

基于超材料与电阻型频率选择表面的薄型宽频带吸波体的设计*

程用志 聂彦[†] 龚荣洲 郑栋浩 范跃农 熊炫 王鲜

(华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(2011年11月4日收到; 2011年12月13日收到修改稿)

设计了三种类型吸波体, 分别为基于正方形金属贴片 (square metal patch, SMP) 结构超材料吸波体、电阻型频率选择表面 (Resistance Frequency Selective Surface, RFSS) 吸波体和 SMP 与 RFSS 的复合结构吸波体. 采用 FDTD 算法分别对这三种类型吸波体的电磁波吸收特性进行数值模拟分析. 模拟得到的结果表明: 在整个 2—30 GHz 频率范围内, SMP 吸波体, 通过几何参数的设计可以实现多频窄带强吸收; RFSS 吸波体, 通过方块电阻的设计可以实现高频宽带强吸收, 但强吸收的带宽有限; SMP 与 RFSS 的复合结构吸波体, 在 3—25 GHz 之间吸收率大于 90% 以上, 且宽频范围内与自由空间具有较好的阻抗匹配特性.

关键词: 超材料, 电阻型频率选择表面, 宽频带吸收

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Ja, 78.20.Ci

1 引言

吸波材料是实现武器装备隐身的重要材料, 可以大幅降低目标的雷达散射截面, 从而提高其生存突防能力和总体作战性能. 传统的磁性吸收剂存在使用温度低, 密度大的缺点^[1]. 因此, 随着隐身技术的日益发展, 寻求和设计雷达吸波材料以实现“薄、轻、宽、强”的高性能要求成为研究的热点. 电磁超材料 (Metamaterials, MMs) 是一种人工设计的结构, 但呈现出自然材料所不具备的超常物理性质的复合材料^[2]. 由于超材料的亚波长结构特性, 可以将其视为有效媒质, 人们通过微结构的设计可以实现等效电磁参数 (ϵ_{eff} 和 μ_{eff}) 调控, 从而实现超材料与电磁波作用方式的调控. 本质上, 超材料更是一种新颖的材料设计思想, 这一思想的基础是通过多种物理结构设计来突破物质的某些表现的、本征自然规律的限制, 从而获得超常的材料功能. 因此, 超材料是目前电磁学, 材料学研究的热点. 基于这一思想可以实现负群速度、负折射

率^[3]、隐身斗篷^[4]、电磁波极化控制^[5]与完美吸收^[6,7]以及天线等微波器件的小型化等^[8].

2008年, Landy 等人首先提出了由电谐振器、电介质基板和金属微带线构成的具有“完美吸收”特性的电磁耦合结构吸波体^[6]. 随后, 研究人员提出了各种极化不敏感和宽入射角等特性的超材料吸波体^[9–12], 但吸收频带依然很窄. 为了实现宽频带吸收, 人们又提出加载集总元件或电阻型频率选择表面的超材料吸波体^[13–17], 虽然吸收频带得到一定程度的展宽, 但是频带的展宽是以牺牲整体的厚度为前提的, 同时加载集总元件的吸波体加工复杂成本较高, 这对实际应用是不利的.

基于电阻型频率选择表面的吸波体材料可以实现宽频带吸收^[15–17], 但厚度难以达到要求且强吸收频带的展宽有限. 而超材料的频率响应特性可以依据其结构参数而进行大范围的调节, 因此我们可以通过超材料的基本单元结构参数设计使其工作在我们需要的频率范围. 本文设计了 SMP 吸波体、RFSS 吸波体和 SMP 与 RFSS 的复合结构吸波体, 并采用 FDTD 算法分别对其吸收特性进行

* 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20090142120003) 资助的课题.

[†] E-mail: nieyan@mail.hust.edu.cn

了数值模拟分析. 数值模拟结果表明: 相比于单纯的 SMP 吸波体、RFSS 吸波体, SMP 与 RFSS 复合结构吸波体在整个 3—25 GHz 频率范围对入射电磁波具有吸收率大于 90% 的强吸收特性. 该复合结构吸波体主要优点是厚度薄、易于实现宽带吸波, 且成本低, 加工简单.

2 理论与结构设计

电磁材料对入射电磁波的吸收率 $A(\omega)$ 通常由反射率 $R(\omega)$ 和透射率 $T(\omega)$ 表示, 即 $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$, 或 $A(\omega) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$, 则透射率 ($T(\omega) = |S_{21}|^2$) 和反射率 ($R(\omega) = |S_{11}|^2$) 分别表现为 S 参数的形式. 通常由于金属背板的存在, $T(\omega) = 0$, 因此吸收率仅由反射率 $R(\omega)$ 决定, 而 $R(\omega)$ 取决于吸波体表面等效复合波阻抗与自由空间的匹配程度以及其对电磁波的损耗特性, 单个结构单元的超材料吸波体依赖于金属结构的电、磁谐振, 只能在很窄的频率范围内实现阻抗匹配^[13]. 为了实现宽频强吸收, 我们设计的 MMs 与 RFSS 复合结构超材料吸波体模型如同图 1(a) 所示, 并采用等效电路理论对其表面等效复合阻抗进行分析计算, 复合结构 RLC 等效电路模型如图 1(b) 所示.

根据串联 RLC 等效电路理论, RFSS 与 MMs 复合结构的表面阻抗可写成:

$$Z_{RM} = R - i \left(\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} \right), \quad (1)$$

则吸波体表面复合波阻抗为:

$$Z_C = \frac{Z_t Z_{RM}}{(Z_t + Z_{RM})}, \quad (2)$$

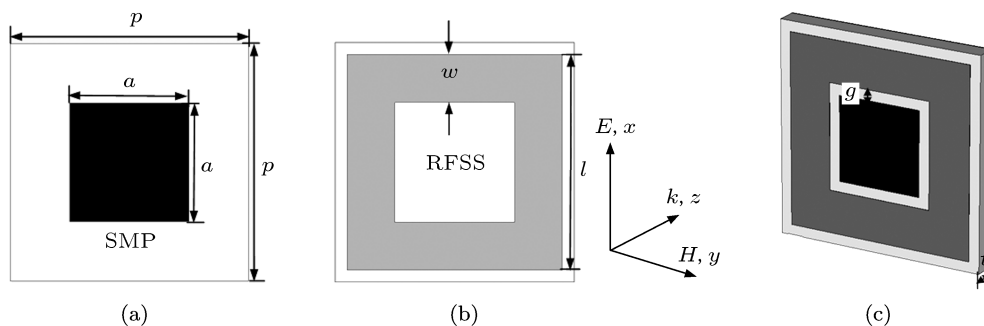


图 2 (a) SMP 结构吸波体模型; (b) RFSS 结构吸波体模型; (c) SMP 与 RFSS 复合结构吸波体模型

其中 R 为 RFSS 的本征阻抗, L 和 C 分别为 MMs 与 RFSS 复合总的等效电感和电容, 其参数值由复合结构的形状决定^[18], Z_t 为电介质板本征阻抗, 可以写成以下形式^[16]:

$$Z_t = i Z_m^{\text{TE, TM}} \tan(\beta t), \quad (3)$$

其中 $Z_m^{\text{TE}} = (\omega \mu_r \mu_0) / \beta$ 和 $Z_m^{\text{TM}} = \beta / (\omega \epsilon_r \epsilon_0)$ 表示电介质基板的 TE, TM 极化时本征阻抗, $\beta = \sqrt{k^2 - k_t^2} = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\epsilon_r \mu_r - (\sin \theta)^2}$, c_0 为真空中的波速, θ 为入射波的角度. 因此, 我们可以通过 MMs 与 RFSS 复合结构参数设计, 根据 (2) 式计算分析其表面复合波阻抗, 以实现与自由空间波阻抗相匹配. 下面我们将通过具体的结构设计, 采用 FDTD 算法分别计算分析基于 MMs, RFSS 以及 MMs 与 RFSS 复合的吸波体吸波性能, 具体结构模型如图 2 所示.

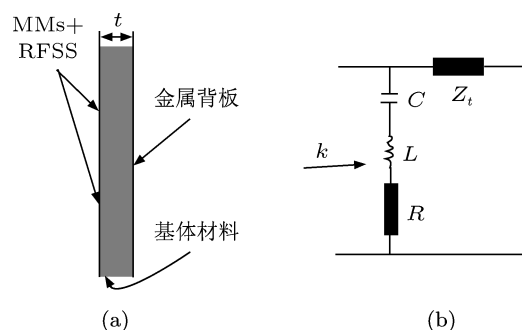


图 1 (a) MMs 与 RFSS 构成的复合结构超材料吸波体模型; (b) RLC 等效电路模型

采用 FDTD 方法进行数值模拟计算时, 三种类型吸波体的晶格常数都为 $p = 20 \text{ mm}$, 电介质板材料为 FR-4(loss), 其介电常数为 $\epsilon_r = 4.9(1 + i0.025)$, 厚度为 $t = 2 \text{ mm}$, SMP 表面和背衬金属为厚 $30 \mu\text{m}$, 电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ 的铜膜.

3 数值模拟分析

3.1 SMP 结构吸波体

首先研究一定厚度的 SMP 结构吸波体对正入射电磁波的吸收性能, 该吸波体主要由厚度为 $30\ \mu\text{m}$ 的正方形金属铜片, 电介质基板与金属背衬构成, 其立体视图如图 3(a) 的插图所示. 当铜片边长 $a = 8\ \text{mm}$ 时, 数值模拟得到的吸收率如图 3(a) 所示, 从图中可以很清楚地看出, 在整个 2—30 GHz 的频率范围内存在八个孤立的吸收峰值, 且分别在 14.5 GHz, 15.8 GHz, 17.2 GHz, 19.9 GHz 和 23.2 GHz 处的吸收率达到 90% 以上, 其对电磁波的多峰强吸收主要基于多模式偶极子谐振机理^[10], 即八个吸收峰值分别对应着八个谐振模式, 其中第一个吸收峰值频点 (7.25 GHz) 为主谐振模式. 吸波体结构基本单元几何参数的不同, 会产生不同模式的谐振增强或减弱, 从而导致不同模式频率点吸收特性的不同^[10]. 以往的单个结构模型超材料吸波体^[11–14,19], 由于厚度比较薄, 只有主谐振模式的谐振特性比较强, 其他模式的谐振特性比较弱, 因

此, 单结构模型吸波体通常表现出单频点窄带强吸收的特点.

超材料吸波体主谐振模式的频率可以通过基本单元结构参数的设计而进行调节. 为了充分说明这一点, SMP 结构吸波体基本单元其他参数不变, 只改变边长 a , 其吸收率结果如图 3(b) 所示. 从图中可以明显地看出, 随着 SMP 结构边长 a 的增大, 主谐振模式的吸收峰值频率向低频移动, 而其他谐振模式频率并没有发生显著的改变, 只是吸收峰值大小发生了变化. 同样, 从图中 3(b) 还可以看出, a 取值不同, 出现大于 90% 的强吸收峰值频率点的个数不同, 例如, 当 $a = 6\ \text{mm}$ 或 $10\ \text{mm}$, 只有三个孤立的强吸收峰值; 当 $a = 12\ \text{mm}$ 时, 出现五个孤立的强吸收峰值. 因此, 我们可以通过改变 SMP 结构几何参数实现其对电磁波吸收特性的调节.

通过对 SMP 结构吸波体的数值模拟分析可知, 尽管该结构吸波体通过调节几何参数可以实现多频强吸收, 但强吸收频带很窄而且是彼此孤立, 因此对实际应用是不利. 接下来, 我们将研究 RFSS 结构吸波体, 并对其吸波特性进行数值模拟分析.

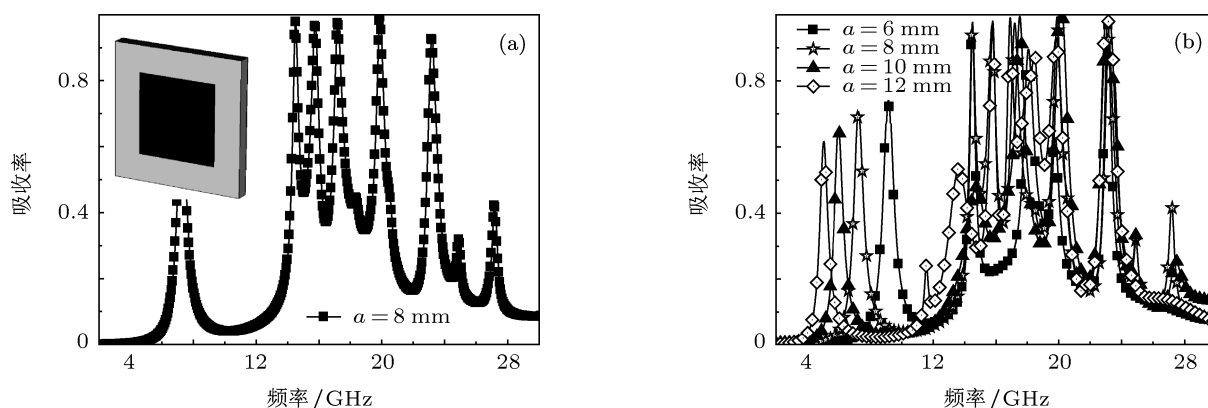
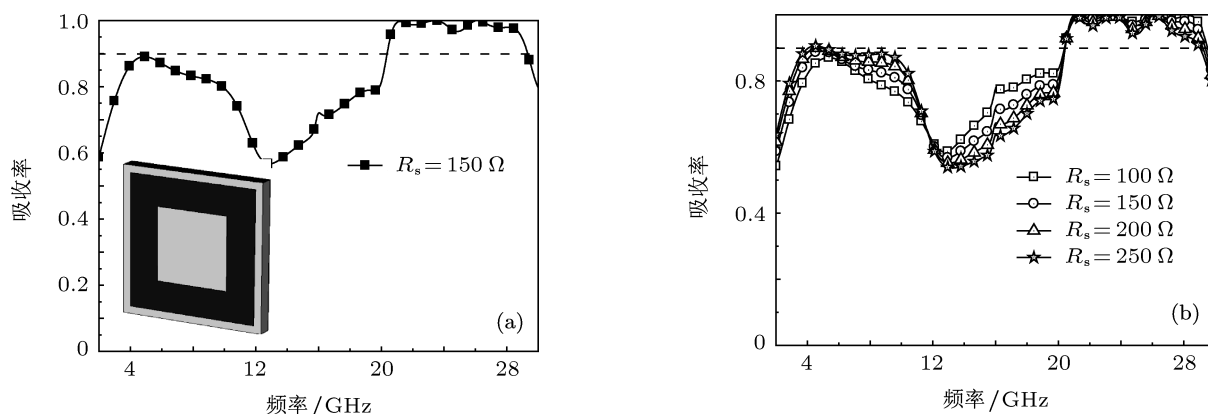


图 3 (a) SMP 结构吸波体吸收率; (b) SMP 结构吸波体在不同边长 a 时的吸收率

3.2 环形 RFSS 结构吸波体

RFSS 结构吸波体主要由环形电阻片 (将炭黑与银浆按一定比例混合成乳状液体, 采用刮涂工艺制备电阻膜, 通过控制涂层厚度实现电阻片方阻控制), 电介质板与金属背衬构成, 其立体视图如图 4(a) 的插图所示. RFSS 线宽 $w = 4\ \text{mm}$, 边长 $l = 19\ \text{mm}$, 厚度 $30\ \mu\text{m}$, 当 $R_s = 175\ \Omega$ 时, RFSS

结构吸波体吸收率如图 1(a) 所示. 从图中可以很清楚地看出, 尽管在整个 2—30 GHz 频率范围内, 吸收率大于 50% 以上, 但只在 21—27 GHz 之间出现大于 90% 以上的强吸收. 与金属 FSS 或超材料相比, RFSS 吸波体对入射电磁波的吸收主要是基于欧姆损耗机理, 即电磁波在 RFSS 上产生感应电流, 电流转变成热能损耗掉. 因此, 通过 RFSS 方块电阻的设计可以实现吸收特性的调节.


 图4 (a) RFSS 结构吸波体吸收率; (b) RFSS 结构吸波体在不同方块电阻值 R_s 时的吸收率

RFSS 结构吸波体在不同方块电阻值 R_s 时的吸收率如图 4(b) 所示, 从图中可以看出, 在整个 2—30 GHz 频率范围内, 大于 90% 以上的强吸收频率范围并没有随着方块电阻的改变而发生显著的变化; 在 7—11 GHz 之间, 吸收率幅值随着方块电阻的增大而增大, 在 12—20 GHz 之间, 吸收率幅值随着方块电阻的增大而减小. 由此可知, 通过改变方块电阻的大小可以实现 RFSS 吸波体吸收特性的调节, 但调节范围很小, 很难实现低频强吸收.

3.3 SMP 与 RFSS 复合结构吸波体

为了实现宽频强吸收, 我们将 SMP 与环形 RFSS 进行复合, 设计了如图 2(c) 所示的复合结构吸波体, 复合结构具体参数如下: $a = 11$ mm, $w = 3.5$ mm, $l = 19$ mm, RFSS 方块电阻 $R_s = 225$ Ω . 同样采用 FDTD 方法对该复合结构吸波体吸收特性进行数值模拟, 结果如图 5(a) 所示. 从图 5(a) 中可以很清楚地看到, 在 3—25 GHz 之间, 复合结构吸波体的反射率小于 10%, 吸收率大于 90% 的相对带宽为 150%. 进一步, 从图 5(b) 中可以看出, 在 3—25 GHz 之间, 复合结构吸波体相对波阻抗实部值在小于 2 大于 0.5 的范围内变化, 表明其在很宽的频带内与自由空间阻抗具有较好的匹配特性, 可以用来实现宽带吸波. 该复合结构吸波体实现宽频强吸收主要基于以下两点: 首先, 电磁波入射到复合表面激发 SMP 结构产生表面感应电流, 该电流产生的磁场与金属背板激发的反向电流所产生的磁场在宽频带内进行耦合产生多模式的谐振作用, 以实现与自由空间的波阻抗匹配, 从而极大地减小了电磁波的反射; 其次, 电磁波的耦

合谐振作用产生的电能最终在 RFSS 中损耗掉.

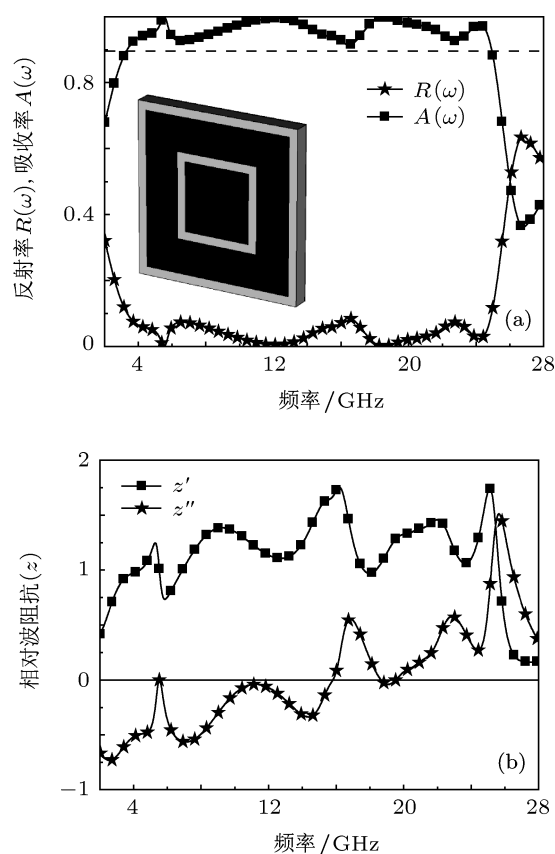


图5 (a) SMP 与 RFSS 复合结构吸波体反射率与吸收率; (b) SMP 与 RFSS 复合结构吸波体相对波阻抗

该复合结构吸波体实现宽频强吸收主要源于超材料的谐振吸收与电阻型频率选择表面的欧姆损耗的协同作用. 为了研究这种协同作用, 所有参数保持不变, 我们分别模拟计算了 SMP 吸波体、RFSS 吸波体、以及 SMP 与 RFSS 复合结构吸波体的吸收率, 结果如图 6 所示. 从图 6 中可

可以看出,在整个 2—28 GHz 频率范围内, SMP 吸波体只出现几个孤立的吸收峰值, RFSS 吸波体只在 20.5—25 GHz 之间出现大于 90% 的强吸收,复合结构吸波体在 3—25 GHz 之间的吸收率大于 90%,这与前面的分析具有很好的一致性,也充分说明了这种协同作用.

为了研究吸波体内的能量损耗情况,我们分别模拟计算了复合结构吸波体在基板有耗和无耗情况下的吸收率,结果如图 7(a) 所示. 由图可以看出,在 3—25 GHz 之间,复合结构吸波体在基板有耗和无耗情况的吸收率基本保持不变,这说明其能量损耗主要集中在 RFSS 电阻片上,与基板的介质损耗无关. 进一步研究基板材料的介电常数对复合结构吸波体吸收性能的影响,我们分别模拟计算了采用不同介电常数基板材料时的吸收率,结构如图 7(b) 所示. 从图中可以看出,复合结构吸波体的吸收率

并没有随基板材料介电常数的改变而发生显著的变化,这为实际制备时基板材料的选择提供了很大的自由度.

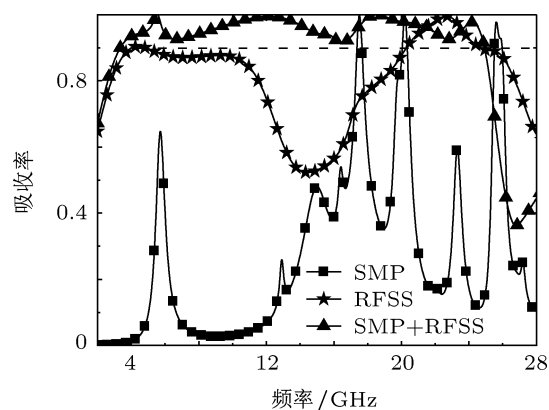


图 6 数值模拟得到的 SMP 吸波体、RFSS 吸波体、以及 SMP 与 RFSS 复合结构吸波体的吸收率

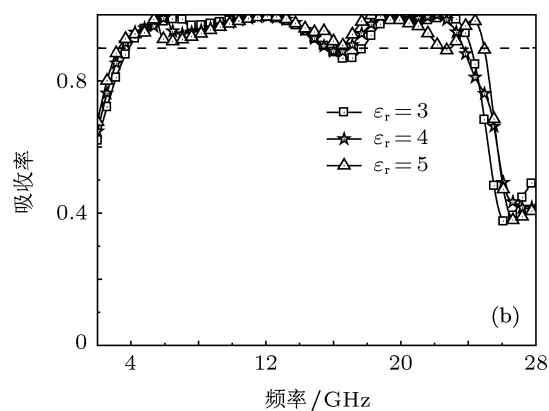
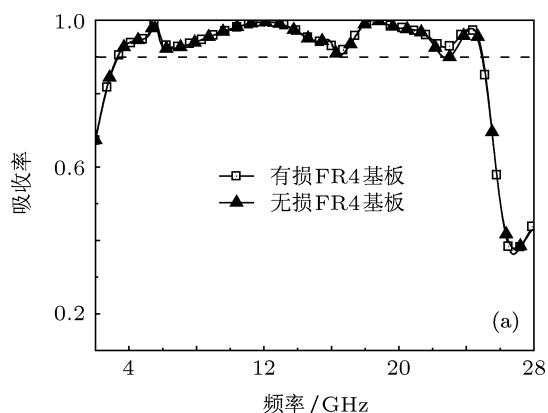


图 7 复合结构吸波体在不同情况下的吸收率 (a) 采用有耗和无耗 FR-4 基板; (b) 采用不同介电常数的无耗基板

4 结论

本文基于超材料与电阻型频率选择表面设计了三类型吸波体,分别为 SMP 吸波体、RFSS 吸波体以及 SMP 与 RFSS 复合结构吸波体. 通过 FDTD 算法分别对其吸收特性进行数值模拟分析. 模拟结果表明: 在 2—30 GHz 频率范围内, SMP 吸波体可以实现多频窄带强吸收; RFSS 吸波体在 21—27 GHz 之间出现大于 90% 以上的强吸

收; SMP 与 RFSS 复合结构吸波体厚度仅为 2 mm, 在 3—25 GHz 之间吸收率大于 90%, 相对带宽为 150%, 且相对阻抗能在该频带内与自由空间阻抗近似匹配. 进一步研究表明: SMP 与 RFSS 复合结构吸波体对电磁波的吸收主要是基于欧姆损耗机理, 且吸收特性并不随基板材料介电常数的改变而发生显著的变化. 这种薄型宽频带吸波体为我们下一步实验室制备提供了理论指导, 可通过传统的 PCB 技术和丝网印刷技术实现. 这为薄型宽频带吸波材料的应用提供了一种新的途径.

- [1] Sugimoto S, Haga K, Kagotani T, Inomata K 2005 *J. Magn. Magn. Mater.* **290** 1188
- [2] Cui Z W, Ma W, Qiu L D, Zhang H T 2008 *Electromagnetic Metamaterials and its Applications* (Beijing: National Defense Industry Press) p8 (in Chinese) [崔万照, 马伟, 邱乐德, 张洪太 2008 电磁超介质及其应用 [M]. 2008. (北京: 国防工业出版社) p8
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [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] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, Jiang T, Kong J A, Chan C T, Zhou L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908
- [6] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [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] Li L W, Li Y N, Soon Y T, Mosig J R, Martin O J F 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 4101
- [9] Avitzour Y, Yaroslav A, Urzhumov, Shvets G 2009 *Phys. Rev. B* **79** 045131
- [10] Lockyear M J, Hibbins A P, Sambles J R, Hobson P R, Lawrence C R 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 041913
- [11] Zhu B, Feng Y J, Zhao J M, Huang C, Jiang T 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 051906
- [12] Cheng Y Z, Yang H L, Cheng Z Z, Xiao B X 2011 *Photonics and Nanostructures—Fundamentals and Applications* **9** 8
- [13] Gu S, Barrett J P, Hand T H, Popa B I, Cummer S A 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 064913
- [14] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Zhou H, Xu Z, Bai P, Peng W D, Lin B Q 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 117802
- [15] Liu H T, Cheng H F, Chu Z Y, Zhang D Y 2007 *Materials & Design* **28** 2166
- [16] Filippo C, Agostino M, Giuliano M 2010 *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **58** 1551
- [17] 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** 087802 (in Chinese) [顾超, 曲少波, 裴志斌, 徐卓, 林宝勤, 周航, 柏鹏, 顾魏, 彭卫东, 马华 2011 物理学报 **60** 087802]
- [18] Filippo C, Agostino M, Giuliano M 2009 *IEEE Radio and Wireless Symposium* **978** 4224
- [19] Luo H, Cheng Y Z, Gong R Z 2011 *Eur. Phys. J. B* **81** 387

Design of a thin wide-band absorber based on metamaterials and resistance frequency selective surface*

Cheng Yong-Zhi Nie Yan[†] Gong Rong-Zhou Zheng Dong-Hao
Fan Yue-Nong Xiong Xuan Wang Xian

(Department of Electronic Science & Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 4 November 2011; revised manuscript received 13 December 2011)

Abstract

Three kinds of absorbers, based on square metal patch structure(SMP) metamaterials, resistance frequency selective surface (RFSS), and the combined SMP with RFSS structures, are designed, respectively. The absorptivities of these absorbers are simulated and analyzed by FDTD method. The simulation results indicate that in a frequency range of 2–30 GHz, SMP absorber can achieve stronger multi-bands absorption by the proper design of geometrical parameters of unit cell; RFSS absorber can achieve stronger high-frequency broadband absorption by the proper design of the square resistance of unit cell. However, the bandwidth of stronger absorption is limited; the absorption of the composite absorber combined with SMP and RFSS structure is greater than 90% in a frequency range of 3–25 GHz, which has a characteristic of better impedance matching to the free space in a wide frequency range.

Keywords: metamaterials, resistance frequency selective surface, wide-band absorption

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Ja, 78.20.Ci

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20090142120003).

[†] E-mail: nieyan@mail.hust.edu.cn