

## 抗方阻波动的超宽带轻薄频率选择表面吸波体\*

王东俊<sup>1) #</sup> 孙子涵<sup>2) #</sup> 张袁<sup>1) 3)</sup> 唐莉<sup>2)</sup> 闫丽萍<sup>2) †</sup>

1) (成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610073)

2) (四川大学电子信息学院, 成都 610065)

3) (电子科技大学电子科学与工程学院, 成都 611731)

(2023年8月22日收到; 2023年9月27日收到修改稿)

满足宽带、极化和入射角度稳定、轻薄和强吸收等高性能要求的电阻膜频率选择表面(FSS)吸波体设计难度大,且易因加工中方阻波动导致吸波性能变化.为此,本文首先分析了方阻波动影响电阻膜FSS吸波体性能的机理,提出抗方阻波动的FSS吸波体设计方法.在此基础上,提出利用不同层FSS阻抗随频率变化互补的扩展带宽方法,结合弯折小型化设计,获得了超宽带、极化和角度稳定的轻薄型抗方阻波动FSS吸波体.该FSS吸波体在TE和TM极化下,90%吸波带宽为1.50—20.50 GHz(相对带宽173%),厚度仅为 $0.093\lambda_L$ .TE极化波80%吸波的角度稳定性可达 $45^\circ$ ,而TM极化波90%吸波的角度稳定性可达 $70^\circ$ .当每层FSS方阻在 $12\text{--}30\ \Omega/\text{sq}$ 范围内波动时,吸波体的90%吸波带宽仍保持在167.0%.实验测试结果与仿真结果基本吻合,证明了所提方法的有效性.

**关键词:** 频率选择表面, 吸波体, 薄型, 超宽带, 方阻波动**PACS:** 42.25.Bs, 42.25.Ja, 78.20.Ci, 74.25.mn**DOI:** 10.7498/aps.73.20231365

## 1 引言

电磁超材料吸波体相比于传统吸波材料具有宽带、剖面低、重量轻、设计灵活等优点,并可以实现对电磁波的灵活调控,近年来受到广泛关注<sup>[1-6]</sup>.频率选择表面(FSS)吸波体作为超材料吸波体中的一种,已经广泛应用于雷达散射截面缩减<sup>[7-9]</sup>、隐身技术<sup>[10-12]</sup>、电磁干扰抑制<sup>[13,14]</sup>等领域.超宽带强吸收、极化和入射角度稳定、轻薄是评价FSS吸波体性能的重要指标.其中吸波体的厚度性能通常采用90%吸波带宽最低频率对应的波长( $\lambda_L$ ),或者厚度性能指标(FoM)<sup>[15]</sup>来进行评估.这里FoM定义为Rozanove理论最小厚度 $RL_h$ <sup>[16]</sup>与实际厚度的比值.根据对电磁波的损耗方式,可以将FSS吸

波体分为欧姆损耗<sup>[17]</sup>与介质损耗<sup>[18]</sup>两大类.基于欧姆损耗机理设计的FSS吸波体主要包括集总电阻FSS吸波体<sup>[19-30]</sup>和电阻膜FSS吸波体<sup>[31-41]</sup>.集总电阻FSS吸波体因其结构特点易与有源器件结合用于可调/可开关吸波体设计<sup>[42,43]</sup>,或与带通FSS结构结合形成吸透/吸反一体化结构<sup>[44-46]</sup>.相比于集总电阻FSS吸波体,电阻膜FSS吸波体在表面感应电流处均能产生电磁损耗,因而吸波性能调控灵活度相对较大.

近年来,研究人员采用不同方法研究获得了高性能电阻膜FSS吸波结构.例如Tirkey等<sup>[30]</sup>将类似棋盘状FSS结构利用丝网印刷技术印制在纸张上,获得了覆盖11.9—45.3 GHz(相对带宽为117%)的低成本吸波体,厚度为 $0.09\lambda_L$ ,TE和TM两种极化方式的80%吸波角度稳定性可达 $45^\circ$ .He等<sup>[34]</sup>

\* 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(批准号:U22A2015)资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: liping\_yan@scu.edu.cn

使用电阻膜 FSS 结构结合有耗蜂窝电介质层, 设计了 90% 吸波带宽覆盖 2.0—15.5 GHz (154.3%) 的超宽带吸波体, 厚度为  $0.113\lambda_L$ . Kazemzadeh<sup>[35]</sup> 使用四层周期不同的方形贴片电阻膜 FSS 通过遗传算法优化介质层厚度构建了超宽带超薄吸波体, 99% 吸波带宽可达 3.26—34.65 GHz (165.6%), 厚度系数  $FoM = 0.993$ , 但未讨论角度稳定性. Shi 等<sup>[36]</sup> 通过逐步增大三层电阻膜 FSS 的周期提高电容多样性, 获得了 1.14—14.2 GHz (170.2%) 的 90% 吸波超宽带吸波体, 厚度为  $0.093\lambda_L$ , TE 极化波角度稳定性可达  $30^\circ$ , TM 波可达  $50^\circ$ . 程用志等<sup>[37]</sup> 采用分形金属 FSS 结构结合电阻膜方形贴片 FSS 结构获得了一种超宽带吸波结构, 90% 吸波带宽可达 7.5—42 GHz (139.4%), 厚度仅为  $0.02\lambda_L$ , 两种极化方式的角度稳定性均可达  $50^\circ$ . 磁性材料的引入, 为降低电阻膜 FSS 吸波体厚度提供了有效途径. 郭飞等<sup>[38]</sup> 将磁性电介质基体结合设计的宽带 (79.1%) FSS 吸波体厚度为  $0.065\lambda_L$ . Hossain 等<sup>[39]</sup> 将磁性介质、FR4 介质和两层电阻膜 FSS 结合, 获得了相对带宽为 146.5% 的吸波体, 厚度为  $0.031\lambda_L$ , 但没有考虑角度稳定性. Zheng 等<sup>[40]</sup> 将磁性介质作为单层电阻膜 FSS 吸波结构的隔离层和顶端补偿层, 获得的吸波结构相对带宽为 120%, 厚度为  $0.033\lambda_L$ . 由此可见, 超宽带强吸收、极化和角度稳定以及轻薄是 FSS 吸波体的主要发展趋势, 同时满足这三个性能指标的高性能 FSS 吸波体设计难度很大.

尽管电阻膜 FSS 吸波结构, 尤其是近几年透明电阻膜 FSS 吸波结构一直是微波吸波体领域的研究热点<sup>[47,48]</sup>, 然而对电阻膜加工带来的方阻不稳定影响 FSS 吸波结构性能问题<sup>[35,49,50]</sup> 的研究还停留在对方阻扫参讨论<sup>[31,33]</sup>. 电阻膜的方阻与其厚度成反比, 常用的电阻膜如氧化锡锡 (ITO) 膜厚度在几十到几百纳米之间, 加工中厚度不稳定必然导致方阻在一定范围内波动. 方阻值越大其波动范围越大, 最终影响实际加工 FSS 吸波体的吸波性能. 因此分析方阻波动影响 FSS 吸波体性能的机理, 并在此基础上研究 FSS 吸波体抗方阻波动的鲁棒设计方法, 对电阻膜 FSS 吸波体的优化设计具有重要指导意义.

为此, 本文在分析方阻波动导致 FSS 吸波体性能变化机理的基础上, 提出电流路径多样性是降低吸波体对电阻波动敏感性、提高吸波性能的有效

方法. 结合该方法, 提出不同层阻抗随频率变化趋势互补的设计思路, 采用弯折小型化设计原则, 设计了一个由三层 ITO 膜 FSS 损耗层组合而成的轻薄型、超宽带且角度稳定的吸波体结构, 为抗方阻波动的高性能 FSS 吸波体设计提供了新思路.

## 2 方阻波动影响 FSS 吸波体的机理分析

正如前文指出的那样, 基于电阻膜的 FSS 吸波体设计在加工时因电阻膜厚度不稳定而导致方阻值变化, 将造成 FSS 吸波体的吸波性能下降. 因此, 本节将分析方阻波动影响 FSS 吸波体性能的机理, 并在此基础上给出 FSS 吸波体抗方阻波动的鲁棒设计方法.

首先以十字分形结构 FSS 吸波体为例, 对其方阻波动敏感性机理进行分析. 采用方阻为  $13 \Omega/\text{sq}$  的 ITO 电阻膜设计如图 1 所示的 FSS 吸波体, 其中 FSS 单元结构为一阶十字分形结构, 周期为  $P$ . 这里零阶为四个 L 支节构成的十字结构, 一阶结构为在十字支节的顶端继续加载 L 形支节, 如图 1(a) 所示. 然后在一阶十字分形结构的支节终端加载小方环, 得到如图 1(b) 所示结构, 相应结构参数值

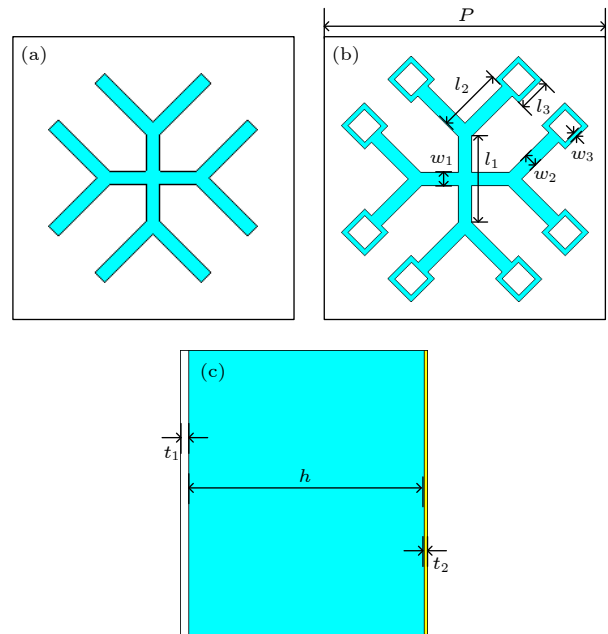


图 1 分形 FSS 吸波体结构 (a) 无方环时和 (b) 有方环时的十字分形 FSS 单元结构; (c) 吸波体侧视图

Fig. 1. Structure of the proposed fractal FSS absorber: The cross-fractal structure (a) without and (b) with square ring; (c) side view of the absorber.

如表 1 所示. 电阻膜 FSS 结构附着在厚度为  $t_1 = 0.175$  mm 的 PET 介质基板上. 空气隔离层厚度为  $h$ , 使用厚度为  $t_2$  的金属作为反射板.

表 1 分形 FSS 吸波体参数

Table 1. Structural parameters of the fractal FSS absorber.

参量	值/mm	参量	值/mm
$t_1$	3.90	$w_1$	0.58
$t_2$	2.59	$w_2$	0.58
$t_3$	1.38	$w_3$	0.20
$P$	11.85	$t_1$	0.175
$h$	5.00	$t_2$	0.05

该分形 FSS 吸波体的共极化和交叉极化反射系数如图 2 所示. 由图 2 可以看到, 该结构交叉极化的反射系数均小于 -55 dB, 因此交叉极化的影响可忽略不计. 由于结构采用了金属反射板, 电磁波入射到该结构的传输系数趋近于 0. 吸波率计算公式为

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1)$$

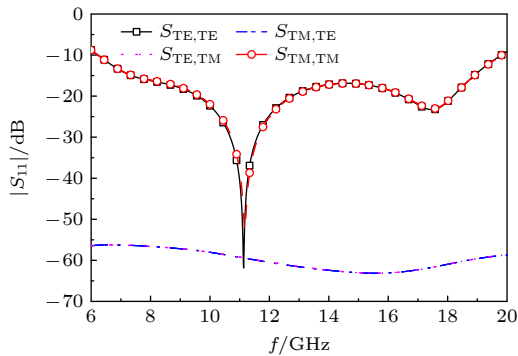


图 2 分形 FSS 吸波体的反射系数

Fig. 2. The scattering parameters of the fractal FSS absorber.

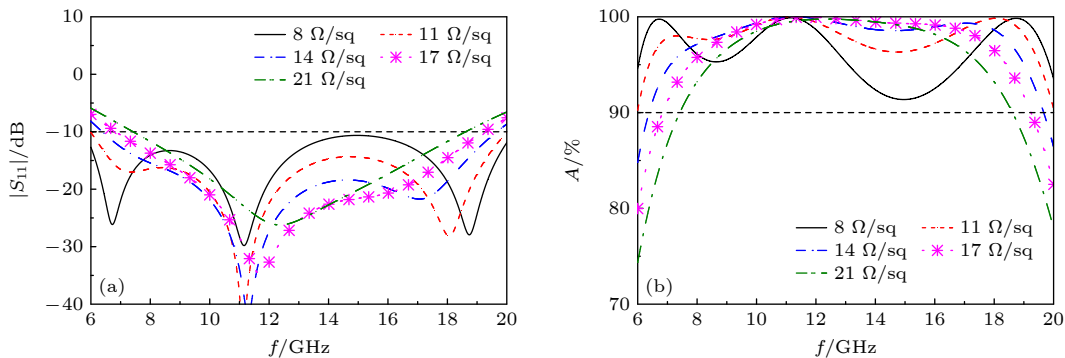


图 3 不同方阻时分形 FSS 吸波体的 (a) 反射系数和 (b) 吸波率

Fig. 3. (a) Reflection coefficient and (b) absorption rate of the fractal FSS absorbers with respect to different sheet resistance.

式中,  $R(\omega)$ ,  $T(\omega)$ ,  $A(\omega)$  分别表示功率的反射率、传输率和吸波率,  $R(\omega) = |S_{xx}|^2 + |S_{yx}|^2$ ,  $T(\omega) = |S_{xx}|^2 + |S_{yx}|^2$ , 其中下标  $xx$  表示为共极化参数,  $yx$  表示交叉极化参数. 由 (1) 式可知反射系数为 -10 dB 时对应 90% 的吸波率. 图 2 仿真结果显示, 在 TE 和 TM 两种极化方式下, 该结构垂直入射时的 90% 吸波带宽为 6.24—19.80 GHz, 相对带宽达到 104%.

基于设计所使用的  $13 \Omega/\text{sq}$  方阻, 根据加工商给出的方阻波动范围, 计算了分形 FSS 吸波体随方阻变化的反射系数和吸波率, 如图 3 所示. 当材料方阻在  $8\text{--}21 \Omega/\text{sq}$  范围内波动时, 结构依然能够在 7.42—18.60 GHz 范围内保持 90% 以上的吸波率. 这表明该结构能够在以  $14.5 \Omega/\text{sq}$  为中心的 89.7% 方阻变化范围内维持良好的吸收性能, 对方阻波动呈现出良好的鲁棒性.

为了进一步分析分形 FSS 吸波体在不同频点处展现出吸波性能变化的原因, 选取随方阻波动吸波率变化不同的三个频点: 8, 11 和 15 GHz, 对比不同方阻时吸波体 FSS 层的表面电流密度, 如表 2 所列. 从表 2 中可以发现, 当 TE 极化电磁波入射时, 随着方阻的增加, 8 和 11 GHz 的吸波体表面电流的集中区域面积逐渐减小, 对应图 3 中相应的反射系数与吸波率波动范围较小. 并且相较于 8 GHz 处, 11 GHz 处的表面电流分布面积缩减更大, 相应地其吸波性能也更加稳定. 而在 15 GHz 时, 随着 ITO 膜方阻变化, 结构上的表面电流密度几乎不发生变化, 其反射系数和吸波性能相对变化更大. 这表明 FSS 结构设计的电流路径多样性, 可使表面电流分布随方阻变化而变化, 从而阻抗变化较小, 这与图 4 中的结论完全一致. 图 4 给出了分形 FSS 吸波体输入阻抗随方阻波动的变化. 由图 4 可以看出, 当方阻从  $8 \Omega/\text{sq}$  增加到  $21 \Omega/\text{sq}$  时, 在

表 2 不同方阻情况下分形 FSS 吸波体的表面电流密度分布  
Table 2. Surface current density of the fractal FSS absorber for different sheet resistance.

