

一种基于石墨烯的超宽带吸波器

姜彦南 王扬 葛德彪 李思敏 曹卫平 高喜 于新华

An ultra-wideband absorber based on graphene

Jiang Yan-Nan Wang Yang Ge De-Biao Li Si-Min Cao Wei-Ping Gao Xi Yu Xin-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 054101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.054101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单层超薄高效圆极化超表面透镜

[Ultra-thin single-layered highefficiency focusing metasurface lens](#)

物理学报.2016, 65(7): 074101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074101>

基于极化旋转超表面的圆极化天线设计

[A circular polarization antenna designed based on the polarization conversion metasurface](#)

物理学报.2016, 65(2): 024101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024101>

一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计

[A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures](#)

物理学报.2015, 64(23): 234101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234101>

基于时间反演电磁波的稀疏阵列单频信号空间功率合成

[Single frequency spatial power combining using sparse array based on time reversal of electromagnetic wave](#)

物理学报.2015, 64(20): 204101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.204101>

电力线谐波辐射在分层各向异性电离层中的传播特点

[Propagation characteristics of power line harmonic radiation into the stratified anisotropic ionosphere](#)

物理学报.2015, 64(19): 194101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194101>

一种基于石墨烯的超宽带吸波器*

姜彦南^{1)2)3)†} 王扬²⁾ 葛德彪⁴⁾ 李思敏¹⁾ 曹卫平¹⁾²⁾
高喜¹⁾²⁾ 于新华¹⁾²⁾³⁾

1) (广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 桂林 541004)

2) (桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004)

3) (桂林电子科技大学, 广西信息科学实验中心, 桂林 541004)

4) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2015年9月9日收到; 2015年11月13日收到修改稿)

隐身技术对降低飞行器目标的雷达散射截面、提高飞行器目标的生存能力具有重要的意义和价值, 而在飞行器目标上引入吸波器结构是一种重要的隐身手段. 然而, 目前已有吸波器的研究主要集中在单频或多频窄带方面. 为了拓展吸波器工作频带, 基于石墨烯材料提出了一种工作于S/C波段的新型超宽带吸波器模型单元, 其中包含一个用石墨烯材料设计的方圆形双环周期结构. 调节石墨烯的表面阻抗, 使得吸收率超过90%的频带范围为2.1—9.0 GHz, 相对带宽约为124%, 实现了超宽带的吸波特性; 鉴于模型的高度对称性, 提出的吸波器模型表现出对入射波极化不敏感的吸波特性; 在不改变模型结构情况下, 调节石墨烯的静态偏置电场, 亦可调控吸波器谐振在2.0—9.0 GHz频带范围内的任意频率点处, 且达到超过99%的吸收效果. 最后采用等效电路模型方法和波的干涉理论对其吸波机理进行深入研究与分析: 从等效电路角度来讲, 方形和圆形环分别引入高、低吸波谐振频率, 二者优化叠加拓展了吸波带宽; 从干涉理论方面来看, 吸波器表面处的首次反射波与透射波的多次出射波形成较强的干涉相消现象, 有效减少了吸波器的反射回波.

关键词: 超宽带吸波器, 石墨烯, 等效电路模型, 干涉理论**PACS:** 41.20.Jb, 52.25.Os, 73.22.Pr**DOI:** 10.7498/aps.65.054101

1 引言

随着现代信息化战争的发展, 为有效降低飞行器目标的雷达散射截面, 吸波器的研究引发了越来越广泛的关注. 研究较为广泛的吸波器主要有Salisbury吸波屏^[1]、Jaumann吸波体^[2]及超材料吸波器^[3–7]. 2008年Landy等^[3]通过合理设计金属表面谐振结构及选择相应的介质, 首次实现了吸波结构在单频谐振点处的完美吸波. Wang等^[4]利用双环形金属结构的耦合效应, 设计出具有双频谐振点的吸波器, 并通过改变双环结构的对称性, 增

加了高频谐振点处的吸收带宽. 最近, Li等^[5]采用高介电常数的六边形频率选择表面周期结构, 实现了吸波器的三频吸波效果. 2011年, Gu等^[6,7]设计出了上下表面分别为栅形金属结构和金属短节线的介质板吸波结构, 该结构具有多频窄带的吸收能力. 2015年, Agarwal等^[8]通过对非传统的锥形螺旋结构吸波器的研究, 在一定程度上增加了吸收带宽. 尽管已有的报道能在谐振点处具有良好的吸波性能, 但通常只能在单个或多个谐振点处进行窄带吸波, 无法达到超宽带甚至是宽带的吸波效果. 此外, 这些吸波器的工作频带也无法调节, 从而限制了它们的应用.

* 国家自然科学基金(批准号: 61361005, 61461016, 61161002, 61561013)、广西自然科学基金(批准号: 2014GXNSFAA118283, 2014GXNSFAA118366, 2015GXNSFAA139305)、桂林电子科技大学创新团队和认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室(桂林电子科技大学)主任基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ynjiang@guet.edu.cn

石墨烯是一种由单层碳原子组成的二维材料^[9], 自2004年被成功提取出来之后得到研究人员的极大关注. 由于它具有高电子迁移率、低电阻率、光学透明性、高灵活性及结构稳定等特性^[10], 因此被广泛地应用于光学及电子器件的研究, 如调制器、反射器、滤波器、极化器^[11–14]以及支持SPP波的传输器^[15]. 更为重要的是: 1) 通过改变静态偏置电场、掺杂率、散射率、温度等参数可以调节石墨烯表面阻抗^[16]; 2) 在微波频段, 石墨烯的表面阻抗实部基本恒定, 且虚部相对实部非常小, 电抗的影响可以忽略. 为此, 本文基于阻抗匹配原理^[17], 在S/C波段提出一种对电磁波极化不敏感的超宽带吸波器, 它是采用石墨烯材料并依据其表面阻抗可调特性而设计出的方圆形混合环周期结构. 该吸波器在2.1–9.0 GHz频带范围内吸收率超过90%; 同时, 通过调节石墨烯的表面阻抗, 亦可在2.0–9.0 GHz范围内的所有频率点处实现超过99%的吸波效果; 最后, 进一步结合等效电路模型(equivalent circuit model, ECM)和干涉相消理论(interference theory, INF)对吸波器的吸波机理进行定量研究与分析. 基于等效电路模型理论, 该吸波器利用石墨烯阻抗的动态可调特性, 对方圆形石墨烯环的表面阻抗分别进行控制, 进而分别形成两个谐振频率靠近且谐振程度适当的频带, 二者优化组合可实现超宽带特性. 而在此频段内, 石墨烯的方圆混合环周期结构使得吸波器和自由空间实现了较好匹配, 减少了吸波器的反射回波. 结合干涉相消理论, 该吸波器利用石墨烯材料阻抗调整方面的便易性, 调整方圆形混合环表面处的初次反射波及透射波的多次出射波, 使得初次反射波和透射波的多次出射波在方圆混合环周期结构处的幅值相近, 相位相差接近于 π , 形成较强的干涉相消现象, 提高了吸波器的吸收性能.

2 微波波段石墨烯表面阻抗特性

根据Kubo公式, 石墨烯表面电导率 σ_g 表示如下^[16]:

$$\begin{aligned} \sigma_g(\omega, \mu_c, \Gamma, T_e) &= \frac{je^2}{\pi\hbar^2} \left[\frac{1}{(\omega - j2\Gamma)} \int_0^\infty \varepsilon \left(\frac{\partial f_d(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_d(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon \right. \\ &\quad \left. - (\omega - j2\Gamma) \int_0^\infty \left(\frac{f_d(-\varepsilon) - f_d(\varepsilon)}{(\omega - j2\Gamma)^2 - 4(\varepsilon/\hbar)^2} \right) d\varepsilon \right], \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $f_d(\varepsilon) = 1/(e^{(\varepsilon - \mu_c)/(k_B T)} + 1)$ 是费米-狄拉克分布, ε 为载流子能量, ω 为频率, e 为电子电荷量, μ_c 为化学势 (可由静态偏置电场 E_b 或掺杂来控制), 且化学势与静态偏置电场满足如下关系^[18]:

$$E_b \approx \frac{\mu_c^2 e}{\pi \varepsilon_r \varepsilon_0 \hbar^2 v_F^2}, \quad (2)$$

其中, ε_r 为介质层相对介电系数. 调节静态偏置电场使 μ_c 在 0–1 eV 范围内变化, 进而调节石墨烯表面阻抗, 它与表面电导率之间的关系为 $Z_g = R_g + jX_g = 1/\sigma_g$. 在取散射率 $\Gamma = 0.5 \times 10^{12}$ Hz、温度 $T_e = 300$ K 且无掺杂情况下, 微波频段内石墨烯表面阻抗频域响应如图1所示. 可以看出, 在微波波段, 石墨烯表面阻抗的实部 (R_g) 与虚部 (X_g) 随化学势的增大而减小, R_g 随频率基本不变, 且 $R_g \gg X_g$, 即虚部相对于实部可以忽略不计. 鉴于本文研究的频段低于 10 GHz, 因此调节石墨烯阻抗时, 可令 $Z_g \approx R_g$.

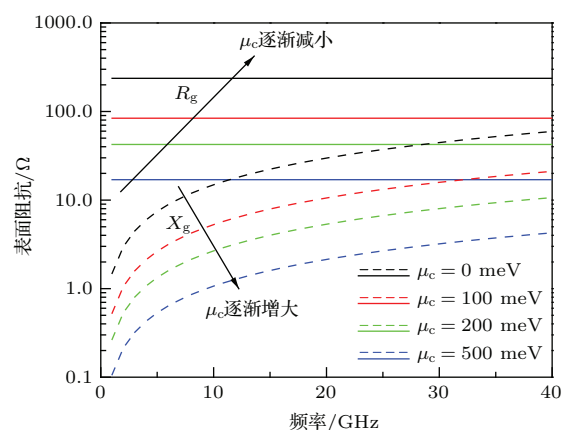


图1 (网刊彩色) 微波频段内石墨烯表面阻抗与化学势及频率关系

Fig. 1. (color online) Frequency dependence of graphene's surface impedance corresponding to chemical potential in microwave band.

3 基于石墨烯的吸波器模型

图2所示的是本文提出的石墨烯吸波器模型单元结构, 它主要由三层组成: 上层为方圆形混合环结构的石墨烯频率选择表面 (FSS) 层; 中间层为相对介电常数 $\varepsilon_r = 1.05$ 、厚度 $d = 13$ mm 的介质板; 底层为金属铜地板, 其电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m, 厚度为 0.1 mm. 表面方圆形混合环石墨烯的正下方有相同尺寸的方圆形混合环形状的双层衬底, 第一层是厚度为 $d_1 = 0.5$ μm 的二氧化硅, 第二层是厚度为 $d_2 = 9.5$ μm 的晶

体硅; 在方环结构上加加载偏置电压 U_1 (方形石墨烯环上的静态偏置电场 $E_{b1} \propto U_1$)、在圆环结构上加加载偏置电压 U_2 (圆形石墨烯环上的静态偏置电场 $E_{b2} \propto U_2$), 单元其他尺寸参数为: $p = 28 \text{ mm}$, $a = 25 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$, $c_1 = 9.45 \text{ mm}$, $c_2 = 7.5 \text{ mm}$.

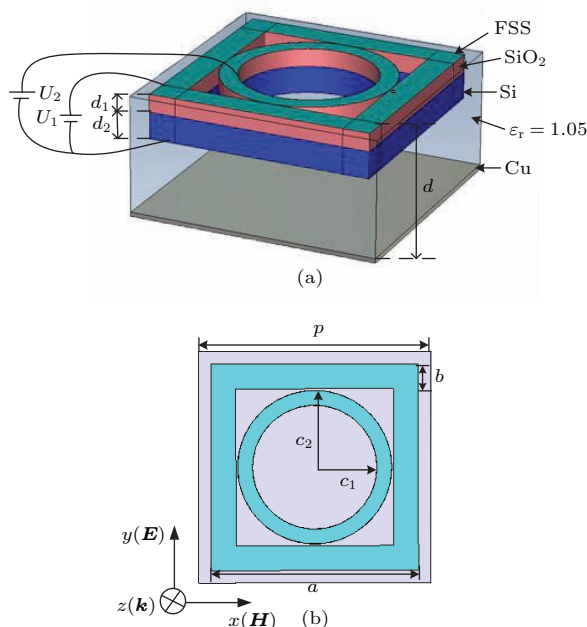


图2 (网刊彩色) 石墨烯吸波器单元示意图 (a) 三维模型图; (b) 俯视图

Fig. 2. (color online) Diagram of the proposed absorber unit using graphene: (a) 3D model; (b) top-view.

4 吸波器吸波性能分析

吸波器吸波性能可用电磁吸收率进行定量分析. 吸收率表达式为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$, 其中 $R(\omega)$ 为能量反射率, $T(\omega)$ 为能量透射率, S_{11} 为吸波器的反射系数, S_{21} 为吸波器的透射系数. 鉴于图2所示的吸波器底层为金属铜板, 导致 $T(\omega) = |S_{21}| = 0$, 则上式简化为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$.

4.1 超宽带吸波性能

通过 U_1 和 U_2 调节静态偏置电场 E_{b1} 和 E_{b2} , 使得方形和圆环形石墨烯的化学势分别为 $\mu_{c1} = 120 \text{ meV}$ 和 $\mu_{c2} = 280 \text{ meV}$, 对应阻抗值分别为 $Z_{g1} = 70 \Omega$ 和 $Z_{g2} = 30 \Omega$. 基于 CST Microwave Studio 2014 电磁仿真软件对如图2所示的吸波器周期单元进行模拟, 边界条件设置为 unit cell, 端口

设置为 Floquet 端口, 激励源采用均匀平面波的形式, 入射波传播和极化方向如图2(b)所示, 基于频域求解器计算得到其吸收率如图3所示. 可以看出, 在 2.1—9.0 GHz 频段内, 吸收率在 90% 以上, 相对吸波带宽 $BW = 2(f_H - f_L)/(f_H + f_L) \times 100\% = 124\%$ (其中 f_H 和 f_L 分别为上限频率和下限频率), 所设计的吸波器具有超宽带的吸波性能.

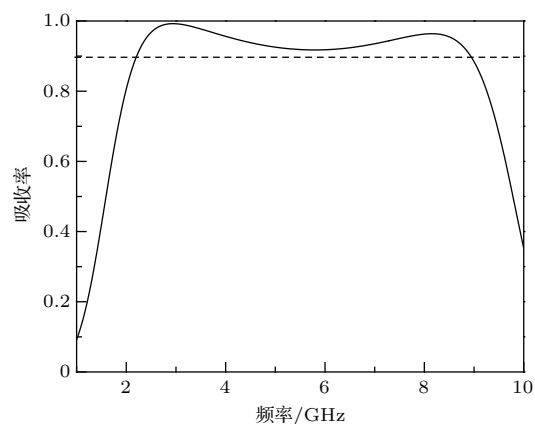


图3 $Z_{g1} = 70 \Omega$, $Z_{g2} = 30 \Omega$ 时的吸收率

Fig. 3. Absorption for the absorber with $Z_{g1} = 70 \Omega$, $Z_{g2} = 30 \Omega$.

不同极化角 (φ) 入射情况下的吸收率如图4所示. 可以看出, 不同极化角的均匀平面波激励下的吸波效果几乎完全一致. 这是由于单元模型在结构上具有高度对称性, 导致其对电磁波极化角度的变化不敏感, 这表明该吸波器可以很好地吸收任意极化的入射电磁波.

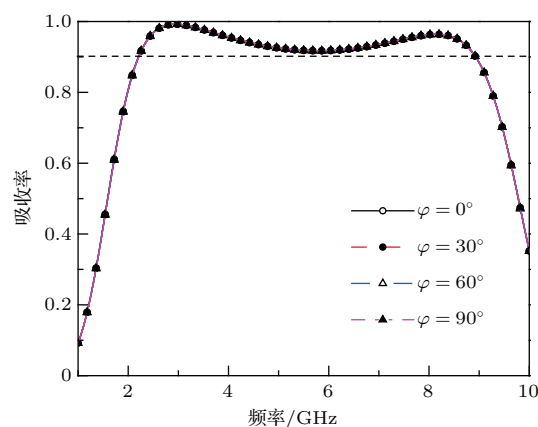


图4 不同极化角度对应的吸收率

Fig. 4. Absorption for the incident wave with different polarization angles.

4.2 谐振频点可控的吸波性能

进一步调节 U_1 和 U_2 (即静态偏置电场 E_{b1} 和 E_{b2} , 或 μ_{c1} 和 μ_{c2}), 在无掺杂情况下, 当 Z_{g1} 和 Z_{g2}

取如表1所列的阻抗值时, 对应的吸收率曲线如图5所示(为了清晰展示, 仅给出了四条曲线), 同时在表1中列出了各组合情况下谐振于各自整频率点处的反射系数. 可以看出: 通过静态偏置电场 E_{b1} 和 E_{b2} 的调节, 可使吸波器在不同的整频率点处产生强的谐振, 实现了吸波器谐振频点可控的吸波性能. 当处于如表1所列的谐振频率点时, 吸波

器阻抗与自由空间阻抗实现最佳匹配, 对电磁波达到了高于99%的吸收率. 需要指出的是, 组合B中的 Z_{g1} 和 Z_{g2} 同时也是获得如图3所示的超宽带吸收率时所需的石墨烯阻抗值. 可以看出, 通过对外加静态偏置电场的动态调整, 进而调控石墨烯化学势, 从而方便地控制石墨烯的阻抗, 最终实现对吸波器吸波特性的动态调节.

表1 方圆环石墨烯阻抗不同组合对应整频点处的 S_{11}
Table 1. S_{11} at integer frequency for the absorber with different surface impedances combinations.

参数组合	整频率点/GHz	化学势/meV		偏置电场/ $V \cdot nm^{-1}$		表面阻抗/ Ω		整频点反射系数/dB S_{11}
		μ_{c1}	μ_{c2}	E_{b1}	E_{b2}	Z_{g1}	Z_{g2}	
A	2	425	0	0.6652	0	20	235	-20
B	3	120	280	0.0530	0.2887	70	30	-22
C	4	67	280	0.0165	0.2887	120	30	-27
D	5	67	140	0.0165	0.0722	120	60	-40
E	6	140	50	0.0722	0.0092	60	150	-33
F	7	210	50	0.1624	0.0092	40	150	-31
G	8	850	82	2.6608	0.0248	10	100	-28
H	9	850	425	2.6608	0.6652	10	20	-48

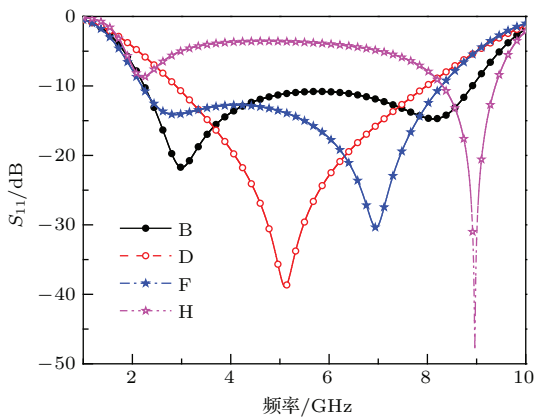


图5 谐振于整频率点时对应的 S_{11} 曲线
Fig. 5. S_{11} curves for the absorber resonating at integer frequency.

耦合电容. 带有接地金属板的介质层等效为终端短路传输线: 当 $d < \lambda/4$ 时, 其等效为电感元件; 当 $\lambda/4 < d < \lambda/2$ 时, 其等效为电容元件. 鉴于本文设计的吸波器的介质层厚度在部分频段下小于 $\lambda/4$ 而在另一部分频段下大于 $\lambda/4$, 因此统一以电抗 Z_1 表示.

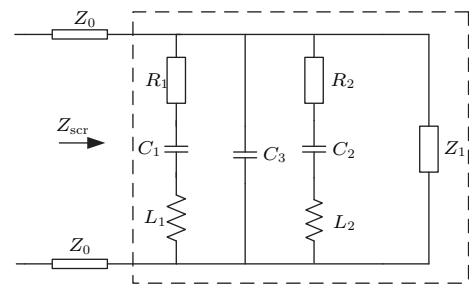


图6 吸波器单元结构等效电路模型
Fig. 6. ECM for the proposed absorber unit.

5 吸波机理研究与分析

5.1 等效电路法

等效电路模型可用于分析环形周期阵列^[19,20], 它是将表面环形结构等效为 RLC 串并联谐振电路. 如图6所示, 是本文提出的图2中吸波器单元结构的等效电路模型. 其中, Z_0 为自由空间阻抗, R_1 , L_1 , C_1 和 R_2 , L_2 , C_2 分别为方形环和圆形环的等效电阻、电感和电容, C_3 为方形环和圆形环之间的

单元中的石墨烯环形结构产生的等效电阻值可表示为^[21]

$$R \approx R_s \frac{S}{A}, \quad (3)$$

其中, R_s 为表面阻抗值, $S = p^2$, A 是表面损耗区域的面积. 但对于环形结构而言, A 应修正为与电场平行的损耗区域面积. 利用(3)式计算得到图2中

的方形和圆形环产生的阻抗分别为 $R_1 = 365.87 \Omega$ 和 $R_2 = 226.5 \Omega$.

依据等效电路的非线性拟合方法^[22,23], 优化得到的各个等效元件值如表2所列. 此外, 在图7中还给出了优化后的等效电路模型的 S_{11} 曲线. 可以看出, 优化得到的 R_1 和 R_2 与(3)式计算结果几乎一致, 且等效电路法和 CST 模拟仿真得到的 S_{11} 曲线一致性也很好, 表明图6作为本文提出的吸波单元的等效电路是有效的, 同时也验证了仿真结果的正确性. 结合图6与表2可以方便地计算出图7中的低频谐振点由 $R_1 L_1 C_1$ 产生, 高频谐振点由 $R_2 L_2 C_2$ 产生, 优化两个谐振点并叠加, 最终拓展了整个模型的吸波带宽^[24].

表2 优化后各元件值

Table 2. Parameters of the equivalent circuit model by optimization.

集总元件	电阻/ Ω		电容/fF			电感/nH	
	R_1	R_2	C_1	C_2	C_3	L_1	L_2
元件值	369	218	99	80	63	9	41

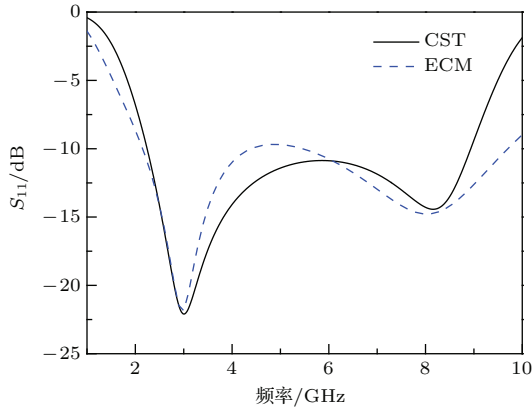


图7 等效电路模型法与 CST 仿真的 S_{11} 曲线

Fig. 7. S_{11} curves for ECM method and CST simulation.

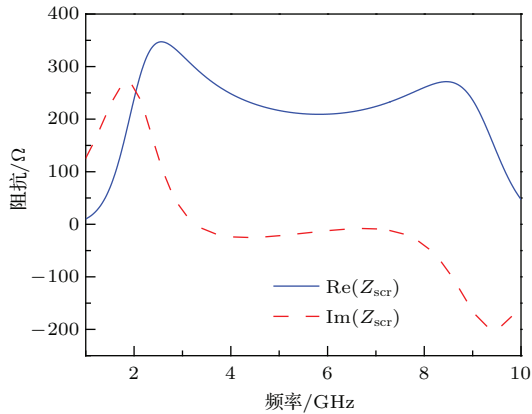


图8 等效电路模型的输入阻抗 Z_{scr}

Fig. 8. Input impedance Z_{scr} for ECM.

进一步计算等效电路的输入阻抗 Z_{scr} , 如图8所示. 可以看出, 在 2.1—9.0 GHz 频段内, 输入阻抗的实部和虚部分别接近 300 和 0 Ω , 部分区域阻抗接近 377 Ω . 这表明吸波器与自由空间阻抗有较好匹配, 这也是使得来波能够有效地被吸波器吸收的重要保证.

5.2 干涉理论

上述 ECM 从电路及阻抗匹配的角度定量分析了超宽带谐振产生的原因, 下面依据电磁波的干涉相消理论^[25,26], 深入研究并阐明吸波器对电磁波的吸波机理.

如图9中的插图所示, 电磁波从自由空间向 FSS 入射时的反射系数和透射系数分别为 $\tilde{r}_{12} = r_{12} e^{i\phi_{12}}$ 和 $\tilde{t}_{12} = t_{12} e^{i\phi_{12}}$, 而从介质板向 FSS 入射时的反射系数和透射系数分别为 $\tilde{r}_{21} = r_{21} e^{i\phi_{21}}$ 和 $\tilde{t}_{21} = t_{21} e^{i\phi_{21}}$, 电磁波在介质中来回振荡, 最终在分界面处的总反射系数为

$$\begin{aligned} \tilde{r} &= \tilde{r}_{12} + \tilde{t}_{12} \tilde{r}_{23} \tilde{t}_{21} e^{i2\beta} + \tilde{t}_{12} \tilde{r}_{23}^2 \tilde{r}_{21} \tilde{t}_{21} e^{i4\beta} \\ &\quad + \tilde{t}_{12} \tilde{r}_{23}^3 \tilde{r}_{21}^2 \tilde{t}_{21} e^{i6\beta} + \dots \\ &= \frac{\tilde{r}_{12} + \tilde{A} \tilde{r}_{23} e^{i2\beta}}{1 - \tilde{r}_{21} \tilde{r}_{23} e^{i2\beta}}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\tilde{A} = \tilde{t}_{12} \tilde{t}_{21} - \tilde{r}_{12} \tilde{r}_{21}$, 传播相位 $\beta = \sqrt{\epsilon_r} k_0 d$, 又因终端为金属地板, 故 $\tilde{r}_{23} = -1$, 则

$$\tilde{r} = \frac{\tilde{r}_{12} + (-\tilde{A} e^{i2\beta})}{1 + \tilde{r}_{21} e^{i2\beta}}, \quad (5)$$

对应的吸收率为

$$\tilde{A}(\omega) = 1 - |\tilde{r}(\omega)|^2. \quad (6)$$

在(5)式中, 令 $r_{12} = |\tilde{r}_{12}|$, $A = |-\tilde{A} e^{i2\beta}|$ 且 $\alpha = \arg(\tilde{r}_{12}) - \arg(-\tilde{A} e^{i2\beta})$, 则当满足 $r_{12} = A$ 且 $\alpha = \pi$ 时, FSS 处的首次反射波与透射波的多次出射波形成最强的干涉相消现象, 可有效抵消吸波器的反射回波, 使得反射系数最小 (等于 0), 吸收率最大 (等于 1).

图9给出 $Z_{g1} = 70 \Omega$, $Z_{g2} = 30 \Omega$ 时的反射系数 $\tilde{r}_{12}$ 和 $\tilde{r}_{21}$ 、透射系数 $\tilde{t}_{12}$ 和 $\tilde{t}_{21}$ 的幅值与相位, 其中 $\tilde{t}_{12}$ 与 $\tilde{t}_{21}$ 的幅值与相位完全相等, $\tilde{r}_{12}$ 与 $\tilde{r}_{21}$ 的幅值与相位相近. 基于图9求得的 $\tilde{r}_{12}$ 与 $-\tilde{A} e^{i2\beta}$ 的幅值及相位差如图10(a)所示. 此外, 在图10中还给出了表1中 D、F 和 H 等三种组合时的对应结果.

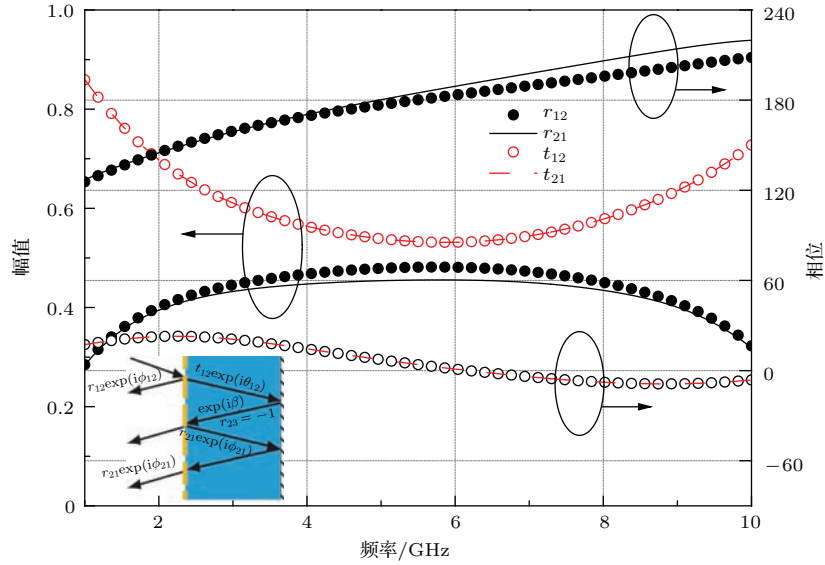
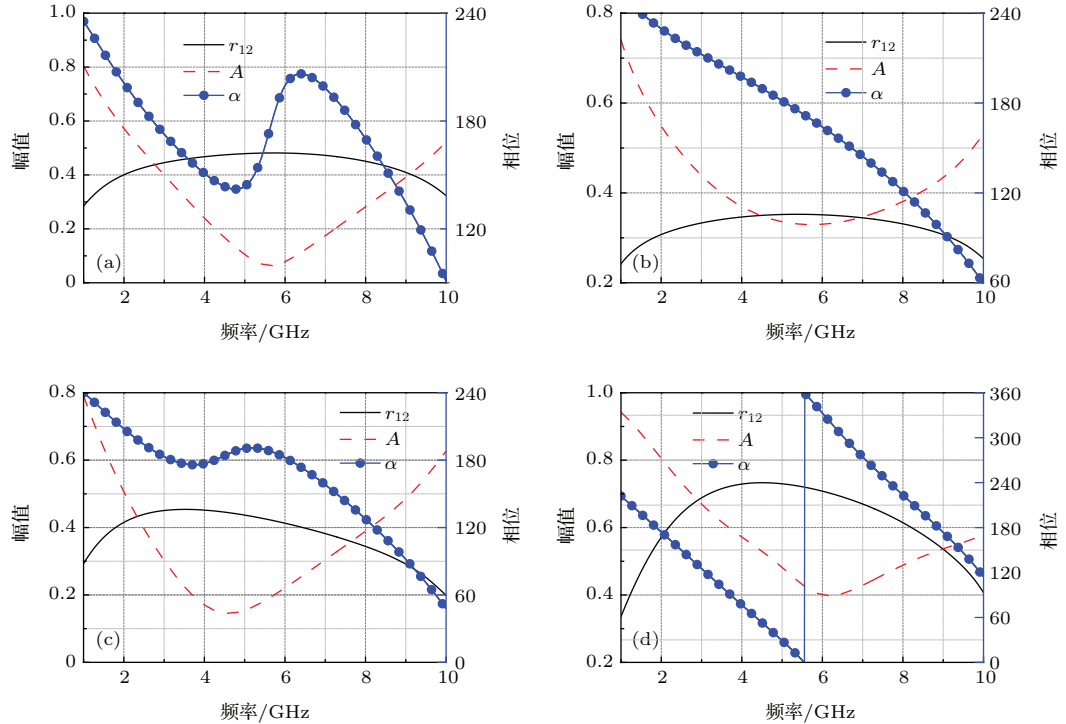


图9 分界面处的反射及透射波相位与幅值

Fig. 9. Phase and amplitude of reflection and transmission at interface of the absorber.

图10 方圆石墨烯环不同阻抗组合时的 r_{12} , A 及 α (a) 组合 B; (b) 组合 D; (c) 组合 F; (d) 组合 HFig. 10. r_{12} , A and α for the absorber with different surface impedances combinations: (a) Combination B; (b) combination D; (c) combination F; (d) combination H.

从图10(a)可以看出, 在2.1—9.0 GHz范围内, 尽管 r_{12} 与 A 有一定偏差, 但 α 在 140° — 210° 范围内 (180° 附近) 波动, 存在干涉相消现象. 在3和8.1 GHz附近时, r_{12} 与 A 接近且 α 近似等于 π , 满足强干涉相消的条件, 吸波性能最优; 除以上两个频点外, 由于 r_{12} 与 A 存在一定偏差且 α 偏离 π , 使

得干涉强度相对减弱, 但吸收率仍能达到90%以上. 在2.1—9.0 GHz频率范围外, 由于 r_{12} 与 A , α 与 π 差别均较大, 导致最终的吸收率较差. 通过(4)式和(5)式求得吸收率如图11所示, 可以看出它与CST, ECM的结果符合度较好, 表明电磁波在FSS处因干涉而相消, 进一步验证了结果的正确性. 从

图10(b)—(d)还可以看出,在5,7和9 GHz谐振点处, r_{12} 与 A 接近且 $\alpha \approx \pi$, 此时的吸波器表现出最佳的吸波性能.

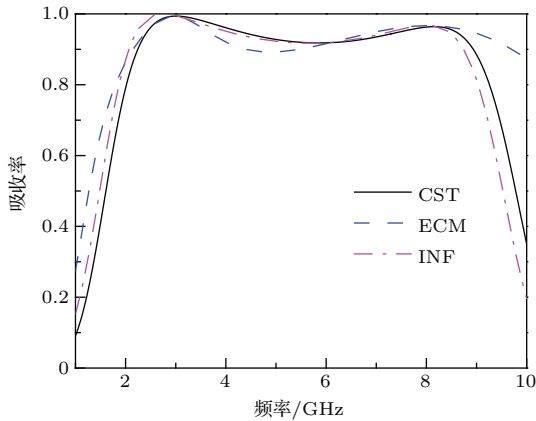


图11 三种方法对应下的吸收率

Fig. 11. Absorption curves calculated by CST, ECM and INF.

6 结束语

利用石墨烯的阻抗可调特性,本文设计了一个工作于S/C波段的超宽带吸波器,它包含一个方形石墨烯混合环结构.吸收率大于90%的频段为2.1—9.0 GHz,相对带宽约124%,且具有对电磁波极化角度不敏感的特点;在不改变模型结构的情况下,通过调节石墨烯上的静态偏置电场,可使设计的吸波器工作在2.0—9.0 GHz内任意频率点,且吸收率大于99%.而后,应用等效电路及干涉理论的方法对吸波器的吸波机理进行深入分析和研究,二者结果与仿真结果具有很好的一致性,表明仿真结果及分析方法的正确性.随着石墨烯制备技术的发展,该吸波器有望在飞行器隐身方面发挥重要作用.

参考文献

[1] Fante R L, McCormack M T 1988 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **36** 1443

[2] Toit L J D 1994 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **36** 17
 [3] Landy N, Sajuyigbe S, Mock J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
 [4] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, Huang W Q, Zhai X, Li X F 2014 *Opt. Commun.* **325** 78
 [5] Li L Y, Wang J, Du H L, Wang J F, Qu S B 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064201
 [6] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Ma H, Lin B Q, Bai P, Peng W D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 107801 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 马华, 林宝勤, 柏鹏, 彭卫东 2011 物理学报 **60** 107801]
 [7] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017801
 [8] Agarwal S, Prajapati Y K, Singh V, Saini J P 2015 *Opt. Commun.* **356** 565
 [9] Geim A K, Novoselov K S 2007 *Nature Mater.* **63** 183
 [10] Geim A K 2009 *Science* **324** 1530
 [11] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Kelly M 2012 *Nature Commun.* **3** 780
 [12] Alaei R, Farhat M, Rockstuhl C, Lederer F 2012 *Opt. Express* **20** 28017
 [13] Fallahi A, Perruisseau-Carrier J 2012 *Phys. Rev. B* **86** 195408
 [14] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Rafique S, Zhu M, Li W, Liang X, Gundlach D, Protasenko V, Kelly M M, Jena D, Liu L, Xing H G 2012 *Nano Lett.* **12** 4518
 [15] Vakil A, Engheta N 2011 *Science* **332** 1291
 [16] Nayyeri V, Soleimani M, Ramahi O M 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 4176
 [17] Avitzour Y, Yaroslav A, Urzhumov, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 045131
 [18] Zhang Y, Feng Y J, Zhu B, Zhao J M, Jiang T 2014 *Opt. Express* **22** 22743
 [19] Langley R J Parker E A 1982 *Electron. Lett.* **18** 294
 [20] Langley R J Parker E A 1983 *Electron. Lett.* **19** 675
 [21] Costa F, Monorchio A, Manara G 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1551
 [22] Costa F, Monorchio A, Manara G 2009 *IEEE Antennas Propag. Society Int. Symp.* Charleston, June, 2009 p781
 [23] Luukkonen O, Simovski C, Granet G, Goussetis G, Lioubtchenko D, Raisanen A V, Tretyakov S A 2008 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **56** 1624
 [24] Gao X, Han X, Cao W P, Li H O, Ma H F, Cui T J 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 3522
 [25] Chen H T, Zhou J F, John F O, Frank C, Abul K A, Antoinette J T 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 073901
 [26] Chen H T 2012 *Opt. Express* **20** 7165

An ultra-wideband absorber based on graphene*

Jiang Yan-Nan^{1)2)3)†} Wang Yang²⁾ Ge De-Biao⁴⁾ Li Si-Min¹⁾ Cao Wei-Ping¹⁾²⁾
Gao Xi¹⁾²⁾ Yu Xin-Hua¹⁾²⁾³⁾

1) (Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication & Signal Processing, Guilin 541004, China)

2) (School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

3) (Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

4) (School of Physics Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 9 September 2015; revised manuscript received 13 November 2015)

Abstract

Stealth technology is of great importance and significance in reducing the radar cross section and improving the survivability of the target aircraft. Absorber is one of the most important structures in stealth technology. However, the present investigations of absorbers mainly focus on the narrow band or multi-band. To extend the operation bandwidth, a graphene-based absorber structure is proposed in this paper. The proposed absorber has a periodic structure whose unit cell consists of a square and a circular graphene-based ring. The surface impedance of the periodic structure can be optimized to match the impedance of the free space in a very wide band by adjusting the electrostatic bias voltage. Then the operation band is significantly extended. By using the commercial software, CST Microwave Studio 2014, the performance of the proposed absorber is studied. The simulated results show that the proposed absorber can absorb electromagnetic (EM) waves in an ultra-wideband from 2.1 to 9.0 GHz, with an absorbing rate of up to 90%. Moreover, the proposed absorber is insensitive to the polarization of the incident wave due to the symmetry of the structure. We also find that the absorber can be tuned to work at any frequency in a range from 2.0 to 9.0 GHz for a fixed geometrical parameter. The equivalent circuit model (ECM) approach and interference theory (INF) are employed to investigate the physical mechanism of the proposed absorber. According to the ECM, we analyze the resonant characteristics of the square and circular graphene rings. Owing to the existence of two different graphene rings, two resonant frequencies are detected. By optimizing the structure parameters of the graphene rings, the two resonant frequencies are brought closer, resulting in the increase of the operation band. On the other hand, the real part of the input impedance of the equivalent circuit reaches up to about 300 Ω , and the imaginary part is close to 0 Ω , which provides good matching to the free space, leading to high absorption rate. According to the interference theory, the amplitudes and phases of the direct reflection and the multiple reflections of EM waves are studied. It is found that the destructive interference between the direct reflection and multiple reflection makes the absorber have high performance in an ultra-wideband. The results obtained from ECM and INF are in good agreement with the simulation ones.

Keywords: ultra-wideband absorber, graphene, equivalent circuit model approach, interference theory

PACS: 41.20.Jb, 52.25.Os, 73.22.Pr

DOI: 10.7498/aps.65.054101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61361005, 61461016, 61161002, 61561013), the Natural Science Foundation of Guangxi, China (Grant Nos. 2014GXNSFAA118283, 2014GXNSFAA118366, 2015GXNSFAA139305), the Program for Innovative Research Team of Guilin University of Electronic Technology (IRTGUET), and the Director Fund of Key Laboratory of Cognitive Radio and Information Processing (Guilin University of Electronic Technology), Ministry of Education, China.

† Corresponding author. E-mail: ynjiang@guet.edu.cn