

含有源频率选择表面可调复合吸波体*

陈 谦 江建军[†] 别少伟 王 鹏 刘 鹏 徐欣欣

(华中科技大学电子科学与技术系, 武汉 430074)

(2010年7月29日收到; 2010年11月5日收到修改稿)

基于传输线等效理论, 设计了含有源频率选择表面(active frequency selective surface, AFSS)的三层可调复合吸波体, 第一层是表面层, 为AFSS衬底; 中间层是AFSS层, 由频率选择表面(frequency selective surface, FSS)和PIN二极管阵列构成; 第三层是介质层. 反射率测量结果表明, 通过调节PIN二极管阵列偏置电压可以动态调节吸波体反射特性, 在偏置电压为5 V时, 可获得最佳吸波性能, 在5—15 GHz和5.3—13 GHz频段分别可获得-8 dB和-10 dB以下吸波效果. 采用贴片电阻取代PIN二极管进一步验证了结果的可靠性.

关键词: 频率选择表面, 复合吸波材料, 反射率, PIN二极管

PACS: 42.25.Bs, 52.35.Hr, 75.70.-i

1. 引言

雷达探测技术的日益先进, 对吸波材料的要求越来越高, 不仅要求吸波材料“薄、轻、宽、强”, 而且要求“智能化”. 传统的雷达吸波材料一旦制作出来, 其电磁特性就已固定, 难以满足日益变化的应用需求. 如何实现吸波材料反射特性智能改变成为吸波材料研究的热点^[1].

FSS^[2]对电磁波具有选择透过性, 这使它广泛应用于雷达罩^[3]、空间电磁滤波器^[4-6]、对吸波材料改性^[7-9]等领域. AFSS是在传统FSS单元图形间加载一系列阻抗元件(如电阻、电感、电容)构成的新型FSS. 调节AFSS阻抗元件阻抗大小可以实现AFSS等效阻抗的改变, 因此, 将其与吸波材料复合是制作“智能”吸波材料的有效途径之一.

Ucar等设计了一种基于开口共振环的可调FSS, 可以实现谐振频率小幅平移^[10]. Mias设计了一种方环对称加载贴片电感元件的可调FSS, 可以明显调节谐振峰幅值^[11]. Martynyuk等人设计了一种圆环可调FSS, 当环间加载不同数值电感、电容时, AFSS表现出不同的反射特性^[12]. Tennant和Chambers设计了一种蝶形FSS的可调微波吸收体, 在9—13 GHz频段反射率可以动态调节^[13-15].

上述几种可调吸波体虽然能实现反射特性的动态调节, 但可调频带不够宽. 本文在传统Salisbury屏^[16,17]基础上设计出一种含PIN二极管阵列的可调复合吸波体, 其反射特性在较宽频带能动态可调, 在最佳匹配状态下有较好的吸波效果.

2. 实验内容

2.1. 吸波体结构

吸波体结构如图1所示. 第一层是表面层, 为AFSS衬底; 中间层是AFSS层, 厚度可以忽略不计; 第三层是介质层. 金属底板采用5 mm厚铝板.

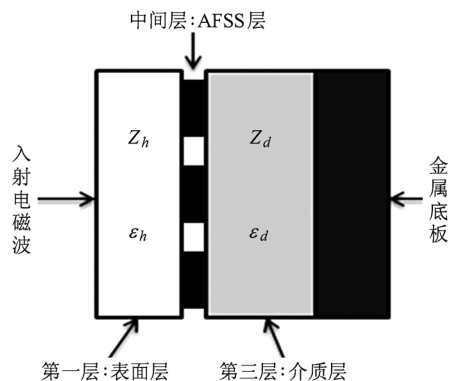


图1 吸波体三层结构示意图

* 国家自然科学基金(批准号:50771047)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jiangj@mail.hust.edu.cn

其传输线等效模型如图 2 所示.

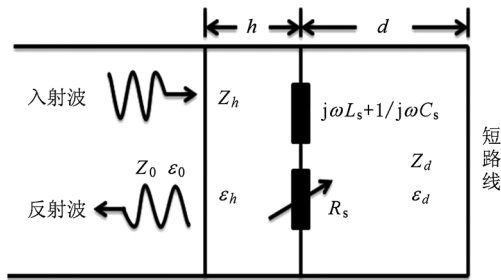


图 2 传输线等效模型

$$Z_H = jZ_h \tan\left(\frac{2\pi fh}{c\sqrt{\epsilon_h}}\right), \quad (1)$$

$$Z_S = R_s + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}, \quad (2)$$

$$Z_D = jZ_d \tan\left(\frac{2\pi fh}{c\sqrt{\epsilon_d}}\right), \quad (3)$$

$$Z_{in} = \frac{Z_H Z_S Z_D}{Z_H Z_S + Z_S Z_D + Z_H Z_D}, \quad (4)$$

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right|, \quad (5)$$

上式中, Z_0, ϵ_0 是空气的特征阻抗和相对介电常数, $Z_0 = 377 \Omega, Z_h, \epsilon_h$ 是表面层的特征阻抗和相对介电常数, Z_d, ϵ_d 是介质层的特征阻抗和相对介电常数, L_s 和 C_s 为 FSS 的等效电感和电容, R_s 是 PIN 二极管阵列等效可变电阻. Z_H, Z_S, Z_D 分别为表面层、AFSS 层、介质层等效阻抗. h, d 分别为表面层、介质层厚度. c, f 为光速和入射波频率, Z_{in}, R 分别为输入阻抗和反射率.

基于传输线等效模型, 吸波体一旦设计出来, 除了 R_s 可调外, 其他均为定值. 则反射率是关于 f 和 R_s 的函数, 通过调节 R_s 可以调节 Z_{in} 的大小, 从而改变吸波体的阻抗匹配状况, 实现反射率的动态调节. 理论上在 R_s 取一最佳值时, 可使反射率最小.

2.2. 样品制备

FSS 样品拓扑结构如图 3 所示. 在 FSS 单元图形间焊接 PIN 二极管 (型号 Phillips BAP70-03) 制作出 AFSS, 大小为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 如图 4 所示. AFSS 衬底板材质为 FR4 绝缘塑料, 厚度 0.7 mm . 介质层是自行制作的泡沫塑料, 厚度为 4.3 mm . 三层黏结在一起, 制得总厚度为 5.1 mm 的测试样品.

PIN 二极管在不同偏置电压下等效为可变电

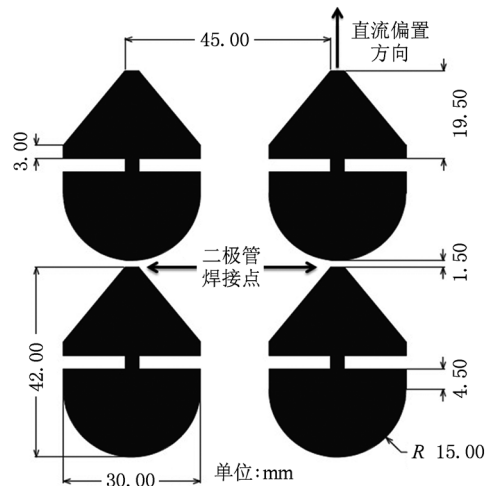


图 3 AFSS 层拓扑结构

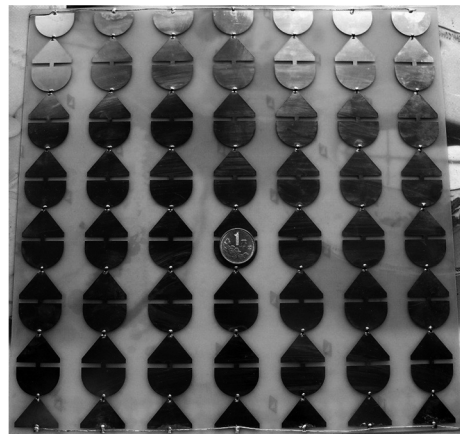


图 4 AFSS 样品

阻, 为了进一步验证实验结果的可靠性, 选取了阻值为 $51 \Omega, 220 \Omega, 1000 \Omega$ 的贴片电阻取代 PIN 二极管制作出另外 3 块样品.

2.3. 样品测试

采用基于矢量网络分析仪 (Agilent 82357E) 搭建的 NRL 弓形法测试平台, 对样品进行反射率测试. 样品台与喇叭天线距离 2 m , 喇叭天线垂直发射线性极化波. PIN 二极管阵列激励信号采用 $10 \text{ MHz}, V_{pp} = 2 \text{ V}$ 的正弦波, 测试中偏置电压从小到大渐变. 典型电压下的反射率-频率曲线如图 5 所示.

用贴片电阻取代 PIN 二极管制得的 3 块样品在相同测试条件下反射率-频率曲线如图 6 所示.

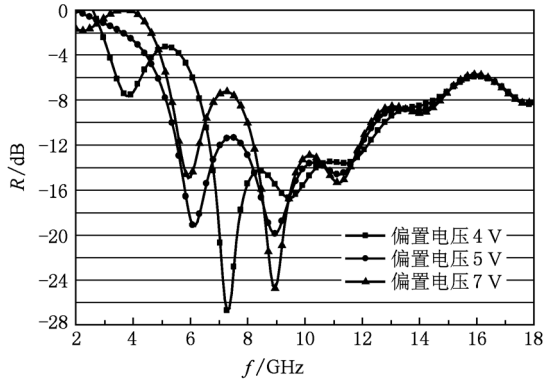


图5 不同偏置电压下的反射率曲线

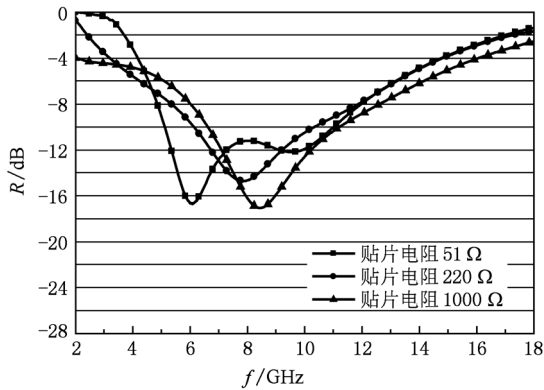


图6 不同阻值下的反射率曲线

3. 结果与讨论

3.1. 结果分析

由图5可见,偏置电压为4 V,5 V时,-8 dB以下吸收频带分别为6.2—15 GHz,5—15 GHz;7 V时,-8 dB以下吸收频带被分成5—6.5 GHz,7.5—15 GHz两个部分.可见,通过调节PIN二极管阵列偏置电压可以动态调节吸波体的阻抗匹配状况,实现反射率的动态调节.偏置电压5 V时处在最佳匹配状态,具有最佳整体吸波性能.

采用贴片电阻取代PIN二极管,测试结果显示不同阻值的贴片电阻反射率曲线明显不同,从而证明采用PIN二极管制作可调吸波体是可行的.

图6中贴片电阻 $R = 51 \Omega$ 时吸波效果最好,但相比采用PIN二极管的吸波体,吸波效果要差许多.这说明吸波体的最佳匹配阻值比 51Ω 要小.与图6相比,图5中10 GHz以后反射率曲线出现规律性起伏,这是因为PIN二极管在交流激励下,不能单纯等效为电阻元件,还存在寄生电感电容,激励源与其构成的回路会产生振荡,从而影响到阻抗匹配.

3.2. 吸波机理分析

采用高频电磁仿真软件对吸波体进行了仿真.采用波端口激励方式,空气腔四面分别对称设置理想导体边界和理想导磁边界,腔体底面采用理想导体边界封闭.

图7为吸波体电场复振幅三维分布图,由图可见7个干涉峰,两边6个干涉峰分别对应单元图形6个端点处,中间大的干涉峰对应PIN二极管.从腔体截面可以看出,干涉峰以AFSS层为中心上下分布,峰的内部电场振幅最大,峰的外围电场振幅最小.电磁波入射到AFSS层,在AFSS两侧发生多次反射和透射,最终获得稳定的干涉模式.由此说明,电磁波的干涉作用是吸波体缩减反射率的主要方式.

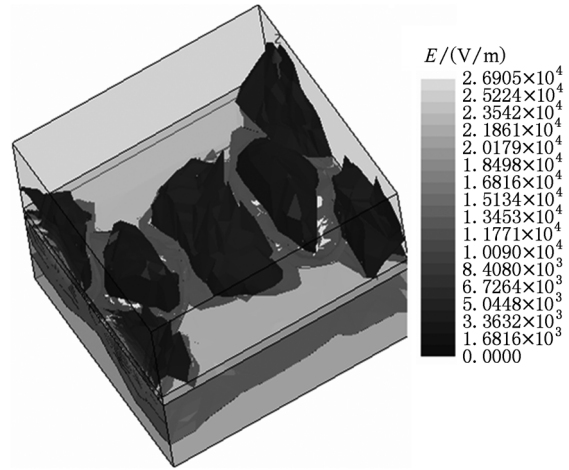


图7 吸波体电场复振幅分布图

图8为AFSS单元面电流密度矢量分布图.由图可见AFSS单元有明显感应电流,尖端尤为突出.

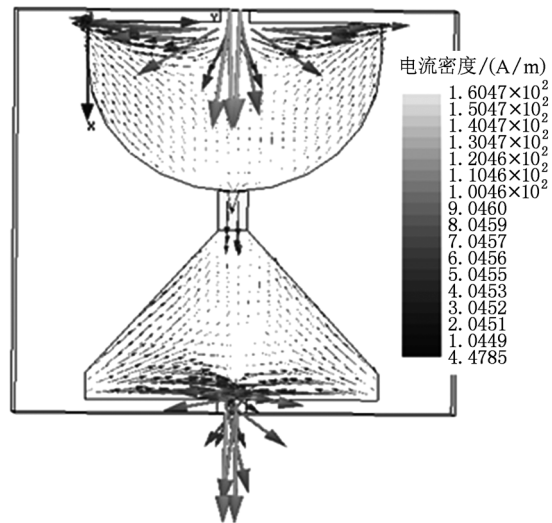


图8 AFSS单元面电流密度矢量分布图

这是因为 AFSS 单元具有偶极子的特征,在电磁场作用下会产生感应电动势,形成感应电流.感应电流经过单元图形间的 PIN 二极管,会产生热量损耗掉.可见,感生电流损耗也是缩减反射率的一重要方式.

4. 结 论

将 PIN 二极管集成到 FSS 中,可以制作出一种

新型可调复合吸波体.调节 PIN 二极管阵列的偏置电压,可以调节吸波体阻抗匹配状况,实现反射特性的动态改变.吸波体等效面密度为 2.42 kg/m^2 ,作为一种质轻、宽频、自适应可调吸波体,具有一定的应用价值,对设计智能吸波材料具有一定的借鉴意义.

- [1] Yang G D, Kang Y, Meng Q J 2010 *Applied Chemical Industry* **39** 584 (in Chinese) [杨国栋、康永、孟前进 2010 应用化工 **39** 584]
- [2] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New York: Wiley-Interscience) pp1—25
- [3] Li X Q, Gao J S, Zhao J L, Sun L C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3803 (in Chinese) [李小秋、高劲松、赵晶丽、孙连春 2008 物理学报 **57** 3803]
- [4] Li X Q, Feng X G, Gao J S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3193 (in Chinese) [李小秋、冯晓国、高劲松 2008 物理学报 **57** 3193]
- [5] Jia H Y, Gao J S, Feng X G, Sun L C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 505 (in Chinese) [贾宏燕、高劲松、冯晓国、孙连春 2009 物理学报 **58** 505]
- [6] Fang C Y, Zhang S R, Lu J, Wang J B, Sun L C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5023 (in Chinese) [方春易、张树仁、卢俊、汪剑波、孙连春 2010 物理学报 **59** 5023]
- [7] Liu H T, Cheng H F, Chu Z Y, Cao Y 2005 *Materials Review* **19** 30 (in Chinese) [刘海韬、程海峰、楚增勇、曹义 2005 材料导报 **19** 30]
- [8] Lu J, Chen X Y, Wang J B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7200 (in Chinese) [卢俊、陈新邑、汪剑波 2008 物理学报 **57** 7200]
- [9] Nie Y, Feng Z K, Zhang X C, He H H 2004 *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science* **32** 50 (in Chinese) [聂彦、冯则坤、张秀成、何华辉 2004 华中科技大学学报(自然科学版) **32** 50]
- [10] Ucar M H B, Sondas A, Erdemli Y E 2008 *Progress in Electromagnetics Research B* **6** 65
- [11] Mias C 2003 *Electron. Lett.* **39** 724
- [12] Martynyuk A E, Lopez J I M, Martynyuk N A 2005 *Electron. Lett.* **41** 2
- [13] Tennant A, Chambers B 2004 *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* **14** 46
- [14] Tennant A, Chambers B 2004 *Smart Mater. Struct.* **13** 122
- [15] Tennant A, Chambers B 2009 *IEEE T. Antenn. Propag.* **57** 808
- [16] Wu R X, Chen P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2915 (in Chinese) [伍瑞新、陈平 2004 物理学报 **53** 2915]
- [17] Wu R X, Wang X Y, Qian J, Zhang M X, Zhu H F, Xu P H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 745 (in Chinese) [伍瑞新、王相元、钱鉴、张明雪、朱航飞、徐培华 2004 物理学报 **53** 745]

Tunable composite absorber with active frequency selective surface^{*}

Chen Qian Jiang Jian-Jun[†] Bie Shao-Wei Wang Peng Liu Peng Xu Xin-Xin

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

(Received 29 July 2010; revised manuscript received 5 November 2010)

Abstract

Based on the equivalent transmission line theory, a three-layer tunable composite absorber with active frequency selective surface (AFSS) is designed. The first layer is an AFSS substrate. The middle layer is an AFSS, which is composed of a frequency selective surface (FSS) and a PIN diode array. The third layer is an insulator. Reflectance measurement shows that the reflection characteristic of the absorber can be dynamically adjusted by adjusting the bias voltage of the PIN diode array. When the bias voltage is 5 V, the best absorption property is observed. Reflection coefficient is below -8 dB and -10 dB at the frequency bands of 5—15 GHz and 5.3—13 GHz, respectively. Replacing PIN diodes with surface mount device (SMD) resistors, the reliability of the above results is further verified.

Keywords: FSS, composite absorber, reflectivity, PIN diode

PACS: 42.25.Bs, 52.35.Hr, 75.70.-i

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50771047).

[†] Corresponding author. E-mail: jiangjj@mail.hust.edu.cn