

# 含螺旋单元频率选择表面的宽频带 强吸收复合吸波体\*

徐永顺 别少伟<sup>†</sup> 江建军 徐海兵 万东 周杰

(华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2014年4月30日收到; 2014年6月6日收到修改稿)

设计和制备了含螺旋单元频率选择表面吸波片的三层复合吸波体, 上层和下层均为磁性吸波片, 中间层为带缺口的螺旋单元频率选择表面. 复合吸波体在总厚度分别为 1.4, 1.7 和 2.0 mm 时, 其反射率在  $-10$  dB 以下的频带宽度分别达到了 9.29, 6.69 和 7.11 GHz, 与不含有频率选择表面的吸波体相比较 (其他参数相同),  $-10$  dB 以下反射率带宽分别提高了 159.5%, 69.3% 和 129.4%, 复合吸波体在总厚度低于吸波体时, 也取得了更好的反射效果. 带缺口圆螺旋单元的频率选择表面嵌入吸波体中, 引入了额外的吸收频带, 拓宽了吸波体的反射率频带宽度. 仿真分析表明嵌入频率选择表面能够改善吸波体的阻抗匹配性, 进而影响其反射率.

**关键词:** 吸波体, 频率选择表面, 复合吸波体

**PACS:** 52.35.Hr, 75.70.Cn, 77.84.Lf, 78.20.Ci

**DOI:** 10.7498/aps.63.205202

## 1 引言

随着无线传输和高频电子设备在商业和军事上广泛应用, 电磁干扰以及电磁兼容性问题所带来的影响受到了极大的重视, 吸波材料引起了广泛关注<sup>[1-3]</sup>. 电子器件的小型化和雷达探测技术的进步, 使得“薄、轻、宽、强”的吸波材料有极为实际的需求<sup>[4,5]</sup>. 然而, 对于传统的吸波材料而言, 宽的吸波频段需要采用厚的吸波材料, 宽频带强吸收与薄轻难以兼顾<sup>[6-8]</sup>. Rozanov<sup>[8]</sup>指出, 任何电介质材料的吸波平板都不可能在其厚度小于某一频点的  $1/17.2$  波长时有低于  $-10$  dB 的反射率. 频率选择表面 (FSS) 作为一种空间滤波器, 由金属贴片组成偶极子阵列或者缝隙阵列, 对电磁波表现出带阻或带通特性<sup>[9,10]</sup>. FSS 特有的频率选择特性, 使得其在混合雷达罩以及带阻滤波器等方面有广泛的应用. FSS 的图形多样、尺寸多变, 以及遗传算法和仿真软件的运用使得 FSS 的设计更加方便自如, 恰当的设计可以使其在一定频率范围内呈现强吸收的

特点<sup>[11,12]</sup>. 但是在很宽的频带内, 单一的 FSS 仍然具有强吸收特征的报道并不多见. 在传统吸波材料嵌入 FSS 组成复合吸波体可能是兼顾吸波体宽频带、强吸收和薄、轻的有效途径. Sun 等<sup>[13]</sup>用方环形的 FSS 置于涂覆吸波材料的平板泡沫吸波体中, 无论是吸收强度还是频带宽度都有较大的提高, 但是其复合吸波体的总厚度超过了 5 mm. Chen 等<sup>[14]</sup>采用嵌入单圆环和双圆环的 FSS 的复合吸波体中, 拓宽了原有吸波材料的频段, 不足的是吸收频带仍不是太宽——反射率低于  $-10$  dB 的带宽小于 3 GHz. 上述复合吸波体在宽频带、强吸收与薄、轻之间的兼顾仍有欠缺.

本文在传统的吸波体中嵌入带缺口圆螺旋单元的 FSS, 设计了三组总厚度分别为 1.4, 1.7 以及 2.0 mm 含缺口螺旋 FSS 的复合吸波体, 其反射率  $-10$  dB 以下频带宽度有很大提高. 并且复合吸波体在总厚度低于吸波体时, 也获得了更好的反射率. 结果表明在吸波体中嵌入 FSS 是解决吸波材料宽频带、强吸收与薄、轻之间矛盾的有效途径之一. 带缺口的圆螺旋 FSS 嵌入吸波体中, 引入了额外的

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61172003) 和湖北省自然科学基金 (批准号: ZRY0124) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: bieshaowei@hust.edu.cn

吸收频带, 拓宽了吸波体的反射率频带宽度. 仿真分析说明 FSS 的加入改善了吸波体的阻抗匹配性, 进而影响吸波体的反射率.

## 2 实验方法

### 2.1 复合吸波体结构

Delihacioglu<sup>[15]</sup> 采用矩量法从理论上推导出旋转周期为 2 的单方螺旋呈现多谐振的特征. 运用螺旋 FSS 多谐振的特性, 加载方螺旋形的 FSS 可以增加额外的吸收频带, 极大地提高了 Salisbury 屏 (Salisbury screen) 反射率低于 -10 dB 的带宽<sup>[16]</sup>. 双开口谐振环 (SDRR) 金属环上的开口以及内外环之间的间距诱导产生磁谐振, 与完整的金属环相比, SDRR 作为基本单元的 FSS 反射率曲线含多个谐振峰, 反射率频带较宽<sup>[17]</sup>. 开口增加了金属环为基本单元的 FSS 谐振峰. 而带缺口的圆螺旋 FSS 具有螺旋形及类似于 SDRR 形态. 基于此, 为利用多谐振增加吸收频带以获得更好的宽频带低反射率, 设计和制备了由厚度为  $t_1$  的吸波片 1 和  $t_2$  的吸波片 2, 中间嵌入厚度为  $d$  的带缺口单圆螺旋 FSS 所构成的总厚度为  $t$  的复合吸波体, 其结构如图 1 所示. 圆螺旋的旋转周期为 2, 线条宽度为 4 mm, FSS 单元间距为 30 mm, 如图 2 所示. 吸波片和 FSS 的长宽均为 180 mm.

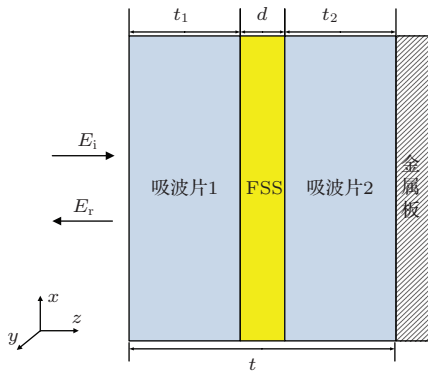


图 1 复合吸波结构横截面示意图

### 2.2 样品制备

采用传统的橡胶工艺制备了厚度分别为 0.5, 0.8 和 1.1 mm 的吸波片, 标准同轴样品测试的电磁参数 (介电常数  $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$ , 磁导率  $\mu = \mu' + j\mu''$ ) 如图 3 所示. FSS 是由总厚度为 0.1 mm 的覆铜板 (衬底材料为 FR4), 采用印制电路板工艺制备而成. 将两层吸波片与 FSS 按照图 1 所示的结构上下叠

加在一起制备了三组复合吸波体, 并且将两层吸波片叠加制备了相应厚度不含 FSS 的三组吸波体, 结构参数如表 1 所示, 复合吸波体未粘贴时的实体结构如图 4 所示.

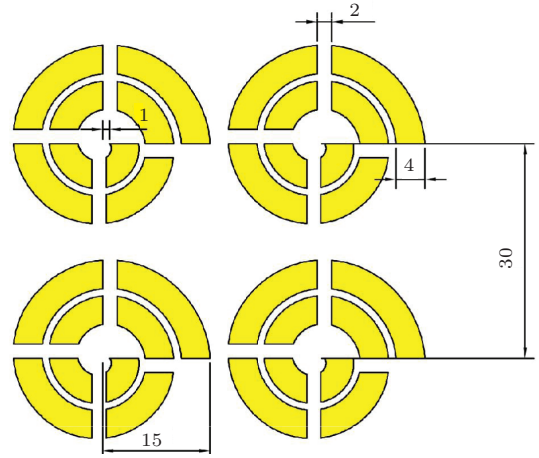


图 2 FSS 单元形状及尺寸

表 1 样品名称及参数

样品名称	参数			
	$t_1/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$t_2/\text{mm}$	$t/\text{mm}$
1	0.5	0.1	0.8	1.4
2	0.5	—	0.8	1.3
3	0.5	0.1	1.1	1.7
4	0.5	—	1.1	1.6
5	0.8	0.1	1.1	2.0
6	0.8	—	1.1	1.9

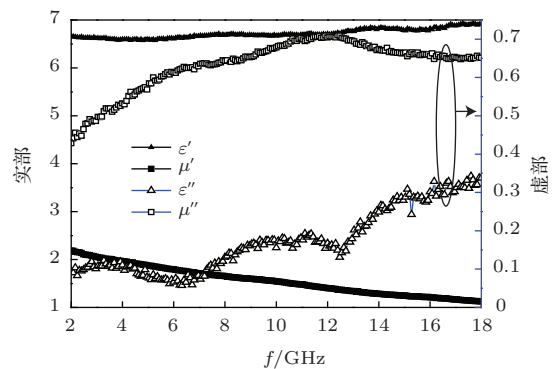


图 3 吸波片电磁参数

## 3 结果与讨论

采用 GJB2038-94 测试了样品的反射率, 测试结果如图 5 所示. 由图 5 可知, 样品 1 的反射率除了在 11—13 GHz 频段外都低于样品 2, 并且样品

1的反射率-10 dB以下频带宽度为9.29 GHz, 带宽提高了159.5%。样品3的反射率-10 dB以下频带宽度为6.69 GHz, 与不含有FSS的样品4相比较, 反射率-10 dB以下频带宽度提高比例为69.3%。相似地, 样品5反射率-10 dB以下频带宽度为7.11 GHz, 在2—18 GHz全频带内反射率低于样品6, 并且其工作频带宽度提高了129.4%。三组复合吸波体的反射率曲线都展现出了多谐振特性, 表明带缺口的圆螺旋FSS的嵌入增加了吸波体的谐振峰。复合吸波体的反射率-10 dB以下频带宽度和强度整体上都要优于吸波体。尽管吸波体嵌入FSS使厚度依次增加了7.7%, 6.3%和5.3%, 但反射率-10 dB以下频带宽度的增加远大于厚度增加的比例, 嵌入FSS极大地改善了吸波体的反射率。通过比较样品1和样品4、样品1和样品6以及比较样品3和样品6, 很容易发现, 尽管前者的总厚度要薄于后者, 但是其反射率效果并不弱于后者, 并且在高频段有更低的反射率。

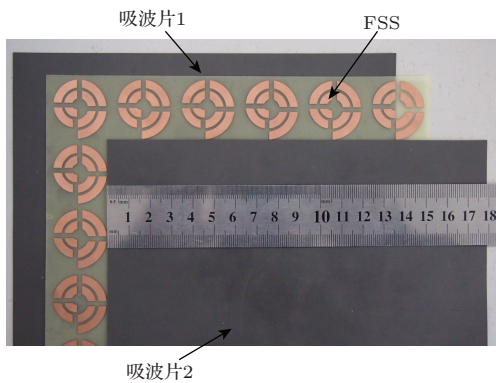


图4 复合吸波体实体结构

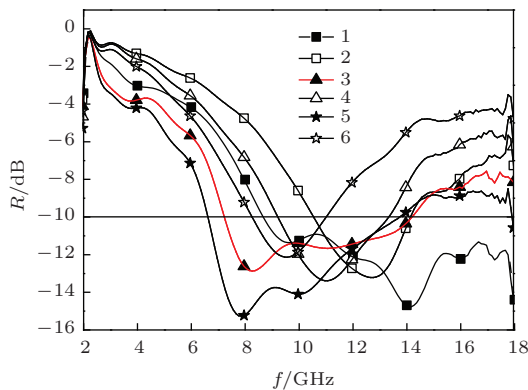


图5 复合吸波体和吸波体的反射率

根据电磁波传播理论, 当电磁波在理想介质中传播时, 其有效波长

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{1}{(f\sqrt{\epsilon\mu})}, \quad (1)$$

