

基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体的设计

高 红, 延凤平, 谭思宇, 白 燕

北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

摘要 设计了一种基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体, 该吸收体的厚度为 $33.254 \mu\text{m}$ (即入射波波长的 $1/7$), 吸收率在 80% 以上的吸收带宽达到 1.422 THz 。仿真及分析结果表明, 该吸收体的吸收特性呈偏振无关, 并对入射角的变化不敏感; 通过改变石墨烯的化学电势能够有效地调控吸收体的吸收能量, 增加聚酰亚胺中间层厚度可提高吸收体的吸收性能。

关键词 材料; 石墨烯; 超材料; 太赫兹; 吸收; 宽带

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0703024

Design of Ultra-Thin Broadband Terahertz Metamaterial Absorber Based on Patterned Graphene

Gao Hong, Yan Fengping, Tan Siyu, Bai Yan

Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Based on patterned graphene, an ultra-thin broadband terahertz metamaterial absorber with the thickness of $33.254 \mu\text{m}$ (about $1/7$ of the incident wavelength) is designed. The bandwidth with an absorptivity of above 80% can reach 1.422 THz . The simulation and analysis results show that the absorption characteristics of this absorber is polarization-independent and insensitive to the incident angle. The absorbed energy of this absorber can be adjusted effectively by changing the chemical potential of graphene. In addition, the absorption performance can be improved when the thickness of polyimide interlayer increases.

Key words material; graphene; metamaterial; terahertz; absorption; broadband

OCIS codes 160.3918; 300.6495; 260.5740

1 引 言

近年来,随着太赫兹辐射及超材料理论的不完善,基于超材料的太赫兹功能器件的研究引起研究者的广泛关注。超材料是一种由周期性排列的结构单元构成的人工复合材料,相比于自然材料,它最大的优势是能够通过调整谐振单元结构来实现某些超常电磁性质,得到负折射率、超透镜、电磁诱导透明(EIT)、完美吸收等电磁现象。超材料凭借独特的电磁特性,被广泛应用于各种功能器件中,如生物化学传感器、谐振器、调制器和滤波器等^[1]。

由于太赫兹吸收在光谱学、成像以及传感等领域的广泛应用,高性能的超材料吸收体已经成为该领域的研究热点之一。在这里,材料损耗不再作为缺点,而是作为一种特性被引入超材料吸收体的设计中以实现电磁吸收。自 2004 年被发现以来,石墨烯就以高导电性、高强度、超轻薄等特性成为光电器件的一种新型材

收稿日期: 2016-12-06; 收到修改稿日期: 2017-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61275091,61327006)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(61620106014)

作者简介: 高 红(1993—),女,硕士研究生,主要从事超材料设计方面的研究。E-mail: 14120055@bjtu.edu.cn

导师简介: 延凤平(1966—),男,博士,教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn(通信联系人)

料。在太赫兹波段,石墨烯能够支持表面等离子激元(SPPs)的传播,可实现电磁场的亚波长约束^[2],而且单层石墨烯对光的吸收率能够达到2.3%,因此石墨烯在超材料吸收体的设计方面具有很大优势^[3]。普通超材料吸收体通常具有高谐振反应以及高品质因数(谐振峰中心频率 f 与3 dB带宽 Δf 的比值 $f/\Delta f$),因此其工作带宽很窄,在窄带滤波、频率选择、传感、调制等领域有广泛的应用。然而,在其他很多应用领域,如带阻滤波器、宽带抗辐射、太阳能电池、微测热辐射计、隐身材料等,仍然需要具有较宽工作带宽的超材料吸收体^[4]。

本文提出一种基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体(下文简称为超材料吸收体)。利用石墨烯-介质层-石墨烯的石墨烯层来代替典型三层超材料结构中的金属层,使用石墨烯层-介质层-金属平面层的结构实现了偏振不敏感的宽带太赫兹超材料吸收体。基于传输线模型理论,建立了超材料吸收体的一种等效电路模型,并且分析讨论了石墨烯的化学电势以及结构中介质层的厚度对超材料吸收体性能的影响。

