

基于多阶等离子激元谐振的超薄多频带超材料吸波体*

王雯洁 王甲富 闫明宝 鲁磊 马华 屈绍波[†] 陈红雅 徐翠莲

(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2014年1月12日收到; 2014年4月10日收到修改稿)

本文设计了一种超薄螺旋结构超材料吸波体, 其厚度 (1.034 mm) 约为其工作波长 (4.81 GHz, 6.59 GHz, 9.16 GHz, 12.69 GHz 和 13.71 GHz) 的 (1/60, 1/44, 1/32, 1/23, 1/21). 仿真和实验结果表明, 该吸波体在 4.81 GHz, 6.59 GHz, 9.16 GHz, 12.69 GHz 和 13.71 GHz 处吸收率分别达到 94.55%、99.89%、99.73%、99.26% 和 99.41%, 实现了多频带强吸收. 从表面电流和功率损耗密度两个方面分析了产生强吸收的原因, 理论分析表明, 多频带强吸收能在五个相邻频率处产生多阶局域表面等离子激元谐振, 螺旋结构之间强烈的电谐振使超材料结构单元产生强烈的吸收. 该超材料吸波体设计简单、易于制作和应用, 在电磁波吸收中具有应用价值.

关键词: 多频带, 超材料吸波体, 螺旋结构, 等离子激元谐振

PACS: 41.20.Jb, 81.05.Xj

DOI: 10.7498/aps.63.174101

1 引言

近十几年来, 电磁超材料迅速成为国际研究热点^[1]. 电磁超材料的设计是以某种具有特殊功能的人工结构为基础, 通过调整单元结构的不同参数, 实现自然界材料所不具备的物理性质, 例如左手特性^[2]. 电磁超材料在高指向性天线、雷达、聚焦微波波束、电磁波隐形、卫星通信等领域有广阔的应用前景^[3]. 近几年, 超材料的吸波性能受到广泛关注. 2008年, Landy等^[4]提出了微波段超材料完美吸波体的概念, 利用电谐振器、短金属线及介质层构成完美吸波体, 与入射电磁波的电磁分量分别耦合产生电谐振和磁谐振, 使反射系数和透射系数同时达到最小, 吸收率则达到最大, 实现完美吸收. 由于完美吸波体在频谱成像、光探测器、微型测辐射热仪及隐身等方面的广泛应用. 目前, 超材料吸波体已由微波频段不断发展至 THz^[5,6]、红外^[7]

和可见光^[8]波段. 由单频带发展为宽频带^[9-18]、多频带^[19-24]等. 其中, 多频带吸波包括二频带、三频带、四频带吸波体, 但是至今还未有五频带或更多频带的吸波体见诸报道.

本文基于单一的电谐振螺旋结构单元设计出超薄五谐振超材料吸波体, 其厚度 (1.034 mm) 约为其工作波长 (4.81 GHz, 6.59 GHz, 9.16 GHz, 12.69 GHz 和 13.71 GHz) 的 (1/60, 1/44, 1/32, 1/23, 1/21). 利用多阶等离子激元谐振理论阐明了多频带完美吸收的物理机理, 结构单元之间的电谐振引起了超材料强烈的吸收. 仿真和实验验证了所设计超材料吸波体的性能.

2 仿真设计

超材料吸波体结构单元由三层构成, 上层是镜像对称的金属螺旋结构, 中间层是介质基板, 底层是金属背板. 介质基板采用 FR-4 损耗板材, 其介电

* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 61331005, 11204378, 11274389, 11304393, 61302023)、中国博士后科学基金 (批准号: 2013M532131, 2013M532221)、陕西省基础研究计划 (批准号: 2011JQ8031, 2013JM6005) 和航空科学基金项目 (批准号: 20123196015, 20132796018) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

常数为4.3, 电损耗角正切值为0.025, 厚度为1 mm. 金属为铜, 其电导率为 5.8×10^7 S/m, 厚度为0.017 mm. 每个金属螺旋结构单元由四个相同的子螺旋结构组成, 如图1(a)所示. 众所周知, 超材料完美

吸波体的设计机理是通过不断优化超材料的结构参数使超材料吸波体的阻抗与自由空间的阻抗匹配, 使入射电磁波的反射率达到最小, 同时透射率无限接近零, 从而使吸收率接近100%.

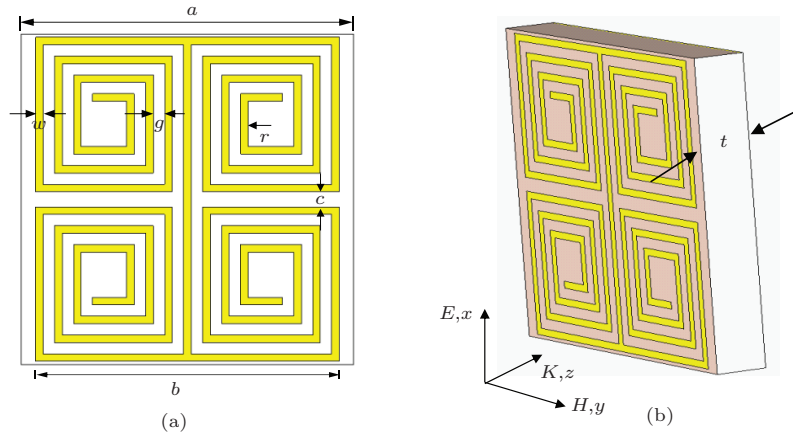


图1 超材料吸波体 (a) 单元结构; (b) 仿真模型

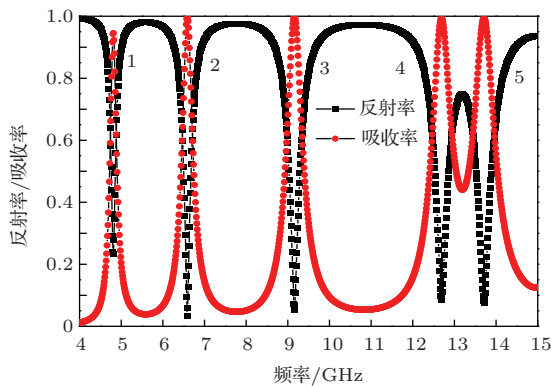


图2 (网刊彩色) 五频带吸波体的反射率和吸收率曲线

采用 CST Microwave Studio 对所设计的超材料吸波体进行全波仿真. 仿真模型如图1(b)所示. 在仿真时, 电磁波沿 z 方向垂直入射到超材料吸波体, x 和 y 方向上的边界条件设为 unit cell 边界. 经优化后的结构参数如下: 单元周期 $a = 11.2$ mm, 内半径 $r = 0.5$ mm, 螺旋结构间隙 $g = 0.3$ mm, 圈数 $n = 3$, 线宽 $w = 0.4$ mm, 螺旋结构长 $b = 9.6$ mm, 子螺旋结构间距 $c = 0.3$ mm. 由仿真得到超材料吸波体的 S 参数 (S_{11} , S_{21}), 进一步可求出反射率 $R(\omega) = |S_{11}|^2$, 透射率 $T(\omega) = |S_{21}|^2$, 由于采用金属背板, $T(\omega) = 0$, 从而得到吸收率 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$, 求得的吸收率如

图2所示, 在 4.81 GHz, 6.59 GHz, 9.16 GHz, 12.69 GHz 和 13.71 GHz 分别出现了强吸收峰, 吸收率分别为 94.55%、99.89%、99.73%、99.26% 和 99.41%, 实现了多频带强吸收.

3 理论分析

为进一步分析五频带吸收产生的物理机理, 分别从表面电流分布和能量损耗密度分布解释五个吸收峰的谐振. 图3(a)对应吸收峰1($f = 4.81$ GHz)时的表面电流分布, 中间金属线及螺旋结构最外层电流分布最强. 在外电场的作用下, 感应电流沿中间金属线产生等离子元振荡, 致使上下相邻两个结构单元之间产生强烈的局域化电场分布, 增强了此区域的介电损耗. 另外, 中间金属线左右两侧螺旋结构中的电流流向正好相反, 产生的感应磁场相互抵消. 为了更清晰描述电流流向, 图3(b)给出了右上角子螺旋结构电流流向放大图. 相应的能量损耗密度分布如图3(c), 说明了吸收峰1能量损耗主要来源于上下相邻结构单元之间强烈的介电损耗. 电磁场不断相互转化, 强烈的电谐振将入射电磁波的能量主要集中在该区域, 以热量的形式损耗掉, 最终磁场也被损耗掉, 再次证明强烈的吸收来自于电谐振.

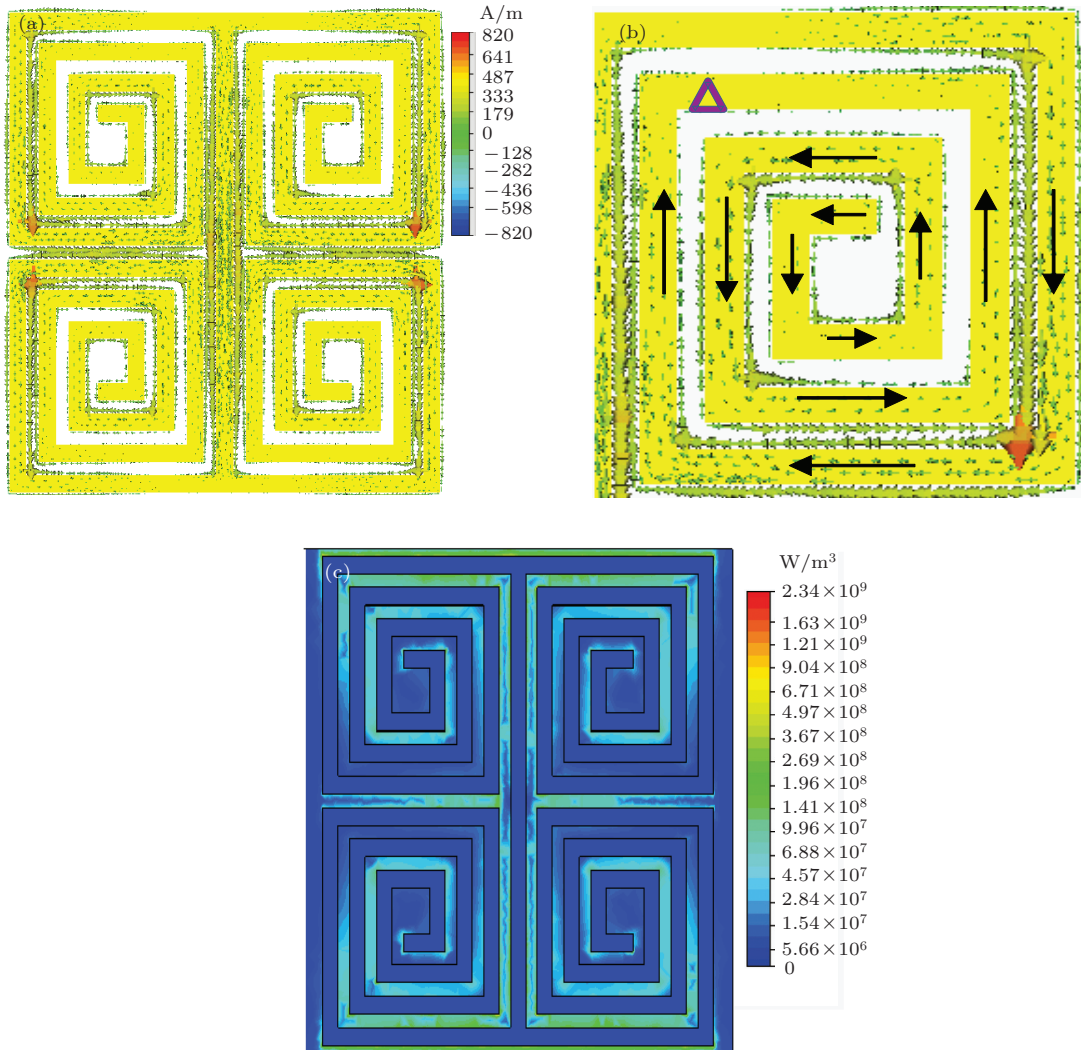


图3 (网刊彩色) 吸收峰频率 4.81 GHz 的 (a) 表面电流分布; (b) 子螺旋结构电流流向放大图; (c) 能量损耗密度分布

图 4(a) 给出了吸收峰 2 对应频率 $f = 6.59$ GHz 处的电流分布. 图中清晰看到螺旋结构单元次外层电流分布最强, 中心连接杆左右两侧螺旋结构中的电流分布也正好相反, 产生的磁场相互抵消, 结构单元中的螺旋结构之间产生强烈的耦合, 产生强烈的电谐振吸收. 图 4(b) 给出了右上角子螺旋结构电流流向放大图. 图 4(c) 给出能量损耗密度分布表明损耗来源于相邻螺旋结构之间的耦合产生的强介电损耗.

图 5(a) 为吸收峰 3 的表面电流分布, 每个子螺旋结构第二层螺旋臂垂直部位上的电流分布最强, 强烈的等离激元振荡使其与左右相邻金属臂产生强烈的耦合. 图 5(b) 电流流向放大图表明电流流向, 图 5(c) 给出了对应的能量损耗密度分布, 说明了吸收峰 3 能量损耗主要来源于第二层螺旋臂与其相邻臂之间的介电损耗.

图 6(a) 为吸收峰 4 的表面电流分布, 图中可以很清楚看到电流分布情况, 电流分布最强的地方聚集在第三层螺旋臂上. 图 6(b) 的螺旋结构电流流向放大图表明电流流向. 图 6(c) 能量损耗密度分布, 第三层螺旋臂与邻近臂的耦合产生了强烈的电谐振. 将电磁场局域在此区间, 大部分能量被介质基板损耗掉.

图 7(a) 为吸收峰 5 的表面电流分布, 图中可以很清楚看到电流分布情况, 电流分布最强的地方聚集在中间金属臂及螺旋结构最外层金属臂上. 与吸收峰 1 处不同的是, 此时在最外层金属臂上产生了二阶等离激元振荡. 图 7(b) 的螺旋结构电流流向放大图表明电流流向. 图 7(c) 能量损耗密度分布表明螺旋结构中长臂与邻近长臂之间的耦合产生了强烈的电谐振, 将电磁场强烈局域在磁区域, 大部分能量被介质基板损耗掉.

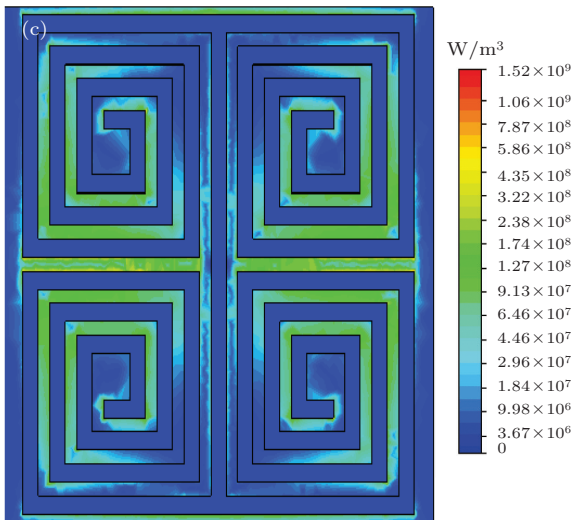
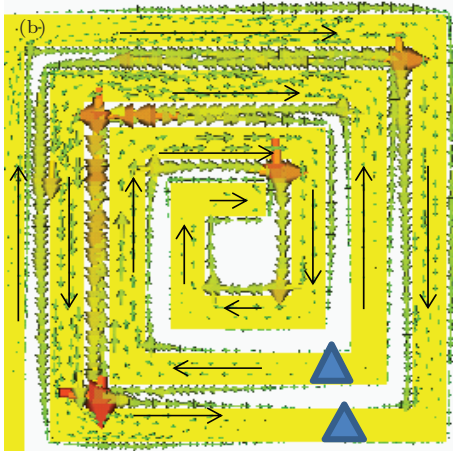
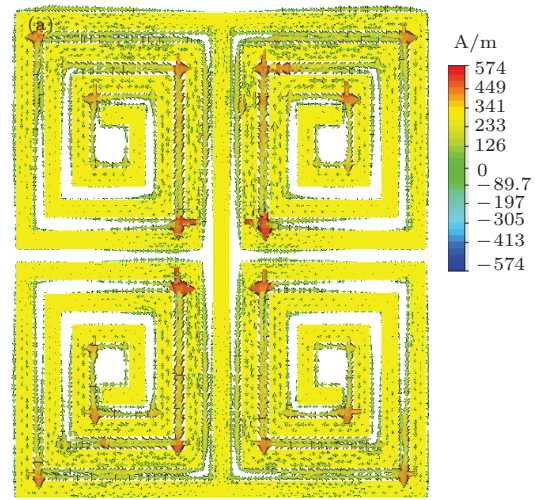


图4 (网刊彩色) 吸收峰频率 6.59 GHz 的 (a) 表面电流分布; (b) 子螺旋结构电流流向放大图; (c) 能量损耗密度分布

由上面的分析可知, 产生能量损耗主要来源是电谐振引起的, 大部分能量被介质基板损耗掉. 中间杆左右两侧子螺旋结构中的电流分布正好相反, 产生的磁场相互抵消, 介质基板两侧金属之间的耦合也比较弱, 磁谐振相对很弱, 电谐振非常强.

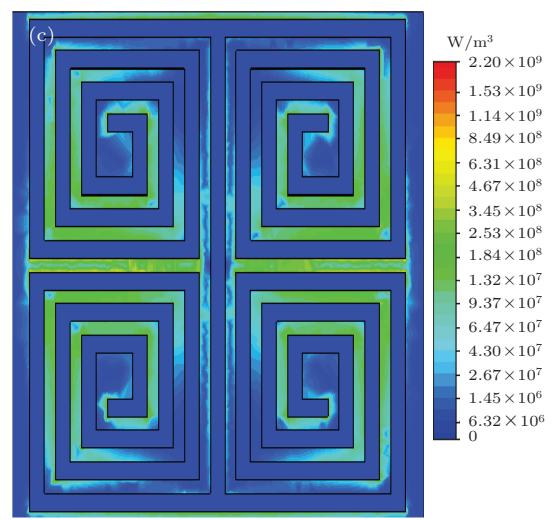
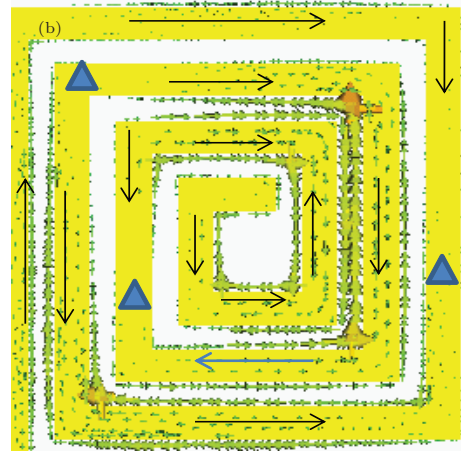
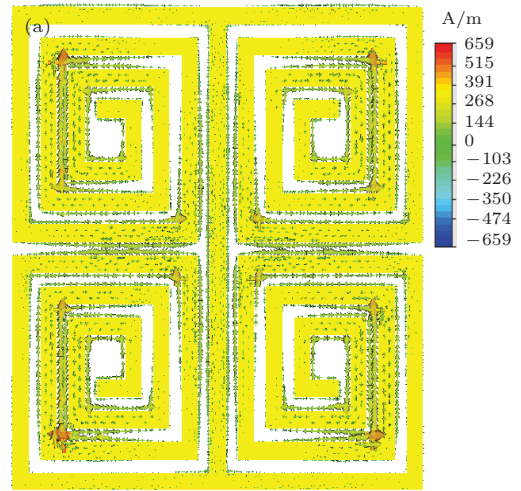


图5 (网刊彩色) 吸收峰频率 9.16 GHz 的 (a) 表面电流分布; (b) 子螺旋结构电流流向放大图; (c) 能量损耗密度分布

电磁波垂直入射时, 吸波体上将产生多阶等离激元谐振^[25]. ϵ_{re} 为吸波体的等效介电常数且有 $1 < \epsilon_{re} < \epsilon_r$, ϵ_{re} 可由下式估算得到^[26]

$$\epsilon_{re} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2},$$

其中 ϵ_r 为介质板的介电常数, 1 为真空的介电常数. 对于图 1(a) 中的吸波体, 吸波体的等效相对介电常数为 2.65.

图 3(b)、图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)、图 7(b) 给出

了在五个谐振吸收频率上, 吸波体表面电流分布的计算结果. 在第二阶谐振频率处, 电流在子螺旋结构中流动, 在子螺旋结构中形成一个驻波节点, 如图 3(b) 中蓝色三角形标注的地方. 在第三阶谐振

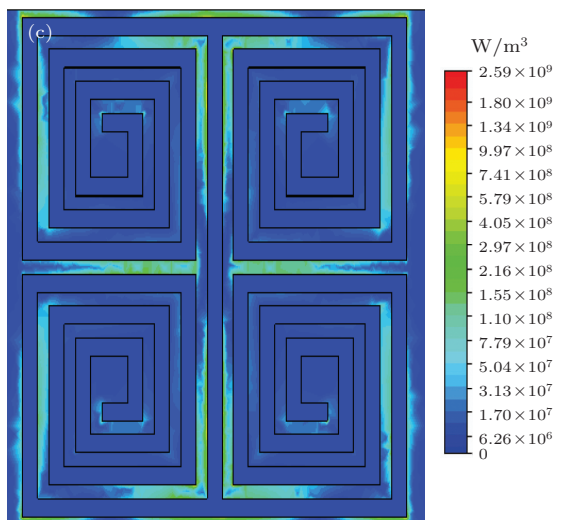
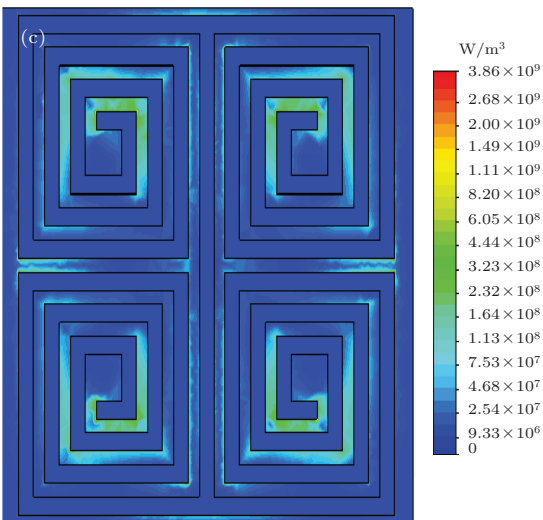
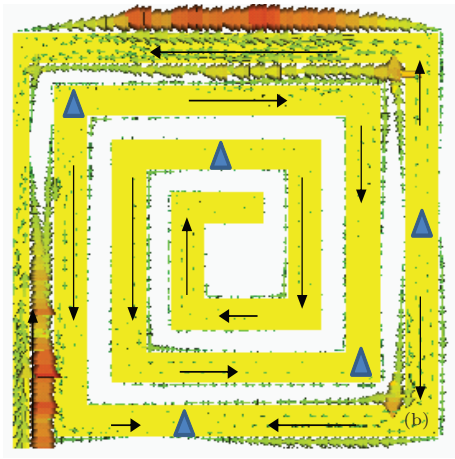
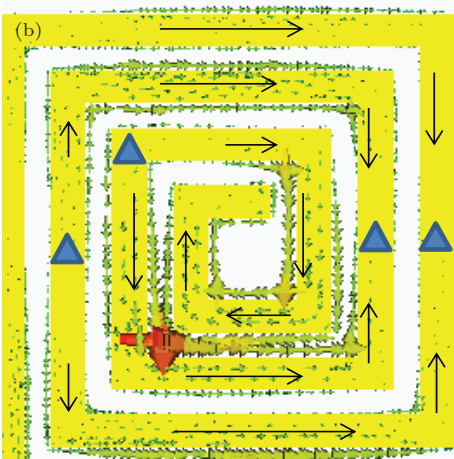
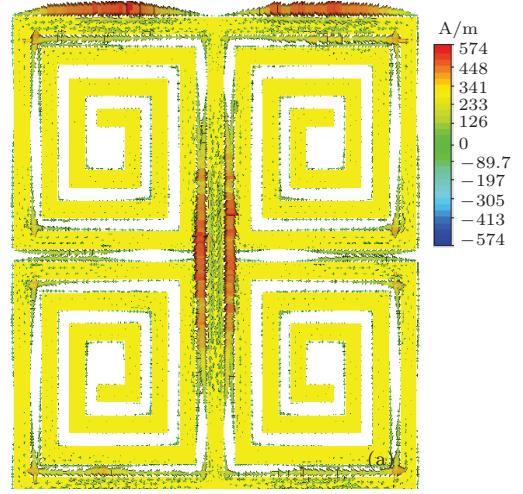
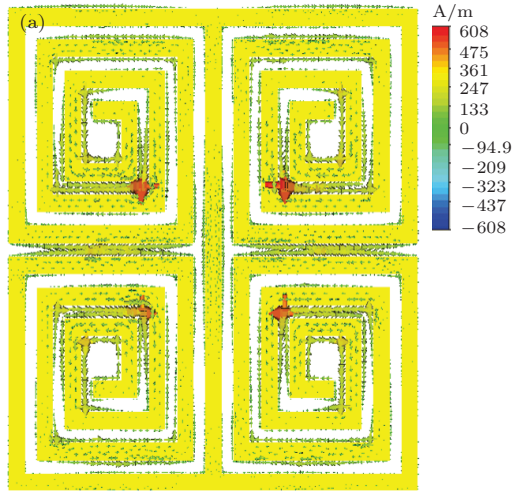


图 6 (网刊彩色) 吸收峰频率 12.69 GHz 的 (a) 表面电流分布; (b) 子螺旋结构电流流向放大图; (c) 能量损耗密度分布

图 7 (网刊彩色) 吸收峰频率 13.71 GHz 的 (a) 表面电流分布; (b) 子螺旋结构电流流向放大图; (c) 能量损耗密度分布

频率处, 电流可被划分为三段, 在图 4(b) 中蓝色三角形标注的地方成两个驻波节点. 在第四、五、六阶谐振频率处, 电流依次可被划分为四、五、六段, 在图 5(b)、图 6(b)、图 7(b) 中蓝色三角形标注的地方, 依次形成三、四、五个驻波节点. 根据每个图中电流节点驻波的波长, 可以根据理论公式计算出相应的谐振频率, 谐振频率公式如下:

$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{c}{2l_n \cdot \sqrt{\epsilon_{re}}}$$

其中 λ_n 是驻波波长, l_n 是图中对应两节点间的长度. 根据上面的公式, 可以依次计算出五个吸收峰谐振频率分别为: $f_1 = 4.75$ GHz, $f_2 = 6.68$ GHz, $f_3 = 9.31$ GHz, $f_4 = 12.45$ GHz, $f_5 = 13.55$ GHz, 理论计算的频率值与仿真模拟的频率值基本符合, 吸波体的多频带吸收来源于金属结构单元上产生的多阶等离激元谐振.

4 实验验证和讨论

图 8(a) 给出了用印制电路板 (PCB) 工艺制造的多频带吸波体样品照片. 此样品包含 27×27 个单元结构, 尺寸为 $302.4 \text{ mm} \times 302.4 \text{ mm}$, 其金属结构的尺寸大小与图 1(a) 中的仿真参数相同. 采用自由空间法在微波暗室中进行测试, 两个 1—18 GHz

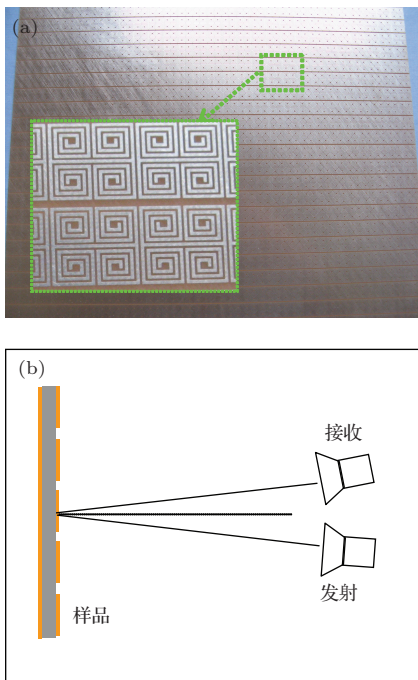


图 8 (网刊彩色) (a) 超材料吸波体试验测试样品; (b) 测试系统简图

的喇叭天线分别与一台 E8363B 型矢量网络分析仪相连接, 一个用来发射信号, 另一个用来接收, 测试系统简图如图 8(b) 所示. 两个喇叭天线到吸波体样品的距离约为 1.5 m, 确保天线发射电磁波为平面波. 测得到超材料吸波体的 S 参数 (S_{11}), 进一步可求出反射率 $R(\omega) = |S_{11}|^2$, 从而得到吸收率 $A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - |S_{11}|^2$, 如图 9 所示, 便于比较也给出了仿真结果. 从图中可以看出, 试验结果与仿真结果基本符合.

实验谐振频率与仿真谐振频率略有偏移, 产生偏移的主要原因有两个: 一是由于实验中 FR-4 基板介电常数与仿真的参数不相同; 二是制作误差及测试样品尺寸有限引起的. 总的来说, 测试结果与仿真结果符合较好, 验证了该超材料吸波体的多频段吸收特性.

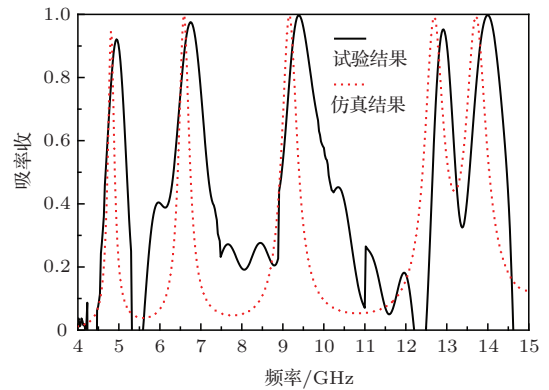


图 9 (网刊彩色) 试验与仿真吸收曲线

5 结 论

本文设计并实验验证了基于螺旋结构的超薄五谐振超材料吸波体, 吸波体厚度 (1.034 mm) 约为其工作波长 $\lambda = c/f$ (4.81 GHz, 6.59 GHz, 9.16 GHz, 12.69 GHz 和 13.71 GHz) 的 (1/60, 1/44, 1/32, 1/23, 1/21). 在外加电磁场的作用下, 在 4.81 GHz, 6.59 GHz, 9.16 GHz, 12.69 GHz 和 13.71 GHz 处吸收率峰值分别达到 94.41%、99.89%、99.73%、99.26% 和 99.41%, 实现多频带强吸收. 研究发现, 吸波体中的谐振器能够在 4.0—14.0 GHz 内的五个相邻频率上产生多阶等离激元谐振, 利用谐振波长计算出的谐振频率与仿真和实验得到的谐振频率基本符合, 这进一步解释了多频带吸收的物理机理.

参考文献

- [1] Ari Sihvola. Metamaterials in electromagnetics 2007 *Metamaterials* **1** 2
- [2] Smith D R, Vier D C, Willie Padilla, Syrus C, Nemat-Nasser, Schultz S 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 1425
- [3] Cui W Z, Ma W, Qiu L D, Zhang H T 2010 *Electromagnetic Metamaterials and its Application* (Beijing: National Defence Industry Press) p1 (in Chinese) [崔万照, 马伟, 邱乐德, 张洪太 2010 电磁超介质及其应用 (北京: 国防工业出版社) 第 1 页]
- [4] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [5] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **101** 24111
- [6] Shen X P, Yang Y, Zang Y Z, Han J G, Zhang W L, Cui T J 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 154102
- [7] Zhu W R, Zhao X P, Gong B Y, Liu L H 2011 *Appl. Phys. A* **102** 147
- [8] Hu C G, Zhao Z Y, Chen X N, Luo X G 2009 *Opt. Express* **17** 11039
- [9] Sun J B, Liu L Y, Dong G Y, Zhou J 2011 *Opt. Express* **22** 21155
- [10] Lu L, Qu S B, Shi H Y, Zhang A X, Xia S, Xu Z, Zhang J Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 2 (in Chinese) [鲁磊, 屈绍波, 施宏宇, 张安学, 夏颂, 徐卓, 张介秋 2014 物理学报 **63** 2]
- [11] Chen S, Cheng H, Yang H, Li J, Duan X, Gu C, Tian J 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 253104
- [12] 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** 8 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 林宝勤, 周航, 柏鹏, 顾巍, 彭卫东, 马华 2011 物理学报 **60** 8]
- [13] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Bai P, Peng W D, Lin B Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 8 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 柏鹏, 彭卫东, 林宝勤 2011 物理学报 **60** 8]
- [14] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 055201
- [15] Mo M M, Wen Q Y, Chen Z, Yang Q H, Qiu D H, Li S, Jing Y L, Zhang H W, Yang Q H, Qiu D H, Li S, Jing Y L, Zhang H W 2014 *Chin. Phys. B* **23** 4
- [16] Fan Y N, Cheng Y Z, Nie Y, Wang X, Gong R Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 067801
- [17] Cheng Y Z, Gong R Z, Nie Y, Wang X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127801
- [18] Nie Y, Cheng Y Z, Gong R Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044102
- [19] Ma Y, Chen Q, Grant J, Shimul C, Saha, Khalid A, David R S 2011 *Optics Letters*. **3** 6
- [20] 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]
- [21] Li L, Yang Y, Liang C H 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063702
- [22] Zhong J P, Huang Y J, Wen G J, Sun H B, Wang P, Gordon O 2012 *Appl. Phys. A* **108** 329
- [23] Ye Q W, Liu Y, Lin H, Li M H, Yang H L 2012 *Appl. Phys. A* **107** 155
- [24] Wang G D, Liu M H, Hu X W, Kong L H, Cheng L L, Chen Z Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 1
- [25] Chen C, Wu S, Yen T 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 34110
- [26] Bahl I, Bhartia P 2003 *Wiley New Jersey*

Ultra-thin multiband metamaterial absorber based on multi-order plasmon resonances*

Wang Wen-Jie Wang Jia-Fu Yan Ming-Bao Lu Lei Ma Hua Qu Shao-Bo[†]
Chen Hong-Ya Xu Cui-Lian

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

(Received 12 January 2014; revised manuscript received 10 April 2014)

Abstract

In this paper, an ultra-thin spiral-structured metamaterial absorber is demonstrated both numerically and experimentally, whose thickness (1.034 mm) is about (1/60th, 1/44th, 1/32th, 1/23th, 1/21th) of the respective working wavelengths (4.81, 6.59, 9.16, 12.69 and 13.71 GHz). Simulation results show that the absorber can achieve absorption up to 94.41%, 99.89%, 99.73%, 99.26% and 99.41% at 4.81, 6.59, 9.16, 12.69 and 13.71 GHz respectively. Thus multi-band absorptions are realized. From the two aspects of surface current and power loss density, the mechanism of strong absorption is analyzed. Theoretical analysis shows that the multi-band absorption arises from multi-order plasmon resonances at five neighboring frequencies. Strong absorptions are induced due to strong electric resonances within/between the spiral structures. Design of the metamaterial absorber is simple and is easy to be implemented, so such absorbers may have application values in designing novel electromagnetic absorbers

Keywords: multi-band, metamaterial absorber, spiral structure, plasmon resonance

PACS: 41.20.Jb, 81.05.Xj

DOI: 10.7498/aps.63.174101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61331005, 11204378, 11274389, 11304393, 61302023), the National Science Foundation for Post-doctoral Scientists of China (Grant Nos. 2013M532131, 2013M532221), the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2011JQ8031, 2013JM6005), and the Aviation Science Foundation of China (Grant Nos. 20132796018, 20123196015).

[†] Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn