

文章编号: 2095-4980(2019)05-0933-06

基于石墨烯的可调谐高吸收率太赫兹超材料

宋建勋, 徐永钊, 凌东雄, 魏东山*

(东莞理工学院 电子工程与智能化学院, 广东 东莞 523808)

摘 要: 提出一种基于石墨烯的双波段太赫兹超材料吸收体, 它由金属-电介质-石墨烯 3 层超材料结构单元在水平方向上进行周期性拓展而成。仿真结果显示, 其在太赫兹波段 6.62 THz 和 9.36 THz 分别产生 99.9% 和 98.9% 的高吸收率; 通过改变石墨烯的费米能级, 可以灵活地控制吸收体的谐振频率和吸收强度, 而吸收体的吸收强度也可以利用石墨烯的弛豫时间进行单独控制。另外, 研究了吸收体中间介质层厚度和介质损耗对吸收率的影响, 这为吸收体初始加工工艺参数的确定提供了依据。研究结果表明, 提出的基于石墨烯的太赫兹超材料吸收体结构简单, 易于加工, 可通过偏置电压或者化学掺杂, 简单地实现吸收体的可调谐性, 为双波段高吸收率太赫兹超材料吸收体的设计提供了重要参考。

关键词: 太赫兹; 石墨烯; 超材料; 吸收体

中图分类号: TN29

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.0933

Tunable terahertz metamaterials with high absorptivity based on graphene structure

SONG Jianxun, XU Yongzhao, LING Dongxiong, WEI Dongshan*

(School of Electrical Engineering & Intelligentization, Dongguan University of Technology, Dongguan Guangdong 523808, China)

Abstract: A graphene-based dual-band terahertz metamaterial absorber is proposed, and it is comprised of three-layer metamaterial structural unit by periodical expansion in the horizontal direction. The simulation results show that the absorber produces 99.9% and 98.9% high absorptivity in the terahertz bands of 6.62 THz and 9.36 THz respectively. By changing the Fermi level of graphene, the resonant frequency and absorption intensity of the absorber can be flexibly controlled. The absorption intensity of the absorber can also be individually controlled by the relaxation time of the graphene. In addition, the influence of the thickness and loss of the intermediate dielectric layer of the metamaterial absorber on the absorptivity was studied, which is conducive to determine the initial processing parameters of the absorber. The study results show that the proposed graphene-based terahertz metamaterial absorber has a simple structure and is easy to process, moreover, it can realize the tuning of the metamaterial absorber by biased voltages or chemical doping. The metamaterial absorber proposed in this paper provides an important reference for the design of dual-band absorbers with high absorptivity in terahertz band.

Keywords: terahertz; graphene; metamaterial; absorber

超材料吸收体是超材料领域的重要组成部分, 在太赫兹调制器、谐振器等方面具有广泛应用^[1-2]。目前对超材料吸收体结构的研究主要集中在金属-电介质-金属 3 层结构上, 已经取得了显著效果。2008 年, 第一个单频段超材料吸收体在 1.3 THz 虽然取得 70% 的吸收率, 但是随后超材料吸收体进入了快速发展阶段, 双频带和多频带吸收体相继提出^[2-6]。从这些研究可以看出, 通过重新设计结构的几何参数可以获得不同的吸收器。然而, 对于吸收体来讲, 一旦结构加工完成, 就很难改变, 这限制了超材料吸收体的工程应用。因此, 追求可调谐超材料吸收体已成为人们关注的焦点。

收稿日期: 2018-10-12; 修回日期: 2019-02-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771138); 东莞市社会科技发展资助项目(2015108101006)

*通信作者: 魏东山 email:dswei@dgut.edu.cn

石墨烯是由单层碳原子组成的六角形蜂巢晶格状二维结构材料^[7]。在太赫兹波段,石墨烯可以支持表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs),并且可以突破电磁场的亚波长限制。由于石墨烯表面等离子体的作用,其具有许多优异的特性,例如动态可调性和太赫兹频带低损耗等^[8-10]。此外,石墨烯的表面电导率随费米能级变化,而费米能级可以通过偏置电压或者化学掺杂来实现动态调谐^[11-14],石墨烯的这种特性为太赫兹超材料吸收体的动态可调谐提供了新思路。超材料吸收体一旦加工完成,它只能在特定频率或非常有限的频率范围内工作,除非吸收体的结构尺寸或者材料发生变化,这在工程应用中是难以实现的。最初,研究人员通过微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)^[15]、液晶^[16]等方法进行吸收体的可调谐性研究,也取得了一定成果,但是基于石墨烯的超材料吸收体效果更好。在正常的太赫兹波入射下,石墨烯和太赫兹波之间会产生独特的相互作用,这使得石墨烯吸收体的可调谐性是动态的、实时的,可以灵活地实现对入射太赫兹波的操控,并进一步实现超材料吸收体强度和谐振频率的可调性。基于此,本文将石墨烯应用于吸收体中,提出一种双波段高吸收率的超材料吸收体结构,有效地将石墨烯的优异特性与吸收体理论相结合,为石墨烯在超材料吸收体中的应用提供重要参考价值。

本文提出的超材料吸收体是由金属—电介质—石墨烯 3 层纳米结构构成,吸收体顶部的石墨烯层由 1 个矩形和 2 个三角形的阵列组成,实现了表面等离子体共振;底部金属层由金构成,用于入射波的反射,以确保入射波不能通过吸收体;中间层为聚酰亚胺聚合物,根据仿真的电场分布图可知,在中间层能够形成法布里-珀罗谐振腔。进一步研究了基于石墨烯超材料吸收体对入射角和偏振角的不敏感特性,结果表明,在较宽的太赫兹频段范围内,特别是对于入射角,吸收体仍然保持良好的吸收性能。吸收体中间电介质的厚度与太赫兹入射波的光路有着密切的联系,随着中间层厚度的增加,吸收体的吸收率有所增加,同时,2 个谐振频率均发生了红移,中间层厚度的确定对于超材料吸收体初始加工参数的确定具有重要参考意义。

1 结构与物理模型

基于石墨烯的太赫兹超材料吸收体的单元结构如图 1(a)所示,图 1(b)为吸收体阵列排布结构。该结构是由金属—电介质—石墨烯组成的 3 层结构构成,在这种纳米结构中,将电导率为 $\sigma_g = 4.7 \times 10^7$ S/m 的有损金作为基底,尺寸为 $2.5 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$,金厚度为 $t_g = 0.2 \mu\text{m}$,远大于金属中太赫兹波的趋肤深度,因此当太赫兹波到达底面时可以被完全反射,最终太赫兹波被完全吸收。中间电介质层聚酰亚胺厚度 $t_s = 3.3 \mu\text{m}$ 。吸收体顶层为石墨烯层,由 1 个矩形和 2 个对等的三角形构成,尺寸为: $a = 1 \mu\text{m}$, $b = 1.8 \mu\text{m}$,三角形结构的底边边长为 a 。为了获得最佳的吸收性能,吸收体所有结构的几何参数都经过了优化设计,以确保超材料吸收体阻抗与自由空间阻抗相匹配。

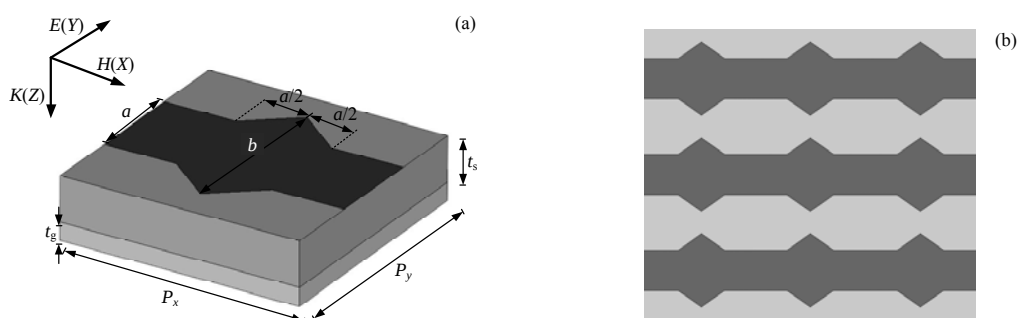


Fig.1(a) Schematic of the unit cell of metamaterial absorber with nano-structure, the geometry dimension is: $P_x = 2.5 \mu\text{m}$, $P_y = 2.5 \mu\text{m}$, $t_s = 3.3 \mu\text{m}$, $t_g = 0.2 \mu\text{m}$, $a = 1 \mu\text{m}$, $b = 1.8 \mu\text{m}$, thickness of the graphene is 0.34 nm ; (b) Front view array of the absorber.

