

双向多频超材料吸波器的设计与实验研究

韩松 杨河林[†]

(华中师范大学物理科学与技术学院, 武汉 430079)

(2013年3月20日收到; 2013年4月24日收到修改稿)

利用金属线单元组合法, 仿真设计并制作了一种在通信频段 (0.8—3 GHz) 的双向多频超材料吸波器. 仿真与实验结果表明: 该吸波器对于不同极化和宽角度入射的电磁波有三个稳定的吸波频点, 分布在 2.04 GHz, 2.34 GHz 和 2.65 GHz, 吸收率分别达到 92.3%, 95.3% 和 94.7%. 该吸波器设计简单、灵活性强、吸收效果好、易于加工, 为通信领域的电磁屏蔽或抗电磁干扰提供了新的方法.

关键词: 超材料, 双向多频吸收, 极化不敏感, 宽角度入射

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 81.05.Zx

DOI: 10.7498/aps.62.174102

1 引言

自 2001 年 Shelby 等^[1] 首次制备出微波频段磁导率和介电常数同时为负的左手材料以来, 电磁超材料越来越吸引人们的广泛关注. 超材料作为人造有效介质有着不同于自然介质的电磁特性, 如负折射率^[1,2]、完美透镜^[3]、隐身斗篷^[4]、电磁波完美吸收^[5]等. 近年来, 研究人员对超材料的研究从微波段^[6-11] 扩展到太赫兹波段^[12-14]、红外波段^[15-17] 和光波段^[18-20]. 自从 Landy 等^[5] 提出在 GHz 波段具有理想吸波特性的谐振结构以后, 吸波材料作为超介质的一种应用得到了广泛的研究. 对吸波器的研究在保证吸收率较高的基础上, 还追求其对电磁波极化不敏感和入射角度不敏感, 以及多频点、宽频带甚至超宽频带的吸收. Ye 等^[21] 利用半径不同的开口谐振环由内至外排列成复合单元结构, 利用其电容-电感谐振实现对电磁波多个频点的吸收. 以上设计由于单向结构, 对电磁波只呈现单向吸收, 这很大程度上限制了吸波超材料的应用. Hu 等^[22] 提出了双向吸收平面结构超材料吸波器, 该结构对入射电磁波的极化方向敏感. Lu 等^[23] 提出三层完全相同的耶路撒冷十字结构, 实现了超材料吸波器的双向吸收且极化无关, 然而该结构吸收频点单一.

本文基于超材料的有效介质理论^[24] 和理想阻抗匹配理论^[25], 设计仿真并实验验证了一种极化不敏感且在宽角度入射情况下, 依然具有良好吸收效果的双向吸波器. 该吸波器单元结构的谐振频率决定于金属线长度, 特定长度的金属线形成一个独立的谐振, 实现特定频率的吸收. 本文选取的金属线长度主要对应于个人通信系统 (1.85—1.99 GHz), 通用移动通信系统 (1.92—2.17 GHz), 蓝牙 (2.4—2.48 GHz) 和卫星数字媒体广播电视 (2.605—2.655 GHz).

2 单元设计及仿真分析

如图 1 所示, 本文设计的超材料吸波器为三层周期金属线结构, 每两层金属线中间由介质层隔开. 单元结构如图 1(b) 和 (c) 所示, 正面和背面为完全相同的结构, 一个单元由 4 个独立的小单元组合而成, 具体尺寸为: $w = 2.5 \text{ mm}$, $g_1 = 4.75 \text{ mm}$, $g_2 = 4.55 \text{ mm}$, $h_1 = 37.6 \text{ mm}$, $h_2 = 33 \text{ mm}$, $h_3 = 29.5 \text{ mm}$, 中间层结构尺寸为: $g_3 = 3.25 \text{ mm}$, $g_4 = 3.05 \text{ mm}$, $w_1 = 4 \text{ mm}$, $L = 38 \text{ mm}$, 整个单元结构尺寸为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$. 介质基板为 FR-4, 介电常数 $\epsilon = 3.9(1 + i0.025)$, 厚度 $T = 3 \text{ mm}$, 覆铜厚度 $t = 35 \mu\text{m}$, 电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$. 如图 1(a) 所示, 激励源设为从 z 方向入射的平面波, 电场 E 沿 x 方

[†] 通讯作者. E-mail: hlyang@hpy.cnu.edu.cn

向, 磁场 H 沿 y 方向. 利用时域有限差分法 (FDTD) 的仿真计算电磁参数 S_{11} 和 S_{12} , 结果如图 2 所示. 从图 2 看出, 在 2.01 GHz, 2.38 GHz 和 2.69 GHz 三个频点处都有强烈的谐振, 电磁波入射到吸波器表面既不形成透射也不形成反射, 则实现对电磁波的吸收. 利用公式 $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{12}|^2$, 计算得到吸收率随频率的变化如图 3 所示, 在上述三个频点对应的吸收率分别达到了 92.6%, 95.9% 和 85.8%.

对于不同极化的电磁波, 仿真结果如图 4 所示,

在极化角度从 0° 到 90° 变化时吸收频点和吸收率完全一致, 说明吸波器构对不同极化方向的电磁波不敏感. 这主要源于对单元结构进行旋转, 形成中心对称结构, 保证不同极化的电磁波入射到吸波器上均能形成强烈的谐振, 参见图 1(b) 和 (c).

图 5 为不同入射角度时, 吸波器的吸收率随频率的变化. 从图可见, 当入射角度在 0° 到 40° 之间变化时, 三个谐振频点基本保持不变, 其吸收效果总体呈下降趋势. 在入射角度为 40° 时, 吸收效果

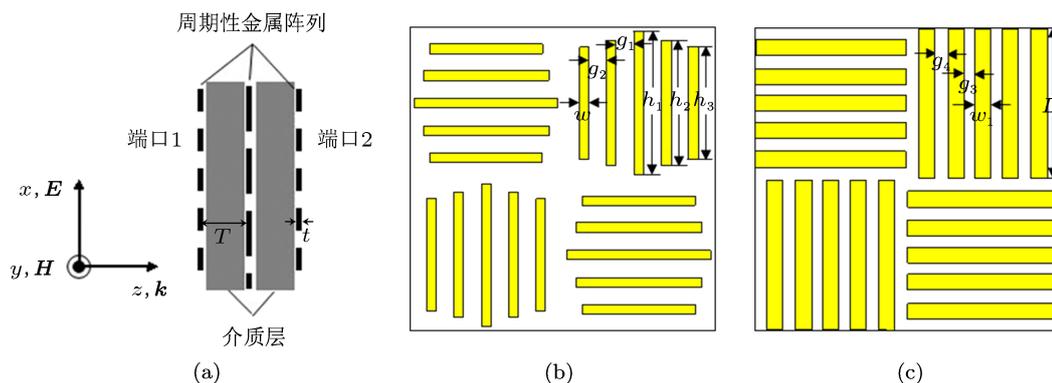


图 1 吸波器结构示意图 (a) 侧视图; (b) 表面单元结构; (c) 中间层单元结构

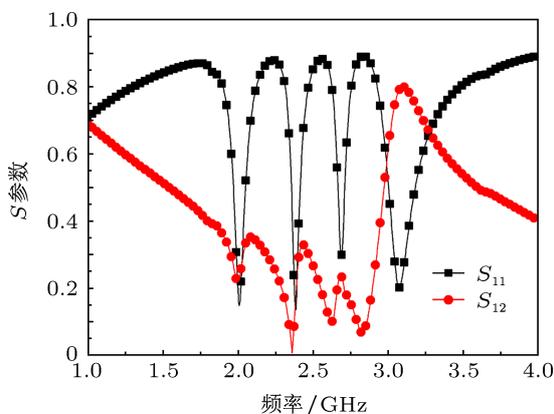


图 2 正入射下 S_{11} 和 S_{12} 随频率的变化

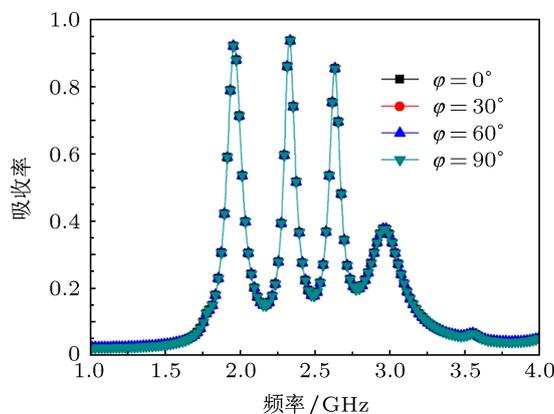


图 4 不同极化下吸收率随频率的变化

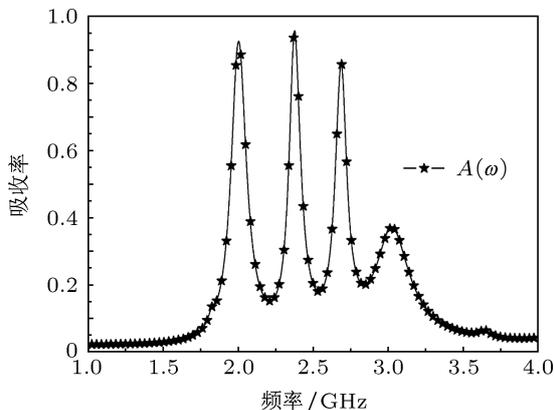


图 3 正入射下吸收率随频率的变化

达到最小, 谐振频点分布在 2.01 GHz, 2.38 GHz 和 2.69 GHz 三处, 且在这三个频点的吸收率分别为 93.4%, 88.3% 和 74.8%. 相比于正入射, 在 2.01 GHz 处吸收率上升了 0.8%, 而在 2.38 GHz 和 2.69 GHz 处吸收率分别下降了 7.9% 和 12.7%. 说明该吸波器对斜入射的电磁波能够保持较好的吸收效果, 这是因为采用了单元结构的轴对称的排列方法, 实现了宽角入射的特点, 如图 1(b) 和 (c) 所示.

单元结构在 2.01 GHz, 2.38 GHz 和 2.69 GHz 三个谐振点上的表面电流分布如图 6 所示, 可以解释单元结构的电磁谐振机制. 图 6(a) 显示最长金属线

上中间部分有表面电流出现,说明此处有强烈的谐振,电流集中在金属线的中部自下而上流动,类似电偶极子谐振;图 6(b) 显示表面电流主要集中在中间金属线旁边两条金属线中部,方向自下而上流动,部分表面电流分布在中间金属线上自上而下流动;图 6(c) 显示表面电流主要分布在最短两条金属线中部,方向自下而上流动,部分表面电流分布在其旁边金属线上,方向自上而下流动.图 6(b) 和 (c) 所示的谐振方式与 (a) 相同.由此说明该吸波器的作用机制可以看成是偶极子谐振,由于单元结构上的金属线宽度均匀,谐振频点仅由金属线的长度控制,每个长度的金属线代表一个偶极子,形成一个吸收峰.三个不同长度的金属线便得到三个不同的吸收频点.

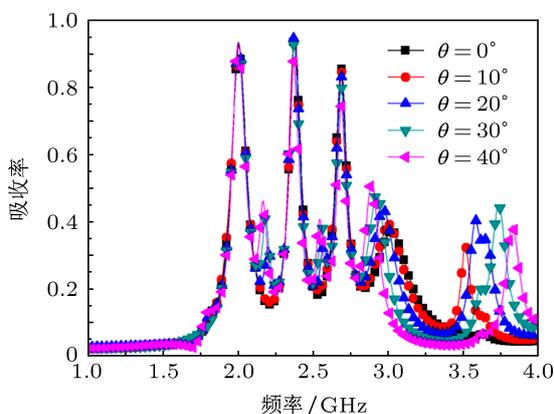


图 5 不同入射角度下吸收率随频率的变化

3 实验及结果分析

采用 PCB(Printed Circuit Board) 工艺,制作 3 mm 厚度两块样品板,第一块是双面板,正反面金属线结构分别如图 7(a) 和 (b) 所示,第二块是单面板,金属线结构如图 7(a) 所示,最后用黏合剂将两块样品粘在一起得到最终样品,由 4×4 个单元组成,尺寸为 $32 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$.用矢量网络分析仪 (Agilent PNA E8362) 连接双脊喇叭天线在自由空间对样品的电磁特性进行测量.

图 8 和图 9 分别给出了在正入射情况下 S_{11} 和 S_{12} 的仿真结果与测量结果,其中测量 S_{11} 时入射电磁波与材料表面法线约为 4.5° 夹角,近似看成垂直入射.由图可见实验和仿真基本符合,实验测得 S_{11} 和 S_{12} 的每一个谐振峰值都低于 -15 dB ,吸收率都能达到 90% 以上.计算结果显示,在 2.04 GHz, 2.34 GHz 和 2.65 GHz 三个频点处吸收率分别达到

92.3%, 95.3% 和 94.7%. 实验相对于仿真出现整体略微偏移,这是由于实际的介质板 FR-4 的介电常数与设定的 $\epsilon = 3.9(1 + i0.025)$ 略有不同.另外,测量时外界环境的干扰也会导致测量结果与仿真结果的差异.

图 10(a) 和 (b) 分别为不同极化的电磁波的 S 参数测量结果, (c) 为吸收率曲线.由于单元结构的

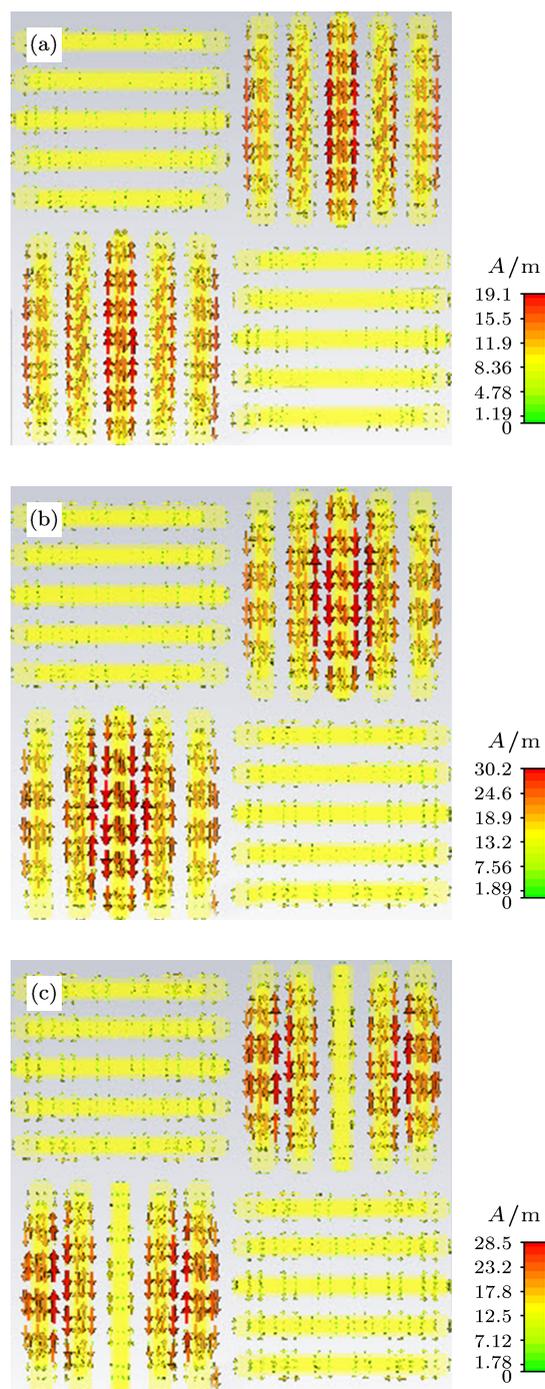


图 6 正入射时吸波器表面电流分布 (a) 2.01 GHz; (b) 2.38 GHz; (c) 2.69 GHz

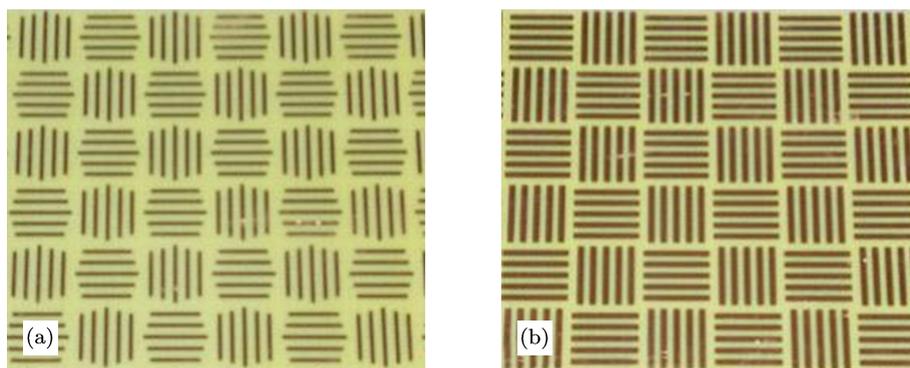


图7 实物样品(部分图) (a)正面和背面结构; (b)中间层结构

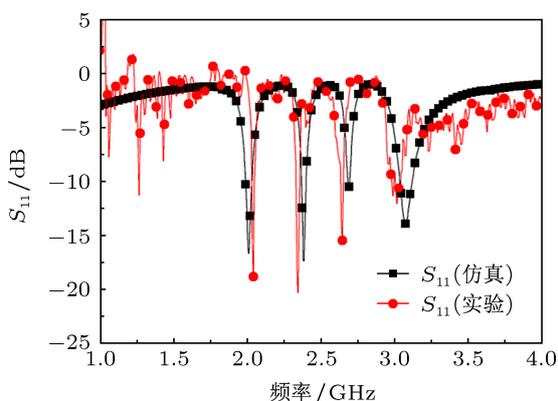


图8 S_{11} 仿真结果和测量结果对比

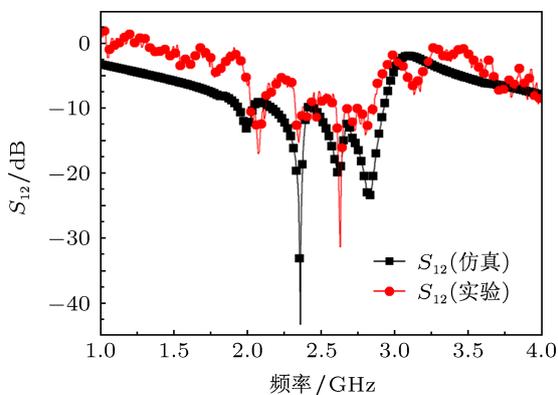


图9 S_{12} 仿真结果和测量结果对比

完全对称, 实验测量吸波器的极化特性时选取在 x - y 平面的 0° , 45° 和 90° 三个方向^[21] 进行测量. 从实验结果可见, 极化角度在 0° 到 90° 之间变化时, 吸波器的谐振频点保持不变, 如图 10(a) 和 (b) 所示; 其吸收率也保持不变, 如图 10(c) 所示. 表明该吸波器具有极化不敏感特性.

S 参数随入射角变化的测量结果如图 11 所示, 从图可见, 入射角在 0° 到 40° 之间变化时谐振频点和吸收率基本保持不变, 图 11(a) 和 (b) 所示; 在最大入射角 40° 时, 在 2.04 GHz 和 2.35 GHz 两个频点上, 吸收率达到 94% 和 98.6%, 2.69 GHz 频点处

吸收率为 83.3%, 如图 11(c) 所示. 由此表明该吸波器具有宽角度入射特性.

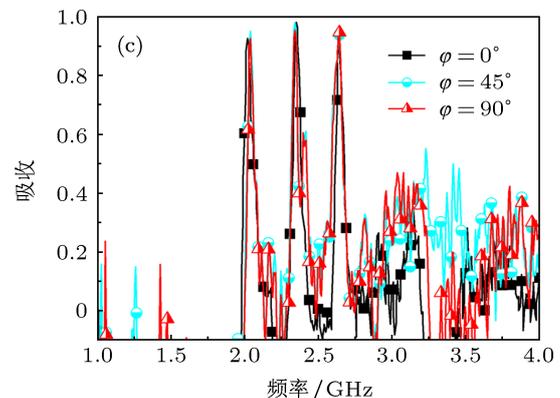
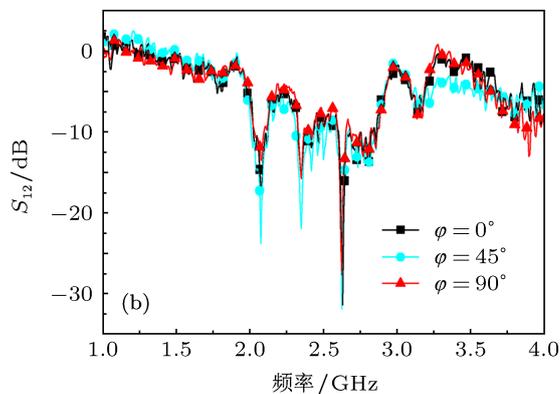
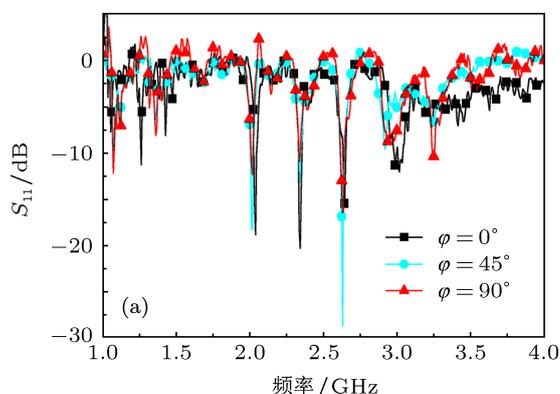
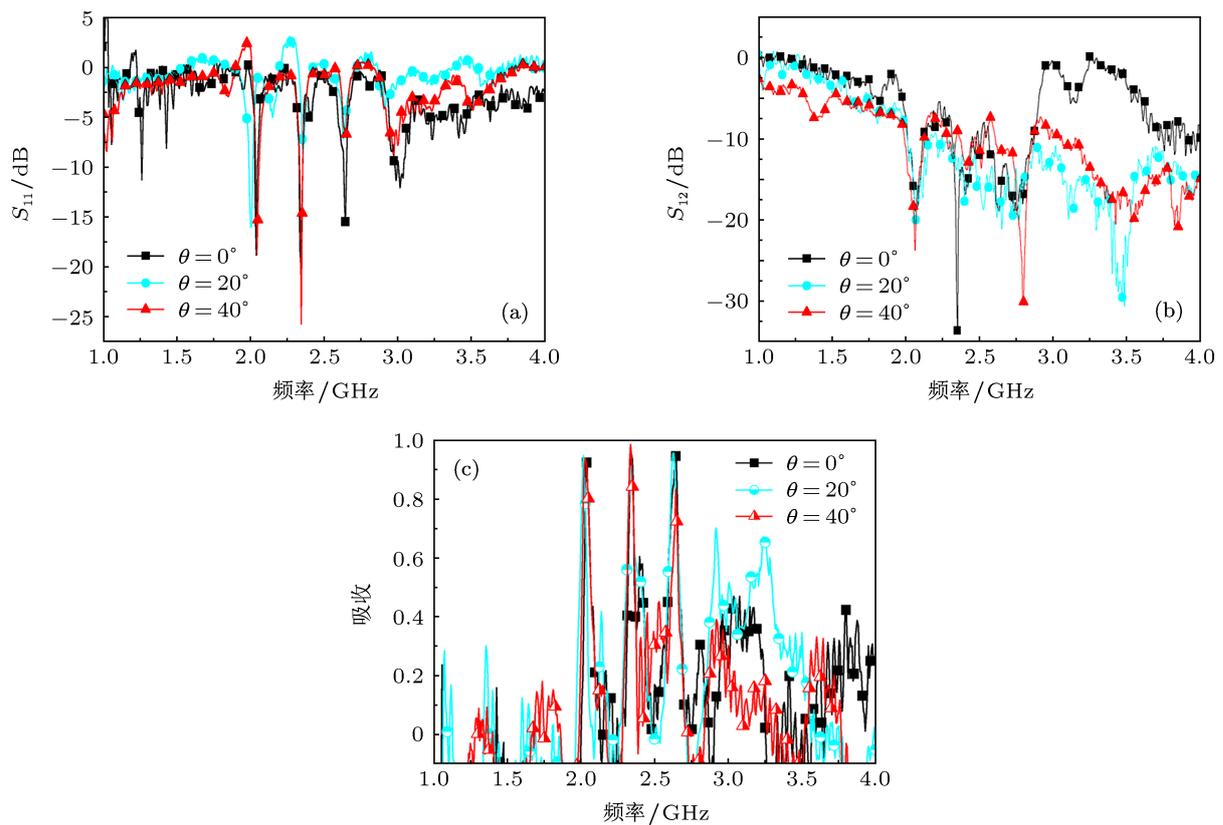


图10 不同极化下 S 参数随频率的变化 (a) S_{11} ; (b) S_{12} ; (c) 吸收率

图 11 不同入射角度下 S 参数随频率的变化 (a) S_{11} ; (b) S_{12} ; (c) 吸收率

4 结论

本文利用单元组合法, 设计了三层金属线双向超材料吸波器. 利用偶极子谐振效应, 形成了对电磁波较完美的吸收. 针对所研究的频段, 选择合适的金属线并调整好金属间距的情况下, 每一条金属线产生一个谐振点, 形成特定的频率的吸收, 因此可以通过增加金属线的数目, 实现三个或三个以上

的吸收频点, 这极大地增强了该吸波器在实际应用中的灵活性. 单元结构旋转形成中心对称结构使得该吸波器对不同极化的电磁波保持完全相同的谐振频点和吸收率; 单元结构的轴对称使得该吸波器在宽角度入射情况下依然保证良好的吸收效果. 该吸波器工作频率分布在通信频段 (0.8—3 GHz), 因此, 该吸波器在通信频段电磁波的屏蔽和防电磁干扰方面有着广泛的应用.

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [2] Parazzoli C G, Greigor R B, Li K, Koltenbah B E C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401
- [3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [4] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [5] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [6] Zhang H B, Deng L W, Zhou P H, Zhang L, Cheng D M, Chen H Y, Liang D F, Deng L J 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 013903
- [7] Cheng Y Z, Xiao T, Yang H L, Xiao B X 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 0536 (in Chinese) [程用志, 肖婷, 杨河林, 肖柏勋 2010 物理学报 **59** 0536]
- [8] 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]
- [9] 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]
- [10] Su Y Y, Gong B Y, Zhao X P 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 084102 (in Chinese) [苏妍妍, 龚伯仪, 赵晓鹏 2012 物理学报 **61** 084102]
- [11] Xu Y Q, Zhou P H, Zhang H B, Chen L, Deng L J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044102
- [12] Kim J, Soref R, Buchwald W R 2010 *Opt. Express* **18** 17997
- [13] Sabah C, Roskos H G 2012 *Current Applied Physics* **12** 433
- [14] Gu C, Qu S B, Pen Z B, Xu Z, Lin B Q, Ma H, Bai P, Peng W D, Zhou H 2011 *Scientia Sinica Phys. Mech & Astron* **41** 280 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 林宝勤, 马华, 柏鹏, 彭卫东, 周航 2011 中国科学: 物理力学天文学 **41** 280]
- [15] Liu N, Mesch M, Weiss T, Hentschel M, Giessen H 2010 *Nano Lett.* **10** 2342
- [16] Jiang Z H, Yun S, Toor F, Werner D H, Mayer T S 2011 *ACS Nano* **5** 4641

- [17] Wang J, Chen Y T, Hao J M, Yan M, Qiu M 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 074510
- [18] Dai L, Jiang C 2009 *Opt. Express* **17** 20502
- [19] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, Atwater H A 2011 *Nat. Commun.* **2** 517
- [20] Lin C H, Chern R L, Lin H Y 2011 *Opt. Express* **19** 415
- [21] Ye Q W, Liu Y, Hai L, Li M H, Yang H L 2012 *Appl. Phys. A* **107** 155
- [22] Hu C G, Li X, Feng Q, Chen X N, Luo X G 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 053103
- [23] Lu L, Qu S B, Xia S, Xu Z, Ma H, Wang J F, Yu F 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 013710 (in Chinese) [鲁磊, 屈绍波, 夏颂, 徐卓, 马华, 王甲富, 余斐 2013 物理学报 **62** 013710]
- [24] Smith D R, Pendry J B 2006 *Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [25] Avitzour Y, Yaroslav A, Urzhumov, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 04513

Study on the design and measurement of dual-directional multi-band metamaterial absorber

Han Song Yang He-Lin[†]

(College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

(Received 20 March 2013; revised manuscript received 24 April 2013)

Abstract

Using the method of combination, we have made a communicational band (0.8 GHz to 3 GHz) dual-directional metamaterial absorber. Simulation and experimental results show that the absorber to the incident electromagnetic wave of different polarization and wide-angle has three stable absorbing bands(2.04, 2.34, and 2.65 GHz), and the absorptions can reach 92.3%, 95.3% and 94.7% respectively. This kind of absorber is very simple in design, having strong flexibility, perfect absorption, and easy processing, which works in a communicational band (0.8 to 3 GHz) so that it provides a new idea on electromagnetic shielding and anti interference.

Keywords: metamaterials, dual-directional multi-band absorbing, polarization insensitive, wide-angle incidence

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 81.05.Zx

DOI: 10.7498/aps.62.174102

[†] Corresponding author. E-mail: hlyang@hpy.ccnuc.edu.cn