

基于电磁谐振的极化无关透射吸收超材料吸波体*

鲁磊¹⁾ 屈绍波^{1)†} 马华¹⁾ 余斐¹⁾ 夏颂²⁾ 徐卓²⁾ 柏鹏³⁾

1) (空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) (西安交通大学, 电子材料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研究中心, 西安 710051)

(2012年10月10日收到; 2012年11月28日收到修改稿)

仿真并实验验证了基于电磁谐振的极化无关透射吸收超材料吸波体, 该吸波体可以实现低频透射和低频吸收. 实验测试结果表明, 该吸波体在 6.77 GHz 吸收率峰值为 83.6%, 半功率带宽为 4.3%, 实现窄带强吸收. 为进一步拓展该谐振型超材料吸波体的吸收带宽, 利用其低频透射特性, 将两个工作于不同频段的吸波体叠加在一起, 测试结果表明, 复合后超材料吸波体的半功率带宽可以增大到 10.9%, 吸收率也略有增强. 该超材料吸波体设计简单, 具有较强的实用性和应用前景.

关键词: 极化无关, 透射吸收, 超材料吸波体

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

DOI: 10.7498/aps.62.104102

1 引言

近年来, 超材料吸波体引起了全世界研究者的广泛关注. 2008 年, Landy 等^[1] 提出了基于电谐振器和短金属带结构的微波波段超材料吸波体, 其中, 电谐振器激发电谐振实现对入射电磁波电场的耦合, 电谐振器的中间部分与短金属带上存在反向电流可以引起磁谐振实现对入射波磁场的耦合. 此后, 超材料吸波体的设计也从微波波段^[1-5] 进一步拓展到太赫兹频段^[6-8] 以及红外波段^[9-13] 和光波段^[14-16]. 然而, 上述大部分超材料吸波体结构需要金属底板, 因而在吸收频段以外的所有电磁波会被吸波体反射回波源, 这限制了超材料吸波体的应用范围. 2010 年, Gu 等^[17] 提出了宽带低反射超材料吸波体, 然而该吸波体是极化相关的, 而且采用了集总元件, 从而使得样品加工复杂且成本较高.

本文仿真并实验验证了基于电磁谐振的极化无关透射吸收超材料吸波体, 该吸波体对电磁波可以实现低频透射, 高频吸收, 因而可用于实现低频

信号通信和低频信号吸收, 可以有选择地实现信号屏蔽和保证信息安全. 由于该超材料吸波体具有低频透射特性, 因而将两个工作于不同频段的吸波体在电磁波传播方向上进行叠加, 可以有效拓展该谐振型超材料吸波体的工作带宽.

2 结构设计和仿真

超材料吸波体的结构如图 1(a) 和 (b) 中的灰色区域所示, 由金属开口方环和“工”形结构组成, 且分别置于介质基板的两侧. 其立方单元结构如图 1(c) 所示, 将此单元周期排列则形成图 1(d) 所示的超材料吸波体. 开口方环和“工”形结构的具体尺寸如下: $a = 5.6 \text{ mm}$, $b = 4.2 \text{ mm}$, $c = 4.8 \text{ mm}$, $l = 5.6 \text{ mm}$, $w_1 = w_3 = 0.4 \text{ mm}$, $w_2 = 1.2 \text{ mm}$, $g = 0.6 \text{ mm}$. 金属结构为铜, 其电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$, 厚度为 0.02 mm . 立方单元周期大小为 7.8 mm . 介质基板采用 FR-4 损耗板材, 其介电常数为 4, 电损耗角正切值为 0.025, 厚度为 0.6 mm . 采用基于有限积分的商业电磁软件 CST 微波工作室对超材料吸波体进行全波仿真. 如图 1(c) 所示, 其中电场 E 沿

* 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: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

+x 方向, 磁场 H 沿 +y 方向, 电磁波沿 +z 方向垂直入射到超材料吸波体. 在 CST 软件仿真中, x 和 y 方向上的边界条件设为 unit cell 边界, 可以模拟无

限周期阵列. 如图 1(c) 和 (d) 所示, 由于该超材料吸波体的单元结构在 x 和 y 方向上具有旋转对称性, 因而该超材料吸波体是极化无关的.

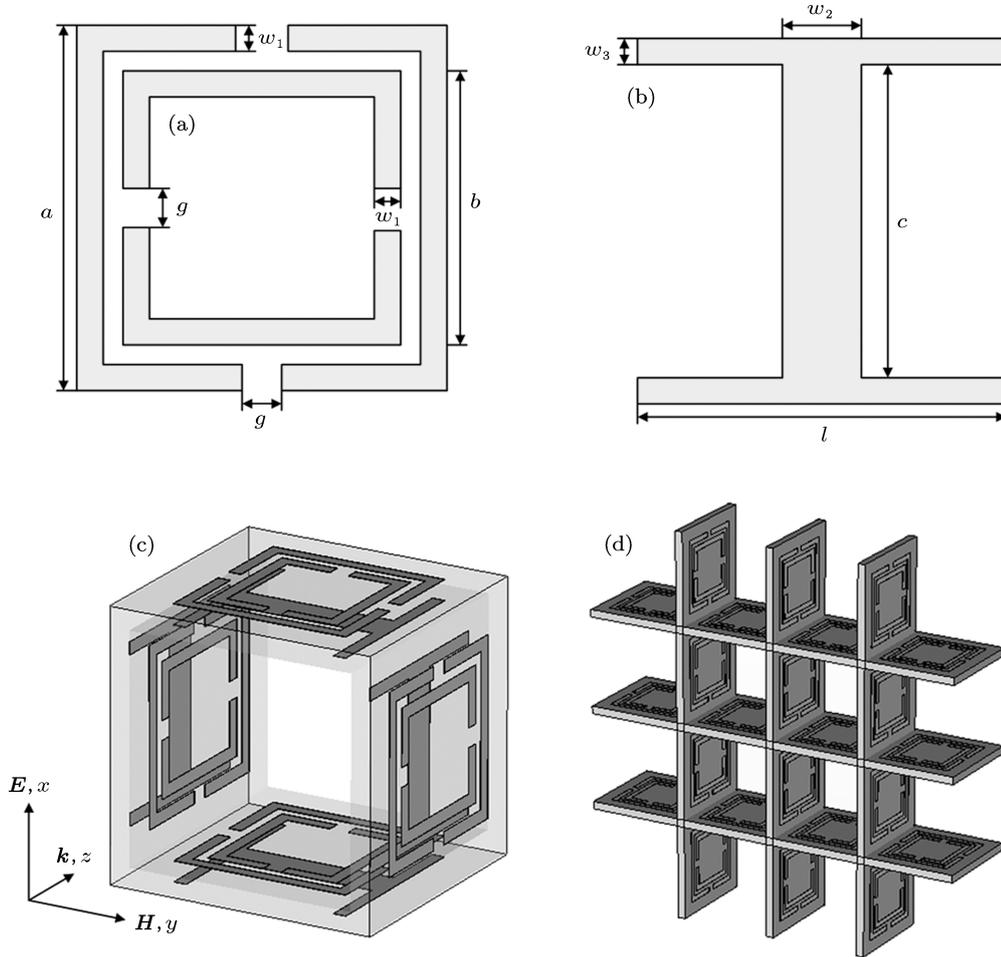


图 1 超材料吸波体的 (a) 开口方环, (b) “工”形结构, (c) 单元, (d) 周期排列

仿真得到超材料吸波体的反射率 (R)、透射率 (T) 和吸收率 (A) 曲线如图 2(a) 所示, 其中 $R = |S_{11}|^2$, $T = |S_{21}|^2$, $A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$. 在低频段, 反射率较小, 而透射率较大, 此时电磁波大部分透射出超材料吸波体; 随着频率的增大, 反射率和透射率曲线在 6.77 GHz 相交, 且二者幅值都很小, 此时吸收率达到最大为 81.7%, 半功率带宽为 4.9%, 实现窄带强吸收; 在更高频段, 反射率较大, 而透射率较小, 此时电磁波大部分被超材料吸波体反射回波源. 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 2(b) 所示. 随着极化角从 0° 逐渐增加到 80° , 吸收峰的频率和幅值大小基本保持不变, 因而该超材料吸波体是极化无关的.

超材料吸波体在吸收峰频率 6.77 GHz 的表面

电流分布如图 3 所示. “工”形结构中间金属带左右两侧的表面电流方向相同, 可以实现电谐振, 但是左右两侧表面电流的大小不同, 右侧电流明显强于左侧; 开口方环的表面电流分布也同样存在左右两侧金属带上的电流方向相同, 但是大小不同. “工”形结构和开口环的两侧部分可以一起构成两个流向相反但是大小不同的环流, 正是由于两个环流的大小不同, 从而使得由两个环流产生的磁谐振不能够相互抵消, 因而整体表现为磁谐振. 由于强烈的电、磁谐振可以将电磁波的电场和磁场局域在超材料吸波体中, 且介质基板为有耗基板, 因而可以实现对入射电磁波的强吸收, 其中微波波段的强吸收主要来源于介质基板的介电损耗 [1].

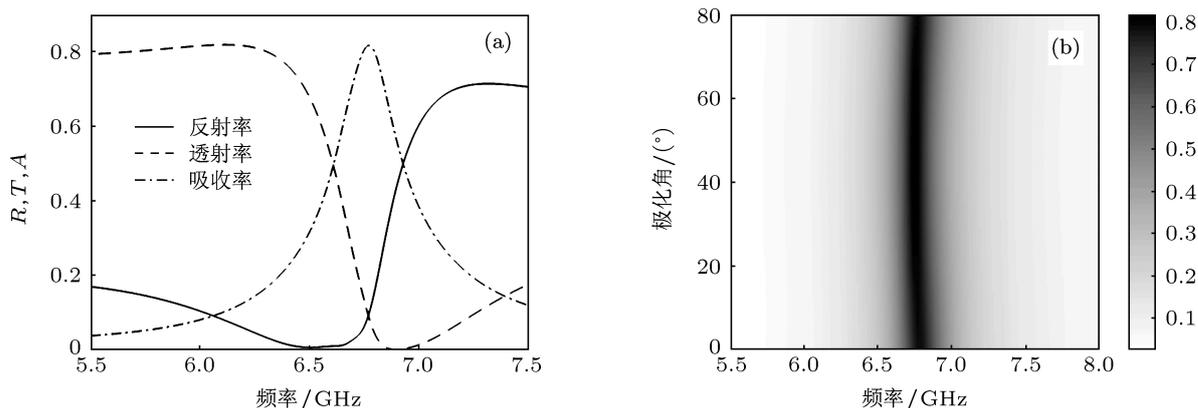


图2 (a) 仿真的反射率、透射率和吸收率; (b) 不同极化角情况下的吸收率

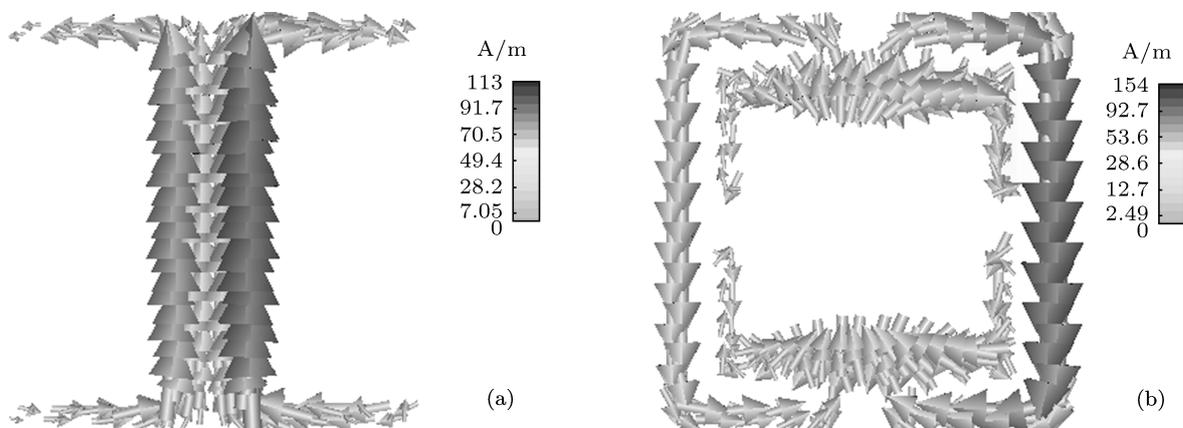


图3 吸收峰频率 6.77 GHz 的表面电流分布 (a) “工”形结构; (b) 开口方环

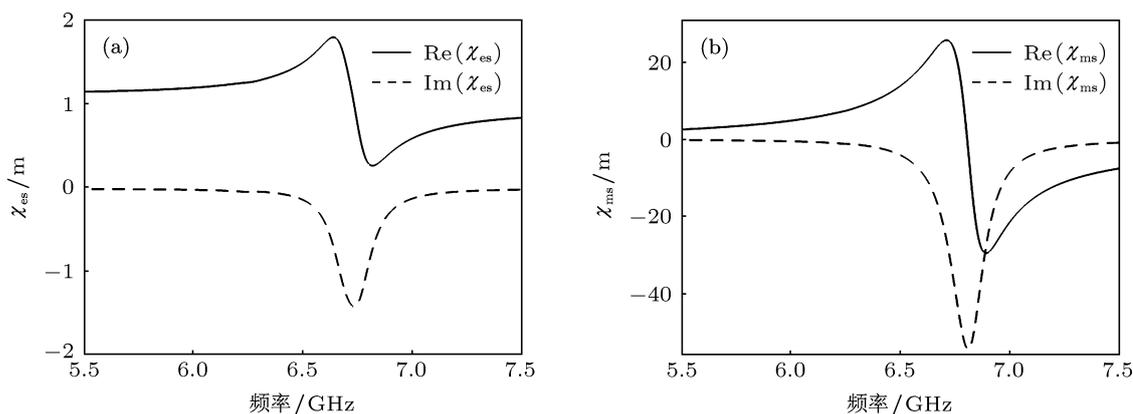


图4 仿真提取超材料吸波体的面极化率 (a) χ_{es} ; (b) χ_{ms}

为进一步研究超材料吸波体的电磁谐振特性, 图4 仿真提取了超材料吸波体的面极化率^[18]. 对于单层超材料, 又可称作超膜或超表面^[19], 可以采用面极化率对其进行描述, 面极化率是取值惟一且最恰当的描述参数^[20-23], 该方法的优点是不存在等效介质理论中提取等效电磁参数^[24,25]所出现的

多值和违反因果律等问题. 对于垂直入射横电极化电磁波, 面极化率为

$$\chi_{es} = -\frac{2i}{k_0} \frac{1-r-t}{1+r+t}, \quad (1)$$

$$\chi_{ms} = -\frac{2i}{k_0} \frac{1+r-t}{1-r+t}, \quad (2)$$

其中, r 和 t 分别为反射系数和透射系数, k_0 为自由空间波数. 由于本文中时间因子采用 $e^{i\omega t}$, 因而所提取出的面电极化率 χ_{es} 和面磁化率 χ_{ms} 的虚部均应小于零, 图 4 中, Re 表示面极化率的实部, Im 表示面极化率的虚部. 如图 4 所示, 在吸收峰频率 6.77 GHz 存在强烈的电谐振和磁谐振, 且强谐振带来强损耗, 从而进一步验证了该超材料吸波体的电磁谐振特性.

3 样品的加工和测试

采用印刷电路板技术加工出的超材料吸波体样品如图 5(a) 所示, 并将其记为吸波体 1. 由于采用矩形波导法只能测试有限周期结构, 因而只加工出图 1(d) 中周期排列超材料吸波体中的有限尺寸, 其金属结构的尺寸大小与图 1 中的仿真参数相同, 样品的总大小为 $34.8 \text{ mm} \times 15.7 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm}$, 共 4×2 个单元. 矩形波导测试系统如图 5(d) 所示, 是由型号为 BJ70 的 C 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 $34.849 \text{ mm} \times 15.799 \text{ mm}$. 测试吸波体 1 得到的反射率、透射率和吸收率曲线如图 6(a) 所示, 在 6.67 GHz, 吸收率峰值为 83.6%, 半功率带宽为 4.3%. 比较图 6(a) 和图 2 可知, 测试的吸收峰频率较仿真结果向低频移动了 0.1 GHz, 这主要是由于加工误差引起的. 总体上, 测试的反射率、透射率和吸收率曲线与仿真结果符合较好.

由于低频电磁波可以透过该超材料吸波体, 因而可以将另一个工作于较低频率的超材料吸波体置于其后实现吸收频段叠加, 从而进一步拓展该超材料吸波体的吸收带宽. 采用该方法, 首先通过调节图 1(a) 和 (b) 中金属开口方环和“工”形结构的尺寸大小, 可以改变超材料吸波体的吸收峰频率. 保持其他参数均不变, 只改变 $a = 5.8 \text{ mm}$, $b = 4.4 \text{ mm}$, $c = 5.0 \text{ mm}$, $l = 5.8 \text{ mm}$, 加工出的第二个超材料吸波体样品如图 5(b) 所示, 并将其记为吸波体 2. 测试吸波体 2 得到的反射率、透射率和吸收率曲线如图 6(b) 所示, 在 6.22 GHz, 吸收率峰值为 83.2%, 半功率带宽为 4.3%.

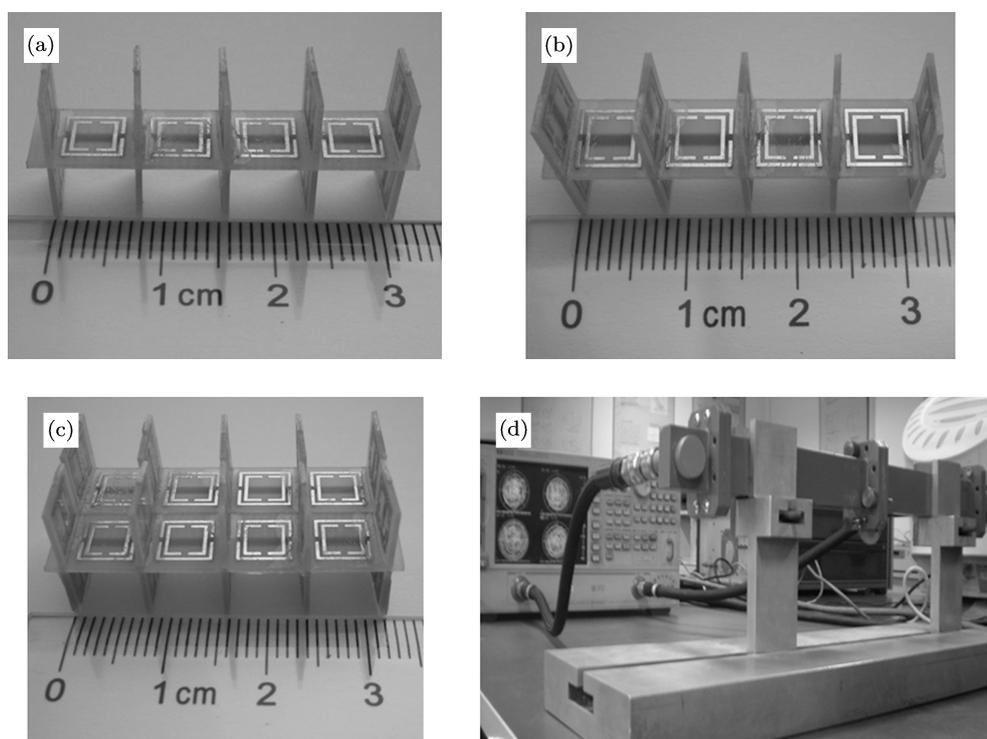


图 5 加工样品和测试系统 (a) 吸波体 1; (b) 吸波体 2; (c) 吸波体 1 和 2 复合; (d) C 波段矩形波导测试系统

将吸波体 1 和吸波体 2 叠加在一起, 如图 5(c) 所示, 并将该吸波体放置于矩形波导中, 电磁波首先垂直入射到吸波体 1, 此时高频电磁波被吸收和

反射, 而低频电磁波则穿过吸波体 1 后入射到吸波体 2, 从而被吸波体 2 吸收或是透射出去. 测试得到复合吸波体的反射率和透射率曲线如图 6(c) 所示,

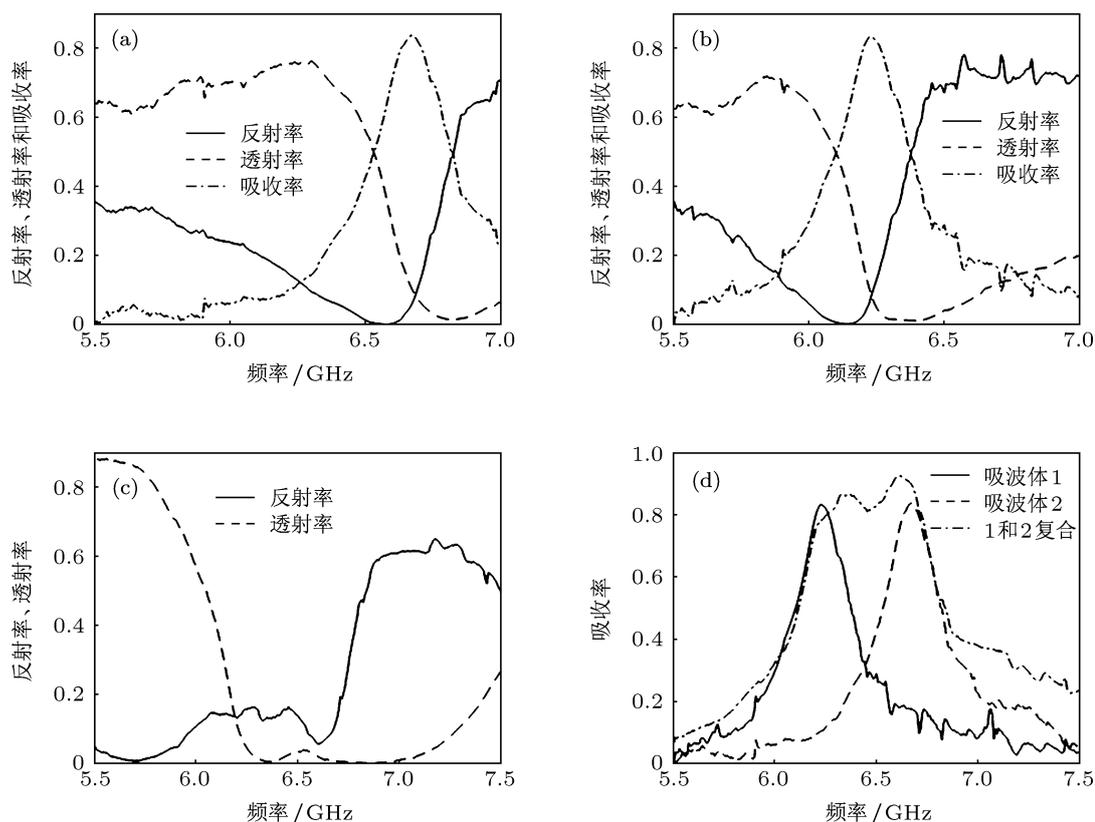


图6 超材料吸波体的测试数据 (a) 吸波体 1; (b) 吸波体 2; (c) 吸波体 1 和 2 复合; (d) 吸收率对比

其中较低频段电磁波可以透射出复合吸波体, 而较高频段的电磁波则被吸收掉. 测试复合吸波体得到的吸收率曲线如图 6(d) 所示, 在 6.62 GHz, 其吸收率最大可以达到 92.31%, 其半功率带宽为 10.9%, 有效地拓展了超材料吸波体的工作带宽.

4 结论

本文仿真设计并实验验证了基于电磁谐振的极化无关超材料吸波体, 测试结果表明, 在 6.67 GHz 可以实现 83.6% 的吸收率, 其半功率带

宽为 4.3%. 该吸波体对电磁波可以实现低频透射和高频吸收, 可应用于实现低频通信和高频屏蔽, 保护信息安全不外泄. 此外, 该吸波体具有良好的透光透气性, 因而具有较强的实用性. 然而, 该谐振型超材料吸波体是窄带吸收的, 为了进一步拓展其工作带宽, 利用其低频透射特性, 将两个工作于不同频段的吸波体进行复合, 可以有效拓展超材料吸波体的吸收带宽. 测试结果表明, 其半功率带宽由 4.3% 增大到 10.9%, 而且复合后吸波体的吸收率也有所增加. 总之, 该超材料吸波体设计简单, 具有较强的实用性和应用前景.

[1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402

[2] Wang B, Koschny T, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **80** 033108

[3] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 张燕萍, 赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3187]

[4] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, Zheng D H, Fan Y N, Xiong X, Wang X 2010 *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]

[5] 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]

[6] 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(R)

[7] Grant J, Ma Y, Saha S, Lok L B, Khalid A, Cumming D R S 2011 *Opt. Lett.* **36** 1524

[8] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, Reiten M T, Luo S N, Taylor A J, Chen H T 2012 *Opt. Lett.* **37** 154

[9] Liu N, Mesch M, Weiss T, Hentschel M, Giessen H 2010 *Nano Lett.* **10** 2342

[10] Liu X L, Starr T, Starr A F, Padilla W J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104**

- 207403
- [11] Jiang Z H, Yun S, Toor F, Werner D H, Mayer T S 2011 *ACS Nano* **5** 4641
- [12] Feng Q, Pu M B, Hu C G, Luo X G 2012 *Opt. Lett.* **37** 2133
- [13] Dayal G, Ramakrishna S A 2012 *Opt. Express* **20** 17503
- [14] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, Atwater H A 2011 *Nat. Commun.* **2** 517
- [15] Wang Y, Sun T Y, Paudel T, Zhang Y, Ren Z F, Kempa K 2012 *Nano Lett.* **12** 440
- [16] 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
- [17] Gu S, Barrett J P, Hand T H, Popa B I, Cummer S A 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 064913
- [18] Holloway C L, Dienstfrey A, Kuester E F, O'Hara J F, Azad A K, Taylor A J 2009 *Metamaterials* **3** 100
- [19] Kuester E F, Mohamed M A, Piket-May M, Holloway C L 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 2641
- [20] Morits D, Simovski C 2010 *Phys. Rev. B* **82** 165114
- [21] Morits D, Simovski C 2012 *Phys. Rev. B* **85** 039901(E)
- [22] Holloway C L, Kuester E F, Dienstfrey A 2011 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **10** 1507
- [23] Holloway C L, Kuester E F, Gordon J A, O'Hara J, Booth J, Smith D R 2012 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **54** 10
- [24] Smith D R, Schultz S, Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [25] Koschny T, Markos P, Smith D R, Soukoulis C M 2003 *Phys. Rev. E* **68** 065602(R)

A polarization-independent transmission absorption metamaterial absorber based on electromagnetic resonance*

Lu Lei¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)†} Ma Hua¹⁾ Yu Fei¹⁾ Xia Song²⁾
Xu Zhuo²⁾ Bai Peng³⁾

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

2) (Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Synthetic Electronic Information System Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 10 October 2012; revised manuscript received 28 November 2012)

Abstract

In this paper, we simulate and experimentally validate a polarization-independent transmission absorption metamaterial absorber based on electromagnetic resonance. The metamaterial absorber can absorb the high-frequency electromagnetic wave, and the low-frequency wave can transmit through the absorber. The tested results indicate that the metamaterial absorber can achieve a narrow bandwidth high absorption with a peak absorption of 83.6% at 6.77 GHz, and a full width at half maximum (FWHM) of 4.3%. To further broaden the absorption bandwidth of the resonant metamaterial absorber, we place two absorbers with different working frequencies together for its low-frequency transmitted characteristic. The measured data show that the composite metamaterial absorber can increase the FWHM to 10.9%, and can enhance the absorption slightly. The metamaterial absorber has some advantages, such as simple design, strong practicability, and important application foreground.

Keywords: polarization-independent, transmission absorption, metamaterial absorber

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

DOI: 10.7498/aps.62.104102

* 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: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn