

基于石墨烯-金属混合结构的可调超材料吸波体设计

王越, 冷雁冰, 董连和, 王丽, 刘顺瑞, 王君, 孙艳军*

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 利用石墨烯与金属相结合的方法提出了一种新型超材料吸波体结构,通过改变外加偏置电压来改变石墨烯的费米能级,在微波段分别实现了单频和宽频的振幅可调性,并阐述了其电磁吸波及振幅可调的机理。对单一频段下的超材料结构进行了模拟仿真,结果表明,当结构参数不变时,吸波体的吸收强度随石墨烯费米能级的增加而不断减小,最大调制深度达到了 58.6%。当石墨烯费米能级为 0 eV 时,吸波体的中心频率随结构参数的改变而改变。基于多吸收峰叠加扩展带宽的原理,利用不同尺寸单元的排列实现了宽频吸波的特性,并通过仿真模拟证明了该宽频吸波体具有振幅可调的性质。

关键词 材料; 超材料吸波体; 石墨烯; 振幅可调; 宽频

中图分类号 O441.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0716001

Design of Tunable Metamaterial Absorber Based on Graphene-Metal Hybrid Structure

Wang Yue, Leng Yanbing, Dong Lianhe, Wang Li, Liu Shunrui, Wang Jun, Sun Yanjun

*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A novel metamaterial absorber based on a graphene-metal hybrid structure is proposed. The amplitude tunability at single frequency and broadband frequency within the microwave domain is realized via the change of graphene Fermi level by altering the applied voltage. The mechanisms of absorption and amplitude tunability of electromagnetic field are illustrated. The numerical simulation of this metamaterial structure under single frequency band is made. The results show that, when the structural parameters are fixed, the absorption intensity of absorber decreases with the increase of graphene Fermi level and the maximum modulation depth reaches 58.6%. When the graphene Fermi level is 0 eV, the center frequency changes with the structural parameters. An array composed of unit structures with different sizes is used to realize the characteristic of the broadband wave absorption based on the multi-absorption-peak superimposed expansion bandwidth principle. The property of amplitude tunability possessed by this broadband absorber is confirmed by numerical simulations.

Key words materials; metamaterial absorber; graphene; amplitude tunable; broadband

OCIS codes 160.3918; 350.2450; 160.4236; 230.4110

1 引 言

超材料吸波体由 Landy 等^[1]在 2008 年首次提出,其基本原理是通过与自由空间的阻抗相匹配来减小反射,从而使得材料吸收最大化。由于其在隐

身^[2]、探测^[3]和通信^[4]方面具有重大的应用价值,超材料吸波体已成为超材料领域的一个研究热点。随着研究的深入,一方面吸波体吸收波长从微波频段逐渐扩展到太赫兹频段^[5]、红外频段^[6]以及光频段^[7],另一方面吸波体吸收频率也从单频^[1]逐渐扩展到双

收稿日期: 2017-12-26; 收到修改稿日期: 2018-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(11474037,11474041)

作者简介: 王越(1995—),男,硕士研究生,主要从事先进光学系统设计与制造方面的研究。

E-mail: 861910443@qq.com

导师简介: 董连和(1953—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事先进光学系统设计与制造方面的研究。

E-mail: custdong@163.com

* 通信联系人。E-mail: custsun@126.com

频^[8]、多频^[9]以及宽频^[10]。然而,传统的超材料吸波体只能在固定的频率或有限的频率范围内工作。尽管通过改变结构尺寸可以有效地调节其工作频率,但是结构一旦制作完成就很难改变,这就限制了吸波体在实际中的应用。学者们希望能够利用热、电、光等方式来实现对超材料吸波体的主动调节和控制。

石墨烯是二维平面晶体,具有对称的锥型零带隙结构,具有极高的电子及空穴迁移率,其电导率可以通过外加偏置电压来调控,故石墨烯被应用于超材料吸波体中。目前,基于石墨烯超材料的研究主要集中在太赫兹波段^[11-12]和红外波段^[13-14]。随着化学气相沉积(CVD)石墨烯的商业化生产,石墨烯在微波可调谐超材料中的应用得到了更进一步的开发。Fallahi等^[15]将五层石墨烯与五层介质相互叠加,设计了一种可调超材料吸波体结构,通过改变偏置电压实现了对该吸波体吸收率的调制,但仅为对吸收峰内 10.7 GHz 处的吸收率进行了调制,无法实现对整个吸收峰的调制。Huang等^[16]基于石墨烯设计了一种宽频可调超材料吸波体,通过改变外接偏置电压实现了中心频率由 13.5 GHz 到 19.0 GHz 的调控。Balci等^[17]利用石墨烯设计了一种可切换雷达吸收表面结构,通过改变偏置电压可在 10 GHz 处实现反射与吸收之间的切换。Yi等^[18]利用多层石墨烯叠加设计了一种中心频率可调的超材料吸波体,通过改变石墨烯的叠加层数实现了 7 GHz 的调谐范围。

然而,这些研究仅利用石墨烯本身的性质对入射电磁波进行调制,无法解决石墨烯本身电导率较低的问题,只有当石墨烯的费米能级较高时才能实现入射电磁波的高吸收效果。然而,石墨烯的费

米能级越高,所需的外加偏置电压也越高,仅利用石墨烯本身的性质无法在低外加偏置电压的情况下同时达到高吸收、高调制深度的效果。因此,本文基于石墨烯自身电导率可调的特性和金属高电导率的特性,将石墨烯与金属结合设计了一种超材料吸波体,使其不仅具有金属超材料吸波体的高吸收率,又具有石墨烯超材料的调控特性,且该设计方法对宽频超材料吸波体同样有效。利用商业软件 CST 对该吸波体表面电流和空间电场分布进行了仿真与分析,阐述了其电磁吸波和振幅可调的机理。

2 结构设计

设计的石墨烯-金属混合结构超材料吸波体如图 1 所示。吸波体由五层结构组成,由上到下依次为:石墨烯与金属铜的混合结构、有机玻璃(PMMA)隔离层、硅介质层、FR-4 介质层、铜基底。结构参数:结构周期 $P=3\text{ mm}$ 、 $W=0.5\text{ mm}$ 、 $G=0.25\text{ mm}$ 、 $L=2.5\text{ mm}$;FR-4 介质层的介电常数为 4.4,厚度 $H=0.5\text{ mm}$;PMMA 介质层的厚度 $T_1=0.1\text{ }\mu\text{m}$;硅介质层的厚度 $T_2=50\text{ nm}$,且在该结构中选用的是掺杂硅,其作为电极给石墨烯施加偏置电压^[19];金属铜厚度均为 $T_3=0.01\text{ mm}$,其电导率为 $5.8\times 10^7\text{ S/m}$;利用商业软件 CST 对所设计的超材料吸波体进行仿真模拟。假设微波垂直于超材料表面沿 Z 轴负方向入射,吸波体的吸收率可由公式 $A=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ 计算得出,其中 S_{11} 和 S_{21} 分别表示吸波体的反射系数和透射系数,可由软件仿真计算得出。

无偏置磁场时,石墨烯的表面电导率在微波波段到可见光波段都可以用 Kubo 公式^[15]表示,即

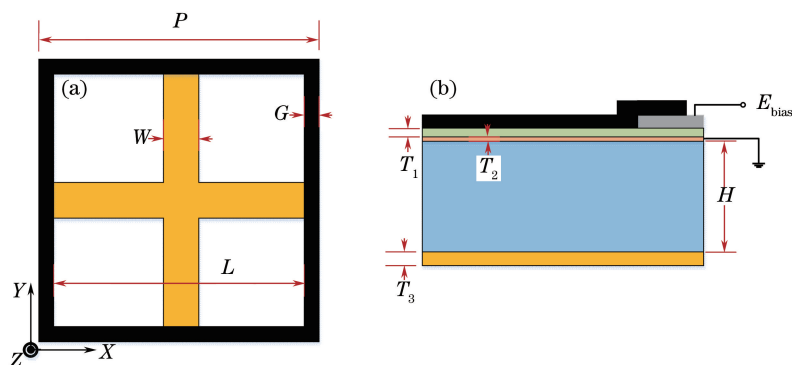


图 1 石墨烯-金属混合结构超材料吸波体的结构示意图。(a)单元结构俯视图;(b)结构主视图

Fig. 1 Structural diagram of metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid.

(a) Top view of unit structure; (b) front view of structure

$$\sigma(\omega, \mu_c) = \frac{-ie^2(\omega + i2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \cdot \left\{ \frac{1}{(\omega + i2\Gamma)^2} \int_0^\infty \epsilon \left[\frac{\partial f_d(\epsilon)}{\partial \epsilon} - \frac{\partial f_d(-\epsilon)}{\partial \epsilon} \right] d\epsilon - \int_0^\infty \epsilon \left[\frac{f_d(-\epsilon) - f_d(\epsilon)}{(\omega + i2\Gamma)^2 - 4(\epsilon/\hbar)^2} \right] d\epsilon \right\}, \quad (1)$$

$$f_d(\epsilon) = [\exp(\epsilon - \mu_c)/(k_B T) + 1]^{-1}, \quad (2)$$

式中 k_B 是玻尔兹曼常数, \hbar 是约化狄拉克常数, $f_d(\epsilon)$ 是费米-狄拉克分布, ϵ 是能量, μ_c 是石墨烯的费米能级, T 是开尔文温度, Γ 是载流子散射率(其倒数即是弛豫时间 τ)。这里取 $T=300$ K, $\Gamma=5 \times 10^{12}$ Hz。根据(1)、(2)式仿真了石墨烯表面电导率与化学势之间的变化关系,如图 2 所示,其中 $\text{Re}(\cdot)$ 与 $\text{Im}(\cdot)$ 分别表示取实部与虚部。

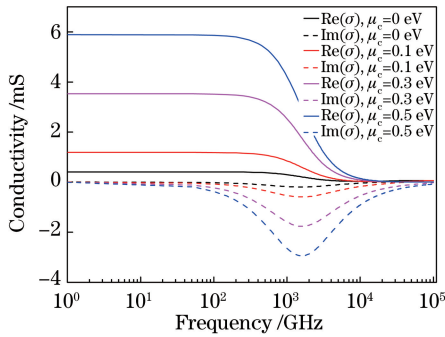
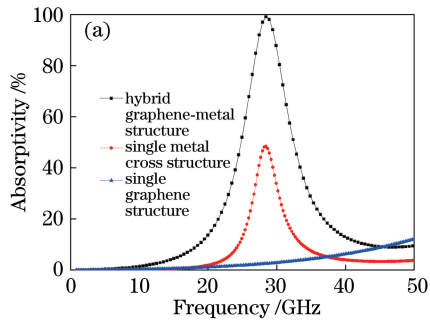


图 2 石墨烯在不同费米能级下的电导率曲线
Fig. 2 Conductivity cures of graphene with different Fermi levels

由图 2 可以看出,石墨烯的电导率随费米能级的改变而改变,而改变石墨烯费米能级的方法主要有外加偏置电压、磁场和光泵等。由于外加偏置电压的方式最为简单有效,因此选择该方式来改变石墨烯的费米能级,二者的关系为



$$\frac{\epsilon_0 \pi \hbar^2 v_F^2}{e} E_{\text{bias}} = \int_0^\infty \epsilon [f_d(\epsilon) - f_d(\epsilon + 2\mu_c)] d\epsilon, \quad (3)$$

式中 E_{bias} 为外加偏置电压,与能带无关的电子速度 $v_F=10^6$ m/s。在仿真过程中,将根据(1)、(2)式计算出的石墨烯电导率值导入其材料特性中,并将石墨烯看作厚度为 $0.001 \mu\text{m}$ 的薄层,从而实现石墨烯材料参数的设置,除此之外,在石墨烯层与介质层之间的边界处设置一条窄带的银电极,用以外加偏置电压。

由图 2 可以看出,石墨烯自身的电导率可以随外加偏置电压的改变而改变,但是其本身的电导率相对较小,无法实现超材料吸波体理想的超高吸收率和灵活的可调功能,因此将石墨烯与金属结构相结合,一方面可以实现传统超材料吸波体的高吸收特性,另一方面可以利用石墨烯本身电导率的可控性实现对超材料吸波体的可调功能。

3 仿真结果与分析

首先,分别对单独金属十字架结构、单独石墨烯结构以及石墨烯-金属混合结构超材料吸波体的吸收曲线进行仿真模拟,结果如图 3(a)所示。可以看出,单独金属十字架结构和单独石墨烯结构都无法在该频段达到超吸收效果,而将两者结合形成的石墨烯-金属混合结构超材料可实现对该频段的超吸收效果。随后,又对石墨烯不同费米能级下石墨烯-金属混合结构超材料吸波体的吸收曲线进行仿真模拟,其结果如图 3(b)所示。可以看出,当石墨烯的费米能级从 0 eV 变化到 0.3 eV 时,吸波体的中心频率保持在 28.5 GHz 附近,没有发生明显改变,但是吸收率从 99% 降低到 41% ,实现了振幅可调的功能,继续增加石墨烯的费米能级仍可以降低其吸收

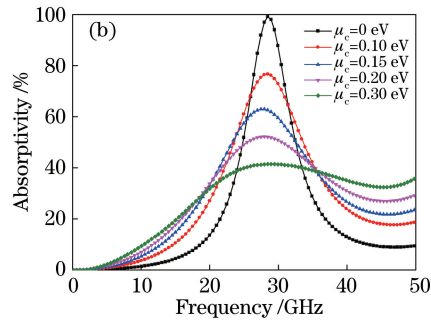


图 3 不同结构的吸收率曲线。(a)单独金属十字架结构、单独石墨烯结构以及石墨烯-金属混合结构超材料吸波体;
(b)不同费米能级下的石墨烯-金属混合结构超材料吸波体
Fig. 3 Absorptivity curves of different structures. (a) Single metal cross structure, single graphene structure, and graphene-metal hybrid structure; (b) metamaterial absorbers with different Fermi levels

强度,但其降低幅度较小,故这里只考虑石墨烯费米能级为 0~0.3 eV 下的情况。其调制深度 M 为

$$M = \frac{|A_{\text{bias}} - A_{\text{max}}|}{A_{\text{max}}} \times 100\%, \quad (4)$$

式中 A_{bias} 为不同费米能级下的吸收率, A_{max} 为最大吸收率。经计算可得,该超材料吸波体的调制深度最大可达 58.6%。并且其费米能级最大为 0.3 eV,这就意味着通过外加低偏置电压即可实现对其振幅的调制,更加符合实际需求。

其次,为了探究石墨烯宽度 G 以及金属十字架的长度 L 对超材料吸波体的影响,对该超材料结构的几何尺寸进行优化研究。当石墨烯的费米能级为 0 eV,周期长度和介质厚度不变,仅改变石墨烯宽度 G 时,其吸收率曲线如图 4 所示。当石墨烯宽度 G 由 0.15 mm 增加到 0.55 mm 时(即 L 由 2.7 mm 减小到 1.9 mm),其中心频率由 25.9 GHz 逐渐增加到 37.3 GHz,发生了蓝移现象,并且其吸收率几乎保持不变。由于此时石墨烯的费米能级为 0 eV,其表面电导率极低,因此超材料吸波体与入射电磁波发生的相互作用主要是依赖金属十字架的共振;又根据等效 LC 电路原理可知,发生蓝移现象的主要原因是金属十字架的结构参数随石墨烯的宽度发生了改变。根据这一特性,可以在应用过程中根据不同的需要来确定石墨烯宽度,保证其中心频率与实际应用相匹配。此外,还对石墨烯费米能级不为 0 eV 下的石墨烯宽度 G 以及金属十字架长度 L 对超材料吸波体的影响分别进行了仿真模拟,结果如图 4 所示。可以看出,当石墨烯费米能级为 0.15 eV 时,改变石墨烯宽度 G 以及金属十字架的长度 L 同样会使超材料吸波体的中心频率发生变化,且其变化趋势与石墨烯费米能级为 0 eV 时的变化趋势基本一致,产生这种现象的原因为石墨烯费

米能级增加后的表面电导率仍然远小于金属的高电导率,故此时中心频率发生偏移的主要影响因素仍为金属十字架结构参数的改变。

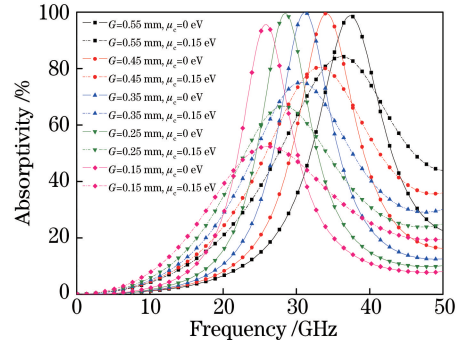


图 4 不同石墨烯宽度对应的吸收率曲线

Fig. 4 Absorptivity curves under different graphene widths

最后,根据多吸收峰叠加扩展带宽的原理,将两个相邻谐振吸收峰叠加形成宽带吸收峰。该超材料宽带吸波体结构单元如图 5 所示,其结构参数为: $G_1 = 0.45$ mm、 $L_1 = 2.1$ mm; $G_2 = 0.25$ mm、 $L_2 = 2.5$ mm,其他结构参数与单峰吸波体结构参数相同。

同样对石墨烯不同费米能级下的超材料宽带吸波体吸收曲线进行仿真模拟,其结果如图 6 所示。可以看出,当石墨烯费米能级为 0 eV 时,两个吸收峰互相叠加使得吸收频带扩宽,导致该超材料宽带吸波体吸收率大于 90% 的带宽达到了 8 GHz。并且从图 6 中可以看出,当石墨烯的费米能级从 0 eV 逐渐增加到 0.3 eV 时,该超材料宽带吸波体的吸收率也会从 96% 左右逐渐降低到 50% 左右,实现了宽频振幅可调的功能,更加符合实际需求。

综上所述,在单频吸收状态下可以通过改变外加偏置电压来改变石墨烯的费米能级,进而实现对该石墨烯-金属混合结构超材料吸波体振幅可调的功能;当石墨烯费米能级不变时,该吸波体的中心吸

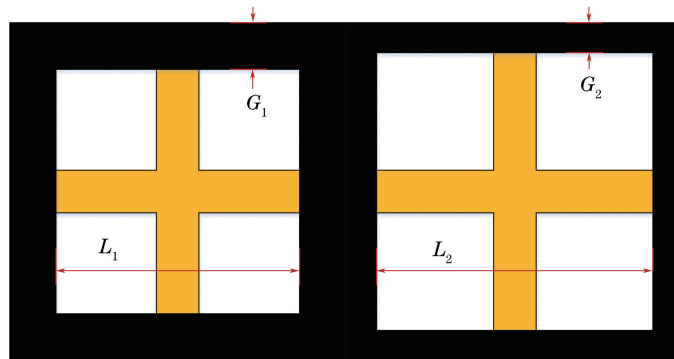


图 5 石墨烯-金属混合结构宽带超材料吸波体的单元结构示意图

Fig. 5 Schematic of unit structure of broadband metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid structure

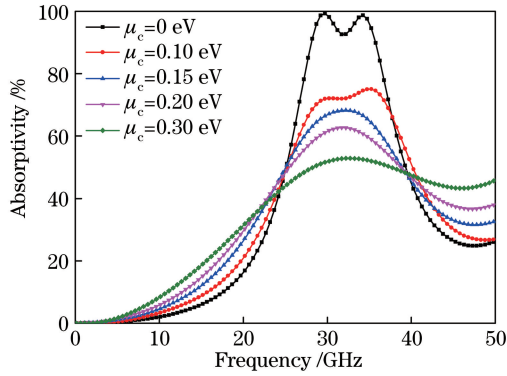


图 6 宽带超材料吸波体在不同费米能级下的吸收率曲线
Fig. 6 Absorptivity curves of broadband metamaterial absorbers with different Fermi levels

收频率可以随石墨烯宽度 G 的增加(即金属十字架 L 的减小)而发生蓝移现象。利用这一特性,通过多吸收峰叠加扩展带宽的原理实现了宽频吸收的超材料吸波体,并且同样可以通过改变外加偏置电压来实现对该宽频吸波体振幅可调的功能。

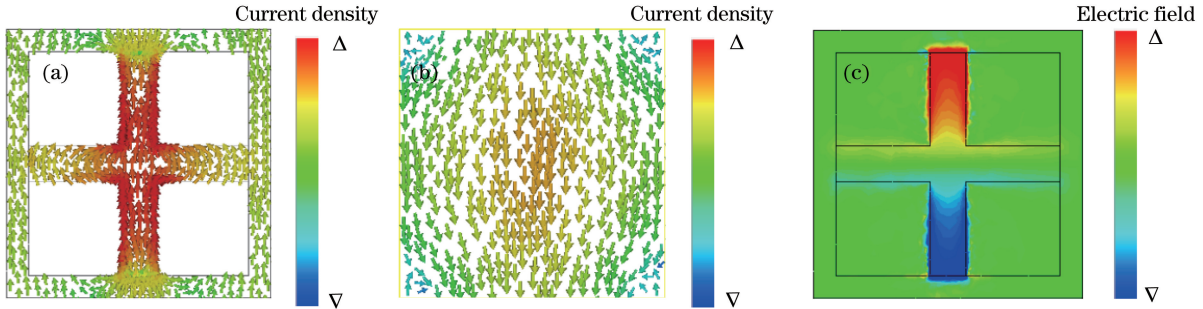


图 7 石墨烯费米能级为 0 eV 时超材料吸波体的场分布。(a) 表面电流,石墨烯-金属混和结构;(b) 表面电流,金属基底;(c) 电场,石墨烯-金属混合结构

