

宽频高吸收双层吸波材料仿真设计及试验验证

王 喆¹, 王月祥^{1,2}, 张存瑞¹, 李 静¹, 张小刚¹, 米玉洁¹

¹中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原

²中国 - 白俄罗斯电磁环境效应“一带一路”联合实验室, 山西 太原

收稿日期: 2022年8月2日; 录用日期: 2022年9月6日; 发布日期: 2022年9月13日

摘 要

采用CST Microwave Studio电磁仿真软件对干涉型吸波材料、损耗型吸波材料及干涉/损耗型双层吸波材料的反射率进行仿真设计。仿真结果表明, 干涉型吸波材料最大吸收频率点即干涉频率随着材料厚度的增加向低频移动, 最大吸收率由材料的厚度决定; 损耗型吸波材料最大吸收频率点随着材料厚度的增加向低频移动, 最大吸收率由材料的电磁参数决定; 干涉/损耗型双层吸波材料可有效地结合两种吸波材料的优势, 实现拓宽吸收频段, 增大最佳反射率。制备干涉/损耗型双层橡胶基平板吸波材料, 并进行测试, 结果表明: 该材料不仅有效地拓宽了平板材料的吸收带宽(-10 dB), 有效带宽为9 GHz, 而且干涉频率附近实现了较强吸收峰(-47.8 dB), 是一种“宽频、高效”的吸波材料设计方法。

关键词

干涉, 损耗, 吸波, 双层介质

Simulation and Experimentation of Wide Frequency Electromagnetic Shielding Coating

Zhe Wang¹, Yuexiang Wang^{1,2}, Cunrui Zhang¹, Jing Li¹, Xiaogang Zhang¹, Yujie Mi¹

¹NO. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi

²China-Blarus Belt and Road Joint Laboratory on Electromagnetic Environment Effect, Taiyuan Shanxi

Received: Aug. 2nd, 2022; accepted: Sep. 6th, 2022; published: Sep. 13th, 2022

Abstract

The CST Microwave Studio electromagnetic simulation software was used to simulate and design

文章引用: 王喆, 王月祥, 张存瑞, 李静, 张小刚, 米玉洁. 宽频高吸收双层吸波材料仿真设计及试验验证[J]. 应用物理, 2022, 12(9): 503-511. DOI: 10.12677/app.2022.129059

the reflectivity of interference type absorbing materials, lossy absorbing materials and interference/lossy double-layer absorbing materials. The simulation results show the maximum absorption frequency point of the interference type wave absorbing material, that is, the interference frequency moves to the low frequency with the increase of the material thickness, and the maximum absorption rate is determined by the material thickness; the maximum absorption frequency point of lossy absorbing material moves to low frequency with the increase of material thickness, and the maximum absorption rate is determined by the electromagnetic parameters of the material. The interference/lossy double-layer absorbing material can effectively combine the advantages of the two absorbing materials to broaden the absorption frequency band and increase the optimal reflectivity. The interference/loss type double-layer rubber-based flat plate absorbing material was prepared and tested. The results showed that it not only effectively broadened the absorption bandwidth (-10 dB) of the flat plate material, the effective bandwidth was 9 GHz, but also achieved strong absorption near the interference frequency of peak (-47.8 dB), which is a "broadband, high-efficiency" design method for absorbing materials.

Keywords

Interference, Loss, Absorbing, Double Layer Medium

Copyright © 2022 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/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着雷达探测、5G 通讯、轨道交通等军、民用电子设备的快速增量发展及使用,空间电磁能量辐射不断增加,形成了严重的电磁辐射污染[1],尤其是固定频率下高能量电磁辐射不仅影响电子和通信设备的正常工作,还会对人体健康造成严重的威胁[2] [3]。因此,吸波材料的应用不仅要求吸波频率宽,同时高吸收率也成为吸波材料一项重要的技术指标。然而,在电子设备中应用的平板型吸波材料由于其厚度限制,无法同时兼具“宽频、高效”型吸收的特点,尤其是针对反射率 < -40 dB 的平板型吸波材料的研究较少。

