

基于石墨烯互补超表面的可调谐太赫兹吸波体

张会云 黄晓燕 陈琦 丁春峰 李彤彤 吕欢欢 徐世林 张晓 张玉萍 姚建铨

Tunable terahertz absorber based on complementary graphene meta-surface

Zhang Hui-Yun Huang Xiao-Yan Chen Qi Ding Chun-Feng Li Tong-Tong Lü Huan-Huan Xu Shi-Lin Zhang Xiao Zhang Yu-Ping Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 018101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.018101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.018101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含石墨烯临界耦合谐振器的吸收特性研究

[Study on the absorbing properties of critically coupled resonator with graphene](#)

物理学报.2015, 64(23): 238103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.238103>

单层石墨烯带传输模式及其对气体分子振动谱的传感特性研究

[Transmission mode of a single layer graphene and its performance in the detection of the vibration spectrum of gas molecular](#)

物理学报.2015, 64(19): 198102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198102>

石墨烯-六方氮化硼面内异质结构的扫描隧道显微学研究

[Scanning tunneling microscopy study of in-plane graphene-hexagonal boron nitride heterostructures](#)

物理学报.2015, 64(7): 078101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.078101>

石墨烯衍生物作为有机太阳能电池界面材料的研究进展

[Recent progress in graphene and its derivatives as interfacial layers in organic solar cells](#)

物理学报.2015, 64(3): 038103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038103>

基于FDFD方法研究含石墨烯薄膜太阳能电池的电磁特性

[Study on the electromagnetic properties of thin-film solar cell grown with graphene using FDFD method](#)

物理学报.2015, 64(1): 018101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.018101>

基于石墨烯互补超表面的可调谐太赫兹吸波体^{*}

张会云^{1)†} 黄晓燕¹⁾ 陈琦^{2)‡} 丁春峰³⁾ 李彤彤¹⁾ 吕欢欢¹⁾ 徐世林¹⁾
 张晓¹⁾ 张玉萍¹⁾ 姚建铨³⁾

1) (山东科技大学电子通信与物理学院, 青岛市太赫兹技术重点实验室, 青岛 266590)

2) (中国工程物理研究院电子工程研究所, 绵阳 621900)

3) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, 天津 300072)

(2015年7月13日收到; 2015年9月17日收到修改稿)

通过在石墨烯超表面设计周期性切条, 实现了基于石墨烯互补超表面的可调谐太赫兹吸波体. 通过改变外加电压来改变石墨烯的费米能级, 吸波体实现频率可调谐特性. 研究了石墨烯费米能级、结构尺寸对超材料吸波体吸收特性的影响, 并利用多重反射理论研究了其物理机理并且证明了模拟方法的可行性. 研究表明: 当石墨烯费米能级取 0.6 eV, 基底厚度 13 μm , 石墨烯上切条长宽分别为 2.9 μm , 0.1 μm 时, 吸波体在 1.865 THz 可以实现 99.9% 的完美吸收; 石墨烯费米能级从 0.4 eV 增大到 0.9 eV, 吸波体共振频率从 1.596 THz 蓝移到 2.168 THz, 且伴随共振吸收率的改变, 吸收率在 0.6 eV 时达到最大; 通过改变费米能级实现的最大吸收率调制度达 84.55%.

关键词: 石墨烯, 超材料, 完美吸收, 多重反射理论

PACS: 81.05.ue, 42.25.Bs, 78.67.Pt, 75.40.Mg

DOI: 10.7498/aps.65.018101

1 引言

完美吸波体最早由 Landy 等^[1] 于 2008 年提出, 其基本原理是通过调控电磁谐振, 实现超材料吸波体与自由空间的匹配降低入射电磁波的反射率, 利用吸波体的介质损耗和欧姆损耗实现电磁波的吸收. 近年来, 由于在探测、成像和传感方面潜在的应用价值, 太赫兹吸波体成为太赫兹和超材料领域的一个研究热点^[2-4]. 自 Tao 等^[5] 设计并制作了第一个太赫兹频段的窄带吸波体之后, 太赫兹双带吸波体、多带吸波体和宽带吸波体等^[6-18] 也相继被研究, 不过这些吸波体只能工作在固定的频率或有限的频率范围内. 尽管通过重建几何模型或者修改基底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, 这限制了吸波体在

实际中的应用^[19]. 近来, 为了克服这个障碍, 实现动态可调的太赫兹超材料吸波体, 有研究组通过将超材料与活性材料或者微机电系统 (MEMS) 材料组合实现频率调谐^[20,21]. 然而, 可调谐性和大规模制造的可能性仍然受到合成材料的可实现性以及 MEMS 工艺的限制.

石墨烯是单层碳原子紧密堆积成的二维蜂窝状结构材料, 具有零带隙能带结构、良好的导电性、超高的电子迁移率、近弹道输运、量子霍尔效应等奇特的物理化学特性, 使其成为凝聚态物理研究的热点. 一些研究组通过设计石墨烯与金属或电介质组成的复合结构实现了单带、多带或宽带吸波体. Alaei 等^[22] 研究了远红外频段下基于石墨烯微带的完美超材料吸波体. Andryieuski 和 Lavrinenko^[23] 利用等效表面电导率方法研究了石墨烯线和石墨烯渔网超材料吸波体的特性. Vasić

^{*} 山东省自然科学基金 (批准号: ZR2012FM011)、青岛市创新领军人才项目 (批准号: 13-CX-25)、中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金 (批准号: 201401)、青岛经济技术开发区重点科技计划 (批准号: 2013-1-64) 和国家留学基金资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: sdust_thz@126.com

[‡] 通信作者. E-mail: qchen1103@163.com

和Gajić [24] 研究了中红外频段下利用石墨烯的光谱调节来拓宽共振超材料吸波体的带宽. Woo等 [25] 提出了一种基于石墨烯的多带太赫兹吸波体. Amin等 [26] 提出了太赫兹频段下的超宽带多层石墨烯吸波体. He和Chen [27] 研究了由石墨烯-电介质多层金字塔置于金属层上组成的宽带太赫兹吸波体. Xu等 [28] 提出由不均匀介质板结构组成的可调太赫兹石墨烯吸波体. Wu等 [29] 通过实验研究了基于堆栈多层石墨烯和石英基底的透明宽带吸波体. Zhu等 [30] 研究了通过周期排列化学掺杂的不同梯度宽度石墨烯带组成宽带单层石墨烯太赫兹吸波体. 石墨烯的电导率能够随费米能级的变化而改变, 使得石墨烯在各种可调谐的器件中具有重要的应用价值. Zhang等 [31] 通过结合十字形金属谐振器和双层石墨烯线实现了偏振无关的可调谐太赫兹吸波体. 本课题组 [32] 研究了中红外频段基于石墨烯的可调偏振无关双带吸波体. Fan等 [33] 研究了基于石墨烯纳米切条的可调谐太赫兹超表面, 但其分离的石墨烯切条结构造成了实验中施加电压改变费米能级的难度.

基于以上研究背景, 考虑在实验中更方便地施加和改变电压, 本文设计了一种石墨烯超材料互补结构的吸波体, 研究了石墨烯费米能级和器件结构尺寸对该超材料吸波体可调谐特性和吸收特性的影响, 并利用多重反射理论 [34] 对其物理机理进行了分析与解释. 该超材料吸波体设计简单, 加工容易, 具有重要的应用价值.

2 理论模型及计算方法

我们设计的基于石墨烯互补超表面的吸波体如图1所示. 吸波体由三层结构组成, 由前到后依次为: 具有切条的石墨烯微米带、二氧化硅隔离层、金基底. 材料参数为: 二氧化硅的介电常数为3.9, 厚度取值为10—15 μm ; 金的电导率为 $4.0 \times 10^7 \text{ S/m}$, 厚度 t 为0.1 μm ; 图中一个周期单元结构参数 P 为6 μm , H 为3 μm , 切条长 l 为2.9 μm , 宽 w 为0.1 μm . 利用CST商用软件的3D-FDTD方法对所设计的超材料吸波体进行全波仿真.

石墨烯的表面电导率可以由Kubo公式 [35,36] 表示: $\sigma = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$, 其中, σ_{intra} 和 σ_{inter} 分别表示带内和带间电导率. 当费米能级大于入射光子能量的一半, 即 $\hbar\omega < 2E_F$ 时, 由于Pauli阻

塞 [37], 石墨烯带间电导率可以忽略不计, 其总电导率由带内电导率主导. 由于太赫兹光子能量很低, 这个条件很容易满足, 我们在研究中将最低费米能级设定为0.4 eV, 使 $\hbar\omega \ll 2E_F$. 在数值模拟计算中, 与入射光波长相比, 石墨烯一个原子的厚度足够薄, 因此石墨烯层可以看作是一个薄片材料, 其复电导率为 σ_g . 基于随机相位近似(RPA)理论 [36,38,39], 石墨烯的复电导率用Drude模型表示为 $\sigma_g = ie^2 E_F / [\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})]$, 复介电常数的表达式 $\varepsilon_g = 1 + i\sigma_g / (\varepsilon_0 \omega \Delta)$, 其中 E_F 代表费米能级, Δ 是石墨烯的厚度(文中取0.5 nm), $\tau = \mu E_F / ev_F^2$ 是弛豫速率, 电子迁移率 $\mu = 10^4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [33], 费米速度 $v_F \approx 10^6 \text{ m/s}$.

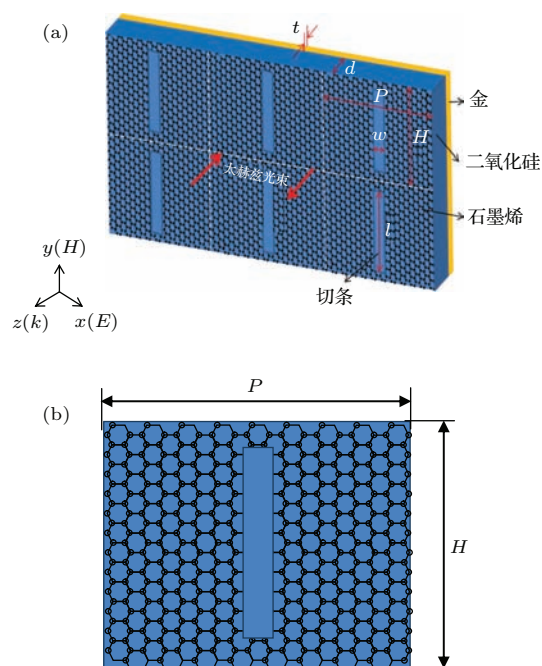


图1 (网刊彩色)(a) 石墨烯超表面完美吸波体结构示意图(六个单元结构); (b) 一个单元结构的俯视图

Fig. 1. (color online) (a) The structure schematic diagram of perfect absorber based on graphene metasurface (six unit cells); (b) the top view of one unit structure.

在用CST软件进行仿真时, 将根据石墨烯复介电常数的表达式计算出不同频率下的介电常数值, 然后将介电常数在不同频率下的色散值导入石墨烯的材料特性中, 从而实现对石墨烯的设置.

3 计算结果与分析

首先我们研究了费米能级对石墨烯电导率的影响. 不同费米能级下电导率的实部和虚部随频率

的变化如图2所示. 从图2可知, 随着费米能级的增大, 石墨烯电导率的实部和虚部均变大, 频率发生红移, 而且石墨烯的电导率在低频色散明显. 与传统金属材料相比, 石墨烯最大的优势就是图2所示的通过静电掺杂电导率的动态可调谐性.

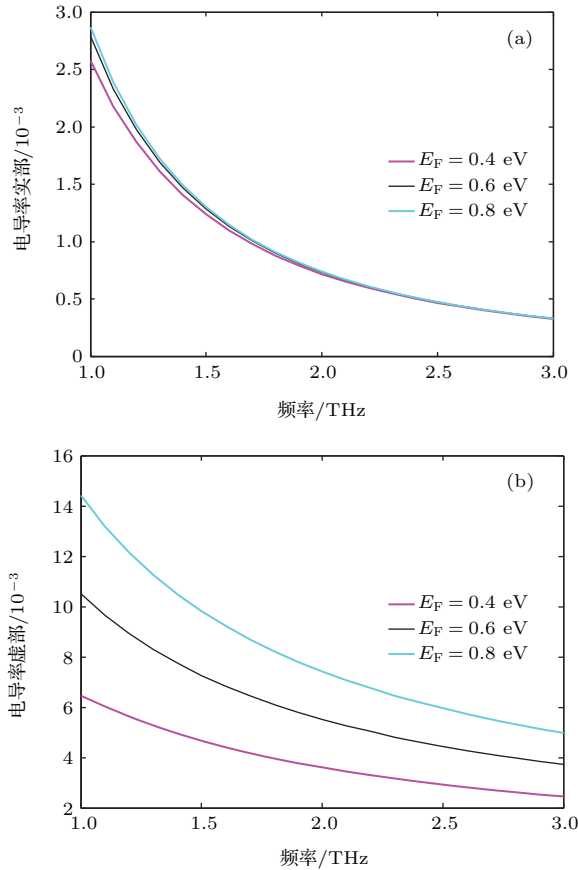


图2 (网刊彩色) 不同费米能级情况下, 石墨烯的电导率 (a) 实部和 (b) 虚部与频率的关系
Fig. 2. (color online) The relation diagrams of (a) real part and (b) imagine part of graphene conductivity as a function of frequency at different Femi level.

根据上面的分析可知, 石墨烯费米能级的变化会影响石墨烯的电导率, 从而影响器件结构对太赫兹光的吸收情况. 通常情况下, 太赫兹光的吸收率可以表示为 $A = 1 - r^2 - t^2$, 其中 r 为反射系数, t 为透射系数. 因为太赫兹波在金属中的趋肤深度小于基底金属层厚度, 所以透射系数等于零, 吸收率就简化为 $A = 1 - r^2$. 文中均用该公式计算吸波体对太赫兹光的吸收率. 图3(a)是隔离层 $d = 13$ μm , 切条尺寸 $l = 2.9$ μm , $w = 0.1$ μm 时, 费米能级取 0.4 — 0.9 eV 时吸波体吸收率随频率变化的曲线. 可以看出: 石墨烯费米能级从 0.4 eV 增大到 0.9 eV, 吸波体共振频率从 1.596 THz 蓝移到 2.168 THz, 频率移动了 26.38% . 且伴随共振吸收

率的改变, 吸收率在 0.6 eV 时达到最大; 在不同的费米能级下, 固定共振频率时, 实现的吸收率的调制度为 84.55% . 为了更加直观地理解吸收率与费米能级和频率的关系, 我们给出了入射光的吸收率随频率和石墨烯费米能级变化的关系, 如图3(b)所示, 较大的吸收在 1.5 — 2.5 THz 范围内.

