金属层可以有效防止太赫兹波透射,即 $T=0$, 当合理的模型结构被外界电磁波照射时,会发生电磁共振,即 $R=0$, 从而达到完美吸收^[28]。

为了清晰地揭示太赫兹吸收器原理,采用多重反射干涉理论(MRIT)^[29-30]。图 1(c)为太赫兹波在吸收器的传播路径。太赫兹波从空气中斜入射进入吸收器,一部分在石墨烯层上表面发生反射,反射系数为 R_{12} ,另一部分经透射进入 SiO₂层,透射系数为 T_{12} 。而透射进入 SiO₂层的太赫兹波到达金属层时,会增加一个复相位因子。经过全反射,再次通过 SiO₂层后,一

部分透射进入空气,此时透射出的太赫兹波的振幅大小为 $T_{12}T_{21}R_{23}\exp(2i\beta)$, R_{23} 为金属板的反射系数, T_{21} 为太赫兹波从 SiO_2 入射到空气的透射系数。还有一部分又会经过多次反射,而这种叠加的多重反射能抵消空气与石墨烯表面的直接反射,从而实现高水平的吸收。器件总反射系数^[31]可表示为

$$R = R_{12} + T_{12}T_{21}R_{23}\exp(2i\beta) + T_{12}T_{21}R_{21}R_{23}R_{23}\exp(4i\beta) + \dots, \quad (1)$$

式中: $R_{23} = -1$; $\beta = \sqrt{\epsilon_s} k_0 d$ 为 SiO_2 层的传播相位; k_0 为自由空间中的波矢大小。对式(1)进行简化得

$$R \approx R_{12} - \frac{T_{12}T_{21}\exp(2i\beta)}{1 + R_{21}\exp(2i\beta)}. \quad (2)$$

石墨烯的总电导率 σ 主要由带内电导率 σ_{inter} 和带间电导率 σ_{intra} 两部分组成^[15,32]。对室温条件的太赫兹波段而言,根据 Pauli 排斥原理, σ_{intra} 相对于 σ_{inter} 可以忽略不计,所以只需对 σ_{inter} 进行数学求解,转化为 Drude 电导形式。因此, σ ^[32-34] 可表示为

$$\sigma \approx \sigma_{\text{inter}} \approx \frac{ie^2|E_f|}{\pi\hbar^2(\omega + i\tau^{-1})}, \quad (3)$$

式中: τ 为石墨烯的弛豫时间; E_f 为石墨烯的费米能级; ω 为入射太赫兹波的角频率; \hbar 为普朗克常数 ($1.05 \times$

$10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$); e 为电子电荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。石墨烯的介电常数 ϵ 和电导率 σ 之间的关系^[34-35] 可表示为

$$\epsilon = 1 + i\sigma/\omega\epsilon_0 t_g, \quad (4)$$

式中: ϵ_0 为真空中的介电常数; t_g 为石墨烯的厚度。石墨烯是一种典型二维材料,所以设定单层石墨烯的厚度为 1 nm ^[36-39]。此外,复现相关研究论文^[11,19,40-41] 的结果,保证整体设计方法的精准性。

3 结果与讨论

在 COMSOL 软件中设置石墨烯的 $\tau = 0.1 \text{ ps}$, $E_f = 0.95 \text{ eV}$ 。当入射电磁波垂直于器件照射时,吸收器在 $2 \sim 8 \text{ THz}$ 的吸收、反射曲线如图 2(a) 所示。由图 2(a) 虚线可知,吸收器存在 3 个峰值,且在 $3.02 \sim 7.16 \text{ THz}$ 范围内的吸收率都超过了 90% ,吸收器的带宽达 4.14 THz ,相对带宽达 80% 以上,极大地提升了石墨烯的可调谐太赫兹吸收器的性能。可以明显地看出,模拟的吸收光谱与 MRIT 理论吸收光谱偏差很小,偏差的主要原因是理论认为此吸收器无损耗。此外,如图 2(b) 所示,对横电 (TE) (外部电磁波的电场只存在于 Y 方向) 和横磁 (TM) (磁场只存在于 X 方向) 模式的吸收效果完全重合,所设计结构在 X 轴和 Y 轴都高度对称,统一在 TE 模式下展开后续讨论。

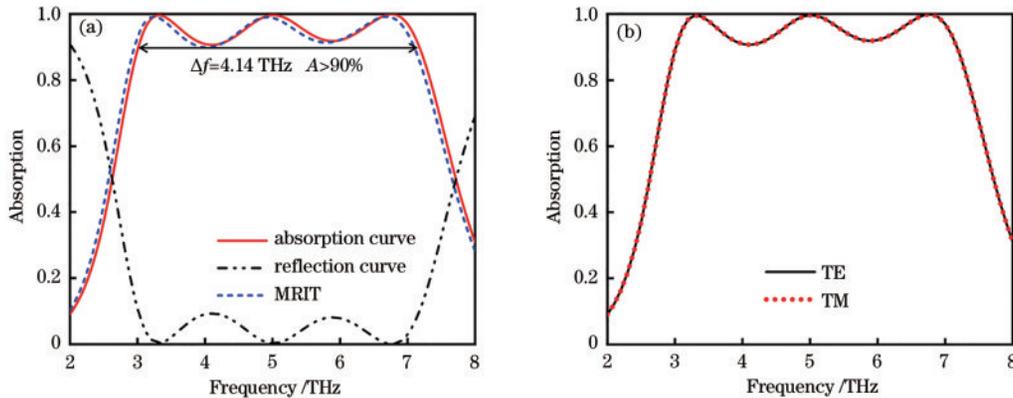


图 2 器件的吸收反射曲线。(a) 模拟计算的吸收、反射曲线和采用 MRIT 理论计算的吸收曲线; (b) TE、TM 模式下的吸收曲线
Fig. 2 Absorption and reflection curves of the device. (a) Simulated absorption and reflection curves and absorption curves calculated using MRIT theory; (b) absorption curves in TE and TM modes

如表 1 所示,与其他相似的吸收器相比,所设计的吸收器结构简单,且在带宽 $> 90\%$ (FB) 和相对带宽方面远远超过其他相似的吸收器,这也使所设计的吸收

器在电磁屏蔽和能量转化领域发挥着更多的作用。

为探究该吸收器宽频带强吸收的内在机制,绘制了不同图案的石墨烯层吸收光谱图,如图 3(a) 所示。

表 1 可调谐超宽带吸收器的比较

Table 1 Comparison of tunable ultrawideband absorbers

Reference	Material	Number of absorber layers	FB / THz	Modulation range / %
[19]	Graphene	3	2.17	16-99
[22]	Graphene	5	1.15	55-99
[42]	VO^{2+} Graphene	3	2.15	5-99
[43]	Graphene	3	2.00	75-99
[44]	Graphene + Au	3	3.40	18-99
Proposed	Graphene	3	4.06	1-99

图 3(a) 中的标识频率位置处的 Z 方向上的电场分布图 (E_z), 如图 3(e) 所示, 图 3(b)~图 3(d) 分别是单独圆形、4 个 L 形和圆形 + L 形石墨烯吸收器的俯视图首先, 对 2 种单独阵列而言, 圆盘结构在高频位置 f_1 处存在一个峰值, 吸收率达到 80%, 而 L 形结构的整体吸收较好, 在低频和中频位置 (f_2 和 f_3) 存在两处凸起。两种单独阵列产生吸收都是石墨烯边缘位置激发较弱的表面等离子体激元, 形成沿入射电场方向的少量偶极子分布。而

对组合结构而言, 也存在着 3 个峰值, 这可能是单独阵列之间的耦合造成的。结合图 3(e) 各个频率处的电场分布图, f_1 和 f_6 处的电场都分布在竖直方向, f_2 与 f_4 处的电场都分布在水平方向, 而 f_3 和 f_5 在水平和竖直方向上都存在部分电场分布。L 形的石墨烯层负责中低频带的吸收, 圆盘形主导中高频部分的吸收, 且在每一频率处的电场都存在偶极子分布, 该分布引起强烈的偶极子共振, 与入射电磁波发生作用从而导致高吸收^[45]。

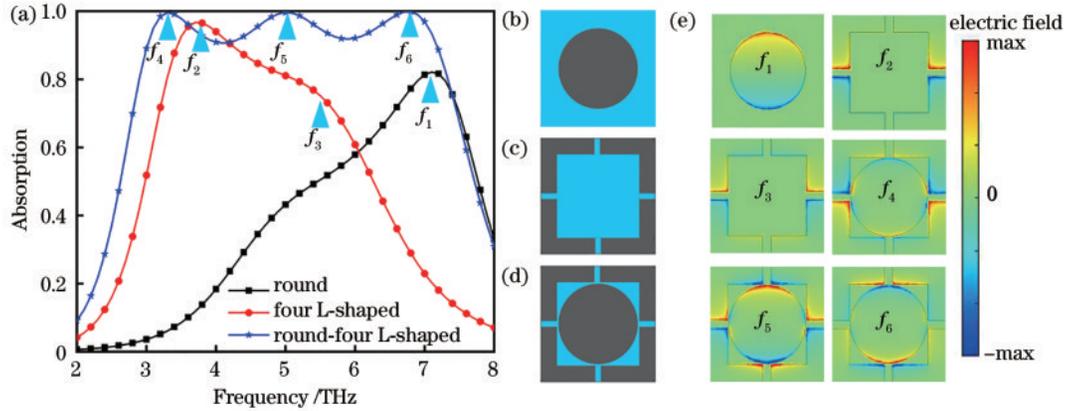


图 3 不同图案的吸收曲线及其对应的 Z 方向上的电场分布图。(a) 单独圆形、4 个 L 形和圆形 + 4 个 L 形石墨烯的吸收曲线; (b) 单独圆形石墨烯吸收器俯视图; (c) 4 个 L 形石墨烯吸收器俯视图; (d) 圆形 + L 形石墨烯吸收器俯视图; (e) 不同频率位置对应的 Z 方向上的电场分布

Fig. 3 Absorption curves for different patterns and their corresponding electric field distribution in the Z-direction. (a) Absorption curves of individual circular; 4 L-shaped and circular + 4 L-shaped graphene; (b) top view of individual circular graphene absorber; (c) top view of 4 L-shaped graphene absorber; (d) top view of circular + L-shaped graphene absorber; (e) electric field distribution in the Z-direction corresponding to different frequency positions

此外, 分析吸收器的电场模分布 $|E|$ 也是解释宽带吸收器的重要步骤, 进一步绘制吸收率大于 90% 的极限频率 (3.02、7.16 THz) 和 3 个峰值频率的 $|E|$ 图, 如图 4 所示。在低频率处 (2.9、3.32 THz), 电场主要被局域到交叉结构的水平狭缝跟圆盘形状的交接处, 此时石墨烯层与外界入射的太赫兹波产生耦合, 并引起电偶极子共振, 使入射光的能量在 SiO_2 层中被消耗, 进而实现吸收器的完美吸收^[46-47]。随着频率的增加, 局域电场从边缘逐渐移动到中间位置, 中间频率位置 (5.02 THz) 的电场已经大部分被局域到沿电场方向上圆盘和 L 形组合结构的狭缝处, 而高频位置 (6.76、7.16 THz) 的电场已经全部局域至此。从外至内, 不同位置的电偶极子共振之间的耦合也是产生宽带吸收的重要原因, 该观点也可以从吸收曲线中得到体现。综上所述, 器件产生的超宽带吸收是两种形状石墨烯产生的偶极子和主要集中在狭缝处产生的偶极子分布及其电偶极子共振之间的相互耦合引起的, 即组合结构之间的杂交和耦合作用。

通过改变内部石墨烯的形状, 进一步描述所设计的吸收器特点。如图 5(a) 所示, 内部为圆形、正菱形和八边形石墨烯吸收器的吸收曲线, 所对应的顶层图案如图 5(b)~图 5(d) 所示, 随着圆形石墨烯变化为正

四边形和正八边形石墨烯, 可以发现吸收器的吸收率的变化并不大。L 形和中间其他形状的石墨烯耦合产生的狭缝一直存在, 此时大部分的电磁场应该被强烈局域在狭缝处。因此, 设计超宽带吸收器的一个非常高效的方式是在顶层平面上设计不同形状图案, 构造出空气狭缝以形成耦合, 从而增加 FB, 增强吸收率。

通过改变吸收器结构的参数, 可以调整石墨烯的磁导率和介电常数, 为了使吸收器保持完美吸收, 需要优化其结构参数。此外, 在实际制作过程中, 精准控制器件的几何参数较为困难, 所以后续讨论几何误差对器件性能的影响。

如图 6(a) 所示, 随着 SiO_2 层厚度的增加, 吸收曲线逐渐红移, 低频部分的吸收率一直保持增长趋势, 中间频率的峰值持续保持着 99% 以上的吸收, 而高频的吸收峰值先增大后减少。这是 SiO_2 厚度的变化, 导致吸收器的有效阻抗和自由空间阻抗在中低频率处相互匹配, 而在高频部分先匹配后打破。在图 6(b)~图 6(d) 中, 分别讨论了圆盘的半径 R 与 L 型石墨烯的长 L 、宽 W 对吸收的影响。随着 R 的增大, 高频部分的吸收率变化明显, 而中低频的吸收效果几乎不变。随着 L 变长, 吸收率的变化正好相反, 这也证明了前面所