本文应用 CST 电磁仿真软件的微波工作室模块,以自由空间为环境背景,建立平板吸波体吸波效能分析模型;依据干涉吸波原理和损耗吸波原理,以 2 组不同材料的电磁参数($\mu', \varepsilon', \mu'', \varepsilon''$)按照阻抗由低到高的方式作为模型中 2 层介质材料的电磁特性输入,调整其匹配厚度,仿真优化具有最佳宽频、高吸收特性的双层吸波材料结构[4]。通过干涉层与损耗层双层橡胶基吸波贴片制备及测试,得出 2 层结构吸波材料,可有效地拓宽吸波带宽,并提高最大吸波效能,为“宽频、高效”型吸波材料提供了有效的设计方法。

2. 理论基础

2.1. 干涉型设计原理

干涉型吸波材料是利用电磁波的干涉效应,通过使介质上界面和下界面的反射波振幅相等、相位相反而干涉抵消,从而达到衰减总反射电磁波能量的作用。

如图 1 所示,当电磁波从空气入射进介质内部时,会在空气-介质表面形成部分反射,记作介质表面反射波;入射波到达反射平面会形成反射继续在介质中反向传输到达空气-介质表面形成部分反射,并再次形成反射和透射,多次振荡,多次从介质中通过空气-介质表面反向透射出的电磁波总和记作介质底面反射波。此时,从入射面角度观察,当介质厚度满足 $d = \lambda m/4$ 时(其中 λm 为电磁波在介质材料中

的波长), 可满足介质表面反射波与介质底面反射波频率相同、相位相反、振幅近似相等, 这两列电磁波将发生干涉抵消现象, 从而使总的反射波衰减[5]。

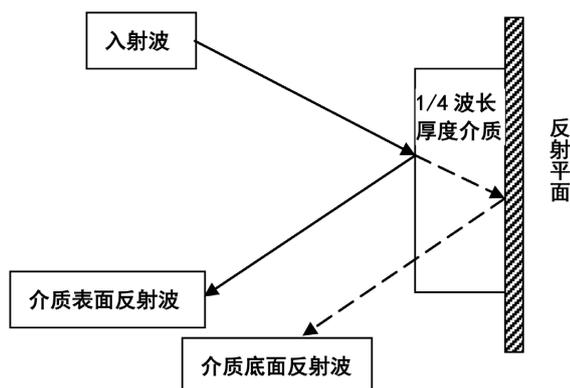


Figure 1. Design principles of single-layer interference-type materials
图 1. 单层干涉型材料设计原理示意图

2.2. 损耗型设计原理

如图 2 所示, 损耗型吸波材料是指电磁波进入吸波材料内部, 其能量被损耗介质通过磁滞损耗、涡流损耗等方式转化为热能或其他形式能量而耗散掉, 从而达到衰减电磁波能量的作用。根据电磁场理论, 当电磁波由阻抗为 Z_0 的自由空间入射到阻抗为 Z 的半无限介质表面时, 其反射系数 R 满足:

$$R = (Z - Z_0) / (Z + Z_0) \quad (1)$$

式中, $Z = (\mu_r / \epsilon_r)^{1/2}$ 为介质波阻抗, Z_0 自由空间波阻抗(376.7 Ω)。当介质有损耗时, 相对磁导率 μ_r 和相对介电常数 ϵ_r , 表示为复数 $\mu_r = \mu' + j\mu''$, $\epsilon_r = \epsilon' + j\epsilon''$ 。其中, 实部 μ' 和 ϵ' 表征了材料的储能容量, 如磁化能和电容, 而虚部 μ'' 和 ϵ'' 表征了材料的极化损耗。损耗介质对电磁波的衰减能力常用电损耗角正切 $\tan \delta_e = \epsilon'' / \epsilon'$ 和磁损耗角正切 $\tan \delta_m = \mu'' / \mu'$ 来表示, 其值越大, 衰减能力越强。同时, 由公式(1)很容易推得, 要使反射系数 $R = 0$, 需满足:

$$\mu' = \epsilon', \mu'' = \epsilon'' \quad (2)$$

显然, 同一介质的各个频率的 μ_r 和 ϵ_r 都难以都满足以上公式(2), 因此该公式是相当苛刻的。如, 不满足上述阻抗匹配条件, 即意味着将有一部分能量在入射时界面即被反射, 无法进入介质中产生损耗效应[6]。

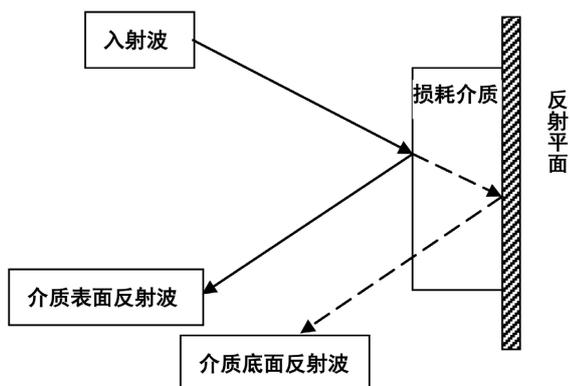


Figure 2. Design principles of single-layer absorbing materials
图 2. 单层吸收型材料设计原理示意图

2.3. 干涉与损耗性结合设计原理

根据上述分析可知,干涉对消原理要求具有与自由空间较好的阻抗匹配性,可以最大限度的呈现入射波与反射波相位相反、振幅相同的状态,在固定频率实现干涉对消吸波效应。损耗吸收原理不仅要求具有较大的损耗正切值,还要求有较好的阻抗匹配性,但两者之间无法兼顾实现,因此,无法达到最佳的损耗吸收效果。本文以阻抗匹配性互补为目标将干涉对消原理与损耗吸收原理相结合,以干涉型吸收层为面层,损耗型吸收层为底层,设计干涉型/损耗性双层吸波材料,尽量提高损耗层的电磁波损耗能力,并将损耗层表面由于阻抗失配引起的入射界面反射波通过面层干涉对消的方式减少双层材料的总反射率,实现干涉型/损耗性双层吸波材料最优的吸波性能。

3. 模型建立

采用 CST MWS 微波工作室中 Unit Cell 模板以及应用频域有限元(FEM)求解器,建立模型,该求解器适用于任意结构、任意介质的 S 参量、辐射与散射问题的仿真。其中,结构单位为 mm,频率单位为 GHz;背景材料设为真空,所建模型为真实模型实体[7]。阵列单元模型结构如图 3 所示:

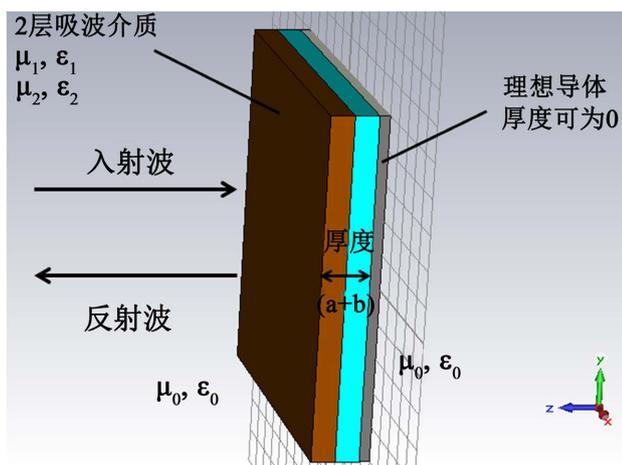


Figure 3. Array unit model structure

图 3. 阵列单元模型结构示意图

如图 3 所示:模型结构是由 2 层各向同性介质层和全反射导体面构成的理想化模型,即复合材料材质完全均匀,无限大,反射面为理想导体,垂直入射。从电磁波入射角度观察,吸波材料从面层至底层分别编号为 H1、H2,厚度分别设为 a、b,输入值可在 0.1~100 mm 可调整;然后分别将前期实测的 H1、H2 在 2~18 GHz 频率下的复数介电常数和复数磁导率数据列表导入到所建单元模型的材料属性中(当 H1、H2 输入电磁参数相同时,可视为单层电磁特性材料,当 H1、H2 输入电磁参数不同时,可视为双层电磁特性材料),最后将该单元在 x 和 y (阵列的两个周期方向)方向上进行周期延拓,从而得到双层吸波体无限阵列结构模型实体[8]。

4. 仿真结果讨论

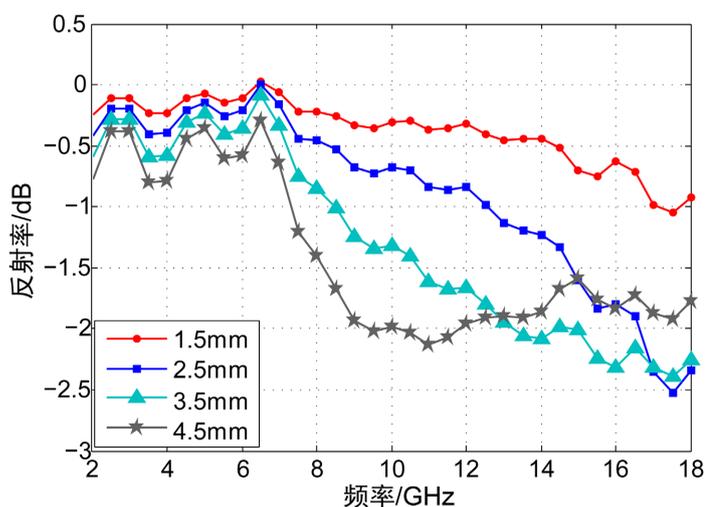
4.1. 干涉型介质仿真结果

将 H1、H2 输入相同的介质参数,设计为干涉型吸波层,其电磁参数应当尽量为无电磁损耗材料,最大限度实现电磁波干涉对消效应[9]。本论文采用硅橡胶电磁参数为输入参数,如表 1 所示:

Table 1. Electromagnetic parameters of silicone rubber**表 1.** 硅橡胶电磁参数列表

参数 \ 频率	2 GHz	4 GHz	6 GHz	8 GHz	10 GHz	12 GHz	14 GHz	16 GHz	18 GHz
ϵ'	2.646	2.548	2.614	2.564	2.607	2.590	2.597	2.587	2.562
ϵ''	0.155	0.096	0.121	0.138	0.130	0.132	0.140	0.155	0.122
μ'	1.13	1.112	1.116	1.139	1.095	1.089	1.071	1.065	1.030
μ''	0.221	0.103	0.030	0.045	0.046	0.037	0.039	0.044	0.062

依据橡胶基吸波材料加工工艺限制, 本文在 1.5~4.5 mm 范围内调整介质层厚度, 分析其厚度影响规律, 其吸波性能仿真结果如图 4 所示:

**Figure 4.** Absorbing performance of interference absorbing materials**图 4.** 干涉吸波型材料吸波性能

可见硅橡胶介质层随着厚度的增加, 其最大吸收频率点即干涉频率向低频移动, 即意味着厚度增加导致其对应的干涉波长增大。在 1.5~4.5 mm 厚度范围内, 干涉频率在 9~18 GHz 范围内。

4.2. 损耗型介质仿真结果

将 H1、H2 输入相同的介质参数, 设计为损耗型吸波层, 最大限度实现电磁波介电损耗和磁损耗效应[10]。本论文采用硅橡胶/85%羰基铁粉的电磁参数为输入参数, 如表 2 所示:

Table 2. Electromagnetic parameters of silicone rubber/89% carbonyl iron powder**表 2.** 硅橡胶/89%羰基铁粉电磁参数列表

参数 \ 频率	2 GHz	4 GHz	6 GHz	8 GHz	10 GHz	12 GHz	14 GHz	16 GHz	18 GHz
ϵ'	18.841	19.166	20.065	20.699	20.610	20.141	20.264	19.647	20.457
ϵ''	0.500	0.572	1.243	2.680	2.953	4.880	4.612	4.825	5.506
μ'	3.841	2.841	2.350	2.182	1.889	1.762	1.334	1.384	1.100
μ''	2.137	1.997	1.659	1.436	1.364	1.296	1.256	1.103	1.111

在 0.4~1.0 mm 范围内调整介质层厚度, 分析其厚度影响规律, 其吸波性能仿真结果如图 5 所示:

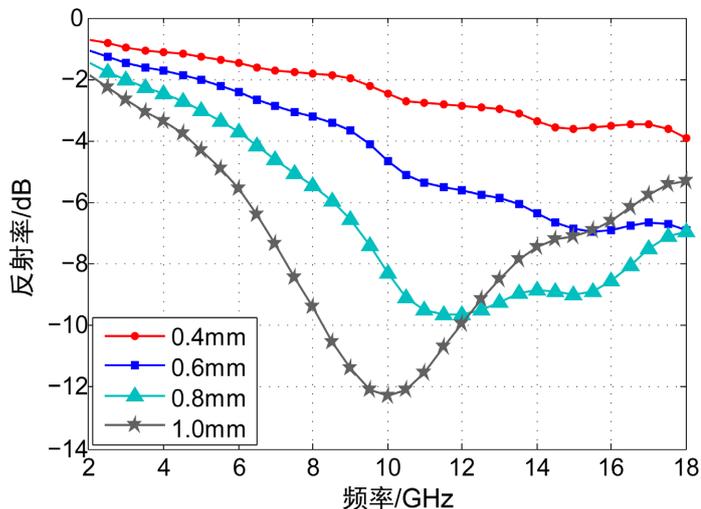


Figure 5. Absorbing performance of lossy absorbing materials

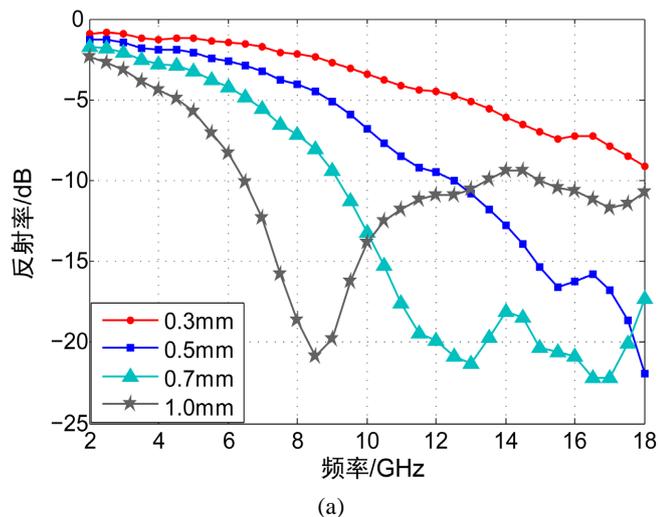
图 5. 损耗吸波型材料吸波性能

可见硅橡胶/89%羰基铁粉介质层随着厚度的增加, 其最大吸收频率点向低频移动, 吸波频率在 10~18 GHz 附近具有明显的介电损耗和磁损耗效应, 在 0.4~1.0 mm 厚度范围内, 有较好的吸波性能。

4.3. 干涉型/损耗型介质仿真结果

将 H1 (面层)、H2 (底层) 分别输入硅橡胶介质层电磁参数和硅橡胶/85%羰基铁粉介质层的电磁参数, 组成干涉型/损耗型双层介质吸波材料, 输入数据与表 1、表 2 相同, 结合上述吸波效能仿真分析, 以 H1 (面层) 厚度为 2.4~2.8 mm、H2 (底层) 0.4~1.0 mm 范围内调整 2 层材料组合, 其吸波性能仿真结果如图 6 所示。

可见通过双层介质电磁参数、厚度的匹配组合, 可实现最佳的吸波性能, 当 H1 (面层) 厚度为 2.6 mm、H2 (底层) 厚度为 0.7 mm 时, 干涉型/损耗型双层介质吸波材料在 9~18 GHz 的反射率 ≤ -10 dB, 最大反射率达到 -49.6 dB。因此, 干涉型/损耗型双层介质吸波材料在合理的电磁参数和厚度匹配的情况下, 不仅可以拓展吸波带宽, 并且可以增强最大吸收峰值, 实现非常好的吸波性能。



(a)

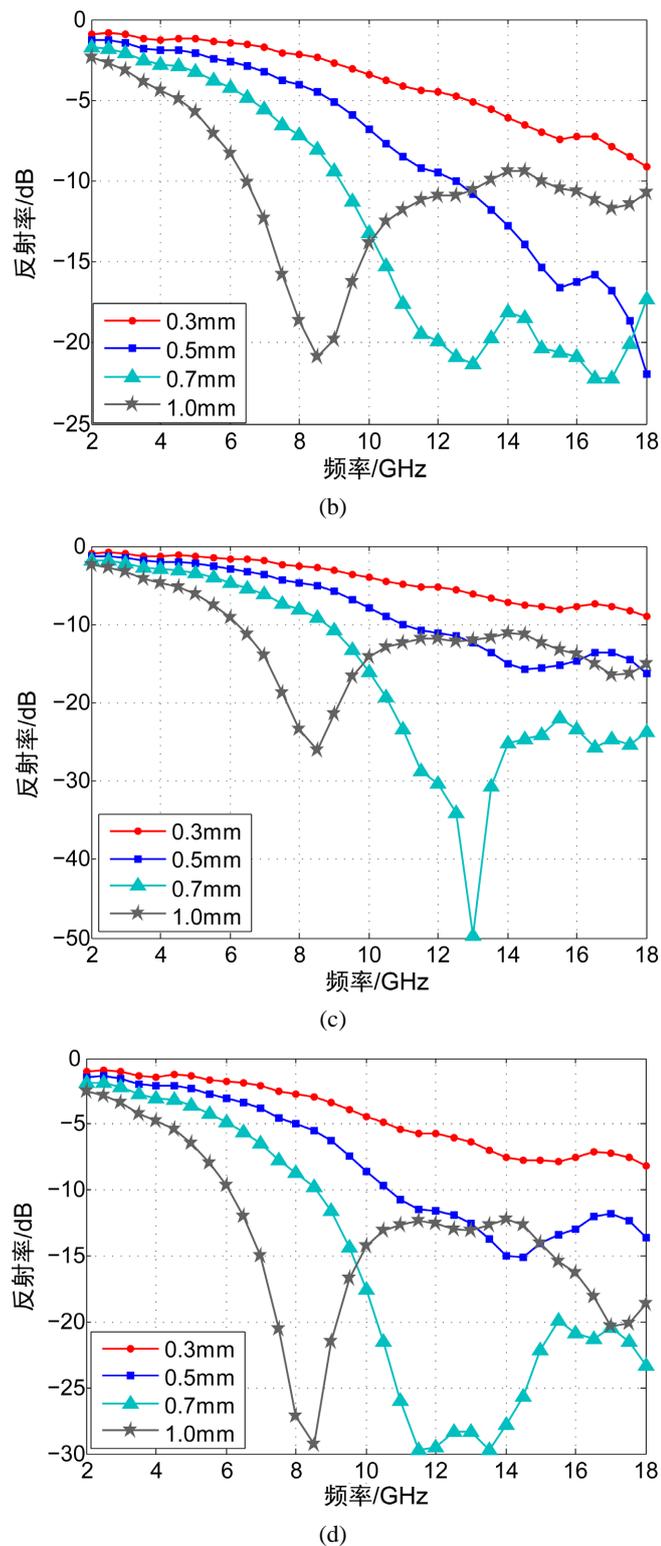


Figure 6. Absorbing performance of Interference/Loss Type Double-layer materials. (a) Absorbing performance when H1 (surface layer) is 2.2 mm; (b) Absorbing performance when H1 (surface layer) is 2.4 mm; (c) Absorbing performance when H1 (surface layer) is 2.6 mm; (d) Absorbing performance when H1 (surface layer) is 2.8 mm

图 6. 干涉型/损耗型双层材料吸波性能。(a) H1 (面层)为 2.2 mm 的吸波性能；(b) H1 (面层)为 2.4 mm 的吸波性能；(c) H1 (面层)为 2.6 mm 的吸波性能；(d) H1 (面层)为 2.8 mm 的吸波性能

5. 试验验证

5.1. 原材料

硅橡胶, 131 型, 中蓝晨光化工研究设计院; 羰基铁粉, YW-3 型, 江苏天一超细金属粉末有限公司; 2,5-二甲基-2,5-二叔丁基过氧化己烷(双二五), 兰州助剂厂。

5.2. 样品制备

按照配方称量各原材料; 清理开炼机并投入硅橡胶、双二五, 混合均匀, 放入模具中模压成型, 成型条件为温度 170℃、时间 15 min、压力 12 MPa, 成型后取出; 清理开炼机并投入硅橡胶、羰基铁粉、双二五, 混合均匀; 调整模具型腔厚度, 将开炼混合料平铺于磨具型腔底部, 上方覆盖成型好的硅橡胶片, 合模, 模压成型, 成型条件为温度 170℃、时间 20 min、压力 12 MPa, 启模后取出双层复合胶片。

5.3. 吸波性能测试

依据 GJB2038A-2011《雷达吸波材料反射率测试方法》中弓形法要求进行测试, 测试结果如图 7 所示。

干涉型/损耗型双层介质吸波材料不仅有效的拓宽了平板材料的吸收带宽(-10 dB)有效带宽为 9 GHz, 而且的干涉频率附近实现了较强吸收峰(-47.86 dB)。可见, 试验验证结果与仿真计算结果具有较好的重合度, 干涉型/损耗型双层介质吸波材料可实现“宽频、高效”吸波材料的设计。

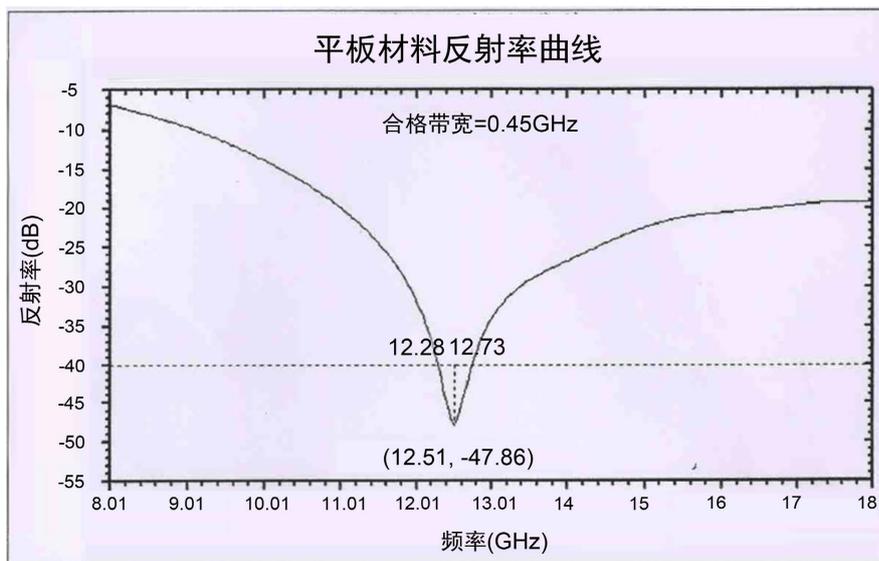


Figure 7. Measured performance of interference type/lossy type double-layer medium microwave absorption
图 7. 干涉型/损耗型双层介质吸波实测性能

6. 结语

- 1) 干涉型吸波材料最大吸收频率点即干涉频率随着材料厚度的增加向低频移动, 最大吸收率由材料的厚度决定。
- 2) 损耗型吸波材料最大吸收频率点随着材料厚度的增加向低频移动, 最大吸收率由材料的电磁参数决定。
- 3) 干涉/损耗型双层吸波材料可有效地结合两种吸波材料的优势, 实现拓宽吸收频段, 提升最大反射率的效果, 是一种实现“宽频、高效”特性平板型吸波材料的有效设计方法。

参考文献

- [1] 范芳岚, 陈炯, 等. 铁氧体吸波材料的研究进展[J]. 辽宁化工, 2021, 52(12): 1833-1838.
- [2] 马虹. 基于吸波材料的 5G 射频天线干扰抑制应用研究[J]. 电子器件, 2021, 44(5): 1078-1083.
- [3] 胡小赛, 沈勇, 王黎明, 等. 吸波材料结构、性能及应用研究进展[J]. 应用化工, 2015, 44(9): 1741-1746.
- [4] 张敏. CST 微波工作室用户全书[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007.
- [5] 黄爱萍, 冯则坤, 等. 干涉型多层吸波材料研究[J]. 材料导报, 2003, 17(4): 21-24.
- [6] 彭俊豪, 郭建华, 蒋兴华. 吸波弹性体材料的研究进展[J]. 弹性体, 2021, 31(4): 75-82.
- [7] 蔡云骧, 周志勇, 徐小倩, 等. 一种基于精英策略非支配排序遗传算法-II 的多层吸波涂层结构设计方法[J]. 兵工学报, 2015, 36(8): 1574-1579.
- [8] 李佳乐, 向军, 叶芹, 等. $\text{Ni}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Zn}_{0.4}\text{Fe}_2\text{O}_4/\text{BaTiO}_3$ 纳米纤维双层吸波涂层的微波吸收特性研究[J]. 无机材料学报, 2015, 30(5): 479-486.
- [9] Kim, S.T. and Kim, S.S. (2016) Microwave Absorbance of Ni-Fe Thin Films on Hollow Ceramic Microspheres Dispersed in a Rubber Matrix. *Journal of Alloys and Compounds*, **687**, 22-27.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.042>
- [10] Namitha, L.K., Chameswary, J., Ananthakumar, S., *et al.* (2013) Effect of Micro- and Nano-Fillers on the Properties of Silicone Rubber-Alumina Flexible Microwave Substrate. *Ceramics International*, **39**, 7077-7087.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.02.047>