其中  $f$  为频率。

为了方便后面的论述, 我们假设电磁波沿着如图1所示的  $z$  轴方向传播。

入射波  $E_i$  瞬时表达式为

$$\mathbf{E}_i = e_x E_{\text{im}} \cos(\omega t + \varphi_z) + c, \quad (2)$$

其中,  $c, \varphi_z$  为常数;  $e_x$  为  $x$  轴方向的单位矢量。

反射波瞬时表达式为

$$\mathbf{E}_r = e_x E_{\text{im}} \cos[\omega t + \varphi_z + 2\pi(2d'/\lambda_{\text{eff}})] + c, \quad (3)$$

其中  $d'$  表示理想介质的厚度。这样, 合成电磁波  $\mathbf{E}_{\text{fin}}$  瞬时表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{fin}} &= \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r \\ &= e_x E_{\text{im}} \cos(\omega t + \varphi_z + \pi(2d'/\lambda_{\text{eff}})) \\ &\quad \times \cos(\pi(2d'/\lambda_{\text{eff}})) + 2c, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{驻波系数 } S = \frac{|\mathbf{E}_{\text{fin}}|_{\text{max}}}{|\mathbf{E}_{\text{fin}}|_{\text{min}}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}; \text{ 反射系数 } |\Gamma| = \frac{S - 1}{S + 1}.$$

由上述讨论可知,  $2d'/\lambda_{\text{eff}}$  的值越接近于  $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ , 则反射系数越小。吸波片对电磁波的响应特性取决于其中合金颗粒粉末的电磁特性, 这些粉末均匀分散在硅橡胶中, 吸波片的电导率很小, 电子也只能在极小的范围内移动, 因此我们认为将吸波片看作理想介质是合理的。因此, 对于相同电磁参数的吸波体, 其厚度越大, 第一谐振频率就会越低, 比较图5中吸波体表现出来的反射率特点可以验证这一结论。并且, 复合吸波体的第一谐振频率也会随着厚度的增加表现出向低频轻微移动的特点。

另外, 在低频段, 因入射波长增加, 复合吸波体对于低频段的吸收效果改善难度要大于高频段。但是结合了FSS的复合吸波片, 其反射率-10 dB以下频带在吸波体原有频段基础上向高低频两端拓展, 带宽有很大的提高。这与嵌入带缺口螺旋的FSS后, 该FSS增加了额外低频谐振峰进而改善其低频段的反射率有关。

为了说明嵌入FSS改善吸波体反射率的机理, 我们运用高频仿真软件 Ansoft HFSS 13 进行仿真分析。以样品5, 6为例, 展示其仿真结果, 仿真和实测反射率的对比效果如图6所示。从图中可以看出, 实测的反射率随频率变化曲线与仿真曲线符合得很好。实测与仿真误差的产生包括FSS制备时的几何误差(FSS的线条精度误差)以及FSS与吸波体嵌合时引入不可排除的空气层等因素。

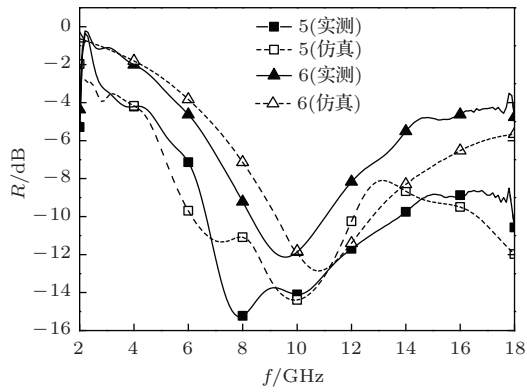


图6 样品5和样品6的仿真与测试

图7展示了样品5和样品6在仿真中10 GHz

时的电磁场分布。从图中可知，样品5中其电磁场分布有明显的聚敛性，电场在有FSS的区域要小于周围的强度，磁场分布也有类似的特征。吸波体则没有这样的特征，表现出相对均匀分布。并且，在10 GHz这一频点上，样品5的电场强度整体上要小于样品6，而磁场强度整体上要大于样品6，这表明在这个频点上，含有FSS的样品5整体极化强度小于样品6，而磁化强度则相反。FSS的嵌入提高了吸波体整体的磁导率而降低了介电常数，改善了吸波体的阻抗匹配性，进而说明FSS具有调节吸波体电磁特性的功能，从而影响其反射率。

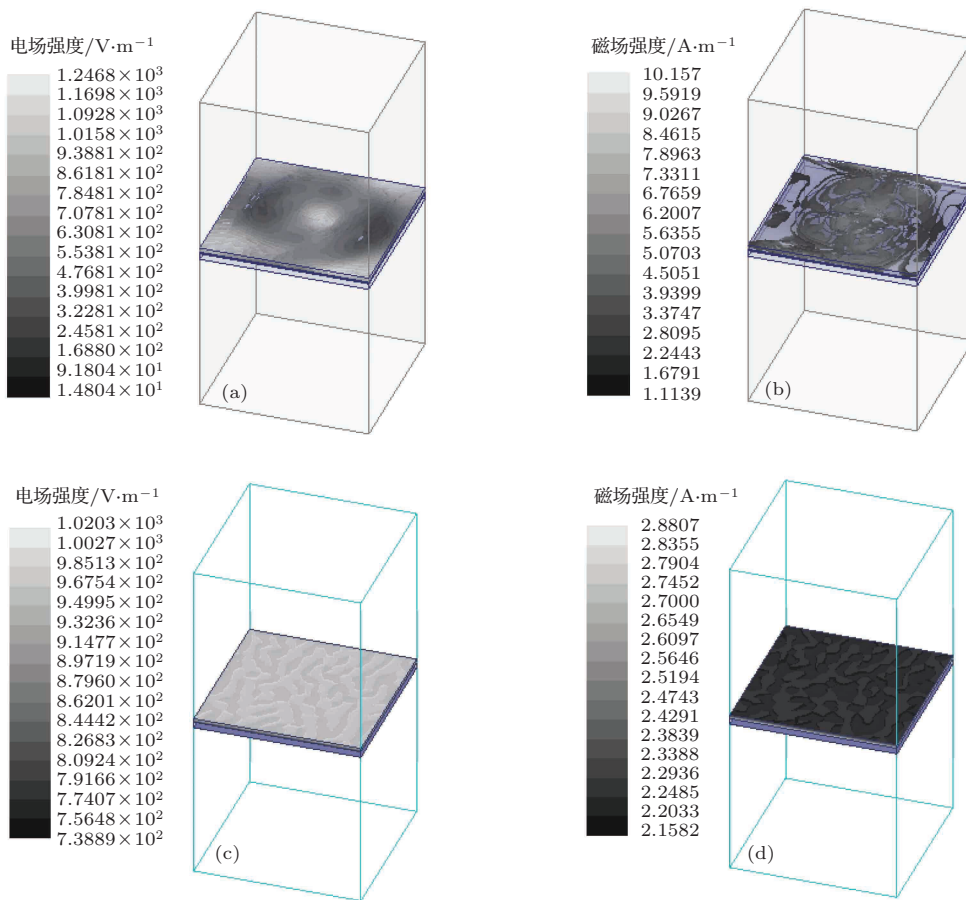


图7 仿真电磁场分布 (a) 样品5电场分布; (b) 样品5磁场分布; (c) 样品6电场分布; (d) 样品6磁场分布

## 4 结 论

本文设计和制备了总厚度不超出2 mm 三组复合吸波体和吸波体。复合吸波体在不明显增加吸波体厚度的情况下，相比于不含FSS吸波体(其他参数相同)反射率-10 dB以下有更宽的频段带宽和整体上更高的吸收强度。复合吸波体相对于

不含FSS吸波体的反射率-10 dB以下频段展宽了159.5%，69.3%和129.4%。根据等效波长原理，定性证明了吸波体谐振频率的变化，并且也说明了复合吸波体的第一谐振频率随厚度的增加而降低的趋势。通过对比分析证明了复合吸波体能够在不降低反射率效果的前提下有效地降低吸波体的厚度。带缺口的圆螺旋FSS嵌入吸波体中，引入了额外的吸收频带，拓宽了吸波体的反射率频带宽度。

仿真分析说明嵌入FSS能够提高吸波体的整体磁导率而降低吸波体的整体介电常数,改善了吸波体的阻抗匹配性,进而调节吸波体的电磁场分布影响其反射率.吸波体中嵌入FSS是解决吸波材料宽频带、强吸收与薄、轻之间矛盾的有效途径之一.虽然本文的复合吸波体反射率-10 dB以下有较宽的频带宽度和较薄的厚度,但还是与吸波材料“薄、轻、宽、强”的要求有较大的差距.下一步的研究目标主要是在保持目前的反射率效果的前提下进一步降低复合吸波体的厚度和密度.

