

基于磁谐振器加载的宽频带超材料吸波体的设计*

顾超¹⁾ 屈绍波^{1)2)†} 裴志斌¹⁾ 徐卓²⁾ 柏鹏³⁾ 彭卫东³⁾ 林宝勤¹⁾

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)

(2010年7月14日收到;2011年3月24日收到修改稿)

基于加载集总元件的磁谐振器设计了一种宽频带、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加载集总元件的磁谐振器、介质基板和金属背板组成. 仿真得到的加载集总元件和不加载集总元件情况下一维阵列结构吸波体的吸收率表明,相对于不加载集总元件的情况,加载集总元件的一维阵列结构吸波体能够实现宽频带吸波. 仿真得到的集总电阻和集总电容取不同值时一维阵列结构吸波体的吸收率表明,集总电阻和集总电容都存在一个最佳值,此时吸波体的吸收率最高、吸收带宽最宽. 仿真得到的基板有耗和无耗情况下一维阵列结构吸波体的吸收率表明,吸波体内的能量损耗主要源于磁谐振器中加载的集总电阻,与基板的介质损耗关系不大. 仿真得到的二维阵列结构吸波体在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.

关键词: 磁谐振器, 集总元件, 宽频带, 超材料吸波体

PACS: 78.20.Ci, 41.20.Jb

1. 引言

电磁超材料^[1]是指一些具有超常物理性质的人工复合结构或复合材料. 利用电磁超材料,许多奇特的物理现象已经被实现,例如负折射^[2,3]、“完美”成像^[4]和“隐身衣”^[5]等. 此外,电磁超材料的许多应用也被提出来,例如天线的小型化^[6]、存储容量的扩充^[7]、天线的隐形^[8]、超薄谐振腔^[9]以及微波器件的小型化^[10-14]等. 这些现象和应用的实现依赖于电磁超材料经电磁辐射后可产生独立可调的电响应^[15]和磁响应^[16]的能力.

最近,基于电磁谐振的“完美”超材料吸波体被提出来^[17,18],引起了学术界的极大关注. 随后,研究人员又设计出极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体^[19-21]. 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超材料的电磁谐振,因而带宽极窄. 极窄的带宽极大地限制了超材料吸波体的应用,虽然宽频带、极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体具有广阔的应用前景,但目前各类

文献中尚鲜见报道. 本文基于加载集总元件的磁谐振器设计了一种宽频带、极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体. 理论和仿真结果表明,该吸波体在4.7—13.3 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. 结构设计

本文设计的超材料吸波体的结构单元由加载集总元件的磁谐振器、介质基板和金属背板组成,如图1所示. 加载集总元件的磁谐振器可等效为一个RLC电路(图2(a)),其中 R 为集总电阻, C 为集总电容, L 为金属线的电感, R_w 为金属线的电阻. 相对于不加载集总元件的磁谐振器(等效电路见图2(b)),加载的集总电容 $C(C \gg C_s, C_s$ 为开口的电容)能够增强电路的储能能力或空间中电磁能转换成电路中电能的能力,加载的集总电阻 $R(R \gg R_w)$ 能够增强电路消耗电能的能力,两者合在一起能够增强磁谐振器对空间中电磁波的吸收. 可以通过集总电阻和集总电容的取值、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

器的尺寸以及介质基板的厚度来调节吸波体的吸收率、中心频率和吸收带宽. 极化不敏感和宽入射

角特性可以通过提高超材料吸波体的结构对称性来实现^[19].

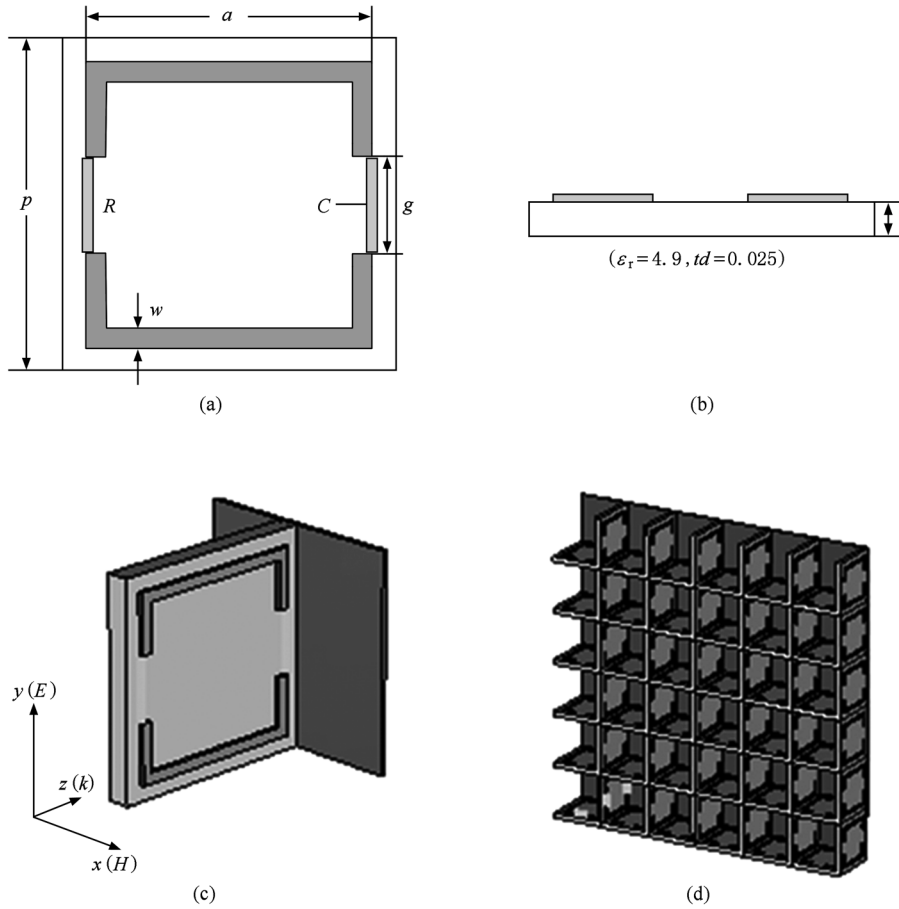


图1 超材料吸波体的结构示意图 (a)加载集总元件的磁谐振器,(b)介质基板,(c)一维阵列结构吸波体的仿真模型,(d)二维阵列结构吸波体

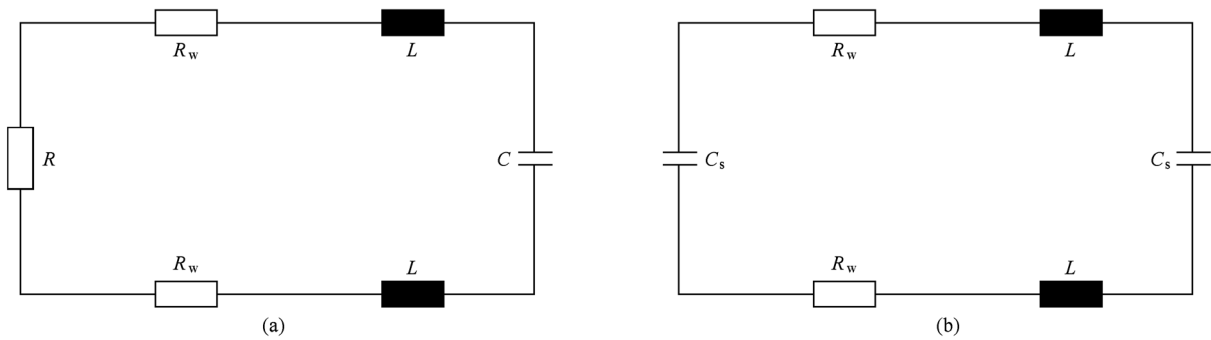


图2 磁谐振器的等效电路图 (a)加载集总元件,(b)不加载集总元件

3. 仿真及分析

利用商业电磁分析软件 CST Microwave Studio 2008 的频域求解器对一维阵列结构吸波体进行仿真. 仿真模型如图 1(c)所示, x - z 平面边界设为完美

电导体, y - z 平面边界设为完美磁导体, x - y 平面边界: $-z$ 方向设为端口 1, $+z$ 方向设为完美电导体. 优化后的加载集总元件的磁谐振器的结构参数如下:单元周期 $p = 10.0 \text{ mm}$,金属线长度 $a = 8.5 \text{ mm}$,金属线宽度 $w = 0.5 \text{ mm}$,开口宽度 $g = 3.0 \text{ mm}$,集总电阻 $R = 250 \text{ } \Omega$,集总电容 $C = 1 \times 10^{-13}$

F, 如图 1(a) 所示. 基板的相对介电常数 $\epsilon_r = 4.9$, 损耗角正切 $td = 0.025$, 基板厚度 $t = 0.3$ mm, 如图 1(b) 所示. 金属线为完美电导体, 厚度为 0.017 mm. 仿真得到了与频率相关的 S 参数 S_{11} , 通过 $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$ 可以计算出加载集总元件和不加载集总元件情况下一维阵列结构吸波体的吸收率, 所得结果如图 3 所示.

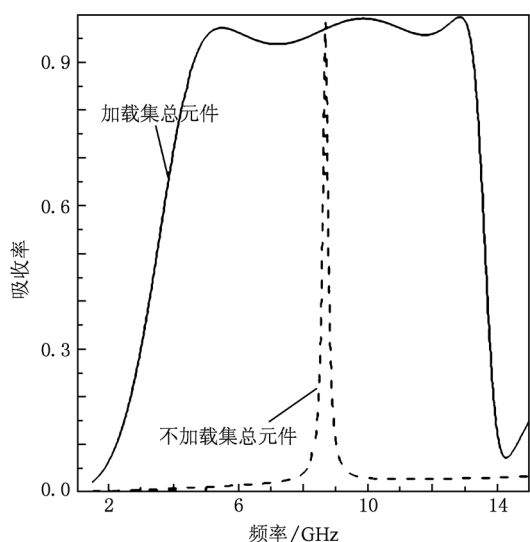


图 3 仿真得到的加载集总元件和不加载集总元件情况下一维阵列结构吸波体的吸收率

由图 3 可以看出: 加载集总元件时, 一维阵列结构吸波体在 4.7—13.3 GHz 之间的吸收率大于 90%, 相对带宽为 95.6%. 这种宽带吸波的实现机理如下: 加载集总元件时, 外加磁场能在很宽的频带内激发磁谐振器中出现感应电流. 这些电流一部

分直接被集总电阻所消耗, 另一部分储存在集总电容中, 而后可以通过集总电容的充放电被集总电阻消耗掉, 从而实现宽带吸波. 不加载集总元件时, 一维阵列结构吸波体仅在 8.7 GHz 有一个吸收率为 98.5% 的吸收峰, 吸收率大于 90% 的相对带宽小于 1%. 该吸收峰的实现机理是阻抗匹配 (此时等效介电常数与等效磁导率相等) 和基板的介质损耗^[15]. 不加载集总元件时, 外加磁场虽然也能在很宽的频带内激发磁谐振器中出现感应电流, 但这些电流缺乏有效的消耗机制. 以上分析表明: 相对于不加载集总元件的情况, 加载集总元件的一维阵列结构吸波体能够实现宽带吸波.

为了研究集总电阻和集总电容取不同值对吸波体吸收效果的影响, 对集总电阻和集总电容取不同值时一维阵列结构吸波体的吸收率进行了仿真计算, 所得结果如图 4 所示. 由图 4(a) 可以看出, 随着集总电阻的增大, 吸收率先增大后减小, 中心频率基本不变. 由图 4(b) 可以看出, 随着集总电容的增大, 吸收率先增大后减小, 中心频率向低频方向移动. 以上仿真结果表明, 集总电阻和集总电容都存在一个最佳值, 此时吸波体的吸收率最高、吸收带宽最宽.

为了研究吸波体内的能量损耗情况, 对基板有耗和基板无耗情况下一维阵列结构吸波体的吸收率进行了仿真, 所得结果如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 在 4.7—13.3 GHz 之间一维阵列结构吸波体在基板无耗情况下的吸收率比在基板有耗情况下的吸收率略小. 以上仿真结果表明, 吸波体内的能量损耗主要源于磁谐振器中加载的集总电阻, 与基板的介质损耗关系不大.

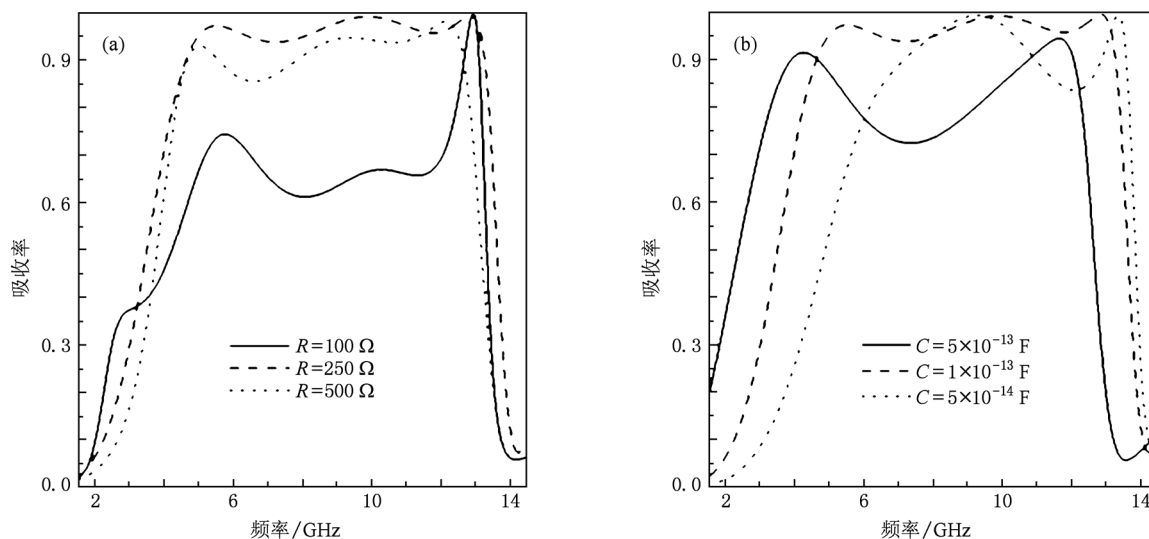


图 4 仿真得到的集总电阻和集总电容取不同值时一维阵列结构吸波体的吸收率 (a) 集总电阻取不同值, (b) 集总电容取不同值

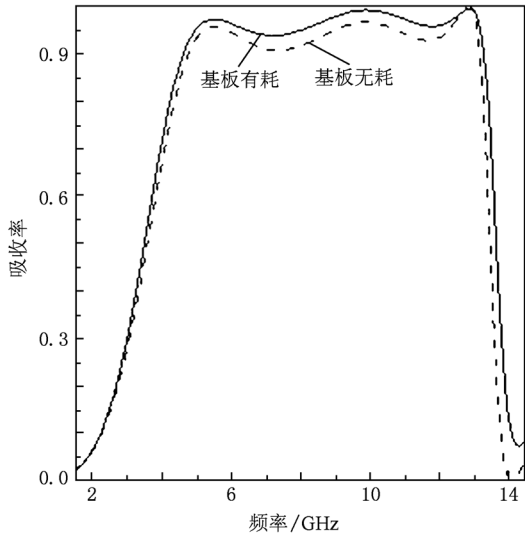


图5 仿真得到的基板有耗和基板无耗情况下一维阵列结构吸波体的吸收率

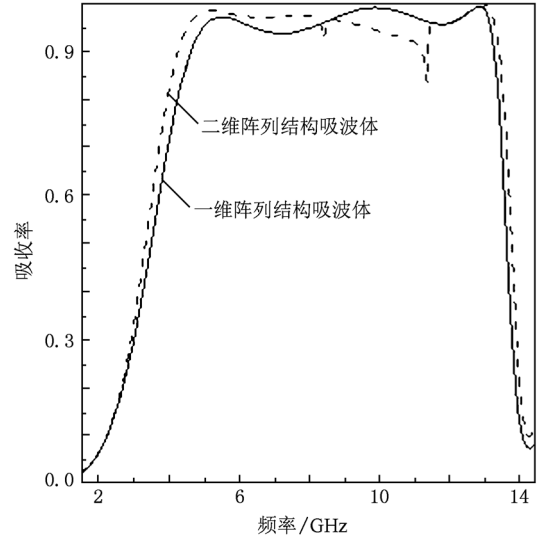


图6 仿真得到的二维阵列结构吸波体的吸收率

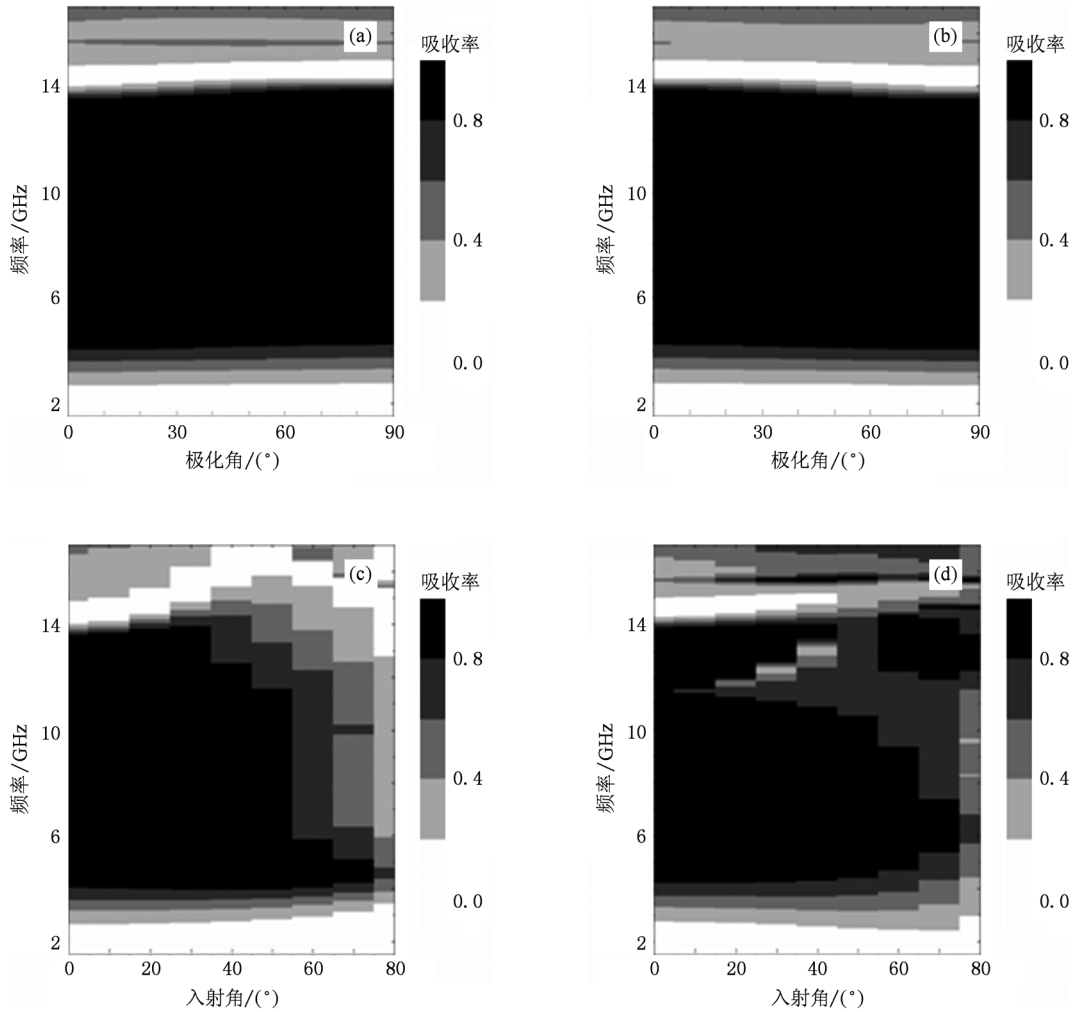


图7 仿真得到的二维阵列结构吸波体在不同极化角和不同入射角下的吸收率 (a)不同极化角下超材料吸波体对横电波的吸收率,(b)不同极化角下超材料吸波体对横磁波的吸收率,(c)不同入射角下超材料吸波体对横电波的吸收率,(d)不同入射角下超材料吸波体对横磁波的吸收率

为了实现极化不敏感和宽入射角特性,将结构单元在 x - y 平面内排列成图 1(d) 所示的具有 90° 旋转对称性的二维阵列结构吸波体. 仿真得到的二维阵列结构吸波体的吸收率如图 6 所示. 由图 6 可以看出,除了在 8.5 和 11.4 GHz 有两个吸收低谷外,在整个计算频段内二维阵列结构吸波体和一维阵列结构吸波体的吸收率近似相等.

为了验证二维阵列结构吸波体的极化不敏感和宽入射角特性,仿真了二维阵列结构吸波体在不同极化角和不同入射角下的吸收率,所得结果如图 7 所示. 由图 7(a) 和 (b) 可以看出,对于横电波和横磁波,极化角在 0° — 90° 变化时二维阵列结构吸波体的吸收率基本不变. 由图 7(c) 和 (d) 可以看出:对于横电波,入射角小于 45° 时二维阵列结构吸波体在 4.7—13.3 GHz 之间的吸收率变化不明显. 对于横磁波,入射角从 20° 变化到 40° 时,在 11.7—13.0 GHz 之间出现了横电波下没有的低谷,该现象是由倾斜入射的电场造成的. 在 4.7—11.7 GHz 之间入射角小于 45° 时,二维阵列结构吸波体的吸收率变化不明显. 以上仿真结果表明,该二维阵列结

构吸波体具有极化不敏感和宽入射角特性.

4. 结 论

本文基于加载集总元件的磁谐振器提出了一种宽频带、极化不敏感和宽入射角的超材料吸波体. 仿真得到的加载集总元件和不加载集总元件情况下一维阵列结构吸波体的吸收率表明,相对于不加载集总元件的情况,加载集总元件的一维阵列结构吸波体能够实现宽频带吸波. 仿真得到的集总电阻和集总电容取不同值时一维阵列结构吸波体的吸收率表明,集总电阻和集总电容都存在一个最佳值,此时吸波体的吸收率最高、吸收带宽最宽. 仿真得到的基板有耗和基板无耗情况下一维阵列结构吸波体的吸收率表明,吸波体内的能量损耗主要源于磁谐振器中加载的集总电阻,与基板的介质损耗关系不大. 仿真得到的二维阵列结构吸波体在不同极化角和不同入射角下的吸收率表明,该二维阵列结构吸波体具有极化不敏感和宽入射角特性.

- [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] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [4] Smith D R, Schurig D, Rosenbluth M, Schultz S, Ramakrishna S A, Pendry J B 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1506
- [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] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, Guérin N, Vincent P 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 213902
- [7] Liu L, He S 2004 *Opt. Express* **12** 4835
- [8] Colladey S, Tarot A C, Pouliguen P, Mahdjoubi K 2005 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **44** 546
- [9] Engheta N 2002 *IEEE Antennas Wireless Propag.* **1** 10
- [10] Marques R, Martel J, Mesa F, Medina F 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 183901
- [11] Alù A, Bilotti F, Engheta N, Vegni L 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 882
- [12] Ali A, Khan M A, Hu Z 2007 *Electron. Lett.* **43** 528
- [13] Tseng C H, Chang C L 2008 *IEEE Microwave. Wireless Compon. Lett.* **18** 25
- [14] Bonache J, Gil I, García G J, Martín F 2005 *Electron. Lett.* **41** 810
- [15] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [16] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **47** 2075
- [17] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [18] Tao H, Landy N I, Bingham C M, Zhan X, Averitt R D, Padilla W J 2008 *Opt. Express* **16** 7181
- [19] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [20] 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
- [21] Avitzour Y, Urzhumov Y A, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 045131

Design of a wide-band metamaterial absorber based on loaded magnetic resonators*

Gu Chao¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)2)†} Pei Zhi-Bin¹⁾ Xu Zhuo²⁾ Bai Peng³⁾ Peng Wei-Dong³⁾ Lin Bao-Qin¹⁾

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)

(Received 14 July 2010; revised manuscript received 24 March 2011)

Abstract

A wide-band, polarization-insensitive and wide-angle metamaterial absorber based on loaded magnetic resonator is proposed. A single unit cell of the absorber is comprised of a magnetic resonator loaded with lumped elements, a substrate and a back metal board. Simulated absorbances of the one-dimensional-array absorber under loading and unloading conditions indicate that compared with under the unloading condition, the one-dimensional absorber under the loading condition can realize a wide-band absorption. Simulated absorbances of the one-dimensional-array absorber with lossy and loss-free substrates indicate that the power loss in the absorber results from lumped resistances in magnetic resonators, and is insensitive to the loss of the substrate. Simulated absorbances of the one-dimensional-array absorber with different lumped resistances and capacitances indicate that there exist optimal values for lumped resistances and capacitances, where the absorbance is highest and the bandwidth is widest. Simulated absorbances of the two-dimensional-array absorber under different polarization angles and different incident angles indicate that the absorber is polarization-insensitive and angle-wide.

Keywords: magnetic resonator, lumped element, 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