

基于磁/电介质混合型基体的宽带超材料吸波体的设计与制备

郭飞 杜红亮 屈绍波 夏颂 徐卓 赵建峰 张红梅

Design and fabrication of a broadband metamaterial absorber based on a dielectric and magnetic hybrid substrate

Guo Fei Du Hong-Liang Qu Shao-Bo Xia Song Xu Zhuo Zhao Jian-Feng Zhang Hong-Mei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 077801 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.077801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.077801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

硅太阳能电池的调制载流子红外辐射动态响应与参数分析

[Infrared radiation dynamic response and parametric analysis for silicon solar cell using photocarrier radiometry](#)

物理学报.2014, 63(22): 227801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.227801>

基于圆台结构的超宽带极化不敏感太赫兹吸收器

[A polarization-independent and ultra-broadband terahertz metamaterial absorber studied based on circular-truncated cone structure](#)

物理学报.2013, 62(23): 237801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.237801>

基于电谐振单元的超介质吸波材料及矩形波导匹配终端应用研究

[Research of metamaterial absorbers and their rectangular waveguide matching terminal applications based on the electric resonators](#)

物理学报.2013, 62(8): 087801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.087801>

一维光子晶体中光场分布特性分析

[The analysis on the properties of light field distribution in one-dimensional photon crystals](#)

物理学报.2012, 61(23): 237801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.237801>

载流子导引的折射率变化偏振相关性研究

[Polarization dependence of carrier-induced refractive index change](#)

物理学报.2012, 61(20): 207803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.207803>

基于磁/电介质混合型基体的宽带超材料吸波体的设计与制备*

郭飞¹⁾ 杜红亮^{1)†} 屈绍波^{1)‡} 夏颂²⁾ 徐卓²⁾ 赵建峰¹⁾ 张红梅¹⁾

1)(空军工程大学理学院, 西安 710051)

2)(西安交通大学电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2014年9月28日收到; 2014年11月13日收到修改稿)

本文设计了一种基于磁/电介质混合型基体的宽带超材料吸波体, 吸波体基本单元由电阻膜、磁/电介质混合型基体以及金属背板组成. 采用时域有限差分法对超材料吸波体吸波性能进行了仿真, 使用遗传算法优化了反射率小于 -10 dB的带宽. 仿真结果表明, 当超材料吸波体厚度为 2.5 mm时, 在 7.8 — 18 GHz频率范围内的反射率小于 -10 dB, 具有厚度薄、宽带、极化不敏感等优点. 通过等效电路模型对其工作机理进行了分析与讨论. 最后制备样品进行测试, 测试结果与仿真结果一致.

关键词: 混合型基体, 宽带, 超材料吸波体, 厚度薄

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

DOI: 10.7498/aps.64.077801

1 引言

近年来, 随着雷达探测技术的迅速发展, 对隐身技术的要求也越来越高, 而使用吸波材料可以有效减小雷达探测的概率, 因此关于高性能吸波材料的研究引起了人们的广泛关注^[1-5]. 传统吸波材料由于比重较大, 吸波性能受 $1/4$ 波长厚度限制等问题, 已逐渐无法满足隐身技术的应用需求. 最近, 超材料吸波体吸引了学术界的极大兴趣^[6-10], 通过调整超材料单元结构, 在较小的厚度下, 可实现双向^[11], 多吸收带^[12-14]以及宽带吸波^[15,16]等特性. 例如, 基于集总电阻元件以及电阻膜的超材料吸波体利用接地基体与单元阵列产生的多谐振特性, 可获得宽带吸波性能^[6,8]. 然而, 目前报道的这类超材料吸波体, 基体均是由单一介质材料构成,

