

基于宽边耦合螺旋结构的低频小型化极化不敏感超材料吸波体*

鲁磊^{1)†} 屈绍波¹⁾ 施宏宇²⁾ 张安学²⁾ 张介秋¹⁾ 马华¹⁾

1) (空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) (西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

(2013年3月16日收到; 2013年4月22日收到修改稿)

设计、仿真并实验验证了基于宽边耦合螺旋结构的低频小型化超材料吸波体. 实验测试结果表明, 该超材料吸波体在 1.39 GHz 吸收率达到最大为 98%, 其单元尺寸和总厚度均为 6.8 mm, 约为 1/32 工作波长, 实现小型化窄带吸波. 由于吸波体中螺旋结构是旋转对称排列的, 因而其对垂直入射电磁波的极化方向是不敏感的. 此外, 该超材料吸波体对斜入射横电和横磁极化电磁波在 60° 时, 仍具有强吸收.

关键词: 超材料, 吸波体, 小型化

PACS: 81.05.XJ, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.62.158102

1 引言

电磁波吸收材料可以有效降低目标的后向雷达散射截面, 其中比较经典的吸波结构如 Salisbury 吸收屏^[1], 该吸收屏为了对入射电磁波产生强损耗, 需要把损耗电阻片放置于距离金属底板 1/4 工作波长处; 当其工作于高频时, 吸波体的厚度不明显, 但是当工作于低频如 1 GHz 时, 其厚度会很大可以达到 75 mm, 这严重限制了其使用. 2008 年, Landy 等^[2] 提出了基于电磁谐振并在高频 X 波段实现近乎完全吸收的超材料吸波体, 其厚度可以突破 1/4 工作波长的限制, 达到 1/35 工作波长. 通过调节超材料吸波体周期单元中金属结构和基板的几何尺寸, 可以调节谐振频率和共振强度, 进而调节其等效电磁参数, 使得吸波体在与自由空间在实现阻抗匹配的同时产生强损耗, 将入射电磁波转化为热能损耗掉. 随后, 超材料吸波体的研究也从单频带吸收拓展到双频带^[3-5]、三频带^[6,7]和宽带吸收^[8-11]. 然而, 这些研究大都集中于较高频段, 尤

其是被称作频率间隙的太赫兹频段^[4-6]以及光频段^[9].

为了对低频电磁波实现强吸收, 并同时减小吸波体的厚度和周期单元尺寸, 本文采用宽边耦合螺旋结构, 利用金属通孔改变单元金属结构中的异号电荷分布, 以增大宽边耦合电容, 从而降低谐振频率实现小型化. 测试结果表明, 该超材料吸波体在 1.39 GHz 对垂直入射电磁波的吸收率为 98%, 吸波体的厚度和周期单元尺寸大小均为 6.8 mm, 约为 1/32 工作波长. 该超材料吸波体单元结构由于具有四重旋转对称性, 因而对垂直入射电磁波的极化方向是不敏感的.

2 单元结构设计

1999 年, Pendry 提出了可实现负磁导率的开口环谐振器 (split ring resonator, SRR)^[12]. 为了降低磁谐振频率, Marqués 将 SRR 的两个开口环分别置于介质基板的两侧形成宽边耦合 SRR^[13-15] 以增大耦合电容降低磁谐振频率, 随后又采用平面螺旋

* 国家自然科学基金 (批准号: 11274389, 61071058, 11204378) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB623306) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: bblfdd@163.com

结构^[16]进一步降低磁谐振频率. 本文中, 我们将宽边耦合 SRR 基板两侧的开口方环通过金属通孔连接起来形成宽边耦合螺旋结构, 从而改变两开口方环中的异号电荷分布, 产生大的耦合电容, 因而可以进一步降低磁谐振频率. 此外, 还可以通过增大介质基板相对介电常数或是减小基板厚度的方法, 进一步增大宽边耦合电容, 降低螺旋结构的谐振频率, 以减小其在工作频率的电尺寸, 实现小型化.

组成超材料吸波体的宽边耦合螺旋结构如图 1(a) 所示, 其具体尺寸如下: $a = 4.8 \text{ mm}$, $w = 0.3 \text{ mm}$, $g = 0.4 \text{ mm}$; 金属通孔的半径为 $r = 0.5 \text{ mm}$; 介质基板为 FR-4, 其厚度为 $h = 0.4 \text{ mm}$, 介电常数为 4.3, 电损耗角正切值为 0.025; 金属结构成分为铜, 其厚度为 0.02 mm , 电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$. 如图 1(b) 所示, 将该螺旋结构沿 x 轴和 y 轴方向周期排列在金属板上, 其排列周期大小为 $p = 6.8 \text{ mm}$.

采用基于有限积分的 CST 2011 对该超材料吸波体进行全波仿真, 如图 1(b) 所示, 沿 x 轴和 y 轴

方向的边界皆设为周期边界条件; 激励为平面电磁波, 且垂直入射到吸波体表面, 其中电场 \mathbf{E} 沿 $+x$ 方向, 磁场 \mathbf{H} 沿 $+y$ 方向, 波矢 \mathbf{k} 沿 $+z$ 方向.

宽边耦合螺旋结构可采用 RLC 等效电路对其进行描述, 如图 2(a) 所示, 其中 R 为介质基板的介电损耗, 此处忽略了金属中的欧姆损耗, 这是由于在微波波段金属中的欧姆损耗可以忽略不计^[17]; L 为螺旋结构的总电感, 可通过文献 [15] 中的公式计算出; C 为基板两侧金属条带之间的总耦合电容, $C = 4aC_{\text{pul}}$, C_{pul} 为两金属条带间单位长度耦合电容, 可通过文献 [18] 表 2.6 中的公式求出. 该宽边耦合螺旋结构可视为 RLC 串联谐振电路, 其谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4aLC_{\text{pul}}}} = \frac{1}{4\pi\sqrt{aLC_{\text{pul}}}} \approx 1.33 \text{ GHz}. \quad (1)$$

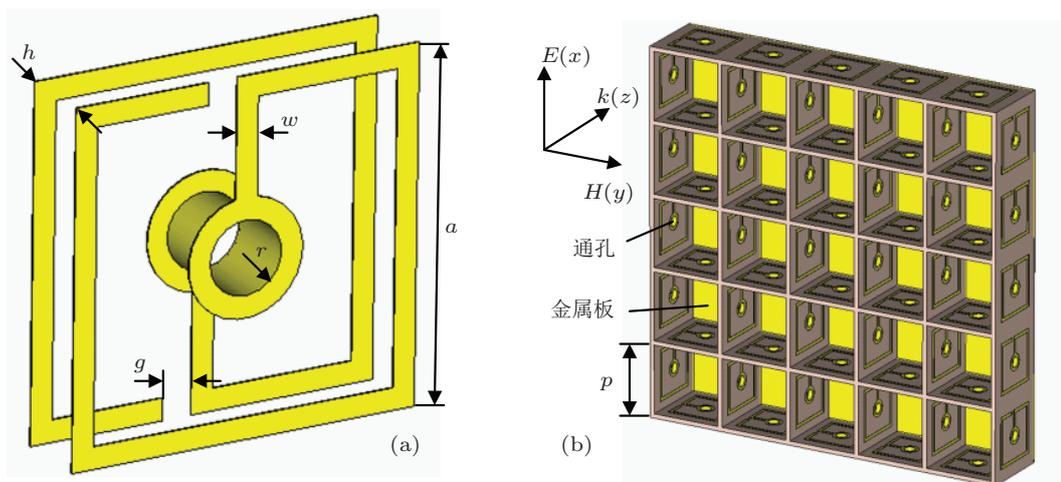


图 1 超材料吸波体结构示意图 (a) 宽边耦合螺旋结构; (b) 排列分布

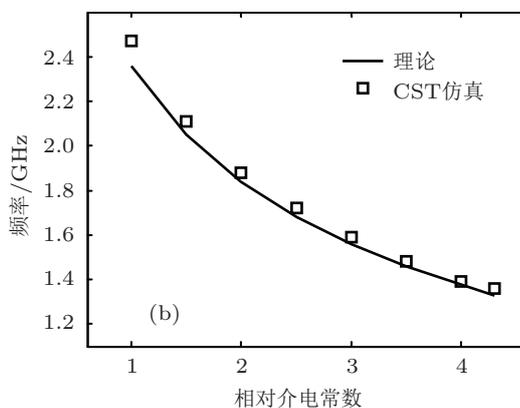


图 2 (a) 螺旋结构等效电路图; (b) 理论与 CST 仿真计算出的谐振频率

图 2(b) 为宽边耦合螺旋结构谐振频率随介质基板相对介电常数的变化曲线. 随着基板相对介电常数的增大, 谐振频率逐渐减小, 理论公式 (1) 的计算结果与 CST 仿真出的结果符合较好, 从而验证了所建立等效电路模型计算公式的有效性.

3 仿真结果与分析

仿真得到超材料吸波体的反射率 (R) 和吸收率 (A) 曲线如图 3 所示, 由于在电磁波传播方向上存在金属底板阻断了电磁波的传播, 因而透射率 (T) 等于 0, 吸收率的计算公式为 $A = 1 - R - T = 1 - R = 1 - |S_{11}|^2$. 在 1.36 GHz, 反射率达到最小 $R \approx 0$, 吸收率达到最大 $A \approx 1$, 电磁波绝大部分能量入射到吸波体内部并被超材料吸波体转化为热能耗散掉. 其半功率带宽约为 5%, 吸波体的总厚度和单元尺寸均为 6.8 mm, 约为 1/32 工作波长.

采用等效参数提取方法 [19-21], 利用仿真得到的散射参数可以反演出超材料吸波体的相对阻抗 z , 其计算公式为

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (2)$$

提取出超材料吸波体的相对阻抗如图 4(a) 所示, 在吸收峰频率 1.36 GHz, 相对阻抗的实部约等于 1, 虚部约等于 0, 从而实现吸波体与自由空间的阻抗匹配. 这种阻抗匹配特性还可以通过反射系数的相位观察出, 如图 4(b) 所示, 在超材料吸波体与自由空间达到阻抗匹配的频率 1.36 GHz, 反射系数的相位会出现跳变.

为了进一步研究超材料吸波体的物理机制, 其在吸收峰频率 1.36 GHz 的表面电流分布如图 5(a)

所示, 介质基板两侧开口方环中的表面电流经过金属通孔组成一个完整的环流, 形成磁偶极子, 产生强烈的磁谐振, 且在螺旋结构首尾重合部分会积累大量异号电荷, 因而此处电场最强, 会产生大的耦合电容, 从而可以显著降低磁谐振频率. 图 5(b) 为介质基板中间位置的电场强度分布, 在螺旋结构的首尾叠加处, 介质基板中的电场最强, 从而进一步验证了通过金属通孔改变介质基板两侧开口方环中的异号电荷分布从而产生大的耦合电容这一设想. 由于 FR-4 介质基板为损耗基板, 因而会在电场最强的位置产生强的介电损耗, 其功率损耗密度如图 5(c) 所示, 可见, 产生强介电损耗的位置正是图 5(b) 中电场最强的位置.

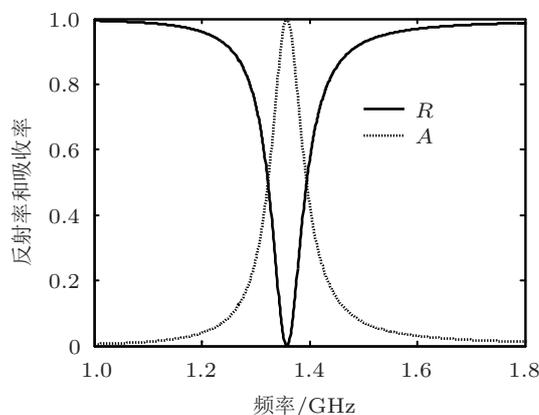


图 3 仿真的反射率和吸收率

超材料吸波体对具有不同极化角垂直入射电磁波的吸收率情况如图 6 所示, 随着极化角从 0° 增加到 90° , 吸收峰的大小和频率都不发生改变. 这主要是因为超材料吸波体中宽边耦合螺旋结构是旋转对称排列的, 因而该吸波体对垂直入射电磁波的极化方向不敏感.

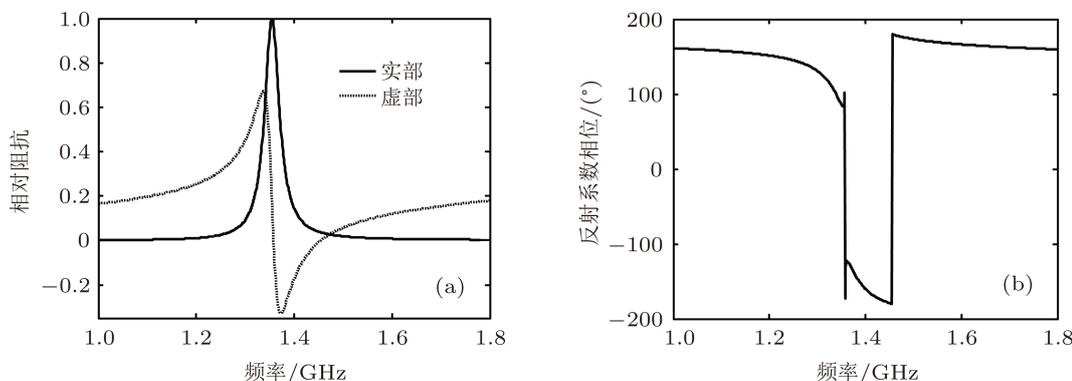


图 4 (a) 超材料吸波体的相对阻抗; (b) 反射系数相位

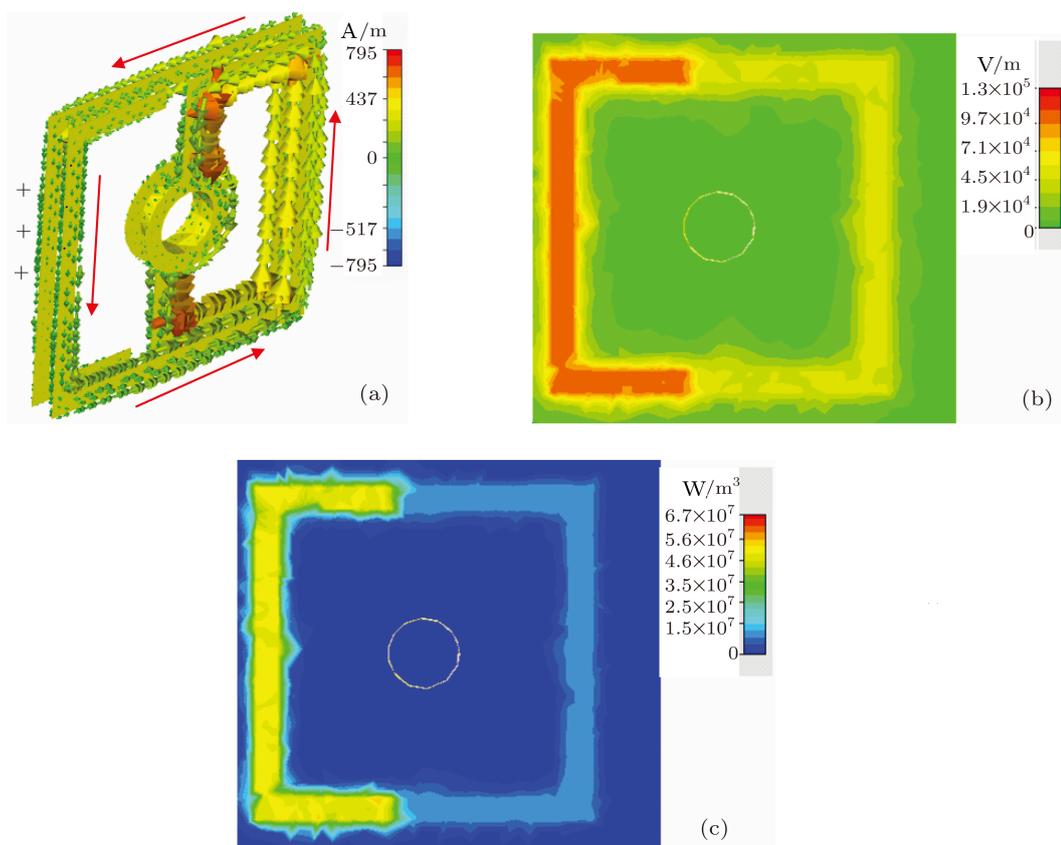


图5 超材料吸波体在吸收峰频率 1.36 GHz 的 (a) 表面电流分布; (b) 电场强度; (c) 功率损耗密度

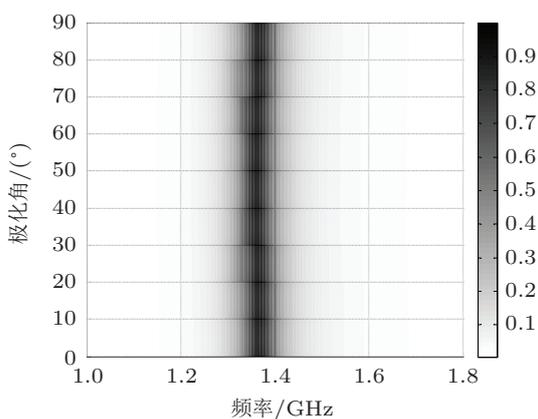


图6 对具有不同极化角垂直入射电磁波的吸收率

为了研究超材料吸波体对斜入射电磁波的吸收情况,图 7(a) 和 (b) 分别给出了其对具有不同斜入射角度横电 (transverse electric, TE) 和横磁 (transverse magnetic, TM) 极化电磁波的吸收率,其中,斜入射角度 θ 为波矢 \mathbf{k} 与吸波体表面法线之间的夹角. 对于 TE 极化波,随着 θ 从 0° 增加到 60° ,吸收峰略微向低频偏移, θ 为 60° 时的吸收率依然可

以达到 88%; 对于 TM 极化波,随着 θ 从 0° 增加到 60° ,吸收峰稍微向高频偏移, θ 为 60° 时的吸收率依然可以达到 91%,因而,超材料吸波体对斜入射 TE 和 TM 极化电磁波具有较好的吸收效果.

4 样品加工与测试

采用印刷电路板技术加工出的超材料吸波体实验样品如图 8(a) 所示,其金属结构的尺寸以及介质基板的参数与图 1(a) 中的仿真参数相同. 实验样品的尺寸大小为 $163.2 \text{ mm} \times 81.6 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$. 采用矩形波导法测试超材料吸波体的散射参数,该 L 波段矩形波导测试系统如图 8(b) 所示,是由型号为 BJ14 的 L 波段标准矩形波导和 HP8270ES 矢量网络分析仪组成,矩形波导的横截面大小为 $165.1 \text{ mm} \times 82.55 \text{ mm}$.

测试得到超材料吸波体的反射率和吸收率曲线如图 9 所示,在 1.39 GHz,反射率达到最小,吸收率达到峰值为 98%,此时电磁波绝大部分能量都被

匹配到吸波体内部, 并被吸波体中的损耗介质基板耗散掉. 吸波体的总厚度为 6.8 mm, 约为 1/32 工作波长, 其半功率带宽为 3%. 测试的吸收峰频率较仿

真结果向高频移动了 0.03 GHz, 这主要是由于实验加工误差引起的. 总之, 实验结果与仿真结果符合较好, 对低频电磁波实现窄带强吸收.

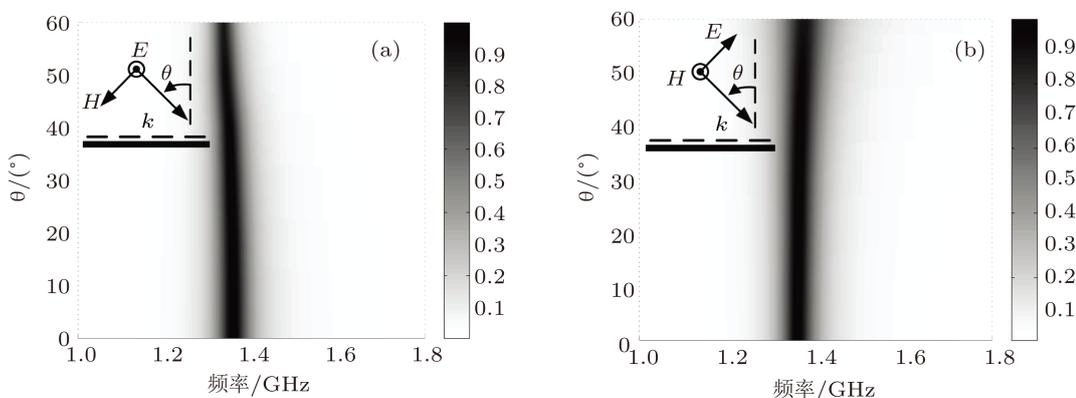


图 7 对不同角度斜入射电磁波的吸收率 (a) TE; (b) TM

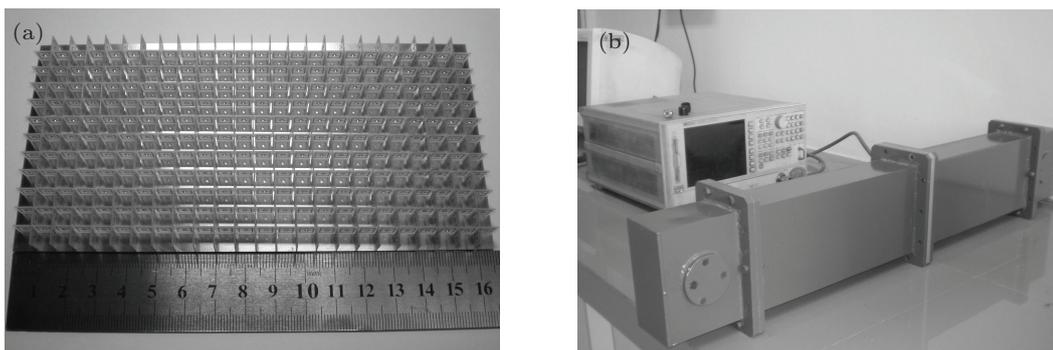


图 8 (a) 测试样品相片; (b) L 波段矩形波导测试系统

5 结论

本文仿真并实验验证了基于宽边耦合螺旋结构的极化不敏感超材料吸波体. 测试结果表明, 该超材料吸波体在 1.39 GHz 吸收率峰值为 98%, 其单元尺寸和总厚度均为 6.8 mm, 约为 1/32 工作波长, 实现小型化窄带吸波. 若要进一步减小吸波体的单元尺寸和厚度, 可以采用结构更为紧凑的多重同心 SRR 或是圈数更多的螺旋线 [22,23], 也可在原有宽边耦合螺旋结构内分别再串联一圈开口环以增加宽边耦合电容和缝隙电容从而降低谐振频率, 这也是我们下一步的工作. 总之, 本文设计的超材料吸波体具有结构紧凑、吸收率高、厚度薄和工

作频率低等特点.

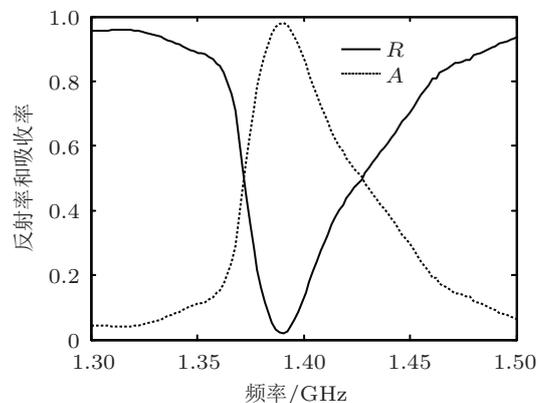


图 9 测试的反射率和吸收率曲线

- [1] Fante R L, McCormack M T 1988 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **36** 1443
- [2] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [3] 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]
- [4] Ma Y, Chen Q, Grant J, Saha S C, Khalid A, Cumming D R S 2011 *Optics Lett.* **36** 945
- [5] He X J, Wang Y, Wang J M, Gui T L, Wu Q 2011 *Progress in Electromagnetics Research* **115** 381
- [6] Shen X P, Yang Y, Zang Y Z, Gu J, Han J G, Zhang W L, Cui T J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 154102
- [7] Ye Q W, Liu Y, Lin H, Li M H, Yang H L 2012 *Appl. Phys. A* **107** 155
- [8] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, Zheng D H, Fan Y N, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134101 (in Chinese) [程用志, 聂彦, 龚荣洲, 郑栋浩, 范跃农, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134101]
- [9] Wang J Q, Fan C Z, Ding P, He J N, Cheng Y G, Hu W Q, Cai G W, Liang E J, Xue Q Z 2012 *Opt. Express* **20** 14871
- [10] Yang Y J, Huang Y J, Wen G J, Zhong J P, Sun H B, Gordon O 2012 *Chin. Phys. B* **21** 038501
- [11] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 055201
- [12] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2075
- [13] Marqués R, Medina F, Raii-El-Idrissi R 2002 *Phys. Rev. B* **65** 144440
- [14] Marqués R, Martel J, Mesa F, Medina F 2002 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **35** 405
- [15] Marqués R, Mesa F, Martel J, Medina F 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 2572
- [16] Baena J D, Marqués R, Medina F 2004 *Phys. Rev. B* **69** 014402
- [17] Raynolds J E, Munk B A, Pryor J B, Marhefka R J 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 5346
- [18] Bahl I, Bhartia P 2003 *Microwave solid state circuit design* (2nd Edn.) (New York: Wiley) p36
- [19] Smith D R, Schultz S, Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [20] Chen X D, Grzegorzczuk T M, Wu B I, Pacheco J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [21] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [22] Alici K B, Bilotti F, Vegni L, Ozbay E 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 071121
- [23] Alici K B, Bilotti F, Vegni L, Ozbay E 2009 *Opt. Express* **17** 5933

A miniaturized low-frequency polarization-insensitive metamaterial absorber based on broadside-coupled spiral structures*

Lu Lei^{1)†} Qu Shao-Bo¹⁾ Shi Hong-Yu²⁾ Zhang An-Xue²⁾
Zhang Jie-Que²⁾ Ma Hua¹⁾

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

2) (School of Electronics & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 16 March 2013; revised manuscript received 22 April 2013)

Abstract

In this paper, we present the design, simulation, and experimental demonstration of a miniaturized low-frequency metamaterial absorber based on the broadside-coupled spiral structures. The tested results indicate that the metamaterial absorber can achieve a miniaturized narrowband absorption with a peak absorption of 98% at 1.39 GHz. Both of the unit cell size and the total thickness of the metamaterial absorber are 6.8 mm that is approximately 1/32 of the working wavelength. Since the spiral structures of the metamaterial absorber are arranged in rotational symmetry, the absorber is polarization-insensitive to the normal incident electromagnetic wave. Additionally, the metamaterial absorber can strongly absorb the obliquely incident electromagnetic wave for both transverse electric and transverse magnetic polarizations, even at 60° angle of incidence.

Keywords: metamaterial, absorber, miniaturized

PACS: 81.05.XJ, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.62.158102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274389, 61071058, 11204378), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB623306).

† Corresponding author. E-mail: bblfdd@163.com