2025年4月

#### 文章编号: 2095-4980(2025)04-0366-10

# 高角度稳定的柔性透明频率选择表面吸波体

杨午1,罗隽2,周艳萍1,刘长军1,赵翔1,闫丽萍\*1

(1.四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065; 2.95801部队,北京 100000)

摘 要:为了提高频率选择表面(FSS)吸波体的角度稳定性,结合介质补偿层,采用氧化铟锡 电阻膜设计了宽带吸波体,具有柔性透明、极化不敏感性和高角度稳定性的特点。该吸波体的 90%吸波带宽覆盖5.66~22.98 GHz频段范围,相对带宽达到121.0%。当电磁波入射角在0°~60° 范围内变化时,该吸波体仍能在7.00~22.86 GHz频段内保持80%以上的吸波率。加工和实验测试 表明,所设计的FSS吸波体呈现良好的透明和柔性特性,测试结果与仿真结果相吻合,验证了设 计的合理性。此外,当电阻膜的方阻值和介质层相对介电常数因加工工艺在一定范围内波动时, 该吸波结构仍能实现宽带吸波,并保持较高的角度稳定性,从而大大提高了所设计的吸波体在飞 行器、车辆等门窗的隐身、电磁干扰抑制领域的工程实用性。

关键词:频率选择表面(FSS);宽带吸波;高角度稳定性;柔性;透明
 中图分类号:TN29
 文献标志码:A
 DOI: 10.11805/TKYDA2023411

## Flexible and optically transparent FSS absorber with high angular stability

YANG Wu<sup>1</sup>, LUO Jun<sup>2</sup>, ZHOU Yanping<sup>1</sup>, LIU Changjun<sup>1</sup>, ZHAO Xiang<sup>1</sup>, YAN Liping<sup>\*1</sup> (1.College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China; 2.Unit 95801, Beijing 100000, China)

**Abstract:** To enhance the angular stability of Frequency Selective Surface(FSS) absorbers, a broadband absorber is designed by using an Indium Tin Oxide(ITO) resistive film in combination with a dielectric compensation layer. This absorber features flexibility, transparency, polarization insensitivity, and high angular stability. The 90% absorption bandwidth of the absorber covers the frequency range of 5.66 to 22.98 GHz, achieving a relative bandwidth of 121.0%. When the incidence angle of the electromagnetic wave varies from 0° to 60°, the absorber maintains an absorption rate of over 80% in the frequency band of 7.00 to 22.86 GHz. Fabrication and experimental testing have shown that the designed FSS absorber exhibits good transparency and flexibility, with test results matching well with simulation results, thereby validating the rationality of the design. Moreover, when the sheet resistance of the resistive film and the relative permittivity of the dielectric layer fluctuate within certain ranges due to manufacturing processes, the absorber structure can still achieve broadband absorption and maintain high angular stability. This significantly enhances the engineering practicability of the designed absorber in applications such as stealth and electromagnetic interference suppression for the windows and doors of aircraft and vehicles.

**Keywords:** Frequency Selective Surface(FSS); wideband absorption; high angular stability; flexible; optically transparent

雷达技术和无线技术的不断发展,对装备隐身性能和电磁兼容性能的要求日益提高。电磁吸波体是降低雷 达散射截面、提高隐身性能以及加强电子设备电磁兼容性能的有效方法之一,在军用和民用领域都得到了广泛 应用。相较于传统电磁吸波体,超材料吸波体,尤其是频率选择表面(FSS)吸波体可利用其自身对入射电磁波的

收稿日期: 2023-12-13; 修回日期: 2024-01-27

基金项目:国家自然科学基金区域联合创新基金资助项目(U22A2015);四川省科技厅资助项目(24GJHZ0386) \*通信作者: 闫丽萍 email:liping\_yan@scu.edu.cn

灵活调控特性获得性能更优(如吸波带宽更宽或厚度相对薄)的电磁吸波体[1-4],因而被广泛用于雷达散射截面缩 减<sup>[5]</sup>、电磁干扰抑制<sup>[6-8]</sup>和隐身技术<sup>[9]</sup>等领域。衡量 FSS 吸波体的性能指标主要包括吸波带宽、极化和角度稳定 性、轻薄性等。FSS 吸波体的宽带设计方法已有很多,这里不再赘述。关于FSS 吸波体的高角度稳定性研究,尽 管三维结构设计在角度稳定性方面表现出一定优势,但其设计过程较为复杂,不同极化模式的斜入射吸波效果 差异大且制造装配要求较高<sup>[10-12]</sup>,因此基于二维FSS吸波体的角度稳定性设计方法受到了更多关注,主要包括多 层级联设计、小型化设计以及加载补偿层等。张鑫等<sup>[13]</sup>通过将2层FSS损耗层级联叠加设计,在6.38~21.32 GHz 吸波频带内横磁(Transverse Magnetic, TM)模的角度稳定性提高到 60°。Sivasamy 等[14]通过小型化设计,实现了 4.8~10.2 GHz的宽带吸波,其80%吸波率的角度稳定性达到50°。Lin等<sup>[15]</sup>设计了基于过孔结构的小型化FSS吸波 体,在5.198~5.882 GHz的频段内角度稳定性达到60°。RAO等[16]根据补偿匹配理论,通过在吸波体上增加介质 匹配层,实现宽带吸波的同时角度稳定性达到45°。JIANG等<sup>[17]</sup>在FSS损耗层上加载聚氯乙烯(Polyvinyl Chloride, PVC)补偿层,使宽带吸波的角度稳定性达到60°。相比于多层级联叠加和小型化设计,加载补偿层的方法简单实 用,且加工难度和制造成本相对较低,成为提高吸波体角度稳定性的常用方法之一。同时,随着工程应用场景 日益增多,对于光学透明吸波体<sup>[18]</sup>、柔性共形吸波体<sup>[19]</sup>等特殊吸波体的需求也日益增加。LU等<sup>[20]</sup>将金属网与石 墨烯材料结合,通过多层叠加设计了高透光的吸波结构,在Ku和Ka波段实现了良好的电磁屏蔽。DONG等<sup>[21]</sup>使 用纳米银涂料制作的FSS吸波体,在6~8 GHz(相对带宽100%)内可实现80%以上吸波率,且透光率超过82%。束 文生<sup>[22]</sup>结合铜箔与透明介质板设计了一个双频段吸波FSS,具有柔性模块化薄膜结构,可屏蔽诸如Wi-Fi等常见 的频段信号。刘婧雯等[23]采用氧化铟锡(Indium Tin Oxide, ITO)电阻膜设计了一款柔性透明的宽带吸波超材料结 构,在15.5~25.8 GHz(相对带宽49.9%)内的吸波率达到90%以上,在透明电磁隐身防御系统和可穿戴电子中具有 应用潜力。在这些透明FSS吸波体设计中,基于金属网设计的吸波体透光率由金属相对于FSS单元面积的比率决 定,该设计方法必将在高频段尤其是毫米波段遇到挑战,因为金属相对于单元面积的比率将受限于加工精确度 而大大增加。在使用透明导电材料的 FSS 吸波体设计中, ITO 电阻膜因其良好的导电性、透光性、热稳定性以及 相对成熟的加工技术而得到更多关注和应用[24-25]。

目前采用单层 FSS 损耗层吸波体的综合吸波性能(带宽、角度稳定性和厚度等)相对不具有吸引力,已有的透明 FSS 吸波体设计主要采用多层 FSS 损耗层拓展带宽并提高角度稳定性,导致其物理厚度增加,且加工过程需要考虑各层单元的对齐问题,降低了工程适用性。因此本文结合介质补偿层设计了透明单层 FSS 吸波体,在不增加厚度的基础上有效改善了吸波带宽和角度稳定性,相比多层 FSS 吸波体,降低了加工成本和难度。通过测试加工所得样品,验证了介质补偿层加载补偿层对于改善吸波带宽和角度稳定性的有效性。通过与文献中的透明FSS 吸波体进行对比,本文所设计的单层 FSS 吸波体在吸波带宽、角度稳定性和厚度等方面具有综合性能优势。

## 1 透明FSS 吸波体设计

#### 1.1 FSS 吸波体单元结构

所设计的 FSS 吸波体结构见图 1,由上而下分别为 介质补偿层、FSS 损耗层、介质隔离层和反射层。其中 介质补偿层和介质隔离层均使用 PVC( $\varepsilon_r$ =2.4, tan  $\delta$ = 0.06)材料,FSS 损耗层和反射层均由沉积在聚对苯二甲 酸乙二醇酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) ( $\varepsilon_r$ =3.0, tan  $\delta$ =0.06)上的 ITO 电阻膜制成。FSS 损耗层选用方阻

值为 35  $\Omega/\Box$ 的 ITO 电阻膜,反射层则选用方阻值为 5  $\Omega/\Box$ 的 ITO 膜。 为使 FSS 吸波体对入射电磁波的极化方式不敏感,单元结构采用中心 对称图案。PET 衬底厚度为 $h_1$ ,介质隔离层厚度为 $h_2$ ,介质补偿层厚 度为 $h_3$ ,详细结构参数见表1。增加介质隔离层厚度一定程度上可提 高相对带宽,但为了控制吸波体的总物理厚度,介质隔离层厚度取 为3 mm。

FSS 吸波体的吸波率 A(ω)可根据式(1)计算:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - \left| S_{11} \right|^2 - \left| S_{21} \right|^2$$
(1)

式中:  $R(\omega)$ 为电磁功率反射率;  $T(\omega)$ 为透射率。 $R(\omega)$ 、 $T(\omega)$ 可分别 用反射系数 $|S_{11}|$ 和透射系数 $|S_{21}|$ 计算获得。



Fig.1 Schematic diagram of FSS unit cell 图1 FSS吸波体单元结构示意图

表1 FSS单元结构参数(单位:mm) Table1 Structural parameters of the FSS(unit:mm)

Tuester Strattarian Parameters er and 1 55(and			
parameter	value		
а	0.3		
b	0.2		
С	0.4		
d	8.6		
е	0.2		
f	0.4		
g	0.6		
j	1.0		
р	12.0		
$h_1$	0.175		
$h_2$	3.0		
$h_3$	3.0		

## 1.2 FSS 单元结构的优化设计

FSS单元结构的设计优化过程见图 2,优化过程中不同结构的吸波性能和输入阻抗对比见图 3。为实现宽带吸波体,单元结构采用多谐振结构组合的设计方法。首先选用方环加十字的基本组合结构(model 1),其吸波性能见图 3(a),吸波率在高于 8.5 GHz 时迅速下降。为改善中频的吸波性能,将十字形结构演化为交指结构

(a) model 1 (b) model 2 (c) model 3 (d) model 4 (d) model 4 Fig.2 Optimal design process of the FSS unit 图2 FSS 单元优化过程

(model 2)。这种改变有效增加了结构中的电流路径,改善了等效电容与等效电感,使单元内的电磁耦合更加紧密,中频段(8.5~17.5 GHz)的输入阻抗随频率变化趋于平坦,有效提高了吸波率。在此基础上,将外方环进行弯折(model 3),通过增加外方环与十字形交指结构的耦合,进一步改善了11.5~18.5 GHz范围内的输入阻抗,将中频段吸波率提高至90%以上。



Fig.3 Comparison of absorption effect and input impedance of three FSS units 图 3 3个FSS单元的吸波性能与输入阻抗对比

图 4~图 6 给出了上述 3 种单元结构分别在 9、13、 17 GHz下的表面电流密度分布。由图 4 可知, 3 种单元 结构均在 9 GHz 处产生了较强的感应电流,尤其是 model 2 和 model 3,增加了电阻膜损耗,使吸波率达到 近 95%。而在 13 GHz 处,3 种单元结构上的感应电流均 减弱,尤其是 model 1 上的电流主要集中在外环上,使 电阻膜损耗降低,吸波率严重下降。但由于 model 2 和 model 3 上仍具有明显的感应电流,因此电阻膜损耗变 化较小,仍保持近乎 90%的吸波率。在 17 GHz 处,3 种 单元结构上的感应电流均增加,但弱于 9 GHz 处,因此 对应的吸波率尽管有一定的上升,但不超过 9 GHz 处的 吸波率。

总体而言, model 2 和 model 3 中交指结构的表面电 流强度在 3 个频点上均高于 model 1, 这主要是因为交指 结构和外环弯折结构增加了电流路径、增强了单元内电 磁耦合,从而随着频率变化可灵活地改善电流分布,确 保吸波结构在 7~18 GHz 频段内的输入阻抗波动较小, 见图 3(b)。

## 1.3 补偿层设计

为进一步提高吸波体的吸波带宽和角度稳定性,在 model 3 结构基础上引入介质补偿层构成新的单元结构 (model 4)。均匀平面波由自由空间斜入射到相对介电常数



Fig.4 Surface current distribution of three units at 9 GHz 图4 3个单元在9 GHz的表面电流分布



为ε,的介质补偿层时,由介质层上下表面引起的反射波应在介质表面相同位置处满足相消叠加,以减少介质层表面

的总反射,见图7,由此可推导介质补偿层厚度(式(2))。对于本 文结构,电磁波由自由空间进入介质补偿层再到原FSS吸波体, 其输入阻抗逐渐降低。考虑中心频点14 GHz,且大角度(如50°) 斜入射后吸波频带的中心频率通常向高频偏移,选用透明PVC材 料进行介质补偿层设计,根据式(2)可得其厚度约为3 mm。

第4期

$$h = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{(\varepsilon_r - \sin^2\theta)}} \tag{2}$$



式中:h为补偿层厚度; $\lambda_0$ 为工作频带中心频率对应波长; $\varepsilon_r$ 为补偿层材料的相对介电常数; $\theta$ 为电磁波斜入射角度。

加载介质补偿层前后(model 3和 model 4)在电磁波垂直入射和斜入射时的吸波性能对比见图 8。垂直入射时, model 3 的 90% 吸波频带为 7.15~17.84 GHz, 相对带宽仅为 85.56%, 而 model 4 的 90% 吸波频带拓宽为 5.66~22.98 GHz, 相对带宽提升至 121.0%。当斜入射角为 50°时,对于横电(Transverse Electromagnetic, TE)波, model 3 已不满足宽带吸波, 而 model 4 仍能在 6.71~26.81 GHz 频带内保持 90% 以上的吸波率; 对于 TM 波, model 4 的 90% 吸波带宽也远远大于 model 3。



图8 有无介质补偿层的吸波性能对比

介质补偿层对吸波性能的改善机理,可从图 9 中电磁波垂直入射及斜入射时 model 3 和 model 4 的阻抗变化进行解释。图 9(a)中垂直入射时,增加介质补偿层使吸波结构在宽频带范围内的输入阻抗虚部更趋于零,而实部随频率变化更加平坦,且在 377 Ω 附近波动,与自由空间阻抗更加匹配。斜入射时,TE 和 TM 极化模式的自由空间阻抗 $\eta_0$ 分别随入射角度 $\theta$ 以 $\eta_0$ /cos  $\theta$  和 $\eta_0$ ×cos  $\theta$ 形式变化<sup>[26]</sup>。图 9(b)为 TE 波 50°斜入射情况,此时 $\eta_0$ /cos  $\theta$ =587 Ω, model 3 的输入阻抗随频率增加逐渐增加;与此相反,model 4 的输入阻抗在小于 20 GHz 的较宽段范围内波动很小,且虚部在高频处逐渐下降,导致反射系数减小。对于 TM 波的 50°斜入射情况,model 4 的输入阻抗在宽频带范围内变得更加平坦,且虚部基本在0 附近波动,实部在 $\eta_0$ ×cos 50°=242 Ω 处上下波动,与自由空间波阻抗匹配良好。因此引入介质补偿层有效改善了吸波结构与空间波阻抗的匹配情况,提高了吸波率和带宽。



Fig.9 Effects of dielectric compensation layer on input impedance of the proposed FSS absorber 图9 介质补偿层对FSS吸波体输入阻抗的影响

#### 2 FSS 吸波体性能分析

## 2.1 角度稳定性分析

角度稳定性是衡量吸波体性能的重要指标之一,加载补偿层的吸波体随入射波极化方式与入射角θ变化的吸 波性能见图 10。电磁波垂直入射时,吸波体在 5.66~22.98 GHz内的吸波率可达到 90%以上,相对带宽达到 121.0%。当入射角θ增加到 50°时,对于 TE极化波,90%吸波率的频带范围为 6.71~26.81 GHz;对于 TM极化波, 90%吸波率的频带范围为 7.20~24.94 GHz。当入射角范围进一步增加到 60°时,吸波体在 TE和 TM 两种极化波斜 入射情况下,仍能在 7.00~24.12 GHz(相对带宽 110.0%)频段内达到 80%以上的吸波率,呈现出良好的角度稳定性。



图 10 FSS 吸波体的角度稳定性

#### 2.2 方阻值波动影响

ITO电阻膜加工过程中,因不同的加工方法和加工工艺存在的误差,会使电阻膜的方阻值 R 存在一定的波动,加工制成的吸波体样品与前期设计的吸波效果存在差异<sup>[27]</sup>。因此,有必要围绕所设计FSS 吸波体对方阻波动敏感性进行分析。电磁波垂直入射时,方阻值 R 波动对吸波性能的影响结果见图 11(a)。可以看出,当方阻值 R 在 24~54 Ω/□范围内逐渐增大时,吸波体在低频部分的吸波率逐渐增大,在高频部分的吸波率逐渐减小,但仍能在 6.29~22.58 GHz(相对带宽 112.9%)频段内保持 90% 的宽带吸波。

方阻值 *R* 波动对所设计 FSS 吸波体角度稳定性的影响见图 11(b)~图 11(c)。由图可知,当方阻值 *R* 在 24~54 Ω/□ 之间波动时,吸波体在两种极化方式下的 80% 吸波带宽仍能保持 7.07~23.95 GHz(相对带宽 108.8%),且角度稳定 性达 50°,证明了所设计的 FSS 吸波体具有良好的抗方阻波动鲁棒性。



Fig.11 Effects of square resistance fluctuation on absorption performance 图 11 方阻值波动对吸波性能的影响

## 2.3 相对介电常数波动影响

介质板材因为加工工艺可能会影响吸波体中主要介质板材 PVC 的电磁参数,本文分析了所设计的 FSS 吸波体在 PVC 的相对介电常数 *ε*<sub>r</sub>发生波动时的性能变化。电磁波垂直入射时的吸波性能见图 12(a),当*ε*<sub>r</sub>在 2.0~2.8 范围内逐渐增大时,吸波率和吸波带宽均略微减小,其90%吸波带宽降低为 6.03~21.53 GHz(相对带宽 112.5%)。斜入射情况见图 12(b)~图 12(c),在入射角 0~60°范围内,当相对介电常数 *ε*<sub>r</sub>分别为 2.0 和 2.8 时,所设计吸波体分别在 7.82~26.38 GHz(相对带宽 108.5%)和 6.29~22.45 GHz(相对带宽 112.5%)频段内仍能达到 80%以上吸波率。



Fig.12 Effects of relative dielectric constant fluctuation on absorption performance 图 12 相对介电常数波动对吸波性能的影响

## 3 实验验证

为验证所设计 FSS 吸波体的性能,对其进行加工和测试。FSS 吸波体实物见图 13(a)和图 13(b),包含的单元数量为 25×25,整体尺寸为 300 mm×300 mm。采用自由空间法对 FSS 吸波体样品进行测试<sup>[28]</sup>,将喇叭天线与安捷 伦矢量网络分析仪(E8363C)连接,放在样品同一侧以测量反射系数 S<sub>11</sub>,实验测试系统见图 13(c)。



(a) transparency

杨

(b) flexibility

(c) experimental system

Fig.13 Prototype of the FSS absorber and the experimental system 图 13 FSS 吸波体样品和实验测试系统

电磁波垂直入射时,加载补偿层 FSS 吸波体的吸波性能测试与仿真结果对比见图 14。由图 14 可知,两种极 化方式下,测试结果与仿真结果基本吻合,且 90% 吸波带宽达到 6.56~22.79 GHz(110.6%),验证了该吸波体设计 的有效性。斜入射时吸波体在两种极化方式下的吸波性能测试结果见图 15,可以看出,当入射角度增加到 50° 时,吸波体在 8.13~22.78 GHz频带内仍能满足 90% 宽带吸波。当入射角范围进一步增大到 60°时,吸波体仍能在 8.64~23.90 GHz频带范围内达到 80% 以上的吸波率。测试与仿真结果之间产生差异的主要原因包括: a)吸波体样 品组装过程中,柔性 PVC 介质本身出现微小的弧度,偏离平面仿真模型; b)样品介质的实际电磁参数与仿真用 值有偏差; c)测试系统搭建时的人为误差带来的影响。



Fig.14 Comparison between measured and simulated absorption rates of the FSS absorber for normal incidence 图 14 垂直入射时 FSS 吸波体测试与仿真吸波率对比





Fig.15 Absorption rate with respect to incident angle 图 15 不同入射角度下的吸波率

本文设计的柔性透明 ITO 电阻膜 FSS 吸波体与文献中 ITO 电阻膜吸波体的性能及部分关键结构参数对比见 表2,其中相对厚度是吸波体单元厚度与90%吸波频带最低截止频率对应波长λ<sub>L</sub>的比值。可以看出,本文设计的 FSS 吸波体在带宽、角度稳定性和厚度等的综合性能方面具有优势。

表2 与文献中透明吸波体性能对比

Table2 Comparison with the transparent absorbers in the literatures								
reference	absorption bandwidth (fractional bandwidth)	angular stability		flovible	thickness	number of		
		90% absorption	80% absorption	liexible	(relative thickness)	FSS lossy layers		
[17]	2.53~8.94 GHz (111.8%)	TE,TM:60°	-	NM	18.35 mm (0.155 $\lambda_{\rm L}$ )	1		
[29]	8~18 GHz (76.9%)	TE,TM:30°	TE,TM:45°	YES	$4.50 \text{ mm} (0.120 \lambda_{\text{L}})$	1		
[30]	10~21.7 GHz (73.8%)	-	TE,TM:45°	YES	$2.35 \text{ mm} (0.120 \lambda_{L})$	1		
[31]	6~17.8 GHz (99.2%)	TE:30°;TM:45°	-	YES	$3.55 \text{ mm} (0.071 \lambda_{\text{L}})$	1		
[32]	2~18.6 GHz (161.2%)	TE,TM:30°	TE,TM:60°	NM	$17.45 \text{ mm} (0.116 \lambda_{L})$	2		
[33]	2.2~18 GHz (156.4%)	TE:40°;TM:60°	-	NM	11.70 mm (0.086 $\lambda_{\rm L}$ )	3		
[34]	7.84~12.35 GHz (44.7%)	-	TE,TM:45°	NO	$1.80 \text{ mm} (0.046 \lambda_{\text{L}})$	1		
[35]	5.7~14.7 GHz (91.1%)	-	TE:50°;TM:70°	NM	6.15 mm (0.117 $\lambda_{\rm L}$ )	1		
[36]	2~17 GHz (157.9%)	TE:30°;TM:40°	TE:40°	NM	12.90 mm (0.086 $\lambda_{\rm L}$ )	3		
[37]	6.54~18.66 GHz (96.2%)	TE,TM:50°	TE,TM:60°	YES	5.35 mm (0.117 $\lambda_{\rm L}$ )	1		
this work	5.66~22.98 GHz (121.0%)	TE,TM:50°	TE,TM:60°	YES	6.35 mm (0.120 $\lambda_{\rm L}$ )	1		

NM:文献未提及吸波体是否具有柔性

## 4 结论

本文基于ITO电阻膜设计了一种柔性透明且高角度稳定的宽带FSS 吸波体,采用多单元组合设计并引入介质 补偿层,有效提高了单层FSS 吸波体的吸波带宽和角度稳定性。结果表明,所设计吸波体具有极化不敏感性, 其90% 吸波带宽达到5.66~22.98 GHz(相对带宽为121.0%),涉及 C、X、K、Ku 波段。TE和TM两种极化情况下, 当入射角度在 0~60°范围时,吸波体在 7.00~24.12 GHz 频段内仍保持 80%以上的吸波率,呈现出良好角度稳定 性。此外,当电阻膜的方阻值和介质板材相对介电常数因加工原因在一定范围内波动时,该吸波体的吸波率、 吸波带宽以及角度稳定性均具有良好的鲁棒性。加工实物证实了所设计的FSS 吸波体样品具有柔性、透明的特 点,实验测试结果与仿真结果吻合良好,实测的 90% 吸波相对带宽达到了 110.6%,且在实现宽带吸波的同时仍 能呈现出较高的角度稳定性。通过与文献中的透明宽带 FSS 吸波体进行对比,充分表明本文所设计的柔性透明 吸波体在带宽、角度稳定性和厚度综合性能上具有优势。该吸波体可用于飞行器、车辆和重要设施(如数据中 心、保密室)的门窗等场景的电磁干扰抑制或隐身领域。

## 参考文献:

- [1] 许留留,闫丽萍,赵翔.适用于5G电磁屏蔽的介质开孔型频率选择表面设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):
  616-620. (XU Liuliu, YAN Liping, ZHAO Xiang. Design of dielectric open aperture frequency selective surface for 5G electromagnetic shielding[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):616-620.) DOI: 10.11805/TKYDA201904.0616.
- [2] 王彦朝,许河秀,王朝辉,等. 电磁超材料吸波体的研究进展[J]. 物理学报, 2020,69(13):39-51. (WANG Yanchao, XU Hexiu,

100

90

absorption rate/%

WANG Zhaohui, et al. Research progress of electromagnetic metamaterial absorbers [J]. Acta Physica Sinica, 2020,69(13):39–51.) DOI:10.7498/aps.69.20200355.

- [3] 聂星河,范逸风,孙永志,等. 一种毫米波超材料反射面天线设计[J]. 航天电子对抗, 2021,37(5):53-55,60. (NIE Xinghe,FAN Yifeng,SUN Yongzhi,et al. Design of a millimeter-wave metamaterial reflector antenna[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2021, 37(5):53-55,60.) DOI:10.16328/j.htdz8511.2021.05.011.
- [4] 胡丹,付麦霞,朱巧芬. 基于石墨烯超材料的宽频带可调太赫兹吸波体[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(6):973-977. (HU Dan,FU Maixia,ZHU Qiaofen. A wide-band tunable terahertz absorber based on graphene metamaterials[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(6):973-977.) DOI:10.11805/TKYDA2021248.
- [5] 马于惠,刘璐,贾帅宇,等. 一种采用吸波透波超表面的天线 RCS 宽带减缩新方法[J]. 电波科学学报, 2022,37(3):471-477.
  (MA Yuhui, LIU Lu, JIA Shuaiyu, et al. A novel method of antenna broadband radar cross section reduction by absorptive/ transmissive metasurface[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2022,37(3):471-477.)
- [6] 任丹,易波,陈鹏宇.应用于北斗卫星导航的频率选择表面研究与设计[J]. 舰船电子对抗, 2023,46(4):94-97. (REN Dan,YI Bo, CHEN Pengyu. Study and design of frequency selective surface applied to Beidou satellite navigation[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2023,46(4):94-97.) DOI:10.16426/j.cnki.jcdzdk.2023.04.021.
- [7] CAVALCANTI-FILHO P H B,ARAUJO J A I,OLIVEIRA M R T,et al. A new design of sierpinski curve fractal FSS for S-band interference protection applications[C]// 2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). Aveiro,Portugal:IEEE, 2019:1-3. DOI:10.1109/IMOC43827.2019.9317417.
- [8] 李倩南,王青,张辉,等. 应用于无线局域网的小型化带阻频率选择表面[J]. 现代电子技术, 2022,45(24):44-47. (LI Qiannan, WANG Qing,ZHANG Hui,et al. Miniaturized band-stop FSS for WLAN[J]. Modern Electronics Technique, 2012,45(24):44-47.) DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2022.24.008.
- [9] SONG Jiakun, HUANG Cheng, YANG Jianing, et al. Broadband and tunable radar absorber based on graphene capacitor integrated with resistive frequency-selective surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2446– 2450. DOI:10.1109/TAP.2019.2943419.
- [10] HU Dawei, CAO Jie, LI Wei, et al. Optically transparent broadband microwave absorption metamaterial by standing-up closedring resonators[J]. Advanced Optical Materials, 2017,5(13):1700109. DOI:10.1002/adom.201700109.
- [11] SHI Ting, TANG Mingchun, YI Da, et al. Near-omnidirectional broadband metamaterial absorber for TM-polarized wave based on radiation pattern synthesis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(1): 420-429. DOI: 10.1109/TAP. 2021.3096203.
- [12] 韩龙飞,郭陈江. 一类具有高角度稳定性三维FSS单元的设计[C]// 2017年全国天线年会. 西安:西安电子科技大学出版社,
  2017: 4. (HAN Longfei, GUO Chenjiang. Design of a class of three-dimensional FSS units with high angle stability[C]//
  Proceedings of the 2017 National Antenna Annual Conference. Xi'an, China:Xidian University Press, 2017:4.)
- [13] 张鑫,戴银所,房建国,等. 基于电阻膜的双层宽频电磁超材料吸波器仿真及分析[J]. 电子技术与软件工程, 2021(21):59-63.
  (ZHANG Xin, DAI Yinsuo, FANG Jianguo, et al. Simulation and analysis of double-layer wideband electromagnetic metamaterial absorber based on resistance film[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2021(21):59-63.)
- [14] SIVASAMY R,KHAN A,NAHUL S,et al. Design and fabrication of a miniaturized microwave absorber with wide band absorption characteristics[C]// 2022 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium(WAMS). Rourkela, India: IEEE, 2022: 1-3. DOI: 10.1109/WAMS54719.2022.9848123..
- [15] LIN Chunwen, SHEN Chikai. Ultracompact via-based absorptive frequency-selective surface for 5-GHz Wi-Fi with passbands and high-performance stability[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018,8(1):41-49. DOI:10.1109/TCPMT.2017.2759221.
- [16] RAO Tingli, YU Shixing, SHI Rongyang, et al. A dielectric matching layer loaded frequency selective Rasorber with enhanced angular stabilities[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023, 22(7): 1552-1556. DOI: 10.1109/LAWP. 2023. 3250844.
- [17] JIANG Hao, YANG Wei, LEI Shiwen, et al. Transparent and ultra-wideband metamaterial absorber using coupled hexagonal combined elements[J]. Optics Express, 2021,29(18):29439-29448. DOI:10.1364/OE.434327.
- [18] 付云起,高冕,陈强,等.透明吸波体综述[J]. 微波学报, 2022,38(3):1-7. (FU Yunqi,GAO Mian,CHEN Qiang, et al. Overview of transparent absorbers[J]. Journal of Microwaves, 2012,38(3):1-7.) DOI:10.14183/j.cnki.1005-6122.202203001.
- [19] 甄国帅,李处森,慈言海,等. 超大尺寸共形吸波体雷达散射截面分析与验证[J]. 航空工程进展, 2022,13(2):38-44. (ZHEN Guoshuai, LI Chusen, CI Yanhai, et al. Analysis and verification of Radar Cross Section of super large conformal absorber[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012,13(2):38-44.) DOI:10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.02.06.

- [20] LU Zhengang, MA Limin, TAN Jiubin, et al. Graphene, microscale metallic mesh, and transparent dielectric hybrid structure for excellent transparent electromagnetic interference shielding and absorbing[J]. 2D Materials, 2017, 4(2):025021. DOI: 10.1088/ 2053-1583/aa57f8.
- [21] DONG Yanfei, YU Dingwang, LI Guochao, et al. Ultrathin and optically transparent microwave absorber based on flexible silver nanowire film[J]. Crystals, 2021,11(12):1583. DOI:10.3390/cryst11121583.
- [22] 束文生.柔性双频段频率选择表面膜的模块化设计[J].空间电子技术, 2020,17(2):109-113. (SHU Wensheng. Modular design for flexible dual-band frequency selective surface film[J]. Space Electronic Technology, 2020,17(2):109-113.) DOI:10. 3969/j.issn.1674-7135.2020.02.018.
- [23] 刘婧雯,段俊萍,张斌珍.一种基于ITO的柔性透明超材料吸波器[J]. 微纳电子技术, 2022,59(10):983-988,996. (LIU Jingwen, DUAN Junping,ZHANG Binzhen. Flexible transparent metamaterial absorber based on ITO[J]. Micronanoelectronic Technology, 2022,59(10):983-988,996.) DOI:10.13250/j.cnki.wndz.2022.10.002.
- [24] 成立顺,孙本双,钟景明,等. ITO 透明导电薄膜的研究进展[J]. 稀有金属快报, 2008(3):10-16. (CHENG Lishun, SUN Benshuang, ZHONG Jingming, et al. Development of ITO transparent and conductive thin films[J]. Rare Metals Letters, 2008(3): 10-16.)
- [25] 邱阳,陈玉峰,祖成奎,等. ITO 薄膜的研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2016, 37(5): 303-324. (QIU Yang, CHEN Yufeng, ZU Chengkui, et al. Research progress of ITO thin films[J]. Advanced Ceramics, 2016, 37(5): 303-324.)
- [26] 方博. 宽角域斜入射稳定频率选择表面吸波体的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2019. (FANG Bo. Research on stable frequency selective surface absorbers with wide angle domain oblique incidence[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2019.)
- [27] 孟庆哲. ITO 透明导电薄膜制备工艺及机理的研究[D]. 金华:浙江师范大学, 2014. (MENG Qingzhe. Research on the preparation process and mechanism of ITO transparent conductive thin films[D]. Jinhua, Zhejiang, China: Zhejiang Normal University, 2014.)
- [28] SUN Zihan, YAN Liping, ZHAO Xiang, et al. An ultrawideband frequency selective surface absorber with high polarizationindependent angular stability[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2023,22(4):789–793. DOI:10.1109/LAWP. 2022.3225582.
- [29] ZHOU Quan, YIN Xiaowei, YE Fang, et al. Optically transparent and flexible broadband microwave metamaterial absorber with sandwich structure[J]. Applied Physics A, 2019,125(2):131. DOI:10.1007/s00339-019-2430-2.
- [30] 王蒙军,户天宇,雷晓勇,等.可共形透明宽带超材料吸波体设计与分析[J]. 电子元件与材料, 2022(7):699-706. (WANG Mengjun,HU Tianyu,LEI Xiaoyong, et al. Design and analysis of conformable transparent broadband metamaterial absorber[J]. Electronic Components and Materials, 2022(7):699-706.) DOI:10.14106/j.cnki.1001-2028.2022.1889.
- [31] XIONG Yao, CHEN Fu, CHENG Yongzhi, et al. Ultra-thin optically transparent broadband microwave metamaterial absorber based on indium tin oxide[J]. Optical Materials, 2022,132(1):112745. DOI:10.1016/j.optmat.2022.112745.
- [32] 牛帅,杨昌,常慧聪,等. 一种基于超材料的轻质宽带雷达/红外兼容隐身结构[J]. 红外与毫米波学报, 2022,41(4):745-750.
  (NIU Shuai, YANG Chang, CHANG Huicong, et al. An ultralight broadband radar and thermal infrared compatible stealth structure based on metamaterials[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2012,41(4):745-750.) DOI:10.11972/j.issn.1001-9014.2022.04.014.
- [33] ZHENG Jiangshan, ZHENG Huabin, PANG Yongqiang, et al. Transparent broadband absorber based on a multilayer ITO conductive film[J]. Optics Express, 2023,31(3):3731-3742. DOI:10.1364/OE.482992.
- [34] LI Shuying, LIU Liangliang, JIANG Yuying, et al. Ultrathin optically transparent electromagnetic shielding window with broadband microwave absorption and ultrahigh optical transmittance[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022,32(11):e23338. DOI:10.1002/mmce.23338.
- [35] KUMAR A,SHRIKANTH-REDDY G,JYOTIBHUSAN P. Highly angular-stable optically transparent microwave absorber with wide absorption bandwidth[J]. IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications, 2022,4(4):114-119. DOI:10.1109/LEMCPA.2022.3210020.
- [36] GAO Mian, CHEN Qiang, ZHENG Yuejun, et al. Design of an optically-transparent ultra-broadband microwave absorber[J]. Chinese Physics B, 2023,32(8):327-333. DOI:10.1088/1674-1056/ac9a39.
- [37] JI Shijun, REN Hailin, ZHANG Chengguang, et al. Optically transparent conformal ultra-broadband metamaterial absorber based on ITO conductive film[J]. Journal of Physics D, 2023, 56(42):425101. DOI:10.1088/1361-6463/ace6b2.

#### 作者简介:

第4期

**杨** 午(1999-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为电磁吸波体结构设计.email:2422247989@qq.com.

**罗 隽**(1976-),女,本科,工程师,主要研究方向 为移动通信.

**周艳萍**(1987-),女,博士,副教授,主要研究方向 为电磁屏蔽、微波新效应及微波新技术的应用等. **刘长军**(1973-),男,博士,教授,博士生导师,主 要研究方向为微波无线能量传输、大功率微波源等.

赵 翔(1973-),女,博士,教授,主要研究方向为 电磁屏蔽、电磁兼容建模与分析、电磁环境效应评估、 统计电磁学、电磁场数值计算等.

**闫丽萍**(1972-),女,博士,教授,主要研究方向为 电磁超表面、电磁兼容建模与分析、电磁环境效应评 估、电磁场数值计算等.

#### (上接第365页)

- [3] BAIG A,GAMZINA D,KIMURA T,et al. Performance of a nano-CNC machined 220 GHz traveling wave tube amplifier[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017,64(5):2390-2397. DOI:10.1109/TED.2017.2682159.
- [4] ZHANG Changqing, PAN Pan, CAI Jun, et al. Demonstration of a PCM-focused sheet beam TWT amplifier at G-band[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023,70(6):2798-2803. DOI:10.1109/TED.2022.3233291.
- [5] LAI Jianqiang, GONG Yubin, XU Xiong, et al. W-band 1 kW staggered double-vane Traveling-Wave Tube[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012,59(2):496-503. DOI:10.1109/TED.2011.2174458.
- [6] ZHENG Yuan, WANG Jianxun, LUO Yong. Extremely broad bandwidth input/output coupling structure design for a Q-band sheet-beam Traveling-Wave Tube[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(10): 3339-3343. DOI: 10.1109/TPS. 2014.2356468.
- [7] YANG Liya, WANG Jianxun, SHU Guoxiang, et al. Design and measurement of a nonlinear-curve directional coupler for sheet beam traveling wave tube[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016,63(9):3733-3739. DOI:10.1109/TED.2016.2593663.
- [8] WANG Jianxun, LIU Guo, SHU Guoxiang, et al. Design and microwave measurement of a broadband compact power coupler for sheet beam traveling wave tubes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2016,63(2):814-818.
- [9] SHU Guoxiang, LIAO Jiacai, HE Jingcong, et al. Demonstration of a wideband and compact input-output coupling structure for subterahertz sheet-beam traveling wave amplifiers[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2022, 12(4): 401-408. DOI:10.1109/TTHZ.2022.3168606.
- [10] GUO Zheng, ZHANG Changqing, CAI Jun, et al. Design of an ultrashort H-plane coupler without transition structure for sheet beam Traveling-Wave Tube amplifier at W-band[J]. Electronics Letters, 2023,59(18):12945. DOI:10.1049/ell2.12945.
- [11] 刘盛纲.微波电子学导论[M].北京:国防工业出版社, 1985. (LIU Shenggang. Introduction to microwave electronics[M].
  Beijing:National Defense University Press, 1985.)

#### 作者简介:

**郭 铮**(1998-),男,在读硕士研究生,研究方向 为太赫兹真空器件.email:guozheng12s@163.com.

**张长青**(1982-),男,博士,高级工程师,主要研 究方向为太赫兹真空器件. **蔡** 军(1978-),男,博士,正高级工程师,主要 研究方向为W波段行波管.

**冯进军**(1966-),男,博士,研究员,主要研究方向为太赫兹真空电子器件、毫米波空间行波管、真空微纳电子学等.