

基于阻抗匹配条件的树枝状超材料吸收器^{*}

张燕萍 赵晓鹏[†] 保 石 罗春荣

(西北工业大学应用物理系, 西安 710129)

(2009 年 9 月 30 日收到; 2009 年 12 月 25 日收到修改稿)

基于树枝状金属结构单元的电磁谐振特性, 设计了一种双面大小树枝状结构的超材料吸收器, 该结构分别是正面二级树枝及正对的背面三级树枝. 通过仿真模拟设计了不同的阻抗匹配方式, 调节相应的结构参数, 找到了阻抗匹配对吸收特性的影响. 在最佳的阻抗匹配条件下, 得到最大吸收率. 实验测量表明, 阻抗匹配条件下双面大小树枝模型可以实现 90.01% 吸收率. 增加样品层数可以有效的增加吸收率, 3 层样品就可以达到 99% 以上的吸收率, 实现工程意义的完美吸收.

关键词: 树枝状结构, 阻抗匹配, 吸收

PACC: 4110H, 4270Y

1. 引 言

超材料 (Metamaterial) 是一种新型人工结构材料, 具有诸如负折射、完美透镜等许多奇异的电磁特性, 引起了人们极大的研究兴趣^[1-3]. 超材料的基础是有效媒质理论^[4], 即可以用有效介电常数和磁导率来表征超材料的特性, 而有效介电常数和磁导率却可以由结构参数调控. 由于谐振的特性, 超材料在特定频率的电磁场作用下会产生强烈的局域共振, 并感应出很强的表面电流, 在局部范围电场强度急剧增大. 因此, 超材料在谐振频率附近都具有较大的介电损耗以及金属欧姆损耗. 先前的研究一般都试图尽量减小超材料的损耗, 更好地体现其负折射率或负磁导率特性. 提出的超材料结构有六边形开口谐振环^[5-8], 短杆对^[9], 各向同性的树枝单元^[10-11] 以及双渔网结构^[12] 等. 2006 年, Schurig 等人^[13] 利用超材料的设计思想, 制备了微波段电磁隐身斗篷. 然而, 介电常数和磁导率的虚部, 也就是表示损耗的部分, 实际上也有许多潜在的应用. 2008 年, Landy 等人^[14] 提出了一种完美超材料吸收器的概念, 通过合理的设计和选择参数, 这种电磁谐振器, 能够对入射电磁波的电磁分量分别产生耦合, 从而, 在一个给定的频带内, 对入射到超材料表面

的电磁波既不产生反射也不产生透射, 实现完美吸收.

超材料吸收器有许多潜在的应用, 比如成像设备和测辐射仪. 然而, Landy 等人所提出的结构具有各向异性, 它只能对特定方向的入射和极化产生完美吸收. 另外, 根据吸收的基本原理, 要想实现接近 100% 的完美吸收, 必须实现阻抗匹配. 结合我们课题组所提出的具有各向同性结构的树枝状超材料及其符合化学上自然生长的制备方法^[15], 提出了一种双面大小树枝状结构的超材料完美吸收器. 该结构由两个前两级分别正对的正反面树枝和 FR-4 介质板组成. 其中, 正面是一个二级金属树枝单元, 背面是一个三级金属树枝单元. 通过数值模拟和实验测量发现, 该结构具有各向同性特征, 能够实现很好的阻抗匹配和接近 100% 的完美吸收. 该超材料吸收器符合化学自然生长模型, 可以应用于红外乃至可见光波段超材料吸收器的制备.

2. 设计原理

传统左手材料, 其正反面结构都是一样的, 典型的如双渔网结构, 它的电磁结构是对称的, 这样它的电磁谐振不能分别自如的调节, 若改变其中一个结构参数, 它的电磁谐振都会变化, 耦合比较

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 50632030, 50872113, 50936002) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

厉害. Landy 等人提出的吸收理论也正是基于此, 即改变结构的对称性, 使得电场和磁场分别在不同的频率点产生谐振. 进而, 电谐振和磁谐振可以分别调节, 最终在某个频率点, 使介电常数和磁导率相等, 此时反射

$$r = -\frac{1}{2}\left(z - \frac{1}{z}\right)\sin(nkl) [te^{ikl}] \quad (1)$$

为 0, 也就是该结构的阻抗和空气阻抗相等. 这样, 根据吸收与透射和反射的关系, 只需要降低透射

$$t = \left[\cos(nkl) - \frac{i}{2}\left(z + \frac{1}{z}\right)\sin(nkl) \right]^{-1} \quad (2)$$

就可以实现完美吸收. 根据影响透射的相关因素

$$T = t^2 = e^{-2n_2kl}, \quad (3)$$

可以采用多层结构减小透射, 最终实现完美吸收, 即透射和反射均为 0, 达到 100% 的完美吸收.

上述三式中, l 是介质板的厚度, r 和 t 分别是反射和透射系数, n_1 是复折射率的实部, n_2 是复折射率的虚部, z 是复阻抗. 可以看出, 达到阻抗匹配时, 反射为零, 由 (3) 式可知, 增大 n_2 或 l , 可以降低透射率.

对于单个金属铜树枝状谐振器, 可以看作是 8 个环形排布的六边形开口谐振环阵列. 对于垂直入射的电磁波, 对称结构的金属铜树枝状谐振器能够完全抵消电磁耦合效应, 并且在入射电场方向提供电耦合. 磁耦合是由在入射磁场方向, 正反面树枝间的环形电流产生的. 若在正反面刻蚀两个相同大小的金属铜树枝, 这种结构的电磁谐振是分离的, 不可能实现匹配, 所以, 要想实现阻抗匹配, 必需设计两个不同大小的树枝结构. 本文设计了一种模型, 具体结构是在介电常数为 4.65 的 FR-4 介质板的正反面分别刻蚀大小树枝状基本结构单元, 其中, 正面是一个二级树枝, 背面是一个三级树枝. 为了使所设计结构的介电常数和磁导率相等, 设计过程中根据金属铜树枝各级参数对介电常数和磁导率的影响程度进行调节: 磁谐振主要由树枝的前两级参数决定, 电谐振主要由第三级参数决定. 实现过程中, 先令两个树枝的第一级和第二级参数分别相等, 即前两级严格正对, 这样可以在特定频率出现比较强的磁谐振; 然后再改变树枝的第三级参数, 使其在相应的频率出现电谐振, 这样电磁谐振就可以在特定的频带内重叠. 从理论上讲, 通过合理的调节该结构的几何参数, 其介电常数和磁导率就可以分别独立的调节, 从而就有可能实现完美阻抗匹配, 使得反射为零. 进而, 只需要进一步降低透

射, 就有可能实现接近 100% 的完美吸收.

3. 仿真与实验

本文从仿真模拟和微波实验两方面来描述双面大小树枝状超材料微波吸收器的匹配和吸收特性. 采用基于有限积分法的德国商用电磁仿真软件 CST Microwave Studio, 模拟过程中设置周期性边界条件, 反复优化确定结构参数.

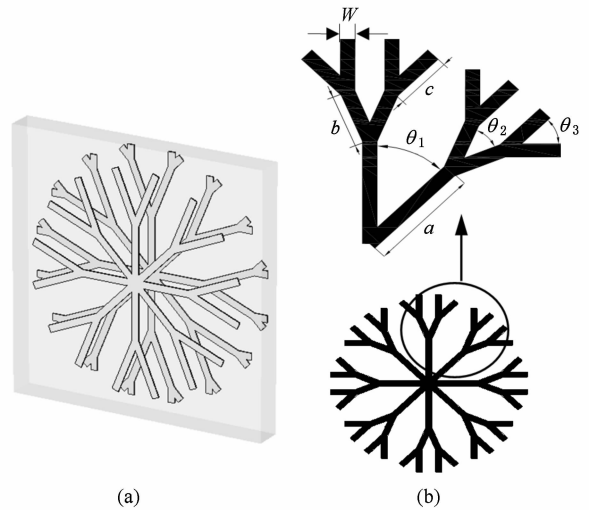


图 1 设计样品示意图 (a) 基本结构单元; (b) 树枝单元结构

利用 AutoCad 和 Protel 等软件设计实验样品, 采用电路板刻蚀技术, 在介电常数为 4.65, 损耗角正切为 0.025, 厚度 0.8 mm 的 FR-4 介质板正反面刻蚀金属铜树枝结构阵列. 本文所设计模型的基本单元结构如图 1(a) 所示, 金属铜树枝的单元结构如图 1(b) 所示, 三级长度分别为 a, b, c , 线宽为 w , 树枝各分支间的夹角分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 线宽 w 取 0.3 mm, 树枝各分支及各级间的夹角取 45° . 为防止氧化, 金属铜树枝的表面均采用浸银处理, 处理后其表面厚度均约为 0.03 mm.

4. 结果与讨论

用如上所述 CST 仿真软件, 经反复优化确定结构参数, 得到一组较好的数据: 正面树枝 $a_1 = 1.6$ mm, $b_1 = 1.6$ mm, $w_1 = 0.3$ mm; 背面树枝 $a_2 = 1.6$ mm, $b_2 = 1.6$ mm, $c_2 = 0.3$ mm, $w_2 = 0.3$ mm; 晶格周期 $d = 7.5$ mm. 通过仿真得到 S 参量图, 其中 S_{11} 和 S_{21} 分别是反射和透射曲线. 实验过程中样品 S 曲线

采用AV3618微波一体化矢量网络分析仪测得. 为了说明问题方便,我们定义如下几个参数:

反射率 $R = |S_{11}|^2$, 透射率 $T = |S_{21}|^2$, 因此, 吸收率可表示为

$$Abs(\omega) = 1 - R - T, \quad (4)$$

为了更好地说明该双面大小金属铜树枝模型既能够实现阻抗匹配, 又可以达到比较高的吸收效率, 通过数值仿真确定参数, 设计加工了五组样品. 各组样品正反面树枝的前两级长度为 $a = b = 1.6$ mm, 晶格周期为 7.5 mm. 固定这些参数, 改变树枝的第三级参数 c , 调节其有效介电常数和磁导率. 其中, c 按照间隔为 0.1 mm, 从 0 变化到 0.4 mm. 最后

把加工好的所有样品都切割为 120 mm × 120 mm.

对于所设计的五组样品, 我们从实验和仿真两部分对其电磁特性曲线做了分析, 包括反射和透射曲线以及根据能量守恒原理得到的吸收曲线. 图 2 就是我们所设计的五组样品的反射、透射及吸收曲线的模拟和测量图.

图 2(a), (c) 和 (e) 是仿真曲线, 图 2(b), (d) 和 (f) 是实验测量曲线. 比较仿真和测量的反射曲线, 在保持正反面树枝的前两级不变, 改变背面树枝的第三级长度时, 我们发现, 当 c 取 0.3 mm, 反射率达到 0, 也就是说在该点实现了很好的匹配.

实验与仿真结果相比较, 中心谐振频率从

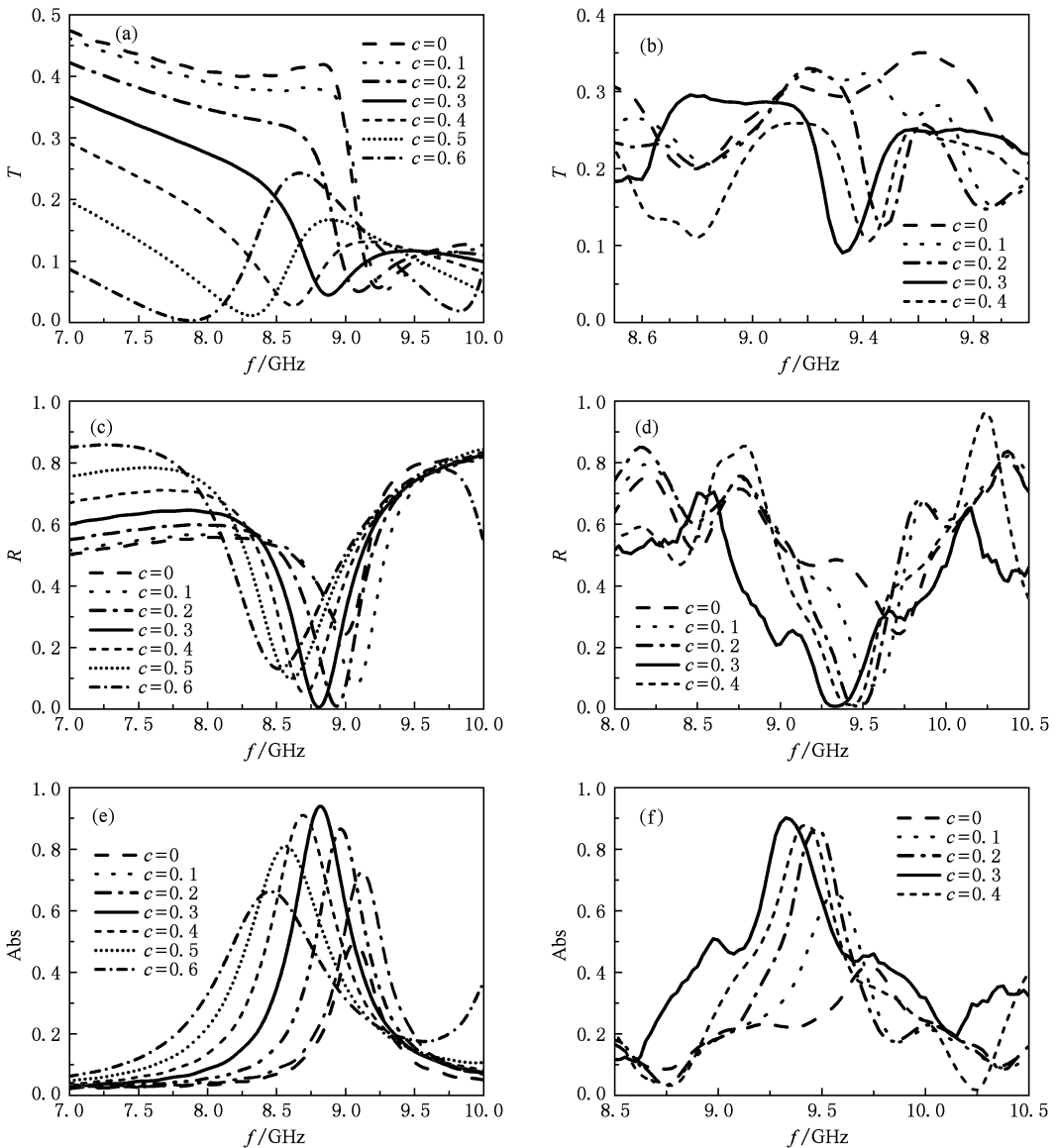


图 2 仿真和测量的各组样品反射、透射和吸收曲线

9.325 GHz 移动到 8.824 GHz, 反射峰值也有些许差异, 但两者符合得还是比较好. 对比仿真和实验测量所存在的差异, 频率移动是因为 FR-4 介质板本身介电常数分布不均匀所导致的. 理论分析表明, 中心谐振频率会随介电常数减小而增大^[16]. 此外, 反射最低点值的差异是由于加工工艺和实验测量系统本身的限制. 根据吸收的关系式, 通过图 2(a), (c) 和 (b), (d) 我们可以得出图 2(e) 和 (f) 所示的

吸收仿真和测量曲线, 可以看出, 在中心谐振频率点时, 吸收也比较高, 仿真值是 93.91%, 测量值达到了 90.01%. 可见, 令正反面树枝的前两级分别相等, 只改变背面树枝的第三级长度, 当选取合适值时, 该结构会在某一个频率点实现零反射, 也就是实现阻抗匹配. 从理论和实验上分别证实了该模型可以实现完美阻抗匹配.

从所设计五组样品的反射和透射随第三级长

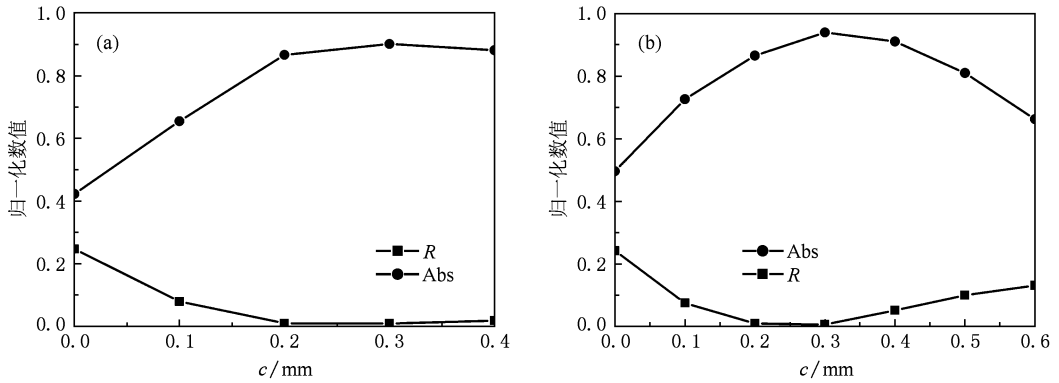


图 3 反射和吸收随第三级长度的变化规律

度变化曲线上可以看出阻抗匹配程度的渐变趋势. 只有当第三级长度取一定值时, 才可以实现阻抗匹配, 而在它两侧的取值都不会实现阻抗匹配. 通过图 3(a) 和 (b) 所示的反射、吸收随第三级长度的变化曲线可以清楚的看出: 无论是仿真值还是测量值, 都表明了只有在满足阻抗匹配时, 吸收比较好. 为了更好的说明问题, 通过散射参量提取法^[17-18]给出了吸收比较好的那组样品的电磁参数曲线, 如图 4(a) 所示. 并给出了各组样品的电磁参数曲线随背面树枝第三级长度的变化曲线, 如图 4(b) 所示. 可见, 只有在满足阻抗匹配时, 即该结构的介电常数

和磁导率相等时, 才可以实现高的吸收率.

为了理解所设计样品的电磁谐振特性, 对该结构的表面电流分布进行了监测, 如图 5 所示. 可以看出, 在电磁波垂直入射的条件下, 单个金属铜树枝结构可以看作电 LC 谐振器, 可以产生电谐振. 背面树枝表面的电流和正面树枝表面的电流是反平行的, 这和“双渔网”以及纳米杆对结构类似, 可以产生磁谐振, 电谐振和磁谐振在同一频率点出现. 通过调节该结构的几何参数, 电磁谐振可以在一个窄带内重叠, 这样就可以对入射的电磁波分别产生谐振, 进而实现完美吸收.

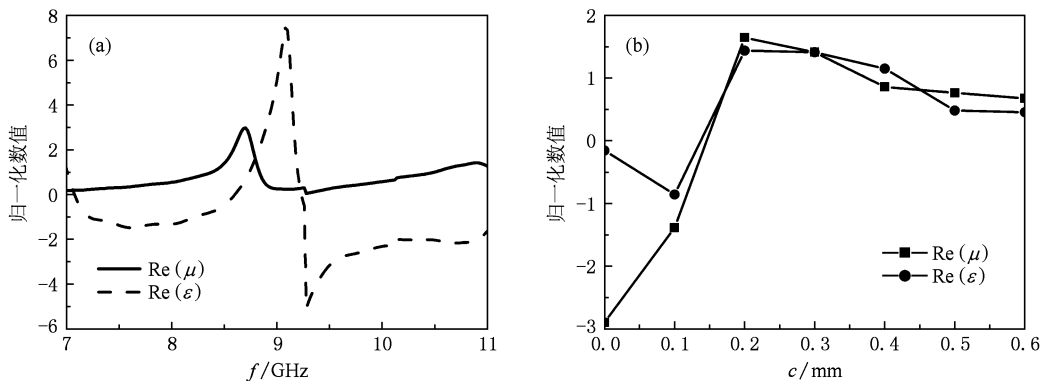


图 4 电磁参数曲线

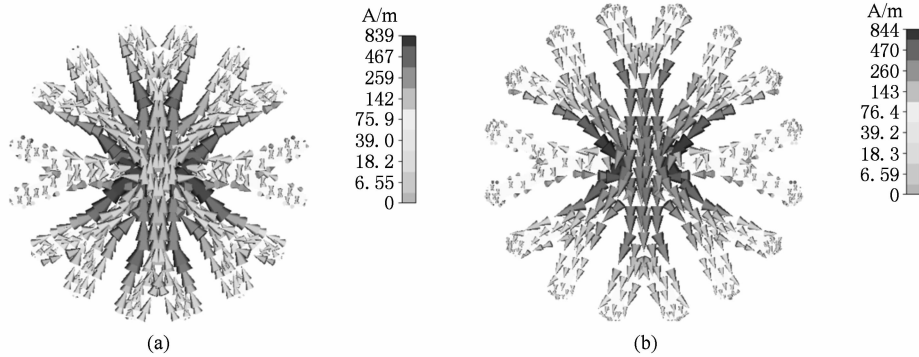


图5 监测的表面电流分布图 (a)正面图;(b)背面图

本文所设计的单层超材料吸收器吸收效率的理论值为 93.91%,为了进一步增加吸收效率,我们通过数值仿真方法研究了单元层数对吸收特性的影响.图6给出了吸收率随层数的变化关系.可以看出,随着层数的增加,吸收率变大,这是因为层数增加,增大了介电损耗,降低了透射率,从而增大了吸

收率.可以看出,两层吸收率为 98.9%,三层吸收率为 99.18%,可见,当层数为 3,甚或 3 层以上时,透射率降低,非常接近于 0,吸收率非常接近于 100%,达到了完美吸收.

5. 结 论

基于树枝状金属结构单元的电磁谐振特性,设计了一种双面大小树枝状结构的超材料吸收器.该结构包括两个金属超材料谐振单元,分别是正面二级树枝及背面三级树枝.通过设计不同的阻抗匹配方式,研究了阻抗匹配对吸收特性的影响.在阻抗完全匹配的条件下,可以得到最大的吸收率.实验结果表明双面大小树枝模型最大可以实现 90.01% 的吸收率.增加样品的层数可以有效的增加吸收率,3 层样品就可以达到 99% 以上的吸收率,实现工程意义上的完美吸收.本文提出的结构模型符合化学自然生长方法,为设计红外和可见光波段的超材料吸收器提供了一种新途径.

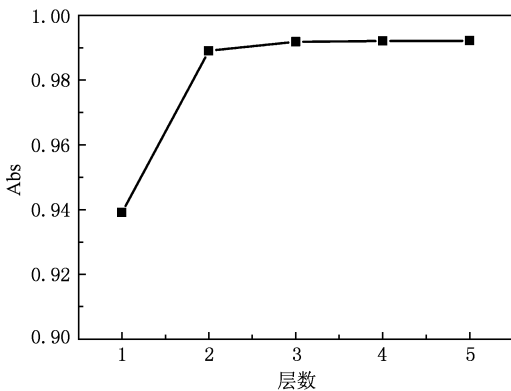


图6 吸收率随单元层数的变化曲线

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [4] Smith D R, Pendry J B 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [5] 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]
- [6] Zhang F L, Zhao Q, Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [7] Zhao X P, Zhao Q, Kang L, Song J, Fu Q H 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [8] 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]
- [9] Zhou J F, Economou E N, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Opt. Lett.* **31** 3620
- [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] Shalaev V M 2007 *Nat. Photonics* **1** 41
- [13] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B,

- Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [14] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [15] Liu H, Zhao X P, Yang Y, Li Q W, Lv J 2008 *Adv. Mater.* **20** 2050
- [16] Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036622
- [17] Smith D R, Schultz S, Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [18] Chen X D, Wu B I, Kong J A, Grzegorzczak T M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 046610

Dendritic metamaterial absorber based on the impedance matching*

Zhang Yan-Ping Zhao Xiao-Peng[†] Bao Shi Luo Chun-Rong

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

(Received 30 September 2009; revised manuscript received 25 December 2009)

Abstract

Based on the electromagnetic resonant characteristic of the metallic dendritic cells, we present a metamaterial absorber (MA) composed of periodic array of double dendritic cells. The unit cell of the absorber is composed of two metallic elements on the substrate, a two-level dendritic cell and a three-level dendritic cell are located on each side separately. Designing different impedance matching conditions, the effect of impedance matching on the absorptivity is found. The experimental results show that a maximum absorptivity of 90% can only occur when the MA layer is impedance-matched to free space. At the same time, increasing the number of MA layers can effectively enhance the absorptivity. For 3 layers, the absorptivity above 99% can be obtained, that is to say, a perfect MA is realized in the engineering sense.

Keywords: dendritic structure, impedance matching, absorption

PACC: 4110H, 4270Y

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 50632030,50872113, 50936002).

[†] Corresponding author. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn