

宽带透射吸收极化无关超材料吸波体*

鲁磊^{1)†} 屈绍波¹⁾ 施宏宇²⁾ 张安学²⁾ 夏颂³⁾ 徐卓³⁾ 张介秋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)

3)(西安交通大学, 电子材料与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2013年9月2日收到; 2013年10月11日收到修改稿)

提出了一种新的基于磁性吸波体材料的具有低频透射和高频宽带吸收特性的超材料吸波体. 该超材料吸波体在1 GHz的透射系数为 -0.5 dB, 具有较好的低频透射特性, 可以实现对低频信号的相互通信; 在频率大于8.4 GHz的频段, 吸收率均大于80%, 基本覆盖整个X波段和Ku波段, 实现高频宽带吸收. 此外, 由于该超材料吸波体的单元金属周期结构具有较好的四重旋转对称性, 因而是极化无关的. 该透射吸收超材料吸波体设计简单, 实用性强, 具有较强的潜在应用价值.

关键词: 透射吸收, 宽带, 超材料吸波体

PACS: 81.05.XJ, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.63.028103

1 引言

超材料吸波体是一类新颖的结构型电磁波吸收材料, 近年来引起了广泛关注. 2008年, Landy等^[1]首次提出完美吸收超材料吸波体, 该吸波体是由一些具有电、磁谐振特性的金属周期结构和电介质组成, 金属结构的谐振会使得超材料吸波体中局域场急剧增强, 在达到阻抗匹配的情况下, 具有损耗的电介质会对电磁波产生强损耗吸收. 此后, 超材料吸波体的研究逐渐拓展到双频带^[2-4]、三频带^[5-7]、宽带^[8-12]以及可调^[13]吸收. 2012年, Costa和Monorchio^[14]首次提出了基于电阻膜的具有低频透射和高频吸收特性的吸波体. 随后, Chen等^[15]提出了基于集总电阻的具有低频吸收和高频透射的超材料吸波体; Motevasselian和Jonsson^[16]提出了基于电阻膜的且低频透射频带是极化相关的吸波体.

本文采用磁性吸波材料与多个同心金属方环相复合的方法, 实现了具有低频透射和高频宽带吸

收的超材料吸波体. 该超材料吸波体在低频具有较好的透射特性, 1 GHz的透射系数为 -0.5 dB; 在高频具有宽带吸收特性, 可以基本覆盖X波段和Ku波段. 另外, 由于该单元结构中的金属方环结构具有良好的四重旋转对称性, 因而是极化无关的.

2 结构设计

超材料吸波体的结构如图1所示. 为了实现低频电磁波透射, 将传统吸波材料设计中阻断电磁波透射的金属底板替换为金属周期结构, 同时为了对高频电磁波实现宽带吸收, 将多个同心金属方环叠加在一起实现谐振叠加以拓展吸收频带. 超材料吸波体的单元结构如图1(a)所示, 其中灰色区域为金属方环结构, 其具体尺寸如下: 周期为 $a = 5.6$ mm, 最外面第一个方环边长为 $b_1 = 3.8$ mm, 中间第二个方环边长为 $b_2 = 3$ mm, 最小的第三个方环边长为 $b_3 = 2.2$ mm, 线宽为 $w = 0.2$ mm, 缝宽为 $g = 0.2$ mm. 超材料吸波体的侧视图如图1(b)所示, 自左至右依次为电介质、磁性吸波材料和金属

* 国家自然科学基金(批准号: 11274389)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

周期结构. 电介质为无耗板材, 其型号为Rogers RT5880, 厚度为 $h_2 = 4$ mm, 相对介电常数为 $\epsilon_{r2} = 2.2$; 磁性吸波材料是由谐振型含磁绝缘硅树脂片组成的商业吸波板材, 其型号为Eccosorb SF-11-18, 厚度为 $h_1 = 1$ mm, 其复相对介电常数 $\epsilon_{r1} = \epsilon'_{r1} - i\epsilon''_{r1}$ 和磁导率 $\mu_{r1} = \mu'_{r1} - i\mu''_{r1}$, 如图2所示, 磁导率的虚部较大, 因而具有较强的磁损耗; 金

属周期结构的成分为铜, 其厚度为 $t = 0.02$ mm, 电导率为 $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m. 采用CST微波工作室的频域有限元求解器对超材料吸波体进行全波仿真, 单元结构的上下左右皆设为Unit Cell周期边界条件, 电磁波垂直入射到吸波体电介质一侧表面, 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.

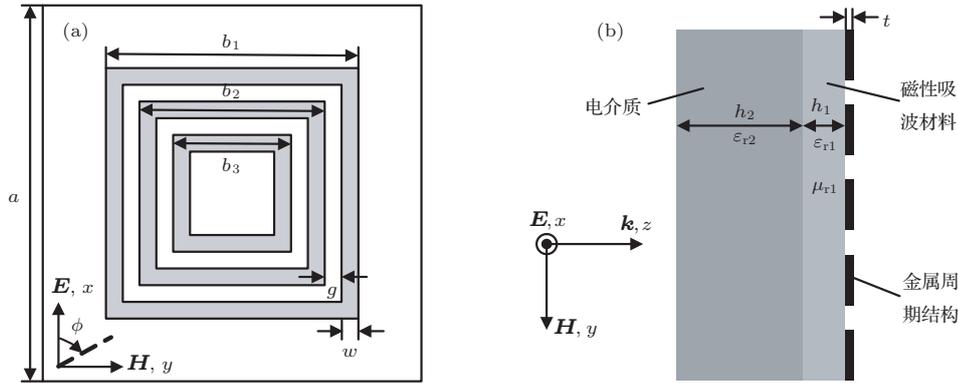


图1 超材料吸波体示意图 (a) 单元结构; (b) 侧视图

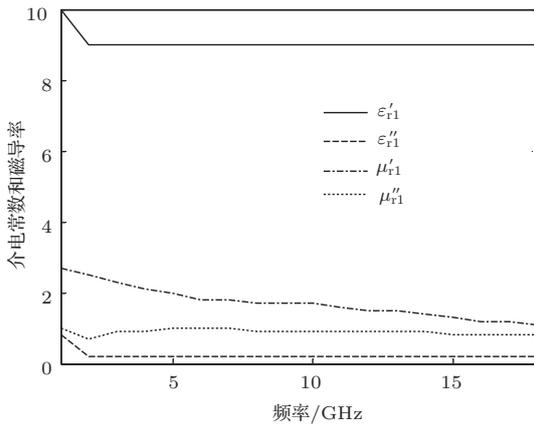


图2 相对介电常数和磁导率

超材料吸波体的传输线 (transmission line, TL) 模型如图3所示. 为便于分析, 可将同心方环等效为三个 RLC 串联谐振电路的并联, 其中, R 为磁性吸波材料中所产生的电磁损耗^[17], 而金属结构所产生的欧姆损耗较小可以忽略不计^[18]; L 与 C 为金属结构加载介质后的总电感和电容, 其计算公式为 $L_n = \mu_{\text{eff}} L_{0n}$, $C_n = \epsilon_{\text{eff}} C_{0n}$, 其中, $n = 1, 2, 3$; 由于金属结构两侧的介质分别是磁性吸波材料和空气, 因而等效磁导率 μ_{eff} 和介电常数 ϵ_{eff} 分别是 $(\mu_{r1} + 1)/2$ 和 $(\epsilon_{r1} + 1)/2$ 的函数, 其计算公式分别为 $\mu_{\text{eff}} = 0.8(\mu_{r1} + 1)/2$ 和 $\epsilon_{\text{eff}} = 0.8(\epsilon_{r1} + 1)/2$, L_{0n} 和 C_{0n} 分别为金属结构在自由空间中的等效电

感和电容, 可以采用全波仿真的方法反演出^[19,20], 采用该方法计算得到其值依次为 6.4, 3.9, 1.3 nH 和 7.9, 7.2 和 9.2 fF.

根据微波网络分析可知, 超材料吸波体的传输矩阵可通过二端口网络的传输矩阵级联得到, 其计算公式为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_2 h_2) & i Z_2 \sin(\beta_2 h_2) \\ \frac{i \sin(\beta_2 h_2)}{Z_2} & \cos(\beta_2 h_2) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\beta_1 h_1) & i Z_1 \sin(\beta_1 h_1) \\ \frac{i \sin(\beta_1 h_1)}{Z_1} & \cos(\beta_1 h_1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_c} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, A, B, C, D 为传输矩阵的元素, $Z_1 = Z_0 \sqrt{\mu_{r1}/\epsilon_{r1}}$, $Z_2 = Z_0 \sqrt{1/\epsilon_{r2}}$ 和 $\beta_1 = k_0 \sqrt{\mu_{r1}\epsilon_{r1}}$, $\beta_2 = k_0 \sqrt{\epsilon_{r2}}$ 分别为磁性吸波材料和电介质的特征阻抗和传播常数, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 和 $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 分别为空气的特征阻抗和传播常数, $Z_c = Z_1 Z_2 Z_3 / (Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3)$ 为三个同心金属方环结构的总阻抗, $Z_n = i\omega L_n + 1/i\omega C_n = R_n + iX_n$ 为各个金属方环的阻抗, R_n 和 X_n 分别为其电阻和

电抗部分, $n = 1, 2, 3$. 最后, 通过传输矩阵可以很容易地计算出超材料吸波体的散射 (S) 矩阵 [21].

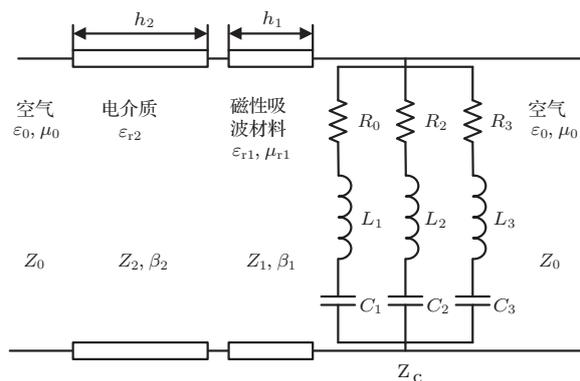


图3 超材料吸波体的传输线模型

3 仿真结果与分析

采用 CST 仿真和 TL 模型得到电磁波垂直入射情况下超材料吸波体的 S 参数幅值和吸收率曲线如图 4 所示, 其中, 标记表示 TL 模型的计算结果. 图 4(a) 中, 在 1 GHz 反射系数 S_{11} 和 S_{22} 大小分别为 -13.1 dB 和 -13.0 dB, 透射系数 S_{21} 和 S_{12} 大小相同为 -0.5 dB, 因而超材料吸波体在低频具有良好的通带特性; 在较高频率, S_{11} 和 S_{21} 均较小, 因而在高频具有宽带吸收特性; S_{22} 在高频段数值较大, 反射很强, 这是由于该超材料吸波体在电磁波传播方向上是非对称的. TL 模型所得到的数据与全波仿真的曲线在变化趋势上符合较好, 可以作为有效、快速的工具对吸波体进行初期优化设计. 图 4(b) 为超材料吸波体三层组成部分在不同组合方式下的吸收率曲线, 其中, 吸收率 (A) 与反射率 (R)、透射率 (T) 以及 S 参数的计算公式为 $A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$. 超材料吸波体由三层结构复合在一起时, 在高频具有宽带强吸收, 频率大于 8.4 GHz 的频段, 吸收率均大于 80%, 基本覆盖整个 X 波段和 Ku 波段, 其中吸收率最高可以达到 88.4%; 当仅有厚度为 h_1 的磁性吸波材料层或是由厚度为 h_2 的电介质层与厚度为 h_1 的磁性吸波层组合时, 高频的吸收率均较低, 因而金属周期结构在提高吸收率中起到重要作用.

超材料吸波体对具有不同极化角 ϕ 垂直入射电磁波的吸收率曲线如图 5 所示, 其中 ϕ 定义为图 1(a) 插图中电场 E 与 $+x$ 轴的夹角. 由于金属同心方环具有四重旋转对称性, 因而只需计算极化角 ϕ 最大为 45° 即可. 当 ϕ 由 0° 逐渐增大到 45° 时, 其

吸收率曲线是基本完全重合的, 反射率和吸收率曲线也同样是重合的, 因而该超材料吸波体是极化无关的.

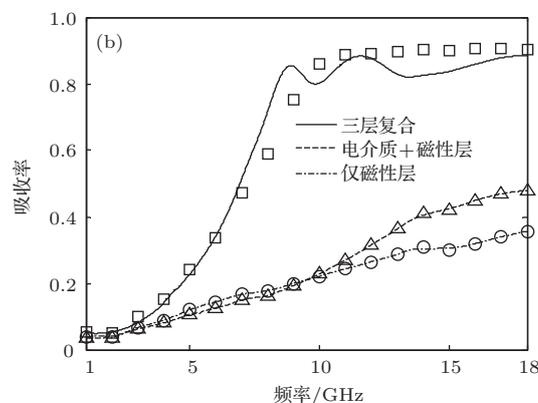
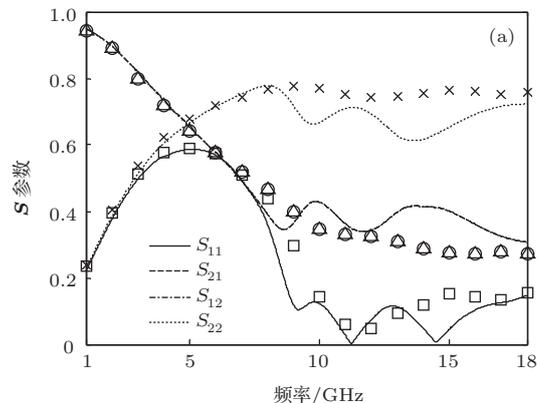


图4 超材料吸波体的 (a) S 参数幅值和 (b) 吸收率

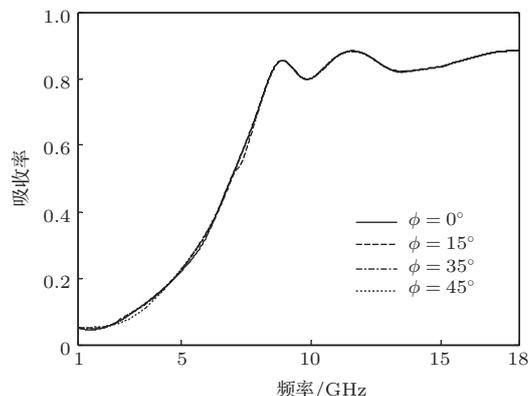


图5 不同极化角 ϕ 下的吸收率

采用等效电磁参数反演方法 [22] 可以由该非对称结构超材料吸波体的 S 参数提取出其归一化面阻抗 z , 其计算公式为

$$z = \frac{(D - A) + \sqrt{(D - A)^2 + 4BC}}{2C}, \quad (2)$$

其中, A, B, C, D 为超材料吸波体的传输矩阵元素, 其值可由 S 矩阵求出 [21]. 计算得到电介质厚

度 h_2 为不同值时, 超材料吸波体的归一化阻抗实部和吸收率曲线如图 6 所示. 图 6 (a) 中, 随着电介质的厚度 h_2 由 0 mm 逐渐增大到 6 mm, 阻抗实部逐渐接近于 1, 即超材料吸波体电介质一侧与自由空间逐渐达到较好的阻抗匹配, 当 h_2 为 4 mm 时匹配达到最好反射较小, 当 h_2 为 6 mm 时, 阻抗实部在较低频率急剧增大且在较高频率急剧减小, 因而匹配变差反射增大. 在图 6 (b) 中, 随着电介质厚度 h_2 的逐渐增大, 超材料吸波体在高频的吸收率逐渐增强, 当 h_2 等于 4 mm 时吸收率达到最大, 但随着 h_2 的进一步增大吸收率逐渐减小, 这与阻抗实部曲线的变化规律是相同的. 因而, 通过调节电介质的厚度 h_2 的大小, 可以使得超材料吸波体与自由空间达到较好的阻抗匹配, 提高其吸收率和吸收带宽. 本文采用的电介质为 Rogers RT5880 柔性板, 其硬度较差, 在实际应用中, 可以将其替换为具有较高强度的玻璃钢, 以实现承载和吸波隐身的双重作用.

为进一步研究超材料吸波体在高频的谐振吸收特性, 图 7 和图 8 分别给出了吸波体在三个谐振频率处的表面电流分布和功率损耗密度分布. 图 7 (a) 为超材料吸波体在较低频率 9.2 GHz 的表面电流分布, 其表面电流主要集中于尺寸最大的第一个方环两侧. 图 7 (b) 为吸波体在 11.2 GHz 的表面电流分布, 其表面电流主要集中于中间第二个方环两侧. 图 7 (c) 吸波体在 14.5 GHz 的表面电流分布, 其表面电流主要集中于尺寸最小的第三个方环两侧. 可见, 不同尺寸大小的方环在不同频率产生谐振, 多个谐振相叠加拓展了超材料吸波体的高频吸收带宽.

超材料吸波体在各谐振频率的功率损耗密度分布如图 8 所示, 其中产生损耗最强的区域与图 7 中表面电流分布最强烈的位置相对应, 也就是对应于磁场分布最强的位置, 由于紧贴于金属方环一侧的磁性吸波材料具有较强的磁损耗, 会在该区域产生强损耗. 因而, 不同尺寸的金属同心方环在不同频率产生多个谐振, 使得局域磁场显著增

强, 进而在具有强磁损耗的磁性吸波材料中产生强吸收.

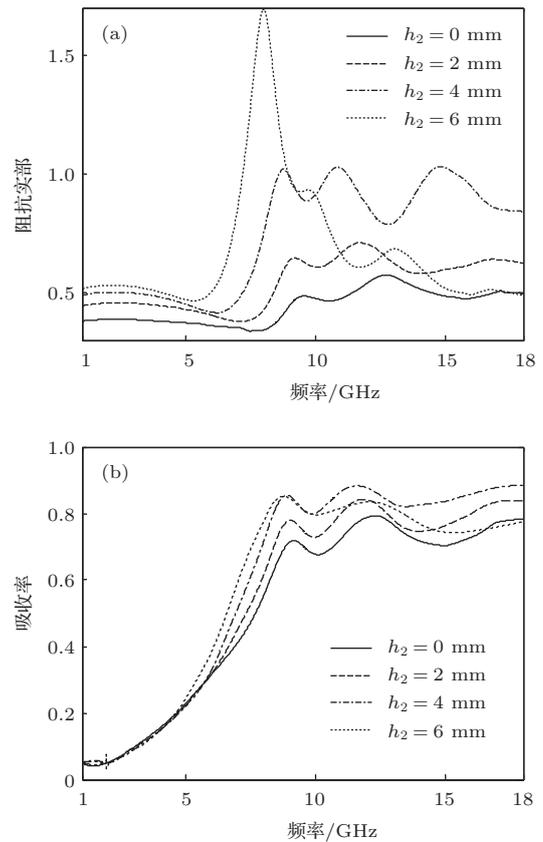


图 6 电介质厚度 h_2 为不同值时的 (a) 归一化阻抗实部和 (b) 吸收率

超材料吸波体对具有不同斜入射角 θ 的横电 (transverse electric, TE) 和横磁 (transverse magnetic, TM) 平面波的吸收率曲线如图 9 所示, 其中, 斜入射角 θ 定义为波矢 \mathbf{k} 与吸波体表面法线的夹角. 对于 TE 波, 随着斜入射角 θ 由 0° 逐渐增大到 60° , 较低频率的吸收率略有减小, 而较高频率的吸收率则略有增大, 当 $\theta = 60^\circ$ 时依然具有较高的吸收率. 对于 TM 波, 随着斜入射角 θ 由 0° 逐渐增大到 60° , 与 TE 波相反, 较低频率的吸收率略有增大, 而较高频率的吸收率则逐渐减小, 当 $\theta = 60^\circ$ 时吸收率依然较大. 总之, 该超材料吸波体对斜入射的 TE 和 TM 波在高频段具有宽角度吸收特性.

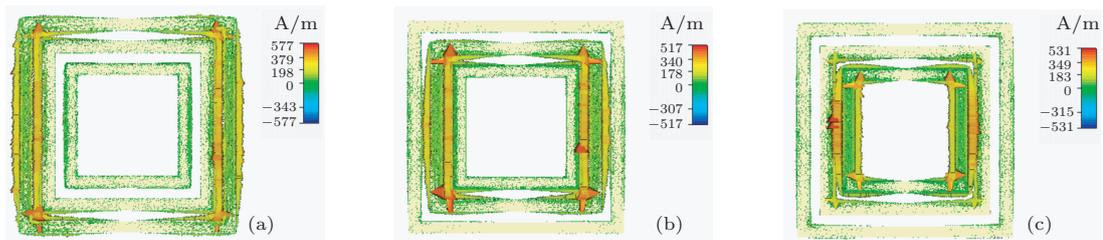


图 7 表面电流分布 (a) 9.2 GHz; (b) 11.2 GHz; (c) 14.5 GHz

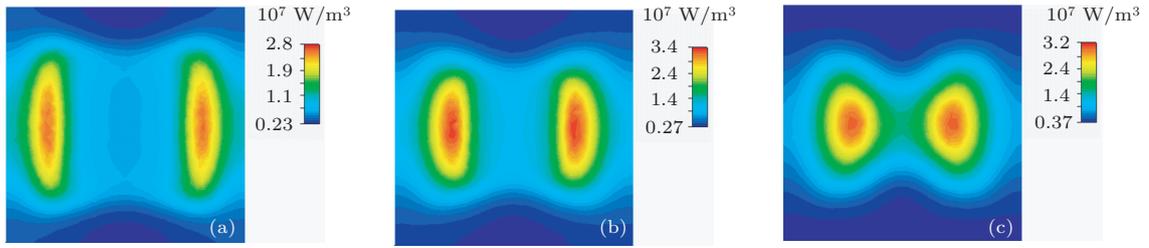


图8 功率损耗密度分布 (a) 9.2 GHz; (b) 11.2 GHz; (c) 14.5 GHz

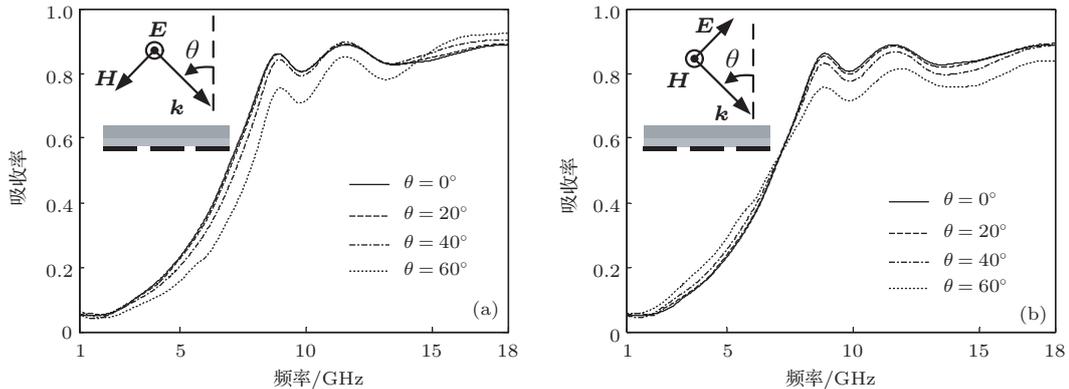


图9 不同斜入射角 θ 下的吸收率 (a) TE波; (b) TM波

4 结 论

基于磁性吸波材料基板和多个同心金属方环周期结构, 实现了具有透射吸收特性的宽带超材料吸波体. 该吸波体在大于 8.4 GHz 的频段, 吸收率均大于 80%, 基本覆盖整个 X 波段和 Ku 波段, 在低频 1 GHz 的透射系数为 -0.5 dB, 实现了较好的低频透射和低频宽带吸收. 通过提取超材料吸波体的相对阻抗, 研究了电介质层在吸波体与自由空间中所起到的阻抗匹配作用. 通过吸波体在各谐振频率的表面电流分布和功率损耗密度分布, 研究了吸波体的谐振吸收机制. 此外, 该超材料吸波体对斜入射的 TE 和 TM 波具有宽角度吸收特性. 由于超材料的工作频率可以通过改变单元金属周期结构的尺寸大小进行调节, 因而可以很容易地设计出工作于其他频段或是具有更宽吸收频带的吸波体. 总之, 该透射吸收超材料吸波体在飞行器的天线收发通信和吸波隐身中具有重要应用价值.

参考文献

[1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
 [2] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241111
 [3] Lee J, Lim S 2011 *Electron. Lett.* **47** 8

[4] Shen X P, Tui 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]
 [5] Shen X P, Cui T J, Zhao J M, Ma H F, Jiang W X, Li H 2011 *Opt. Express* **19** 9401
 [6] Li L, Yang Y, Liang C 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063702
 [7] 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
 [8] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese)[保石, 罗春荣, 张艳萍, 赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3187]
 [9] Ding F, Cui Y X, Ge X C, Jin Y, He S L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 103506
 [10] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 055201
 [11] Cheng Y Z, Wang Y, Nie Y, Zheng D H, Gong R Z, Xiong X, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 134102 (in Chinese)[程用志, 王莹, 聂彦, 郑栋浩, 龚荣洲, 熊炫, 王鲜 2012 物理学报 **61** 134102]
 [12] 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]
 [13] Yang Y J, Huang Y J, Wen G J, Zhong J P, Sun H B, Gordon O 2012 *Chin. Phys. B* **21** 038501
 [14] Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 2740
 [15] Chen X, Li Y Q, Fu Y Q, Yuan N C 2012 *Opt. Express* **20** 28347
 [16] Motevasselian A, Jonsson B L G 2012 *IET Microw. Antennas Propag.* **6** 747

- [17] Costa F, Monorchio A 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 4650
- [18] Raynolds J E, Munk B A, Pryor J B, Marhefka R J 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 5346
- [19] Costa F, Monorchio A, Manara G 2009 *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications* Turin, Italy, September 14–18, 2009 p852
- [20] Costa F, Monorchio A, Manara G 2009 *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* Charleston, USA, June 1–5, 2009 p1
- [21] Pozar D M 2005 *Microwave Engineering* (3rd Ed.) (New York: John Wiley & Sons) p160
- [22] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617

A broadband transmission absorption polarization-independent metamaterial absorber*

Lu Lei^{1)†} Qu Shao-Bo¹⁾ Shi Hong-Yu²⁾ Zhang An-Xue²⁾
Xia Song³⁾ Xu Zhuo³⁾ Zhang Jie-Qiu¹⁾

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

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

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

(Received 2 September 2013; revised manuscript received 11 October 2013)

Abstract

In this paper, we propose a new metamaterial absorber based on magnetic absorbing material. This absorber has the characteristics of low-frequency transmission and high-frequency broadband absorption. The transmission coefficient of the metamaterial absorber is -0.5 dB at 1 GHz: the good low-frequency transmission property can realize intercommunication between the low-frequency signals. The absorptivity is greater than 80% in the frequency range above 8.4 GHz, which almost covers all the X-band and Ku-band frequencies. In addition, the metamaterial absorber is polarization-independent due to the fourfold rotational symmetry of the unit cell metallic periodic structure. The metamaterial absorber has the advantages of simple design, strong practicability, and high potential application value.

Keywords: transmission absorption, broadband, metamaterial absorber

PACS: 81.05.XJ, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.63.028103

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

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