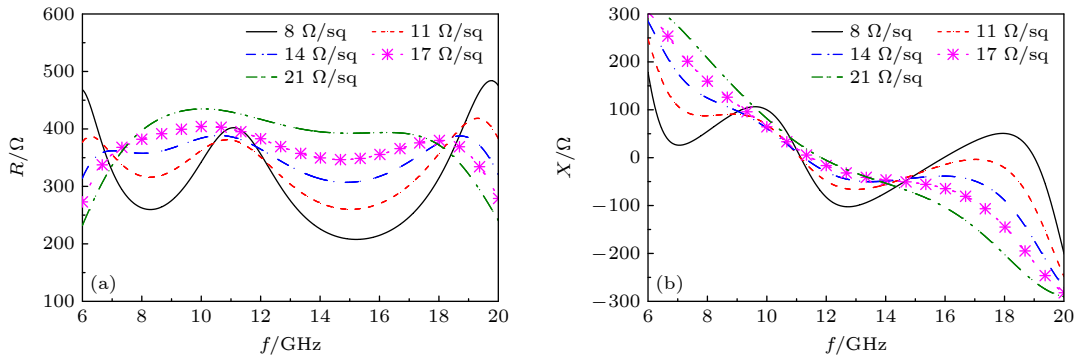
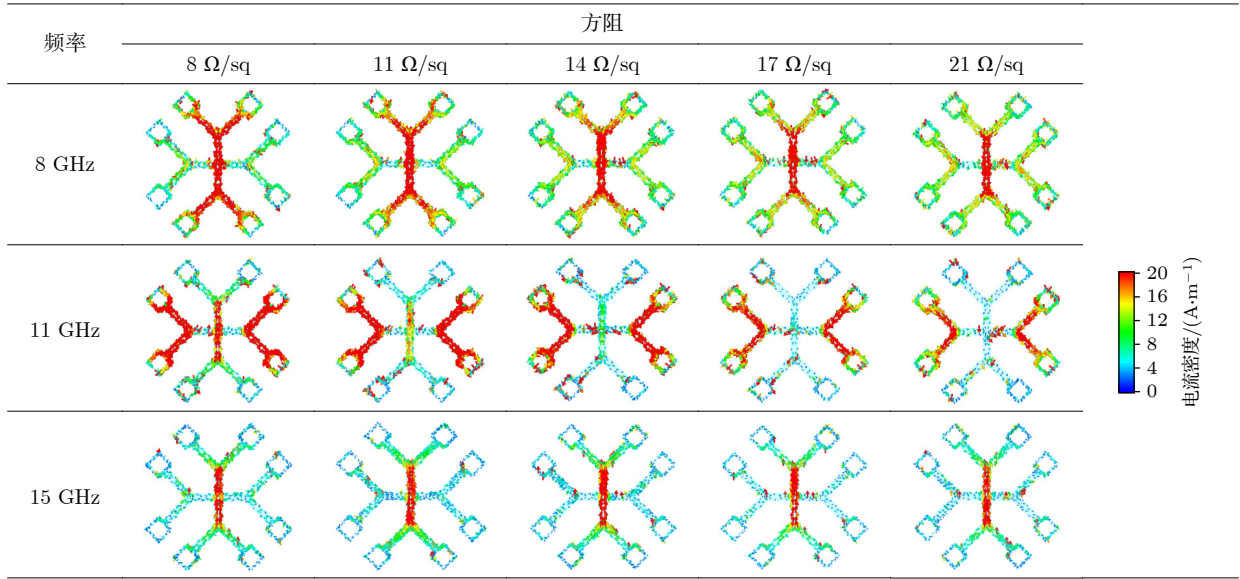


图 4 分形 FSS 吸波体的输入阻抗随方阻波动的变化 (a) 等效电阻; (b) 等效电抗

Fig. 4. Input impedance of the fractal FSS absorber with respect to fluctuation of sheet resistance: (a) Resistance; (b) reactance.

11 GHz 处输入阻抗变化非常小, 而 15 GHz 处输入阻抗变化最大, 这也是导致 15 GHz 处吸波率相对于 11 GHz 处变化剧烈的原因. 同样的现象和结论通过其他结构也得到了验证, 这里不一一赘述.

因此, 使用电阻膜进行 FSS 吸波体设计时, 通过 FSS 单元结构上电流路径的多样化设计, 可使 FSS 结构反射系数随方阻波动呈现较小的变化, 确保 FSS 吸波体的吸波性能不发生恶化, 呈现出良好的鲁棒性.

### 3 超宽带角度稳定的轻薄 FSS 吸波体设计

#### 3.1 吸波体的单元结构

如引言所述, 能够同时满足超宽带、角度稳定和轻薄的 FSS 吸波体是吸波体设计领域的一大挑战. 为此, 使用 ITO 电阻膜, 采用多层和多谐振结

构组合设计进行宽带 FSS 吸波设计, 同时采用弯折小型化单元结构提高角度稳定性和实现电流路径多样化, 通过单元图案设计使不同 FSS 层的阻抗变化趋势随频率变化呈现互补特点, 确保在超宽带内的阻抗匹配, 最终获得了超宽带、角度稳定的轻薄、抗方阻波动 FSS 吸波结构.

所设计高性能 FSS 吸波体的单元结构如图 5 所示, 共包含三层 FSS 电阻膜层和三层聚甲基丙烯酸酯 (PMI) 隔离层. PMI 泡沫的相对介电常数  $\epsilon_{r1}$  为 1.12, 密度约为  $0.075 \text{ g/cm}^3$ , 自重轻, 有利于降低吸波结构整体重量. 吸波结构的最底部为金属反射板. 尽管采用优化算法可以通过优化 PMI 厚度, 结合 FSS 损耗层设计获得高性能 FSS 吸波体, 但三层 FSS 结构参数众多, 必将提高优化设计复杂度和工作量. 为此, 这里简化设计复杂性, 将 PMI 泡沫介质层的厚度统一设定为  $6 \text{ mm}$ , 约为  $12 \text{ GHz}$  电磁波波长的  $1/4$ .

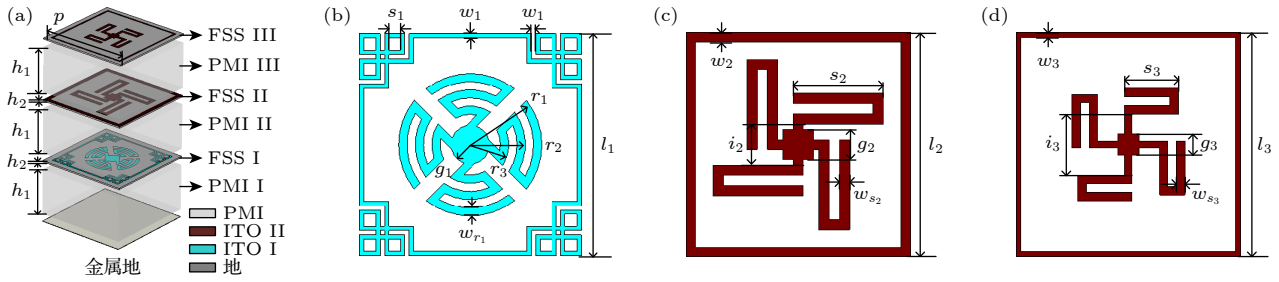


图 5 高性能 FSS 吸波体结构图 (a) 整体结构; (b) FSS I, (c) FSS II 和 (d) FSS III 的单元结构

Fig. 5. Configuration of the proposed FSS absorber: (a) Perspective view; unit cell of (b) FSS I, (c) FSS II and (d) FSS III.

在 FSS 单元结构设计上, FSS I 采用弯折方环与弯折十字结构组合进行宽带和小型化设计. 首先对方环的四个角向内弯折, 形成类似中国结的结构, 同时对十字结构每个支节进行扇形弯折设计. 这些弯折设计不仅实现了单元结构的小型化, 有利于提高角度稳定性; 而且增加了电流路径, 有助于提高结构对于电阻膜方阻波动的鲁棒性. 最后在十字结构中心增加一个圆形贴片, 可在一定程度上降低 FSS 结构在高频处的电阻. FSS III 与 FSS II 单元的结构图案相同但参数不同, 这两层 FSS 单元仅对中心十字结构进行弯折设计, 并在十字结构中心设计方形贴片, 可在一定程度降低高频处的电阻和电抗, 更好地与空间波阻抗  $377 \Omega$  进行匹配. 三层 FSS 层 ITO 膜的方阻依次为  $R_{s1} = 9 \Omega/\text{sq}$ ,  $R_{s2} = 13 \Omega/\text{sq}$  和  $R_{s3} = 13 \Omega/\text{sq}$ . 对于各层 FSS 结构, ITO 均沉积在  $0.175 \text{ mm}$  厚、介电常数为  $\epsilon_r = 3$  的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 介质基板上, 其余结构参数取值见表 3 所列.

表 3 FSS 吸波体参数

Table 3. Structural parameters of the FSS absorber.

参量	值/mm	参量	值/mm	参量	值/mm
$l_1$	10.28	$w_1$	0.20	$s_1$	0.56
$g_1$	0.90	$r_1$	3.30	$w_{r1}$	0.38
$r_2$	2.54	$r_3$	1.78	$l_2$	11.78
$w_2$	0.50	$i_2$	2.18	$s_2$	4.74
$w_{s2}$	0.54	$g_2$	1.62	$l_3$	10.64
$w_3$	0.22	$i_3$	2.96	$s_3$	2.60
$w_{s3}$	0.40	$g_3$	1.06	$P$	11.90
$h_1$	6.00	$h_2$	0.175		

### 3.2 吸波体的设计分析

图 6 为所提高性能 FSS 吸波体分层结构示意图及其导纳. 从图 6(b) 可以看出, ②处的输入电导仅在  $7.7\text{--}14.1 \text{ GHz}$  范围内接近自由空间波阻抗的导纳值  $0.0026$ , 而输入电纳值在宽带范围内都在零附近 (见图 6(c)). 为了实现匹配, 则需要 FSS II

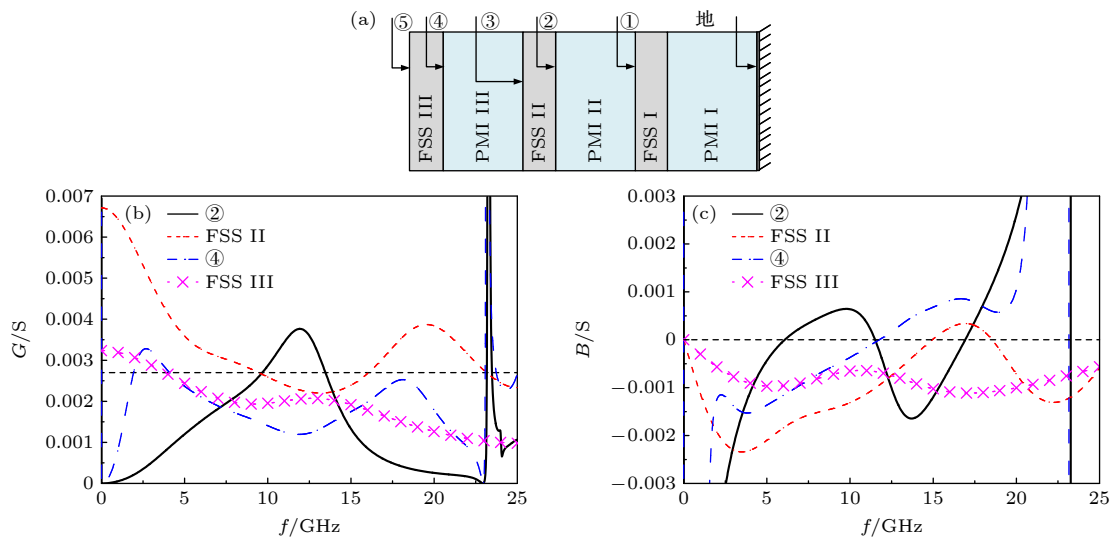


图 6 FSS 吸波体 (a) 分层结构示意图及 (b) 输入电导和 (c) 输入电纳

Fig. 6. The schematic (a) and input conductance (b) and susceptance (c) of the proposed FSS absorber.

在高频和低频段范围内提供较大的电导. 因此, 在 FSS II 的结构设计上, 通过增加方环边长, 减小单元间距, 并结合弯折十字结构的参数设计, 使其等效电导分别在 7.7 GHz 前和 14.1 GHz 后具有与 ②处输入电导相反的变化趋势, 见图 6(b). 由此并联后的输入电导在整个频段范围内变化平缓, 且向匹配值靠近. 然而④处的输入电导在约 4 GHz 后均低于匹配值, 则需 FSS III 提供较大的等效电导以提升整体电导值. 因此, 在 FSS III 结构设计上, 通过调控其结构参数使其等效电导在整个频段范围内变化都较为平缓, 确保吸波体 (位置⑤处) 输入电导在宽带范围与自由空间阻抗相匹配, 如图 7 所示. 由图 7 中不同层表面处输入阻抗的对比, 可以看出正是基于 FSS I 和 FSS II 层等效阻抗随频率变化的互补设计, 加上隔离介质层的阻抗变换, 使得 FSS 吸波结构的带宽被迅速展宽且与自由空间阻抗匹配. 此时吸波结构的总输入阻抗在 1.3—20.5 GHz 频段范围内: 电抗接近于零, 电阻则处于 200—308  $\Omega$  之间波动.

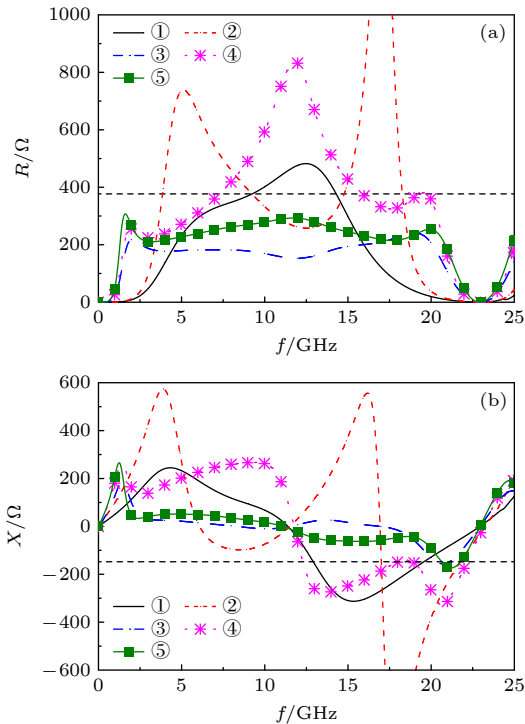


图 7 各层处的输入阻抗 (a) 等效电阻; (b) 等效电抗  
Fig. 7. Input impedance at each layer: (a) Resistance; (b) reactance.

图 8 给出的散射参数仿真结果表明, 所设计的三层 FSS 吸波体在 TE 和 TM 两种极化方式下, 90% 吸波带宽达到了 1.50—20.50 GHz (173%), 整体

FSS 吸波体厚度为 18.6 mm, 即  $0.093\lambda_L$ , 密度为  $0.125 \text{ g/cm}^3$ , 呈现轻薄特性. 为了进一步说明所设计高性能 FSS 吸波体厚度薄的特点, 这里根据 Rozanov 极限<sup>[16]</sup>, 计算了相同 90% 吸波频带的最小理论厚度为

$$RL_h = \frac{1}{2\pi^2} \left| \int_0^\infty \ln |R(\lambda)| d\lambda \right| = 17.72 \text{ mm}, \quad (2)$$

其中  $R(\lambda)$  为反射系数关于波长 ( $\lambda$ ) 的函数. 由此获得厚度性能系数 (最小理论厚度  $RL_h$  与实际所设计的吸波体厚度之比)<sup>[15]</sup> 为  $FoM = RL_h/h_{\text{all}} = 0.95$ , 表明所设计的 FSS 吸波体厚度已经非常接近理论极限值.

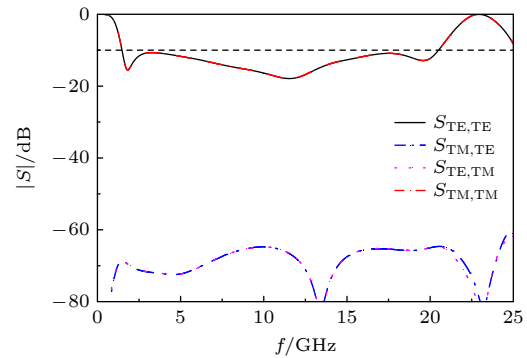


图 8 FSS 吸波体散射参数

Fig. 8. The scattering parameters of the proposed FSS absorber.

### 3.3 角度稳定性分析

极化和角度稳定性是高性能 FSS 吸波体的必备特征, 这里对所设计 FSS 吸波体在不同极化下的角度稳定性进行分析. 图 9(a) 为 TE 极化下不同入射角对应的吸波率, 当入射角为  $20^\circ$  时, FSS 吸波体在 1.50—20.50 GHz 范围内满足 90% 以上的吸波率, 相对带宽为 173%; 当入射角增加到  $45^\circ$  时, 依然能够在 1.48—21.00 GHz 范围内满足 80% 以上的吸波率, 相对带宽为 174%. 图 9(b) 为 TM 极化下的吸波率. 当入射角逐渐增大时, 所设计 FSS 吸波体的吸波带宽逐渐向高频缩减, 当入射角为  $60^\circ$  时, FSS 吸波体满足 90% 吸波率的带宽缩减为 3.53—20.50 GHz, 相对带宽依然能够达到 141%; 当入射角进一步增加到  $70^\circ$  时, 依然能够在 5.75—20.50 GHz 范围内满足 90% 以上的吸波率, 相对带宽为 112%. 即当入射角增大到  $70^\circ$  时, 所设计的 FSS 吸波体对 TM 极化波仍然呈现宽带强吸波效果. FSS 吸波体对 TE 和 TM 极化波入射角度响应

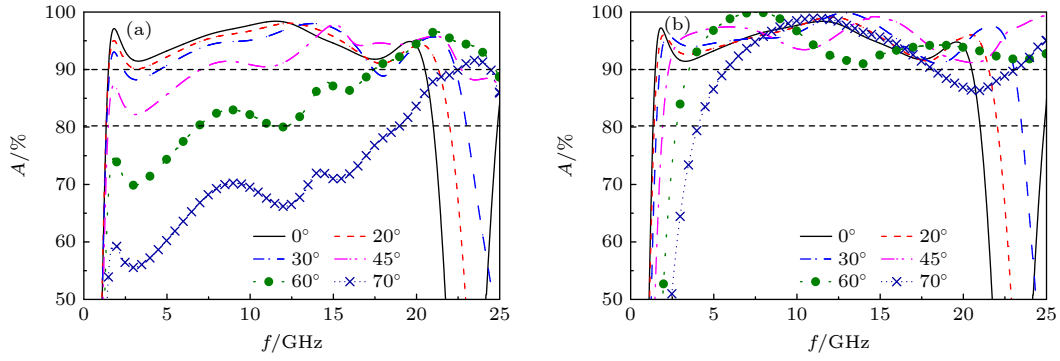


图 9 FSS 吸波体吸波率随入射角的变化 (a) TE 极化; (b) TM 极化

Fig. 9. Absorption rate with respect to incident angles for (a) TE and (b) TM polarizations.

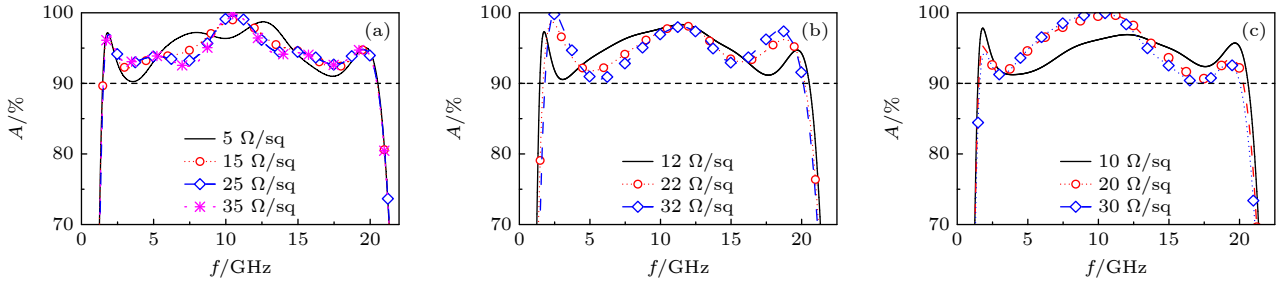

 图 10 (a) FSS I, (b) FSS II 和 (c) FSS III 方阻  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ ,  $R_{s3}$  变化对吸波率的影响 (注意: 当一层 FSS 层方阻变化时, 另外两层取原值)

 Fig. 10. Effects of (a)  $R_{s1}$ , (b)  $R_{s2}$  and (c)  $R_{s3}$  on absorption rate of the proposed FSS absorber. Note that when the sheet resistance of one FSS layer changes, the other two layers take their original values.

的不同, 是由于两种极化波的空间波阻抗以及吸波体的等效阻抗随入射角度的变化不同引起的. 随入射角度  $\theta$  增大, TE 极化波的波阻抗  $Z_0/\cos\theta$  迅速增大, 而 TM 极化波的波阻抗  $Z_0\cos\theta$  则逐渐减小. 同时 FSS 吸波体的等效阻抗随 TE 极化波入射角度的增加低于空间波阻抗的增加, 而随 TM 极化波入射角度增大变得与空间波阻抗接近或差异不大, 因此造成两种极化方式下吸波体的角度稳定性不同.

### 3.4 抗方阻波动鲁棒性分析

本文中的高性能 FSS 吸波体在设计中通过中国结式弯折和十字扇形及方形弯折来实现多电流路径, 以提高吸波体对于加工导致方阻波动的鲁棒性. 为了验证这一性能, 图 10 首先给出了每层 FSS 损耗层方阻变化对吸波性能的影响. 总结三种情况可知, 当每层 FSS 结构方阻在 12—30  $\Omega/\text{sq}$  范围内波动时, 所设计的 FSS 吸波体的 90% 吸波率带宽仍能保持在 167.0%, 即 1.80—20.0 GHz 范围内.

图 11 给出了吸波体三层 FSS 层方阻同时变化时对吸波率的影响. 当 FSS I 方阻为 5  $\Omega/\text{sq}$

时, FSS II 在 12—32  $\Omega/\text{sq}$ , FSS III 在 10—30  $\Omega/\text{sq}$  内同时波动, FSS 吸波体能够维持 85% 以上的吸波率. 当 FSS I 方阻为 35  $\Omega/\text{sq}$  时, FSS II 在 12—32  $\Omega/\text{sq}$ , FSS III 在 10—30  $\Omega/\text{sq}$  范围内同时波动时, FSS 吸波体可维持 80% 以上的吸波率. 由此说明, 即使因加工导致每层 FSS 方阻同时波动, 所设计的 FSS 吸波体也依然能够维持较好的吸波性能.

表 4 给出了所设计 FSS 吸波体与其他 FSS 吸波体的性能对比. 由表 4 可以看出, 所设计的 FSS 吸波体在带宽、厚度和角度稳定性上具有综合优势.

## 4 实验验证

对所设计 FSS 吸波体进行加工后的实物尺寸为 300 mm  $\times$  300 mm, 包含 29  $\times$  29 个单元结构, 如图 12(a) 所示. 隔离介质层采用 6 mm 厚的 PMI 泡沫, 最底层泡沫板背部粘贴铝箔形成反射板. 实验测试系统如图 12(b) 所示, 发射和接收天线置于待测件的同侧, 并沿吸波体中心轴线对称放置, 使用 Agilent E8363 C 矢量网络分析仪进行  $S$  参数测量.

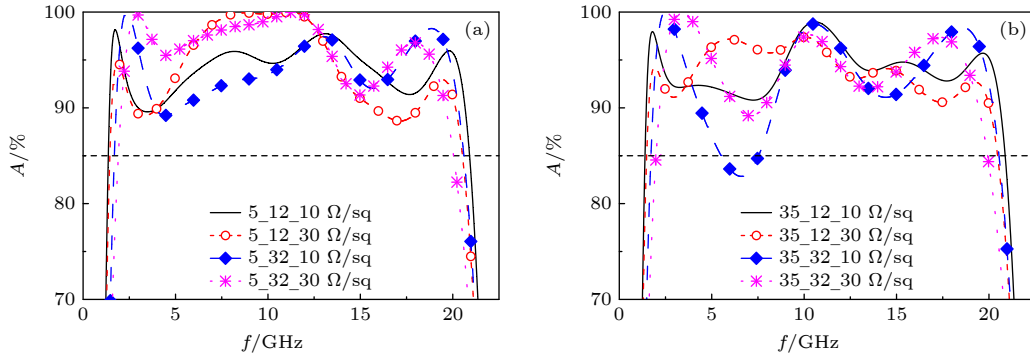


图 11 (a) FSS I 方阻为 5 Ω/sq 和 (b) FSS I 方阻为 35 Ω/sq 时其他 FSS 层方阻同时变化对吸波率的影响  
Fig. 11. Effects of simultaneous variation of square resistances of 2nd and 3rd layers on the absorption performance.

表 4 与其他宽带 FSS 吸波体的性能对比

Table 4. Comparison between the proposed and other FSS absorbers.

文献	90%带宽/GHz	FBW/%	厚度 (FoM)	FSS层数	角度稳定性	
					TE	TM
[15]	1.07—9.70	160.3	0.93	2	30° (80%)	60° (80%)
[17]	2.24—11.40	134.3	0.075 λ <sub>L</sub>	2	45° (80%)	30° (87%)
[22]	2.11—3.89	59.3	0.090 λ <sub>L</sub>	3D	50° (90%)	50° (90%)
[25]	5.80—22.20	117.1	0.155 λ <sub>L</sub>	1	50° (90%)	40° (90%)
[29]	0.87—9.28	165.8	0.086 λ <sub>L</sub>	2	45° (80%)	45° (90%)
[31]	7.0—27.5	118.8	0.096 λ <sub>L</sub>	1	45° (80%)	30° (80%)
[32]	2.79—20.62	152.0	0.119 λ <sub>L</sub>	2	60° (80%)	60° (80%)
[34] <sup>#</sup>	2.0—15.5	154.3	0.113 λ <sub>L</sub>	1	—	—
[36]	1.14—14.2	170.2	0.093 λ <sub>L</sub>	3	30° (90%)	50° (90%)
[37]	7.5—42.0	139.4	0.02 λ <sub>L</sub>	2	50° (> 80%)	50° (> 80%)
[38] <sup>#*</sup>	7.8—18.0	79.1	0.065 λ <sub>L</sub>	1	—	—
[39] <sup>*</sup>	0.76—4.92	146.5	0.031 λ <sub>L</sub>	2	—	—
[41]	2.1—37.5	179.0	0.98	4	45° (80%)	60° (90%)-
[51]	3.16—51.6	176.9	0.102 λ <sub>L</sub>	4	45° (80%)	45° (88%)
本文设计	1.50—20.50	173.0	0.95或0.093 λ <sub>L</sub>	3	45° (80%)	70° (90%)

注: # 代表所用介质层为有耗电介质层; \* 代表介质层为有耗电介质.

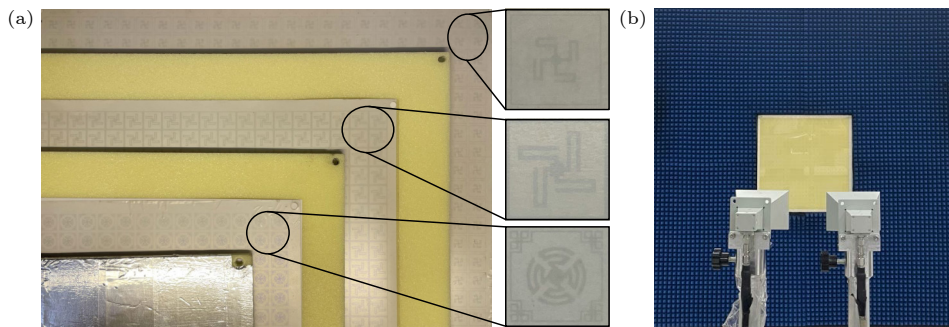


图 12 (a) 加工样件; (b) 实验测试系统

Fig. 12. (a) Fabricated prototype; (b) the experimental setup.

图 13 为垂直入射时的吸波率测试结果. 从图 13 中可以看出, 测试结果在两种极化方式下, 90% 吸波带宽达到 2.59—19.4 GHz (152.9%), 80% 吸波带宽为 2.32—20.1 GHz, 相对带宽为 158.6%. 测试

结果与仿真结果基本吻合, 但在低频段测试结果受测量天线的最低工作频段 2 GHz 和电磁衍射影响, 因此无法给出可靠的测量结果, 导致与仿真结果偏差较大.

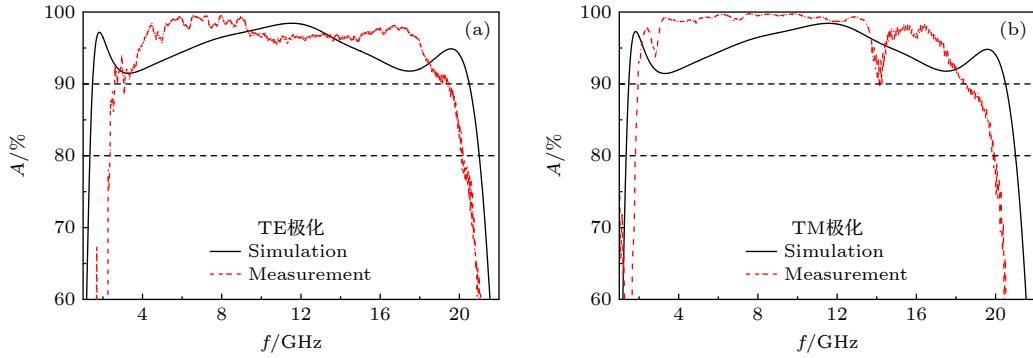


图 13 (a) TE 与 (b) TM 极化下垂直入射测试结果与仿真结果对比

Fig. 13. Comparison of measurement and simulation results of (a) TE and (b) TM polarizations for normal incidence.