2 基于石墨烯的宽带太赫兹超材料吸收体的设计

2.1 超材料吸收体的结构设计

超材料吸收体及其单元结构如图1所示,其中 $E(y)$ 为入射电磁场的电场分量, $H(x)$ 为入射电磁场的磁场分量, $k(z)$ 为波矢量分量。吸收体由石墨烯层、介质层、金属平面层构成。石墨烯层由石墨烯-SiO₂介质层-石墨烯构成,石墨烯的厚度 t 一般为0.3~2 nm^[5-8],这里取2 nm(石墨烯的厚度远小于入射波波长,可忽略不计),长度 $l=35 \mu\text{m}$,SiO₂介电层厚度 $t_d=50 \text{ nm}$ (要保证SiO₂层足够薄,以实现表面等离子体的强约束)。中间介质层是厚度 t_p 为30 μm 的聚酰亚胺聚合物,其介电常数 $\epsilon_p=2.96+0.27i$ 。选择厚度 d 为200 nm的铝作为基底平面层,用来抑制光的透射,电导率 $\sigma=3.56 \times 10^7 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 。整个单元以周期 $P=38 \mu\text{m}$ 在 x,y 方向排列。

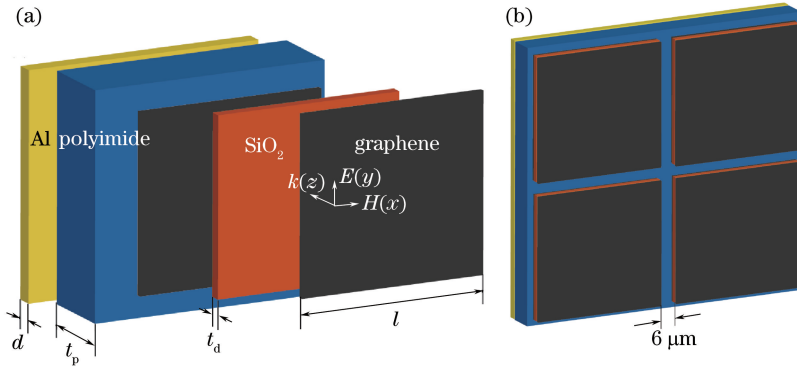


图1 (a)结构单元和(b)超材料吸收体示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of (a) structural unit and (b) metamaterial absorber

2.2 等效电路模型

基于传输线理论^[9],超材料吸收体的每一层都相当于一个电路负载,电磁波在三层超材料吸收体结构中传播,可建立吸收体的等效电路模型,进而计算出超材料吸收体的吸收率。结构基底平面层利用完美电导体(PEC)边界条件进行等效,基于石墨烯的宽带超材料吸收体的等效电路模型如图2所示,其中 Z_g 为石墨烯的阻抗, Z_0 为自由空间阻抗, Z_1 为聚酰亚胺中间层与二氧化硅层交界处聚酰亚胺界面的等效输入阻抗, Z_2 为聚酰亚胺中间层与二氧化硅层交界处二氧化硅层界面的等效输入阻抗, Z_{in} 为空气和二氧化硅层交界处空气界面的等效输入阻抗, Z_3 为空气和二氧化硅层交界处二氧化硅层界面的等效输入阻抗, Γ 为反射系数, t_d 为SiO₂介质层的厚度, t_p 为聚酰亚胺中间层的厚度, β_0 为自由空间的传输常数, β_d 为SiO₂介质层的传输常数, β_p 为聚酰亚胺中间层的传输常数, Z_d 为SiO₂介质层的阻抗, Z_p 为聚酰亚胺中间层的阻抗。

假设电磁波经过厚度为 t_d 的SiO₂介质层后产生的相位 $\delta_d=\beta_d t_d$,电磁波经过厚度为 t_p 的聚酰亚胺中间层后产生的相位 $\delta_p=\beta_p t_p$,则图2所示的超材料吸收体等效电路的部分参数可以表示为

$$\begin{cases} Z_1 = iZ_p \tan \delta_p \\ Z_2 = Z_g Z_1 / (Z_g + Z_1) \\ Z_3 = Z_d (Z_2 + jZ_d \tan \delta_d) / (Z_d + jZ_2 \tan \delta_d) \end{cases} \quad (1)$$

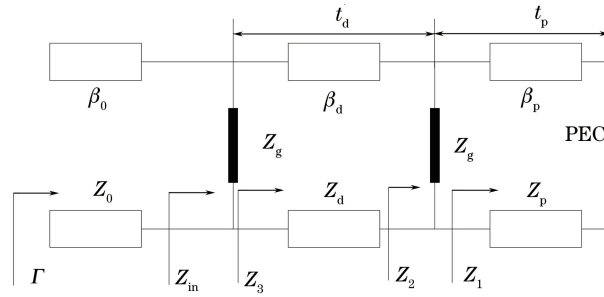


图 2 超材料吸收体的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of metamaterial absorber

式中相对介电常数为 ϵ_d 的电介质的阻抗 $Z_d = Z_0 \sqrt{\epsilon_d}$, 相对介电常数为 ϵ_p 的电介质的阻抗 $Z_p = Z_0 / \sqrt{\epsilon_p}$, 其中自由空间阻抗 $Z_0 = 120\pi$ 。输入阻抗 $Z_{in} = Z_g Z_3 / (Z_g + Z_3)$, 反射系数 $\Gamma = \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|$ 。因为金属平面层抑制了光的透射, 即光的透射率为 0, 所以超材料吸收体的吸收率^[10] $A = 1 - \Gamma^2$ 。

2.3 仿真结果及分析

采用 CST Microwave Studio 软件的频域求解器, 太赫兹波垂直入射超材料表面且电场方向为垂直偏振, 在石墨烯的化学电势 $\mu_c = 0.9$ eV, 聚酰亚胺中间介质层厚度 $t_p = 30 \mu\text{m}$ 的情况下, 对提出的基于石墨烯的宽带超材料吸收体进行仿真, 得到其吸收频谱。

2.3.1 基于有图案、无图案石墨烯的吸收体吸收性能对比

图 3 所示为基于有图案、无图案石墨烯的超材料吸收体的反射频谱和吸收频谱。从基于无图案石墨烯的超材料吸收体的反射频谱和吸收频谱可以看出, 在 $0 \sim 3$ THz 范围内, 频率 $f = 1.587$ THz 处产生了法布里-珀罗谐振, 吸收率在 80% 以上的吸收带宽为 0.753 THz。这是由于超材料吸收体三层结构构成了典型的法布里-珀罗谐振腔。在谐振频率 $f = 0.582$ THz 处, 基于有图案石墨烯的超材料吸收体结构激发了表面等离子共振, 且在 $f = 1.587$ THz 处由法布里-珀罗谐振腔产生的谐振峰与表面等离子共振在 $f = 0.582$ THz 处产生的谐振峰产生重叠, 从而实现了宽带吸收; 吸收率在 80% 之上的吸收带宽达到 1.422 THz, 较无图案结构的吸收带宽宽 0.669 THz。

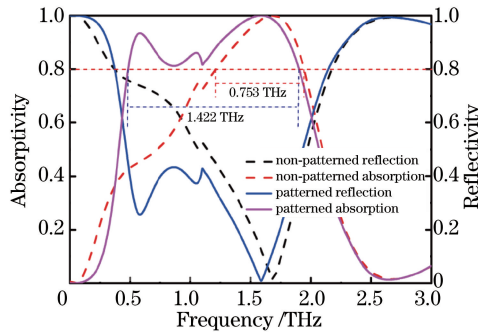


图 3 基于有图案、无图案石墨烯的超材料吸收体的反射和吸收频谱

Fig. 3 Absorption and reflection spectra of metamaterial absorbers based on patterned and non-patterned graphene

2.3.2 电场分布、电磁场偏振方向对吸收性能的影响

为了进一步揭示基于所提出的超薄宽带超材料吸收体两个谐振的产生机理, 对两个谐振频率下的电场分布进行了仿真分析。图 4 所示为基于有图案石墨烯的超材料吸收体分别在谐振频率 $f = 0.582$ THz 和 $f = 1.587$ THz 处的电场分布, 其中图 4(a)、(b) 为吸收体上表面 ($z = 0$ 切平面) 的电场分布。由图可见, 与谐振频率 $f = 1.587$ THz 处的电场分布相比, 在谐振频率 $f = 0.582$ THz 处, 表面等离子体波被石墨烯表面强烈约束, 电场集中在十字结构中间, 产生很强的相互作用, 电场共振增强, 因此吸收体在谐振频率 $f = 0.582$ THz 附近出现明显的反射谷^[11]。图 4(c)、(d) 所示为吸收体 $x = 0$ 切平面沿波传播方向的电场分布。由图可见, 与谐振频率 $f = 0.582$ THz 处的电场分布相比, 在谐振频率 $f = 1.587$ THz 处, 部分电场被束

缚在法布里-珀罗谐振腔内,这是由于光进入法布里-珀罗谐振腔后进行多次反射,反射波之间相干相消,从而在谐振频率 $f = 1.587$ THz 处出现了较强的太赫兹波吸收。

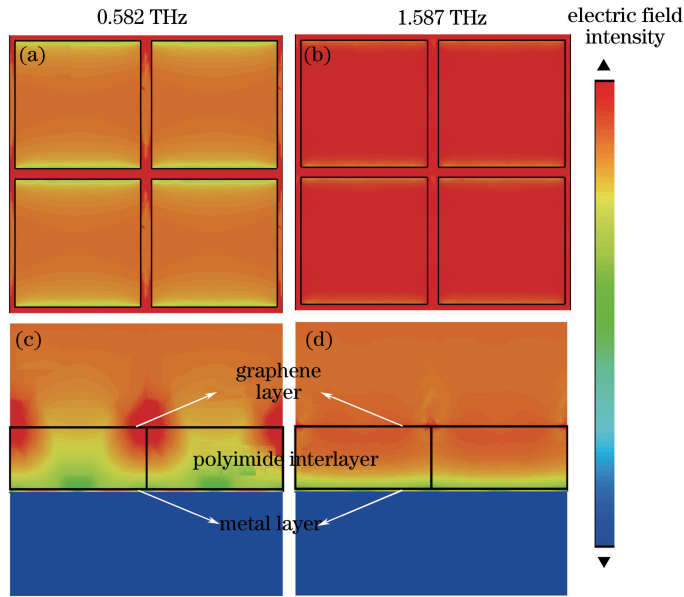


图 4 超材料吸收体的电场分布。(a)(b) $z=0$ 切平面;(c)(d) $x=0$ 切平面沿太赫兹波传播方向
Fig. 4 Electric field distributions of metamaterial absorber. (a)(b) $z=0$ tangent plane;
(c)(d) $x=0$ tangent plane along propagation direction of terahertz wave

本文所提出的太赫兹超材料吸收体结构高度对称,推断吸收谱对入射电磁场偏振方向的变化不敏感。为了验证这一点,仿真计算了偏振角以 1° 为步长、从 0° 增加到 45° 的吸收谱,如图 5(a)所示。由图可见,随着偏振角度的改变,超材料吸收体的吸收性能几乎没有发生变化,证明其具有偏振无关的吸收特性。并且在偏振角小于 45° 时,仍能保持在 1.422 THz 带宽内的吸收率高于 80%。进一步研究了斜入射情况下超材料吸收体对入射波入射角度的敏感性。图 5(b)所示为太赫兹波的入射角对吸收性能的影响。由图可见,随着入射角度的增加,第一个谐振模式的振幅随着入射角度的增大而不断减小,第二个谐振模式的谐振频率随着入射角的增大而出现蓝移的现象。在入射角小于 45° 时,仍能保持 1.632 THz 带宽内的吸收率高于 70%。

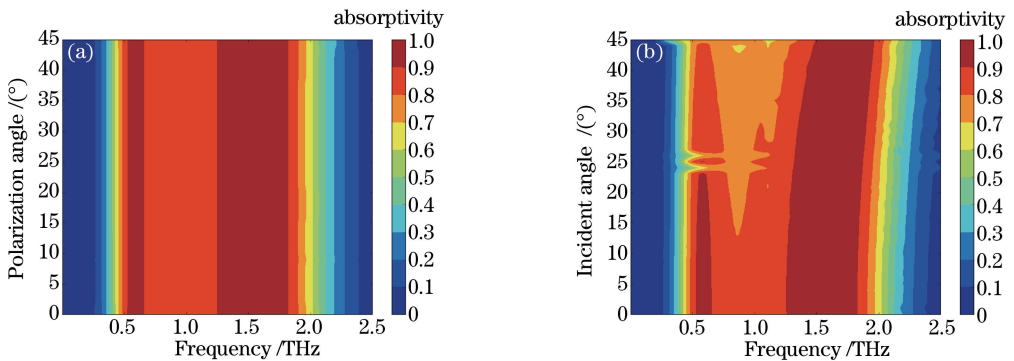


图 5 归一化吸收谱。(a)偏振角 $0^\circ \sim 45^\circ$; (b)入射角 $0^\circ \sim 45^\circ$

Fig. 5 Normalized absorption spectra. (a) Polarization angle of $0^\circ \sim 45^\circ$; (b) incident angle of $0^\circ \sim 45^\circ$

2.3.3 化学电势对吸收体吸收性能的影响

利用化学掺杂或外加电场的方法改变石墨烯的载流子浓度,进而影响石墨烯的化学电势,以达到改变电导率的目的,最终实现对表面等离子激元的调控。这种调节是实时、动态的,可实现灵活可控的光学吸收。而传统超材料吸收体中金属材料的电磁特性通常是无法调节的。单层石墨烯的电特性可由表面电导率 $\sigma(\omega, \tau, T, \mu_c)$ 表征,其中 ω 为入射平面波的角频率; τ 为弛豫时间(假设与能量无关); T 为室温; μ_c 为化学电势(费米电压),与静电偏置或化学掺杂有关。单层石墨烯的电导率可以通过 Kubo 公式^[12-15]计算:

$$\begin{cases} \sigma(\omega, \tau, T, \mu_c) = \sigma' + i\sigma'' = \frac{\sigma_0}{1 + i\omega\tau} \\ \sigma_0 = \frac{e^2 \tau}{\pi \hbar^2} \left\{ \mu_c + 2k_B T \ln \left[\exp\left(\frac{-\mu_c}{k_B T}\right) + 1 \right] \right\} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常数, e 为电子电荷, $\hbar = h/(2\pi)$ 为狄拉克常数, h 为普朗克常数。(2)式所对应的单层石墨烯的阻抗^[16-17]可以表示为

$$Z_g = \frac{1}{\sigma}. \quad (3)$$

设定 $T = 300 \text{ K}$, $\tau = 0.1 \text{ ps}$, 分析化学电势对超材料吸收体吸收性能的影响。因为化学电势的变化是由载流子密度的改变引起的, 其动态范围是 $0.0 \text{ eV} \leq \mu_c \leq 1.0 \text{ eV}$, 所以可通过增加外部偏置电压来改变石墨烯的化学电势^[18-19]。

超材料吸收体吸收特性随化学电势的变化情况如图 6 所示。由图 6(a)可见, 在化学电势由 0.0 eV 增大到 1.0 eV 的过程中, 吸收体的吸收率由 20% 增加到 100% 。当化学电势从 0 eV 逐渐增大到 1 eV 时, 超材料吸收体的阻抗逐渐接近自由空间阻抗, 当结构的阻抗与自由空间阻抗相等时, 超材料吸收体的吸收率能够达到最大。由图 6(b)可看出, 随着化学电势由 0 eV 增加到 1 eV , 吸收体的吸收带宽逐渐变宽。化学电势由 0 eV 增加到 0.5 eV 时, 吸收带宽大幅增加; 化学电势由 0.5 eV 增加到 1 eV 时, 吸收带宽平缓增加; 吸收带宽在化学电势为 1 eV 时达到最大, 为 1.65 THz 。

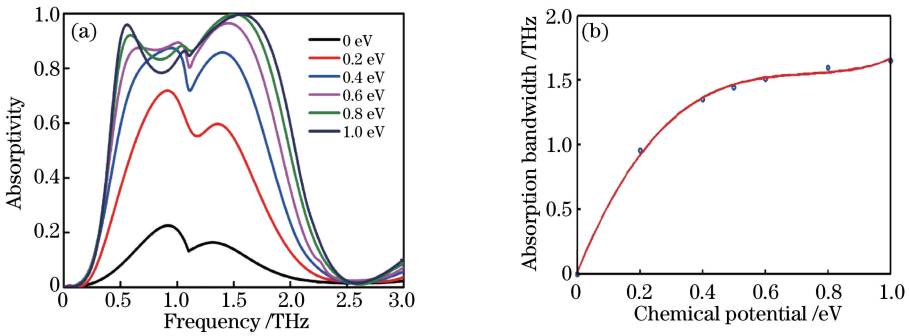


图 6 (a)在不同的化学电势下,超材料吸收体的吸收频谱;(b)吸收带宽随石墨烯化学电势的变化

Fig. 6 (a) Absorption spectra of metamaterial absorber under different chemical potentials;
(b) absorption bandwidth versus chemical potential

另外,从图 6(a)中可以观察到吸收谱逐渐出现两个谐振峰,这是由于随着化学电势 μ_c 的不断增大,载流子密度不断增加,由表面等离子共振产生的谐振峰出现红移;而当 μ_c 增加时,由法布里-珀罗谐振产生的谐振峰出现蓝移。吸收体宽带的实现是由两个谐振峰重叠产生的,因此会逐渐显现出两个谐振峰。这也进一步证实了经典的吸波理论——阻抗匹配理论,即:当吸波材料的阻抗与自由空间阻抗相匹配时,入射波可最大限度地进入材料内部,并且利用各种损耗性介质及磁性材料,可使入射波被损耗掉,从而最大程度地吸收入射波^[20]。由此得出结论:基于石墨烯的太赫兹超材料吸收体的吸收能量可以通过化学电势进行动态控制。

2.3.4 聚酰亚胺中间层厚度 h 对吸收体吸收带宽的影响

图 7 所示为化学电势 $\mu_c = 0.5 \text{ eV}$ 时,超材料吸收体的吸收特性随聚酰亚胺中间介质层厚度 h 的变化情况。由图 7(a)可知,随着中间层厚度的增加,吸收体的吸收率逐渐增大,并且谐振频率发生红移。如图 7(b)所示,吸收带宽随中间层厚度的增加而逐渐变窄,并与中间层厚度呈线性关系。产生这种现象的原因是,随着聚酰亚胺中间层厚度的增加,整个超材料吸收体结构的等效厚度沿着波传播的方向增加,即结构的等效电容增大,谐振峰向低频率处平移,红移的同时伴随着共振幅度的增强。

3 结 论

提出一种基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹超材料吸收体,该吸收体的厚度为 $33.254 \mu\text{m}$,是入射波

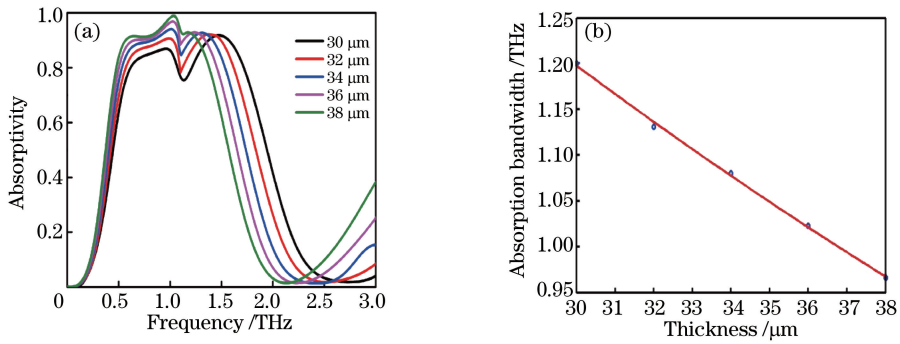


图 7 (a)聚酰亚胺中间层厚度不同时,超材料吸收体的吸收频谱;(b)吸收带宽随聚酰亚胺中间层厚度的变化

Fig. 7 (a) Absorption spectra of metamaterial absorber under different thicknesses of polyimide interlayer; (b) absorption bandwidth versus thicknesses of polyimide interlayer

波长的 $1/7$,通过法布里-珀罗谐振腔产生的谐振峰与表面等离子共振产生的谐振峰重叠,实现了宽带吸收,并且吸收率在 80% 以上的吸收带宽能达到 1.422 THz。进一步的仿真结果证实:该吸收体的吸收特性为偏振无关,并对入射角变化不敏感。利用数理仿真方法分析了材料参数以及结构尺寸的变化对超材料吸收体性能的影响。研究表明,通过改变石墨烯的化学电势能够有效地调控超材料吸收体的吸收能量,增加聚酰亚胺中间层厚度能提高吸收体的吸收性能。提出的基于有图案石墨烯的超薄宽带太赫兹吸收体可应用于宽带抗辐射、隐身材料,以及带阻滤波器等领域。

参 考 文 献

- [1] Li Huayue, Liu Jianjun, Han Zhanghua, *et al.* Terahertz metamaterial analog of electromagnetically induced transparency for a refractive-index-based sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0223003.
李化月, 刘建军, 韩张华, 等. 基于类电磁诱导透明效应的太赫兹折射率传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0223003.
- [2] 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.
- [3] Amin M, Farhat M, Bağci H. An ultra-broadband multilayered graphene absorber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(24): 29938-29948.
- [4] Liu Yi, Peng Xiaoyu, Wang Zuobin, *et al.* Terahertz-wave absorber based on metamaterial[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(9): 756-763.
刘毅, 彭晓昱, 王作斌, 等. 基于超材料的太赫兹吸波材料[J]. *红外技术*, 2015, 37(9): 756-763.
- [5] Gu Yu, Wang Min, Pu Mingbo, *et al.* Tunable broadband absorber in terahertz regime based on graphene and metallic sub-wavelength structure[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(1): 60-64, 70.
顾钰, 王民, 蒲明博, 等. 基于石墨烯结合亚波长金属结构的太赫兹宽带动态吸收器[J]. *光电工程*, 2016, 43(1): 60-64, 70.
- [6] Andryieuski A, Lavrinenko A V. Graphene metamaterials based tunable terahertz absorber: Effective surface conductivity approach[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 9144-9155.
- [7] He S, Chen T. Broadband THz absorbers with graphene-based anisotropic metamaterial films[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(6): 757-763.
- [8] He X. Tunable terahertz graphene metamaterials[J]. *Carbon*, 2015, 82: 229-237.
- [9] Wen Q Y, Xie Y S, Zhang H W, *et al.* Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the terahertz band[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20256-20265.
- [10] Wen Y, Ma W, Bailey J, *et al.* Broadband terahertz metamaterial absorber based on asymmetric resonators with perfect absorption[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(3): 406-411.
- [11] Cong L, Tan S, Yahiaoui R, *et al.* Experimental demonstration of ultrasensitive sensing with terahertz metamaterial absorbers: A comparison with the metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031107.
- [12] Hanson G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(6): 064302.

- [13] Gusynin V P, Sharapov S G, Carbotte J P. Magneto-optical conductivity in graphene[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2007, 19(2): 249-264.
- [14] Fu J H, Chang M, Kong W D, *et al.* Broadband graphene absorber in THz based on superposition of bands[C]. *Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, 2015: 535-536.
- [15] Mikhailov S A, Ziegler K. A New Electromagnetic Mode in Graphene[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(1): 016803.
- [16] Padooru Y R, Yakovlev A B, Kaipa C S R, *et al.* Dual capacitive-inductive nature of graphene metasurface: Transmission characteristics at low-terahertz frequencies[C]. *2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2013: 1598-1599.
- [17] Kaipa C S R, Yakovlev A B, Hanson G W, *et al.* Enhanced transmission with a graphene-dielectric microstructure at low-terahertz frequencies[J]. *Physical Review B*, 2012, 85(24): 245407.
- [18] Xu H J, Lu W B, Jiang Y, *et al.* Beam-scanning planar lens based on graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(5): 051903.
- [19] Xu H J, Lu W B, Zhu W, *et al.* Efficient manipulation of surface plasmon polariton waves in graphene[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100: 243110.
- [20] Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. *Radar cross section*[M]. Boston: Artech House, 1993: 156-158.