Fig. 7 Field distributions of metamaterial absorber when graphene Fermi level is 0 eV. (a) Surface current, graphene-metal hybrid structure; (b) surface current, metal substrate; (c) electric field, graphene-metal hybrid structure

其次,分别对单独金属十字架结构、单独石墨烯结构以及石墨烯-金属混合结构超材料吸波体的电场分布进行仿真模拟,结果如图 8 所示。可以看出,单独的金属十字架结构仅能在中心频率处表现出较弱的谐振效果,而单独石墨烯结构在中心频率处几乎不产生谐振效果,两者都无法在该频段实现超吸收效果,而将两者结合形成的石墨烯-金属混合结构超材料可在中心频率处实现强烈的谐振效果,从而实现对该频段的超吸收效果。

另外,由对超材料吸波体的分析可知,超材料吸波体的吸收率由 $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 求得,其中

4 吸波体机理分析

为了研究该吸波体电磁吸波和振幅可调的机理,对吸波体的表面电流和电场分布分别进行了仿真计算与分析。首先以石墨烯费米能级为 0 eV 下的吸波体为例,在中心频率 28.5 GHz 处设置相应的场监视器,在微波垂直入射到结构表面的条件下计算得到其表面电流分布,结果如图 7 所示。其中图 7(a)、(b)所示分别是石墨烯-金属混合结构和底层金属基板的表面电流分布,可以看出,在电磁波的作用下,两者的表面形成了反平行电流并形成了一个电流回路,从而引起强烈的磁响应,进而在 Z 方向上产生强烈的磁谐振^[20]。同时,由图 7(c)还观测到,在石墨烯-金属混合结构上的电流主要集中在金属十字架之上,且电荷在金属十字架上下两个端口处交替积累,形成电偶极子共振。也就是说,在中心频率 28.5 GHz 处同时实现了磁谐振和电谐振,这也是构成超材料吸波体的前提条件。

S_{11} 、 S_{21} 由复阻抗 $Z(\omega)$ 与复折射率 $n(\omega)$ 决定。已知自由空间阻抗为 Z_0 ,反射率通常定义为

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 = \left[\frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \right]^2, \quad (5)$$

当 $Z(\omega) = Z_0$ 时,超材料的阻抗与自由空间的阻抗相匹配,反射率为 0,从而实现对入射电磁波的高吸收。故根据阻抗匹配原理可知:通过调节周期性单元结构的结构参数可以独立调控其有效介电常数和磁导率,即对其相应的磁响应和电响应进行调控,进而实现与自由空间的阻抗匹配,最终实现对中心频率的超强吸收。

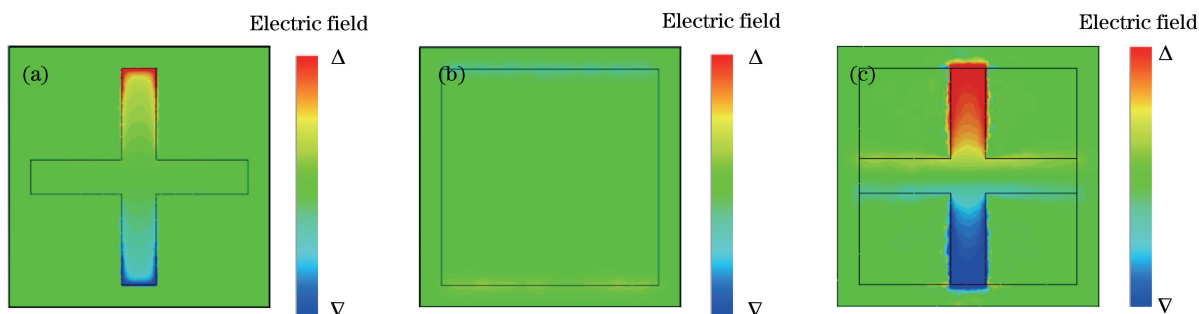


图 8 石墨烯费米能级为 0 eV 时不同超材料吸波体的场分布。(a)单独金属十字架结构；
(b)单独石墨烯结构；(c)石墨烯-金属混合结构

Fig. 8 Field distributions of metamaterial absorbers with different structures when graphene Fermi level is 0 eV.
(a) Single metal cross structure; (b) single graphene structure; (c) graphene-metal hybrid structure