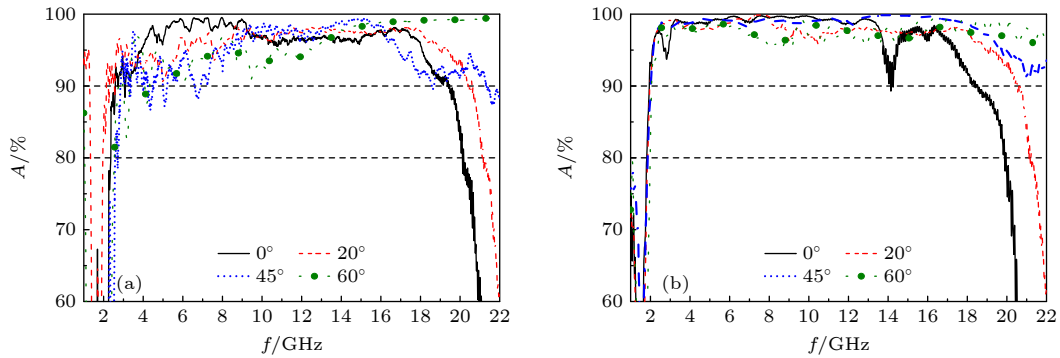


图 14 (a) TE 与 (b) TM 极化下不同入射角吸波率测试结果

Fig. 14. The measured absorption rate of (a) TE and (b) TM polarizations with respect to incident angles.

图 14 为两种极化方式下, 不同入射角度时的吸波率测量结果. 由图 14 可知, TE 极化波 90% 吸波带宽为 2.15—19.5 GHz (160.3%) 时的角度稳定性可达 20°; 而 TM 极化波 90% 吸波带宽为 1.9—18.3 GHz (162.4%) 的角度稳定性可达 60°. 如果考虑 80% 吸波率, 对于 TE 和 TM 模式, 在 2.72—19.9 GHz (151.9%) 范围内, 均可获得高达 60° 的角稳定性. 因此, 所设计 FSS 吸波结构在两种极化方式下均呈现超宽带和高角度稳定性特点.

所设计 FSS 吸波体的测量结果与仿真结果基本符合. 测量所得的吸波率与仿真结果之间差异的主要原因包括: 1) ITO 薄膜在实际加工中不仅出现方阻波动, 还会出现厚度不均匀导致每层 FSS 平面上的方阻不均匀<sup>[51]</sup>, 从而影响吸波率; 2) 测量过程中, 入射角度调节差异、以及收发天线并没有严格关于待测件对称等带来的影响; 3) 电磁边缘衍射效应对测试结果的影响; 4) 多层 FSS 结构在装配时每层单元之间没有完全对齐对测试结果产生影响.

## 5 结 论

本文首先分析了电阻膜 FSS 吸波体设计中方阻波动对吸波性能影响的机理, 发现 FSS 结构设计中增加电流路径的多样性可以有效地抵抗方阻波动对吸波性能的影响. 基于此研究, 提出了采用多层电阻膜 FSS 结构阻抗互补方式进行抗方阻波动的轻薄型超宽带频率选择表面吸波体设计. 所提出的 FSS 吸波体在垂直入射时的带宽为 1.50—20.50 GHz, 相对带宽高达 173%, 覆盖了 Ku, X, C, S 波段以及部分 L 和 K 波段, 整体 FSS 吸波体厚度为  $0.093 \lambda_L$ , 理论最小厚度与实际厚度的比值为 0.95, 实现了轻薄型超宽带频率选择表面吸波体设计. 对吸波体的鲁棒性分析表明, 当方阻在 12—30  $\Omega/\text{sq}$  内波动时, 吸波体依然能够在 167.0% 带宽范围内保持 90% 吸波率. 最后, 对该 FSS 吸波体的角度稳定性进行分析. 仿真和测试结果均表明: 对于 TE 极化波, 80% 吸波率的角度稳定性达到 45°; 而对于 TM 极化波, 其 90% 吸波率的角度稳定性最高

可以达到  $70^\circ$ 。所提出的超宽带 FSS 吸波体设计方法解决了超宽带设计目标下难以同时兼顾吸波体厚度和角度稳定性的问题, 为超宽带、角度稳定的轻薄 FSS 吸波体设计提供了解决思路。

## 参考文献

- [1] Ramya S, Rao I S 2016 *Prog. Electromagn. Res.* **50** 23
- [2] Li M, Shen L, Jing L Q, Xu S, Zheng B, Lin X, Yang Y H, Wang Z J, Chen H S 2019 *Adv. Sci.* **6** 1901434
- [3] Nguyen T K T, Cao T N, Nguyen N H, Tuyen L D, Bui X K, Truong C L, Vu D L, Nguyen T Q H 2021 *IEEE Photonics J.* **13** 1
- [4] Wang Z J, Yang H C, Jing L Q 2023 *J. Opt.* **25** 74002
- [5] Liu T, Cao X Y, Gao J, Zheng Q R, Li W Q, Yang H H 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 1479
- [6] Wang Y Z, Xu H X, Wang Z H, Wang M Z, Wang S J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 134101 (in Chinese) [王彦朝, 许河秀, 王朝辉, 王明照, 王少杰 2020 物理学报 **69** 134101]
- [7] Feng K S, Li N, Li T, 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 034101 (in Chinese) [冯奎胜, 李娜, 李桐 2022 物理学报 **71** 034101]
- [8] Yu J, Jiang W, Gong S X 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 1058
- [9] Huang Z, Luo Z N, Zhao Y, Li H R, Si K X, Han Y, Miao L, Jiang J J 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 6191
- [10] Panwar R, Puthucheri S, Singh D, Agarwala V 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 2802804
- [11] Zhao Y T, Li Y S, Yang G H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 198101 (in Chinese) [赵宇婷, 李迎松, 杨国辉 2020 物理学报 **69** 198101]
- [12] Chakradhary V K, Baskey H B, Roshan R, Pathik A, Akhtar M. J 2018 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **66** 4737
- [13] Zuo P P, Li T W, Wang M J, Zheng H X, Li E P 2020 *IEEE Access* **8** 6583
- [14] Shukoor M A, Dey S 2022 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **64** 1337
- [15] Hossain M I, Nguyen-Trong N, Sayidmarie K H, Abbosh, A. M 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 8215
- [16] Rozanov K N 2000 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **48** 1230
- [17] Yao Z X, Xiao S Q, Jiang Z G, Yan L, Wang B Z 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 591
- [18] Panwar R, Puthucheri S, Agarwala V, Singh D 2015 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **63** 2438
- [19] Yang J, Shen Z X 2007 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **6** 388
- [20] Wang Y, Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 074101 (in Chinese) [王莹, 程用志, 聂彦, 龚荣洲 2013 物理学报 **62** 074101]
- [21] Wu Y M, Wang R, Ding X, Wang B Z 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 224201 (in Chinese) [吴雨明, 王任, 丁霄, 王秉中 2020 物理学报 **69** 224201]
- [22] Shi T, Jin L, Han L, Tang M C, Xu H X, Qiu C W 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 229
- [23] He Y, Feng W S, Guo S, Wei J F, Zhang Y L, Huang Z, Li C L, Miao L, Jiang J J 2020 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **19** 841
- [24] Yao Z X, Xiao S Q, Li Y, Wang B Z 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 7276
- [25] Ma Z Y P, Jiang C, Cao W B, Li J L, Huang X Z 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 9376
- [26] Luo G Q, Yu W, Yu Y, Zhang X H, Shen Z X 2020 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **68** 4206.
- [27] Hao X J, Lin X Q, Yang X M, Su Y H, Yao Y, Yang Y L 2023 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **22** 59
- [28] Zhang Q Q, Zhao Z Z, Zheng J H, Li F R, Tang J Z, Huang Y, Ren Y X, Chen X M 2023 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **72** 8002010
- [29] Cao Z W, Li H R, Wu Y, Yao G J, Zhao Y, Huang Z, Guo S, Miao L, Jiang J J 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 11217
- [30] Cao Z W, Yao G J, Zha D C, Zhao Y, Wu Y, Miao L, Bie S W, Jiang J J 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 9942
- [31] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Lin B Q, Zhou H, Bai P, Gu W, Peng W, Ma H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 087801 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 柏鹏, 彭卫东, 林宝勤 2011 物理学报 **60** 087801]
- [32] Sun Z H, Yan L P, Zhao X, Gao R X K 2023 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **22** 789
- [33] Tirkey M M, Gupta N 2022 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **64** 66
- [34] He F, Si K X, Li R, Zha D C, Dong J X, Miao L, Bie S W, Jiang J J 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 8643
- [35] Kazemzadeh A 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 135
- [36] Shi T, Tang M C, Yang J N, Yan X S 2022 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **21** 551
- [37] Cheng Y Z, Nie Y, Gong R Z, Wang X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 044103 (in Chinese) [程用志, 聂彦, 龚荣洲, 王鲜 2013 物理学报 **62** 044103]
- [38] Guo F, Du H L, Qu S B Xia S, Xu Z, Zhao J F, Zhang H M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 077801 (in Chinese) [郭飞, 杜红亮, 屈绍波, 夏颂, 徐卓, 赵建峰, 张红梅 2015 物理学报 **64** 077801]
- [39] Hossain M I, Nguyen-Trong N, Abbosh A M 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 410
- [40] Zheng L, Yang X Z, Gong W, Qiao M K, Li X C 2022 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **21** 576
- [41] Li Y, Gu P F, He Z etc. 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 11911
- [42] Fan Y D, Li D, Ma H Z, Xing J Q, Gu Y J, Ang L K, Li E P 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 2855
- [43] Zhu M, Yuan H, Li H Y, Wang Y, Cao Q S 2022 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **64** 2005
- [44] Wang Y, Min X F, Zhao M X, Yuan H, Li R H, Hu X R, Cao Q S 2022 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **21** 2125
- [45] Chen Q, Sang D, Guo M, Fu Y Q, 2018 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **66** 4105
- [46] Xing Q J, Wu W W, Yan Y C, Zhang X M, Yuan N C 2022 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **21** 1688
- [47] Jiang H, Yang W, Lei S W, Hu H Q, Chen B, Bao Y F, He Z Y 2021 *Opt. Express* **29** 29439
- [48] Li D D, Hu X J, Gao B T, Yin W Y, Chen H S, Qian H L 2023 *Prog. Electromagn. Res.* **176** 35
- [49] Zhang H B, Zhou P H, Lu H P, Xu Y Q, Liang D F, Deng L J 2013 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61** 976
- [50] Min P P, Song Z C, Yang L, Dai B, Zhu J Q 2020 *Opt. Express* **28** 19518
- [51] Kong X L, Ma H Y, Chen P etc. 2021 *Chin. J. Radio Sci.* **36** 947 (in Chinese) [孔祥林, 马洪宇, 陈鹏等 2021 电波科学学报 **36** 947]

# Ultra-wideband thin frequency-selective surface absorber against sheet resistance fluctuation\*

Wang Dong-Jun<sup>1) #</sup> Sun Zi-Han<sup>2) #</sup> Zhang Yuan<sup>1) 3)</sup>  
Tang Li<sup>2)</sup> Yan Li-Ping<sup>2) †</sup>

1) (*Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. LTD., Chengdu 610073, China*)

2) (*College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

3) (*School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*)

( Received 22 August 2023; revised manuscript received 27 September 2023 )

## Abstract

The design of thin frequency selective surface (FSS) absorber based on resistive film that meets the requirements of broadband, polarization independence, incident angle stability, and strong absorption is a challenging task. Fabrication tolerance of resistive film can result in fluctuations in sheet resistance, which negatively affects the absorber performance. To tackle these problems, this work firstly investigates how sheet resistance fluctuations affect the absorbing performance of resistive film FSS absorber. The analysis of simulated surface current density distribution and impedance reveals that the diversity of current paths provides an effective way to mitigate the influence of sheet resistance fluctuation. This is achieved by enabling flexible variation of surface current in response to sheet resistance fluctuations. Consequently, the variation of input impedance of the FSS absorber due to the fluctuation of sheet resistance is suppressed within a small range. Then, a method of extending bandwidth is proposed by employing the complementary variation of FSS impedance with frequency at different layers. By combining this approach with a miniaturization design, a thin and light FSS absorber is developed that exhibits ultra-wide bandwidth, polarization independence and angle stability while mitigating the effects of sheet resistance perturbation. The proposed FSS absorber achieves a 90% absorption bandwidth from 1.50 GHz to 20.50 GHz, covering Ku, X, C, S bands and part of the L and K bands, with a relative bandwidth reaching 173%. The absorber has a thickness of  $0.093\lambda_L$  for both transverse electric (TE) polarization and transverse magnetic (TM) polarization, yielding a figure of merit (FoM, the ratio of the theoretical minimum thickness to the actual thickness) of 0.95, indicating that the thickness is close to the theoretical limit. The absorber maintains over 90% absorption rate for TM polarization at an incidence angle of up to  $70^\circ$ , and 80% absorption for TE polarization at  $45^\circ$ . Furthermore, the 90% absorbance bandwidth of the absorber remains at 167.0% when the sheet resistance of any FSS layer fluctuates within a range from 12 to  $30 \Omega/\text{sq}$ . A prototype of the proposed FSS absorber is fabricated and measured, and the experimental results are in good agreement with the simulation results, thus validating the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** frequency selective surface, absorber, thin, ultra-wideband, sheet resistance fluctuation

**PACS:** 42.25.Bs, 42.25.Ja, 78.20.Ci, 74.25.nm

**DOI:** [10.7498/aps.73.20231365](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231365)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U22A2015).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: [liping\\_yan@scu.edu.cn](mailto:liping_yan@scu.edu.cn)



## 抗方阻波动的超宽带轻薄频率选择表面吸波体

王东俊 孙子涵 张袁 唐莉 闫丽萍

### Ultra-wideband thin frequency-selective surface absorber against sheet resistance fluctuation

Wang Dong-Jun Sun Zi-Han Zhang Yuan Tang Li Yan Li-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 024201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231365

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231365>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 有源器件混合集成的超薄超宽带可调雷达吸波体

Ultra-thin ultra-wideband tunable radar absorber based on hybrid incorporation of active devices

物理学报. 2022, 71(3): 034101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211254>

#### 基于电路模拟吸收体的宽带吸波型频率选择表面设计

A novel wideband absorptive frequency selective surface based on circuit analog absorber

物理学报. 2020, 69(19): 198101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200641>

#### 基于超表面的旋向选择吸波体

Absorbers with spin-selection based on metasurface

物理学报. 2020, 69(23): 234103 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200511>

#### 基于半导体光纤环形腔激光器的全光广播式超宽带信号源

All-optical broadcast ultra-wideband signal source based on semiconductor fiber ring laser

物理学报. 2019, 68(14): 140401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182301>

#### S/X双频带吸波实时可调的吸波器

S/X dual-band real-time modulated frequency selective surface based absorber

物理学报. 2020, 69(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200606>

#### 基于方形开口环的超宽带线性极化转换器

Ultra-wideband linear polarization converter based on square split ring

物理学报. 2019, 68(11): 117801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190267>