

基于电阻膜与分形频率选择表面的超薄宽频带超材料吸波体的设计*

程用志 聂彦† 龚荣洲 王鲜

(华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2012年5月13日收到; 2012年9月26日收到修改稿)

设计了一种基于一阶 Minkowski 分形双方环 (Minkowski fractal double square loop, MFDSL) 电谐振器结构与电阻膜复合的超薄、宽频带、极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体. 该吸波体的基本结构单元由 MFDSL 电谐振器结构、方块电阻膜、电介质基板和金属背板组成. 采用时域有限差分算法对这种复合结构吸波体的电磁波吸收特性进行数值模拟分析. 模拟得到的反射率和吸收率表明: 该吸波体在 7.5—42 GHz 之间对入射电磁波具有大于 90% 以上的强吸收特性. 模拟得到的不同极化角和不同入射角下的吸收率表明: 该吸波体具有极化不敏感和宽入射角特性. 进一步的数值模拟结果表明, 该复合结构吸波体对电磁波的吸收主要是基于电磁谐振和电路谐振机制, 通过方块电阻的设计可以实现工作频率范围的调节.

关键词: 电阻膜, 分形频率选择表面, 宽频带吸收

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

DOI: 10.7498/aps.62.044103

1 引言

自 2001 年 Shelby 等^[1]首次制备出微波段磁导率和介电常数同时为负的左手材料以来, 电磁超材料越来越引起人们的广泛关注^[2]. 本质上, 超材料更是一种新颖的材料设计思想, 这一思想的基础是通过多种物理结构设计来突破物质的某些表现的、本征自然规律的限制, 从而获得超常的材料功能. 基于超材料的结构设计思想, 科学家们实现了诸如负折射^[1,3]、完美透镜^[4]、隐身斗篷^[5]、电磁波完美吸收^[6]等许多常规材料所不能实现的一些奇异的物理现象. 这些现象的实现主要依赖于超材料的亚波长结构特性, 因此可以将其视为有效媒质. 人们通过微结构的设计可以实现等效电磁参数 (ϵ_{eff} 和 μ_{eff}) 调控, 从而实现超材料与电磁波作用方式的调控. 自 2008 年 Landy 等^[6]首先提出了基于超材料的电磁波完美吸收的概念, 超材料吸波体得到了广泛的关注和研究. 从微波到可见光波段, 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”特性的超材料吸波体^[7-11]. 虽然该类型超材料吸波体具有厚度薄、吸收强等特点, 但吸收频带很窄, 因此, 其实际应用受到了一定的限制.

为了实现超材料宽频强吸收, 人们做了各种尝试和设计. Gu 等^[12]设计了电谐振器结构, 并在其中加载电阻和电容, 该加载集总元件的吸波体的低频吸收频带得到了一定的展宽. Gu 等^[13]设计了加载集总元件的平面超材料吸波体, 理论模拟结果显示该吸波体强吸收频带达到 1.5 GHz. 随后, Filippo 等^[14]提出了电阻型超材料吸波体, 并根据等效电路理论给出了设计规则, 设计的吸波体可以实现宽频强吸收. 以上文献报道的有关新型超材料吸波体设计虽然可以实现强吸收频带的展宽, 但是厚度比较大, 同时加载集总元件的吸波体加工复杂成本较高, 这对实际应用也是不利的.

本文在前人研究的基础上, 基于超材料的电

* 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20090142120003) 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

磁谐振吸收特性和电阻型频率选择表面的电路谐振吸收特性的思想设计了一种宽频带、极化不敏感和宽角度吸收的超薄超材料吸波体. 该吸波体由 Minkowski 分形双方环 (Minkowski fractal double square loop, MFDSL) 电谐振器结构、方块电阻膜 (square resistance film, SRF), 电介质基板 (dielectric substrate, DS) 和金属背板 (ground-plane, GP) 构成双层复合结构模型. 采用时域有限差分法 (FDTD) 对该复合结构吸波体进行数值模拟, 模拟结果表明该吸波体对入射电磁波具有宽频带强吸收、极化不敏感和宽角度吸收特性. 该复合结构吸波体主要优点是厚度薄、易于实现宽带吸波, 且成本低, 加工简单.

2 理论与结构设计

超材料作为一种新兴的人工构造材料, 由于自身所具有的奇异特性, 在隐身材料领域中逐步

成为热点, 并表现出广阔的应用前景. 电磁超材料对入射电磁波的吸收率 $A(\omega)$ 通常由反射率 $R(\omega)$ 和透射率 $T(\omega)$ 表示, 即 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 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, 而 $R(\omega)$ 取决于吸波体表面等效复合波阻抗与自由空间的匹配程度及其对电磁波的损耗特性. 根据超材料的电磁参数的洛伦兹模型, 通过公式推导, 最终吸收率可表示成如下形式 [8]:

$$A(\omega) = 1 - e^{-2(F\omega^2 t/c\gamma)}, \quad (1)$$

其中 γ 和 F 分别为超材料基本单元复合结构的损耗因子和几何参数因子, t 为整体厚度, c 为真空中的光速, γ 由基本单元金属结构和介质基体材料的损耗特性决定, F 由基本单元结构的几何参数决定. 因此, 可以通过超材料基本单元复合结构的参数设计, 使其实现宽频带电磁波的强吸收 ($A(\omega) \rightarrow 1$).

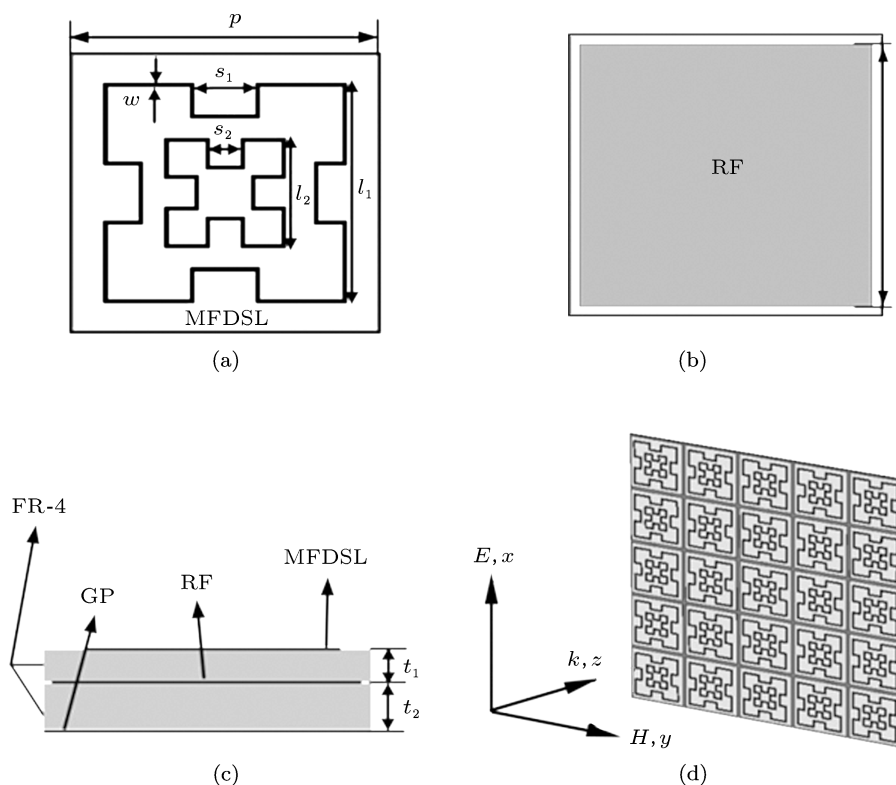


图 1 超材料吸波体的结构示意图 (a) MFDSL 电谐振器结构; (b) SRF 结构; (c) 基本单元结构侧视图; (d) 复合结构阵列立体视图

本文设计的超材料吸波体基本单元结构模型如图 1 所示, 采用双层复合结构. 从上至下, 第一层为 MFDSL 电谐振器结构层, 中间层为 SRF, 底层为金属背板 GP; 中间基板材料为 FR-4(loss),

其介电常数为 $\epsilon_r = 4.9(1 + i0.025)$; SRF 的表面方块电阻为 $R_s = 230 \Omega$; MFDSL 结构和背衬金属为厚 $30 \mu\text{m}$ 、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 $t_1 = 0.25 \text{ mm}$, $t_2 = 0.5 \text{ mm}$, $p = 20 \text{ mm}$, $w = 0.3 \text{ mm}$, $l_1 = 16 \text{ mm}$, $l_2 = 8 \text{ mm}$, $s_1 = 4 \text{ mm}$, $s_2 = 2 \text{ mm}$, $l = 19.5 \text{ mm}$. 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

复合结构吸波体的数值模拟结果如图 2 所示. 从图 2 中可以看出, 在 7.5—42 GHz 频率范围内, 超材料反射率小于 10%, 对应的吸收率大于 90%, 峰值吸收率接近 100%, 吸收率大于 90% 的相对吸收带宽为 139.4%. 模拟结果表明, 该吸波体具有超宽带强吸收特性. 进一步研究该吸波体对入射电磁波吸收的极化特性和宽入射角特性, 具体情况通过不

同极化角和不同入射角下对横电波 (TE 波) 和横磁波 (TM 波) 的吸收率可以看出, 数值模拟结果如图 3 所示.

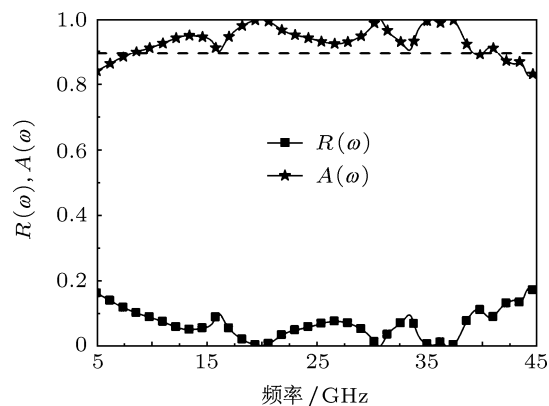


图 2 数值模拟得到的复合结构吸波体的反射率与吸收率

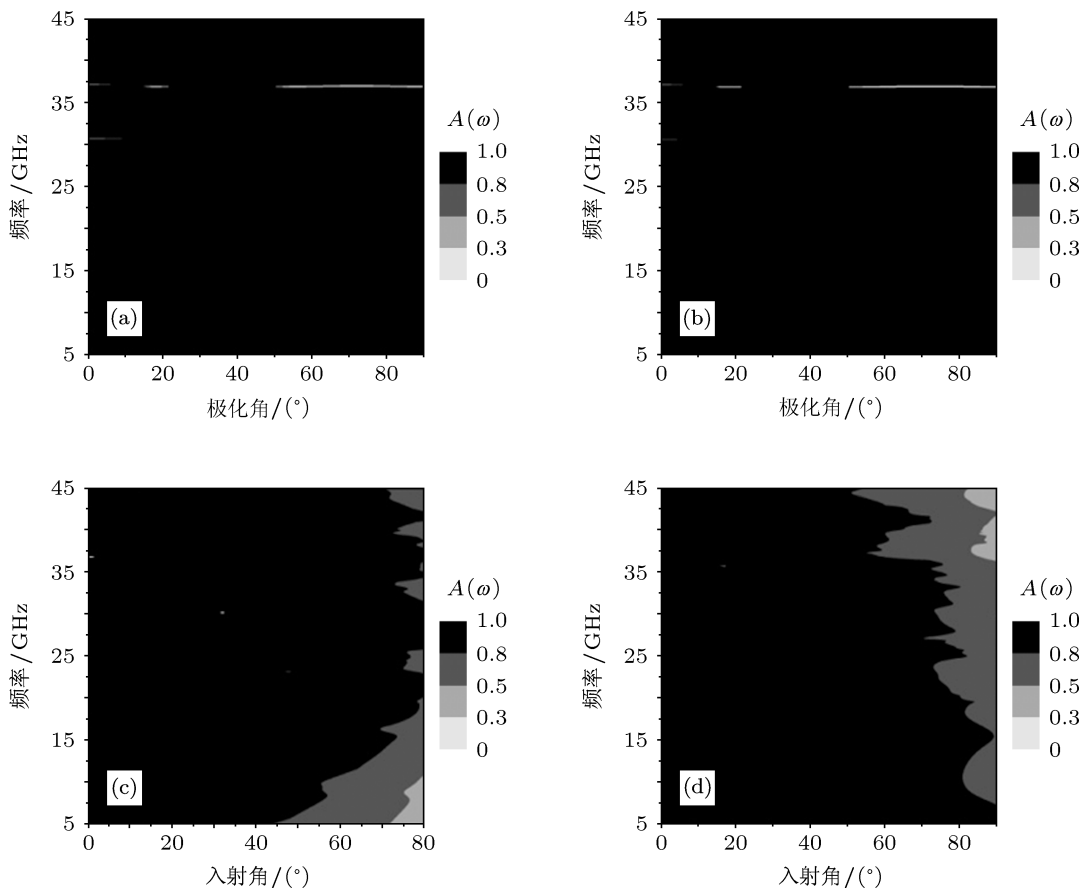


图 3 复合结构吸波体在不同极化角和不同入射角下的吸收率 (a), (b) 分别为不同极化角下的 TE 波和 TM 波, (c), (d) 分别为不同入射角下的 TE 波和 TM 波

从图 3(a) 和 (b) 中可以看出, 对于 TE 波和 TM 波, 极化角在 0° — 90° 变化时, 复合结构吸波体的吸收率保持不变, 表明该吸波体具有极化不敏感特性. 由图 3(c) 和 (d) 可以看出, 对于 TE 波, 入射角小于

60° 时吸波体在 7.5—45 GHz 之间的吸收率基本保持不变; 对于 TM 波, 入射角小于 50° 时吸波体在 5—45 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入射角特性.

前期研究表明,对于传统的单一结构超材料吸波体,强吸收主要源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,因此具有窄频带强吸收特性 [6,7,15],通过基本单元结构参数设计可对吸收频率进行调节.对于基于电阻膜的超材料吸波体,宽频带、强吸收特性主要基于电路谐振机制 [14,16-18],通过结构参数和方块电阻的设计实现吸波特性的调节,但是厚度难以达到要求.

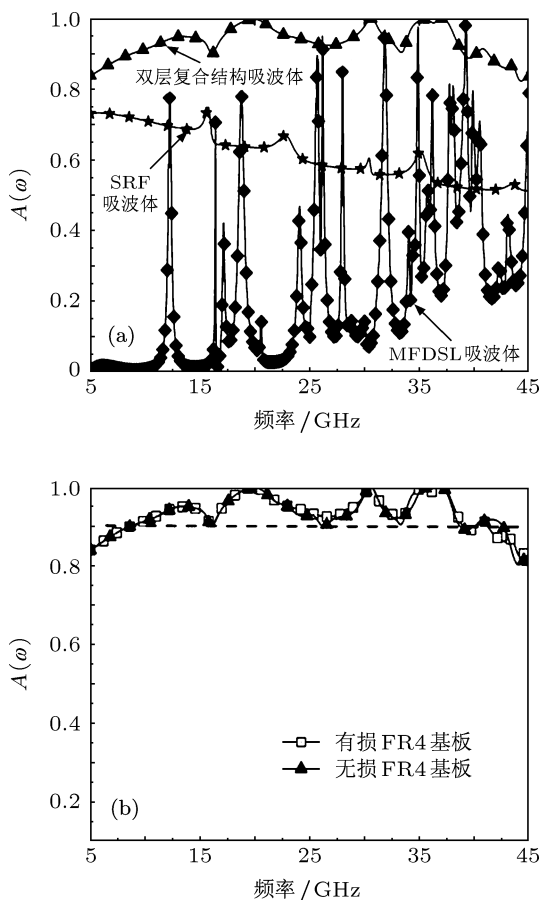


图4 (a) 数值模拟得到的MFDSL吸波体SRF、吸波体以及MFDSL与SRF双层复合结构吸波体的吸收率; (b) 复合结构吸波体在基板有耗和无耗情况下的吸收率

为了研究复合结构吸波体的宽频带强吸收机制,有必要考虑两种不同类型的吸波体模型.第一种为MFDSL吸波体,主要由MFDSL电谐振器结构,0.75 mm厚的FR-4(loss)基板与金属背衬GP构成;第二种为SRF吸波体,主要由SRF电阻膜,0.75 mm厚的FR-4(loss)基板与金属背衬GP构成,其他参数不变并分别对其进行数值模拟,结果如图4(a)所示.从图中可以很清楚地看出,在5—45 GHz频率范围内,MFDSL吸波体呈现出多频窄带

强吸收特性,吸收峰值频率彼此孤立,其主要源于电磁谐振吸收;而SRF吸波体并没有呈现出大于90%的强吸收特性,吸收率在50%—70%之间,且吸收特性比较稳定,这主要是基于电路谐振吸收特性 [14,16,18].由此可知,这两种类型的吸波体各有优缺点,在实际应用中各有利弊.将两者的特性进行结合,设计成如图1(c)所示的复合结构模型.由图4(a)可知,在整体厚度保持在0.75 mm不变的情况下,复合结构的吸收率在7.5—42 GHz之间大于90%,由此可知,MFDSL与SRF双层复合不仅拓宽了吸收频带,而且吸收能力得到进一步增强,这也说明我们设计的复合结构具有叠加效应.为了研究双层复合结构吸波体内的能量损耗情况,分别模拟计算了该吸波体在基板材料有耗和无耗情况下的吸收率,结果如图4(b)所示.可以看出,在7.5—42 GHz之间,双层复合结构吸波体在基板材料FR4有耗和无耗情况下的吸收率基本保持不变,这说明其能量损耗主要集中在SRF电阻膜上,与基板的介质损耗无关.

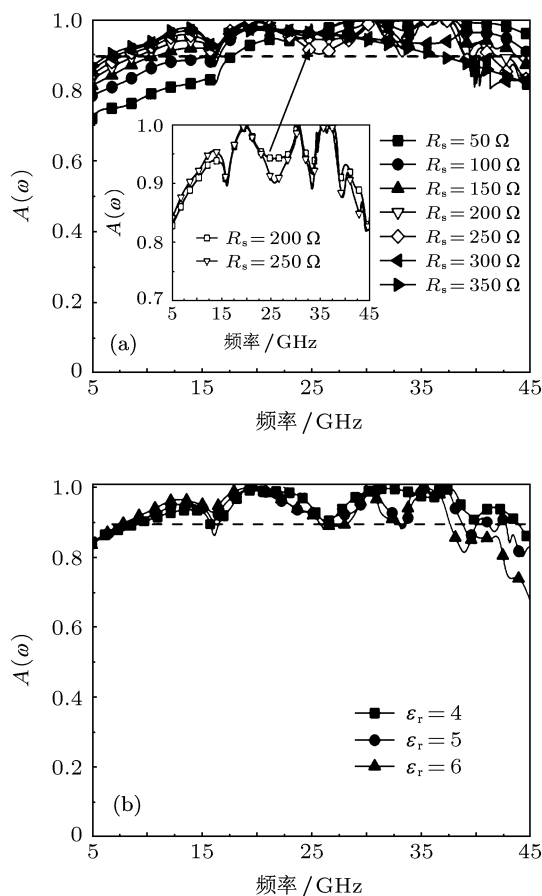


图5 复合结构吸波体在不同情况下的吸收率 (a) 不同的方块电阻值 R_s ; (b) 不同的基板材料介电常数

进一步研究复合结构吸波体参数对其吸收特

性的影响, 在这里主要考虑复合结构不同方块电阻值和基本材料介电常数的影响, 结果如图 5 所示. 由图 5(a) 可以看出, 当方块电阻 R_s 在 50—350 Ω 变化时, 在整个 5—45 GHz 频率范围内, 吸收率都达到了 70% 以上; 随着电阻膜方块电阻 R_s 的增大, 90% 的吸收频率范围逐渐向低频移动; 另外, 电阻膜的电阻也存在一个最优值范围, 在 200—250 Ω 范围内, 90% 的吸收频率范围基本保持不变且带宽达到最大, 由此说明可以通过改变方块电阻的大小来调节复合结构吸波体的工作带宽和频率范围. 从图 5(b) 中可以看出, 复合结构吸波体的吸收率并没有随基体材料介电常数的改变而发生显著的变化, 这为实际制备时基体材料的选择提供了很大的自由度.

4 结论

本文设计了一种超薄、宽频带、极化不敏感和宽入射角特性的双层复合结构超材料吸波体模型. 数值模拟得到的吸收率表明: 由 MFDSL 与 SRF 构

成的双层复合结构超材料整体厚度仅为 0.75 mm, 吸收率大于 90%, 峰值吸收率接近 100%, 吸收率大于 90% 的相对吸收带宽为 139.4%. 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入射角特性. 通过分别对 MFDSL 吸波体、SRF 吸波体以及采用无损的 FR4 基板时的双层复合结构吸波体的数值模拟结果表明: 该复合结构吸波体实现超宽频带强吸收主要是源于 MFDSL 的电磁谐振与 SRF 的电路谐振吸收的协同作用, 吸收的电磁波能量主要是通过 SRF 的电阻膜损耗的. 进一步研究复合结构吸波体电阻膜和基体材料介电常数对其吸收特性的影响表明: 改变方块电阻的大小可以调节复合结构吸波体的工作带宽和频率范围, 电阻膜的电阻也存在一个最优值范围, 在 200—250 Ω 范围内, 90% 的吸收带宽达到最大; 另外, 吸收特性并不随基体材料介电常数的改变而发生显著的变化. 这种超薄宽频带吸波体的设计为实验室制备提供了理论指导, 可通过传统的 PCB 技术和丝网印刷技术实现.

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [2] 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]
- [3] Parazzoli C G, Greigor R B, Li K, Koltenbah B E C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401
- [4] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [5] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [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** 536 (in Chinese) [程用志, 肖婷, 杨河林, 肖柏勋 2010 物理学报 **59** 536]
- [8] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [9] Grant J, Ma Y, Saha S, Khalid A, Cumming D R S 2011 *Opt. Lett.* **36** 3476
- [10] Hao J M, Wang J, Liu X L, Padilla W J, Zhou L, Qiu M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 251104
- [11] Ding P, Liang E, Cai G, Hu W Q, Fan C Z, Xue Q Z 2011 *J. Opt.* **13** 075005
- [12] Gu S, Barrett J P, Hand T H, Popa B I, Cummer S A 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 064913
- [13] 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
- [14] Filippo C, Agostino M, Giuliano M 2010 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **58** 1551
- [15] Shen X P, Cui T J, Ye J X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 058101 (in Chinese) [沈晓鹏, 崔铁军, 叶建祥 2012 物理学报 **61** 058101]
- [16] 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]
- [17] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J, Pang Y Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 108901 (in Chinese) [孙良奎, 程海峰, 周永江, 王军, 庞永强 2011 物理学报 **60** 108901]
- [18] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, Zheng D H, Gong R Z, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134103 (in Chinese) [程用志, 王莹, 聂彦, 郑栋浩, 龚荣洲, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134103]

Design of an ultrathin and wideband metamaterial absorber based on resistance film and fractal frequency selective surface*

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

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

(Received 13 May 2012; revised manuscript received 26 September 2012)

Abstract

An ultrathin, wideband, polarization-insensitive and wide-angle metamaterial absorber is presented, which is based on one order Minkowski fractal double square loop (MFDSL) electric resonator structure and resistance film. The unit cell of this absorber consists of MFDSL, square resistance film, dielectric substrate and metal ground plane. The simulations and analyses of electromagnetic absorbing properties of this composite structure absorber are performed by the finite-difference time-domain method. The simulated reflection and absorption indicate that the absorption of the composed structure absorber is greater than 90% in a frequency range of 7.5–42 GHz. The simulated absorptions under different polarization conditions and incident angles indicate that this composite structure absorber is polarization-insensitive and of wide-angle. The further numerical simulation results indicate that the absorption of this absorber originates mainly from the absorbing mechanism of electromagnetic resonance and circuit resonance, the operation frequency range can also be adjusted by the design of the square resistance.

Keywords: resistance film, fractal frequency selective surface, wideband absorption

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

DOI: 10.7498/aps.62.044103

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20090142120003) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51207060).

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