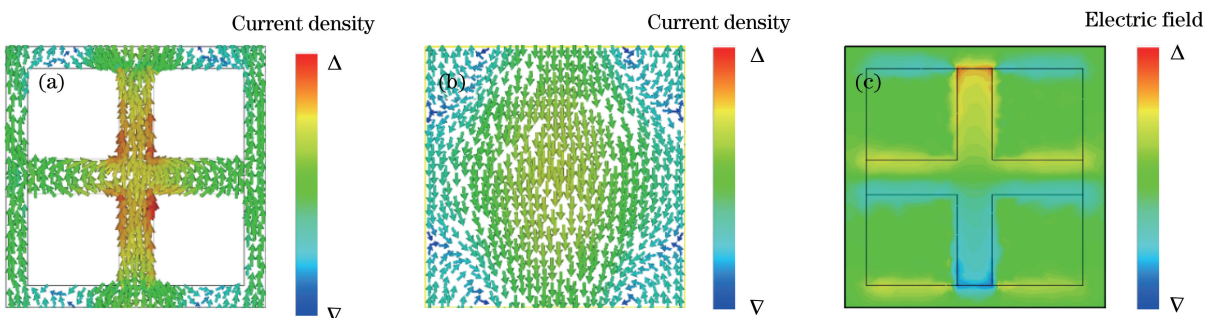


图 9 石墨烯费米能级为 0.3 eV 时超材料吸波体的场分布。(a)表面电流,石墨烯-金属混和结构；(b)表面电流,金属基底；
(c)电场,石墨烯-金属混合结构

Fig. 9 Field distributions of metamaterial absorber when graphene Fermi level is 0.3 eV. (a) Surface current, graphene-metal hybrid structure; (b) surface current, metal substrate; (c) electric field, graphene-metal hybrid structure

为了对吸波体的振幅调谐机理进行研究,在石墨烯费米能级为 0.3 eV 时对其表面电流和电场分布再次进行仿真计算,结果如图 9 所示。其中图 9(a)、(b)分别是石墨烯-金属混合结构和底层金属基底的表面电流分布,可以明显地看出,在电磁波的作用下,两者的表面依然形成了反平行电流和相应的电流回路,进而在 Z 方向上产生了对应的磁谐振,然而石墨烯费米能级的增加导致石墨烯中电流密度的增加,进而影响金属十字架上的电流分布,使其电流强度小于之前的电流强度,从而导致了 28.5 GHz 下 Z 方向的磁谐振效果大大降低。同时,之前集中在金属十字架上的电流导致电荷交替积累,从而形成了电偶极子共振。然而,此时的电流在石墨烯结构上的分布逐渐增加,并且此时的电场不仅分布在金属十字架之上,还分布在石墨烯结构上,从而降低了电荷在金属十字架两端交替积累的效果,进而降低了电偶极子的共振效果。由图 9(c)可知,此时的电场分布较为均匀,在金属十字架与石墨烯结构上都存在由电场引起的电偶极子共振,但共振效果却大幅度降低。也就是说,在石墨烯费米能

级从 0 eV 增加到 0.3 eV 的过程中,在中心频率 28.5 GHz 处都可以实现磁谐振和电谐振,只是其谐振效果不断减弱,从而导致吸波体的中心频率保持在 28.5 GHz 不变,而吸收率不断降低。

为了研究宽带吸波体的吸收机理,分别对超材料吸波体在 28 GHz 和 32 GHz 处的电场分布进行

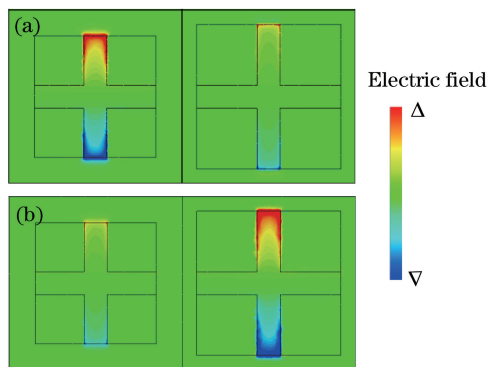


图 10 石墨烯费米能级为 0 eV 时超材料吸波体在不同频率下的场分布。(a) 28 GHz; (b) 32 GHz

Fig. 10 Field distributions of metamaterial absorber under different frequencies when graphene Fermi level is 0 eV. (a) 28 GHz; (b) 32 GHz

了仿真模拟,结果如图 10 所示。由图 10 可知,在 28 GHz 处,左边金属十字架的电场较强,说明此频率下的吸收主要是由左边金属十字架谐振导致;同理可知,32 GHz 处是由右边金属十字架谐振而导致的高吸收。两个不同尺寸的结构分别在两个频率处产生谐振,将两者相连就实现了宽频吸收。宽频吸波体的振幅可调机理与单频吸波体的振幅可调机理相似,即随着石墨烯费米能级的增加,两边金属十字架的谐振效果不断减弱,从而导致吸收率的不断降低,进而实现对宽频超材料吸波体的振幅可调特性。

5 结 论

基于石墨烯自身电导率可调的特性和金属高电导率的特性,利用石墨烯与金属相结合的方法提出了一种新型超材料吸波体结构。利用商业软件 CST 对单频超材料吸波体进行了仿真模拟,仿真结果表明:当结构参数不变,石墨烯费米能级由 0 eV 逐渐增加到 0.3 eV 时,该吸波体的吸收率由 99% 降低到 41%,调制深度最大可达 58.6%,而当石墨烯费米能级为 0 eV 时,吸波体的中心频率随结构参数的改变而改变。根据多吸收峰叠加扩展带宽的原理,通过不同尺寸单元的排列实现了宽频吸波的特性,并通过仿真模拟证明了该宽频吸波体同样具有振幅可调的性质。通过对该吸波体表面电流分布及内部空间电场的仿真模拟,阐述了其电磁吸波及振幅可调的机理。该方法将石墨烯与金属结合,使其同时具有传统金属超材料的电磁波高吸收特性和石墨烯的调控特性,结构设计简单,调控范围较大,在隐身、探测和通信等领域都具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, *et al.* Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [2] Schurig D, Mock J J, Justice B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [3] Wu D, Liu Y, Li R, *et al.* Infrared perfect ultra-narrow band absorber as plasmonic sensor [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2016, 11(1): 483.
- [4] Karaaslan M, Bağmancı M, Ünal E, *et al.* Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications [J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 31-38.
- [5] Astorino M D, Frezza F, Tedeschi N. Ultra-thin narrow-band, complementary narrow-band, and dual-band metamaterial absorbers for applications in the THz regime [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(6): 063103.
- [6] Liu N, Mesch M, Weiss T, *et al.* Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [7] Hao J, Zhou L, Qiu M. Nearly total absorption of light and heat generation by plasmonic metamaterials [J]. *Physical Review B*, 2011, 83(16): 165107.
- [8] Wang B X, Zhai X, Wang G Z, *et al.* A novel dual-band terahertz metamaterial absorber for a sensor application [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(1): 014504.
- [9] Gu C, Qu S B, Pei Z B, *et al.* Multiband terahertz metamaterial absorber [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(1): 017801.
- [10] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, *et al.* A simple design of ultra-broadband and polarization insensitive terahertz metamaterial absorber [J]. *Applied Physics A*, 2014, 115(4): 1187-1192.
- [11] Xu N, Chen J, Wang J, *et al.* Dispersion HIE-FDTD method for simulating graphene-based absorber [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, 11(1): 92-97.
- [12] Zhang Y, Feng Y, Zhu B, *et al.* Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22743-22752.
- [13] Chen C, Yang S Y, Yu J, *et al.* Numerical study on tunable perfect absorption in square graphene-dielectric arrays at near-infrared wavelengths [J]. *Materials & Design*, 2017, 128: 157-165.
- [14] Parvaz R, Karami H. Far-infrared multi-resonant graphene-based metamaterial absorber [J]. *Optics Communications*, 2017, 396: 267-274.
- [15] Fallahi A, Perruisseau-Carrier J. Design of tunable bi-periodic graphene metasurfaces [J]. *Physical Review B*, 2012, 86(19): 195408.
- [16] Huang X, Hu Z, Liu P. Graphene based tunable fractal Hilbert curve array broadband radar absorbing screen for radar cross section reduction [J]. *AIP Advances*, 2014, 4(11): 117103.
- [17] Balci O, Polat E O, Kakenov N, *et al.* Graphene-enabled electrically switchable radar-absorbing surfaces [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6628.
- [18] 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.

- [19] Ren L, Zhang Q, Yao J, *et al.* Terahertz and infrared spectroscopy of gated large-area graphene [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3711-3715.
- [20] Zou T B, Hu F R, Xiao J, *et al.* Design of a polarization-insensitive and broadband terahertz absorber using metamaterials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(17): 178103.
邹涛波, 胡放荣, 肖靖, 等. 基于超材料的偏振不敏感太赫兹宽带吸波体设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(17): 178103.