

# 基于电阻膜的宽频带超材料吸波体的设计\*

顾超<sup>1)</sup> 屈绍波<sup>1)2)†</sup> 裴志斌<sup>1)</sup> 徐卓<sup>2)</sup> 林宝勤<sup>1)</sup>  
周航<sup>1)</sup> 柏鹏<sup>3)</sup> 顾巍<sup>4)</sup> 彭卫东<sup>3)</sup> 马华<sup>1)</sup>

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)

3) (空军工程大学综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心, 西安 710051)

4) (成都理工大学工程技术学院, 乐山 614300)

(2010年9月29日收到; 2011年3月24日收到修改稿)

基于电阻膜设计了一种宽频带、极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体。该吸波体的结构单元由六边形环状电阻膜结构、介质基板和金属背板组成。仿真得到的反射率和吸收率表明, 该吸波体在 7.0—27.5 GHz 之间对入射电磁波具有宽频带的强吸收, 证实了电路谐振相对于电磁谐振易于实现宽带吸波。仿真得到的不同极化角和不同入射角下超材料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。仿真得到的基板和电阻膜对超材料吸波体吸收率的影响表明, 电阻膜结构和金属背板之间形成的电容以及电阻膜结构的电阻都存在一个最佳值, 此时电路谐振最强、吸收带宽最大。

**关键词:** 电阻膜, 电路谐振, 宽频带, 超材料吸波体

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

## 1. 引言

电磁超材料<sup>[1]</sup>是指一些具有超常物理性质的人工复合结构或复合材料。根据等效媒质理论<sup>[2]</sup>, 可以用等效介电常数和等效磁导率来描述超材料的电磁特性。通过调节超材料单元的结构参数, 能够设计出具有任意等效介电常数和等效磁导率的超材料<sup>[3]</sup>。基于这种思想, 2001年 Shelby 等<sup>[4]</sup>首次用负折射实验证实了左手材料的存在, 2003年“完美”平板成像<sup>[5]</sup>的概念被提出来, 2006年世界上第一件“隐身衣”<sup>[6]</sup>问世。在之前的设计中, 研究人员提出了许多方法来尽量避免超材料的损耗(例如采用增益补偿媒质<sup>[7]</sup>), 但是超材料的损耗可能在吸波中具有潜在的应用。2008年, Landy 等<sup>[8,9]</sup>基于电磁谐振设计出“完美”超材料吸波体。随后, 研究人员又设计出极化不敏感<sup>[10]</sup>和宽入射角<sup>[11,12]</sup>的超材料吸波体。虽然上述超材料吸波体具有极强的吸波

能力, 但其吸波主要依赖于金属结构的电磁谐振, 因而带宽极窄。为了拓展超材料吸波体的带宽, 加载集总元件的宽带超材料吸波体<sup>[13]</sup>被提出来, 但其成本过高且加工复杂。本文基于电阻膜设计了一种宽频带、极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体。其主要优点是易于实现宽带吸波, 且成本低、加工简单。仿真结果表明, 该超材料吸波体在 7.0—27.5 GHz 之间对入射电磁波具有极化不敏感和宽入射角的强吸收。

## 2. 理论

超材料吸波体的吸收率  $A(\omega)$  可以表示为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega),$$

其中  $R(\omega)$  是反射率,  $T(\omega)$  是传输率。因为金属背板的存在,  $T(\omega) = 0$ , 所以吸收率仅由反射率  $R(\omega)$  决定, 反射率  $R(\omega)$  取决于超材料吸波体的表面阻抗<sup>[14]</sup>与自由空间的阻抗匹配程度。传统的超材料吸波体大多依赖于金属结构的电磁谐振

\* 国家自然科学基金(批准号:60871027, 60901029, 61071058)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2009CB623306)和陕西省自然科学基金(批准号:SJ08F01)资助的课题。

† 通讯联系人。E-mail: Qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

(相对于频率的变化极不稳定),其表面阻抗只能在谐振频率附近极窄的频带内与自由空间阻抗匹配,因而带宽极窄. 为了实现宽频带的超材料吸波体,可以用电阻膜结构替代金属结构,将电磁谐振转化为电阻膜结构、基板和金属背板之间的电路谐振. 因为电路谐振相对于频率的变化比较稳定,其表面阻抗能在谐振频率附近很宽的频带内与自由空间阻抗匹配,从而可以用来实现宽带吸波.

### 3. 结构设计

本文设计的超材料吸波体的结构单元由六边

形环状电阻膜结构、介质基板和金属背板组成,如图 1 所示. 利用商业电磁分析软件 CST Microwave Studio 2008 对所设计的超材料吸波体进行仿真,仿真模型如图 1(c)所示.  $x-z$  和  $y-z$  平面边界设为周期性边界, $x-y$  平面边界(+ $z$  方向)设为端口. 优化后的超材料吸波体的结构参数如下:六边形单元的周期  $p = 5.5$  mm,六边形环状电阻膜边长  $a = 5$  mm,六边形环状电阻膜宽度  $w = 2$  mm,基板厚度  $t = 4$  mm,电阻膜的方块电阻  $R = 70 \Omega$ (将碳黑、水和乳液按一定比例配成乳状液体,采用喷涂工艺制备电阻膜,电阻膜的方块电阻可由喷涂的厚度来控制),介质基板为多孔泡沫( $\epsilon_r = 1$ ).

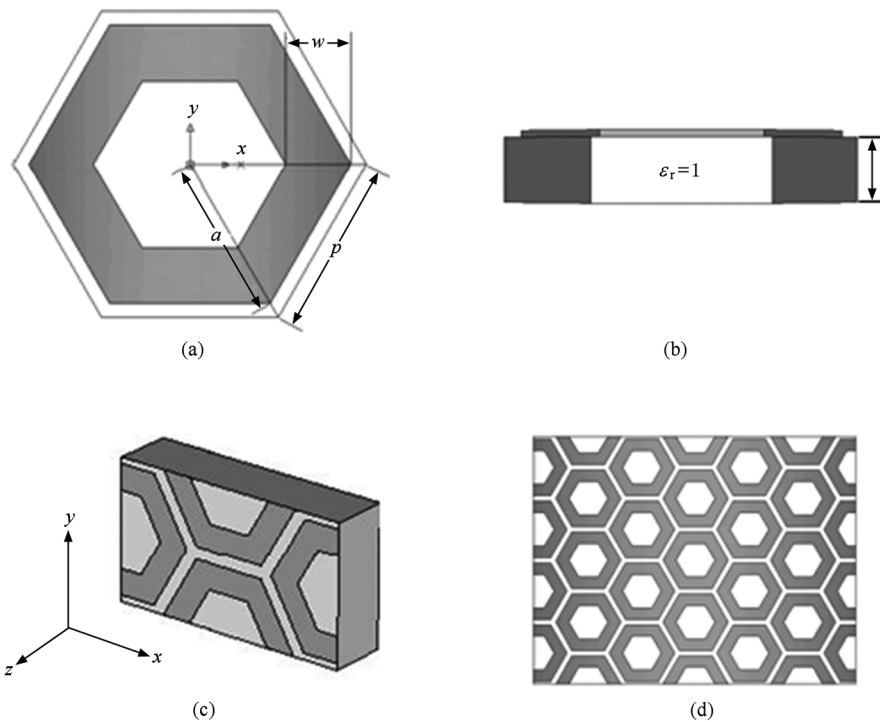


图 1 超材料吸波体的结构示意图 (a) 六边形环状电阻膜结构, (b) 介质基板, (c) 仿真模型, (d) 阵列正视图

### 4. 仿真及分析

利用 CST 的频域求解器,可以计算出与频率相关的  $S$  参数( $S_{11}$ ). 通过  $R(\omega) = |S_{11}|^2$  和  $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ , 可以分别计算出超材料吸波体的反射率和吸收率,所得结果如图 2 所示. 由图 2 可以看出,在 7.0—27.5 GHz 之间,超材料吸波体的反射率小于 10%、吸收率大于 90%,吸收率大于 90% 的相对带宽为 118.8%. 仿真结果表明,电阻膜结构、基板

和金属背板构成的电路谐振相对于频率的变化比较稳定,其表面阻抗能在很宽的频带内与自由空间阻抗匹配,可以用来实现宽带吸波.

另一方面,该超材料吸波体是极化不敏感和宽入射角的,这一点可由超材料吸波体在不同极化角和不同入射角下对横电波和横磁波的吸收率看出,所得结果如图 3 所示. 计算中采用了商业电磁分析软件 CST Microwave Studio 2008 的周期性边界和频域求解器,模数设为 2(一个是横电模,一个是横磁模). 由图 3(a) 和 (b) 可以看出,对于横电(或横

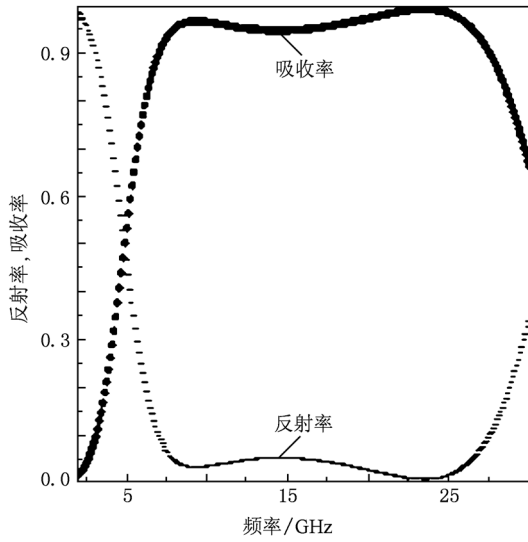


图2 仿真得到的超材料吸波体的反射率和吸收率

磁)波,极化角在 $0^\circ$ — $90^\circ$ 变化时吸波体的吸收率变化非常小,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,在 $7.0$ — $27.5$  GHz之间,横电波在入射角小于 $45^\circ$ 时吸波体的吸收率无明显变化,横磁波在入射角小于 $35^\circ$ 时吸波体的吸收率无明显变化,表明该吸波体具有宽入射角特性.

进一步研究了基板的介电常数、厚度与电阻膜的方块电阻、宽度等因素对超材料吸波体吸收率的影响,所得结果如图4所示.由图4(a)可以看出,随着基板介电常数 $\epsilon_r$ 的增大,吸收频带的高频部分逐渐缩小、低频部分基本不变.由图4(b)可以看出,随着基板厚度 $t$ 的逐渐增大,吸收频带的高频部分逐渐减小、低频部分变化不大.仿真结果表明,电阻膜结构和金属背板之间形成的电容达到一个最佳值时,电路谐振达到最强,吸收带宽最大.由图4(c)可

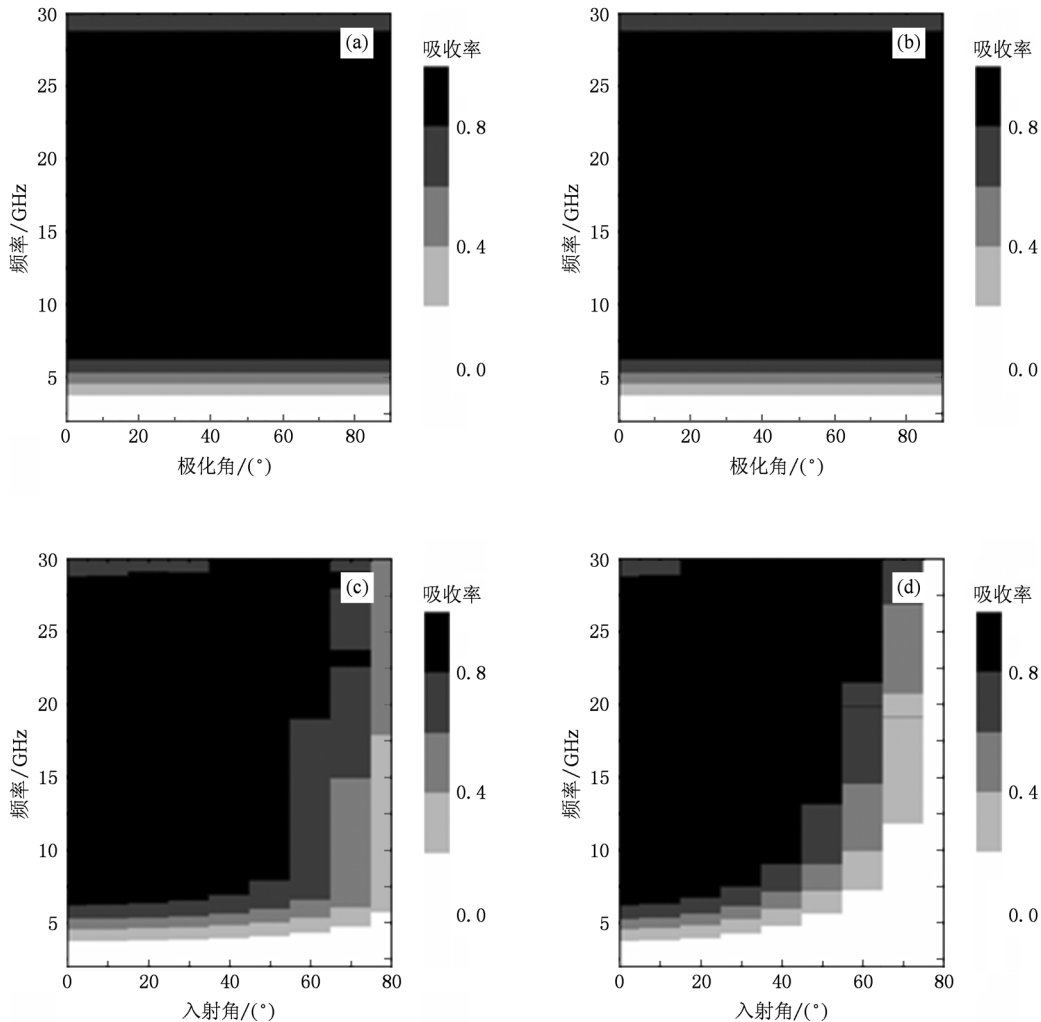


图3 仿真得到的超材料吸波体在不同极化角和不同入射角下的吸收率 (a)不同极化角下超材料吸波体对横电波的吸收率,(b)不同极化角下超材料吸波体对横磁波的吸收率,(c)不同入射角下超材料吸波体对横电波的吸收率,(d)不同入射角下超材料吸波体对横磁波的吸收率

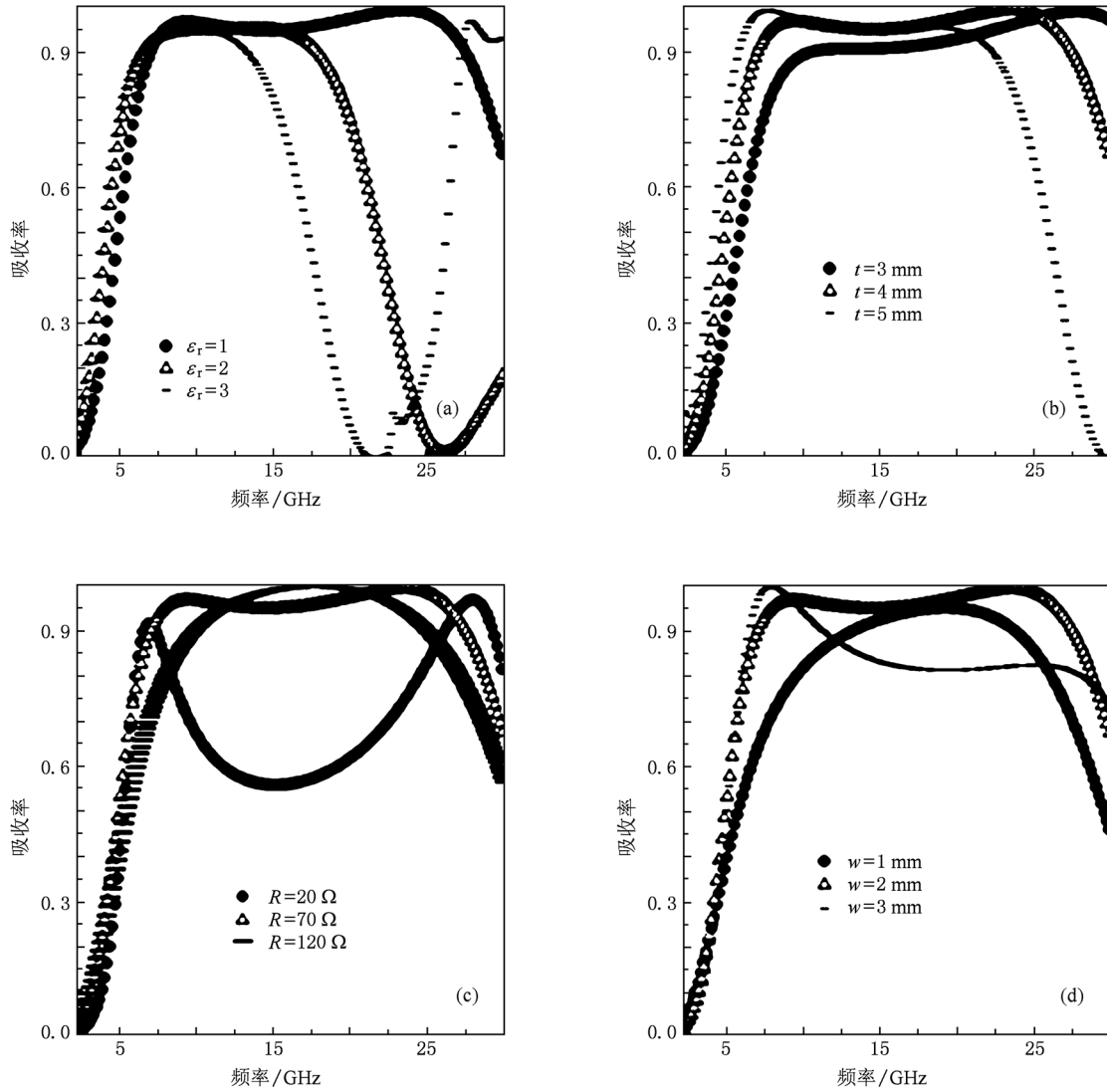


图4 仿真得到不同条件下超材料吸波体的吸收率 (a)采用不同介电常数的基板,(b)采用不同厚度的基板,(c)采用不同方块电阻的电阻膜,(d)采用不同宽度的电阻膜

可以看出,随着电阻膜方块电阻  $R$  的增大,90% 的吸收带宽先增大、后减少.由图4(d)可以看出,随着电阻膜宽度  $w$  的增大,90% 的吸收带宽先增大、后减少.仿真结果表明,电阻膜形成的电阻也存在一个最佳值,此时电路谐振最强、吸收带宽最大.

## 5. 结 论

本文基于电阻膜设计了一种宽频带、极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体.仿真得到的超材料

吸波体的反射率和吸收率表明,电阻膜结构、基板和金属背板构成的电路谐振相对于频率的变化比较稳定,其表面阻抗能在很宽的频带内与自由空间阻抗匹配,可以用来实现宽带吸波.仿真得到的不同极化角和不同入射角下超材料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.仿真得到的基板和电阻膜对超材料吸波体吸收率的影响表明,电阻膜结构和金属背板之间形成的电容以及电阻膜结构的电阻都存在一个最佳值,此时电路谐振最强、吸收带宽最大.

- [1] Caloz C, Itoh T 2006 *Electromagnetic Metamaterials; Transmission Line Theory and Microwave Applications: The Engineering Approach* (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.) pp2,3
- [2] Smith D R, Pendry J B 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [3] Chen X D, Grzegorzczak T M, Wu B I, Pacheco J J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [4] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [5] Smith D R, Schurig D, Rosenbluth M, Schultz S, Ramakrishna S A, Pendry J B 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1506
- [6] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [7] Goyvadinov A A, Podolskiy V A, Noginov A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 191103
- [8] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [9] Tao H, Landy N I, Bingham C M, Zhang X, Averitt R D, Padilla W J 2008 *Opt. Express* **16** 7181
- [10] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [11] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, Pilon D, Shrekenhamer D, Landy N I, Fan K, Zhang X, Padilla W J, Averitt R D 2008 *Phys. Rev. B* **78** 241103
- [12] Avitzour Y, Urzhumov Y A, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 045131
- [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] Li Y X, Xie Y S, Zhang H W, Liu Y L, Wen Q Y, Ling W W 2009 *J. Phys. D* **42** 095408

## Design of a wide-band metamaterial absorber based on resistance films\*

Gu Chao<sup>1)</sup> Qu Shao-Bo<sup>1)2)†</sup> Pei Zhi-Bin<sup>1)</sup> Xu Zhuo<sup>2)</sup> Lin Bao-Qin<sup>1)</sup>  
Zhou Hang<sup>1)</sup> Bai Peng<sup>3)</sup> Gu Wei<sup>4)</sup> Peng Wei-Dong<sup>3)</sup> Ma Hua<sup>1)</sup>

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

2) (Key Laboratory of Electronics Ceramics and Devices of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Research Center of Synthetic Electronic Information System and Electronic Countermeasure, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

4) (College of Engineering and Technology, Chengdu University of Technology, Leshan 614300, China)

(Received 29 September 2010; revised manuscript received 24 March 2011)

### Abstract

A wide-band, polarization-insensitive and wide-angle metamaterial absorber is presented, which is based on resistance films. A unit cell of the absorber consists of a hexagonal resistance film, a substrate and a metal backboard. Simulated reflectances and absorbances indicate that this absorber has a wide-band strong absorption for the incident wave from 7.0 GHz to 27.5 GHz, indicating that electrocircuit resonances are more suited to realize a wide-band strong absorption than electromagnetic resonances. Simulated absorbances under different polarization angles and different incident angles show that this absorber is polarization-insensitive and angle-wide. Simulated influence of substrate and resistance film on the absorbance of the absorber indicates that there exist optimal values for the capacitance between the resistance film and the metal backboard and for the resistance of the resistance film, where electrocircuit resonances are strongest and the absorption band is widest.

**Keywords:** resistance film, electrocircuit resonance, wide-band, metamaterial absorber

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

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60871027, 60901029, 61071058), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2009CB623306) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. SJ08F01).

† Corresponding author. E-mail: Qushaobo@mail.xjtu.edu.cn