

复合石墨烯/硅半球的宽带太赫兹超材料吸收器

孟宪睿^{1,2}, 张 铭^{1,2*}, 席宇鹏^{1,2}, 王如志^{1,2}, 王长昊^{1,2}, 王 波^{1,2}

- (1. 北京工业大学 材料与制造学部 新能源材料与技术研究部, 北京 100124;
2. 北京工业大学 材料与制造学部 新型功能材料教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 提出了一种性能可调的宽带、极化与入射角不敏感的超材料太赫兹吸收器, 该吸收器自上而下分为四层结构, 分别是: 硅半椭球/半球体复合结构、连续石墨烯层、PDMS 介质层和金属背板。通过在 TE 波垂直入射条件下仿真, 在已知结果基础上, 对不同石墨烯化学势和不同结构条件下的电场结果分析表明, 在硅半椭球/半球体亚波长复合结构所形成的连续、多模法布里-珀罗共振, 以及由石墨烯所激发的多个离散的等离子体共振的协同作用下, 其吸收光谱得到平滑和扩展, 使该结构可实现吸收率宽范围可调, 以及接近 100% 吸收率的宽频带吸收特性。特别的, 当石墨烯化学势分别为 0.2 与 0.9 eV 时, 其分别可获得约 5.7 THz 与 7 THz 的宽带太赫兹波吸收 (吸收率超过 90%), 且其最大吸收率接近完美吸收 (约 99.8%)。此外, 该结构还具有 360°极化不敏感和高于 60°的入射角不敏感等优异特性, 在以上角度范围内, 吸收器吸收率仍可保持到 90% 以上。在太赫兹波探测、光谱成像以及隐身技术等方面具有潜在的应用前景。

关键词: 太赫兹; 硅半球层; 化学势; 宽带

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210648

Wideband terahertz metamaterial absorber for composite graphene/silicon hemispheres

Meng Xianrui^{1,2}, Zhang Ming^{1,2*}, Xi Yupeng^{1,2}, Wang Ruzhi^{1,2}, Wang Changhao^{1,2}, Wang Bo^{1,2}

- (1. Institute of Advanced Energy Materials and Devices, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Key Laboratory of Advanced Functional Materials, Ministry of Education, Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: A tunable broadband, polarization insensitive and incident angle insensitive metamaterial terahertz absorber is proposed, which consists of silicon semi-ellipsoid/semi-spherical structure, graphene, dielectric layer and metal back plate. Based on the known results, the electric field results under different chemical potentials of graphene and different structural conditions were analyzed by simulation under the condition of vertical incident TE wave show that under the synergism of continuous and multimode Fabry-Perot resonances formed by silicon semi-ellipsoid/semi-spherical subwavelength structure and multiple discrete plasma resonances excited by graphene the absorption spectrum is smoothed and expanded so that the structure can achieve a wide range of adjustable absorptivity and a broadband absorption characteristic of nearly 100% absorptivity. When the chemical potential of graphene is around 0.2 eV and 0.9 eV, it can obtain about 5.7 THz and 7 THz wideband terahertz

收稿日期: 2021-09-08; 修订日期: 2021-11-04

作者简介: 孟宪睿, 男, 硕士生, 主要从事光电信息与能源材料方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 张铭, 男, 教授, 博士, 主要从事磁电子信息材料与异质结、新型多铁性磁-光-电多场、多功能耦合材料的设计与研发、新型能源材料的设计与预测与磁性智能材料等方面的研究。

wave absorption (the absorption rate is more than 90%), respectively, and its maximum absorption rate is close to perfect absorption (about 99.8%). In addition, the structure is insensitive to 360° polarization and incident angle higher than 60°. In the above angle range, the absorptivity of the absorber can still be maintained to more than 90%. and the structure has potential applications in terahertz wave detection, spectral imaging and stealth technology.

Key words: terahertz; silicon hemispheric layer; chemical potential; wideband

0 引言

太赫兹波是一种频率范围位于微波与红外波段之间的电磁波,因其在军事、通信、生物与医学检测以及安保等领域的巨大应用潜力而日渐获得广泛的关注。但目前,针对太赫兹波的研究与应用仍然是所有电磁波中最不发达的频率范围之一,因而被称为太赫兹间隙^[1-2]。电磁超材料的出现为填补这一空白开辟了新途径,它是一种由亚波长结构组成的周期性阵列,因其独特的电磁特性备受关注。与其他材料不同,超材料无需改变材料本身,只需通过设计不同结构和尺寸来达到操控电磁波,进而对 THz 波产生响应的目的^[3-4]。利用超材料构造的各种太赫兹功能器件已越来越多地见诸于报道^[5],例如超材料传感器^[6]、极化转换器^[7]与吸收器^[8]等。2008 年, Landy 等提出了基于超材料的完美吸收器概念,他们利用开口环等构成的电磁谐振器可对特定频率电磁波实现完美吸收^[9]。然而早期的超材料吸收器由于其共振结构具有强烈的色散,仅能够实现很窄的吸收带宽。为了解决这一问题,研究者们提出了例如多共振器级联以及色散控制等多种方法去扩展超材料吸收器的带宽^[10]。不过,基于传统超材料的电磁波吸收器仍然存在着吸收光谱不可调节的局限性。近十年来,研究者们相继提出了利用微机电系统^[11]和肖特基二极管结构^[12]等方法实现动态可调电磁吸收,但是这些结构复杂的吸收器具有较大的加工难度。

自石墨烯被证明可在自然界稳定存在以来,因其独特的结构与性质吸引了研究者们的大量关注^[13]。在石墨烯的众多特性中,其可通过电掺杂改变光学特性最为引人注目:石墨烯的等离子体频率可以通过改变石墨烯的化学势而改变^[14],在动态吸收等方面具有独特的优势。例如,2013 年 A. Andryieuski 等人利用单层石墨烯结合亚波长金属结构在太赫兹波段实现了窄带和宽带动态可调吸收^[15],但是,该吸收器的调

节形式仅局限于吸收率的调整。2014 年, Y. Zhang 等人将双层石墨烯网格与十字金属亚波长结构相结合,在太赫兹波段实现了极化无关的窄带吸收频率动态可调吸收^[16],可惜的是该吸收器的频率相对调节范围仅有 15%,并且未能实现吸收带宽的扩展。纵观近五年来国内外对基于石墨烯的太赫兹动态吸收研究,实现带宽的扩展和在保证吸收率的前提下实现吸收频率的调节仍然是主要研究目标^[17-18]。

文中利用单层均匀石墨烯与硅材料球面-椭球面复合法布里-珀罗 (FP) 腔结构相结合,设计了一种新型的复合结构的石墨烯基太赫兹超材料吸收器。通过将石墨烯层与硅半球层的梯度变化组合,同时实现偏振无关和宽带高吸收的性能。该吸收器具有高度对称性,偏振角在 90°范围内呈现出广角无关性;且入射角在入射角低于 60°范围内可保持 90%左右的宽带吸收性能。

1 石墨烯调控原理及公式

石墨烯是一种由碳原子组成的单原子层六方晶格二维材料,其电导率可由 Kubo 方程推导出的表面电导率表示。当其化学势 $\mu_C \gg k_B T$ 时,其表面电导率可表示为^[19]:

$$\sigma_{2D} \approx \frac{ie^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i2\pi\Gamma)} \left[\frac{\mu_C}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{\frac{\mu_C}{k_B T}} + 1 \right) \right] + \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2|\mu_C| - (\omega + i2\Gamma)\hbar}{2|\mu_C| + (\omega + i2\Gamma)\hbar} \right] \quad (1)$$

式中: \hbar 、 k_B 与 e 分别为约化的普朗克常数、玻耳兹曼常数以及电子电量; $k_B T$ 表示热能; Γ 是带电粒子散射率,其值设定为 0.43 eV; μ_C 为石墨烯化学势,可由载流子浓度决定^[20]。

$$n_0 = \frac{2}{\pi \hbar^2 v^2} \int_0^{+\infty} \varepsilon [f_0(\varepsilon - \mu_C) - f_0(\varepsilon + \mu_C)] d\varepsilon \quad (2)$$

式中: $f_0 = 1 + e^{\frac{(\varepsilon - \mu_C)}{k_B T}}$ 是费米-狄拉克分布函数,而费米速

度 $v = 1.0 \times 10^6$ m/s。因为,载流子浓度可通过加载在石墨烯上的偏置电压控制。

$$n_0 = \frac{\epsilon_{dielectric} \epsilon_0 V_{bias}}{ed} \quad (3)$$

式中: d 为介质层厚度; $\epsilon_{dielectric}$ 为介质层相对介电常数。因此,可通过偏置电压实现对石墨烯化学势的有效调控。文中利用以下关系:

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_{2D}(\omega)}{t_n} \quad (4)$$

式中: t_n 是石墨烯薄膜的膜厚,在文中的仿真计算中设定为 1 nm。化学势具体调控手段为:如图 1(b)所示,将吸收器石墨烯层外接电源作为正极,底层金属层作为负极,通过增大外加电压的方式增大石墨烯层的化学势。

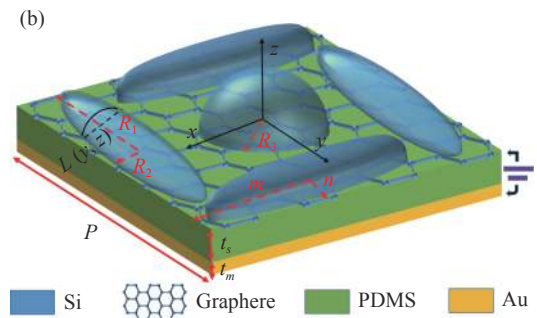
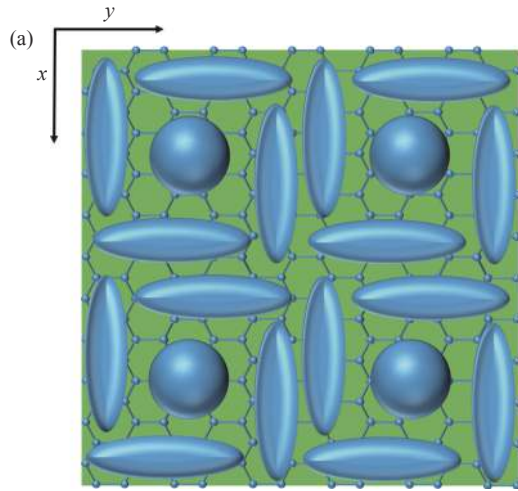


图 1 (a) 宽带吸收器周期结构 x - y 平面示意图; (b) 吸收器的三维单元示意图, 其中 $P = 104 \mu\text{m}$, $R_1 = 11 \mu\text{m}$, $R_2 = 38 \mu\text{m}$, $R_3 = 26 \mu\text{m}$, $t_s = 15 \mu\text{m}$, $t_m = 2 \mu\text{m}$

Fig.1 (a) x - y plane diagram of the periodic structure of the broadband absorber; (b) 3 D schematic diagram of the absorber, where $P=104 \mu\text{m}$, $R_1=11 \mu\text{m}$, $R_2= 38 \mu\text{m}$, $R_3=26 \mu\text{m}$, $t_s=15 \mu\text{m}$, $t_m=2 \mu\text{m}$

2 设计和仿真

吸收器的结构示意图如图 1 所示,由下到上依次为连续金属接地层、PDMS(聚二甲基硅氧烷)薄膜、均匀单层石墨烯以及硅半球-半椭球复合结构层组成。该超材料结构单元的晶格周期 P 为 $104 \mu\text{m}$, 金属金作为接地层,其电导率为 4.561×10^7 S/m, 厚度 t_m 为 $2 \mu\text{m}$ 。其上为介质层,材料为低损耗的 PDMS 聚合物,相对介电常数 $\epsilon_2 = 1.72$, 损耗角正切 $\tan \delta_2 = 0.15$, 介质厚度 $t_s = 15 \mu\text{m}$ 。介质层上为由半椭球与半圆球构成的硅周期结构,其单元结构分别由位于边缘的四个旋转对称半椭球和一个位于结构中心的半圆球组成。半椭球的长轴长 $R_1 = 38 \mu\text{m}$, 短轴长 $R_2 = 11 \mu\text{m}$, 且椭圆中心距离相邻侧壁距离分别为 $m = 40 \mu\text{m}$ 和 $n = 12 \mu\text{m}$, 而中心半圆球半径 $R_3 = 26 \mu\text{m}$ 。相对介电常数 ϵ_1 和损耗角正切 $\tan \delta_1$ 分别为 11.65 和 0.174。仿真基于有限元方法,利用商业计算软件 CST Microwave Studio 2020 中的频域求解器完成。仿真频率范围为

0.1~10 THz, 选择 TE 波作为入射波。其中,沿 x 和 y 方向单胞采用周期性边界条件,则吸收器的吸收率可通过公式 (5) 计算:

$$A = 1 - R - T \quad (5)$$

式中: R 和 T 分别是反射率和透过率。这里,反射率 $R = |S_{11}|^2$, 其中 S_{11} 是入射波的反射系数。由于底部金属反射层具有足够的厚度 ($t_s = 2 \mu\text{m}$), 其远大于太赫兹波的趋肤深度而使得透过率 $T \approx 0$ 。因此,吸收率 A 仅与反射率有关,具体为:

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

对于该结构上层的硅半椭球和半圆球,在 TE 波垂直入射时,波在半球内部沿 x 方向不断反射,该结构等效于几何轮廓尺寸不断随 z 和 y 变化的法

法布里-珀罗 (FP) 谐振腔,如图 2(b) 所示。所提出的吸收器中的激发石墨烯等离子体共振 (GPRS) 与具有波矢量的石墨烯等离子体的驻波模式的形成相关联。

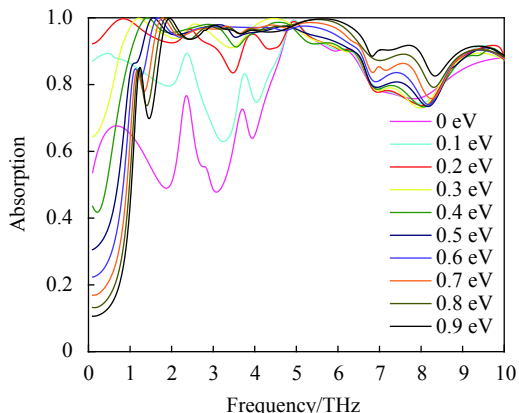


图 2 不同石墨烯化学势 $\mu(0\sim 0.9\text{ eV})$ 条件下吸收器吸收率随频率变化图

Fig.2 Absorption spectra of the proposed absorber with various values of the graphene chemical potential μ from 0 to 0.9 eV

$$K_{GPRS}(\omega) = \frac{\pi\hbar^2}{e^2 E_f} \varepsilon_0 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \omega (\omega + i\tau^{-1}) \quad (7)$$

式中: ε_0 是真空介电常数; ε_1 是硅半球的相对介电常数; ε_2 是 PDMS 的相对介电常数。半椭球和半圆球谐振腔对应的共振角频率 ω 可以用公式 (8) 来计算:

$$\text{Re}(K_{GPRS}(\omega)) = \frac{\pi N + \varphi}{L(y, z)} \quad (8)$$

式中: $\text{Re}(K_{GPRS}(\omega))$ 是 $K_{GPRS}(\omega)$ 的实部。在某个位置的半椭球 F-P 腔长 $L(y, z)$ 可以近似为 $L(y, z) = 2R_2 \sqrt{1 - \frac{y^2 - z^2}{R_1^2}}$, 而半圆球的 F-P 腔长 $L(y, z)$ 可以近似为 $L(y, z) = 2R_3 \sqrt{1 - \frac{y^2 - z^2}{R_3^2}}$ N 是正整数, 是谐振模式的阶数; φ 是 FP 腔中的反射系数的相位, 文中研究可以忽略不计。因此, 半椭球和半圆球第 N 阶模式的 ω_{N1} 和 ω_{N2} 可以分别简化为:

$$\omega_{N1} = \frac{e}{\hbar} \sqrt{\frac{E_f (N\pi + \varphi) R_2}{2\pi\varepsilon_0 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \sqrt{R_2^2 R_1^2 - R_1^2 y^2 - R_2^2 z^2}}} \quad (9)$$

$$\omega_{N2} = \frac{e}{\hbar} \sqrt{\frac{E_f (N\pi + \varphi) R_3}{2\pi\varepsilon_0 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \sqrt{R_3^4 - R_3^2 (y^2 - z^2)}}} \quad (10)$$

不同的整数 N 对应多个不同的离散 GPR, 然而, 文中所示吸收器, 半椭球和半圆球的几何轮廓不断变化, 因此, 通过连续改变 L , 相对于 Y 和 Z 形成一系列 FP 谐振腔; 因此, 将导出具有连续频率的谐振腔等离子体共振 (FPRS)。连续 FPRS 不仅填充离散 GPRS 的频率间隔, 还不会形成重叠的谐振频率。因此, 该宽带吸收器的吸收谱较平滑^[14]。

3 结果与讨论

前期研究表明, 石墨烯的表面电导率与其 THz 波段的化学势 (费米能级) 密切相关。而且, 石墨烯的费米能级可以通过施加偏置电压来调节。因此, 可将石墨烯材料优越的电磁特性应用于吸波器的振幅可调特性。为了验证利用偏置电压的吸收器的可调吸收性能, 课题组模拟了 TE 极化法向入射下的吸收谱与频率和化学势的函数关系。

如图 2 所示, 在室温下 ($T = 300\text{ K}$), 当调整石墨烯片的化学势时, 吸收器的吸收幅值可发生显著变化。当化学势在 $0.0\sim 0.9\text{ eV}$ 之间变化时, 其 0.1 THz 处吸收率可获得 $10\sim 92\%$ 宽范围调节; 而在 1.9 THz 处亦可获得约 $50\sim 100\%$ 的吸收率变化。而且, 当化学势从 0 eV 增加到 0.2 eV 时, 约 $1\sim 10\text{ THz}$ 吸收曲线大体上在逐渐变得平坦, 其平均吸收率获得显著得到提升; 当化学势超过 0.2 eV 后, 吸收光谱除原位于约 0.82 THz 共振峰发生明显蓝移外, 其平均吸收率随化学势的增加变化不明显。此外, 当化学势为 0.2 eV 时, 吸收器可分别在 $0.1\sim 3.1\text{ THz}$ 和 $3.7\sim 6.3\text{ THz}$ (总带宽约 5.7 THz) 的频率范围内获得高于 90% 的吸收性能, 其最高吸收率可达到 99.2% ; 而且, 在 $0\sim 10\text{ THz}$ 的整个太赫兹波段均可获得超过 70% 的吸收率。类似地, 当化学势调整为 0.9 eV 时, 可分别在 $1.7\sim 6.7\text{ THz}$ 、 $6.9\sim 7.9\text{ THz}$, 以及 $8.9\sim 9.9\text{ THz}$ (总带宽约 7 THz) 三个频率范围获得超过 90% 的吸收率, 最高吸收率可达到 99.8% 。

为了更加清晰了解吸收光谱随石墨烯化学势变化的作用机理, 计算了石墨烯化学势 μ 分别为 0.1 、 0.2 、 0.4 eV 时, 在 TE 垂直入射情况下, 在石墨烯层上方 50 nm 处的电场分布, 结果如图 3 所示。

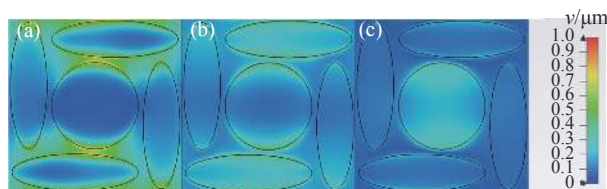


图 3 石墨烯层上方 $z = 50\text{ nm}$ 处吸收器在不同石墨烯化学势 μ 下电场分布图: (a) $\mu = 0.1\text{ eV}$; (b) $\mu = 0.2\text{ eV}$; (c) $\mu = 0.4\text{ eV}$

Fig.3 The electric field distributions ($|E|$) of the proposed absorber on the x - y plane with $z = 50\text{ nm}$ at the different graphene chemical potential μ of (a) 0.1 , (b) 0.2 and (c) 0.4 eV

由图 3 可知, 石墨烯化学势不同时, 吸收器谐振模式存在明显不同。当化学势为 0.1 eV 时, 电场主要被强制约束在半椭球/半球体之间的间隙中, 主要由相邻半椭球/半球体之间的耦合作用造成太赫兹波的捕获与吸收。

当化学势增加至 0.2 eV 时, 电场峰值由间隙移动至半椭球/半球体边缘处, 说明其共振模式由相邻半椭球/半球体之间的耦合转变为半椭球或半球体自身的基频模式, 且当化学势继续增加时, 电场主要分布于半球体上, 其太赫兹吸收主要来源于半球体的电偶极子共振。这说明该结构的优异吸收特性与其结构密切相关。由于石墨烯的存在, 可以激发多个离散的离子体共振 (GPRs)。再结合半椭球/半球体结构所具有的连续改变的几何轮廓, 形成一系列法布里-珀罗谐振腔 (F-P 腔), 因此可导出具有连续频率的法布里珀罗共振 (FPRs)^[21]。而且, 连续的 FPRs 不仅会填充离散 GPRs 的频率间隔, 而且还不会形成重叠的谐振频率。即, 吸收器的宽带吸收光谱是 F-P 腔长度随 y 和 z 的连续变化的结果, 不同谐振频率的重叠可以平滑和扩展整个吸收光谱, 从而获得一种具有平滑吸收光谱的宽带吸收器。如将该结构与介质模式的圆柱体或单纯的半球体结构相比, 半椭球体的存在使其在 y 和 z 方向上具有更温和的梯度分布, 因此有可能使其存在更复杂、更紧凑的 FPRs, 从而获得更宽、更平滑的吸收曲线。

为了探讨石墨烯以及亚波长 F-P 谐振腔的作用, 分别计算了无石墨烯无谐振结构 (NN)、有石墨烯且只有半球结构 (G-SemiSphere)、有石墨烯且只有半椭球结构 (G-SemiEllip)、无石墨烯但具有半椭球/半球谐振结构 (N-SemiEllip SemiSphere) 以及具有石墨烯与半椭球/半球谐振结构 (G-SemiEllip/SemiSphere) 的吸收率随频率变化关系, 结果如图 4 所示。

总体而言, 相对于 NN 结构 (在 0~10 THz 频率范围内, 其平均吸收率约为 40.1%), 表面 F-P 谐振结构与石墨烯的加入可显著提升其吸收性能。如吸收器均具有石墨烯层, 随着在吸收器表面增加半圆球、半椭球以及半椭球/半圆球复合结构, 吸收器的平均吸收率逐步递增, 其分别为 59.8%、84.6% 与 89.3%。

此外, 通过比较有、无石墨烯层的计算结果可知, 石墨烯层的存在对吸收性能有显著影响。当石墨烯

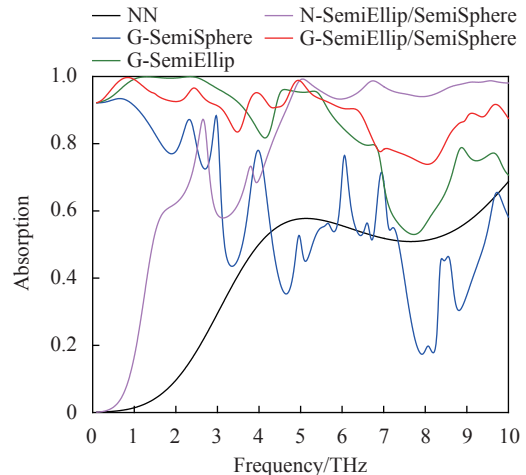


图 4 $\mu = 0.2$ eV 时五种不同结构的吸收谱: (1) 无石墨烯无谐振结构; (2) 有石墨烯且只有半球结构 (蓝线); (3) 有石墨烯且只有半椭球结构 (绿线); (4) 无石墨烯但具有半椭球/半球谐振结构 (粉线); (5) 有石墨烯与半椭球/半球谐振结构 (红线)

Fig.4 (a) Simulated absorption spectra of the proposed G-SemiEllip/SemiSphere absorber (red line) and four other absorbers with NN (black line), G-SemiSphere (blue line), G-SemiEllip (green line) and N-SemiEllip/SemiSphere (pink line)

不存在时, 特别是在 5 THz 以下的频率区域, 整体吸收光谱性能显著恶化。在吸收器中增加均匀石墨烯层, 可显著改善 0~5 THz 范围的吸收性能, 从而将吸收器平均吸收率从 76.2% 提高到 89.3%。上述结果表明, 石墨烯层与表面半椭球/半圆球复合 F-P 谐振腔结构对于改善吸收器性能是非常有效的。

此外, 课题组通过分析吸收器在不同共振频率下的电场分布以了解其吸收器作用机理。图 5 为以 0.82 THz 与 4.95 THz 共振频率为例, 分别取石墨烯化学势为 0.2 eV, 且在石墨烯层上方 50 nm 处的电场强度分

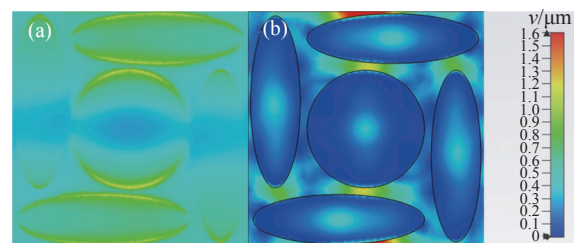


图 5 在 (a) 0.82 THz 和 (b) 4.95 THz 的不同频率下, 在 $z = 50$ nm 的 x - y 平面上吸收器的电场分布 ($|E|$)

Fig.5 The electric field distributions ($|E|$) of the proposed absorber on the x - y plane with $z = 50$ nm at the different frequencies of (a) 0.82 THz, and (b) 4.95 THz

布。计算均假设入射波为垂直入射的 TE 极化波。

由图可知,在这两个频率下,吸收体分别在半椭圆/半球体边缘或其间隙形成强场约束,从而产生高效的太赫兹捕获和吸收。当共振频率为 0.82 THz 时,电场被限制在半椭圆与半球体的边缘;而在共振频率 4.95 THz 时,电场则被强制约束在半椭圆/半球体之间的间隙中。这说明在 0.82 THz 共振频率下的吸收主要是由于单独的半椭圆或半球体的基频共振模式(电偶极子共振);而在 4.95 THz 共振频率下,则主要是由于相邻半椭圆/半球体之间的耦合作用。再结合图 1(a)可知,不同共振区可以产生重叠以实现宽带吸收。而且,据参考文献 [14] 报道,半椭圆 F-P 谐振腔结构在在较高的谐振频率下,由于不同的谐振模式的严重重叠,即形成混合模式谐振,模式特性将变得更加复杂,可使吸收曲线变得更为平坦,从而有利于实现宽带高效吸收。

进一步,笔者课题组研究了太赫兹吸收行为与极化和入射角的关系。为了简化分析,将化学势取为 0.2 eV,并固定除极化角或入射角以外的其他所有吸收器参数。图 6(a)给出了垂直入射波偏振角在 0°~90°之间变化时该吸收体的吸收光谱。吸收率甚至随入射角增大而获得一定提高,这可能是由于随着入射角 θ 的增大,结构某些部分的寄生共振增加,从而产生一定的广角吸收特性,该吸收特性应该主要与产生亚波长结构的谐振有关,而与入射角的依赖性较小。对于 TM 偏振,即使在 70~80°的角度下,最大吸收率仍然很大。这是因为入射波的磁场方向可随入射角的变化而变化,这对于有效驱动表面亚波长谐振结构、石墨烯,以及底部金属层之间的循环电流是有利的,对于保持阻抗匹配也是非常重要的。上述结果表明,该吸收体的半椭圆/半球体亚波长结构可以补偿石墨烯超材料表面与自由空间太赫兹波之间的动量不匹配,从而表现出优良的广角特性。

最后,在制造方面,首先 300 °C 下通过常规的真空中镀膜工艺在石英基板表面镀上 1~2 μm 厚度的金属反射镜;PDMS 溶液的预聚体与固化剂按照 10:1 的比例混合,用 60 wt% 甲苯稀释,将制备好的 PDMS 溶液放于 Si 基板上在 100 °C 下用热板固烘烤两小时,得到 12~18 μm 厚度的 PDMS 薄膜;运用化学气相沉积法 (CVD) 在铜箔衬底上生长 2~5 层石墨烯,然后

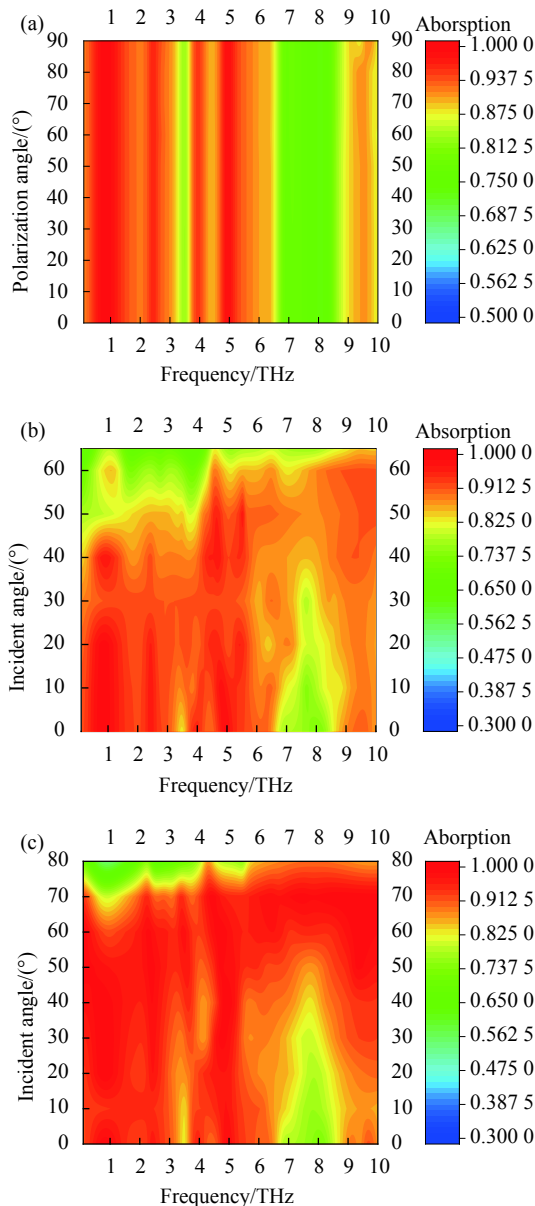


图 6 (a) TE 波斜入射时吸收率随极化角 ϕ (电场方向与 y 轴的夹角)的变化率; (b)-(c) TE/TM 波斜入射时吸收率随入射角 θ (入射方向与 z 轴的夹角)的变化率

Fig.6 (a) The change rate of absorptivity with polarization angle (angle between electric field direction and y -axis) at oblique incident of TE wave; (b)-(c) The rate at which the absorptivity varies with the incidence angle θ (the angle between the incident direction and the z -axis) for oblique incidence of TE/TM waves

将石墨烯薄膜用湿化学腐蚀基底法从铜箔衬底上转移至 PDMS 表面;最后,采用光刻的方法在石墨烯表面刻蚀出硅半球层。由于许多应用需要廉价,大面积的等离子体吸收器,因此制造方法是至关重要的。课题组使用步进和闪光紫外线印记光刻制造等离子体

吸收器, 其和连续制造方法相比具有可重复使用的掩模和大面积制造的优点。

4 结 论

文中设计了一种基于石墨烯的性能可调、宽带、极化与入射角不敏感的太赫兹超材料吸收器。该吸收器的吸收单元由表面半球/半球体亚波长谐振结构、石墨烯、介质层以及金属背板等组成。仿真工作由 CST Studio Suite 2020 这款光学仿真工具来完成。

通过石墨烯化学势的调控, 可在其化学势分别为 0.2 eV 与 0.9 eV 时获得 5.7 THz 与 7 THz 左右的超宽带吸收, 其吸收率均可高于 90%, 并可在一定谐振频率 (如 0.82、4.95 THz 等) 实现近乎完美的太赫兹波吸收。器件形成宽带吸收的机理源于由石墨烯激发的等离子体共振, 以及源于表面亚波长结构所提供的连续可变的多模法布里-珀罗共振的协同作用。此外, 该吸收器同时具备入射角度 60° 以下的高吸收特性和 360° 极化不敏感特性, 最后, 介绍了该吸收器的具体制备工艺。

参考文献:

- [1] O'Hara J F, Withayachumnankul W, Al-Naib I. A review on thin-film sensing with terahertz waves [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2012, 33(3): 245-291.
- [2] Liu Xinyuan, Zeng Hanwen, Tian Xi, et al. Transmission simulation and safety analysis of terahertz radiation in skin [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 9. (in Chinese)
- [3] Chen G, Lin X, Wang Z. Enhanced reflective dichroism from periodic graphene ribbons via total internal reflection [J]. *Opt Express*, 2019, 27(16): 22508-22521.
- [4] Kong X, Wang Z, Du L, et al. Optically transparent metamirror with broadband chiral absorption in the microwave region [J]. *Opt Express*, 2019, 27(26): 38029-38038.
- [5] Wang Hua, Sun Xiaohong, Wang Zhen, et al. Characteristic analysis of metamaterial absorber in terahertz wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1225003. (in Chinese)
- [6] Forouzesfard M R, Ghafari S, Vafapour Z. Solute concentration sensing in two aqueous solution using an optical metamaterial sensor [J]. *Journal of Luminescence*, 2021, 230: 117734.
- [7] Xu J, Li R-Q, Jiang X-P, et al. Ultra-wideband linear polarization converter based on square split ring [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(11): 117801. (in Chinese)
- [8] Shen G, Zhang M, Ji Y, et al. Broadband terahertz metamaterial absorber based on simple multi-ring structures [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(7): 075206.
- [9] Landy N I. A perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 207402.
- [10] Baqir M A, Naqvi S A. Electrically tunable terahertz metamaterial absorber comprised Cu/Graphene strips [J]. *Plasmonics*, 2020, 15(6): 2205-2211.
- [11] Wang Xin, Sun Lining, Shi Yunbo. Design and application of miniature multi-parameter water quality sensor chip [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2215-2226. (in Chinese)
- [12] Phon R, Lim S. Design and analysis of active metamaterial modulated by RF power level [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 8703.
- [13] Li Quan, Liu Shanshan, Lu Guangda, et al. Active control of terahertz electromagnetically induced transparency metasurface using a graphene-metal hybrid structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(9): 20210246. (in Chinese)
- [14] Zhong R, Yang L, Liang Z, et al. Ultrawideband terahertz absorber with a graphene-loaded dielectric hemi-ellipsoid [J]. *Opt Express*, 2020, 28(20): 28773-28781.
- [15] Andryieuski A, Lavrinenko A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: effective surface conductivity approach [J]. *Opt Express*, 2013, 21(7): 9144-9155.
- [16] Zhang Y, Feng Y, Zhu B, et al. Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency [J]. *Opt Express*, 2014, 22(19): 22743-22752.
- [17] Cao Tun, Li Kuan, Li Yang, et al. Tunable optical metamaterials and their applications [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 968-985. (in Chinese)
- [18] Chen Xieyu, Tian Zhen. Recent progress in terahertz dynamic modulation based on graphene. [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 86-97. (in Chinese)
- [19] Hwang E H, Das Sarma S. Dielectric function, screening, and plasmons in two-dimensional graphene [J]. *Physical Review B*, 2007, 75(20): 205418.
- [20] Yang J, Zhu Z, Zhang J, et al. Broadband terahertz absorber based on multi-band continuous plasmon resonances in geometrically gradient dielectric-loaded graphene plasmon structure [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 3239.
- [21] Rahmanzadeh M, Rajabalipanah H, Abdolali A. Multilayer graphene-based metasurfaces: Robust design method for extremely broadband, wide-angle, and polarization-insensitive terahertz absorbers [J]. *Appl Opt*, 2018, 57(4): 959-968.