图 1(a) 超材料吸收体单元结构示意图,几何尺寸: $P_x = 2.5 \mu\text{m}$, $P_y = 2.5 \mu\text{m}$, $t_s = 3.3 \mu\text{m}$, $t_g = 0.2 \mu\text{m}$, $a = 1 \mu\text{m}$, $b = 1.8 \mu\text{m}$, 石墨烯的厚度为 0.34 nm ; (b) 吸收体前视图。

2 结果与讨论

2.1 双波段高吸收率频谱

本文采用三维电磁仿真软件 CST Microwave Studio 分析了超材料吸收体的吸收特性,利用软件频域求解器计算出 S 参数,计算的频率范围是 $5 \sim 11 \text{ THz}$,图 2 给出了太赫兹波段下的吸收频谱特性。根据吸收率公式 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$,其中反射率 $R(\omega) = S_{11}^2$,透射率 $T(\omega) = S_{21}^2$,即 $A(\omega) = 1 - S_{11}^2 - S_{21}^2$,由于基底金的厚度远大

于其趋肤深度,可得 $S_{21}=0$, 因此, 吸收率 $A(\omega)=1-S_{11}^2$ 。这一点也可根据经典吸波理论和阻抗匹配理论得出, 当吸收体阻抗与自由空间阻抗相匹配时, 入射波可以最大限度地进入材料内部, 并且可以通过各种方式进入有损介质或磁性材料中, 从而最大程度吸收入射波。在仿真过程中, 太赫兹波垂直入射在吸收体表面, 电场方向沿 Y 轴, 磁场方向沿 X 轴, 具体如图 1 所示。仿真结果如图 2 所示, 在太赫兹波段范围内, 吸收体在 6.62 THz 和 9.36 THz 分别产生 99.9% 和 98.9% 的高吸收率完美吸收峰, 2 个吸收峰的频率间隔约为 2.74 THz。

2.2 吸收体电场强度分布

为了进一步揭示吸收体产生 2 个吸收峰的物理机理, 数值模拟分析了 6.62 THz 和 9.36 THz 处 2 个谐振频率下的电场分布, 顶部石墨烯层的电场分布如图 3 所示。从图中可以看出, 谐振频率为 9.36 THz 的电场强度强于 6.62 THz 的电场分布, 表明在 9.36 THz 石墨烯层产生了表面等离子共振, 电场被强烈地约束在石墨烯表面, 大部分入射波被石墨烯层吸收, 因此超材料吸收体在谐振频率 9.36 THz 处产生明显的吸收峰。图 3(a) 中, 在 6.62 THz 处超材料吸收体表面的较强电场区域是由于吸收体结构顶点的局部增强效应引起的, 此外, 其他区域的电场强度都相对较低。

图 4 显示了在 6.62 THz 和 9.36 THz 处超材料吸收体横截面沿太赫兹波传播方向的内部电场分布, 可以看出, 由于在 6.62 THz 处顶层石墨烯平面和底层金之间形成了强烈的法布里-珀罗谐振腔, 与谐振频率 9.36 THz 的内部电场强度相比, 超材料吸收体横截面在 6.62 THz 处形成了较强的电场。在形成的法布里-珀罗谐振腔中, 入射波和反射波之间发生相干消除, 从而在谐振频率 6.62 THz 处发生强烈的太赫兹波吸收。

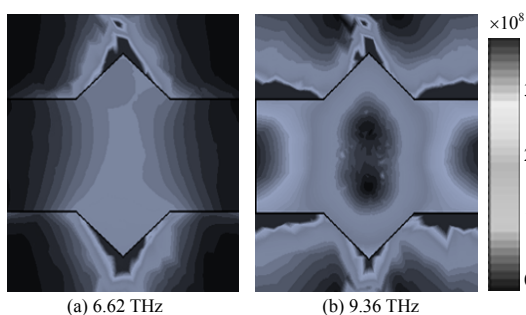


Fig.3 Calculated electric field distribution on the top graphene of the metamaterial absorber for 6.62 THz and 9.36 THz
图 3 超材料吸收体顶部石墨烯层在 6.62 THz 和 9.36 THz 处的电场分布

