**Hans**汉斯

# 基于弯折结构的FSS吸波超材料

## 刘文武,王永华\*,韩雪峰

长春理工大学跨尺度微纳制造教育部重点实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2024年5月28日; 录用日期: 2024年7月5日; 发布日期: 2024年7月16日

# 摘要

本文介绍了一种基于FSS的小厚度、大带宽超材料吸收体。在F4B基板上制造了总厚度仅为2 mm的结构, 重复单元的尺寸为10 mm×10 mm。当电磁波垂直入射在吸收体上时,其吸收带宽为8.9 GHz (从10.46 GHz到19.54 GHz)。材料的吸收率都在90%以上,最高吸收率为100%。通过大量的模拟,结构得到了 优化。此外,绘制了电磁参数  $\varepsilon_{eff}$  和  $\mu_{eff}$  图像来说明吸收机制,绘制了顶层和底层的电流图像来进一步 支持吸收机制。最后,通过实验验证了结构对垂直入射电磁波的吸收能力。

#### 关键词

吸波超材料,基于弯折结构,频率选择表面

# FSS Absorbing Metamaterial Based on Bending Structure

#### Wenwu Liu, Yonghua Wang\*, Xuefeng Han

Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: May 28<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 16<sup>th</sup>, 2024

#### Abstract

In this paper, a FSS-based metamaterial absorber with small thickness and large bandwidth is presented. Structures with a total thickness of only 2 mm were fabricated on a F4B substrate, and the dimensions of the repeating unit were 10 mm × 10 mm. The absorption bandwidth of the absorber was 8.9 GHz (from 10.46 GHz to 19.54 GHz) when an electromagnetic wave was incident perpendicularly on the absorber. The absorptions of the materials are all above 90% and the

\*通讯作者。

highest absorption is 100%. The structure was optimised by extensive simulations. In addition, electromagnetic parameters  $\varepsilon_{eff}$  and images  $\mu_{eff}$  were plotted to illustrate the absorption mechanism, and current images of the top and bottom layers were plotted to further support the absorption mechanism. Finally, the structure's ability to absorb vertically incident electromagnetic waves was experimentally verified.

#### **Keywords**

Wave-Absorbing Metamaterials, Bending-Based Structures, Frequency-Selective Surfaces

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

nttp://creativecommons.org/incenses/by/4.u

CC O Open Access

## 1. 引言

超材料(MTM)是由金属周期性和介电周期性组成的具有电磁财产的人工周期结构。这些结构在自然 界中并不存在,它们的电磁财产通常在自然界中找不到。因此,超材料有着广泛的应用,如雷达隐身[1][2]、 超材料天线[3][4]、能量收集[5]和传感器等[6][7]。与传统吸收体(如体积庞大、易碎和制造复杂的多层吸 收体)相比,超材料具有厚度薄、重量轻、成本低等优点。可以通过改变周期性排列的金属图案的几何尺 寸来调整阻抗。

频率选择表面吸收体是一种周期性结构,其上表面由一系列周期性金属结构组成,这些金属结构在 底表面的方向上相隔一定距离,并被介质隔开。在谐振频率下,由于材料和空气之间的阻抗匹配,反射 波减小。此外,由于介质的介电损耗,传输波被吸收。然而,这种结构具有吸收带宽窄的缺点。为了获 得更多的吸收带,已经开发了双频 MTM 吸收器[8]和多频 MTM 吸收器[9] [10]。研究人员还试图使用多 层结构[11] [12]来获得更大的带宽,每层都有一个周期性的金属结构,并且每层都与周期性金属结构对应 的吸收带连接在一起,以达到扩展带宽的目的。尽管这种结构可以增加带宽,但由于使用多层结构,吸 收体的厚度大大增加。也有一些研究试图设计单层结构的吸收体,这种金属谐振型超材料吸波体是由多 个谐振单元组成,通过调节不同的谐振单元的尺寸结构可控制不同的谐振峰[13]。为了实现宽带吸收,可 以设计不同谐振单元在相邻不同频点实现相邻谐振峰的叠加[14] [15]。目前,很多的 FSS 吸波超材料都 是在 Salisbury 屏的基础上发展而来,在吸收器结构的周期性金属结构上添加电阻片[16] [17]。实际上, 这种结构具有吸收带宽大的优点,但结构的厚度往往相对较大,所涉及的制造工艺也很复杂。

本文提出了一种基于频率选择表面的吸收材料,该材料具有带宽大、厚度薄的优点。通过绘制电磁 参数(*ε<sub>eff</sub> & μ<sub>eff</sub>*)的实部和虚部图以及电流分布图来说明结构的超材料性能。最后,制备了一个样品进 行实验验证。

### 2. 超材料的结构设计

对于基于频率选择表面的微波超材料吸收体,单个谐振频带产生的吸收带宽非常小。为了获得大的 带宽,需要获得尽可能多的谐振频带,并将这些谐振频带连接在一起以形成大的吸收带。Han [18]利用通 过总结弯折结构的部分设计规律设计出了大吸收带宽的基于 FSS 的超材料。但是为了获得大带宽使得单 元形状比较复杂,这使得调整的工作量大大增加。为了实现大吸收带宽同时使单元结构更加的简单,本 文将进一步挖掘设计规律,最终设计出一款结构简单的大带宽吸收超材料。 超材料结构的横截面图如图 1 所示。该吸波体由三层结构组成。第一层是周期性单元,材料是铜, 电导率  $\sigma = 5.8 \times 10^7$  S/m,厚度是 1oz。第二层是介质层,材料是 F4B,介电常数为 2.2,损耗正切为 0.001, 厚度是 2 mm。第三层是一层铜,厚度是 1oz。图 2 为周期性单元的详细尺寸图,其中  $L_1 = 2.2$  mm,  $L_2 =$ 1.1 mm,  $L_3 = 0.4$  mm,  $L_4 = 5.1$  mm,  $L_5 = 0.5$  mm,  $L_6 = 1$  mm,  $L_7 = 2.7$  mm,  $L_8 = 0.5$  mm。单元的尺寸为 10 mm × 10 mm。



## 3. 仿真和分析

模拟设置如图 3 所示。立方体的前、后、左、右表面是周期条件,用于模拟无限平面。电磁波从端 口 1 发射。端口 2 用于计算 S<sub>21</sub>。在端口和超材料吸收器之间是空气。金属是由完美导电体条件模拟的。 在这里,我们将这种吸收体视为一种均匀介质。为了获得更精确的归一化阻抗值,并尽可能消除空气层 对计算结果的影响,我们需要将 port 1 放置在尽可能靠近吸波体上表面的位置(本文设定的距离为 0.5 mm)。 请注意,为了便于描述模拟细节,图中的距离大于 0.5 mm),并让 port 2 尽可能靠近吸收器的下表面(本 文中设置的距离为 0.5 毫米。请注意为便于描述模拟详细信息,图中距离大于 0.5 mm)。

当电磁波垂直入射时,仿真的结果如图 4 所示。从图中可以看出,吸波超材料的结构产生了三个吸收带,其中吸收率在 90%以上的频率范围分别为 10.47~19.55 GHz、20.84 GHz 附近和 24.03~26.29 GHz, 吸收带的整体宽度达到 11.34 GHz。从图中可以看出在吸收频带上一共有 5 个吸收峰,他们频率分别是

(1)

10.93 GHz、14.21 GHz、18.83 GHz、20.84 GHz、24.17 GHz 和 25.63 GHz,除 20.84 GHz 外,其他五个 频率的吸收率均超过 99.98%。等大双弯折结构的形状更加的简单,没有过多的调整细节并且产生了很大的带宽。

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





**Figure 4.** Wave absorption properties of metamaterials 图 4. 超材料吸波性能

同样为了验证结构中不同参数对吸收率曲线产生的影响,对结构中的各个参数进行了变化对比。产

### 生的对比结果如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出,当 L<sub>1</sub> 从 2.2 mm 变为 2.4 mm 时,整体吸光度曲线向低频移动了一定距离,整体 曲线形状没有大的变化。但当 L<sub>1</sub> 值变为 2.4 mm 时,从图中可以看出,第二吸收峰和第三吸收峰向低频 移动了较大距离,因此第一吸收峰和第二吸收峰之间的吸收率增加,第二吸收峰和第三吸收峰之间的吸收率降低。吸收率从 90%以上下降到 85%。可以看出,当 L<sub>1</sub>变化超过一定值时,它对曲线的影响也会增 加,在 21 GHz 附近会产生一排吸收峰。虽然这个吸收峰较窄,但会随着 L<sub>1</sub>的增加而逐渐增大。





如图 5(b)所示,当 L<sub>2</sub>的值从 0.9 mm 开始逐渐增大时,可以观察到第一吸收峰、第五吸收峰和第六 吸收峰向高频方向有少量移动,第二吸收峰和第三吸收峰向低频方向有少量移动,而第四吸收峰的位置 几乎保持不变。这样,第一吸收峰和第二吸收峰之间的吸收率就会相对大幅增加。同时,由于第三个吸

收峰比第二个吸收峰在低频方向上产生了更大的偏移,这导致第二个吸收峰和第三个吸收峰之间的吸收 率也有小幅增加。因此,随着 L<sub>2</sub> 长度的逐渐增加,第一吸收带的吸收带宽减小,但吸收率却逐渐增加。 此外,第六个吸收峰比第五个吸收峰更多地向高频方向偏移,这将导致第五和第六个吸收峰之间的吸收 率略有下降,吸收带宽略有增加。

如图 5(c)所示,当 L<sub>3</sub>的值从 0.2 mm 变为 0.4 mm 时,可以观察到第三个吸收峰向低频方向移动了一小段距离,第四个吸收峰的位置几乎保持不变,其余的吸收峰都不同程度地向高频方向移动。这使得第二和第三吸收峰相互靠近,导致第二和第三吸收峰之间的吸收率增加。第二吸收峰和第六吸收峰向高频方向移动的程度分别大于第一吸收峰和第五吸收峰,这将导致第一吸收峰和第二吸收峰之间以及第五吸收峰和第六吸收峰之间的吸收率下降幅度不同。因此,随着 L<sub>3</sub>长度的逐渐增加,第一吸收带的吸收带宽将逐渐减小,而第三吸收带的吸收带宽逐渐增大,同时吸收率逐渐减小。

我们也可以通过等效介电常数  $\varepsilon_{eff}$  和等效磁导率  $\mu_{eff}$  来解释超材料对电磁波的吸收现象[16]。这里我 们认为这个超材料是均匀介质。我们可以通过公式(2)和公式(3)来计算阻抗 Z 和折射率 n。其中的  $S_{11}$ 表示的是返回端口 1 的电磁波的量和由端口 1 发射出的电磁波的量的比值。 $S_{21}$ 表示的是返回端口 2 和电磁 波的量和由端口 1 发射出的电磁波的量的比值。d表示的是超材料的厚度, k表示的是波数。

$$Z = \sqrt{\frac{\left(1 + S_{11}\right)^2 - S_{21}^2}{\left(1 - S_{11}\right)^2 - S_{21}^2}}$$
(2)

$$n = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[ \frac{1}{2S_{21}} \left( 1 - S_{11}^2 + S_{21}^2 \right) \right]$$
(3)

由于底层是由一层铜覆盖的,所以在这里 *S*<sub>21</sub>的值等于 0,但是这样就会使得公式(2)中的分母出现数 值为 0 的情况。为了避免公式中分母为 0 的情况,在仿真的设置中将底层的一整层铜改为在覆盖一整层 铜的情况下同时在单元的四个角落上分别开 0.5 mm × 0.5 mm 的方形小孔。这样设置的话既可以计算出 *S*<sub>21</sub>的数值同时还几乎不影响吸收曲线的形状。公式(4)给出了反射率 *n* 和阻抗 *z* 的在计算等效介电常数和 等效磁导率的关系。

$$\varepsilon_{eff} = -\frac{n}{z} \pi \mu_{eff} = nz \tag{4}$$

Normalized Impedance = 
$$\frac{Z_{(\omega)}}{\eta_0} = \sqrt{\frac{\operatorname{Re}(\mu_{eff}) - j\operatorname{Im}(\mu_{eff})}{\operatorname{Re}(\varepsilon_{eff}) - j\operatorname{Im}(\varepsilon_{eff})}}$$
 (5)

归一化阻抗的计算公式如公式(5)所示。超材料表面的阻抗情况如图 6 所示,其中阻抗实部最理想的 情况是接近于 1,阻抗虚部的最理想的情况是接近于 0。在满足这两条的情况下可以保证电磁波的能量最 大程度的转化为超材料内的能量。

已知阻抗  $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ ,其中的  $\mu$  是磁导率,  $\varepsilon$  是介电常数。在本文中  $\mu$  是等效磁导率,  $\varepsilon$  是等效介电 常数。当两个等效系数的比值为 1 时,阻抗达到最佳匹配,这就要求这两个系数的实部和虚部越接近越 好。从图 7 和图 8 中我们可以看到在 10.932 GHz, 14.21 GHz 以及 18.828 GHz 这三个频率上等效介电常 数的实部和等效磁导率的实部是非常的接近的,等效介电常数的虚部和磁导率的虚部也是非常接近的, 使得在这三个频率上该结构的超材料的吸收率会很高。在吸收频带上的其他频率上,等效介电常数和磁 导率的实部以及等效介电常数和磁导率的虚部都是比较接近的,因此在这些频率上该结构的超材料的吸 收率可以达到 90%左右。





与大小弯折结构对电磁波的吸收理论相同,等大双弯折结构吸波超材料中单元结构的不同的部分分 别在 10.932 GHz, 14.21 GHz 和 18.828 GHz 上发生了谐振,并且这三个谐振频带连接到一起形成了大的 吸收带宽。电场和磁场在吸波体的上表面和下表面上产生电谐振和磁谐振。谐振频率下的电场分布如图 10 所示。电场的能量主要集中在图中高亮部分的位置,可以视为等效电容 C。谐振频率下的磁场分布如 图 9 所示,磁场的能量主要集中在如图中高亮部分的位置,可以视为等效电感 L。L 和 C 形成谐振电路。 如图 10 和图 11 所示,通过电磁共振在上表面和下表面上形成传导电流,并且在介质层中形成位移电流。 传导电流和位移电流形成电流回路,并在电磁共振的作用下连续流动,由于介质层的介电效应(极化弛豫), 使得位移电流的能量被消耗掉,使得能量也持续的被消耗。



**Figure 8.** Imaginary part of equivalent permittivity and equivalent permeability 图 8. 等效介电常数和等效磁导率虚部



**Figure 9.** Electric field distribution

图 9. 电场分布图



**图 10.** 磁场分布图





当电磁波垂直入射时的情况如图 12 所示。当电场的极化角度从 0 度增加到 45 度时,材料的吸收率 会随着角度的增大逐渐下降。



**Figure 12.** Absorbance as polarisation direction is changed 图 12. 当极化方向改变时的吸收率

从图 13 中可以看到当波的入射方向发生改变时,吸收曲线发生了较大的变化。当入射角度为 15 度时,第一二吸收峰之间的吸收率下降,二三吸收峰之间的吸收率提高,21~25 GHz 的吸收率大幅提升,整体上吸收率没有较大的下降。当继续增大入射角度值 30 度时,一二吸收峰之间的吸收率有较大幅度下降,整体上吸收带宽有变小,21~25 GHz 上的吸收率继续上升。当入射角变为 45 度时,13 GHz 处的吸收率继续下降至 60%。16~25 GHz 的吸收率整体下降。

如图 14 所示,当以 TM 入射的方式入射时吸收率的变化同样是比较大的。15 度入射时,整体上吸收曲线的吸收率下降很小,并且 20~25 GHz 频段上的吸收率和 TE 入射一样,出现了大幅增加的趋势。随着入射角的持续增大,10.3~19.3 GHz 的频段上吸收率逐步下降,20~25 GHz 上的吸收率在逐渐上升。



**Figure 13.** Absorbance at different angles for the case of TE incidence 图 13. TE 入射情况下不同角度的吸收率





用于实际样品的材料为 F4B (厚度为 2 mm,相对介电常数为 2.2,损耗角正切为 0.001)。为了模拟无限大的周期性结构,制作的模型由 18×18 个单元阵列组成,如图 15 所示。

由于设备(2~18 GHz, MS46322B, 日本安立)性能限制,测试曲线只到 18 GHz。我们从图 16 中可以 看出仿真的曲线和测试的曲线吸收效果几乎一致。



Figure 15. Physical drawing and partial enlargement 图 15. 实物图和局部放大图



**Figure 16.** Comparison of simulation results and test results 图 16. 仿真结果和测试结果对比

## 4. 结论

本文提出了一种新型的超薄大带宽吸波超材料,其带宽为9 GHz (从 10.3 GHz 到 19.3 GHz),吸收率 在 90%以上。10.8 GHz, 14.6 GHz 以及 18.8 GHz 的吸收率分别为 99.98%, 99.98%和 99.85%。通过绘制 电磁参数变化曲线图发现,通过合理的设置 FSS 金属结构可以使超材料吸收体实现良好的阻抗匹配,通 过绘制电场、磁场和电流分布图发现,该超材料吸收体是通过电磁共振和极化弛豫效应实现电磁波的高 效吸收。制造的样品经过测试,其吸收效果与模拟结果基本一致。吸收器不使用任何电阻作为消耗源,并且具有大的带宽、小的单元尺寸和更小的厚度。

### 基金项目

国家自然科学基金(52175264); 吉林省科技厅项目(YDZJ202301ZYTS490; 20220201054GX); 重庆市

#### 自然基金(CSTB2022NSCQ-MSX0506; CSTB2022NSCQ-MSX1643)。

## 参考文献

- Gao, Y., Jing, H., Wang, J., Kang, J., Zhao, L., Chen, L., *et al.* (2024) A Transparent Broadband Flexible Metamaterial Absorber for Radar Infrared-Compatible Stealth. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 57, Article ID: 155102. https://doi.org/10.1088/1361-6463/ad1dbe
- [2] Zhong, S., Jiang, W., Xu, P., Liu, T., Huang, J. and Ma, Y. (2017) A Radar-infrared Bi-Stealth Structure Based on Metasurfaces. *Applied Physics Letters*, **110**, Article ID: 063502. <u>https://doi.org/10.1063/1.4975781</u>
- [3] Liu, Y. and Zhao, X. (2018) Metamaterials and Metasurfaces for Designing Metadevices: Perfect Absorbers and Microstrip Patch Antennas. *Chinese Physics B*, 27, Article ID: 117805. <u>https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/11/117805</u>
- [4] Afsar, M.S.U., Faruque, M.R.I. and Abdullah, S. (2024) Swastika-Shaped Rotationally Symmetric Quadruple-Structured Near-Infrared Metamaterial Absorber for Absorbing Solar Energy. *Optical Materials*, 148, Article ID: 114805. <u>https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114805</u>
- [5] Liu, Z., Zhang, H., Fu, G., Liu, G., Liu, X., Yuan, W., et al. (2020) Colloid Templated Semiconductor Meta-Surface for Ultra-Broadband Solar Energy Absorber. Solar Energy, 198, 194-201. <u>https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.066</u>
- [6] Hadipour, S., Rezaei, P. and Norouzi-Razani, A. (2024) Multi Band Square-Shaped Polarization-Insensitive Graphene-Based Perfect Absorber. *Optical and Quantum Electronics*, 56, Article No. 471. <u>https://doi.org/10.1007/s11082-023-06081-0</u>
- [7] Hanif, A., Alam, T., Islam, M.T., Hakim, M.L., Yahya, I., Albadran, S., et al. (2024) NI-PI-NI Based Nanoarchitectonics Near-Perfect Metamaterial Absorber with Incident Angle Stability for Visible and Near-Infrared Applications. International Journal of Optomechatronics, 18, Article ID: 2299026. <u>https://doi.org/10.1080/15599612.2023.2299026</u>
- [8] Zhang, H., Zhang, H., Liu, G. and Li, H. (2019) Ultra-broadband Multilayer Absorber with the Lumped Resistors and Solid-State Plasma. *Results in Physics*, 12, 917-924. <u>https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.12.059</u>
- [9] Tran, M.C., Le, D.H., Pham, V.H., Do, H.T., Le, D.T., Dang, H.L., et al. (2018) Controlled Defect Based Ultra Broadband Full-Sized Metamaterial Absorber. Scientific Reports, 8, Article No. 9523. <u>https://doi.org/10.1038/s41598-018-27920-1</u>
- [10] Al-badri, K.S.L. (2020) Electromagnetic Broad Band Absorber Based on Metamaterial and Lumped Resistance. Journal of King Saud University—Science, 32, 501-506. <u>https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.07.013</u>
- [11] Dinh, M.Q., Le, M.T., Ngo, S.T. and Tung, N.T. (2021) Unifying Approach to Multilayer Metamaterials Absorber for Bandwidth Enhancement. *Optics Communications*, 485, 126725. <u>https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126725</u>
- [12] Chen, P., Kong, X., Han, J., Wang, W., Han, K., Ma, H., et al. (2021) Wide-Angle Ultra-Broadband Metamaterial Absorber with Polarization-Insensitive Characteristics. *Chinese Physics Letters*, 38, Article ID: 027801. <u>https://doi.org/10.1088/0256-307x/38/2/027801</u>
- [13] Xiong, H., Wu, Y., Dong, J., Tang, M., Jiang, Y. and Zeng, X. (2018) Ultra-Thin and Broadband Tunable Metamaterial Graphene Absorber. *Optics Express*, 26, 1681-1688. <u>https://doi.org/10.1364/oe.26.001681</u>
- [14] Zhang, H., Zhang, H., Yao, Y., Yang, J. and Liu, J. (2018) A Band Enhanced Plasma Metamaterial Absorber Based on Triangular Ring-Shaped Resonators. *IEEE Photonics Journal*, 10, 1-10. <u>https://doi.org/10.1109/jphot.2018.2854906</u>
- [15] Ma, W., Wen, Y. and Yu, X. (2013) Broadband Metamaterial Absorber at Mid-Infrared Using Multiplexed Cross Resonators. *Optics Express*, 21, 30724-30730. <u>https://doi.org/10.1364/oe.21.030724</u>
- [16] Chen, J., Shang, Y. and Liao, C. (2018) Double-Layer Circuit Analog Absorbers Based on Resistor-Loaded Square-Loop Arrays. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **17**, 591-595. <u>https://doi.org/10.1109/lawp.2018.2805333</u>
- [17] Wang, Q. and Cheng, Y. (2020) Compact and Low-Frequency Broadband Microwave Metamaterial Absorber Based on Meander Wire Structure Loaded Resistors. AEU—International Journal of Electronics and Communications, 120, Article ID: 153198. <u>https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153198</u>
- [18] Han, X., Wang, Y., Xu, J. and Yu, H. (2021) An Ultrathin Wideband Microwave Metamaterial Absorber Based on Frequency Selective Surface. Advanced Electronic Materials, 8, 2101040. <u>https://doi.org/10.1002/aelm.202101040</u>