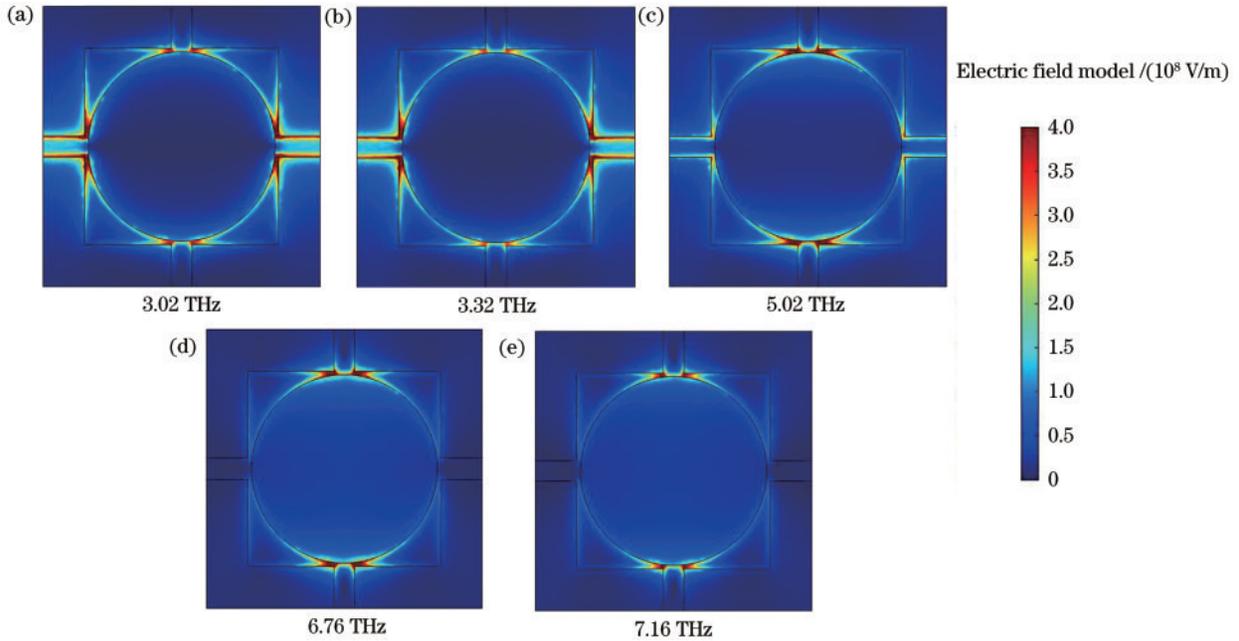


图 4 不同频率下的电场模的分布图。(a) 器件吸收率为 90% 时左频率位置 3.02 THz 处的电场分布; (b) 3.32 THz 处的电场分布图; (c) 5.02 THz 处的电场分布图; (d) 6.76 THz 处的电场分布图; (e) 7.16 THz 处的电场分布图

Fig. 4 Distribution of electric field modes at different frequencies. (a) Electric field distribution at the left frequency position (3.02 THz) at 90% device absorption; (b) electric field distribution at 3.32 THz; (c) electric field distribution at 5.02 THz; (d) electric field distribution at 6.76 THz; (e) electric field distribution at 7.16 THz

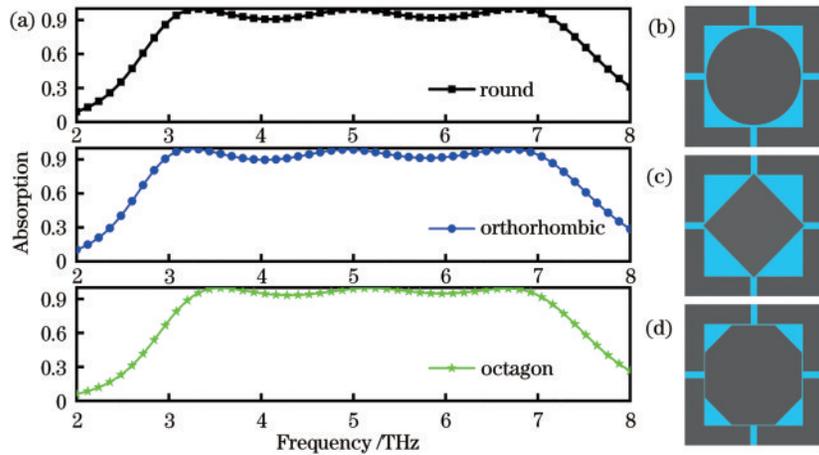


图 5 改变内部石墨烯形状时器件的吸收曲线及其对应的顶层图案。(a) 内部为圆形、正菱形和八边形石墨烯的吸收曲线; (b) 内部为圆形石墨烯的顶层图案; (c) 内部为正菱形的顶层图案; (d) 内部为八边形的顶层图案

Fig. 5 Absorption curves of the devices and their corresponding top layer patterns when changing the shape of the content graphene. (a) Absorption curves of round, orthorhombic and octagon graphene inside; (b) top layer pattern of round graphene inside; (c) top layer pattern of orthorhombic inside; (d) top layer pattern of octagon inside

述的 L 结构主导中低频的吸收, 圆盘结构负责中高频部分吸收。由图 6(d) 可知, 当 W 在 $0.45 \sim 0.60 \mu\text{m}$ 变化时, 整个频段的吸收率都持续增长。因为 L 形结构的宽度也可以定义成 L 形结构和圆盘之间的距离, 随着距离的减少, 圆盘和 L 形石墨烯之间共振耦合增加, 从而使器件的吸收率持续增强。但二者距离过小会导致狭缝变小, 从而使得局域电场减少, 吸收率降低。综上所述, 器件在保持高吸收的前提下, 结构参数都可以在一定范围内变化, 这将降低实际制作过

程中的成本和难度。

器件在实际运用过程中, 外界入射的太赫兹波不一定垂直于器件表面, 所以研究器件的偏振角度的敏感性是非常必要的。如图 7(a)、图 7(b) 分别为 TE、TM 模式下器件随着入射角变化的吸收光谱图。在 TE 模式下, 入射角在 $0^\circ \sim 70^\circ$ 的变化过程中, 当入射角为 30° 时, 吸收强度和频谱宽度变化不大。继续增大入射角, 频谱宽度和吸收率都缓慢减少, 直到入射角为 50° 时, 吸收率大于 80% 的频谱宽度超过 4 THz。当入

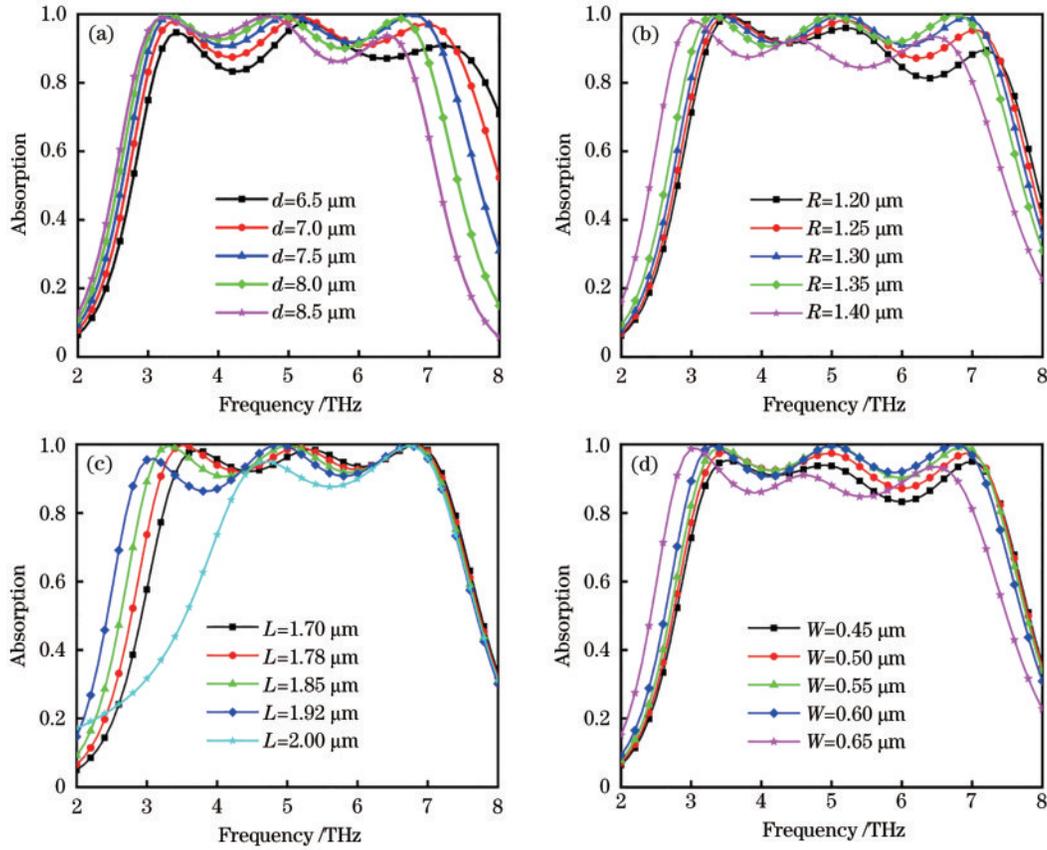


图 6 不同结构参数的吸收曲线图。(a)不同的介电层厚度 d 的吸收曲线图；(b)不同圆形石墨烯的半径 R 的吸收曲线图；(c)不同 L 形石墨烯长度 L 的吸收曲线图；(d)不同 L 形石墨烯宽度 W 的吸收曲线图

Fig. 6 Absorption curve plots for different structural parameters. (a) Plot of absorption curves for different dielectric layer thicknesses d ; (b) plot of absorption curves for different radii R of circular graphene; (c) plot of absorption curves for different L-shaped graphene lengths L ; (d) plot of absorption curves for different L-shaped graphene widths W

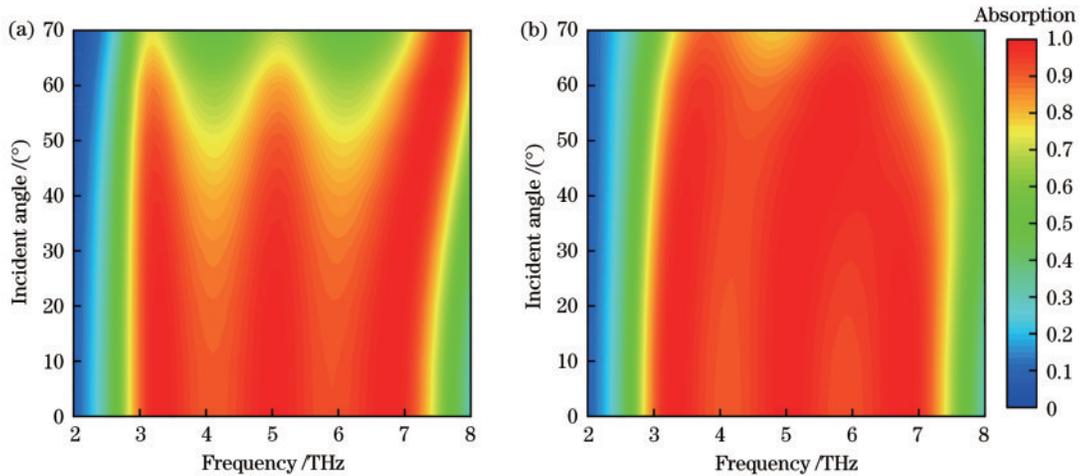


图 7 入射角从 0° 到 70° 变化的吸收光谱图。(a)TE 模式下的吸收光谱图；(b)TM 模式下的吸收光谱图
Fig. 7 Absorption spectrograms for varying the angle of incidence from 0° to 70° . (a) Absorption spectrogram in TE mode; (b) absorption spectrogram in TM mode

射角大于 50° 时,吸收效果明显降低,太赫兹波作用在吸收器表面的能量大大减少,所以吸收率会迅速降低^[24]。在 TM 模式下,入射角在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内,吸收效果和频谱宽度都具有很好的效果,且当电磁波以 40° 斜入射时,其吸收效果比垂直入射时更好,这可能是在

TM 模式下随着角度增大,吸收体表面的偶极子被有效激发,最终使吸收效果增强。综上所述,虽然入射角度增大,所设计超材料的性能会有所下降,但所设计的吸收器在两种极化状态下仍可以在宽角度入射下实现非常好的吸收效果。

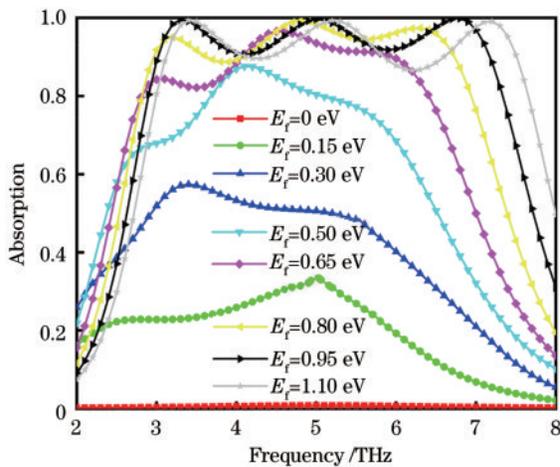


图8 吸收器在不同石墨烯费米能级下的吸收曲线

Fig.8 Absorption curves of the absorber at different graphene Fermi energy levels

器件的主动可调谐的性质在实际中将会有更多的应用空间。石墨烯的费米能级可以通过在石墨烯层上使用离子凝胶来施加外部直流偏置电压 V_g 来进行调节,其关系^[15,48]可描述为

$$E_f = V_f \sqrt{\pi \epsilon_0 \epsilon_s V_g / ed}, \quad (5)$$

式中:费米速度 $V_f = c/300$ 。首先,当 $E_f = 0$ eV 时,吸收器的吸收率只达到 1%,几乎不发生吸收,在上层的石墨烯表面发生全反射;而当 $E_f = 0.95$ eV 时,吸收器实现超宽带的完美吸收,只需要通过外加电压就可以精确地控制器件在完美吸收器和完全反射器之间灵活切换,这将使所设计的吸收器在光开关和调制器等领域发挥重要作用。此外,随着 E_f 从 0 eV 不断增加到 1.1 eV,吸收曲线不断地蓝移,吸收率大小和宽带也不断增加,在 $E_f = 0.95$ eV 时,吸收率的综合效果最好,随着 E_f 的增加,更多的载流子能激发等离激元。总的来说,所设计的吸收器具有主动可调谐性质,能更好满足实际运用的要求。

4 结 论

综上所述,基于石墨烯超材料设计了一种极化不敏感、功能可调和高灵敏度超宽带吸收器。通过改变外加电压来调节石墨烯的费米能级,使所设计的吸收器在超宽带完美吸收和完全反射之间主动切换。当石墨烯的费米能级调控到 0.95 eV 时,器件在 3.02~7.16 THz 范围内的吸收率都高于 90%。通过电磁场分布 ($|E|$ 和 E_z) 和改变内部石墨烯形状分析发现,在狭缝处产生局域等离子体共振及其引起的电偶极子共振之间的耦合作用是产生宽带完美吸收的主要原因。因此,本研究在太赫兹传感器、滤波器和智能开关等领域有着广阔的应用前景,也为太赫兹超宽带吸收器的设计提供更多、更具体的思路。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Yin X X, Baghai-Wadji A, Zhang Y C. A biomedical perspective in terahertz nano-communications: a review [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(10): 9215-9227.
- [3] Liu W W, Zhang Z L, Su Q, et al. Interdigitated photoconductive antenna-based two-color femtosecond laser filamentation THz time-domain spectral detection [J]. Optics Express, 2022, 30(11): 18562-18570.
- [4] Zhang X Q, Xu Q, Xia L B, et al. Terahertz surface plasmonic waves: a review[J]. Advanced Photonics, 2020, 2(1): 014001.
- [5] Chen C X, Chai M Q, Jin M H, et al. Terahertz metamaterial absorbers[J]. Advanced Materials Technologies, 2022, 7(5): 2101171.
- [6] Sung S, Dabironezare S, Llombart N, et al. Optical system design for noncontact, normal incidence, THz imaging of *in vivo* human cornea[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(1): 1-12.
- [7] Wu X L, Zheng Y, Luo Y, et al. A four-band and polarization-independent BDS-based tunable absorber with high refractive index sensitivity[J]. Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP, 2021, 23(47): 26864-26873.
- [8] Cheng Y Y, Wang Y X, Niu Y Y, et al. Concealed object enhancement using multi-polarization information for passive millimeter and terahertz wave security screening[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6350-6366.
- [9] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [10] Huang M H, Wei K H, Wu P H, et al. Terahertz broadband absorber based on a combined circular disc structure[J]. Micromachines, 2021, 12(11): 1290.
- [11] Zheng Z P, Zheng Y, Luo Y, et al. Terahertz perfect absorber based on flexible active switching of ultra-broadband and ultra-narrowband[J]. Optics Express, 2021, 29(26): 42787-42799.
- [12] Bing P B, Guo X Y, Wang H, et al. Characteristic analysis of a photoexcited tunable metamaterial absorber for terahertz waves[J]. Journal of Optics, 2019, 48(2): 179-183.
- [13] Ning J, Chen K, Zhao W B, et al. An ultrathin tunable metamaterial absorber for lower microwave band based on magnetic nanomaterial[J]. Nanomaterials, 2022, 12(13): 2135.
- [14] Geim A K. Graphene: status and prospects[J]. Science, 2009, 324(5934): 1530-1534.
- [15] Beheshti Asl A, Pourkhalil D, Rostami A, et al. A perfect electrically tunable graphene-based metamaterial absorber[J]. Journal of Computational Electronics, 2021, 20(2): 864-872.

- [16] Theodosi A, Tsilipakos O, Soukoulis C M, et al. 2D-patterned graphene metasurfaces for efficient third harmonic generation at THz frequencies[J]. *Optics Express*, 2022, 30(1): 460-472.
- [17] Grigorenko A N, Polini M, Novoselov K S. Graphene plasmonics[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(11): 749-758.
- [18] Zhang R Y, Luo Y H, Xu J K, et al. Structured vanadium dioxide metamaterial for tunable broadband terahertz absorption[J]. *Optics Express*, 2021, 29(26): 42989-42998.
- [19] Han J Z, Chen R S. Tunable broadband terahertz absorber based on a single-layer graphene metasurface[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 30289-30298.
- [20] 马栎敏, 徐晗, 刘禹煌, 等. 基于石墨烯超材料的宽频带太赫兹吸收器[J]. *光学学报*, 2022, 42(9): 0923001.
Ma L M, Xu H, Liu Y H, et al. Broadband terahertz absorber based on graphene metamaterial[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 0923001.
- [21] Shen H Y, Liu F X, Liu C Y, et al. A polarization-insensitive and wide-angle terahertz absorber with ring-porous patterned graphene metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(7): 1410.
- [22] Fardoost A, Vanani F G, Amirhosseini A, et al. Design of a multilayer graphene-based ultrawideband terahertz absorber[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2017, 16(1): 68-74.
- [23] Xie T, Chen D B, Yang H P, et al. Tunable broadband terahertz waveband absorbers based on fractal technology of graphene metamaterial[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(2): 269.
- [24] Feng H, Xu Z X, Li K, et al. Tunable polarization-independent and angle-insensitive broadband terahertz absorber with graphene metamaterials[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 7158-7167.
- [25] Lan J X, Zhang R X, Bai H, et al. Tunable broadband terahertz absorber based on laser-induced graphene[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(7): 073701.
- [26] 于新颖, 杨森, 樊东燕. 可调谐极化不敏感太赫兹吸收器的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(3): 0316004.
Yu X Y, Yang S, Fan D Y. Design of tunable polarization insensitive terahertz absorber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(3): 0316004.
- [27] 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频吸收器[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0316001.
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.
- [28] Zheng Z P, Zheng Y, Luo Y, et al. A switchable terahertz device combining ultra-wideband absorption and ultra-wideband complete reflection[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, 2022, 24(4): 2527-2533.
- [29] Chen H T. Interference theory of metamaterial perfect absorbers[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7165-7172.
- [30] Yang D Q, Zhang C, Ju X C, et al. Multi-resonance and ultra-wideband terahertz metasurface absorber based on micro-template-assisted self-assembly method[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2547-2556.
- [31] Zhuo S S, Zhou F Q, Liu Y L, et al. Terahertz multimode modulator based on tunable triple-plasmon-induced transparency in monolayer graphene metamaterials[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2022, 39(4): 594-599.
- [32] Xu B Z, Gu C Q, Li Z, et al. A novel structure for tunable terahertz absorber based on graphene[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23803-23811.
- [33] Andryieuski A, Lavrinenko A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 9144-9155.
- [34] Chen Z H, Chen H, Yin J K, et al. Multi-band, tunable, high figure of merit, high sensitivity single-layer patterned graphene: perfect absorber based on surface plasmon resonance[J]. *Diamond and Related Materials*, 2021, 116: 108393.
- [35] 薛钊, 张海婷, 杨茂生, 等. 基于图形化石墨烯的可调谐宽光谱太赫兹吸收器的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(5): 0530002.
Xue Z, Zhang H T, Yang M S, et al. Tunable broadband spectral terahertz absorber based on graphic graphene[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0530002.
- [36] 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.
- [37] Qian J J, Zhou J, Zhu Z, et al. Polarization-insensitive broadband THz absorber based on circular graphene patches[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(10): 2709.
- [38] Lü Y S, Liu W, Tian J P, et al. Broadband terahertz metamaterial absorber and modulator based on hybrid graphene-gold pattern[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2022, 140: 115142.
- [39] Deng B C, Guo Q S, Li C, et al. Coupling-enhanced broadband mid-infrared light absorption in graphene plasmonic nanostructures[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 11172-11178.
- [40] Liu W, Lv 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.
- [41] Li Z Y, Yi Z, Liu T, et al. Three-band perfect absorber with high refractive index sensing based on an active tunable Dirac semimetal[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, 2021, 23(32): 17374-17381.
- [42] Zheng Z P, Luo Y, Yang H, et al. Thermal tuning of terahertz metamaterial absorber properties based on VO₂[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, 2022, 24(15): 8846-8853.
- [43] Chen H, Chen Z H, Yang H, et al. Multi-mode surface plasmon resonance absorber based on dart-type single-layer graphene[J]. *RSC Advances*, 2022, 12(13): 7821-7829.

- [44] Liu Z M, Guo L, Zhang Q M. Analytical method for designing tunable terahertz absorbers with the desired frequency and bandwidth[J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 39777-39787.
- [45] Li T, Chen H, Sun H A, Yang X T, et al. Microtopography-guided chessboard-like structure for a broadband terahertz absorber[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, 4(6): 2822-2830.
- [46] Zhang M, Song Z Y. Switchable terahertz metamaterial absorber with broadband absorption and multiband absorption[J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21551-21561.
- [47] Bordbar A, Basiry R, Yahaghi A. Design and equivalent circuit model extraction of a broadband graphene metasurface absorber based on a hexagonal spider web structure in the terahertz band[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(7): 2165-2172.
- [48] Amin M, Siddiqui O, Abutarboush H, et al. A THz graphene metasurface for polarization selective virus sensing[J]. *Carbon*, 2021, 176: 580-591.