

含石墨烯三明治结构杂化超表面微波吸收性能调控研究

高 杨, 张钰晶, 蔡伟奇, 付全红, 张富利, 樊元成*

(西北工业大学物理科学与技术学院, 西安, 710129)

摘要 基于石墨烯的电磁可调性与具有特殊电磁响应的无源金属结构耦合, 设计了三明治结构微波吸波超表面, 系统地研究了金属结构和石墨烯电性对吸波性能的调控。通过三维全波电磁场仿真, 证实了可以通过调节石墨烯方阻改变谐振频率处的吸波率, 于 $740 \Omega/\text{sq}$ 实现微波的完美吸收, 且由担任相移介质的聚丙烯的厚度控制谐振频率。构建了石墨烯结构与金属微结构杂化超表面, 对引入金属谐振模式进一步增强微波吸收的超表面设计进行了研究, 证实了可以通过调节石墨烯方阻获得频率 23.2 GHz 和 36.4 GHz 处的微波完美, 以及由其确定的宽带吸收。分析了金属线宽、周期、金属石墨烯间距等主要结构参数对吸波率与频率的影响。该研究在拓展超表面设计与石墨烯应用方面有着一定的价值。

关键词 石墨烯; 超表面; 微波吸收

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.06.004

中图分类号 TB34; O441.4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)06-0025-05

Research on the Control of Microwave Absorption Properties of Hybrid Meta-Surface Containing Graphene Sandwich Structure

GAO Yang, ZHANG Yujing, CAI Weiqi, FU Quanhong, ZHANG Fuli, FAN Yuancheng*

(School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract A hybrid meta-surface for achieving microwave absorption is designed based on the tunability of graphene and passive metallic structure with specific response to utilize the metallic structure and the electric properties of graphene for controlling the wave absorption. Through simulating three-dimensional full-wave electromagnetic field, the results prove the simulation to be the fact that the absorption rate at the resonant frequency can be tuned by adding the bias voltage through the square resistance of graphene, a perfect-absorption is achieved at a resistance level of $740 \Omega/\text{sq}$, and the absorption frequency is determined by the polypropylene thickness. The hybrid meta-surface combined with metallic structure and microwave absorber is further constructed, the metallic structure with new resonant mode is designed to increase the operation band width of the microwave absorption. The perfect absorption can achieve at 23.2 and 36.4 GHz, and the these two frequencies define a wide band microwave absorption. The influence of structural

收稿日期: 2021-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(12074314, 11674266)

作者简介: 高 杨(1998—), 男, 陕西杨凌人, 硕士生, 研究方向为超表面研究。E-mail: 599307186@qq.com

通信作者: 樊元成(1988—), 男, 宁夏固原人, 教授, 博士生导师, 研究方向为超材料光波调控及应用。E-mail: phyfan@nwpu.edu.cn

引用格式: 高杨, 张钰晶, 蔡伟奇, 等. 含石墨烯三明治结构杂化超表面微波吸收性能调控研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(6): 25-29. GAO Yang, ZHANG Yujing, CAI Weiqi, et al. Research on the Control of Microwave Absorption Properties of Hybrid Meta-Surface Containing Graphene Sandwich Structure[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(6): 25-29.

parameters on the absorptive rate and frequency is studied. The research on the tunable absorption in hybrid meta-surface is of certain scientific value in meta-surface design and graphene related applications.

Key words graphene; meta-surface; microwave absorption

超材料是人工设计的亚波长结构,具有奇异的电磁特性^[1-5]。将三维超材料的基本原理推广到二维平面,设计具有不同等效介电常数和磁导率的平面人工结构也可以引起反常的电磁波响应,即超表面^[6-11]的概念。这些效应包括对波前的振幅^[12]、相位^[13-14]、极化^[15-16]等产生的突变作用。这些结构通常具有平面上周期排列的特征,一般关注其在一个周期内的结构。其次,在一定超表面结构上,还可以引入二极管^[17-18]、相变材料^[19-20]、石墨烯^[21-22]、电子器件^[23]等,通过有源的方式使超表面具有动态性能。其中,石墨烯自从被制备和研究以来便有着广泛的应用^[24-25],在光学^[26]、太赫兹波^[27]、微波^[28-29]的调控方面发挥了巨大的作用。石墨烯在微波波段内的电导率较易控制,即方阻,可应用于吸波效果可调的吸波器件中,这一特性源于其二维原子结构与零隙能带结构^[30],调节载流子浓度即可影响电导率,且晶体可以用德鲁德模型进行描述,即意味着阻抗色散效应可忽略,视为一定值,这为含石墨烯的吸波器件提供了便捷的优点。在当前的研究中,与离子电解液或离子凝胶等介质复合,利用外部驱动下的离子层影响石墨烯导电性是稳定而有效的方式。此前的研究也提出了将直接电极分别置于石墨烯及硅衬底上的调节方式,但对偏置电压的要求较大。

本文研究的吸波器基于一种石墨烯与离子电解液复合三明治结构,石墨烯附着于薄膜基板上,与离子电解液直接接触,方阻可以与加载的电压值形成对照,进而在外部控制下保持阻值一定。仿真结果显示了该石墨烯结构频率、幅值可调的线性反射谱。进一步,研究了石墨烯吸收谱与扰动的杂化行为,通过引入在截止频率以下具有德鲁德特性的无源金属结构形成杂化超表面,观察到了可调频的完美吸收谱和额外宽带特性,并研究了杂化超表面微波吸收性能与结构参数的关联。

1 石墨烯三明治结构微波吸收

1.1 石墨烯三明治结构微波吸收

图1表示出了吸波器的层次构成。上部为石墨烯-离子液体-石墨烯的三明治结构,可看作一个电容器。其中2层以聚氯乙烯(PVC)薄膜为基底的石墨烯构成极板,石墨烯位于内侧,之间填充离子液体

(常用的离子液体为有机氟化物)研究已经表明这种结构外加偏置电压会形成德拜电荷层,使石墨烯方阻具有数千欧姆的动态范围。吸波器中层为抗腐蚀、稳定性强的聚丙烯(PP)介质,底层为金属板。

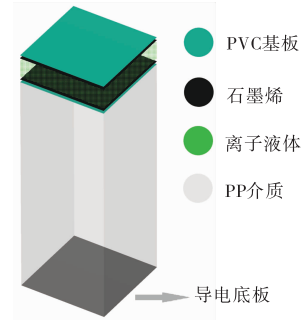


图1 含石墨烯三明治结构吸波器层次示意图

1.2 石墨烯三明治结构特性

在微波波段,石墨烯主要表现出电损耗特征,同时,在此不考虑色散效应,且电磁波的金趋肤深度很浅,金属底板可以看作是理想导体,将完全反射入射的电磁波。经过PP的相移后,入射波将与反射回波相干涉,增强局域电场并被石墨烯与PP吸收。所以结构的总反射率为 $R=1-T-A$ 。以下给出总反射率表达式:

$$R = \frac{j(1-\beta)\sin(kd) - Y(1-\alpha)\cos(kd)}{j(1+\beta)\sin(kd) + Y(1+\alpha)\cos(kd)} e^{j2k_0 d} \quad (1)$$

式中: $Y = \sqrt{\epsilon_r/\mu_r/Y_0}$,其为总结构归一化导纳;将石墨烯三明治视为一个整体,则 ϵ_r 和 μ_r 分别为PP的介电常数和磁导率, $\epsilon_r = 2.5$ 、 $\mu_r = 1$; $\alpha = Z_a/Z_0$ 为石墨烯三明治归一化等效阻抗; $\beta = Y_a/Y_0$ 为归一化等效导纳; d 为PP厚度。

要达到理想的吸波效果,需要以上参数配合,以达到结构与空气良好的阻抗匹配,对应的电磁波频率称为谐振频率 f_0 。在结构谐振频率下 $\alpha=0$, $kd=\pi/2$,式(1)可简化为:

$$R = \frac{1-\beta}{1+\beta} \quad (2)$$

将结构中的其他参数设为:PVC厚度 $d_1 = 0.07$ mm,介电常数 $\epsilon_1 = 3$;离子液体厚度 $d_2 = 0.1$ mm,介电常数 $\epsilon_2 = 2.5$ 。通过仿真,得到了正入射下结构其他参数不变时的反射频谱随PP厚度和石墨烯方阻的变化,如图2所示。

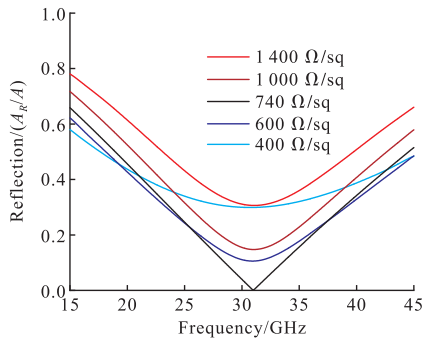


图 2 石墨烯方阻不同时对应吸波器的反射频谱

一般,外部电压形成的纵向电场引起德拜电荷层是一个动态过程,当电荷浓度随电压增大而增大后,电荷的聚集会对电压增量趋于平缓,且石墨烯载流子浓度增加趋于缓慢,所以低阻值的形成相对高阻值更加困难。可以看出,从初始的 1 400 Ω/sq 开始降低石墨烯方阻,结构以单个谐振频率 f_0 为中心的反射幅值逐步降低,中心频率不变,且阻值 1 400 Ω/sq 时,中心频率 31.0 GHz 处反射已达到 0.31,即大于 90% 吸波率。方阻为 740 Ω/sq 时可视为产生单频完美吸波,此时幅值与频率的关系为线性,其表达式为:

$$R \approx \frac{Y \sin \frac{\pi}{2} F}{2j \cos \frac{\pi}{2} F - Y \sin \frac{\pi}{2} F} \approx -j \left(\frac{\pi}{4} Y \right) F \quad (3)$$

继续降低方阻,由于其他参数不变时阻抗匹配条件只关于阻抗的单值解,所以阻抗匹配效果变差,吸波率降低。在此基础上,将方阻固定为 740 Ω/sq,当 PP 厚度减小时,谐振频率增加而谐振点吸波率不变,见图 3。

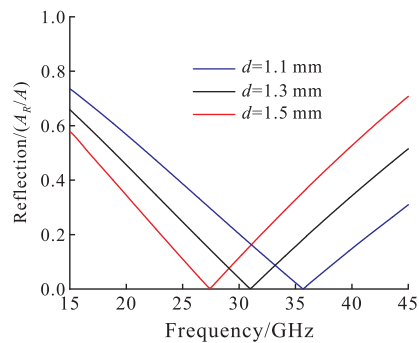


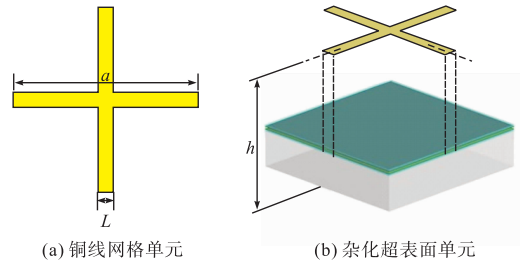
图 3 pp 厚度不同时对应吸波器的反射频谱

所以不同 PP 厚度均可满足对应不同波长的匹配条件,提供完美吸收需要的相移。若单纯依靠石墨烯三明治的吸波器实现不同频率的完美吸收,需要根据需求重复加工匹配厚度的 PP。谐振频率越高,PP 厚度越小,器件更薄,同时也对材料选择与加工精度的要求更高。考虑到石墨烯三明治结构的优势与局限性,随后引入了无源金属结构。

2 石墨烯杂化超表面

2.1 石墨烯三明治结构引入无源金属结构

图 4(a)为铜金属网格在一个单元内的几何形状示意图。该结构属于频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 即 FSS,网格形是常用的形式。FSS 及应用已经有许多研究^[31],如作为反射面天线的负反射器、提高电磁波调制效率、用于雷达隐身等。同样地,在微波波段铜的电磁波趋肤深度极小,电导率良好,因此无需考虑铜线厚度、电导率色散产生的影响,而主要关注几何参数:组成网格的细线宽度 L 与网格周期 a 。图 4(b)为 FSS 单元与石墨烯三明治吸波器结合,两者间距为 h ,平行无接触,由外部方式固定。FSS 可以为吸波器提供新的宽带特性,改变谐振频率。这种结合方式只需关注 h 值的影响,并相比其他组合方式更易加工和实验。



(a) 铜线网格单元 (b) 杂化超表面单元

图 4 含石墨烯三明治结构杂化超表面

2.2 石墨烯杂化超表面调控特性

控制变量仿真得出,我们看到对于每组结构参数,都存在对应于石墨烯高方阻和低方阻的 2 个谐振频率,见图 5。

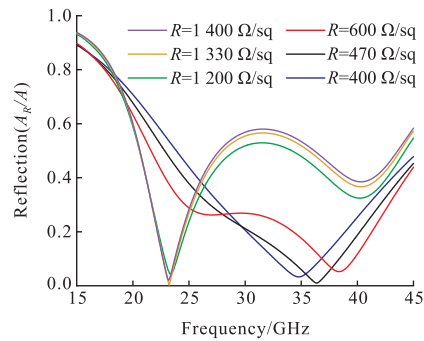


图 5 石墨烯方阻不同时对应杂化超表面的反射频谱

该结果显示,固定 $d = 1.3 \text{ mm}$, $L = 0.5 \text{ mm}$, $a = 6 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$ 时,完美吸波频率通过调节石墨烯方阻由 23.2 GHz 变为 36.4 GHz,相应阻值为 1 330 Ω/sq 与 470 Ω/sq。加入的金属网格为石墨烯吸波器提供了宽带特性,这源于杂化超表面石墨烯与金属间法诺谐振的耦合结果。FSS 也可以看作具有较低电子密度的金属晶体,根据 a 值的不同具

有不同的截止频率,其反射频谱见图6。 $a=6\text{ mm}$ 时,截止频率为50 GHz,该频率以下表现出德鲁德特性。相比单独的石墨烯三明治,金属结构带来的谐振频率改变与宽带特性与耦合作用下石墨烯表面的切向电场增强、石墨烯结构整体阻值分布都有关系^[32]。

从图5所示的结果可以看出,石墨烯处于高阻值时即可在低频处产生完美吸波,中心频率随方阻改变较小(1 400~1 200 Ω/sq 对应 23.2~23.4 GHz),处于低阻值时产生高频完美吸波,中心频率随方阻减小降低(600~400 Ω/sq 阻值改变量引起 3.6 GHz 红移)。方阻为 600 Ω/sq 时的宽带特性最好,24.3~43.0 GHz 频带内保持 10% 以下反射率。石墨烯方阻为杂化超表面的吸收特性调控提供了便捷的途径。

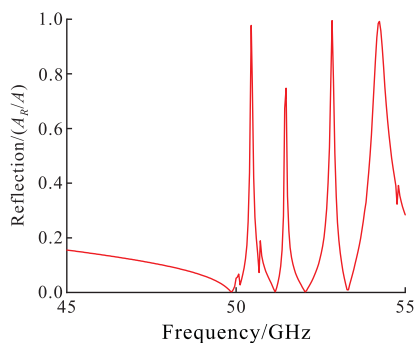


图6 金属结构的反射频谱($a=6\text{ mm}$)

2.3 石墨烯杂化超表面结构参数-特性研究

控制石墨烯在宽带阻值,控制变量地改变结构参数,结果如图7所示。可以看出, L 越小,即铜线越窄,石墨烯处于宽带阻值 600 Ω/sq 时的吸波中心频率越低,另外 L 与 f_0 关联较小(在石墨烯的高、低阻值时均验证成立,图未示出),但 L 更小的 FSS 宽带特性更佳, $L=0.1\text{ mm}$ 时 90% 吸波带为 21.7~42.5 GHz。对于 L 较大的铜线 FSS,达到高频处的完美吸波需要更大阻值调节范围($L=0.6\text{ mm}$ 时的高频完美吸波对应方阻为 440 Ω/sq ,图未示出),比 $L=0.5\text{ mm}$ 对应方阻低 30 Ω ,而当选用更宽的铜线, $L>1.0\text{ mm}$ 时,FSS 更多的表现出反射特点,FSS 与石墨烯吸波器的耦合吸波作用变差,且无法产生高频完美吸波。因此 L 值在允许范围内可以尽可能小,以提供更好的实际调控效果。其次,随着 a 减小, f_0 升高。 $a=5\text{ mm}$ 时,方阻为 600 Ω/sq 即可产生高频完美吸波,相对于较大周期的 FSS 更易实现高低频完美吸波的切换。最后, h 值改变了耦合波束间的相位, h 越小则 f_0 越高,与 d 值的影响方向相同,且完美吸波总是存在(在石墨烯的高、低阻值时均验证成立,图未示出)。由于石墨烯电容器

与 FSS 非接触, h 由外部装置影响,应注意其对吸波波段产生的偏移。

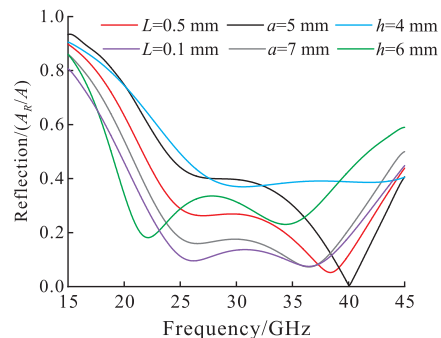


图7 结构参数 L 、 a 、 h 控制变量地不同时,对应杂化超表面的反射频谱

3 结语

本文首先研究了含石墨烯三明治结构的微波吸收性能,其随着石墨烯方阻的变化可产生单频率的完美吸波,固定石墨烯方阻而只改变 PP 介质厚度则完美吸波频率不同,该现象产生于干涉效应与石墨烯电损耗特性。进一步,引入金属结构与石墨烯构造杂化超表面,调节石墨烯方阻产生了完美吸波频率由低频向高频的变换以及额外的宽带效应,本研究阐明了杂化超表面微波宽带吸收性能与主要结构参数间的关系。

参考文献

- [1] LINDEN S, ENKRICH C, WEGENER M, et al. Magnetic Response of Metamaterials at 100 Terahertz[J]. Science, 2004,306: 1351-1353.
- [2] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C K. Metamaterials and Negative Refractive Index[J]. Science, 2004,305: 788-792.
- [3] CHEN H T, PADILLA W J, ZIDE J M O, et al. Active Terahertz Metamaterial Devices[J]. Nature, 2006,444: 597-600.
- [4] ZHAO Q, ZHOU J, ZHANG F L, et al. Mie Resonance-Based Dielectric Metamaterials[J]. Mater Today, 2009,12: 60-69.
- [5] JAHANI S, JACOB Z. All-Dielectric Metamaterials[J]. Nature Nanotechnology, 2016,11: 23-36.
- [6] YU N F, GENEVE P, KATS M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction[J]. Science, 2011, 334: 333-337.
- [7] SUN S L, HE Q, XIAO S Y, et al. Gradient-Index Meta-Surfaces as a Bridge Linking Propagating Waves and Surface Waves[J]. Nature Mater, 2012,11: 426-

- 431.
- [8] GLYBOVSKI S B, TRETYAKOV S A, BELOV P A, et al. Metasurfaces: from Microwaves to Visible [J]. *Physics Reports*, 2016,634: 1-72.
- [9] DING F, PORS A, BOZHEVOLNYI S I. Gradient Metasurfaces: a Review of Fundamentals and Applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2018,81(2):026401.
- [10] WANG S M, WU P C, SU V C, et al. A Broadband Achromatic Metalens in the Visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018,13: 227-232.
- [11] SHALTOUT A M, SHALAEV V M, BRONGERSMA M L. Spatiotemporal Light Control with Active Metasurfaces[J]. *Science*, 2019,364: 648.
- [12] CHEN P Y, ALU A. Atomically Thin Surface Cloak Using Graphene Monolayers[J]. *ACS Nano*, 2011,5(7): 5855-5863.
- [13] YATOOSHI T, ISHIKAWA A, TSURUTA K. Terahertz Wavefront Control by Tunable Metasurface Made of Graphene Ribbons[J]. *Applied Physics Letters*, 2015,107(5):053105.
- [14] 李小兵, 陆卫兵, 刘震国, 等. 基于可调石墨烯超表面的宽角度动态波束控制[J]. *物理学报*, 2018,67(18): 184101.
- [15] YU N F, AIETA F, GENEVET P, et al. A Broadband, Background-Free Quarter-Wave Plate Based on Plasmonic Metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012,12(12): 6328-6333.
- [16] YANG R S, XU J, SHEN N H, et al. Subwavelength Optical Localization with Toroidal Excitations in Plasmonic and Mie Metamaterials []. *InfoMat*, 2021,5: 577-597.
- [17] MA X L, PAN W B, HUANG C, et al. An Active Metamaterial for Polarization Manipulating[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014,2(10): 945-949.
- [18] FU Q H, ZHANG F L, FAN Y C, et al. Weak Coupling between Bright and Dark Resonators with Electrical Tunability and Analysis Based on Temporal Coupled-Mode Theory[J]. *Applied Physics Letters*, 2017,110(22):1-5.
- [19] LI C, ZHU W, LIU Z, et al. Tunable Near-Infrared Perfect Absorber Based on The Hybridization of Phase-Change Material and Nanocross-Shaped Resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2018,113(23): 1-5.
- [20] ZHU W, FAN Y C, LI C, et al. Realization of a Near-Infrared Active Fano-Resonant Asymmetric Metasurface by Precisely Controlling the Phase Transition of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [J]. *Nanoscale*, 2020, 12: 8758-8767.
- [21] ANDRYIEUSKI A, LAVRINENKO A V. Graphene Metamaterials Based Tunable Terahertz Absorber: Effective Surface Conductivity Approach[J]. *Optics Express*, 2013,21: 9144-9155.
- [22] DAI S, MA Q, LIU M K, et al. Graphene on Hexagonal Boron Nitride as a Tunable Hyperbolic Metamaterial [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10: 682-686.
- [23] ZHANG M, ZHANG W, LIU A Q, et al. Tunable Polarization Conversion and Rotation based on a Reconfigurable Metasurface [J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):12068.
- [24] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films[J]. *Science*, 2004,306: 666-669.
- [25] GEIM A K, NOVOSELOV K S. The Rise of Graphene[J]. *Nature Mater*, 2007,6: 183-191.
- [26] YAN H G, LOW T, ZHU W J, et al. Damping Pathways of Mid-Infrared Plasmons in Graphene Nanostructures [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7: 394-399.
- [27] LEE S H, CHOI M, KIM T T, et al. Switching Terahertz Waves with Gate-Controlled Active Graphene Metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2012,11(11): 936-941.
- [28] BALCI O, KAKENOV N, KOCABAS C. Controlling Phase of Microwaves with Active Graphene Surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2017,110(16): 1-5.
- [29] NAN J, YANG R, XU J, et al. Actively Modulated Propagation of Electromagnetic Wave in Hybrid Metasurfaces Containing Graphene[J]. *EPJ Applied Metamaterials*, 2021,7: 9.
- [30] HORNG J, CHEN C F, GENG B S, et al. Drude Conductivity of Dirac Fermions in Graphene [J]. *Physical Review B*, 2011,83:165113.
- [31] TUCKER C E, ADE P. FSS and Metal Mesh Filters for THz Applications[C]// 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. Rome, Italy :IEEE,2010:11624295.
- [32] DABIDIAN N, KHOLMANOV I, KHANIKAEV A B, et al. Electrical Switching of Infrared Light Using Graphene Integration with Plasmonic Fano Resonant Metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2015,2: 216-227.

(编辑:徐楠楠)