

基于集总元件的低频宽带超材料吸波体设计与实验研究*

王莹 程用志 聂彦[†] 龚荣洲

(华中科技大学, 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2012年5月18日收到; 2012年12月12日收到修改稿)

提出一种基于集总元件的超材料吸波体结构设计, 并进行了理论分析和实验验证. 仿真结果表明, 该吸波体在 2.5 GHz 到 4.46 GHz 的低频带内具有吸收率超过 95%、半高宽达到 70.4% 的良好吸收特性. 反演计算得到的等效输入阻抗表明集总元件的加入可以使该结构在较宽的频率范围内有较好的阻抗匹配特性, 介质表面能量损耗分布的模拟计算结果说明能量主要损耗在了集总电阻中, 从而实现低频宽带的吸收特性. 制备了实验样品并用自由空间法进行测试, 测试结果与模拟结果符合得较好. 进一步的实验测试结果表明 FR4 基板的厚度对该吸波体的吸收特性有明显的调控作用, 且对于固定参数的结构存在最佳匹配厚度.

关键词: 集总元件, 超材料吸波体, 低频, 宽带

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.62.074101

1 引言

超材料是一种人工设计及制备的复合介质材料, 具有许多奇特的物理特性, 如负折射现象、负介电常数与磁导率、逆多普勒效应以及逆切伦科夫效应等^[1-3], 近年来在隐身材料、微波段以及太赫兹波段器件等电磁学领域受到广泛的关注. 目前的研究领域根据损耗特性不同主要朝两个方向发展: 一种是尽量减小电磁波入射后的损耗, 其主要研究及应用方向包括完美透镜、隐身斗篷、小型化天线等^[4-6]; 另一种以增大电磁波入射后的损耗为目的, 增强材料对电磁波的吸收能力, 从而实现电磁屏蔽等功能. 这里我们主要关注后者的设计与实现.

在超材料引入吸波体设计之前, 大多吸波材料研究主要集中于碳泡沫尖劈类吸波材料、铁氧体瓦以及频率选择表面(FSS)等^[7]上. 传统的吸波材料设计要求介质厚度在电磁波传播方向上满足 $\lambda/4$ 的要求以实现大的衰减, 并且通常密度较大,

很难同时满足“薄、轻、宽、强”的高性能要求, 从而促进了包括超材料在内的高吸收特性吸波材料的研究. 2008年, Landy等^[8]提出了一种基于周期性谐振单元的“完美吸波体”, 峰值处吸收率几乎达到100%, 引起了研究人员的极大兴趣. 随后多种吸波体结构被提出^[7,9-15], 大多由具有一定图案的金属薄膜与介质基板形成的电谐振器和磁谐振器构成, 具有厚度薄、吸收能力强的特点, 但是通常吸收频带较窄. 一般可以通过优化吸波体结构的结构几何参数、将不同谐振单元结构相结合以及将多层结构相结合等方法来实现吸波体的宽入射角、极化不敏感和多频带强吸收^[9,10,12]的特性.

根据等效电路理论可以将超材料吸波体结构等效为等效电阻、电容和电感的串并联进行分析^[16-18], 直接在吸波体结构中加入集总元件则可以方便地改变输入阻抗和损耗特性, 为吸波体的探索与发展提供一种新思路^[19]. Gu等^[7]在开口环以及电谐振器结构中加入集总电阻和电容, 调节输入阻抗, 降低 Q 值, 增加吸收强度, 并通过多种谐振单元组合的方法拓宽频带, 用波导法进行测试, 实

* 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20090142110004)和国家自然科学基金(批准号: 51207060)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: nieyan@mail.hust.edu.cn