### 参考文献

- [1] Xu Q Y, Zhang H B, Zhou P H, Lu H P, Liang D F, Xie J L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 058103 (in Chinese) [徐秋阳, 张辉彬, 周佩珩, 陆海鹏, 梁迪飞, 谢建良 2013 物理学报 **62** 058103]
- [2] Li S J, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Yang Q, Zhang Z, Zhang H M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 244101 (in Chinese) [李思佳, 曹祥玉, 高军, 郑秋容, 杨群, 张昭, 张焕梅 2013 物理学报 **62** 244101]
- [3] Zhou Y J, Pang Y Q, Cheng H F 2013 *Chin. Phys. B* **22** 015201
- [4] Chen Q, Jiang J J, Bie S W, Wang P, Liu P, Xu X X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074202 (in Chinese) [陈谦, 江建军, 别少伟, 王鹏, 刘鹏, 徐欣欣 2011 物理学报 **60** 074202]
- [5] Wang M L, Zhang S J, Liu J Q, Liang W, Liu X M, Liang X W 2012 *International Workshop on Metamaterials (Meta)* Nanjing, China October 8–10, 2012 p1
- [6] Chen L Y, Duan Y P, Liu L D, Guo J B, Lin S H 2011 *Mater. Des.* **32** 570
- [7] Chiu S C, Yu H C, Li Y Y 2010 *J. Phys. Chem. C* **114** 1947
- [8] Rozanov K N 2000 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **48** 1230
- [9] Munk B A 2000 *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design* (New York: Wiley) pp3–12
- [10] Zhou H, Qu S B, Peng W D, Lin B Q, Wang J F, Ma H, Zhang J Q, Bai P, Wang X H, Xu Z 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054101
- [11] Zhang L, Yang G H, Wu Q, Hua J 2012 *IEEE Trans. Magn.* **48** 4534
- [12] Li L, Werner D H, Bossard J A, Mayer T S 2006 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **54** 908
- [13] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J 2012 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **11** 675
- [14] Chen H Y, Zhang H B, Deng L J 2010 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **9** 899
- [15] Delihacioglu K, Uckun S, Ege T 2008 *Prog. Electromagnet. Res. B* **6** 81
- [16] Seman F C, Cahill R 2011 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **53** 1538
- [17] Li D, Xie Y J, Wang P, Yang R 2007 *J. Electromagnet. Wave. Appl.* **21** 1551

# Composite absorber of broadband and high attenuation with spiral frequency selective surfaces<sup>\*</sup>

Xu Yong-Shun   Bie Shao-Wei<sup>†</sup>   Jiang Jian-Jun   Xu Hai-Bing   Wan Dong   Zhou Jie

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

( Received 30 April 2014; revised manuscript received 6 June 2014 )

## Abstract

In this paper, a three-layer composite absorber with a split-spiral frequency selective surface layer clamped by two traditional absorber layers, is designed. The 1.4, 1.7 and 2.0 mm thick composites reach, respectively, the bandwidth values of 9.29, 6.69 and 7.11 GHz at a reflectivity lower than the  $-10$  dB level, whose operating bandwidths are increased by 159.5%, 69.3% and 129.4% compared with those of the traditional absorbing sheet without frequency selective surface (under otherwise identical parameters). Further, the paper shows that the thinner composite sheet can have more excellent performance in reflection than the absorb sheets. The split-spiral frequency selective surfaces generated multiple resonance can be used to generate additional absorption band. The simulation results show that the embedded frequency selective surface improves an impedance matching between absorber with the free space, which changes the reflection of the absorbing sheet.

**Keywords:** electromagnetic absorber, frequency selective surfaces, electromagnetic composite absorber

**PACS:** 52.35.Hr, 75.70.Cn, 77.84.Lf, 78.20.Ci

**DOI:** [10.7498/aps.63.205202](https://doi.org/10.7498/aps.63.205202)

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61172003) and the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. ZRY0124).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [bieshaowei@hust.edu.cn](mailto:bieshaowei@hust.edu.cn)