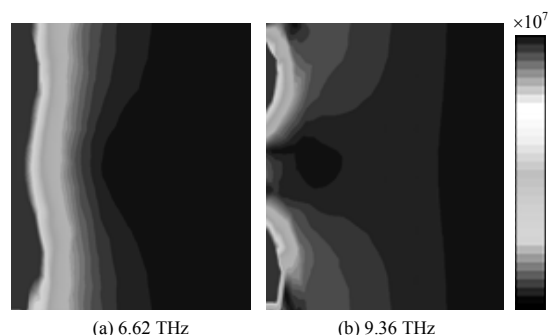


Fig.4 Calculated electric field distribution inside the metamaterial absorber at 6.62 THz and 9.36 THz
图 4 超材料吸收体在 6.62 THz 和 9.36 THz 的内部电场分布

2.3 入射角和偏振角不敏感性分析

本文提出的太赫兹超材料吸收体是一种二维对称结构, 因此可以推断吸收体在太赫兹入射角和电场强度的极化方向上具有一定的独立性, 即基于石墨烯的超材料吸收体具有入射角不敏感特性和偏振不敏感特性。通过仿真软件, 数值模拟了从 0° 到 45° 太赫兹入射角的吸收频谱和电场强度偏振角的吸收频谱。如图 5 所示, 当入射角从 0° 到 45° 变化时, 吸收体的第一个吸收峰保持在 98% 以上, 第二个吸收峰值保持在 96% 以上, 2 个吸收峰强度下降很小。此外, 2 个谐振频率也仅有轻微的红移。因此, 本文提出的超材料吸收体在宽入射角范围内仍保持 2 个较高的吸收峰, 吸收体对入射角具有不敏感特性。

不同偏振角的超材料吸收体吸收频谱如图 6 所示。随着偏振角从 0° 变化到 45° , 第一吸收峰值保持在 80% 以上, 第二吸收峰值保持在 75% 以上, 2 个吸收峰的位置保持不变。因此,

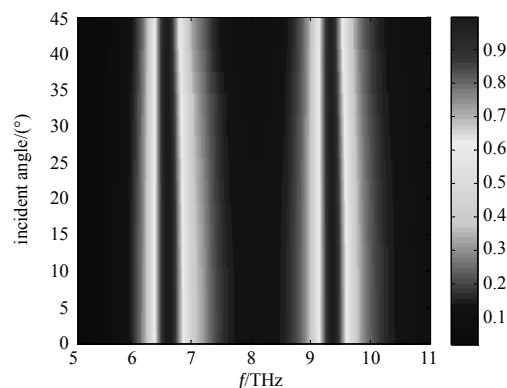


Fig.5 Absorption spectra of metamaterial absorber at different incident angles
图 5 超材料吸收体对不同入射角的吸收频谱

结果表明基于石墨烯的超材料吸收体对偏振角也具有不敏感特性,这对实际的应用环境具有一定的鲁棒性和适应性。

2.4 费米能级对吸收性能的影响

石墨烯作为新型的二维超材料,最大优点是可以通过偏置电压或者化学掺杂来调节其表面电导率,这非常有利于可调谐超材料吸收体的实现。本文设计的超材料吸收体是基于单层石墨烯结构的,单层石墨烯的电学性质可以通过表面电导率 $\sigma(f, \tau, T, \mu_c)$ 来表征。其中 f 表示太赫兹入射波频率; τ 为弛豫时间; T 为室温,单位为开尔文; μ_c 为载流子迁移率。根据 Kubo 公式^[17],单层石墨烯的表面电导率可表示为:

$$\begin{cases} \sigma(f, \tau, T, \mu_c) = \sigma' + j\sigma'' = \frac{\sigma_0}{1 + j2\pi f\tau} \\ \sigma_0 = \frac{e^2\tau}{\pi\hbar^2} \left\{ \mu_c + 2k_B T \ln \left[\exp\left(\frac{-\mu_c}{k_B T}\right) + 1 \right] \right\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数; $\hbar = h/(2\pi)$ 是约化普朗克常数, h 是普朗克常数。