验测试结果与仿真相符的较好. Gu 等^[14]设计了一种基于集总元件的平面吸波体, 通过电磁仿真软件的模拟计算表明, 该吸波体具有低频宽带吸收特性, 但并没有从实验上进行验证. 本文提出了一种基于集总元件的新型超材料吸波体, 采用电磁仿真软件 (CST Microwave Studio 2009) 进行模拟仿真, 优化结构参数后得到了更好的理论吸收特性, 在 2.5GHz 到 4.46GHz 的低频频段内吸收率基本达到了 95% 以上, 半高宽达到 70.4%. 并用 PCB 印制电路板方法制备加工了实验样品, 用自由空间法对反射系数进行测试, 实验中基板的介电常数为 3 左右, 实验测得吸收率在 2.87 GHz 到 5.68 GHz 之间的低频频段内基本保持在 80% 以上的良好特性, 与模拟

计算结果符合得很好. 另外还对该结构附着在不同厚度的 FR4 基板上的情况进行了实验测试, 发现厚度有明显的调控作用, 且对固定尺寸的结构存在最佳匹配厚度.

2 结构与模拟分析

本文设计的超材料吸波体结构单元由加载集总元件的电谐振器、介质基板和金属背板组成, 其结构如图 1 所示. 该复合结构首先将入射的电磁波能量转变为电能, 然后通过集总电阻损耗掉^[14,15]. 本设计结构中加载的 R 和 C 元件具有轴对称性, 因而该吸波体具有极化不敏感特性.

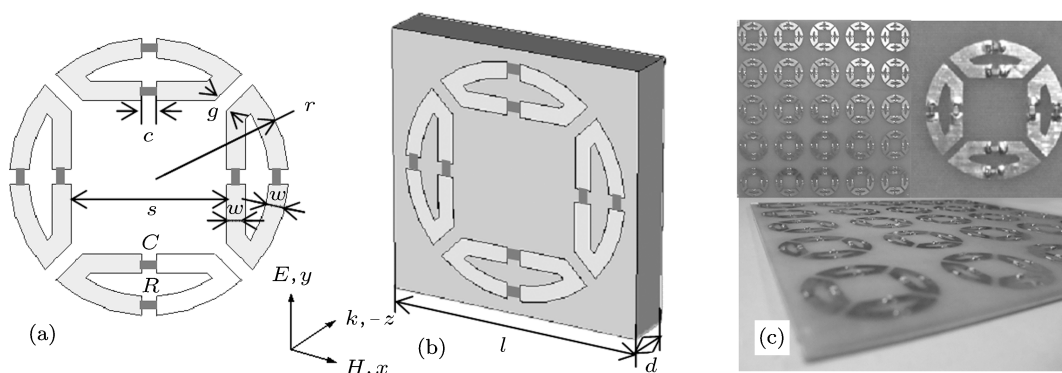


图 1 超材料吸波体结构示意图 (a) 正面结构图; (b) 斜侧面结构图; (c) 测试样品

超材料吸波体的吸收率 $A(\omega)$ 可以表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$, 其中 $R(\omega) = |S_{11}|^2$ 为反射率, $T(\omega) = |S_{21}|^2$ 为透射率. 对于加有一定厚度金属背板的超材料吸波体, 透射率 $T(\omega) = 0$, 因此吸收率可以用反射率简单表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega)$. 经过优化后确定结构参数如下: $l = 40 \text{ mm}$, $r = 16 \text{ mm}$, $s = 15.2 \text{ mm}$, $w = 2.7 \text{ mm}$, $g = 2 \text{ mm}$, $c = 2 \text{ mm}$, 内圈元件均为电容 $C = 4 \text{ pF}$, 外圈元件均为电阻, $R = 250 \Omega$. 电场沿 y 轴方向, 磁场沿 x 轴方向, 电磁波沿 $-z$ 轴方向入射. FR4 基板的介电常数 $\epsilon_r = 4.9$, 损耗角正切 $t_d = 0.025$, 厚度 $d = 7.3 \text{ mm}$.

用 CST Microwave Studio 2009 的频域求解器对所设计的超材料吸波体进行仿真的结果如图 2(a) 所示. 可以看到, 加载集总元件的吸波体结构在 2.5 GHz 到 4.46 GHz 频段内吸收率达到了 95% 以上, 半高宽为 70.4%. 而没有加载集总元件的结构仅有较窄的高吸收峰值, 5.8 GHz 和 6 GHz 处吸收率分别为 87.6% 和 99.2%. 用反演算法计算^[20] 得到

的等效输入阻抗如图 2(b) 所示, 从图中可以看到加载集总元件结构的等效阻抗实部在吸收频段内以及在 5.8 GHz 附近阻抗近似为 1, 而没有加载集总元件时等效输入阻抗在 3 GHz 处有个远大于 1 的峰值, 4.70 GHz 和 5.64 GHz 处分别有一个阻抗为 0.4 的峰值, 其他频段阻抗均约为 0. 说明集总元件的加入可以改变等效输入阻抗, 经过优化可以使材料在宽带内满足阻抗匹配条件.

为了研究该吸波体的能量损耗情况, 我们分别模拟计算了加载和不加载集总元件的结构在不同频点处介质表面的能量损耗分布, 结果如图 3 所示. 选择强吸收宽带内任一频率点分析, 如在 3 GHz 处, 没有加载集总元件时 (图 3(b)), 电磁波能量分布在金属结构边缘及结构之间缝隙中, 损耗较小; 加载集总元件后 (图 3(a)), 能量损耗主要分布在左右两个环路对所在区域, 尤其集中于集总电阻附近. 与宽带外吸收峰值处的表面能量损耗分布图 (图 3(c) 和 (d)) 对比, 可以看到, 在 3 GHz 处, 尽管加载

集总元件的超材料吸波体 (图 3(a)) 在介质中产生损耗的面积较小, 仍具有很高的吸收率, 这说明了此时的损耗主要是表面电流流经集总电阻产生的欧姆损耗. 比较 5.88 GHz 处加载集总元件 (图 3(c)) 和 5.8 GHz 处不加载集总元件 (图 3(d)) 的情况可

以看到, 两者的能量损耗分布总体相类似, 能量损耗在介质中分布面积较大, 说明两者在该频点处吸收峰值产生的原因相同, 能量损耗主要来源于介质中的介电损耗和电流流经表面金属结构产生的欧姆损耗.

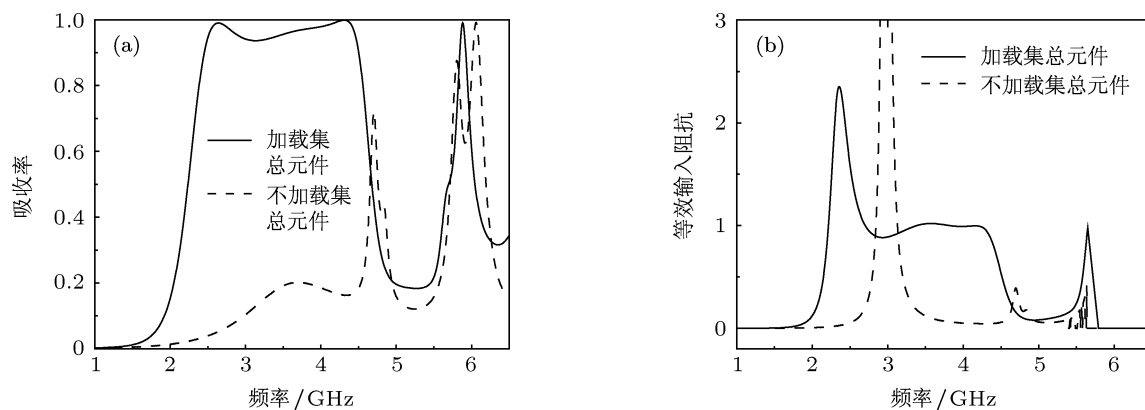


图2 加载集总元件以及不加载集总元件情况下的吸收率仿真结果与反演计算阻抗 (a) 吸收率; (b) 等效输入阻抗

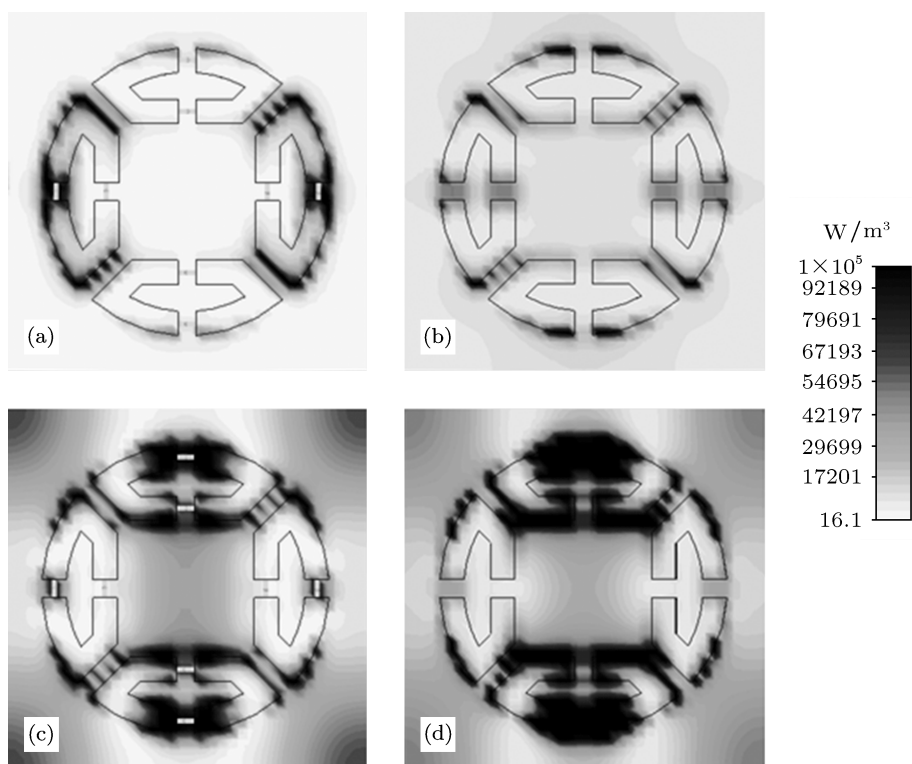


图3 能量分布图 (a) 加载集总元件结构 3 GHz 处; (b) 不加载集总元件 3 GHz 处; (c) 加载集总元件 5.88 GHz 处; (d) 不加载集总元件 5.8 GHz 处

3 样品制备与实验测试

基于上述设计的超材料吸波体结构, 我们制备了相关实验样品并进行了测试. 实验样品表面为

0.35 μm 厚的铜箔结构, 尺寸结构与仿真参数相同, 中间层为 FR4 介质基板, 背面为金属背板. 用 PCB 印制电路板方法在 FR4 介质基板上制备 5×5 周期的吸波体单元结构, 再焊接上贴片元件, 外环间隙

焊接电阻元件,阻值为 249Ω ,内环间隙焊接电容元件,电容值为 4 pF .

在微波暗室中用自由空间法对实验样品的反射系数进行测试,计算出吸收率曲线如图4中虚线所示.可以看到在 2.87 GHz 到 5.68 GHz 频段内吸收率基本上保持在 80% 以上.实际基板的介电常数不能达到上述模拟计算的理想值,大约为 3 ,因此我们按照实际的参数进行模拟计算,参数如下: $l = 40 \text{ mm}$, $r = 16 \text{ mm}$, $s = 15.2 \text{ mm}$, $w = 2.7 \text{ mm}$, $g = 2 \text{ mm}$, $c = 2 \text{ mm}$,电容 $C = 4 \text{ pF}$,电阻 $R = 249 \Omega$,FR4基板的介电常数为 $\epsilon_r = 3$,厚度为 $d = 7.3 \text{ mm}$,计算发现材料介电常数减小后,吸收频带向高频移动,结果如图4中实线所示.

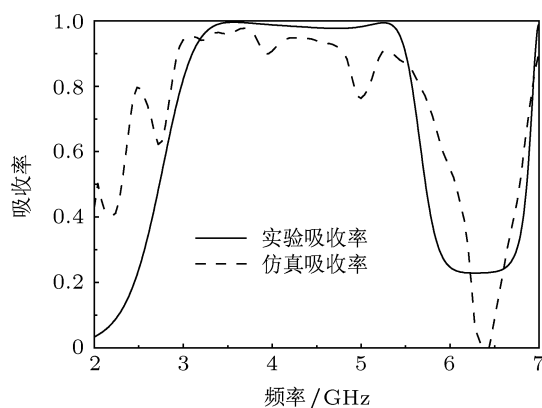


图4 实验测试样品吸收率

从图4中可以很清楚地看到实验结果与模拟计算结果符合得比较好.实验结果相比于模拟结果吸收率略有降低.其可能原因主要包括两个方面:一方面由于贴片元件经手工焊接到材料表面,焊接点的焊锡具有一定阻抗,实际阻抗与理论设计值存在差异,导致一定程度的等效阻抗不匹配;另一方面是由于实际样品的大小有限而产生的边缘绕射对实验结果有一定的影响.

进一步,本文研究了基板材料的厚度对本超材料吸波体吸收特性的影响.不同厚度情况下模拟仿真和实验测试得到的吸收率曲线如图5所示.从图5(a)和(b)中可以看出,实验测试与仿真结果符合得比较好,厚度增加时,强吸收频带逐渐向低频移动;厚度为 5.3 mm 时匹配性差,而厚度为 7.3 mm 时结果较优,具有较高的吸收率和较宽的吸收频带;当进一步增大厚度,强吸收频带开始变窄.由此可以说明基板厚度对吸收频带具有很强的调控特性,并且存在一个最佳厚度值,使得该结构在最宽的频

带范围内满足阻抗匹配原理从而实现低频宽带强吸收特性.

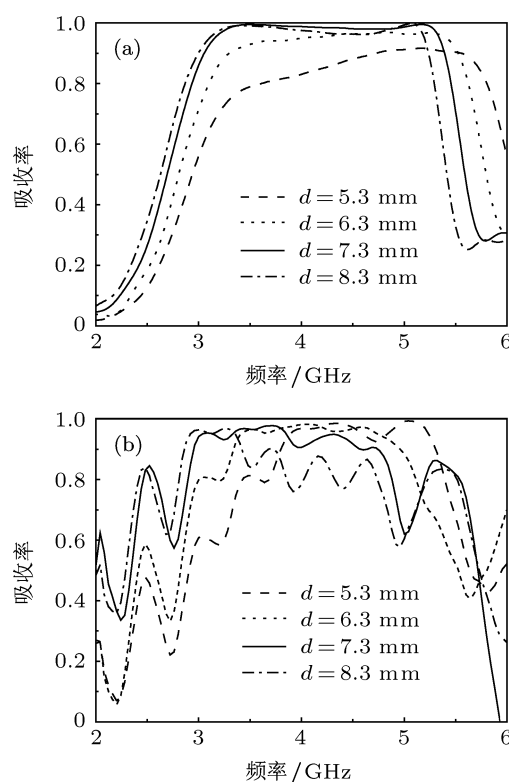


图5 不同基板厚度情况下吸收率 (a) 模拟计算; (b) 实验测试

4 结论

本文设计和制备了基于集总元件的超材料吸波体结构,该结构在低频具有宽带高吸收特性.模拟计算得到 2.5 GHz 到 4.46 GHz 频带内吸收率基本达到 95% 以上,半高宽为 70.4% .通过反演计算得到的等效输入阻抗表明通过加载集总元件可以使得超材料结构在很宽的频带内满足阻抗匹配条件,拓宽吸收频带.通过计算加载和不加载集总元件结构在不同频点处的能量损耗分布表明通常的超材料吸波体主要通过介质中的介电损耗和表面电流的欧姆损耗耗散能量,而加载集总元件的超材料可以通过结构中的集总电阻来损耗电磁波的能量,从而达到高吸收率的目的.用PCB印制电路板方法制备实验样品,焊接贴片元件,用自由空间法进行测试.结果表明,实验制备样品测试结果与仿真结果符合得较好,提高基板介电常数和适当增加基板厚度可以使得吸收频段向低频移动.本文提出的超材料吸波体为低频宽带吸波体研究设计提供了一种切实可行的思路,具有潜在的应用前景.

- [1] Cui W Z, Ma W, Qiu L D, Zhang H T 2008 *Electromagnetic Metamaterials and its applications* (Beijing: National Defense Industry Press) p8 (in Chinese) [崔万照, 马伟, 邱乐德, 张洪太 2008 电磁超介质及其应用 (北京: 国防工业出版社) 第 8 页]
- [2] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788
- [3] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [4] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [5] Schurig D, Mock J J, Justice B J 2006 *Science* **314** 977
- [6] Palandoken M, Grede A, Henke H 2009 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **57** 331
- [7] Gu S, Barrett J P, Hand T H 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 64913
- [8] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [9] Wang B, Koschny T, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **80** 33108
- [10] Zhu B, Feng Y J, Zhao J M, Huang C, Jiang T 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 051906
- [11] Li Y X, Xie Y S, Zhang H W 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 95408
- [12] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 6078 (in Chinese) [张燕萍, 赵晓鹏, 保石, 罗春荣 2010 物理学报 **59** 6078]
- [13] Zhu B, Feng Y J, Zhao J M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 51906
- [14] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Zhou H, Xu Z, Bai P, Peng W D, Lin B Q 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 117802
- [15] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Lin B Q, Zhou H, Bai P, Gu W, Peng W D, Ma H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087802 (in Chinese) [顾超, 曲少波, 裴志斌, 徐卓, 林宝勤, 周航, 柏鹏, 顾魏, 彭卫东, 马华 2011 物理学报 **60** 087802]
- [16] Fu L, Schweizer H, Guo H 2008 *Phys. Rev. B* **78** 115110
- [17] Costa F, Monorchio A, Manara G 2010 *IEEE Trans Antennas Propag.* **58** 1551
- [18] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, Zheng D H, Fan Y N, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134102 (in Chinese) [程用志, 聂彦, 龚荣洲, 郑栋浩, 范跃农, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134102]
- [19] Cheng Y Z, Gong R Z, Nie Y, Wang X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127801
- [20] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617

Design and experiments of low-frequency broadband metamaterial absorber based on lumped elements*

Wang Ying Cheng Yong-Zhi Nie Yan[†] Gong Rong-Zhou

(Department of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 18 May 2012; revised manuscript received 12 December 2012)

Abstract

A structure of metamaterial absorber constructed based on lumped elements is proposed, analyzed theoretically and verified experimentally. The simulated results indicate that the absorption of the proposed absorber is over 95% in the frequency range of 2.5 to 4.46 GHz, and the FWHM is 70.4%. The designed structure has a better impedance matching characteristic to the free space in a wider frequency range when loaded with lumped elements by scattering parameter retrieval calculation. It also can be found that the large loss occurs in lumped resistance, which contributes much to the low-frequency broadband absorption properties obtained by simulating the energy loss distribution of the dielectric surface. Results measured by means of the free space method agree well with the simulation. Further measured results also show that the thickness of FR4 substrate obviously has controllable effects on absorption properties of the absorber, the absorption wide band will move to lower frequency with the increase of thickness, and the optimal thickness for the structure of certain parameters also can be obtained.

Keywords: lumped element, metamaterial absorber, low-frequency, broadband

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.62.074101

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20090142110004), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51207060).

[†] Corresponding author. E-mail: nieyan@mail.hust.edu.cn