

Preparation of Graphene Metamaterial Microstructure Material and Its Application in Improved Design of Microwave Absorbing Coatings

Lishun Fu¹, Mingjuan Sun¹, Guangxuan Liu², Xue Li^{1*}

¹Kuang-Chi Institute of Advanced Technology, Shenzhen Guangdong

²Kuang-Chi Advanced Technology Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Email: xue.li@kuang-chi.com

Received: Sep. 19th, 2019; accepted: Oct. 3rd, 2019; published: Oct. 10th, 2019

Abstract

Graphene was used to develop a new type of metamaterial microstructure material, which was applied to improved design of W-type barium ferrite microwave absorbing coatings. The influence of improved design on absorbing performance was analyzed and the absorbing mechanism was investigated. The simulation results show that the microwave absorbing performance of the microwave absorbing coatings has been greatly improved by metamaterials. The effective absorption bandwidth of 1.0 mm microwave absorbing coating can be greatly increased from 0 to 11.3 GHz, and the -20 dB absorption bandwidth of 2.0 mm microwave absorbing coating can reach 11.4 GHz. The distribution of electric field, magnetic field and power loss at different frequency points of microwave absorbing coating improved by metamaterials is also analyzed and discussed through simulation.

Keywords

Metamaterial, Graphene, Microwave Absorbing Performance, Microstructure Material, Simulation Design

石墨烯超材料微结构材质的制备及其在吸波涂层改进设计上的应用

付立顺¹, 孙明娟¹, 刘光烜², 李 雪^{1*}

*通讯作者。

文章引用: 付立顺, 孙明娟, 刘光烜, 李雪. 石墨烯超材料微结构材质的制备及其在吸波涂层改进设计上的应用[J]. 材料科学, 2019, 9(10): 905-915. DOI: 10.12677/ms.2019.910112

¹深圳光启高等理工研究院, 广东 深圳

²深圳光启尖端技术有限责任公司, 广东 深圳

Email: xue.li@kuang-chi.com

收稿日期: 2019年9月19日; 录用日期: 2019年10月3日; 发布日期: 2019年10月10日

摘要

本文利用石墨烯开发了一种新型超材料微结构材质, 并将其应用于W型钽铁氧体吸波涂层的改进设计, 分析了改进设计对吸波性能的影响, 并对吸波机理进行了研究。通过仿真发现, 经过超材料改进设计的吸波涂层的吸波性能得到了大幅提高, 1.0 mm吸波涂层的有效吸收带宽可从0大幅增加到11.3 GHz, 2.0 mm吸波涂层-20 dB的吸收带宽可达11.4 GHz。本文通过仿真还对经超材料改进设计的吸波涂层在不同频点处的电场、磁场和能量损耗分布情况进行了分析和讨论。

关键词

超材料, 石墨烯, 吸波性能, 微结构材质, 仿真设计

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial International License (CC BY-NC 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



Open Access

1. 引言

超材料是一种具有传统自然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构, 一般由远小于工作波长的结构单元周期排列而成。由于单元周期远小于工作波长, 电磁波无法识别材料单元细节, 可以看成等效介质材料[1] [2]。通过在材料关键物理尺度上的结构有序设计, 突破某些表现自然规律的限制, 从而获得自然界传统物质不具备的电磁特性, 如左手特性[3]、逆 Doppler 效应[4]、逆 Snell 效应[5]、逆 Cherenkov 效应[6]、完美透镜效应[7]、逆 Goos-Hänchen 位移[8]等。在这些基础上, 人们发现了超材料广阔的应用前景, 如超分辨成像、小型化天线、电磁波隐形、电磁吸波体、高灵敏探测器等。

超材料的电磁波调制特性是由微结构特性、微结构拓扑分布及基体材料共同决定, 目前超材料微结构单元材质主要以金属(如铜、银、铝等)为主。但是随着应用需求的不断变化, 对超材料的电磁性能的需求不断多样化, 超材料的设计复杂程度及精细程度不断提高, 单纯金属材料作为超材料微结构材质无法满足超材料技术在复杂电磁波调制领域的应用发展[9] [10]。因此, 超材料微结构单元专用材料的研究已经成为发展超材料应用技术的关键[11] [12]。本文利用石墨烯开发了一种新型超材料微结构材质, 并将其应用于 W 型钽铁氧体涂层的改进设计, 探讨了这种新型微结构材质对吸波性能的影响, 并对影响机理进行了分析。

2. 实验

2.1. 石墨烯超材料微结构材质的制备

原料及药品: 丙烯酸树脂和 N,N-二甲基甲酰胺均购自巴斯夫, 尼龙酸甲酯购自济南中维化工有限公司

司, 异氟尔酮购自东莞市中美精细化工有限公司, 乙酸乙酯购自江苏索普(集团)有限公司, 以上化学试剂均为化学纯。石墨烯购自常州第六元素材料科技股份有限公司。

石墨烯超材料微结构材质制备过程如下: 将丙烯酸树脂、尼龙酸甲酯、异氟尔酮、乙酸乙酯按重量比 10:25:4:3 的比例混合均匀, 然后加入适量的分散剂 N,N-二甲基甲酰胺, 通过搅拌得到澄清透明的均匀树脂溶液。将石墨烯加入到树脂溶液中, 通过搅拌机搅拌、三辊机研磨和砂磨机研磨得到原浆, 将石墨烯浆料丝网印刷在基板表面并烘干后即得石墨烯超材料微结构材质。

2.2. 分析表征方法

采用 HITACHI SU8010 型扫描电子显微镜对石墨烯和 W 型钕铁氧体进行形貌分析。采用数显粘度计测试石墨烯浆料的粘度, 刮板细度仪测试浆料的细度。采用四探针法测试石墨烯超材料微结构材质的方阻。采用网络矢量分析器测试样品的电磁参数, 得到样品的复数介电常数和复数磁导率。为了防止装配间隙过大造成测试样品与空气线的配合不良, 同轴样品的外形尺寸要求较为严格, 本文采用模压方法制作样品。首先把待测粉末与石蜡混合均匀, 然后将其装入成形模具压制成圆环状测试样品, 圆环尺寸为内径 3.04 mm, 外径 7 mm, 厚度 3 mm, 测试样品中含粉末的质量分数为 85%。

2.3. 基于超材料对吸波涂层的改进设计

为了考察石墨烯超材料微结构材质在超材料方面的应用, 本文将其应用于对 W 型钕铁氧体吸波涂层的改进设计。W 型钕铁氧体吸波涂层作为中介质层涂覆在金属表面, 而本文制备好的石墨烯超材料微结构材质作为超材料层印刷在吸波涂层的表面。整体结构如图 1 所示, 自上而下依次为石墨烯方环图案电阻膜、吸波涂层和金属背板。

本文采用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 中的时域求解器对基于超材料改进设计的吸波涂层进行数值仿真分析, x 和 y 方向为超材料结构单元的周期边界, 电场沿 x 轴方向, 磁场沿 y 轴方向, 电磁波沿 z 轴方向垂直入射。为了考虑到相邻单元对单元自身电磁特性的影响, 在仿真时采用波导模拟器法进行研究。波导上下两面设为理想电壁, 左右两面设为理想磁壁。将超材料结构单元放置在波导中间, 垂直极化电磁波从波导一段照射, 经过超材料结构单元形成透射波和反射波, 由此可以得到其反射系数和透射系数。根据镜像理论可以推断出, 如果除掉四周的波导壁, 并且引入镜像, 该模型得到的单元电磁特性等效为无限阵列人工电磁结构的电磁特性。

基于超材料改进设计的吸波涂层的结构参数如图中所示, 其中石墨烯超材料微结构单元的周期长度为 $l_0 = 10$ mm, 方环图案边长 $l = 6.4$ mm, 线宽 $w = 0.8$ mm。本文主要将石墨烯方环方阻值 R_s 和吸波涂层的厚度 h 作为变量进行讨论。

根据传输线理论, 电磁波在传播过程中遇到不同的媒质的分界面时, 一部分电磁波能量在界面上被反射回来, 另一分电磁波能量则透过分界面继续传播, 其余的被介质吸收掉。它们之间的关系可表示为: $R + T + A = 1$, 其中 $R = |S_{11}|^2$ 为反射率, $T = |S_{21}|^2$ 为透射率, A 为吸收率。本文中由于金属背板的存在导致透射率 $T = 0$, 吸收率 A 可表示为: $A = 1 - R = 1 - |S_{11}|^2$, 所以可以用散射系数 S_{11} 来表征材料的吸波性能。

3. 结果与分析

3.1. 石墨烯超材料微结构材质的分析

图 2 为本文用来做超材料微结构材质的原料石墨烯的扫描电镜照片, 从图中可以看出, 石墨烯的片径为 5~10 μm 之间。不同石墨烯含量的浆料的粘度在 30,000~100,000 mPa·s 之间, 细度在 10 μm 以下。将不同石墨烯含量的浆料印刷在基板表面, 用四探针法测试其方阻, 其方阻值在 100~3000 Ω/\square 之间。

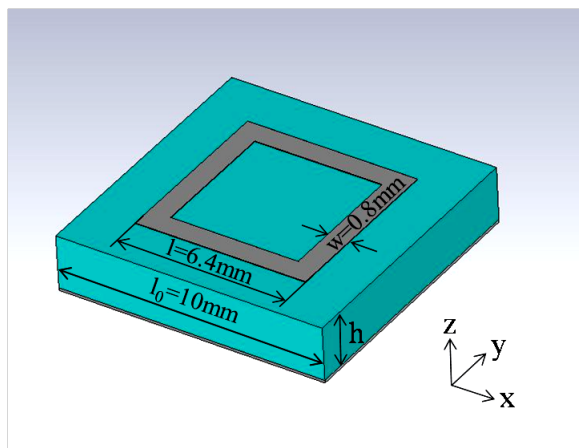


Figure 1. Structure chart of microwave absorbing coatings based on improved design of metamaterials

图 1. 基于超材料改进设计的吸波涂层结构图

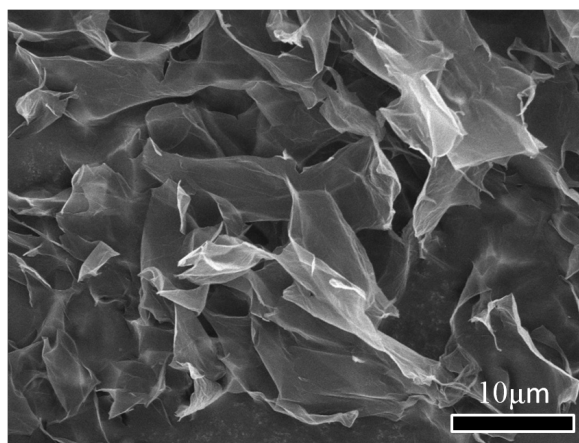


Figure 2. Scanning electron micrograph of graphene

图 2. 石墨烯的扫描电镜照片

3.2. W 型钡铁氧体的形貌和电磁性能分析

图 3 为本文用来做吸波涂层的原料 W 型钡铁氧体的扫描电镜照片, 从图中可以看出, W 型钡铁氧体的片径在 5~15 μm 之间, 厚度为 500 nm 左右。能谱分析表明, W 型钡铁氧体的成分为 $\text{BaZnCoFe}_{16}\text{O}_{27}$ 。

图 4 和图 5 分别为 W 型钡铁氧体在 2~18 GHz 范围内的复介电常数和复磁导率。从图中可以看出, W 型钡铁氧体的介电常数实部和虚部在 2~18 GHz 频段内基本保持不变, 分别为 6.7 和 0.1 左右。磁导率实部从 2 GHz 处的 2.6 逐渐下降到 10 GHz 处的 0.7 附近, 然后缓慢下降到 18 GHz 处的 0.6 附近。磁导率虚部先增大后减小, 首先从 2 GHz 处的 1.0 逐渐上升到 7 GHz 处的 1.5 附近, 然后逐渐下降到 18 GHz 处的 0.2 附近。

在测得的 W 型钡铁氧体的电磁参数基础上应用传输线定理可以对其吸波性能进行计算和评价。吸波材料可以近似地看作传输线, 根据传输线的一般理论, 解传输线方程可得吸波材料反射率计算公式如下:

$$Z_{in} = Z_0 (\mu_r / \epsilon_r)^{1/2} \tanh \left[j (2\pi f d / c) (\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \right] \quad (1)$$

$$RL = 20 \lg \left| (Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0) \right| \quad (2)$$

其中 Z_{in} 为吸波材料的输入阻抗; Z_0 为自由空间的波阻抗; μ_r 和 ϵ_r 分别为吸波材料的复介电常数和复磁导率; c 为电磁波在自由空间的传播速度, 即光速; f 为微波频率; d 为吸波材料厚度; RL 为反射损耗。

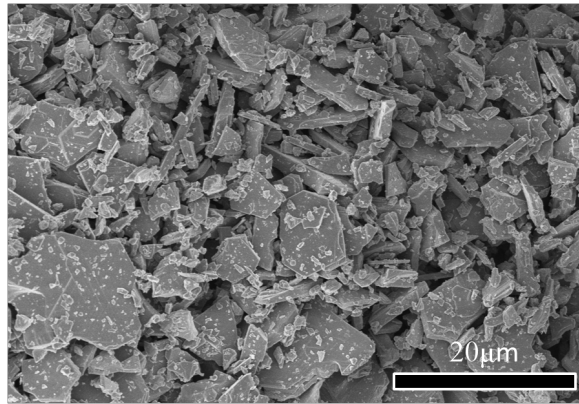


Figure 3. Scanning electron micrograph of W-type barium ferrite
图 3. W 型钡铁氧体的扫描电镜照片

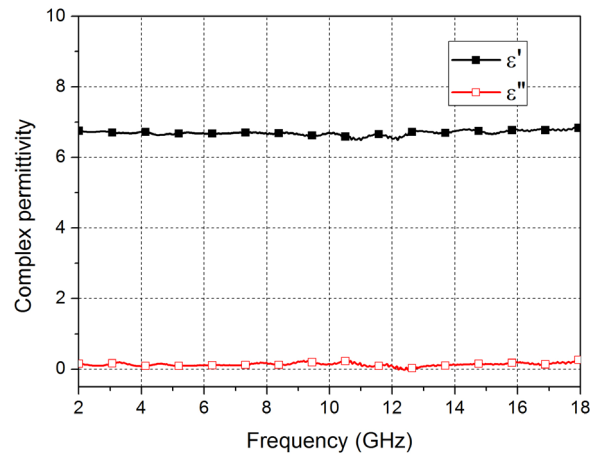


Figure 4. Complex permittivity of W-type barium ferrite
图 4. W 型钡铁氧体的复介电常数

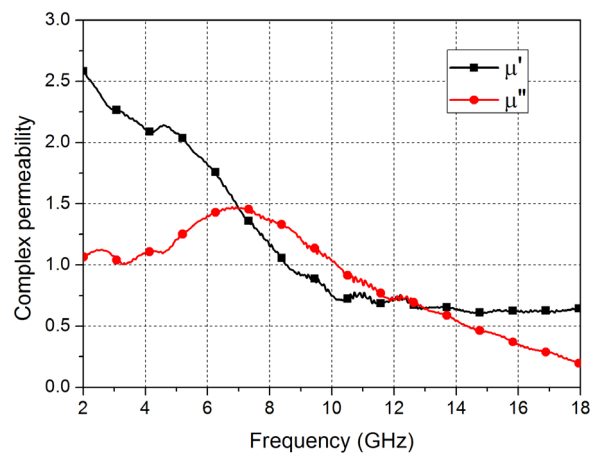


Figure 5. Complex permeability of W-type barium ferrite
图 5. W 型钡铁氧体的复磁导率

图 6 为 W 型钡铁氧体在不同涂层厚度下的反射率损耗曲线。从图中可以看出, 当 W 型钡铁氧体涂层厚度为 1.0 mm 时, 在 2~18 GHz 范围内反射损耗不超过 -5 dB; 当涂层厚度为 1.5 mm 时, 反射率损耗在 6~18 GHz 范围内小于 -5 dB 但不超过 -10 dB; 当涂层厚度在 2.0 mm 时, 吸收峰值在 16.2 GHz 可达 -31.4 dB, 有效吸收带宽(RL < -10 dB)可达 11.6 GHz, 其频带位置为 6.4~18 GHz; 当涂层厚度在 2.5 mm 时, 吸收峰向低频方向移动, 在 7.3 GHz 附近可达 -31.9 dB, 有效吸收带宽可达 10.6 GHz, 其频带位置为 5.4~15 GHz; 当涂层厚度为 3.0 mm 时, 吸收峰进一步向低频方向移动, 峰值强度降低, 有效吸收带宽变窄, 在 6.2 GHz 附近的吸收峰值仅为 -21.8 dB, 有效吸收带宽仅为 4.5 GHz, 其频带位置为 4.7~9.2 GHz。上述结果表明, W 型钡铁氧体涂层在厚度较小时, 反射损耗不明显, 随着涂层厚度增加, 反射损耗逐渐增加, 当厚度为 2.0 mm 时, 有效吸收带宽达到最大。

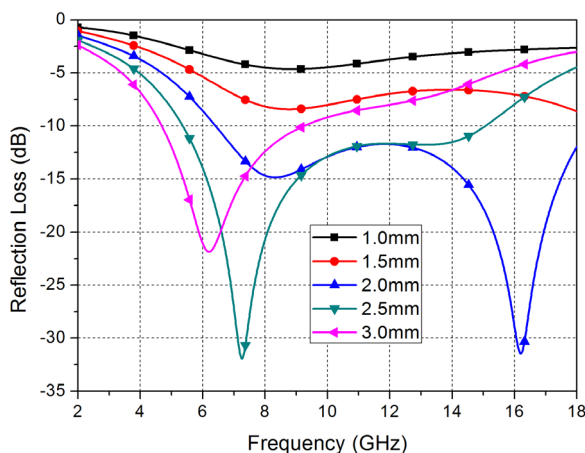


Figure 6. Reflection loss curves of W-type barium ferrite coatings with different thicknesses

图 6. W 型钡铁氧体在不同涂层厚度下的反射率损耗曲线

3.3. 基于超材料对吸波涂层的改进设计

通过石墨烯超材料微结构材质对不同厚度的 W 型钡铁氧体吸波涂层进行改进设计。首先研究吸波涂层厚度为 1.0 mm 时石墨烯方环方阻值 R_s 对吸波性能的影响。本文通过 CST 仿真得到了石墨烯方环方阻值 R_s 为 100, 200, 500, 1000, 2000 Ω/\square 时吸波涂层的反射率曲线, 如图 7 所示。从图中可以看出, 当石墨烯方环方阻值 R_s 为 100 Ω/\square 和 200 Ω/\square 时, 吸波涂层的性能仅提高了 1~2 dB 左右, 当方环方阻值 R_s 为 500 Ω/\square 时, 在 9 GHz 附近的吸收峰超过 -8 dB, 在 5.2~18 GHz 的频带范围内反射损耗超过 -6 dB; 当方环方阻值 R_s 为 1000 Ω/\square 时, 在 9 GHz 附近的吸收峰超过 -10 dB, 在 5.7~18 GHz 的频带范围内反射损耗超过 -8 dB; 当方环方阻值 R_s 为 2000 Ω/\square 时, 在 14.3 GHz 附近的吸收峰可达 -13.9 dB, 有效吸收带宽可达 11.3 GHz, 频带位置在 6.7~18 GHz。上述结果表明, 对于吸波性能不明显的 1.0 mm 吸波涂层而言, 经过超材料的改进设计并选择合适的阻值, W 型钡铁氧体吸波涂层的吸波性能可以得到大幅改善。

然后选择有效吸收带宽最宽的 2.0 mm 吸波涂层作为研究对象, 研究石墨烯方环方阻值 R_s 对 W 型钡铁氧体吸波涂层性能的影响。图 8 为方环不同阻值下 W 型钡铁氧体吸波涂层的吸波性能仿真图。从图中可以看出, 当石墨烯方环方阻值 R_s 为 200 Ω/\square 时, 吸波涂层的有效吸收带宽从 11.6 GHz 增加到 12.4 GHz, 吸收峰值从 -31.4 dB 下降到 16.3 GHz 处的 -17.6 dB, 整体吸波性能有所回落; 当石墨烯方环方阻值 R_s 为 500 Ω/\square 时, 有效吸收带宽增加到 12.7 GHz, 吸收峰值有所回升, 在 15.9 GHz 处可达 -24.6 dB, 在 6.6~17.7 GHz 范围内实现了反射损耗小于 -15 dB; 当石墨烯方环方阻值 R_s 为 1000 Ω/\square 时, 吸收峰值在 15.4 GHz

处可达-48 dB, -20 dB 的吸收带宽可达 11.4 GHz, 频带位置在 7.4~16.8 GHz, 此时吸波性能达到最强; 当石墨烯方环方阻值 R_s 增加到 2000 Ω/\square 时, -20 dB 的吸收带宽下降到 7.4 GHz, 频带位置在 8.1~15.5 GHz, 吸收峰值在 10.6 GHz 附近为-29.7 dB; 当石墨烯方环方阻值 R_s 进一步增加到 3000 Ω/\square 时, -20 dB 的吸收带宽进一步到 3.9 GHz, 频带位置在 9.2~13.1 GHz, 吸收峰值在 10.8 GHz 仅为-22.3 dB。以上结果表明, 超材料改进设计过程中, 2.0 mm 吸波涂层存在着一个最佳的方环方阻值 2000 Ω/\square , 此时-20 dB 的吸收带宽达到最大。

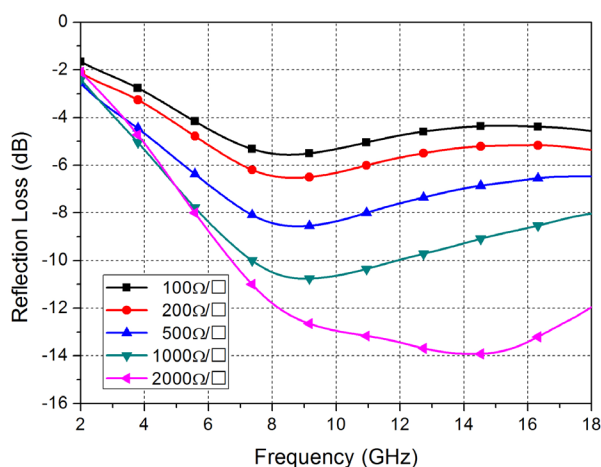


Figure 7. Reflection loss curves of 1.0 mm microwave absorbing coatings with different square ring sheet resistance values

图 7. 1.0 mm 吸波涂层在不同方环方阻值下的反射率损耗曲线

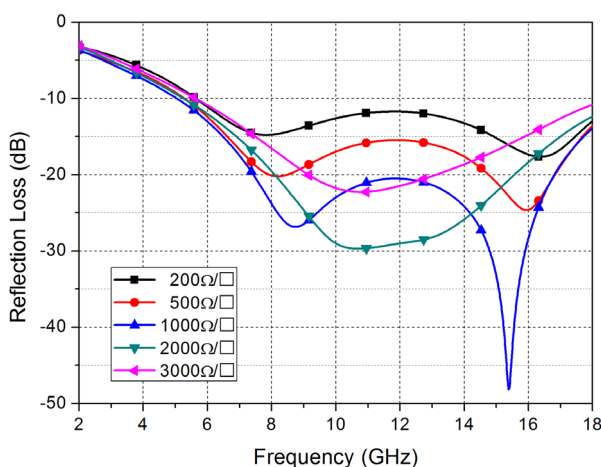


Figure 8. Reflection loss curves of 2.0 mm microwave absorbing coatings with different square sheet resistance values

