

双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体

麻哲义培^{1,2}, 姜 超^{1,2*}, 刘妍琼^{1,2}, 黎嘉乐^{1,2}

(1. 中南大学粉末冶金研究院, 湖南长沙 410083; 2. 粉末冶金国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

摘 要: 本文提出了一种基于双层超表面的多层复合吸波体的设计方法, 设计的吸波体包含两层核心超表面功能层、顶层吸收增强蒙皮和数层支撑介质层, 两层超表面 I 和 II 的结构单元分别为加载贴片电阻的异形金属片和加载贴片电阻的六边形金属环, 蒙皮为玻璃纤维层压板, 支撑介质为 PMI 泡沫。仿真结果表明, 反射系数低于 -10 dB 的吸波频带覆盖范围为 2.80~23.64 GHz, 低于 -20 dB 的吸波频带覆盖范围为 3.56~22.56 GHz。测试结果表明, 反射系数低于 -10 dB 的频带为 2.36~23.87 GHz; -20 dB 吸波频带为 3.17~23.16 GHz。仿真和测试所得反射系数曲线具有良好的 consistency, 验证了该设计方法的有效性。仿真和测试结果表明, 50° 斜入射的 -10 dB 反射系数频带与垂直入射时基本保持一致, 起始和终止频率的偏移量小于 0.8 GHz; 进一步地, 斜入射角为 60° 时, 反射系数低于 -10 dB 的相对带宽最大可达 141.8%, 表明本研究所设计的复合吸波体具有宽角域入射稳定特性。此外, 本文研究了该复合吸波体宽频广角强吸收的相关机理以及主要结构参数对吸波性能的影响, 结果表明顶层蒙皮在超宽带范围内可提升吸波率 0.2 (1.0 代表 100% 吸波), 两层超表面吸波频带的互补增强设计能够明显改善其斜入射角度稳定性。

关键词: 吸波体; 超表面; 多层结构; 超宽带; 斜入射

基金项目: 湖湘青年科技创新人才项目 (No.2021RC3003); 国防科技基础加强计划子课题 (No.2022-JCJQ-ZD-01-1)

中图分类号: TN001; TB34

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)08-2668-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230609

Ultrawideband and High Absorption Composite Absorber Enabled by Double Layers of Metasurface Complementary Enhancement Design

MA Zhe-yi-pei^{1,2}, JIANG Chao^{1,2*}, LIU Yan-qiong^{1,2}, LI Jia-le^{1,2}

(1. Institute of Powder Metallurgy Research, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: In this study, a design method of multilayer structure composite absorber based on double layers of metasurface is proposed. The designed composite absorber consists of two layers of metasurface, top absorption enhanced skin and several support dielectric slabs. The unit cells of metasurface I and II are separately irregular-shaped metal patches connected by chip resistors and hexagonal metal rings loaded with chip resistors; the top absorption enhanced skin is a fiber-glass enforced epoxy laminate; support dielectric slabs adopt PMI foam. The simulation results indicate that the absorption frequency bands with reflection coefficients below -10 dB and -20 dB are 2.80~23.64 GHz and 3.56~22.56 GHz, respectively. The measurement results show that, the absorption frequency bands with reflection coefficients below -10 dB and -20 dB are 2.36~23.87 GHz and 3.17~23.16 GHz, respectively; the reflection coefficient curves obtained by simulation and test have good consistency, which verifies the effectiveness of the design method. The simulation and test results show that the frequency band of -10 dB reflection coefficient at 50° oblique incidence is basically consistent with that at normal incidence, while the offset of start and stop frequencies is less than 0.8 GHz; further, the simulation and test results show that when the oblique incidence angle is 60°, the fractional bandwidth of the reflection coefficient below -10 dB is up to 141.8%, which indicates that the composite absorber designed in this study has the incidence stability in a wide angle range. In addition, the mechanism of ultrawideband and high absorption of the structure and the influence of the main structure parameters are analyzed; the results demonstrate that the top absorption enhanced skin can improve absorptivity of the whole

structure by up to 0.2(1.0 represents 100% absorption), and the complementary enhancement design of the two layers of metasurface absorption frequency bands can improve oblique incidence stability obviously.

Key words: absorber; metasurface; multi-layer structure; ultrawideband; oblique incidence

Foundation Item(s): Hunan Science and Technology Innovation Talents Program (No.2021RC3003); Basic Strengthening Research Sub-Project (No.2022-JCJQ-ZD-01-1)

1 引言

随着无线通信技术和高频设备的快速发展、智能家居等电子设备的不断普及和推广,电磁辐射所带来的负面影响逐渐复杂多样,利用电磁吸收技术消除电磁污染、实现电磁防护是解决该类问题的一种有效方法.传统的吸波技术中,以Salisbury屏为代表的谐振型吸波体仅能在较窄的频带内实现电磁吸收,尽管通过空间拓扑得到的Jaumann吸波体能够拓宽吸波频带,但也极大地增加了吸波体的厚度;以铁氧体为代表的磁性吸波材料,在较薄的厚度具备一定的吸波性能,但是无法在宽带范围内实现高性能吸波且面密度较大.因此,发展新的电磁吸波技术已成为公认的重要课题.

现阶段,超材料吸波体(metamaterial absorber)作为一类周期性排布的人工复合吸波结构,由于具有能够通过结构设计来提高吸波性能和实现轻薄化等优势,因此有着极强的应用前景,成为了吸波技术领域的研究热点之一.根据结构单元的性质,超材料吸波体可分为无损金属单元超材料吸收体^[1-5]和电阻加载单元超材料吸收体^[6-17]两类.

无损金属单元超材料吸收体方面:Nguyen等人^[1]提出了一种结构单元为八角扇形的超表面吸波体,能够在9.26 GHz两侧产生宽度为0.15 GHz的90%吸收带,斜入射角为70°,厚度为0.8 mm;Islam等人^[3]采用组合图形结构单元设计的单层超表面吸波体,产生了5个90%吸收带宽极窄的吸收尖峰,厚度为1.5 mm.电阻加载单元超材料吸收体方面:Singh等人^[6]设计的电阻加载组合圆环单元单层超表面吸波体在8.0~20.1 GHz频段反射系数低于-10 dB,相对带宽为86.2%,斜入射角为45°,厚度为3.4 mm;He等人^[10]通过增加多层匹配层设计,所得到的电阻加载单层超表面吸波体将90%吸波频段为2.3~13.3 GHz,相对带宽为141.0%,斜入射角增为45°,厚度为18.0 mm;Yao等人^[13]在不考虑斜入射稳定性的情况下,基于双层超表面所设计的超材料吸波体实现了相对带宽为171.2%的90%吸波;Liu等人^[16]提出的基于三层电阻加载超表面的吸波体实现了相对带宽为170.0%的90%吸波,入射角为40°.因此,基于无损金属单元超表面的超材料吸收体仅能在相对较薄的厚度产生一个或者多个带宽小于0.5 GHz的吸收率大于90%的吸收峰,有效吸波频带偏窄;基于电阻加载单元超表面的超材料吸收体则以增加一定厚度为

代价,极大地改善了吸波性能和拓宽有效吸收带宽;通常单层电阻加载超表面吸波体90%吸波频带的相对带宽可以达到100%左右,斜入射角约为30°^[6-9];多层电阻加载超表面的设计^[11-17]则可以将90%吸波频带的相对带宽拓宽到170%左右,将斜入射角增大到45°.需要注意的是,多层电阻加载超表面吸波体虽然实现了吸波频带的拓宽和吸波角度的增大,但是仍然存在吸波强度低、斜入射角不够理想、超表面层裸露(稳定性风险)等不足之处.

针对上述问题,本文提出了一种基于双层超表面的多层复合吸波体的设计方法,并设计了一种具有蒙皮保护层、双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体.超表面I和II的结构单元分别为由贴片电阻连接的异形金属片和加载贴片电阻的六边形金属环,蒙皮层为玻璃纤维层压板.在斜入射角为5°时,反射系数低于-10 dB的频带为2.36~23.87 GHz,相对带宽为164.0%;-20 dB吸波频带为3.17~23.16 GHz,相对带宽为152.0%,斜入射角不小于60°,总厚度为14.2 mm.本设计在宽带范围内对吸收强度的增强、入射角的增大、蒙皮保护层对安全风险的降低,使其具备更广泛的应用价值.

2 结构与吸收机理

基于超表面吸波体的设计主要分为超表面的设计和支撑介质层设计两个部分.本研究小组在文献[18]的研究中提出了能够在宽带范围内实现反射系数低于-20 dB基于单层超表面吸波体的设计方法,本文进一步研究和总结了拓宽反射系数低于-20 dB吸波频带,具有双层超表面的设计原则,并结合设计实例进行简单的论述.首先,本研究所提出的吸波体的设计主要基于四分之一波长谐振损耗吸收机理和多重干涉理论^[19],图1说明了其设计逻辑.不同频率的电磁波进入到吸波体时,会依次通过顶层蒙皮、支撑介质层III、超表面II、支撑介质层II、超表面I和支撑介质层I,在金属反射层被无损反射,再次通过多个功能层后的剩余能量则继续传播;在此过程中,顶层蒙皮层可视为具有弱电磁损耗和弱反射的界面,超表面I是具有强电磁损耗和较强反射的界面,超表面II是具有强电磁损耗和较强反射的界面,支撑介质层I、II、III为低损耗介质.本文提出的超宽带吸波体,基于四分之一波长谐振损耗机理,首先,在超表面I和超表面II的位置具

有强吸收特性;其次,利用超表面 I 和 II 的反射特性和蒙皮层的损耗特性,为吸波体在低频、中频和低频都新增了一个吸收增强层,最终实现了超宽带范围内吸收率大于 99% 的性能. 根据上述设计原理可以得出,两层超表面在不考虑相互耦合的状态下可分别视为两个独立的基于单层超表面的吸波体,因此超表面 I 和超表面 II 可利用文献[18]中得出的设计原则进行初步设计,应该满足以下原则:(1)超表面 I 和超表面 II 对应的吸波频带,反射系数应在 -7.0 dB 左右,吸收率应为 0.44 左右;(2)超表面 I 和超表面 II 的透波频带应该交叉互补,且透波系数应在 -3.5 dB 左右,吸波率远大于 0.44 时,透波系数可以更低. 同时,三层支撑层介质的厚度设计可通过以下方法进行初步估算,当所有材质等效为空气时 $h_{1_空气}$ 、 $h_{2_空气}$ 、 $h_{3_空气}$ 、 $h_{4_空气}$ 、 $h_{5_空气}$ 、 $h_{6_空气}$ 的厚度应满足:

$$h_{1_空气} + h_{2_空气} + h_{3_空气} + h_{4_空气} + h_{5_空气} + h_{6_空气} \sim \lambda_{L_空气}/4,$$

$$h_3 + h_4 + h_5 + h_6 \sim \lambda_{M_空气}/4,$$

$$h_5 + h_6 \sim \lambda_{H_空气}/4,$$

其中, $\lambda_{L_空气}$ 为 99% 吸收率的起始频率所对应应在空气中的波长; $\lambda_{M_空气}$ 为 99% 吸收率的中心频率所对应应在空气中的波长; $\lambda_{H_空气}$ 为 99% 吸收率的终止频率所对应应在空气中的波长. 空气中波长和介质中波长的换算公式为

$$\lambda_0 = c_0/f,$$

$$\lambda_m = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r \mu_r},$$

其中, λ_0 为空气中的波长; c_0 (2.99×10^8 m/s) 为光速; f 为频率; λ_m 为介质中的波长; ϵ_r 为介质材料的相对介电常数; μ_r 为介质材料的相对磁导率.

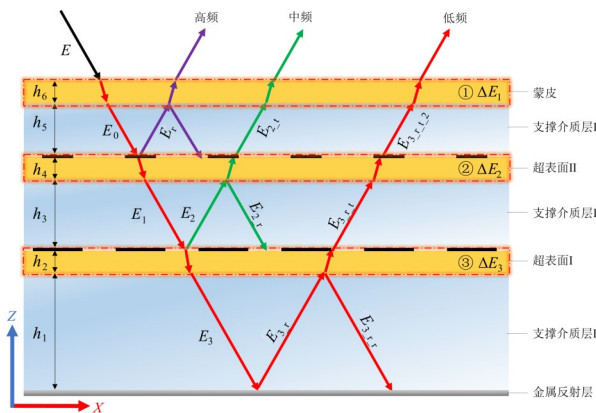
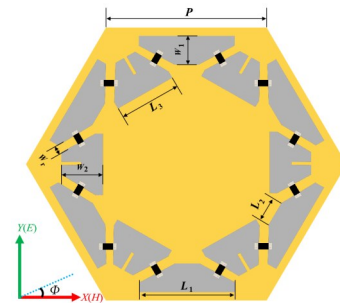


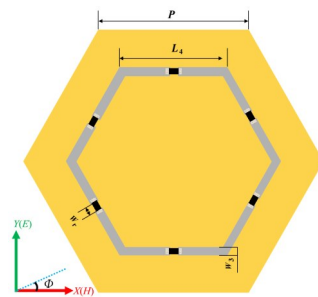
图1 本文设计的双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体的结构和吸收机理

为了验证上述设计方法,本文设计的宽频广角复合吸波体的基本结构如图2所示,共有7个功能层,从下到上分别是金属反射层、支撑介质层 I、超表面 I、

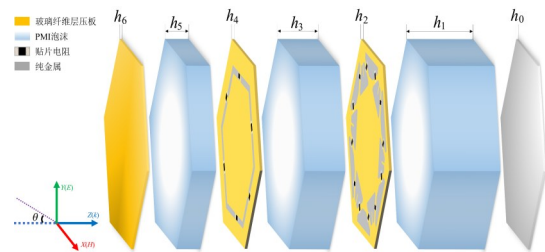
支撑介质层 II、超表面 II、支撑介质层 III 和顶层蒙皮,在平面内以正六边形密排的方式构成完整的周期性结构. 表1为双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体结构所采用材料的性能参数,顶层蒙皮和超表面的衬底选用相对介电常数为 4.30,损耗角正切为 0.025 的玻璃纤维层压板,支撑介质层均采用相对介电常数为 1.05 的 PMI 泡沫,损耗角正切值为 0.003 6,金属反射层采用连续的铜箔,电导率为 5.8×10^7 S/m. 由于六边形密排环单元自身的第二谐振点可达到第一谐振点的 3 倍,可以实现比其他环形结构更宽的吸波特性^[20,21],因此,本文所设计的宽频广角复合吸波体两层超表面的结构单元均采用六边形结构. 图2(a)所示为本文所提出吸波体中超表面 I 的结构单元,是加载了 12 个阻值为 R_1 的贴片电阻的异形环,图2(b)所示为本文所提出吸波体中超表面 II 的结构单元,是加载了 6 个阻值为 R_2 的贴片电阻的正六边形环.



(a) 超表面 I 结构单元



(b) 超表面 II 结构单元



(c) 双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体结构单元

图2 双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体的基本结构

表 1 双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体所包含材料的性能参数

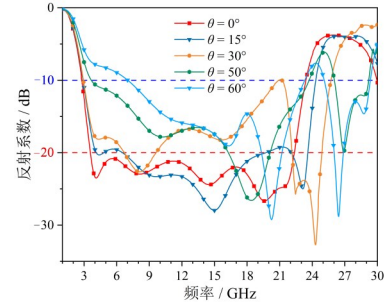
材料	位置	介电常数	损耗角正切	电导率/(S/m)
玻璃纤维层压板	h_2, h_4, h_6	4.30	0.025 0	—
PMI 泡沫	h_1, h_3, h_5	1.05	0.003 6	—
金属铜	h_0	—	—	5.8×10^7

本文使用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 2023 对结构进行设计仿真,仿真结果为 S 参数,考虑到极化转换^[22-25]对结构吸收性能表征准确性的影响,如图 2 所示,若入射电磁波在 y 方向具有电场分量(对应 TE 极化),在 x 方向具有磁场分量(对应 TM 极化),本文中吸收率的计算公式采用 $A = 1 - |r_{yy}|^2 - |r_{xy}|^2 - |t_{xy}|^2 - |t_{yy}|^2$,其中, r_{yy} 为反射率, r_{xy} 为反射极化转换率, t_{xy} 为传输极化转换率, t_{yy} 为传输率,通过数据后处理的方式获得结构的吸收率.在完整的超宽带吸波超材料结构中,金属反射层的存在使得 t_{xy} 传输极化转换率和 t_{yy} 传输率为 0,此时吸收率的公式将简化为 $A = 1 - |r_{yy}|^2 - |r_{xy}|^2$,TM 波吸收率的计算方式与 TE 波类似.本文所提出的设计经过多次参数扫描优化,最终的结构参数如下: $P=6.1$ mm、 $L_1=3.6$ mm、 $L_2=1.2$ mm、 $L_3=2.4$ mm、 $L_4=5.2$ mm、 $w_1=1.2$ mm、 $w_2=1.8$ mm、 $w_3=0.7$ mm、 $w_r=0.5$ mm、 $h_1=7.0$ mm、 $h_2=0.2$ mm、 $h_3=4.1$ mm、 $h_4=0.2$ mm、 $h_5=2.4$ mm、 $h_6=0.3$ mm、 $R_1=80.6$ Ω 、 $R_3=430.0$ Ω .

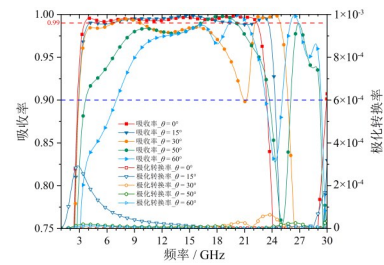
3 仿真结果分析

如图 3 所示,本文所提出结构在不同入射角时的仿真结果表明,双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体能够在超宽带范围内实现反射系数低于 -10 dB(90% 吸收率)、-20 dB(99% 吸收率)的吸收性能,TE 波状态下 -10 dB 吸收的入射角稳定性不小于 50° ,且在入射角为 60° 时仍然具备超宽带吸收特性;TM 波状态下 -10 dB 吸收的入射角稳定性不小于 30° ,且在入射角为 60° 时仍然具备宽带吸收特性;同时,如图 3(b)和(c)所示,吸波体在 TE/TM 波下的极化转换率的数量级为 10^{-4} ,即等效极化转化吸收对实际吸波性能影响极小,所设计吸收体的高吸收性能主要源于四分之一波长谐振带来的电磁损耗.具体地,在电磁波垂直入射时,TE/TM 波反射系数低于 -10 dB 的频带为 2.80~23.64 GHz; -20 dB 吸波频带为 3.56~22.56 GHz.在 TE 波状态下,入射角为 15° 时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 2.92~24.08 GHz,反射系数低于 -20 dB 的频带为 4.16~23.56 GHz;入射角为 30° 时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 2.96~25.72 GHz;入射角为 50° 时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 3.68~23.68 GHz 和 26.04~29.16 GHz,且在 7.84~21.36 GHz 频段反射系数低于 -15 dB;入射角为 60° 时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 6.96~23.28 GHz 和 25.12~29.32 GHz.在

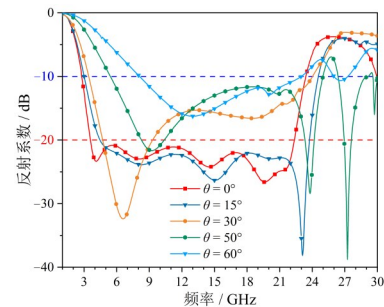
TM 波状态下,入射角为 15° 时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 3.04~24.56 GHz,反射系数低于 -20 dB 的频带为 4.48~23.72 GHz;入射角为 30° 时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 3.44~24.00 GHz,且在 4.24~21.08 GHz 反射系数低于 -15 dB.入射角为 50° 时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 5.44~24.96 GHz 和 26.40~29.12 GHz;入射角为 60° 时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 8.12~22.96 GHz.



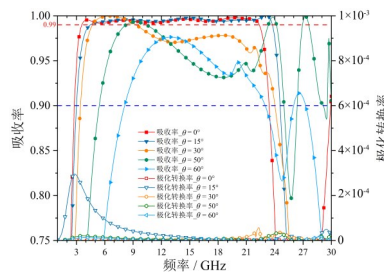
(a) TE 波,不同入射角时反射系数仿真结果



(b) TE 波,不同入射角时吸收率和极化转换率仿真结果



(c) TM 波,不同入射角时反射系数仿真结果

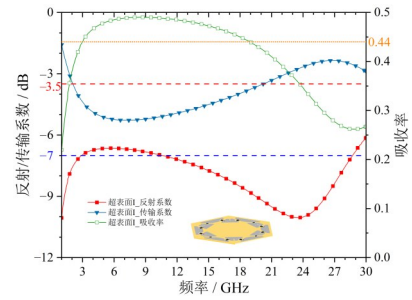


(d) TM 波,不同入射角时吸收率和极化转换率仿真结果

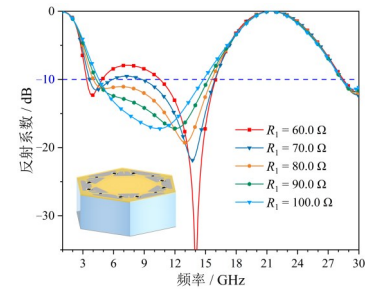
图 3 双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体仿真结果

为了说明和验证本文所设计吸波体的物理机理, 本文将利用 CST Microwave Studio 2023 对超表面 I、超表面 II 的电磁特性和表层蒙皮对吸波性能的影响进行量化的表征. 首先是超表面 I 的电磁特性和其上所加载电阻对吸波性能的影响, 如图 4(a) 所示, $\theta=0^\circ$ 时, 超表面 I 在 3.00~18.92 GHz 吸收率大于 0.44, 在 2.92~10.16 GHz 反射系数在 -7.0~-6.5 dB 之间, 在 2.08~20.20 GHz 传输系数在 -5.3~-3.5 dB 之间, 且反射系数较高、传输系数较低的频段与吸波率明显大于 0.44 的频段对应. 如图 4(b) 所示, $h_1=7.0$ mm 时, 基于超表面 I 的吸波体在加载不同阻值 R_1 时的反射系数. 可以看到在 3.40~16.00 GHz 频段具有明显的吸收性能, 当 $R_1=60.0 \Omega$ 时, 中间 4.92~10.52 GHz 频段的反射系数大于 -10 dB; R_1 增大到 70.0 Ω 时, 中间频段的反射系数明显下降, 且在 $R_1=80.0 \Omega$ 时, 在 4.04~15.60 GHz 频段的反射系数低于 -10 dB; 随着 R_1 进一步增大, 吸波体中间频段的反射系数进一步减小, 但是有效吸波带宽向中间频段收紧、变窄; 同时, 随着 R_1 的增大, 基于超表面 I 的吸波体始终在 17.00~26.00 GHz 频段具备明显的反射特性. 如图 4(c) 所示, $h_1=7.0$ m, $R_1=80.6 \Omega$ 时, 基于超表面 I 的吸波体在不同入射角下的反射系数; 随着入射角的增大, 吸波体的吸收频带逐渐向高频偏移, 且有效吸收带逐渐变窄, 因此超表面 I 本身不具备良好的斜入射稳定特性; 具体地, 当入射角为 15° 时, 反射系数低于 -10 dB 的频带为 4.44~15.80 GHz, 相较于入射角为 0° 时的吸收带, 向高频平移了约 0.27 GHz; 当入射角增大到 30° 时, 反射系数低于 -10 dB 的频带为 8.24~17.48 GHz, 吸收频带缩小了 2.12 GHz; 除此之外, 当入射角大于 45° 时, 超表面 I 的吸波体在高频 19.00~29.00 GHz 的吸收性能提高. 因此, 超表面 I 主要用于 3.40~16.00 GHz 频段电磁波的吸收, 以及大入射角度时高频的吸收增强.

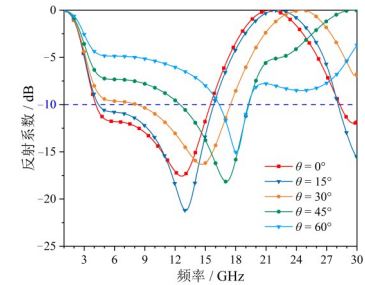
接下来分析超表面 II 的电磁特性和其上所加载电阻对吸波性能的影响, 如图 5(a) 所示, $\theta=0^\circ$ 时, 超表面 I 在 16.88~20.88 GHz 吸收率大于 0.44, 在 1.00~30.00 GHz 的反射系数均小于 -7.0 dB, 在 15.50~20.60 GHz 传输系数在 -4.7~-3.5 dB 之间, 且传输系数较低的频段与吸波率明显大于 0.44 的频段对应; 同时需要注意到, 超表面 II 与超表面 I 具有吸收带互补、透波频带交叉的特性. 如图 5(b) 所示, $h_1=7.0$ mm, $h_2=0.2$ mm, $h_3=4.1$ mm, 且未加载超表面 I 时, 基于超表面 II 的吸波体在加载不同阻值 R_2 时的反射系数. 在 R_2 从 350.0 Ω 逐渐增大到 450.0 Ω 的过程中, 反射系数低于 -10 dB 的频带向低频拓宽; 在 R_2 从 450.0 Ω 逐渐增大到 550.0 Ω 的过程中, 反射系数低于 -10 dB 的起始频率基本不变, 终止频率逐渐向低频偏移; 但是需要注意的是, R_2 在大范围内变化的过程



(a) TE波, $\theta=0^\circ$, $R_1=80.6 \Omega$ 时, 超表面 I 反射/传输系数和吸收率



(b) TE波, $\theta=0^\circ$, 基于超表面 I 的吸波体加载不同阻值 R_1 时的反射系数



(c) TE波, $R_1=80.6 \Omega$ 时, 基于超表面 I 的吸波体在不同入射角下的反射系数

图 4 超表面 I 的电磁特性

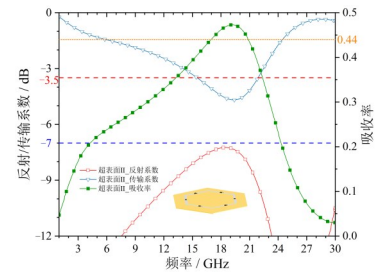
中, 基于超表面 II 的吸波体在 3.00~11.00 GHz 的最小吸收系数从 -8.2 dB 上升到了 -5.9 dB, 吸收性能变弱, 在 15.80~22.60 GHz 频段始终具有明显的吸收特性. 图 5(c) 所示为未加载超表面 I 时, 基于超表面 I 的吸波体在不同入射角下的反射系数, $h_1=7.0$ mm, $h_2=0.2$ mm, $h_3=4.1$ mm, $R_2=430.0 \Omega$, 随着斜入射角的增大, 吸波体在低频和吸收频带均向高频偏移, 低频的吸收频带逐渐明显, 高频吸收频带逐渐消失, 因此单独的超表面 II 不具备良好的斜入射稳定特性. 具体地, 入射角在 15° 以内, 低频吸收带和高频吸收带变化较小; 当入射角为 30° 时, 高频反射系数低于 -10 dB 的频带收缩为 18.48~22.36 GHz; 当入射角为 60° 时, 高频反射系数低于 -10 dB 的频带基本消失, 新增低频反射系数低于 -10 dB 的频带 5.68~11.52 GHz. 因此, 超表面 II 主要用

于 15.80~22.60 GHz 频段电磁波的吸收,与基于超表面 I 的吸波体的明显吸收频带 3.40~16.00 GHz 互补;同时,超表面 II 表现出大入射角时低频的吸收增强特性,与基于超表面 I 的吸波体大入射角时高频的吸收增强频段互补。

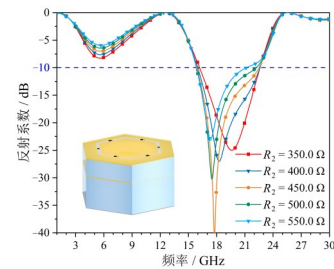
为了验证本文所述设计原理,进一步验证该设计方法的有效性,本文通过仿真计算,得出了在 TE 波下,顶层蒙皮厚度 $h_6=0.3$ mm 时对复合吸波体吸收率的增加量。如图 6(a)所示,当本文提出的复合吸波体仅包含超表面 I 时,在入射角小于 15° 的范围内,其在 3.88~17.68 GHz 内的吸收率大于 0.44;随着斜入射角的增大,吸收率大于 0.44 的频带不断拓宽,与图 4(c)中结构反射系数的变化趋势一致。如图 6(b)所示,增加了顶层蒙皮后,垂直入射时,其在 3.64~12.72 GHz 范围内的吸收率大于 0.44;随着斜入射角增大至 60° ,吸收率大于 0.44 的频带拓宽至 3.48~18.32 GHz。具体地,如图 6(c)所示,垂直入射时,顶层蒙皮在 2.36~10.04 GHz 范围内有吸收增强作用;随着斜入射角增大至 60° ,具有吸收增强的频带拓宽至 2.64~15.08 GHz,在低频和中频实现了 0~0.12 的吸收增强效果,与第 2 节中所述物理机理一致。

图 7 为 $h_6=0.3$ mm,不同入射角时,顶层蒙皮对超表面 II 的吸收增强作用对比图。如图 7(a)所示,当本文提出的复合吸波体仅包含超表面 II,垂直入射时,其在 14.96~24.40 GHz 范围内的吸收率大于 0.44;随着斜入射角的增大,该频带范围内吸收率逐渐降低,低频吸收率增强,与图 5(c)中结构反射系数的变化趋势一致。如图 7(b)所示,增加了顶层蒙皮后,垂直入射时,其在 14.44~23.52 GHz 范围内的吸收率大于 0.44,整体略微向低频移动;斜入射角增大至 60° 时,该频带范围内吸收率在 0.44 上下波动。具体地,如图 7(c)所示,垂直入射时,顶层蒙皮在 6.64~22.12 GHz 范围内有吸收增强作用;随着斜入射角增大至 60° ,具有部分间断的吸收增强的频带拓宽至 7.16~30.00 GHz,在中频和低频实现了 0~0.22 的吸收增强效果,与第 2 节中所述物理机理一致。

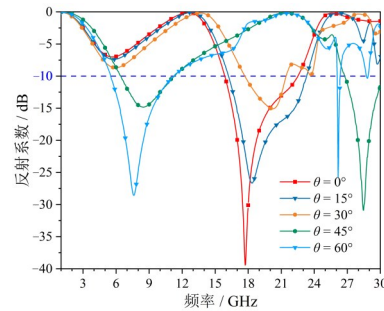
图 8 为 $h_6=0.3$ mm,不同入射角时,顶层蒙皮对包含超表面 I 和超表面 II 结构的吸收增强作用对比图。如图 8(a)所示,随着斜入射角的增大,受益于超表面 I 的吸收率在低频的斜入射稳定特性、中高频吸收率增大特性和超表面 II 的吸收率在低频增大特性,组合结构的吸收率在宽带范围内表现出了斜入射稳定性。图 8(b)表明,顶层蒙皮的引入,在保持了斜入射稳定性的同时,进一步增加了组合结构的吸收率。具体地,如图 8(c)所示,垂直入射时,顶层蒙皮在 2.52~22.56 GHz 范围内有吸收增强作用;随着斜入射角增大至 60° ,具有部分间断的吸收增强的频带拓宽至 1.00~30.00 GHz,在低



(a) TE 波, $\theta=0^\circ$, $R_2=430.0 \Omega$ 时,超表面 II 反射/传输系数和吸收率



(b) TE 波, $\theta=0^\circ$, 基于超表面 II 的吸波体加载不同阻值 R_2 时的反射系数



(c) TE 波, $R_2=430.0 \Omega$ 时,基于超表面 II 的吸波体在不同入射角下的反射系数

图 5 超表面 II 的电磁特性

频、中频和低频实现了 0~0.20 的吸收增强效果。图 9 为本文所提出的双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体,有无顶层蒙皮吸收率对比图,具体如图 9(c)所示。垂直入射时,蒙皮层能够使吸波体整体吸收率在 1.92~25.22 GHz 的提升大于 0.01;随着斜入射角的增大,具有部分间断的吸收增强的频带上限增加至 29.48 GHz,吸收率最大增大大量达到了 0.42,因此组合结构中蒙皮层所提升的吸收率与第 2 节中所述物理机理一致。

进一步地,探讨不同厚度蒙皮对吸波体整体性能的影响。如图 10 所示电磁波垂直入射时,复合吸波体在顶层蒙皮不同厚度下的反射系数,首先本文所提出的复合吸波体在没有顶层蒙皮时反射系数小于 -10 dB 的频带为 2.80~23.64 GHz,反射系数小于 -15 dB 的频带为 3.20~

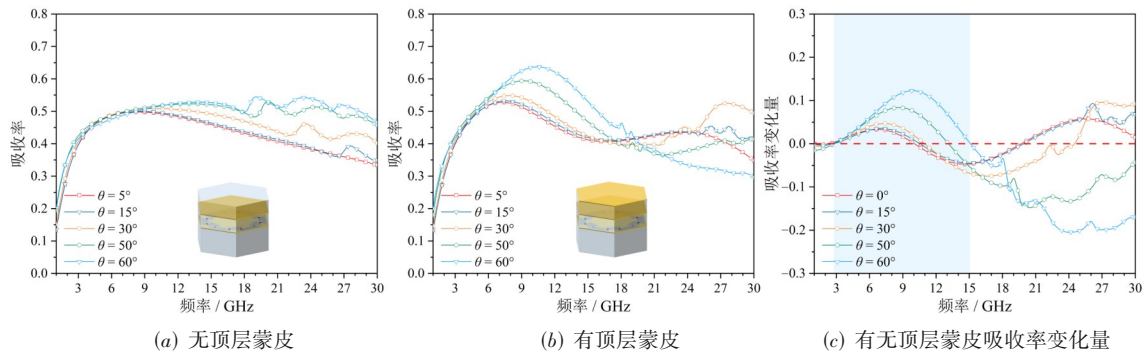


图6 TE波, $h_6=0.3$ mm, 不同入射角时, 顶层蒙皮对超表面 I 的吸收增强作用

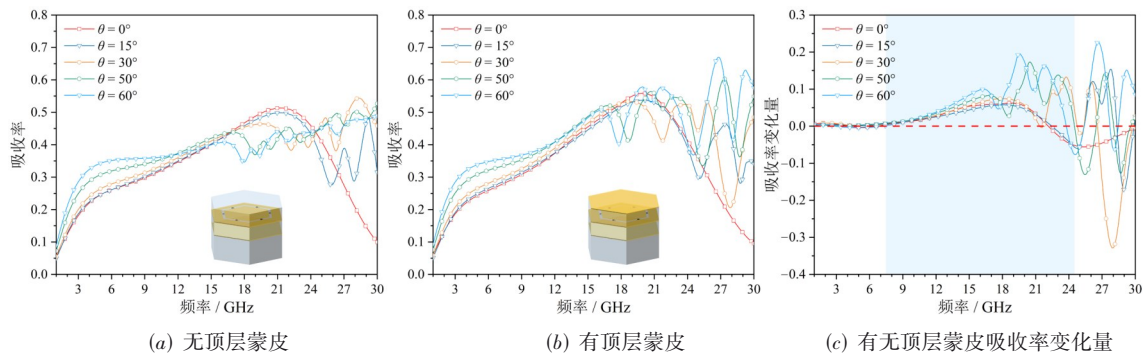


图7 TE波, $h_6=0.3$ mm, 不同入射角时, 顶层蒙皮对超表面 II 的吸收增强作用

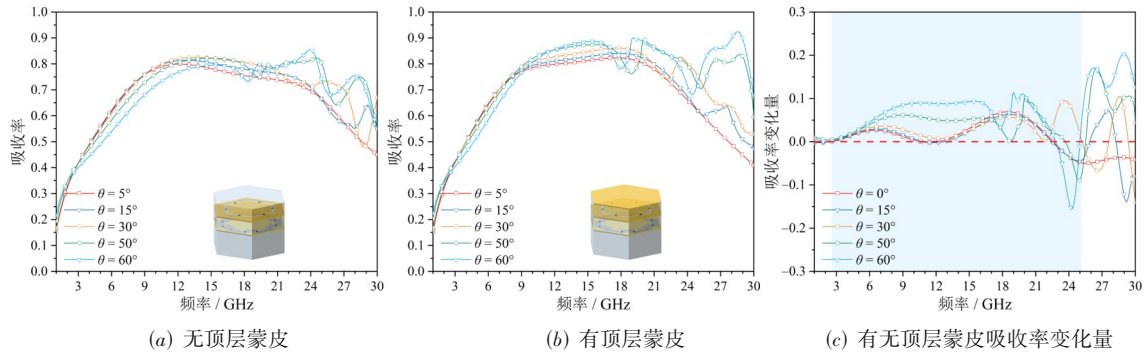


图8 TE波, $h_6=0.3$ mm, 不同入射角时, 顶层蒙皮对超表面 I 和超表面 II 构成整体的吸收增强作用

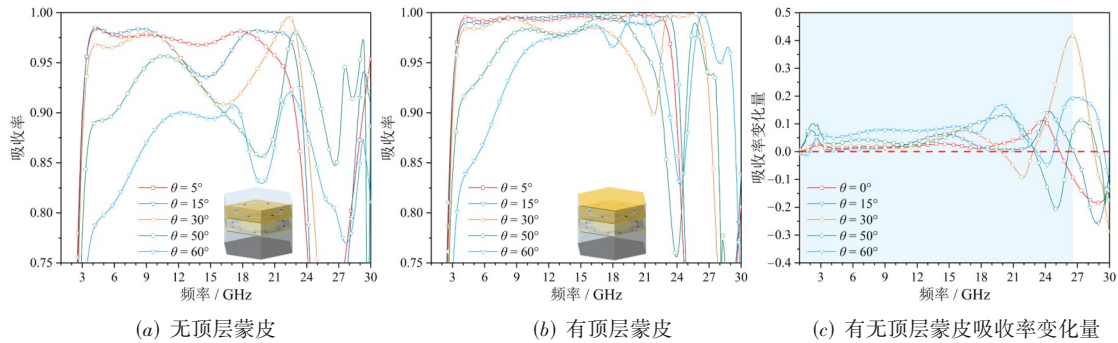


图9 TE波, $h_6=0.3$ mm, 不同入射角时, 顶层蒙皮对所提出吸波体的吸收增强作用

22.84 GHz;随着蒙皮厚度从0.1 mm增加至0.6 mm, 反射系数低于-10 dB的频带最宽拓宽到2.89~23.67 GHz, 变化较小, 且蒙皮厚度在0.3~0.6 mm之间时, 反射系数

低于-10 dB的频带几乎不变;随着蒙皮的厚度从0.1 mm增加至0.4 mm, 反射系数低于-15 dB的频带逐渐变宽, 且在0.4 mm时达到最宽, 为3.29~23.14 GHz, 且在0.3 mm时形

成最宽的反射系数低于 -20 dB的频带为 $3.73\sim 22.59$ GHz;随着蒙皮厚度进一步从 0.4 mm增加到 0.6 mm,反射系数低于 -15 dB和低于 -20 dB的频带逐渐变窄.因此,顶层蒙皮的意义在于,能够极大地提升复合吸波体的吸收强度,提高斜入射稳定性能;除此之外,顶层蒙皮的添加避免和降低了超表面 II 裸露在环境中的潜在风险,例如撞击带来的结构损坏、器件掉落等,提高了超材料吸波体的环境适应能力.

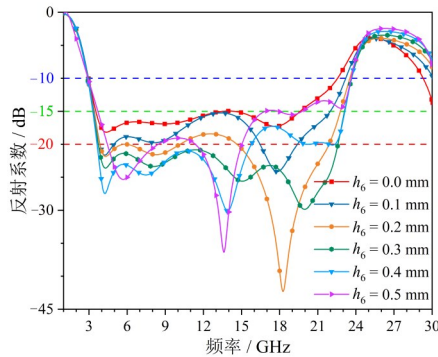
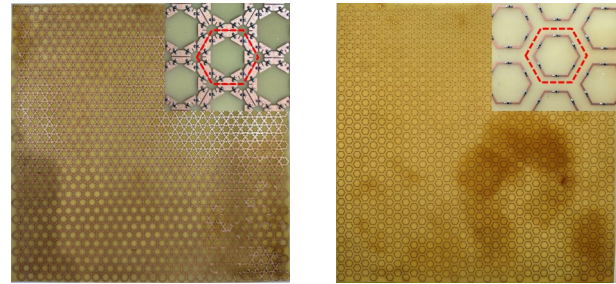


图10 TE波, $\theta=0^\circ$ 时,吸波体在不同蒙皮厚度 h_c 时的反射系数

4 测试结果与分析

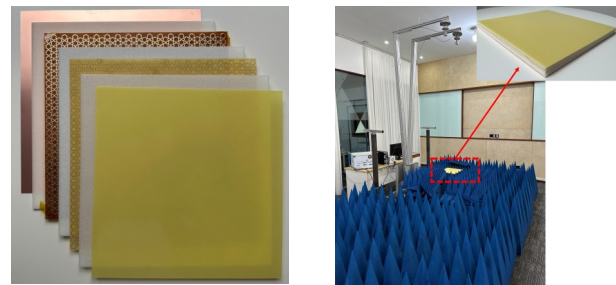
为了验证所提出的双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体,本课题组加工制备了一个 $305\text{ mm}\times 305\text{ mm}$ 的平板样品,共包含986个基本单元.图11(a)所示为超表面 I 实物,图11(b)所示为超表面 II 实物,图11(c)所示为宽频广角复合吸波体的各部分实物.该样品在半开放的微波暗室中测量,采用了Ceyear 3671G 矢量网络分析仪和弓形法测试系统对样品不同入射角的反射系数进行测试,图11(d)所示为样品的测试环境.图12(a)和(c)所示为该样品在不同入射角时反射系数,TE波状态下,入射角为 5° 、 15° 时, -20 dB吸收频带分别为 $3.17\sim 23.16$ GHz、 $3.55\sim 23.68$ GHz;入射角为 5° 、 15° 、 30° 、 50° 、 60° 时, -10 dB吸收频带分别为 $2.36\sim 23.87$ GHz、 $2.47\sim 24.33$ GHz、 $2.52\sim 26.29$ GHz、 $2.97\sim 23.45$ GHz/26.35~29.08 GHz、 $4.24\sim 24.92$ GHz/26.17~28.68 GHz. TM波状态下,入射角为 5° 、 15° 时, -20 dB吸收频带分别为 $3.51\sim 22.39$ GHz、 $3.97\sim 23.76$ GHz;入射角为 5° 、 15° 、 30° 、 50° 、 60° 时, -10 dB吸收频带分别为 $2.34\sim 21.28$ GHz、 $2.52\sim 24.88$ GHz、 $3.10\sim 25.08$ GHz、 $4.56\sim 25.59$ GHz/27.09~30.00 GHz、 $8.21\sim 21.58$ GHz. 测试结果表现与仿真结果趋势一致,在超宽带范围内实现了反射系数低于 -10 dB和 -20 dB的吸收性能,以及斜入射大角度稳定特性,但是吸收起始频率略微向低频移动.可能的原因如下:第一,仿真阶段支撑介质层均采用相对介电常数为1.05,损耗角正切值为0.003 6的材料,顶层蒙皮和超表面的衬底选用相对介电常数为4.30,损耗角正切为0.025的

玻璃纤维层压板,然而实际制备样品的过程中,可能存在介电属性测试样本和反射系数测试样本之间存在部分差异的可能;第二,不同厚度的支撑介质是通过切割机得到,会有一些的工艺误差,且样品在堆叠、复合的过程中厚度误差会增大,并进一步影响测试结果;第三,超表面通过外协加工获得,制备工艺同样不能保证其衬底厚度和介电性能与设计值完全一致,也会对结果产生一定影响.综上所述,仿真和测试结果的一致性充分说明了本设计方法的可行性和所提出双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体的有效性.



(a) 超表面 I 实物图

(b) 超表面 II 实物图



(c) 宽频广角复合吸波体的各部分实物图

(d) 测试环境

图11 宽频广角复合吸波体的实物和测试环境

为了说明本设计的优越性,本文对近两年文献中具有代表性的超宽带超材料吸波体,主要从反射系数低于 -10 dB/ -20 dB的吸波带宽、最大斜入射角和厚度三方面进行了对比,如表2所示.可以得出以下结论:(1)现有吸波体主要研究方向为在超宽带范围内实现反射系数低于 -10 dB的吸收性能,仅有极少数反射系数低于 -20 dB的宽带设计;(2)部分设计为了能够尽可能拓宽 -10 dB吸收带宽,通常以牺牲斜入射稳定性为代价,部分设计的最大斜入射角能达到 45° ;(3)受限于四分之一波长谐振吸收机理,吸波体的相对厚度通常在 $0.1\lambda_L$ 上下波动(λ_L 为反射系数低于 -10 dB起始频率对应波长),厚度的提升通常能带来更好的斜入射稳定性或者更宽的 -10 dB吸收带宽.本文所提出的设计不仅在超宽带范围内实现了 -10 dB(FBW=164.0%)和 -20 dB(FBW=152.0%)的吸收性能,同时TE/TM波下的

最大斜入射角也能达到 $60^\circ/50^\circ$, 并且没有明显地增加

结构的整体厚度, 体现出了极佳的综合性能.

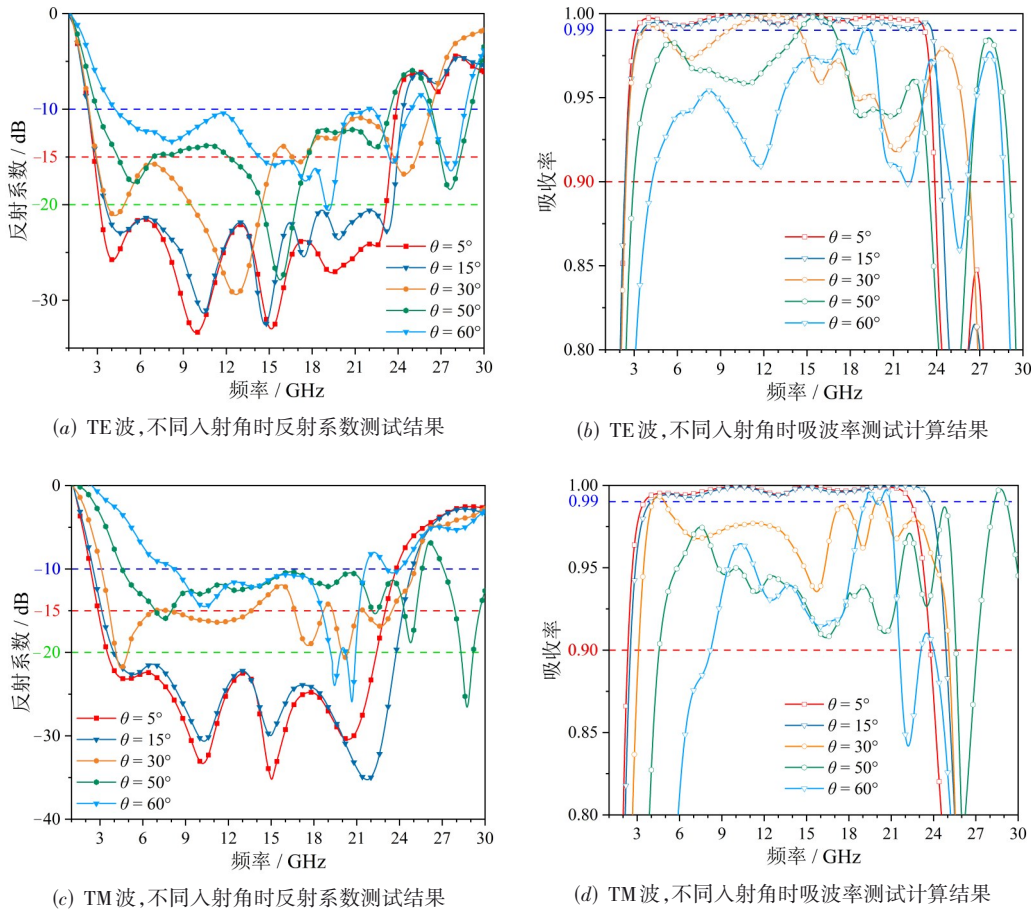


图 12 双层超表面互补增强宽频广角复合吸波体在不同入射角时的测试计算结果

表 2 宽带吸波体性能对比

参考文献	垂直入射相对带宽/GHz		最大斜入射角				绝对厚度/mm	相对厚度 λ_L/mm
	-10 dB	-20 dB	-10 dB		-20 dB			
			TE	TM	TE	TM		
文献[10]	$(f_L=2.3, f_H=13.3)$ 141.0%	—	45°	45°	—	—	18.0	0.138
文献[13]	$(f_L=1.0, f_H=12.9)$ 171.2%	—	0°	0°	—	—	26.0	0.087
文献[16]	$(f_L=5.2, f_H=44.0)$ 158.0%	—	0°	0°	—	—	6.5	0.120
文献[18]	$(f_L=6.1, f_H=18.0)$ 117.0%	$(f_L=7.0, f_H=18.0)$ 88.0%	50°	40°	40°	30°	8.0	0.155
文献[26]	$(f_L=11.9, f_H=45.3)$ 117.0%	—	45°	30°	—	—	6.1	0.086
文献[27]	$(f_L=2.1, f_H=37.5)$ 178.8%	—	0°	0°	—	—	14.0	0.098
本论文	$(f_L=2.4, f_H=23.9)$ 164.0%	$(f_L=3.2, f_H=23.2)$ 152.0%	60°	50°	15°	15°	14.2	0.114

注: f_L 代表起始频点, f_H 代表终止频点; 相对带宽的计算公式为 $\text{FBW}=2 \times (f_H - f_L) / (f_H + f_L)$; 相对厚度由吸波体总厚度 λ_L 得到.

5 结论

本文提出了一种基于双层超表面的多层复合吸波体的设计方法, 并设计了一种具有蒙皮保护层、双层超表面的多层结构复合吸波体. 该设计方法表明超表面 I 和超表面 II 的设计应该满足其吸波频带, 反射系数应在

-7.0 dB 左右, 吸收率应为 0.44 左右; 此外, 超表面 I 和超表面 II 的透波频带应该交叉互补, 且透波系数应在 -3.5 dB 左右. 同时, 基于四分之一波长谐振损耗机理, 在吸波体增加厚度适当的蒙皮, 通过为吸波体在低频、中频和高频各新增一个吸收增强层, 可在超宽带范围

内提升吸收性能;并且,利用顶层蒙皮在不同入射角的吸收增强提高吸波体斜入射稳定性能. 仿真结果表明,蒙皮层能够使吸波体整体吸波率在 1.92~29.48 GHz 的提升大于 0.01,部分频点吸收率最大增加可达 0.42. 试验结果表明,本文所提出的吸波体能够在垂直入射时,反射系数低于 -10 dB 的频带为 2.36~23.87 GHz,相对带宽为 164.0%;-20 dB 吸波频带为 3.17~23.16 GHz,相对带宽为 152.0%,斜入射角不小于 60°;其中,超表面 I 主要用于 3.4~16.0 GHz 频段电磁波的吸收和大入射角度时高频的吸收增强;超表面 II 主要用于 15.8~22.6 GHz 频段电磁波的吸收和大入射角时低频的吸收增强. 因此,本文提出的设计方法和设计的吸波体解决了超宽带范围内强吸收、大入射角度稳定性的问题,且具有良好的环境稳定性,为电磁吸波体的设计提供了有益的思路.

参考文献

- [1] NGUYEN T T, LIM S. Wide incidence angle-insensitive metamaterial absorber for both TE and TM polarization using eight-circular-sector[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3204.
- [2] LEE D J, HWANG J G, LIM D, et al. Incident angle- and polarization-insensitive metamaterial absorber using circular sectors[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 27155.
- [3] ISLAM M R, ISLAM M T, MONIRUZZAMAN M, et al. Penta band single negative meta-atom absorber designed on square enclosed star-shaped modified split ring resonator for S-, C-, X- and Ku- bands microwave applications[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 8784.
- [4] AMIRI M, TOFIGH F, SHARIATI N, et al. Wide-angle metamaterial absorber with highly insensitive absorption for TE and TM modes[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 13638.
- [5] HANNAN S, ISLAM M T, ALMUTAIRI A F, et al. Wide bandwidth angle- and polarization-insensitive symmetric metamaterial absorber for X and Ku band applications[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 10338.
- [6] SINGH A, GUPTA N. Screen-printed wideband absorber for the X and Ku bands[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(5): 1321-1329.
- [7] SAMBHAV S, GHOSH J, SINGH A K. Ultra-wideband polarization insensitive thin absorber based on resistive concentric circular rings[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(5): 1333-1340.
- [8] ZHAO Y T, CHEN B, WU B. Miniaturized periodicity broadband absorber with via-based hybrid metal-graphene structure for large-angle RCS reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2022, 70(4): 2832-2840.
- [9] YUAN X J, ZHANG C, CHEN M J, et al. Wideband high-absorption electromagnetic absorber with chaos patterned surface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(1): 197-201.
- [10] HE F, SI K X, LI R, et al. Broadband frequency selective surface absorber with dual-section step-impedance matching for oblique incidence applications[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(11): 7647-7657.
- [11] CHEN J L, SHANG Y P, LIAO C. Double-layer circuit analog absorbers based on resistor-loaded square-loop arrays[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(4): 591-595.
- [12] WEI J F, HE Y, BIE S W, et al. Flexible design and realization of wideband microwave absorber with double-layered resistor loaded FSS[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(18): 185101.
- [13] YAO Z X, XIAO S Q, LI Y, et al. On the design of wideband absorber based on multilayer and multiresonant FSS array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(3): 284-288.
- [14] TAYDE Y, SAIKIA M, SRIVASTAVA K V, et al. Polarization-insensitive broadband multilayered absorber using screen printed patterns of resistive ink[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(12): 2489-2493.
- [15] LIM D, LIM S. Ultrawideband electromagnetic absorber using sandwiched broadband metasurfaces[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(9): 1887-1891.
- [16] LIU T, KIM S S. Ultrawide bandwidth electromagnetic wave absorbers using a high-capacitive folded spiral frequency selective surface in a multilayer structure[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 16494.
- [17] 林宝勤, 魏伟, 达新宇, 等. 一种基于多层电阻膜的超宽带超材料吸波体[J]. *电子学报*, 2014, 42(3): 607-610.
LIN B Q, WEI W, DA X Y, et al. A novel ultra-broadband metamaterial absorber based on multilayer resistance films[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(3): 607-610. (in Chinese)
- [18] MA Z, JIANG C, CAO W B, et al. An ultrawideband and high-absorption circuit-analog absorber with incident angle-insensitive performance[J]. *IEEE Transactions on An-*

- tennas and Propagation, 2022, 70(10): 9376-9384.
- [19] CHEN H T, ZHOU J F, O'HARA J F, et al. Antireflection coating using metamaterials and identification of its mechanism[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(7): 073901.
- [20] MUNK B A. Frequency Selective Surfaces[M]. New York: Wiley, 2000.
- [21] KAZEM ZADEH A, KARLSSON A. Capacitive circuit method for fast and efficient design of wideband radar absorbers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(8): 2307-2314.
- [22] SHI Y, CHU P P, MENG Z K. Ultra-wideband hybrid polarization conversion-absorption metasurface with a transmission window and narrow transition bands[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(9): 095102.
- [23] GUO Z H, GAO C J, ZHANG H F. Direction-dependent Janus metasurface supported by waveguide structure with spoof surface plasmon polariton modes[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(2): 2200435.
- [24] LIAO S Y, QIAO Z, SUI J Y, et al. Multifunctional device for circular to linear polarization conversion and absorption[J]. Annalen Der Physik, 2023, 535(7): 2300195.
- [25] LIAO S Y, SUI J Y, ZHANG H F. Switchable ultra-broadband absorption and polarization conversion metastructure controlled by light[J]. Optics Express, 2022, 30(19): 34172-34187.
- [26] TIRKEY M M, GUPTA N. A novel ultrathin checkerboard inspired ultrawideband metasurface absorber[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(1): 66-74.
- [27] LI Y, GU P F, HE Z, et al. An ultra-wideband multilayer absorber using an equivalent circuit-based approach[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(12): 11911-11921.

作者简介



麻哲义培 男,陕西宝鸡人. 现为中南大学粉末研究院博士研究生. 主要研究方向为电磁超材料、吸透一体结构和吸波结构.
E-mail: zheyipeima@outlook.com



姜超 男,湖北鄂州人. 现为中南大学粉末冶金研究院副教授、博士生导师. 主要研究方向为电磁超材料、忆阻器人工智能材料器件以及压电铁电功能材料.
E-mail: jiangchao@csu.edu.cn



刘妍琼 女,湖南娄底人. 现为中南大学粉末冶金研究院硕士研究生. 主要研究方向为电磁超材料、吸透一体结构和吸波结构.
E-mail: liuyanqiong@csu.edu.cn



黎嘉乐 男,江西萍乡人. 中南大学粉末冶金研究院科研助理. 主要研究方向为复合材料加工工艺.
E-mail: 591135285@qq.com