超材料吸收体不同费米能级的吸收频谱如图 7 所示。当费米能级从 0.3 eV 增加到 0.5 eV 时,2 个吸收峰同时发生了显著的蓝移,它们之间的频率差基本保持不变。蓝移是由沿石墨烯层传播的表面等离子体激元波矢产生的,根据公式 $k_{\text{spp}} \propto (\hbar f^2)/(2\alpha_0 E_F c)$,其中 α_0 为精细结构常数, E_F 为费米能级,单位为 eV, f 为谐振频率,因此 $f \propto E_F^{1/2}$,所以在不改变吸收体结构的情况下,可通过改变石墨烯的费米能级来实现超材料吸收体谐振频率的动态调谐。此外,当费米能级从 0.3 eV 增加到 0.5 eV 过程中,2 个吸收峰也分别增加了 28.3% 和 44.7%,高频峰值的变化大于低频峰值的变化,并且 2 个吸收峰的吸收强度均保持在 50% 以上。因此,吸收体的谐振频率和吸收强度可以通过偏置电压或化学掺杂来动态调节。

2.5 弛豫时间对吸收性能的影响

超材料吸收体不同弛豫时间的吸收频谱如图 8 所示。固定 $E_F = 0.5$ eV 不变,吸收强度随着弛豫时间 τ 增加而显著增加,当吸收强度达到最大值后,再增大弛豫时间吸收强度开始下降,这意味着载流子迁移率对吸收率的贡献是有限的,载流子迁移率达到饱和后,当载流子继续增加时,太赫兹入射波的能量将从吸收体中反射出来。无论弛豫时间如何变化,2 个谐振频率在整个频带内均保持不变,也就是说,2 个吸收峰之间的频率差保持不变,2 个峰值频率差约为 2.7 THz。此外,当 τ 从 0.3 ps 增加为 1 ps 时,2 个吸收峰的吸收率仍然高于 85%。根据石墨烯弛豫时间公式 $\tau = E_F \mu / (ev_f^2)$,其中 $v_f = 10^6$ m/s,当费米能级 E_F 不变时,弛豫时间随着载流子迁移率而变化,载流子迁移率与周围环境有关。因此,可以通过改变石墨烯的弛豫时间来单独控制超材料吸收体的吸收率。

2.6 中间介质层对吸收性能的影响

吸收体中间介质层聚酰亚胺的厚度也对吸收率具有显著影响,图 9 显示了超材料吸收体的吸收频谱随介质层厚度的变化情况。从图中可以看出,随着中间介电层的厚度增加,吸收体的两个吸收峰值显著增加,同时,2 个

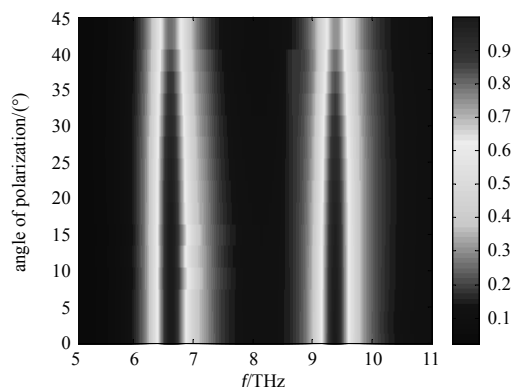


Fig.6 Absorption spectrum of the metamaterial absorber with different polarization angles
图 6 不同偏振角的超材料吸收体的吸收频谱

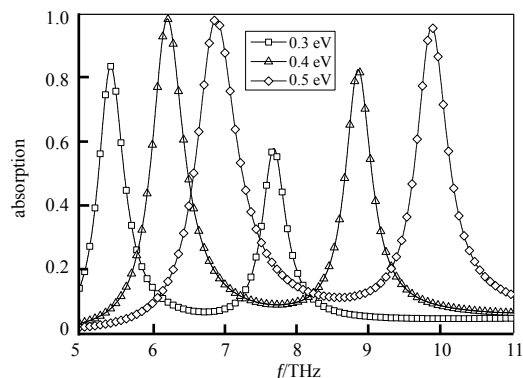


Fig.7 Absorption spectra of metamaterial absorber for different Fermi levels
图 7 超材料吸收体不同费米能级的吸收频谱

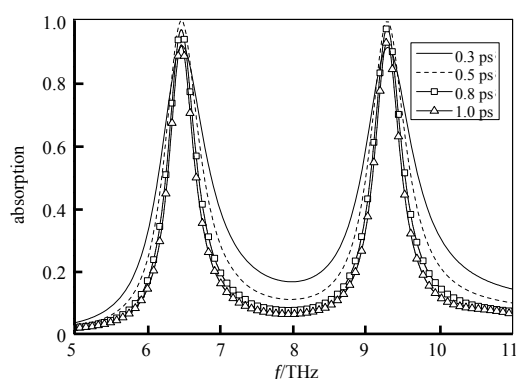


Fig.8 Absorption spectra of metamaterial absorber for different relaxation time of graphene
图 8 超材料吸收体不同弛豫时间的吸收频谱

谐振频率同时出现红移。原因在于随着中间层聚酰亚胺的厚度增加,吸收体结构中的太赫兹波传播光路增加,即吸收体结构的等效电容变大,根据公式 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$,谐振频率将会降低。仿真结果表明,当吸收体中间层的厚度从 $2.4\ \mu\text{m}$ 增加到 $3.3\ \mu\text{m}$ 时,超材料吸收体的吸收强度会显著增加,均保持在 80% 以上,并且 2 个吸收峰值频率差略有变化。同时也考虑了超材料吸收体中间介质层在有损耗和无损耗情况下的吸收情况,如图 10 所示。从图中可以看出,该结构中间介质层有损耗介质对吸收率的影响并不大,对于有损耗介质,吸收强度会略有下降,2 个谐振频率也略有增加。通过对吸收体中间介质层参数的优化设计,有利于超材料吸收体初始加工参数的确定。

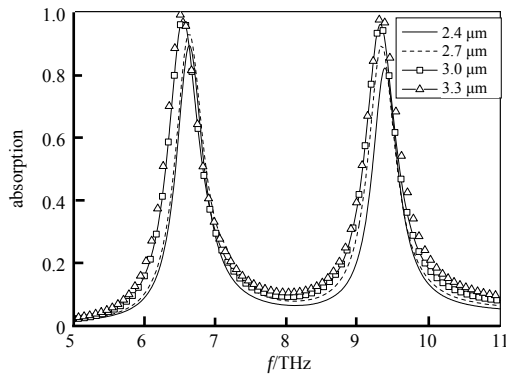


Fig.9 Absorption spectra of the metamaterial absorber with different thicknesses of middle-layer polyimide dielectric

图 9 超材料吸收体在中间介质层不同厚度下的吸收频谱

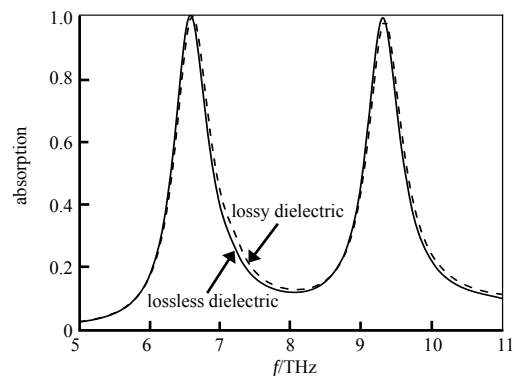


Fig.10 Absorption spectra of the metamaterial absorber in lossy and lossless middle-layer polyimide dielectric

图 10 超材料吸收体在中间介质层有无损耗下的吸收频谱

3 结论

综上所述,本文提出的基于石墨烯超材料吸收体在 $6.62\ \text{THz}$ 和 $9.36\ \text{THz}$ 处分别产生 99.9% 和 98.8% 的高吸收率。根据超材料吸收体谐振频率的电场分布图,深入分析了 2 个吸收峰的谐振机理,在 $6.62\ \text{THz}$ 产生谐振的原因是由于法布里—珀罗谐振腔,而在 $9.36\ \text{THz}$ 产生谐振的原因在于表面等离子激元。此外,随着入射角和偏振角的增加,吸收体仍然保持 2 个较高吸收峰,吸收性能基本保持不变,证明了吸收体对入射角和偏振角的不敏感性。根据偏置电压和化学掺杂都可以改变石墨烯费米能级的特性,实现了超材料吸收体的动态调谐,设计结构简单的超材料吸收体便可以产生良好的吸收效果,与传统的金属超材料结构相比具有明显的优势。研究还表明,通过改变石墨烯的费米能级,可以有效地控制超材料吸收体的吸收强度和谐振频率。石墨烯的弛豫时间的变化仅与吸收体的吸收强度有关。石墨烯具有独特的电学和化学性质,在可调谐超材料吸收体方面具有重要的应用前景。

参考文献:

- [1] KAKENOV N, ERGOKTAS M S, BALCI O, et al. Graphene based terahertz phase modulators[J]. 2D Materials, 2018, 7(3): 1-8.
- [2] MENG Tianhu, HU Dan, ZHU Qiaofen. Design of a five-band terahertz perfect metamaterial absorber using two resonators[J]. Optics Communications, 2018, 7(3): 151-155.
- [3] TAO H, LANDY N I, BINGHAM C M et al. A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7181-7188.
- [4] YAO Gang, LING Furi, YUE Jin, et al. Dual-band tunable perfect metamaterial absorber in the THz range[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 1518-1527.
- [5] SHEN X, YANG Y, ZANG Y, et al. Triple-band terahertz metamaterial absorber: design, experiment, and physical interpretation[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(15): 1-4.
- [6] CHEN Z, ZHANG Y X. Planar terahertz metamaterial with three-resonant frequencies[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(6): 67-82.
- [7] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials[J]. Science, 2004, 303(5536): 1494-1496.
- [8] WUNSCH B, STAUBER T, SOLS F, et al. Dynamical polarization of graphene at finite doping[J]. New Journal of Physics, 2006, 8(12): 318-325.

- [9] HWANG E H, SARMA S D. Dielectric function, screening, and plasmons in two-dimensional graphene[J]. Physical Review, 2007, 75(20): 418–425.
- [10] JABLAN M, BULJAN H. Plasmonics in graphene at infrared frequencies[J]. Physical Review B, 2009, 80(24): 301–307.
- [11] SHI X, HAN D, DAI Y, et al. Plasmonic analog of electromagnetically induced transparency in nanostructure graphene[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28438–28443.
- [12] CHENG H, CHEN S, YU P, et al. Dynamically tunable plasmonically induced transparency in periodically patterned graphene[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(20): 203112–203114.
- [13] FALLAHI A, PERRUISSEAU-CARRIER J. Manipulation of giant Faraday rotation in graphene metasurfaces[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(23): 231605-1–8.
- [14] DING J, ARIGONG B, REN H, et al. Tunable complementary metamaterial structures based on graphene for single and multiple, transparency windows[J]. Scientific Reports, 2014, 4(4): 6128–6132.
- [15] HE X J, MA Q X, JIA P, et al. Dynamic manipulation of electromagnetically induced transparency with MEMS metamaterials[J]. Integrated Ferroelectrics, 2015, 161(1): 85–91.
- [16] MANUEL Decker, CHRISTIAN Kremers, ALEXANDER I Minovich, et al. Electro-optical switching by liquid-crystal controlled metasurfaces[J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8879–8885.
- [17] 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, Bali Island, Indonesia: [s.n.], 2015: 535–536.

作者简介:



宋建勋(1972–), 男, 河南省商丘市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为太赫兹波段吸收体的理论仿真、二维材料结构的仿真与计算.email: 2151822@qq.com.

徐永钊(1972–), 男, 广州市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为非线性光纤光学和光纤通信技术.

魏东山(1979–), 男, 湖北省赤壁市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为太赫兹光谱学、太赫兹技术与光学传感技术在生物医学、材料科学等领域的应用.

凌东雄(1964–), 男, 云南省绥江市人, 博士, 教授, 主要研究方向为光电子技术及太赫兹技术.