

# 基于电阻型频率选择表面的低频宽带超材料吸波体的设计\*

程用志 王莹 聂彦 郑栋浩 龚荣洲 熊炫 王鲜†

(华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(2011年10月17日收到; 2011年11月21日收到修改稿)

基于电阻型频率选择表面 (Resistance Frequency Selective Surface, RFSS) 设计了一种低频宽带、极化不敏感和宽入射角特性的超材料吸波体. 该吸波体的基本单元由开槽十字型平面超材料 (Cave Cross Planar Metamaterial, CCPM)、RFSS、电介质基板和金属背板组成. 采用 FDTD 方法数值模拟得到的结果表明: 相比于单纯的 CCPM 吸波体、RFSS 吸波体, CCPM 和 RFSS 复合结构吸波体低频吸收特性得到极大改善, 在整个 1—5 GHz 频率范围内, 吸收率大于 80%, 吸收峰值达到 98% 以上. 数值模拟得到的不同极化角和不同入射角下的吸收率表明: 该复合结构吸波体具有极化不敏感和宽角度吸收特性.

**关键词:** 平面超材料, 电阻型频率选择表面, 超材料吸波体

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Ja, 78.20.Ci

## 1 引言

电磁超材料是人工设计的结构并呈现出自然材料所不具备的超常物理性质的复合材料<sup>[1]</sup>. 由于超材料具有亚波长结构特性, 其基本单元微结构尺寸远小于作用电磁波的波长 ( $1/10$ ), 可以将其视为有效媒质. 根据有效媒质理论, 人们通过微结构的设计可以实现等效电磁参数 ( $\epsilon_{\text{eff}}$  和  $\mu_{\text{eff}}$ ) 调控, 从而实现超材料与电磁波作用方式的调控. 基于这一思想可以实现负群速度、负折射率<sup>[2,3]</sup>、电磁波极化控制<sup>[4]</sup>、电磁隐身<sup>[5]</sup>以及完美吸收<sup>[6,7]</sup>等.

最近, 人们基于超材料的电磁耦合谐振特性提出了各种具有“完美吸收”特性的吸波体<sup>[6-13]</sup>. 起初, 人们设计的超材料吸波体大多是基于有效媒质理论<sup>[14]</sup>和理想阻抗匹配理论<sup>[8]</sup>, 其基本单元主要由电谐振器结构, 电介质层 (基板材料), 金属背衬等构成三层或多层耦合结构, 呈周期性排列, 具有厚度薄、吸收强、频带窄等特性<sup>[6-10]</sup>. 随后, 人们又提出加载集总元件或电阻膜的超材料吸波体, 可

以实现吸收频带的展宽、极化不敏感和宽入射角等特性<sup>[11-13]</sup>, 但是吸收频带的展宽是以牺牲整体的厚度为前提的, 同时加工复杂成本较高, 这对实际应用是不利的.

以往的基于 RFSS 的吸波体材料可以实现宽频带吸收<sup>[15]</sup>, 但厚度难以达到要求且很难使吸收频带降低到低频范围. 而超材料的频谱特性可以依据其结构参数而进行调节, 因此我们可以通过调节超材料的基本单元结构参数使其工作在我们需要的频率范围. 基于这一思想, 本文将 RFSS 与 CCPM 进行组合, 设计了一种低频宽带超材料吸波体, 并对其吸波机理和吸波特性进行了数值研究. 数值模拟结果表明: 该双层复合结构超材料吸波体在 1—5 GHz 低频范围内对入射电磁波具有极化不敏感和宽角度强吸收特性.

## 2 结构设计

复合材料的吸收率  $A(\omega)$  通常由反射率  $R(\omega)$  和透射率  $T(\omega)$  表示, 即  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ ,

\* 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20090142120003) 资助的课题.

† E-mail: Wangx@mail.hust.edu.cn

或  $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ , 则透射率 ( $T(\omega) = |S_{21}|^2$ ) 和反射率 ( $R(\omega) = |S_{11}|^2$ ) 分别表现为  $S$  参数的形式. 通常由于金属背板的存在,  $T(\omega) = 0$ , 因此吸收率仅由反射率  $R(\omega)$  决定, 以往设计的超材料吸波体依赖于金属结构的电、磁谐振, 因此只能在很窄的频率范围内实现理想的阻抗匹配 [13]. 为了实现低频强吸收的超材料吸波体, 在不显著增加整体厚度的情况下, 我们设计了 RFSS 与 CCPM 双层复合结构超材料吸波体.

双层超材料吸波体基本单元结构模型如图 1 所示. 最上面第一层为 CCPM(图 1(b)), 中间层为 RFSS(图 1(c)), 底层为金属背板, 中间基板材料为 FR4(loss), 其介电常数为  $\epsilon_r = 4.9(1 + i0.025)$ , RFSS 的方块电阻为  $R = 375 \Omega$ , CCPM 表面和背衬金属为厚  $30 \mu\text{m}$ , 电导率  $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$  的铜膜. 通过优化设计, 双层超材料吸波体基本单元结构几何参数为  $t_1 = 0.8 \text{ mm}$ ,  $t_2 = 1.2 \text{ mm}$ ,

$p = 20 \text{ mm}$ ,  $g = 1 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 17 \text{ mm}$ ,  $w_1 = 12 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 12 \text{ mm}$ ,  $w_2 = 7 \text{ mm}$ ,  $l = 19 \text{ mm}$ ,  $w = 5.5 \text{ mm}$ . 我们采用 FDTD 算法对图 1 基本单元结构模型进行数值模拟,  $x$ - $y$  平面方向设置周期性边界条件.

### 3 数值模拟分析

CCPM 与 RFSS 双层复合结构超材料吸波体的数值模拟结果如图 2(a) 所示. 从图 2(a) 中可以看出, 在 1—5 GHz 频率范围内, 超材料反射率小于 20%, 对应的吸收率大于 80%, 峰值吸收率达到 98%, 并且呈现明显的双频强吸收特性, 吸收率大于 80% 的相对吸收带宽为 136.6%. 我们通过  $S$  参数反演算法计算了相对波阻抗 [16,17], 从图 2(b) 中可以看出, 双层复合结构超材料在 1—5 GHz 宽频范围内与自由空间具有较好的阻抗匹配特性.

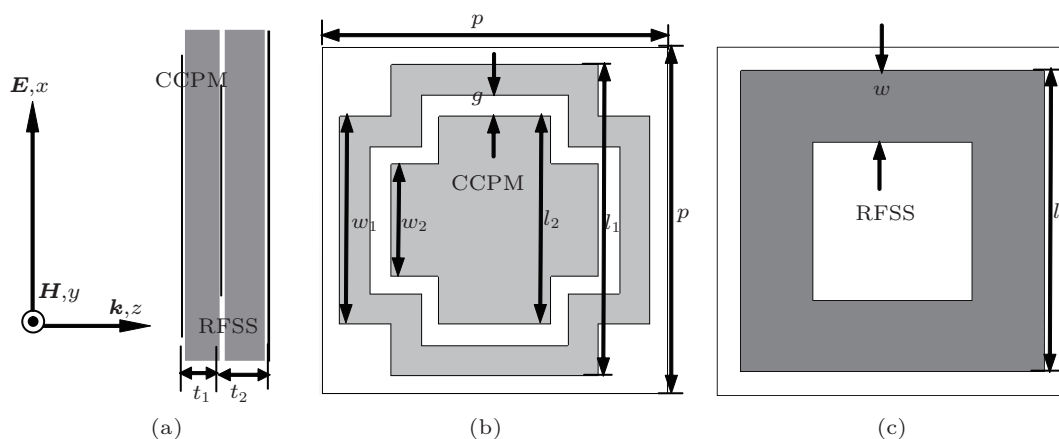


图 1 (a) CCPM 与 RFSS 构成的双层复合结构; (b) CCPM 层结构; (c) RFSS 层结构

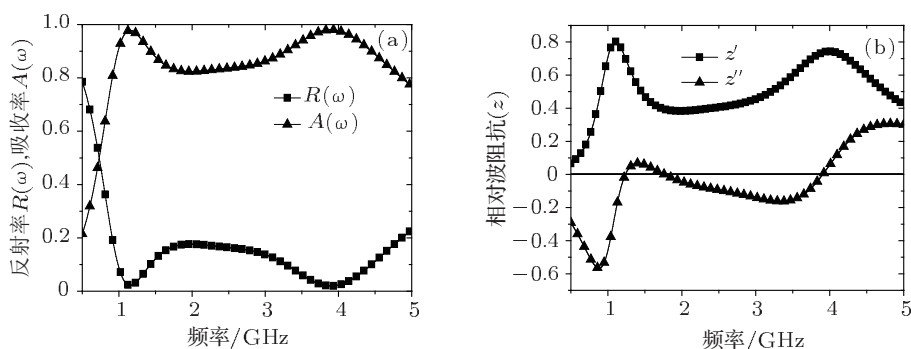


图 2 (a) 数值模拟得到的 CCPM 与 RFSS 双层复合结构超材料吸波体的反射率与吸收率; (b) 相对波阻抗

前期研究表明 [6,7], 传统单一结构模型超材料吸波体实现强吸收, 主要由于其基本单元耦合结构

对入射的电磁波产生强烈的局域电、磁谐振作用, 从而诱导产生表面金属膜的欧姆损耗和中间基板

材料的介质损耗, 因此具有很强的窄带吸收特性且不受  $1/4$  波长厚度的限制, 同时其吸收频率可以依据其结构几何参数而进行调节. 而基于 RFSS 的吸波体实现宽频吸收主要是由于电阻片的欧姆损耗

以及电阻片呈容性与金属底板组合从而对入射电磁波产生很强的磁损耗, 同时满足宽带内相应匹配条件 [15], 其厚度一般小于  $1/4$  波长, 但是很难实现低频强吸收.

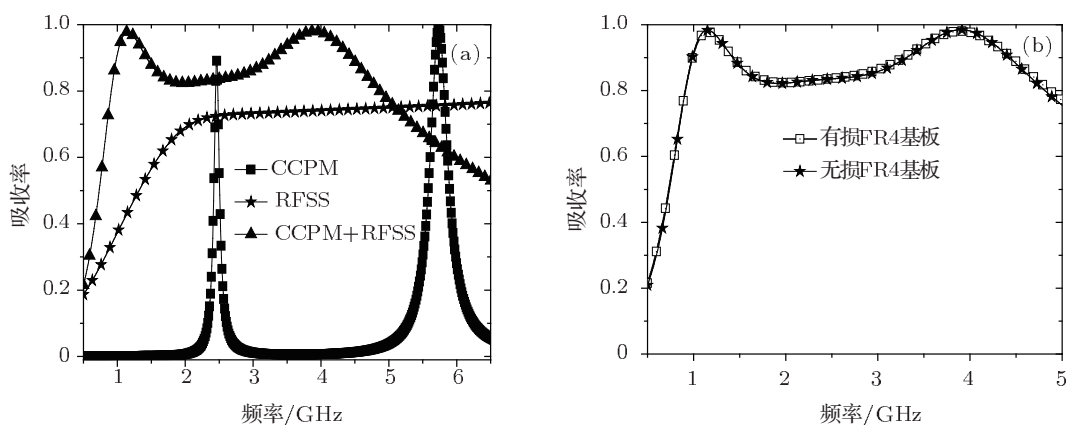


图3 (a) 数值模拟得到的 CCPM 吸波体、RFSS 吸波体、以及 CCPM 与 FRSS 双层复合结构吸波体的吸收率; (b) 双层复合结构吸波体在有损和无损 FR4 基板情况下的吸收率

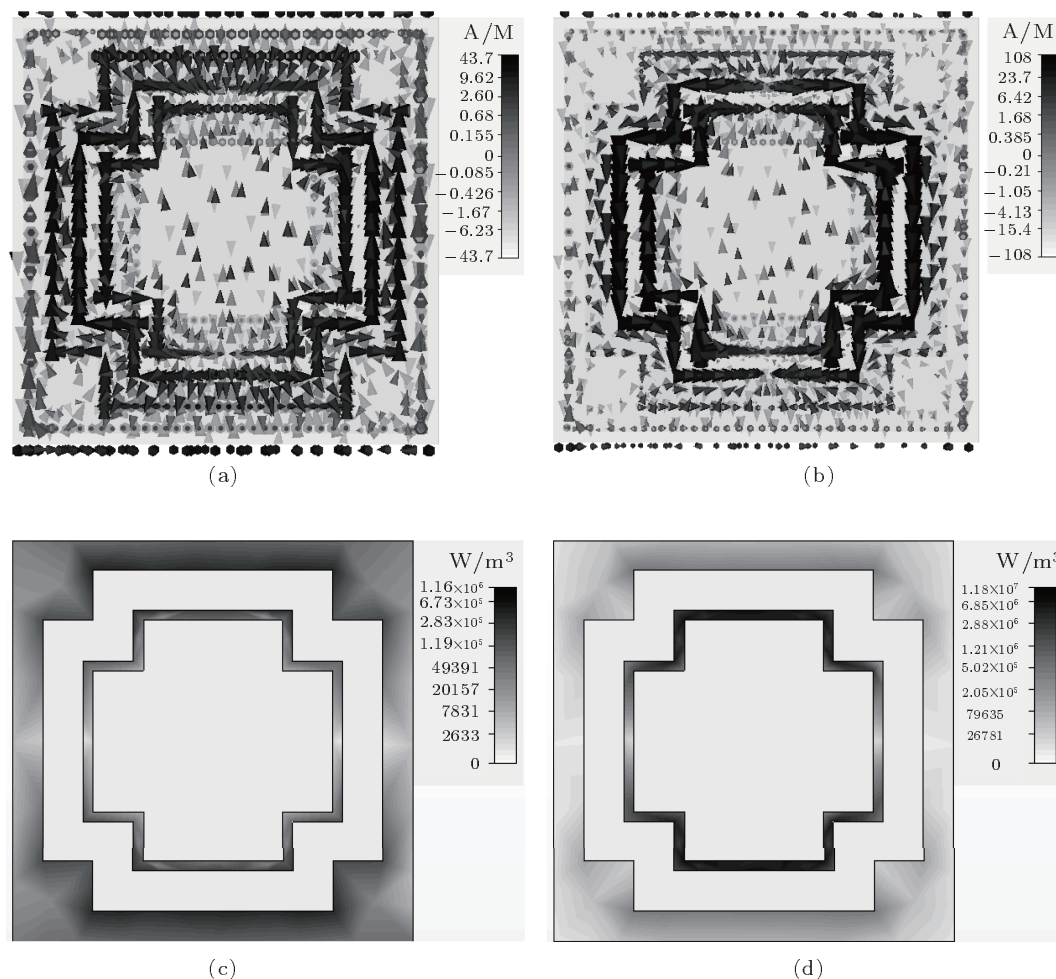


图4 (a) 和 (b) 分别为双层复合结构吸波体在谐振频率 1.1 GHz 和 3.9 GHz 处的表面电流分布; (c) 和 (d) 分别为双层复合结构吸波体在谐振频率 1.1 GHz 和 3.9 GHz 处的能量损耗分布

为了进一步证实上述分析,我们分别模拟计算了CCPM吸波体、RFSS吸波体,得到的吸收率结果如图3(a)所示.从图中可以看出,CCPM吸波体分别在2.4 GHz和5.7 GHz处产生很强的吸收特性,吸收率都达到90%以上,RFSS吸波体在2—6.5 GHz之间吸收率约为70%,并没有呈现强吸收特性,而CCPM与RFSS的复合结构在1—5 GHz范围内吸收率大于80%,且吸收峰值达到98%以上,整体厚度为2 mm,仅为中心波长的1/60.由此可知,CCPM与RFSS复合不仅降低了吸收频率展宽了吸收频带,而且吸收能力进一步增强.为了研究吸波体内的能量损耗情况,我们分别模拟计算了双层复合结构吸波体在基板有耗和无耗情况下的吸收率,结果如图3(b)所示.由图可以看出,在1—5 GHz之间,吸波体在基板有耗和无耗情况的吸收率基本保持不变,这说明其能量损耗主要集中在RFSS电阻片上,与基板的介质损耗无关.

为了进一步研究双层复合结构吸波体的能量损耗情况,我们分别模拟计算了其单元结构的表

面电流分布和能量损耗分布,结果如图4所示.从图4(a)和(b)中可以看出,在1.1 GHz低频谐振时,产生的表面电流主要集中在CCPM结构的外环边缘;在3.9 GHz高频谐振时,产生的表面电流主要集中在CCPM结构的内环边缘.从图4(c)和(d)中可以看出,在两个谐振频率点处,能量损耗主要集中在CCPM结构谐振电流最大的位置.

由以上数值模拟分析可知,CCPM与RFSS构成的双层复合结构超材料对低频宽带电磁波的强吸收主要基于两点:首先,电磁波入射到CCPM表面激发其理想导体结构产生表面感应电流,该电流产生的磁场与金属背板激发的反向电流所产生的磁场进行耦合产生强烈的谐振作用,同时满足自由空间的波阻抗匹配,从而极大地减小了电磁波的反射<sup>[7]</sup>;其次,RFSS层对入射波产生欧姆损耗<sup>[15]</sup>.

为进一步研究双层复合结构超材料吸波体的低频宽带强吸收特性,我们数值模拟了其在不同极化角和不同入射角下的吸收率,所得结果如图5所示.由图5(a)和(b)可以清晰地看出,对于TE波和

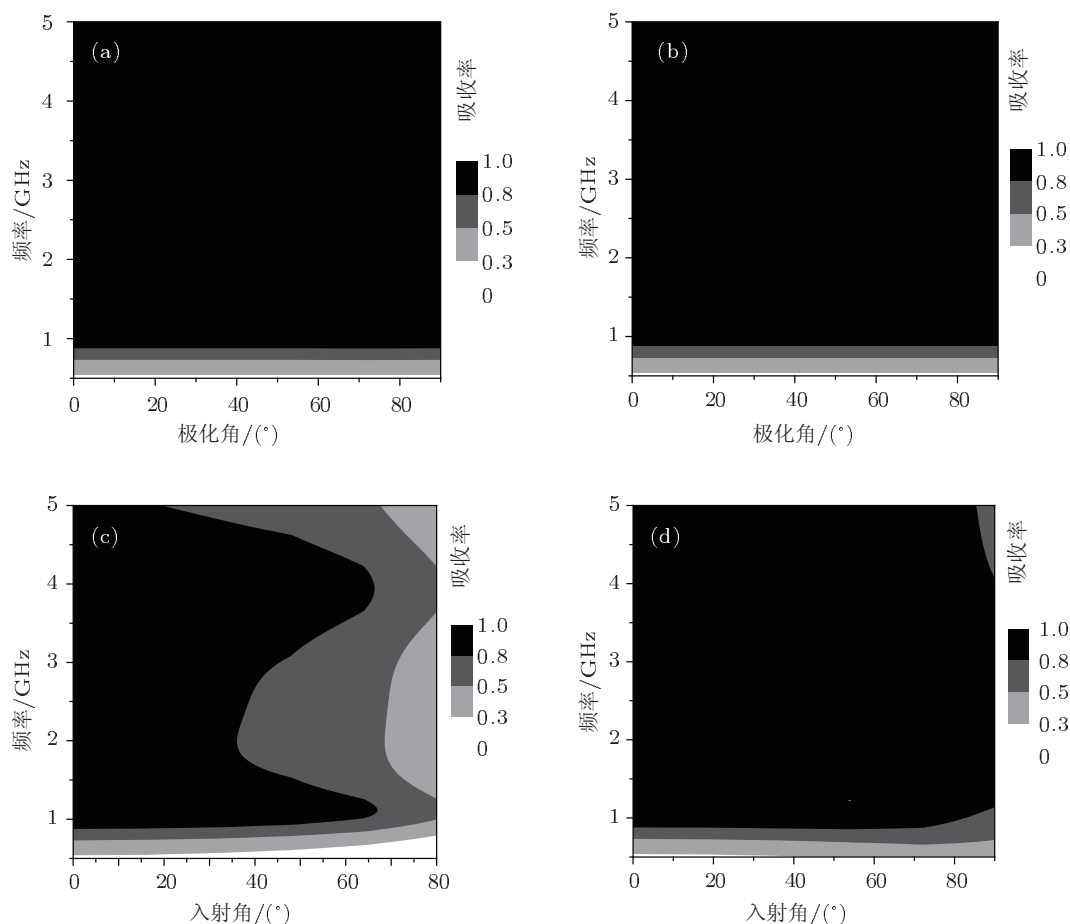


图5 双层复合结构超材料吸波体在不同极化角和不同入射角下的吸收率 (a)和(b)分别为不同极化角下的TE波和TM波;(c)和(d)分别为不同入射角下的TE波和TM波

TM 波, 极化角在  $0^\circ$ — $90^\circ$  变化时, 双层复合结构吸波体的吸收率保持不变. 由图 5(c) 和 (d) 可以看出, 对于 TE 波, 入射角小于  $35^\circ$  时吸波体在 0.5—5 GHz 之间的吸收率基本保持不变, 大于  $60^\circ$  时出现了两个谷值, 这主要是斜入射的磁场造成的; 对于 TM 波, 入射角在  $0^\circ$ — $80^\circ$  变化时吸波体在 0.5—5 GHz 之间的吸收率保持不变. 由此可以说明该吸波体具有极化不敏感和宽角度吸收特性.

## 4 结论

本文设计了一种低频宽带、极化不敏感和宽入射角特性的超材料吸波体双层复合结构模型. 数

值模拟得到的吸收率以及反演算法得到的相对波阻抗特性表明: 由 CCPM 与 RFSS 构成的双层超材料吸波体厚度仅为 2 mm, 在 1—5 GHz 频率范围吸收率大于 80%, 吸收峰值达到 98%, 其相对阻抗在该频带内与自由空间阻抗近似匹配. 数值模拟得到的复合结构表面电流和能量损耗分布表明: 该吸波体对电磁波的吸收主要是以 RFSS 的欧姆损耗起主导作用. 数值模拟得到的不同极化角和入射角下吸波体的吸收率表明: 该吸波体具有极化不敏感和宽角度吸收特性. 这种超材料吸波体的设计为实验室制备低频高性能吸波体提供了理论指导, 可通过传统的 PCB 技术和丝网印刷技术实现.

- 
- [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] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [3] Tang S W, Zhu W R, Zhao X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3320 (in Chinese) [汤世伟, 朱卫仁, 赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 3320]
- [4] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [5] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, Jiang T, Kong J A, Chan C T, Zhou L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908
- [6] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [7] Cheng Y Z, Xiao T, Yang H L, Xiao B X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 0536 (in Chinese) [程用志, 肖婷, 杨河林, 肖柏勋 2010 物理学报 **59** 0536]
- [8] Avitzour Y, Yaroslav A, Urzhumov, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 045131
- [9] Zhu B, Feng Y J, Zhao J M, Huang C, Jiang T 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 051906
- [10] Hu C G, Li X, Feng Q, Chen X N, Luo X G 2010 *Opt. Express.* **18** 6598
- [11] Gu S, Barrett J P, Hand T H, Popa B I, Cummer S A 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 064913
- [12] 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
- [13] 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]
- [14] Smith D R, Pendry J B 2006 *Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [15] Liu H T, Cheng H F, Chu Z Y, Zhang D Y 2007 *Materials & Design* **28** 2166
- [16] Chen X D, Tomasz M, Grzegorzcyk, Wu Bae-Ian 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [17] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617

# Design of a low-frequency broadband metamaterial absorber based on resistance frequency selective surface\*

Cheng Yong-Zhi Wang Ying Nie Yan Zheng Dong-Hao  
Gong Rong-Zhou Xiong Xuan Wang Xian<sup>†</sup>

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

(Received 17 October 2011; revised manuscript received 21 November 2011)

## Abstract

A low-frequency broadband, polarization-insensitive and wide-angle metamaterial absorber is presented, which is based on resistance frequency selective surface (RFSS). The unit cell of this absorber consists of cave cross planar metamaterial (CCPM), RFSS, dielectric substrate and metal backboard. The simulated results based on FDTD method indicate that with the absorptions of compared to the individual CCPM absorber and RFSS absorber, the absorption of the composite structure absorber of CCPM and RFSS is enhanced greatly, and it is greater than 80% and the absorption peak is over 98% in the whole frequency range of 1—5 GHz. The simulated absorptions under the conditions of different polarization and incident angles indicate that this composite structure absorber has polarization-insensitive and wide-angle absorption.

**Keywords:** planar metamaterial, resistance frequency selective surface, metamaterial absorber

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Ja, 78.20.Ci

---

\* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20090142120003).

<sup>†</sup> E-mail: Wangx@mail.hust.edu.cn