图 8. 2.0 mm 吸波涂层在不同方环方阻值下的反射率损耗曲线

为了考察吸波涂层厚度对超材料改进设计后吸波性能的影响, 本文固定方环方阻值为 2000 Ω/\square , 通过 CST 仿真不同涂层厚度时的吸波性能, 如图 9 所示。从图中可以看出, 当吸波涂层厚度为 1.0 mm 和 1.5 mm 时, 吸波性能尚不能达到-20 dB, 而吸波涂层厚度为 2.0 mm 时, -20 dB 的吸收带宽可达 7.4 GHz,

当吸波涂层厚度增加到 2.5 mm 时, -20 dB 的吸收带宽下降到 5.5 GHz, 当吸波涂层厚度进一步增加到 3.0 mm 时, 吸波性能又回落到 -20 dB 以下。以上结果表明, 随着吸波涂层厚度的增加, 经过超材料改进设计的吸波涂层性能先增大后减小, 在 W 型钽铁氧体吸波涂层的厚度为 2.0 mm 时, 经超材料改进设计后的吸收带宽达到最大, 说明经超材料改进设计后的吸波涂层也存在一个最佳匹配厚度, 此时吸波性能最佳。

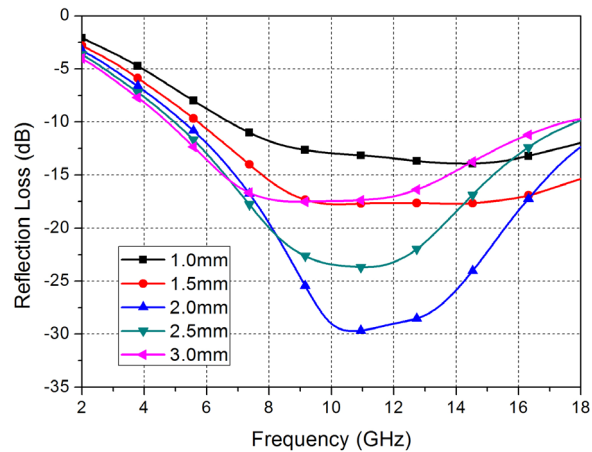


Figure 9. Reflection loss curves of microwave absorbing coatings improved by metamaterials with different thicknesses
图 9. 经超材料改进设计的吸波涂层在不同厚度下的反射率损耗曲线

3.4. 超材料改进设计对吸波涂层的影响机理分析

为了研究超材料改进设计对吸波涂层的影响, 本文选用石墨烯方环方阻值为 $1000 \Omega/\square$ 情况下厚度为 2.0 mm 的吸波涂层作为研究对象。选取频段内的两个吸收峰位置以及两峰中间的位置作为观察点, 即 $f=8.7 \text{ GHz}$ 、 $f=10.6 \text{ GHz}$ 和 $f=15.4 \text{ GHz}$ 频点处, 并选取 $f=3 \text{ GHz}$ 频点作为参照点, 分别观察在 TE 波模式下超材料改进设计的吸波涂层的电场分布和磁场分布, 仿真结果如图 10 和图 11 所示。

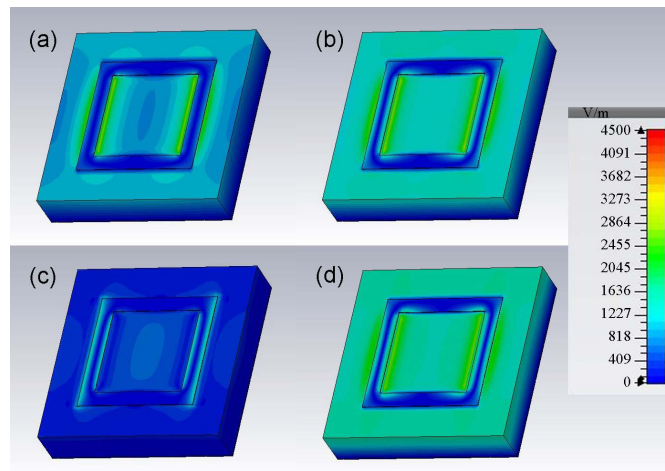


Figure 10. Electric field distributions of microwave absorbing coatings at different frequencies. (a) 3 GHz; (b) 8.7 GHz; (c) 10.6 GHz; (d) 15.4 GHz

图 10. 吸波涂层在不同频点下的电场分布图 (a) 3 GHz; (b) 8.7 GHz; (c) 10.6 GHz; (d) 15.4 GHz

从图 10 中可以看出, 在 3 GHz 低频频点处, 吸波涂层上的电场开始在超材料方环左右边缘处聚集; 在 8.7 GHz 频点处, 电场主要分布在吸波涂层表面, 并且在方环左右边缘处也聚集了较强的电场; 在 10.6 GHz 频点处, 吸波涂层表面的电场大幅降低, 电场主要聚集在方环的左右边上; 在 15.4 GHz 频点处, 电场又重新分布在吸波涂层表面, 并且在方环左右边缘处也聚集了较强的电场。

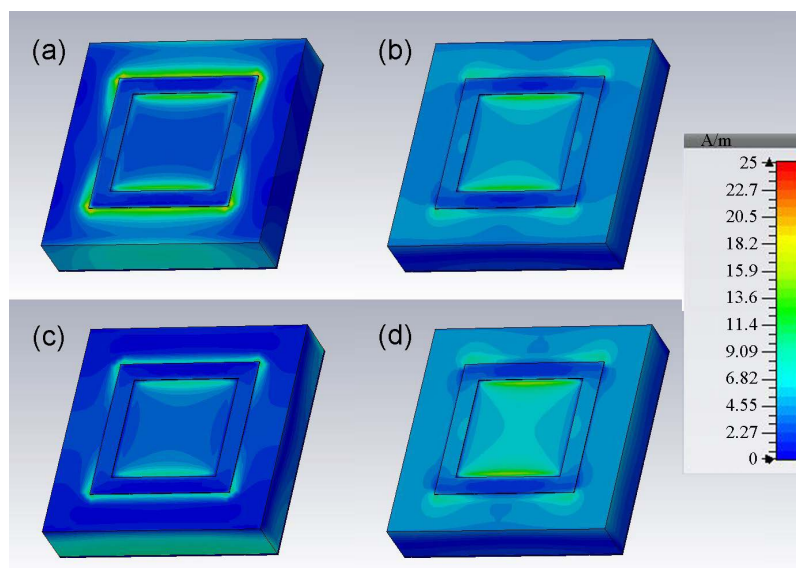


Figure 11. Magnetic field distributions of microwave absorbing coatings at different frequencies. (a) 3 GHz; (b) 8.7 GHz; (c) 10.6 GHz; (d) 15.4 GHz

图 11. 吸波涂层在不同频点下的磁场分布图 (a) 3 GHz; (b) 8.7 GHz; (c) 10.6 GHz; (d) 15.4 GHz

由图 11 可以看出, 在 3 GHz 低频频点处, 磁场主要聚集在方环上下边缘处, 特别是在方环四个角上磁场强度达到最大, 而在吸波涂层表面分布的磁场很小; 在 8.7 GHz 频点处, 在方环上下边缘处的磁场有所下降, 而在吸波涂层表面分布的磁场有所上升; 在 10.6 GHz 频点处, 吸波涂层表面分布的磁场大幅降低, 磁场主要聚集在方环的上下边缘处; 在 15.4 GHz 频点处, 吸波涂层表面的磁场又重新上升, 并且在方环的上下边缘处也聚集了较强的磁场。

图 12 为超材料改进设计后的吸波涂层在不同频点处的功率损耗密度分布情况。从图中可以看出, 在 3 GHz 低频频点处, 方环上下边缘处的损耗较为明显, 而吸波涂层内部的损耗较低。在 8.7 GHz 频点处, 方环上下边缘处的损耗基本不变, 而吸波涂层内部的损耗大幅提升; 在 10.6 GHz 频点处, 方环上下边缘处的损耗仍然保持不变, 而吸波涂层内部的损耗相对 8.7 GHz 频点时有所降低。在 8.7 GHz 频点处, 能量损耗主要分布在方环上下边缘处和涂层内部, 说明在低频吸收峰位置处石墨烯超材料和 W 型钡铁氧体涂层在这两个频点都对吸波性能产生了贡献。在 15.4 GHz 频点处, 方环上下边缘处的损耗变小, 而涂层内部的损耗变大, 说明在高频吸收峰位置处主要对吸波性能有贡献的是 W 型钡铁氧体涂层。通过超材料改进对吸波涂层低频位置处的吸波性能增强, 有效地拓展了吸波材料的吸波性能。

4. 结论

1) 利用石墨烯超材料微结构材质可以对 W 型钡铁氧体吸波涂层进行超材料改进设计。吸波涂层厚度为 1.0 mm, 经超材料改进设计后的吸波性能可以得到大幅改善, 当方环方阻值 R_s 为 $2000 \Omega/\square$ 时, 吸波涂层的有效吸收带宽可从 0 大幅增加到 11.3 GHz。而对于涂层厚度为 2.0 mm 的吸波涂层而言, 当方环

方阻值 R_s 为 $1000 \Omega/\square$ 时, -20 dB 的吸收带宽可达 11.4 GHz 。

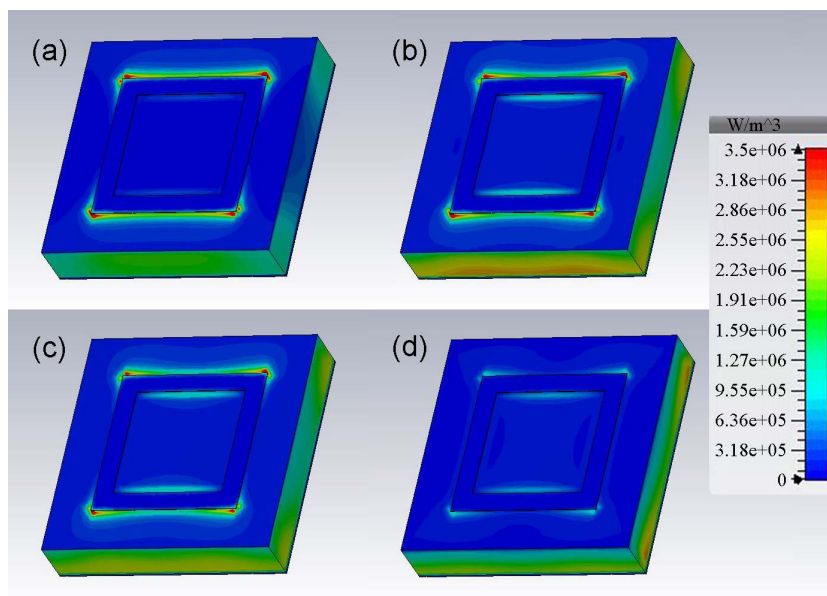


Figure 12. Power loss density distributions of microwave absorbing coatings at different frequencies (a) 3 GHz; (b) 8.7 GHz; (c) 10.6 GHz; (d) 15.4 GHz

图 12. 吸波涂层在不同频点下的功率损耗密度分布图 (a) 3 GHz; (b) 8.7 GHz; (c) 10.6 GHz; (d) 15.4 GHz

2) 经超材料改进设计的吸波涂层存在一个最佳匹配厚度。当石墨烯超材料方环方阻值 R_s 为 $2000 \Omega/\square$ 时, W 型钽铁氧体吸波涂层的最佳匹配厚度为 2.0 mm , 此时 -20 dB 的吸收带宽可达 7.4 GHz 。

3) 经石墨烯超材料材质(方环方阻值 R_s 为 $1000 \Omega/\square$)改进设计的 2.0 mm 吸波涂层, 在低频吸收峰(8.7 GHz)处电场和磁场都是分布在方环边缘和涂层表面, 能量损耗主要分布在方环上下边缘处和涂层内部; 在高频吸收峰(15.4 GHz)处, 电场和磁场分布情况与低频吸收峰时类似, 但能量损耗主要分布在涂层内部; 在两吸收峰之间的 10.6 GHz 处, 电场和磁场主要分布在方环边上和边缘处, 而能量损耗分布情况与低频吸收峰时类似。结果表明, 经过石墨烯超材料材质改进设计后, 有效地拓展了 W 型钽铁氧体吸波涂层的吸波性能。

基金项目

深圳市科技计划项目(JCYJ20151015165557141)。

参考文献

- [1] 刘晓明. 介质超材料的设计、制备及其对电磁波的调控[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [2] 周济, 李龙土. 超材料技术及其应用展望[J]. 中国工程科学, 2018, 20(6): 69-74.
- [3] Veselago, V.G. (1968) The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, **10**, 509-514. <https://doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>
- [4] Seddon, N. and Berapark, T. (2003) Observation of the Inverse Doppler Effect. *Science*, **302**, 1537-1540. <https://doi.org/10.1126/science.1089342>
- [5] 徐楠. 电磁异向介质材料设计及应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
- [6] 张忠祥. 左手微带导波结构及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [7] Valanju, P.M., Walser, R.M. and Valanju, A.P. (2002) Wave Refraction in Negative-Index Media: Always Positive

and Very Inhomogeneous. *Physical Review Letters*, **88**, Article ID: 187401.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.187401>

- [8] 李春芳. 反向 Goos-Hänchen 位移及负群时延[J]. 北京石油化工学院学报, 2002, 10(4): 55-58.
- [9] 苏妍妍, 龚伯仪, 赵晓鹏. 基于双负介质结构单元的零折射率超材料[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 084102.
- [10] 宋荟荟, 周万城, 罗发, 等. 超材料吸波体研究进展与展望[J]. 材料导报, 2015, 29(17): 43-46.
- [11] Zhao, W. and Jiu, S.W. (2015) Fabrication of Metamaterials Based on Gold Dendritic Cells. *Rare Metal Materials and Engineering*, **44**, 3037-3040. [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(16\)60046-2](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(16)60046-2)
- [12] 杜云峰, 姜交来, 廖俊生. 超材料的应用及制备技术研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(5): 115-121.