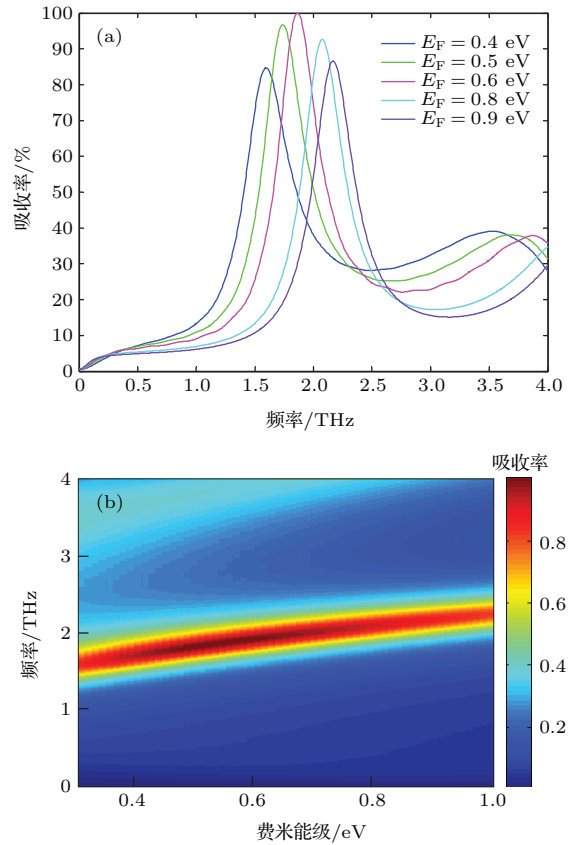


图3 (网刊彩色)(a) 吸收率随不同石墨烯费米能级变化的示意图; (b) 吸收率随石墨烯费米能级与频率变化的投影图
Fig. 3. (color online) (a) The absorption rate with varying graphene Femi level; (b) the projection drawing of absorption rate as functions of graphene Femi level and frequency.

为了得到理想的吸收谱线, 我们对石墨烯微米结构的几何尺寸进行优化研究. 当切条尺寸为 $l = 2.9$ μm , $w = 0.1$ μm , 二氧化硅隔离层取不同的厚度, 石墨烯微米结构对太赫兹光的吸收谱如图4(a)所示. 从图4(a)可以看出, 当二氧化硅隔离层厚度增加时, 共振吸收发生红移, 并且吸波体在 $d = 13$ μm 时达到完美吸收. 图4(b)为固定隔离层的厚度 $d = 13$ μm , 改变切条长度得到的吸收谱. 由图4(b)可见, 切条的长度变大时, 共振吸收同样发生了红移, 并且在 $l \leq 2.9$ μm 的尺寸内均可以实现 99% 以上的吸收.

图4(c)为固定隔离层的厚度 $d = 13 \mu\text{m}$, 切条长度 $l = 2.9 \mu\text{m}$ 时, 共振吸收及共振频率随切条宽度变化的曲线. 从图4(c)可以看出: 随着切条宽度不断变大, 共振频率单调增加, 发生蓝移; 同时, 吸波体在 $w = 0.1 \mu\text{m}$ 处实现完美吸收.

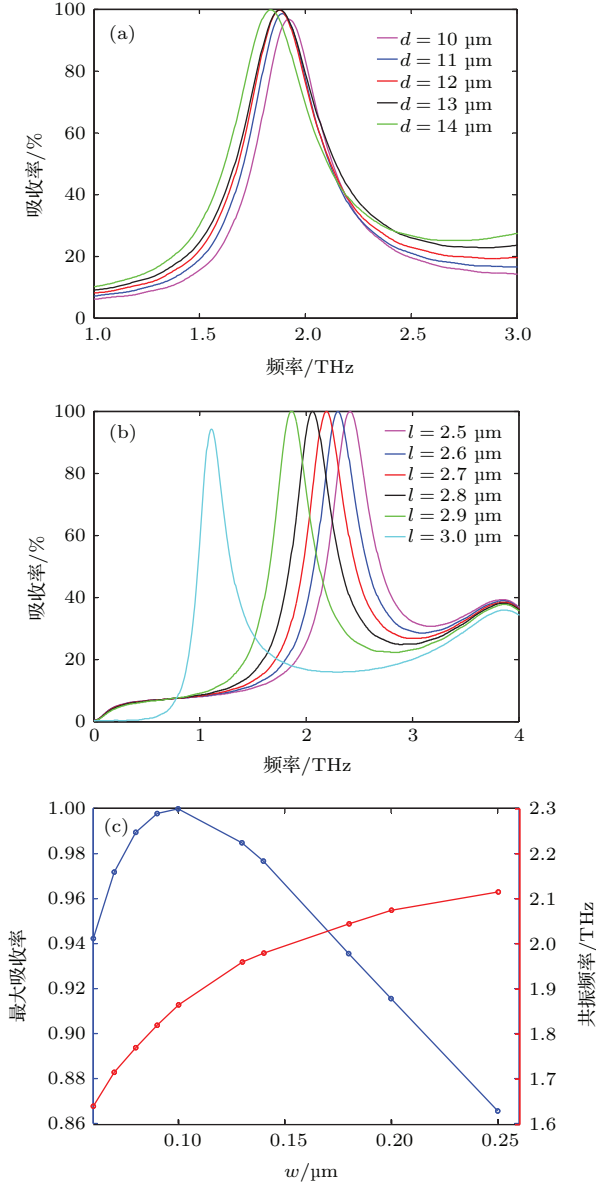


图4 (网刊彩色) 石墨烯的费米能级为0.6 eV时, (a) 不同SiO₂隔离层厚度和(b)不同切条长度对应的吸收谱以及(c)不同的切条宽度对应的最大吸收值与共振频率图

Fig. 4. (color online) When graphene Femi level is 0.6 eV, the absorption spectra at (a) different thicknesses of SiO₂ and (b) different lengths of cut-wire, and (c) the diagram of cut-wire width corresponding to the maximum absorption and resonance frequency.

根据以上优化分析, 我们得到了石墨烯的费米能级 $E_F = 0.6 \text{ eV}$ 时, 吸波体的反射、透射和吸收谱, 如图5所示, 其中, $t = 0.1 \mu\text{m}$, $d = 13 \mu\text{m}$,

$l = 2.9 \mu\text{m}$, $w = 0.1 \mu\text{m}$. 从图5可看出, 吸波体在频率为1.865 THz处的共振峰值实现了99.9%的完美吸收.

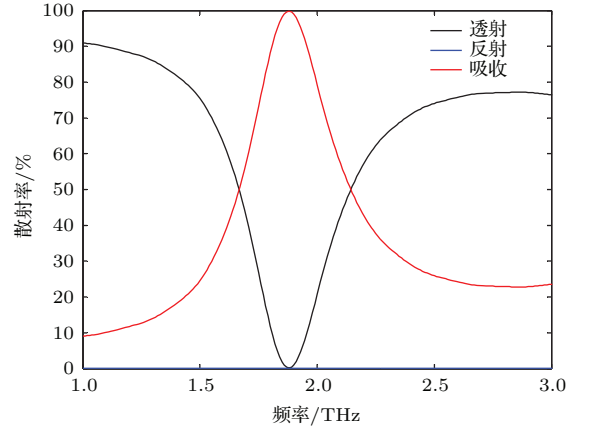


图5 (网刊彩色) 石墨烯的费米能级 $E_F = 0.6 \text{ eV}$ 时, 吸波体的反射、透射和吸收谱

Fig. 5. (color online) The reflection, transmission and absorption spectrum of absorber when graphene Femi level is 0.6 eV.

4 吸波体的机理分析

为了进一步研究吸波体的吸收机理, 我们引入多重反射理论对吸收的物理机理进行分析解释. 在该理论中, 光波的相位差和振幅大小都影响到吸收的情况. 如图6所示, 将吸波体看作有两个镜面的不对称法布里-珀罗腔, 顶部镜面为石墨烯微米带阵列, 底部镜面为金属接地层. 顶部的超材料层的厚度极小, 可以忽略, 底部的金属接地层可看作是反射系数为 -1 的完美反射面. 在该模型中, 所有的近场干涉和磁共振已被忽略. 太赫兹光以某个角度入射到超表面上, 一部分反射到空气中, 另一部分透射到隔离层中, 继续传播至金属层. 反射系数 $\tilde{r}_{12} = r_{12} e^{i\phi_{12}}$; 透射系数 $\tilde{t}_{12} = t_{12} e^{i\theta_{12}}$; 复传播相位 $\tilde{\beta} = \beta_r + i\beta_i = \sqrt{\epsilon_{\text{space}}} k_0 d$, 其中 k_0 是真空中波矢, β_r 是传播相位, β_i 表示绝缘层的吸收, ϵ_{space} 是隔离层的介电常数. 光线在到达金属层表面之后, 再次出现部分反射回隔离层, 部分透射到空气中的情况, 此时反射系数 $\tilde{r}_{21} = r_{21} e^{i\phi_{21}}$, 透射系数 $\tilde{t}_{21} = t_{21} e^{i\theta_{21}}$. 类似于光在分层介质中的传播, 此结构中的全部反射就是多次反射的叠加. 总反射系数 $\tilde{r} = \tilde{r}_{12} - \frac{\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21}e^{i2\beta}}{1 + \tilde{r}_{12}e^{i2\beta}}$, 其中第一项是石墨烯界面上的直接反射, 第二项, 包括符号“ $-$ ”, 是石墨烯与金属接地层之间多次反射叠加的结果. 由于太赫兹在金属中的趋肤深度为70 nm, 小于金属

层厚度, 所以透射系数等于零, 吸收率可以表示为 $A(\omega) = 1 - |\tilde{r}(\omega)|^2$.

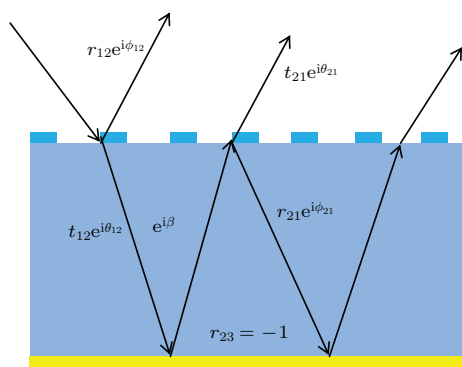


图6 (网刊彩色) 吸波体结构的多重反射示意图
Fig. 6. (color online) The multiple-reflection schematic map of absorber structure.

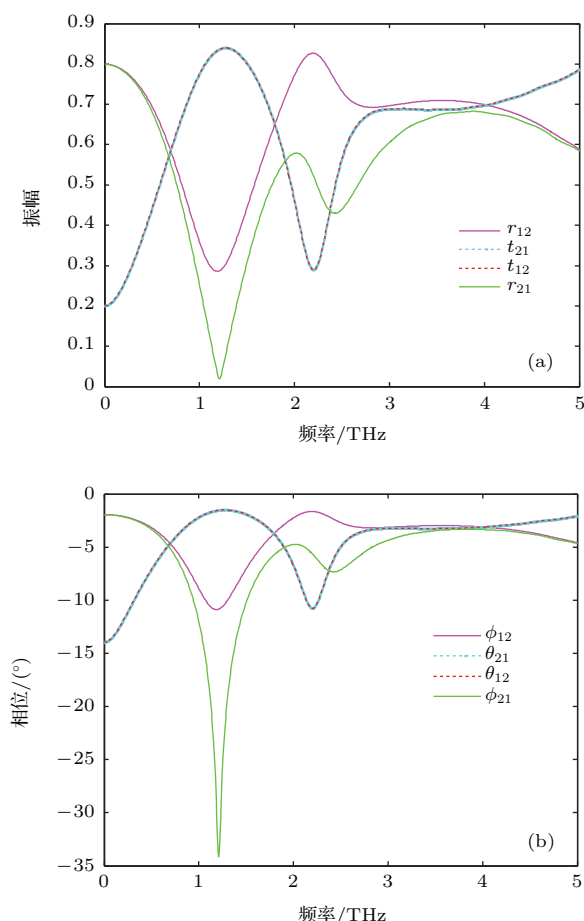


图7 (网刊彩色) (a) 太赫兹光射到石墨烯与隔离层界面上时反射和透射系数的振幅; (b) 太赫兹光射到石墨烯与隔离层界面上时反射和透射系数的相位

Fig. 7. (color online) (a) The amplitude of reflection and transmission coefficients when THz light incident on the interface of graphene and substrate; (b) the phase of reflection and transmission coefficient when THz light incident on the interface of graphene and substrate.

石墨烯与隔离层界面上的反射和透射系数的振幅和相位的模拟结果分别如图7(a)和图7(b)所示。我们将多重反射理论计算的吸收率与用CST数值模拟所得的结果进行比较, 如图8所示。从图8可以看出, 两者基本相符合, 较小的差异是由于金属接地层以及模拟所取的数据点有偏差所致, 可见数值模拟的结果较为可靠。

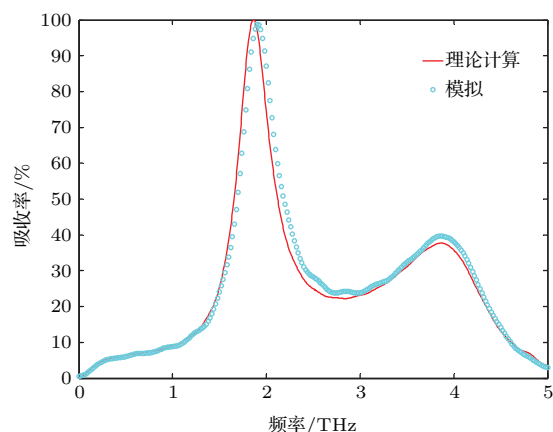


图8 (网刊彩色) 吸收率的数值模拟与理论计算结果对比
Fig. 8. (color online) The absorption rate comparison diagram of numerical simulation and theoretical calculation.

5 结 论

本文设计了一种新型的石墨烯超表面可调谐完美吸波体, 并基于多重反射理论解释了其吸波机理。研究了石墨烯不同费米能级、不同几何尺寸时, 吸波体对太赫兹光的吸收情况。研究结果表明: 切条尺寸一定时, 增大基底厚度, 共振频率出现红移, 且基底厚度为 $13 \mu\text{m}$ 时达到最大吸收; 基底厚度一定时, 切条长度增大、宽度减小也会使共振频率出现红移, 在 $l = 2.9 \mu\text{m}$, $w = 0.1 \mu\text{m}$ 时实现最大吸收。当石墨烯费米能级取 0.6 eV , 基底厚度 $13 \mu\text{m}$, 石墨烯上切条长宽分别为 $2.9 \mu\text{m}$, $0.1 \mu\text{m}$ 时, 吸波体在 1.865 THz 实现 99.9% 的完美吸收。在该结构的基础上, 可以通过调整结构的几何尺寸以及石墨烯的费米能级得到不同的共振频率, 也可以在石墨烯上设计不同结构的切条来达到实际应用的目的。

参考文献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [2] Zhang X C 2002 *Phys. Med. Biol.* **47** 3667

- [3] Yahiaoui R, Guillet J P, Miollis F D, Mounaix P 2013 *Opt. Lett.* **38** 4988
- [4] Alves F, Grbovic D, Keaney B, Lavrik N V, Karunasiri G 2013 *Opt. Express* **21** 13256
- [5] Tao H, Landy N I, Bingham C M, Zhang X, Averitt R D, Padilla W J 2008 *Opt. Express* **16** 7181
- [6] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241111
- [7] Ma Y, Chen Q, Grant J, Saha S C, Khalid A, Cumming D R S 2011 *Opt. Lett.* **36** 945
- [8] Wen Y Z, Ma W, Bailey J, Matmon G, Yu X M, Aeppli G 2013 *Appl. Opt.* **52** 4536
- [9] Ma Y B, Zhang H W, Li Y X, Wang Y C, Lai W E, Li J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 058102
- [10] Shen X P, Yang Y, Zang Y Z, Gu J Q, Han J G, Zhang W L, Cui T J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 154102
- [11] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017801
- [12] Dai Y H, Chen X L, Zhao Q, Zhang J H, Chen H W, Yang C R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064101 (in Chinese) [戴雨涵, 陈小浪, 赵强, 张继华, 陈宏伟, 杨传仁 2013 物理学报 **62** 064101]
- [13] Mo M M, Wen Q Y, Chen Z, Yang Q H, Li S, Jing Y L, Zhang H W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 237801 (in Chinese) [莫漫漫, 文岐业, 陈智, 杨青慧, 李胜, 荆玉兰, 张怀武 2013 物理学报 **62** 237801]
- [14] Ma Y, Chen Q, Grant J, Saha S, Khalid A, Cumming D R S 2011 *Opt. Lett.* **36** 3476
- [15] Ye Y Q, Jin Y, He S L 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 498
- [16] Wang B X, Wang L L, Wang G Z, Huang W Q, Li X F, Zhai X 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 111
- [17] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, Reiten M T, Luo S N, Taylor A J, Chen H T 2012 *Opt. Lett.* **37** 154
- [18] Wen Y Z, Ma W, Bailey J, Matmon G, Yu X M, Aeppli G 2014 *Opt. Lett.* **39** 1589
- [19] Liu C, Ye J, Zhang Y 2010 *Opt. Commun.* **283** 865
- [20] Zhou H, Ding F, Ji Y, He S L 2011 *Prog. Electromagn. Res.* **119** 449
- [21] Hu F R, Qian Y X, Li Z, Niu J H, Nie K, Xiong X M, Zhang W T, Peng Z Y 2013 *J. Opt.* **15** 055101
- [22] Alae R, Farhat M, Rockstuhl C, Lederer F 2012 *Opt. Express* **20** 28017
- [23] Andryieuski A, Lavrinenko A V 2013 *Opt. Express* **21** 9144
- [24] Vasić B, Gajić R 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 261111
- [25] Woo J M, Kim M S, Kim H W, Jang J H 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 081106
- [26] Amin M, Farhat M, Bağcı H 2013 *Opt. Express* **21** 29938
- [27] He S, Chen T 2013 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **3** 757
- [28] Xu B Z, Gu C, Li Z 2013 *Opt. Express* **21** 23803
- [29] Wu B, Tuncer H M, Naeem M, Yang B, Cole M T, Milne W I, Hao Y 2014 *Sci. Rep.* **4** 4130
- [30] Zhu Z H, Guo C C, Zhang J F, Liu K, Yuan X D, Qin S Q 2015 *Appl. Phys. Express* **8** 015102
- [31] Zhang Y, Feng Y, Zhu B, Zhao J, Jiang T 2014 *Opt. Express* **22** 22743
- [32] Zhang Y P, Li T T, Lü H H, Huang X Y, Zhang X, Xu S L, Zhang H Y 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 068101
- [33] Fan Y, Shen N H, Koschny T, Soukoulis C M 2015 *ACS Photon.* **2** 151
- [34] Chen H T 2012 *Opt. Express* **20** 7165
- [35] Hanson G W 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 064302
- [36] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P 2007 *J. Phys. Condens. Matter* **19** 026222
- [37] Yao Y, Kats M A, Genevet P, Yu N, Song Y, Kong J, Capasso F 2013 *Nano Lett.* **13** 1257
- [38] Wunsch B, Stauber T, Sols F, Guinea F 2006 *New J. Phys.* **8** 318
- [39] Hwang E H, Sarma S D 2007 *Phys. Rev. B* **75** 205418

Tunable terahertz absorber based on complementary graphene meta-surface*

Zhang Hui-Yun^{1)†} Huang Xiao-Yan¹⁾ Chen Qi^{2)‡} Ding Chun-Feng³⁾ Li Tong-Tong¹⁾
Lü Huan-Huan¹⁾ Xu Shi-Lin¹⁾ Zhang Xiao¹⁾ Zhang Yu-Ping¹⁾ Yao Jian-Quan³⁾

1) (Qingdao Key Laboratory of Terahertz Technology, College of Electronic, Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

2) (Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

3) (Institute of Laser and Optoelectronics, School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 13 July 2015; revised manuscript received 17 September 2015)

Abstract

Recently, metamaterials have attracted considerable attention because of their unique properties and potential applications in many areas, such as in bio-sensing, imaging, and communication. Among these researches, the metamaterial absorber has aroused much interest of researchers. The metamaterial absorber is important due to a broad range of potential application to solar energy, sensing, coatings for reducing the reflection, and selective thermal emitters. As a two-dimensional honeycomb structure composed of a single layer carbon atom, graphene is a promising candidate for tuning metamaterials and plasmonic structures due to its unique properties which differ substantially from those of metal and semiconductors. In this paper, we propose a tunable terahertz absorber based on graphene complementary metamaterial structure by removing periodic cut-wires on the graphene meta-surface. On the basis of the tunability of graphene conductivity, the absorber possesses a frequency tunable characteristic resulting from the change of graphene Fermi level by altering the applied voltage. Here, we mainly study the influences of Fermi level of graphene and the size of the structure on the absorption characteristic of this metamaterial absorber. We finally obtain the corresponding Fermi level and structural size under the perfect absorption condition. In addition, we utilize the multiple reflection theory to explore the physical mechanism, and verify the feasibility of the simulation method at the same time. The research indicates that the absorber can achieve 99.9% perfect absorption at 1.865 THz when the graphene Fermi level is 0.6 eV, the thickness of substrate is 13 μm , and the length and width of slit are 2.9 μm and 0.1 μm , respectively. When graphene Fermi level increases from 0.4 eV to 0.9 eV, the resonance frequency of the absorber is blue-shifted from 1.596 THz to 2.168 THz. Meanwhile, the absorption rate increases from 84.68% at 0.4 eV to a maximum value of 99.9% at 0.6 eV, then gradually decreases to 86.63% at 0.9 eV. The maximum modulation of the absorption rate is 84.55% by varying the Fermi level. When the thickness of substrate increases, the resonant frequency is red-shifted. The resonant frequency is blue-shifted when both the width and the length of the cut-wire on graphene increase. On the basis of the proposed graphene meta-surface absorber, one can gain different resonant frequencies by adjusting the structure geometric size and graphene Fermi level. The graphene complementary structure can also be designed into different patterns to achieve the purpose of practical application.

Keywords: graphene, metamaterial, perfect absorption, multiple-reflection theory

PACS: 81.05.ue, 42.25.Bs, 78.67.Pt, 75.40.Mg

DOI: 10.7498/aps.65.018101

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2012FM011), the Qingdao City Innovative Leading Talent Plan, China (Grant No. 13-CX-25), the CAEP THz Science and Technology Foundation (Grant No. 201401), the Science and Technology Project of Qingdao Economic and Technical Development Zone, China (Grant No. 2013-1-64), and the China Scholarship Council.

† Corresponding author. E-mail: sdust_thz@126.com

‡ Corresponding author. E-mail: qchen1103@163.com