主要通过结构单元的拓扑优化设计展宽吸收带宽, 尚未充分利用基体材料的可设计性. 同时, 磁性材料由于其高的磁导率, 可在较小的厚度下展宽吸波体带宽^[17,18], 但存在比重较大的缺点. 基于上述分析, 将磁性与电介质基体结合设计超材料吸波体, 不仅可克服单一磁性材料比重较大的缺点, 还增加了设计自由度, 这有助于展宽吸收带宽. 本文以磁介质(片状铁粉与环氧树脂复合材料)与电介质(聚四氟乙烯, F4B)为基体, 设计了基于方片、圆片、十字形电阻膜超材料吸波体, 分析了结构单元形状对吸波性能的影响, 并以方片形超材料吸波体为例对其吸波机理进行了讨论分析. 实验结果表明, 该超材料吸波体在 7.6 — 18 GHz的频段内反射率小于 -10 dB. 该吸波体具有宽带、厚度薄、极化不敏感等优点.

* 国家自然科学基金(批准号: 61331005)、中国博士后科学基金(批准号: 2013M532131)和陕西省基础研究计划(批准号: 2013JM6005)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: duhongliang@126.com

‡ 通信作者. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

2 仿真设计与分析

2.1 磁性材料及其吸波性能

在超声的振荡下,使环氧树脂(20wt%)与羰基铁粉(60wt%)充分混合,然后加入固化剂(20wt%),高速机械搅拌 20 min 后,将一部分配制好的复合物刷涂在尺寸为 180 mm × 180 mm × 6 mm 的铝板上,在温度为 50 °C 的环境中固化 24 h 得到磁性材料.将另一部分倒入标准波导端口(BJ32, BJ48, BJ70, BJ100, BJ140)尺寸的模具中,固化制得样品,并使用矩形波导法测试其电磁参数,结果如图 1 所示.在 2.6—18 GHz 频率范围内,磁性材料介电常数实部 ϵ' 和虚部 ϵ'' 几乎保持不变;其磁导率实部 μ' 随频率的增加而逐渐减小,虚部 μ'' 随频率的增加先增大后逐渐减小,显示出典型的磁共振特性^[19-21].

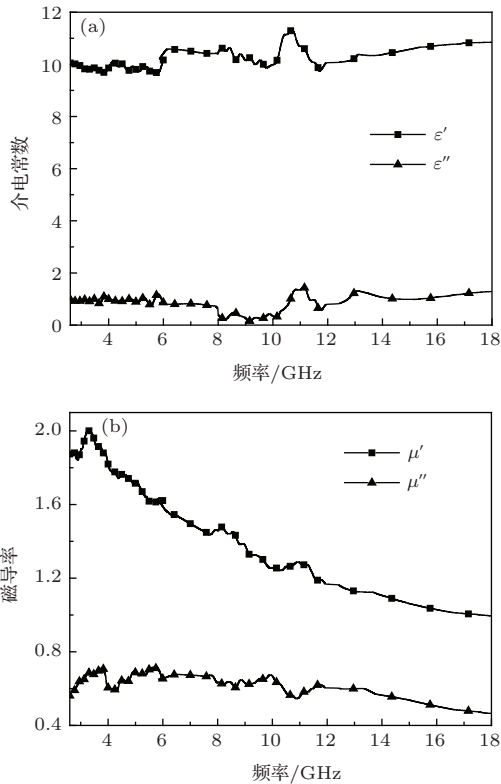


图1 磁性材料的电磁参数 (a) 介电常数; (b) 磁导率

根据传输线模型,在给定厚度和频率的情况下,当电磁波垂直入射时,单层吸波材料的反射率 R 为^[22]

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} \right|, \quad (1)$$

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left(j \frac{2\pi f t}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right), \quad (2)$$

其中, Z_{in} 为输入阻抗, $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$, $\mu_r = \mu' - j\mu''$ 分别为材料的相对复介电常数和磁导率, f 为频率, t 为厚度, c 为自由空间中的光速. 根据图 1 所示电磁参数,计算了不同厚度下的反射率,结果如图 2 所示. 由图可知,随着材料厚度的增加,吸波材料的吸收峰频率向低频移动.

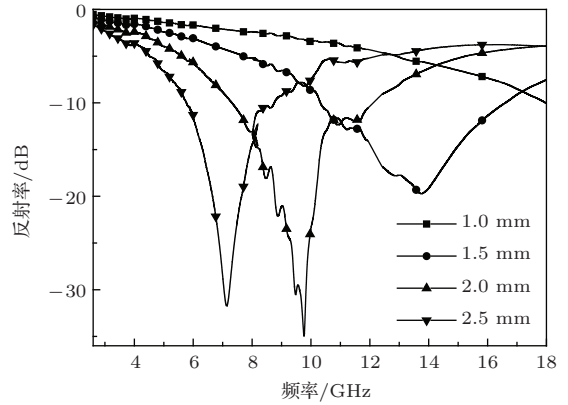


图2 磁性材料在不同厚度下(1—2.5 mm)的反射率

2.2 设计与性能分析

超材料吸波体的结构如图 3(a) 所示,自上而下依次为电阻膜、电介质基体(F4B)、磁介质基体、金属背板,其中 F4B 的介电常数 $\epsilon_r = 2.65 (1 - j0.001)$. 由于金属背板的存在,传输率 $T(\omega) = 0$,吸收率 $A(\omega)$ 可表示为 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$,故可用反射率 $R(\omega)$ 来表征超材料吸波体对电磁波的吸收. 为了实现极化不敏感特性,选用具有旋转对称性的十字、方片、圆片形电阻膜,如图 3(b) 所示,其中 t_1 为 F4B 的厚度, t_2 为磁性材料的厚度, L 为周期单元的尺寸, D 和 d 为电阻膜的特征尺寸. 在磁性材料和 F4B 的总厚度保持在

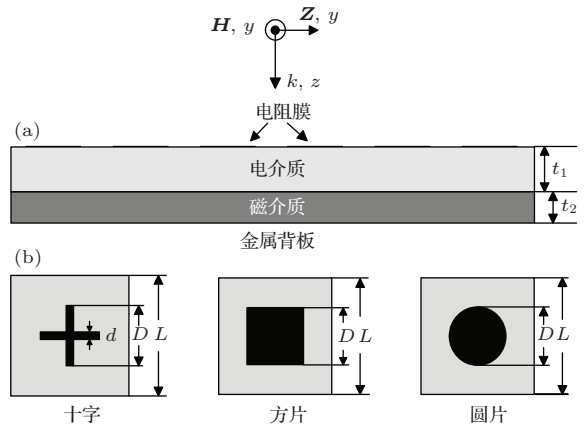


图3 超材料吸波体的结构示意图 (a) 侧视图; (b) 单元结构

表1 超材料吸波体优化后的带宽和结构参数

单元结构	t_1/mm	t_2/mm	D/mm	L/mm	d/mm	$R_s/(\Omega/\square)$	带宽 ($< -10 \text{ dB}$)/(GHz)
方片	1.5	1	6.75	12	-	65	7.7—17.8
圆片	1.5	1	8.12	14	-	50	7.8—18
十字	1.78	0.72	7.07	9.96	5.23	85	7.8—18

2.5 mm 的基础上, 利用 CST Microwave studio 2012 进行模拟计算, 其中 x 和 y 轴方向为 unit cell 边界条件, 并假设电磁波垂直入射到吸波体表面. 运用遗传算法分别优化了三种超材料吸波体在 2.6—18 GHz 频段内反射率小于 -10 dB 的最大带宽, 表 1 给出了优化后的吸波体的结构参数和带宽特性, 其中 R_s 为电阻膜方阻值.

图 4 是优化后的超材料吸波体反射率曲线. 可以看到, 方片、圆片、十字形三种超材料吸波体优化带宽接近, 大约为 7.8—18 GHz, 并均出现两个吸收峰. 例如, 对于方片形超材料吸波体, 在 8.7 GHz 和 15.3 GHz 处可观察到吸收峰. 由此可见, 电阻膜结构单元的形状对优化带宽的影响较小. 另外, 与图 2 中单纯磁性材料以及图 4 中无电阻膜时基体 (1 mm 磁性材料+1.5 mm F4B) 吸波性能相比, 超材料吸波体带宽得到了显著改善. 同时, 由于磁性材料厚度仅为 1.0 mm, 所以该超材料吸波体比重较小.

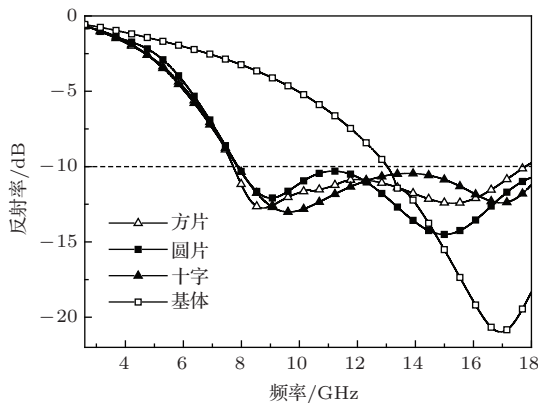


图4 数值模拟得到的超材料吸波体与基体的反射率

为了揭示超材料吸波体的工作机理, 建立了等效电路模型, 如图 5 所示. 在有金属背板的情况下, 磁性层和介质层等效为两段传输线, 电阻膜等效为具有电纳特性的电路, 超材料吸波体等效电路为二者电路的并联. 根据图 5 可以得到超材料吸波体

的等效输入导纳为

$$Y_{in} = Y_{fss} + Y_d \quad (3)$$

其中, 电阻膜的导纳 Y_{fss} 为

$$Y_{fss} = G_1 + jB_1, \quad (4)$$

基体导纳 Y_d 为

$$Y_d = G_2 + jB_2. \quad (5)$$

根据阻抗匹配原则可知, 当 $B_1 + B_2 = 0$ 时, 电路发生谐振, 吸波体在谐振频率附近会出现吸收峰.

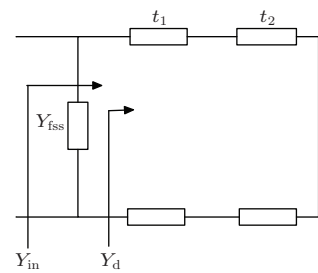


图5 超材料吸波体等效电路模型

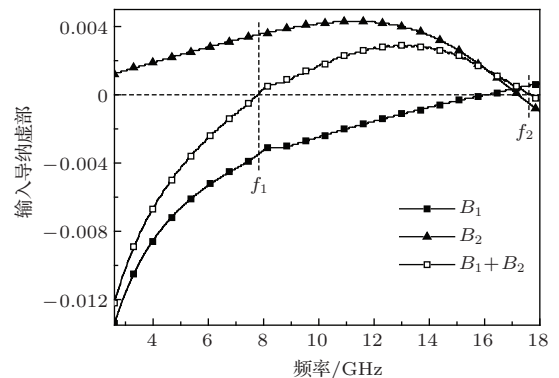


图6 超材料吸波体、电阻膜和基体导纳的虚部

以方片形超材料吸波体为例, 通过 S 参数反演得到了接地基体和电阻膜的等效导纳的虚部, 如图 6 所示. 在 7.8 GHz 和 17.6 GHz 处, 电阻膜导纳虚部与基体导纳虚部大小相等, 符号相反, 所以超材料吸波体在 7.8 GHz 和 17.6 GHz 处发生谐振. 由此可知, 在频率 8.7 GHz 和 15.3 GHz 处出现的吸收

峰是由吸波体发生谐振造成的,这与常见的基于介质层的超材料吸波体是类似的[8].需要指出的是,在高频段的等效电路谐振频率 17.6 GHz 和吸收峰 15.3 GHz 相差较大,这是因为等效电路模型只是一种近似分析方法,尚未考虑电阻膜与金属背板之间的耦合作用[23].

为了研究超材料吸波体内能量损耗情况,计算了电介质基板 F4B 在有损和无损情况下的反射率,结果如图 7 所示.由图 7 可清楚地看出,在 2.6—18 GHz 的微波频段上,超材料吸波体在 F4B 有损和无损情况下的反射率基本保持不变,这个结果说明吸波体的能量损耗与 F4B 的损耗无关.综上,由磁性材料的吸波性能(图 2 所示),超材料吸波体以及基体材料的吸波性能(图 4 所示)可知,超材料吸波体的能量损耗主要集中在磁性基体和电阻膜上.

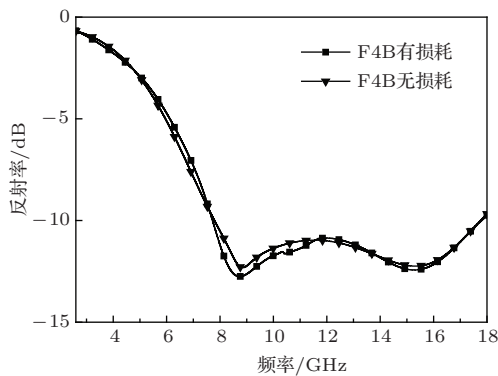


图 7 超材料吸波体在 F4B 有损和无损情况下的反射率

3 实验验证

根据表 1 中优化的结构参数和方阻值,制备了方片形超材料吸波体样品.在制备过程中,首先采用丝网印刷工艺将电阻膜印在 180 mm × 180 mm × 0.02 mm 的 PET 膜上,然后用粘结剂将印有电阻膜的 PET 膜、F4B 介质基板以及磁性介质基板粘在一起,最终制得的实物样品如图 8 所示.

采用自由空间法测量吸波体的反射率,测量系统由 Agilent E8363 矢量网络分析仪以及矩形喇叭天线等组成,测试结果如图 9 所示.可以看到,吸波体测试反射率小于 -10 dB 的带宽为 7.6—18 GHz,与优化设计结果稍有差异.这主要是由以下几方面的原因造成的,一是测试的误差,仿真时的样品是无限大平面,而测试的却是有限大平面,电磁波边缘绕射会对测试产生一定的影响;二是基体的实际电磁参数与仿真时电磁参数会有一定的误差;三

是电阻膜的尺寸及其阻值的不均匀性也会导致测量结果与仿真结果的差别.

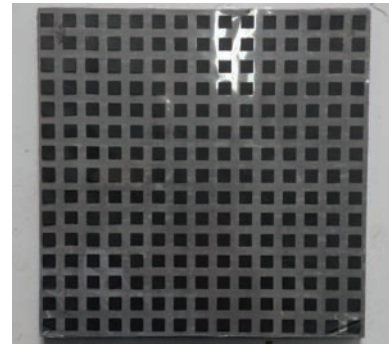


图 8 超材料吸波体的实物图

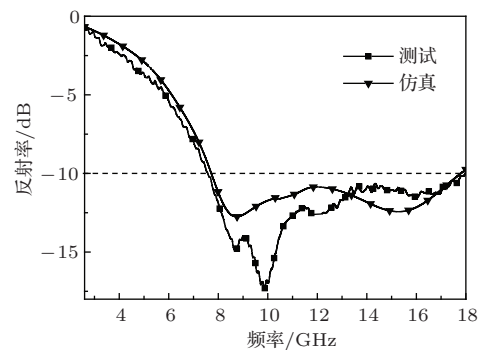


图 9 吸波体反射率的实验测试值与仿真值

4 结 论

本文设计了一种基于磁/电介质混合型基体的宽带超材料吸波体,数值仿真结果表明:吸波体在 7.8—18 GHz 频率范围内反射率小于 -10 dB,并出现两吸收峰,其能量损耗只集中在磁性材料和电阻膜上.运用等效电路模型分析表明,该吸波体的两吸收峰是由谐振引起的.制备了超材料吸波体并测试了反射率,测试结果表明:厚度为 2.5 mm 时,吸波体反射率在 -10 dB 以下的带宽可达到 7.6—18 GHz.该吸波体具有宽带、厚度薄、极化不敏感等优点,在军事上具有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [2] Pang Y Q, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 114902
- [3] Yang Y, Yang Y, Xiao W, Ding J 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 17A521

- [4] Wang GD, Liu MH, Hu XW, Kong LH, Cheng LL, Chen ZQ 2014 *Chin. Phys. B* **23** 017802
- [5] Tsuda Y, Yasuzumi T, Hashimoto O 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **10** 892
- [6] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, Zheng D H, Fan Y N, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134101 (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** 134101]
- [7] Pang Y Q, Cheng H Y, Zhou Y J, Li Z G, Wang J 2012 *Opt. Express* **20** 12515
- [8] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J 2012 *Opt. Express* **20** 4675
- [9] Li H, Dibakar R C, Suchitra R, Matthew T. R, Luo, S N, Antoinette J T, Chen H T 2012 *Opt. Letters* **37** 154
- [10] Singh P K, Korolev K A, Afsar M A, Sonkusale S 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 264101
- [11] Lu L, Qu S B, Xia S, Xu Z, Ma H, Wang J F, Yu F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 013701 (in Chinese) [鲁磊, 屈绍波, 夏颂, 徐卓, 马华, 王甲富, 余斐 2013 物理学报 **62** 013701]
- [12] Tuong P V, Park J W, Rhee J Y, Kim W, Jang W H, Cheong H, Lee Y P 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 081122
- [13] Bhattacharyya S, Srivastava K V 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 064508
- [14] Huang X J, Yang H L, Yu S Q, Wang J X, Li M H, Ye Q W 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 213516
- [15] Yang GH, LiuXX, Lv YL, Fu JH, Wu Q, Gu X M 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 17E523
- [16] Yoo M, Lim S 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 2652
- [17] Kazantsev Y N, Lopatin A V, Kazantseva N E, Shatrov A D, Mal' tsev V P, Vilcáková J, Sába P 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1227
- [18] Chen H Y, Zhang H B, Deng L H J 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **9** 899
- [19] Han M G, Tang W, Chen W B, Zhou H, Deng L J 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 09A958
- [20] Liu J R, Itoh M, Terada M, Horikawa T, Machida K I 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 093101
- [21] Zhang X F, Dong X F, Huang H, Liu H Y, Wang W N, Zhu X G, Lv B, Lei J P, Lee C G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 053115
- [22] Yang Y, Yang Y, Xiao W, Ding J 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 17A521
- [23] Kazemzadeh A, KarlssonA 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 3310

Design and fabrication of a broadband metamaterial absorber based on a dielectric and magnetic hybrid substrate*

Guo Fei¹⁾ Du Hong-Liang^{1)†} Qu Shao-Bo^{1)‡} Xia Song²⁾ Xu Zhuo²⁾
Zhao Jian-Feng¹⁾ Zhang Hong-Mei¹⁾

1) (College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Key Laboratory of Electronic Materials Research of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 28 September 2014; revised manuscript received 13 November 2014)

Abstract

In this paper, a broadband metamaterial absorber is designed based on a hybrid substrate consisting of the dielectric and magnetic materials. The absorber is composed of the resistance film, dielectric layer, magnetic layer, and metal backboard. Numerical simulation of the absorbing properties is performed by means of the finite-difference time-domain method, and the bandwidth of the reflectivity below -10 dB is optimized by the genetic algorithm. Simulated results indicate that a bandwidth of reflectivity below -10 dB can be achieved over the frequency range from 7.8 to 18 GHz when the thickness of the absorber is only 2.5 mm. The proposed metamaterial absorber has many advantages, such as thin thickness, broadband, and polarization insensitivity. The operation mechanism of the absorber has also been analyzed and discussed within the model of equivalent circuit. In the end, an absorber sample is fabricated based on the design. It is found that the experimental result is well consistent with the design requirements.

Keywords: hybrid substrate, broadband, metamaterial absorber, thin thickness

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

DOI: 10.7498/aps.64.077801

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61331005), the National Science Foundation for Post-doctoral Scientist of China (Grant No. 2013M532131), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2013JM6005).

† Corresponding author. E-mail: duhongliang@126.com

‡ Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn