

# 基于树枝结构单元的超材料宽带微波吸收器<sup>\*</sup>

保 石 罗春荣 张燕萍 赵晓鹏<sup>†</sup>

(西北工业大学应用物理系, 西安 710129)

(2009 年 5 月 11 日收到; 2009 年 7 月 27 日收到修改稿)

本文设计并制作了一种基于树枝结构单元的超材料宽带微波吸收器. 该超材料吸收器采用夹层结构, 由按六边形密集排布的金属树枝阵列、双层介质基板和金属薄膜组成. 通过调节树枝单元的几何参数和金属树枝阵列的排布方式, 可以出现三个吸收峰, 实现三频工作. 通过调节三个吸收峰工作的频率形成宽频吸收, 采用夹层结构提高吸收效率, 从而对垂直入射到超材料表面的微波实现高吸收. 实验表明吸收器的反射曲线从 9.79 GHz 到 11.72 GHz 出现了反射率小于 10% 的较宽吸收带, 透射曲线恒等于 0, 吸收率大于 90% 的带宽为 1.93 GHz. 这种超材料吸收器具有吸收效率高、结构简单、体积小, 二维各向同性及吸收带宽较宽等优点.

**关键词:** 树枝状结构, 夹层结构, 吸收效率, 吸收带宽

**PACC:** 4110H, 4270Y

## 1. 引 言

超材料 (metamaterial) 是一种新型人工结构材料, 可以实现诸如负折射和完美透镜等一系列奇异的电磁特性<sup>[1]</sup>. 根据有效媒质理论<sup>[2]</sup>, 超材料的电磁特性可以用有效介电常数和有效磁导率来表示. 通过设计超材料的单元结构, 使其对电场和磁场产生相应的谐振, 从而可以方便地调控其有效介电常数和有效磁导率. 利用这个思想, 2001 年 Smith 等人在微波段第一次制备了介电常数和磁导率同时为负的左手材料 (left-handed metamaterials)<sup>[3]</sup>, 2006 年 Pendry 等人设计并制备了电磁隐身斗篷 (cloak)<sup>[4]</sup>. 之前的研究一般都试图尽量减小超材料的损耗, 更好地体现其负磁导率或负折射率的特性. 但是, 超材料中的损耗也具有很多潜在的应用. 2008 年 Landy 等人研制出一种高效超材料完美吸收器 (perfect metamaterial absorber, PMA), 对于入射到其表面的电磁波可以确保既不反射也不透射, 达到电磁波完全吸收的科学标准<sup>[5]</sup>. 这种 PMA 可以作为高效的电磁加热装置, 也可以应用于电磁波的收集和探测装置, 如辐射热测量仪. 由于 Landy 设计的 PMA 结构单元是各向异性的, 因此只能适用于特定方向入射和偏振的电磁波, 其吸收带宽很窄, 大

大限制了它的实际应用.

我们组设计了开口六边形双环结构单元左手超材料<sup>[6-9]</sup>, 提出了各向同性树枝型结构单元模型<sup>[10,11]</sup>, 制备出同时实现负介电常数和负磁导率的微波左手材料<sup>[12-14]</sup>. 基于树枝型模型, 我们组新近发展了由下向上的化学制备方法, 获得红外<sup>[15]</sup>和光学频段<sup>[16]</sup>左手超材料. 针对各向异性单元和窄吸收带的不足, 本文提出了一种基于树枝结构的超材料宽带微波吸收器. 利用树枝结构单元各向同性特点, 设计六边形密集排布<sup>[17]</sup>金属树枝阵列, 并采用夹层结构, 可以很好地消除电磁耦合的影响, 实现二维各向同性; 在没有降低吸收率的前提下, 大大增加吸收带宽. 相对于需要四分之一波长厚度的传统电磁带隙吸收器<sup>[18]</sup>, 这种超材料吸收器具有结构简单、体积小等优点, 这种设计可以应用到光学频段超材料吸收器.

## 2. 样品制备及实验

本文从实验和模拟两方面来研究树枝结构的超材料宽带微波吸收器的吸收特性. 采用电路板刻蚀技术, 分别在两层厚度均为 0.8 mm 的环氧酚醛玻璃纤维 PCB 基板的顶层和中间层上刻蚀出六边形密集排布的金属树枝阵列, 并且在底层镀一层金

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 50632030, 50872113), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2004CB719805) 和国防基础科研项目资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

属薄膜,采用电路板轧合技术,将两层板紧密轧合起来,结构单元如图 1(a)所示. 金属树枝的三级分支长度分别为  $a, b, c$ , 线宽  $w = 0.3 \text{ mm}$ , 夹角  $\theta = 45^\circ$ , 六边形边长为  $r$ , 如图 1 所示. 金属树枝和金属薄膜的表面做了镀锡处理以减缓氧化, 处理后的金属覆层厚度均约为  $0.03 \text{ mm}$ , 改变金属树枝的三级分支长度  $a, b, c$  以及六边形边长  $r$ , 得到工作于 X 波段的宽带超材料吸收器.

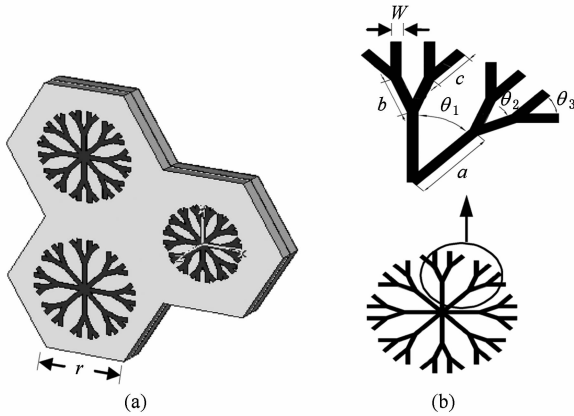


图 1 (a) 样品结构单元图; (b) 金属树枝结构单元图

通过基于时域有限差分法的德国商用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 反复优化确定结构参数. 仿真得到 S 曲线图. 其中  $S_{11}$  和  $S_{21}$  分别是反射和透射曲线. 测量过程中样品的 S 曲线是采用 AV3618 微波一体化矢量网络分析仪测得的.

定义反射率<sup>[5]</sup>  $R = |S_{11}|^2$ , 透射率<sup>[5]</sup>  $T = |S_{21}|^2$ .

由于该超材料宽频微波吸收器的底层为一层金属薄膜, 故  $S_{21}$  曲线恒为零. 因此吸收率可表示为  $A = 1 - R - T = 1 - R = 1 - |S_{11}|^2$ .

### 3. 结果与讨论

采用电路板刻蚀技术, 分别在两层厚度均为  $0.8 \text{ mm}$  的环氧酚醛玻璃纤维 FR-4 基板的顶层和中间层上刻蚀出六边形密集排布的金属树枝阵列单元, 并且在底层镀一层金属薄膜. 实验设计了三种树枝状结构单元, 三级分支长度分别为  $a_1 = 1.4 \text{ mm}, b_1 = 0.9 \text{ mm}, c_1 = 0.7 \text{ mm}$ ;  $a_2 = 1.2 \text{ mm}, b_2 = 0.9 \text{ mm}, c_2 = 0.6 \text{ mm}$ ;  $a_3 = 1.1 \text{ mm}, b_3 = 0.8 \text{ mm}, c_3 = 0.8 \text{ mm}$ , 线宽  $w = 0.3 \text{ mm}$ , 树枝以及金属薄膜的厚度均为  $0.02 \text{ mm}$ , 单元之间采用六边形排布, 边长为  $r = 4 \text{ mm}$ . 将刻蚀后的 FR-4 板切成大小为  $156$

$\text{mm} \times 146 \text{ mm}$  的矩形, 完成所设计样品 1 的制作. 电磁波垂直于树枝平面入射的情况下, 金属树枝在平行电场作用下会产生电谐振, 其谐振频率为  $9.79 \text{ GHz}$ , 而金属树枝与底层铜膜会产生反平行电流, 如图 2 所示, 图中表面电流方向为箭头方向, 类似于双鱼网结构<sup>[19,20]</sup>, 形成磁谐振. 由于树枝结构单元的二维各向同性, 所以当阻抗匹配时<sup>[21]</sup>, 对垂直入射到超材料表面的各偏振态微波的反射波为零, 并且超材料在谐振频率附近都具有较大的金属欧姆损耗以及介电损耗, 达到电磁波完全吸收. 因金属树枝阵列的结构单元是由三种不同尺寸的树枝组成, 大小差异, 其谐振频率各不相同, 用 CST 软件计算了结构单元谐振时的表面电流分布如图 3 所示, 不同尺寸树枝谐振时吸收峰所对应谐振表面电流分布不同. 图 3(a) 所示的谐振频率为  $9.79 \text{ GHz}$ , 其吸收峰由最大尺寸的树枝谐振产生, 其他两种结构不形成谐振; 图 3(b), (c) 所示的谐振频率分别为  $10.69 \text{ GHz}, 11.68 \text{ GHz}$ . 可以看出, 树枝单元尺寸越小, 谐振频率越高, 故吸收峰向高频移动, 出现三个吸收峰. 图 4 为样品 1 的吸收效果图, (a) 为模拟图, (b) 为实际测量图. 从图中可以看出在  $9.79 \text{ GHz}, 10.69 \text{ GHz}, 11.68 \text{ GHz}$  附近, 出现了吸收率分别为  $95.0\%, 87.0\%, 91.6\%$  的吸收峰. 从试验结果中可以看出因采用夹层结构很好地增强了超材料吸收器的谐振强度, 提高吸收率<sup>[16]</sup>.

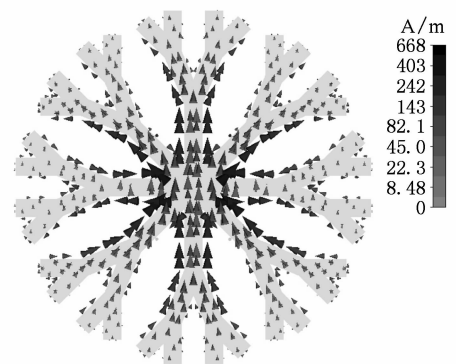


图 2 金属树枝在电磁波作用下的表面电流图

调节三级分支长度分别为  $a_1 = 1.2 \text{ mm}, b_1 = 0.7 \text{ mm}, c_1 = 0.5 \text{ mm}$ ;  $a_2 = 1.1 \text{ mm}, b_2 = 0.7 \text{ mm}, c_2 = 0.5 \text{ mm}$ ;  $a_3 = 1.1 \text{ mm}, b_3 = 0.7 \text{ mm}, c_3 = 0.6 \text{ mm}$ , 线宽  $w = 0.3 \text{ mm}$ ; 树枝以及金属薄膜的厚度均为  $0.02 \text{ mm}$ , 单元之间采用六边形排布, 边长为  $r = 4.0 \text{ mm}$ . 将刻蚀后的 FR-4 板切成大小为  $156 \text{ mm} \times 146$

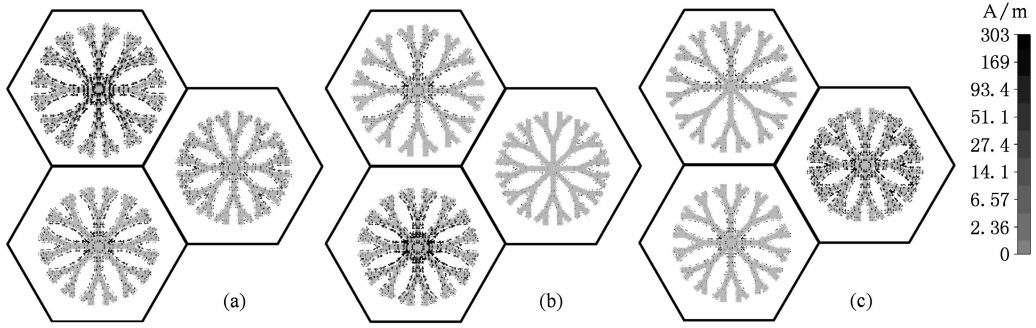


图3 结构单元谐振时的表面电流分布图

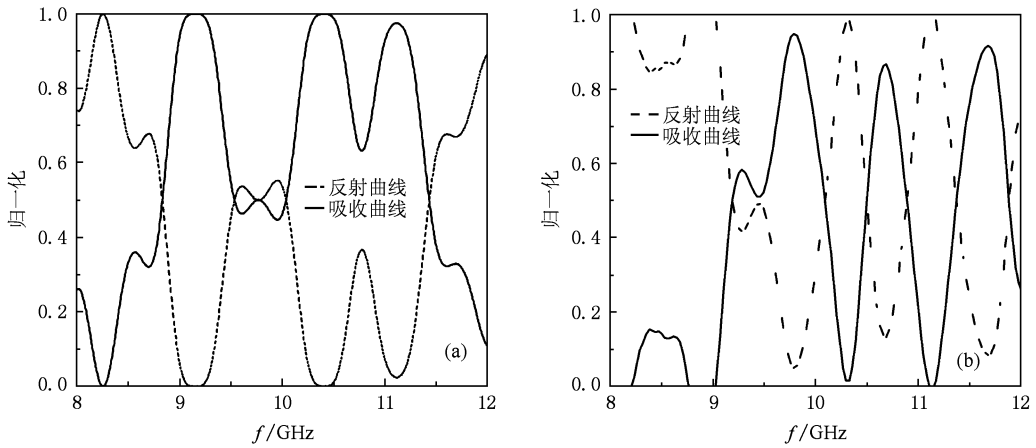


图4 超材料吸收器样品1的吸收效果图 (a)样品1的数值模拟结果;(b)样品1的实际测量图

mm 的矩形,完成所设计样品2的制作.超材料吸收器2的吸收效果如图5所示,(a)为数字模拟图,(b)为实际测量图.从图中可以看出,通过调节不同尺寸树枝的谐振频率,实现了从10.48 GHz到11.29 GHz,吸收率大于90%的带宽为810 MHz的宽频吸收.并从10.85 GHz到11.07 GHz的吸收率达到了99%,实现了完美吸收.

在样品2的基础上将边长调节为 $r = 4.6$  mm.将刻蚀后的FR-4板切成大小为180 mm × 178 mm的矩形,完成样品3的制作.超材料吸收器3的吸收效果如图6所示.图6(a)为模拟图,(b)为实际测量图.从图中可以看出,反射曲线从9.79 GHz到11.72 GHz附近,出现了反射率小于10%较宽吸收带,透射曲线恒等于0.则吸收率大于90%的带宽为

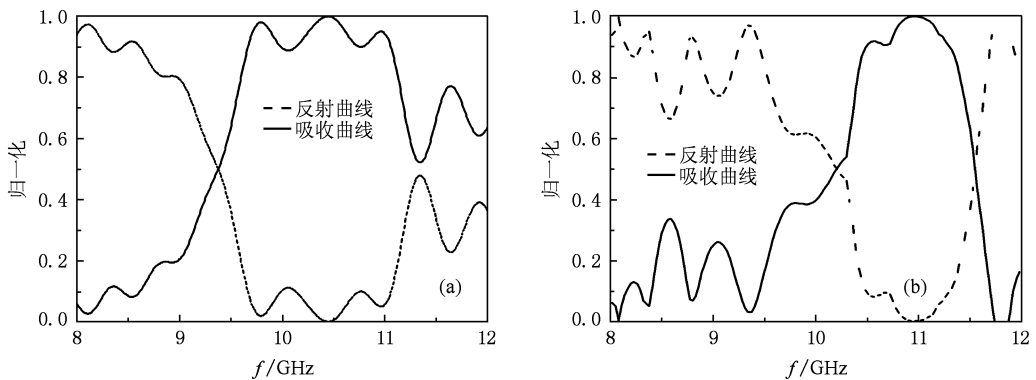


图5 超材料吸收器样品2的吸收效果图 (a)样品2的数值模拟结果;(b)样品2的实际测量图

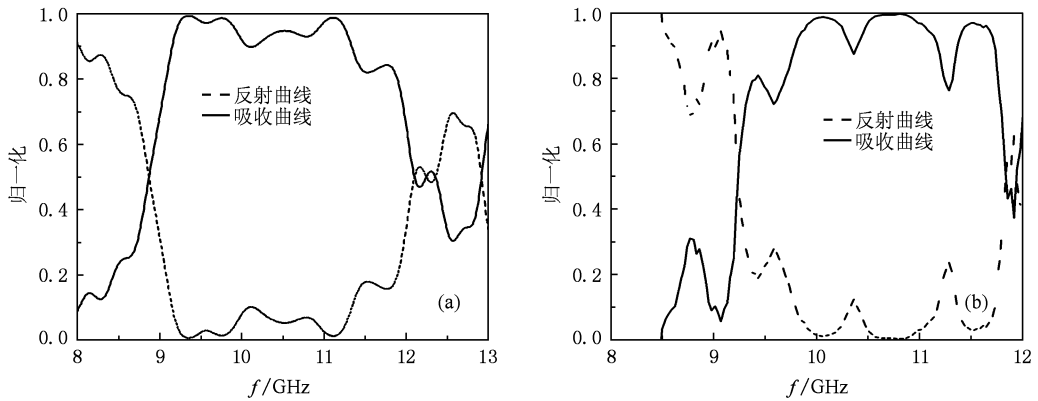


图6 超材料吸收器样品3的吸收效果图 (a)样品3的数值模拟结果;(b)样品3的实际测量图

1.93 GHz. 从实验测量结果与模拟结果的对比可以看到,实际测量的结果与理论分析的结果吻合较好,但由于FR-4基板的介电常数分布不均匀以及上下双层树枝间微小位错的存在,测量结果与模拟的结果存在着微小误差,通过调节三个吸收峰,从而达到宽频吸收的目的.

#### 4. 结 论

本文通过计算机仿真和实验,研究了树枝结构

超材料宽频微波吸收器的吸收特性. 采用树枝结构单元模型,设计金属树枝六边形密集排布阵列,实现了二维各向同性、三频段吸收. 采用夹层结构通过调节三个吸收峰的工作频率,形成宽频吸收,谐振强度增强,吸收率提高. 实验表明吸收器的反射曲线从9.79 GHz到11.72 GHz,出现了反射率小于10%较宽吸收带,透射曲线恒等于0,吸收率大于90%的带宽为1.93 GHz. 这种超材料吸收器具有各向同性、吸收带宽、吸收效率高等优点,为设计和制作光学频段超材料吸收器提供了新的途径.

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [2] Smith D R, Pendry J B 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [3] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [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] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [6] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H, Luo C R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵 乾、赵晓鹏、康 雷、张富利、刘亚红、罗春荣 2004 物理学报 **53** 2206]
- [7] Zhang F L, Zhao Q, Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [8] Zhao X P, Zhao Q, Kang L, Song J, Fu Q H 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [9] Luo C R, Kang L, Zhao Q, Fu Q H, Song J, Zhao X P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣、康 雷、赵 乾、付全红、宋 娟、赵晓鹏 2005 物理学报 **54** 1607]
- [10] Zhou X, Fu Q H, Zhao J, Yang Y, Zhao X P 2006 *Opt. Express.* **14** 7188
- [11] Zhu W R, Zhao X P, Guo J Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241116
- [12] Zhou X, Zhao X P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181908
- [13] Guo J Q, Luo C R, Zhao X P 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 044102
- [14] Luo C R, Wang S H, Guo J Q, Huang Y, Zhao X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3124 (in Chinese) [罗春荣、王连胜、郭继权、黄 勇、赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 3124]
- [15] Liu H, Zhao X P, Yang Y, Li Q W, Lv J 2008 *Adv. Mater.* **20** 2050
- [16] Liu B Q, Zhao X P, Zhu W R, Luo W, Cheng X C 2008 *Adv. Funct. Mater.* **18** 3523
- [17] Christopher M B, Tao H, Liu X L, Richard D A, Zhang X, Padilla W J 2008 *Opt. Express.* **16** 18565
- [18] Munk B A, Pryor J B, Gan Y B 2004 *Electromagnetic Materials Proc. of the Symposium F* 2003 (Singapore: World Scientific Publishing Company) p977
- [19] Zhou J, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [20] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T, Soukoulis C M, Economou E N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
- [21] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104

# Broadband metamaterial absorber based on dendritic structure<sup>\*</sup>

Bao Shi Luo Chun-Rong Zhang Yan-Ping Zhao Xiao-Peng<sup>†</sup>

(*Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China*)

(Received 11 May 2009; revised manuscript received 27 July 2009)

## Abstract

We present a metamaterial absorber (MA) composed of double layers of metal dendritic cells, dielectric substrate and metal film. With three different sizes of dendritic cells arranging in hexagonal array, it is able to find three discrete absorption peaks. Our experiments confirm that, if the frequencies of the three absorption peaks go closer, a combined broadband absorption peak could be achieved. Compared with the metamaterial absorber with only one singer layer of metal dendritic cells, the double-layered metal dendritic cells adopted in our MA greatly improve the absorption efficiency. The experimental result shows an absorption band of 1.93 GHz width with the absorptivity higher than 90% in the frequency range between 9.79 and 11.72 GHz. The proposed MA has a series of advantages such as high absorptivity, simple structure, small thickness, 2D isotropy and wide absorption band.

**Keywords:** dendritic structure, interbed framework, absorption efficiency, absorption bandwidth

**PACC:** 4110H, 4270Y

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50632030, 50872113), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB719805) and the Defense Basic Research Program of China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn