

一种基于多层电阻膜的超宽带超材料吸波体

林宝勤, 魏 伟, 达新宇, 杜思深, 李 伟

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077)

摘 要: 本文提出了一种基于多层电阻膜的超宽带超材料吸波体的设计模型. 该吸波体的结构单元由一种环形电阻膜片在含导体底面的平面分层介质基板上多层叠加而成, 各层电阻膜片的外形相同, 但表面阻值不同. 一件四层吸波体的仿真分析结果表明: 该吸波体对 6.8GHz ~ 59.6GHz 频段之间的垂直入射波吸波率均大于 90%; 同时对入射角为 45 度的 TE 和 TM 斜入射波仍能保持超宽带吸波, 具有极化不敏感和宽入射角特性. 另外, 对不同层次吸波体的分析表明: 随着电阻膜片层次的增加, 其吸波效果更好, 吸波频带变宽, 带内吸波效果更稳定.

关键词: 吸波体; 超材料; 超宽带; 表面电阻; 电阻膜

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)03-0607-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.029

A Novel Ultra-Broad-Band Metamaterial Absorber Based on Multilayer Resistance Films

LIN Bao-qin, WEI Wei, DA Xin-yu, DU Si-shen, LI Wei

(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: A novel design approach for creating an ultra-broad-band metamaterial absorber based on multilayer resistance films is provided in this paper. One unit cell of the absorber is composed of multilayer resistance films nipped between layered medium with a metal backboard. The resistance films at different layers are isomorphic, while their surface resistances are unequal. Simulated results of one four-layer absorber shown that the absorber has high absorptivity of more than 90% from 6.9 to 59.6 GHz at vertical incidence, it is polarization-insensitive and angle-wide and can keep strong absorption at TE or TM incidence when the oblique angle of incidence is 45°. In addition, the simulated results of several absorbers with different layer indicated that their absorption would be stronger along with the augment of their layers, and the absorption band is wider at the same time.

Key words: absorber; metamaterial; ultra - broad - band; surface resistance; resistance film

1 引言

超材料^[1] (Metamaterial) 是一种新型的周期性人工电磁结构, 其通过单元结构的设计及其周期布阵, 利用单元结构的电磁响应^[2,3], 得到一种有天然材料所不具备的一系列奇异的电磁特性, 如负折射^[4,5]、“完美”成像^[6]和“隐身衣”^[7]等. 根据等效媒质理论^[8], 超材料的电磁特性可以用等效介电常数和等效磁导率来描述, 利用单元结构的电磁响应, 设计出具有不同等效介电常数和磁导率的超材料^[9]. 目前, 超材料已在无线电^[10]、微波^[11]、毫米波^[12]、太赫兹^[13]、中红外^[14]、近红外^[15]和近可见光^[16]等不同电磁频段均已得到实现. 在微波频段, 由于单元尺寸适当, 便于设计, 目前具更多实现方式, 已得到广泛的应用.

近年来基于超材料的吸波体设计引起了学术界的极大关注^[17~24]. 2008 年, Landy 等人基于电磁谐振设计

出“完美”超材料吸波体^[19]. 随后, 研究人员又设计出极化不敏感^[20,21]和宽入射角^[22~24]的超材料吸波体. 虽然上述超材料吸波体具有极强的吸波能力, 但其吸波频带较窄.

本文提出了一种基于多层电阻膜的超宽带超材料吸波体, 其结构单元由一种环形电阻膜片在含导体底面的平面分层介质基板上多层叠加而成, 各层环形电阻膜片外形相同, 但表面阻值不同. 通过对各层电阻膜片表面电阻的优化取值, 可实现超宽带吸波. 本文首先对一件四层结构的吸波体进行了优化设计, 仿真分析结果表明: 其在垂直入射下对 6.8GHz ~ 59.6GHz 之间的人射波吸波率均大于 90%; 同时具有极化不敏感和宽入射角特性, 对不同方向的 TE 和 TM 入射波均能保持较好的吸波效果. 另外, 对不同层次吸波体的分析表明: 随着电阻膜层次的增加, 其吸波特性更好, 吸波频带变宽, 带内吸波效果更稳定, 一件五层吸波体对频率为 5.6GHz

~63.0GHz之间的入射波均能实现有效吸收。

2 结构设计

本文设计的超材料吸波体为一种周期性的平面分层结构,其结构单元由外形相同、表面电阻值不同的电阻膜片在含导体底面的分层介质基板上多层叠加而成。各层周期布阵的电阻膜片均可等效为一有效阻抗,其中包含有电阻分量和电抗分量,其结合含导体底面的介质基板,根据传输线等效模型,即可等效为一加阻的谐振电路,当电阻膜片表面电阻大小适当时,在谐振频点即可实现有效吸波。由于本文提出的吸波体选用了多层叠加的模式,虽然各层电阻膜片外形相同,但距导体底面的距离不同,由此可找到更多的谐振频点,实现超宽带吸波。

该吸波体中的各层外形相同的电阻膜片如图1(a)所示,在一单元中,电阻膜片由两个同心的方形环合成,外方形环与周期边界相联,相邻单元的外环联为一体,外方环的中心边长,即单元周期为 P ,边宽为 w_1 ;内方环的外边长为 l ,边宽为 w_2 。

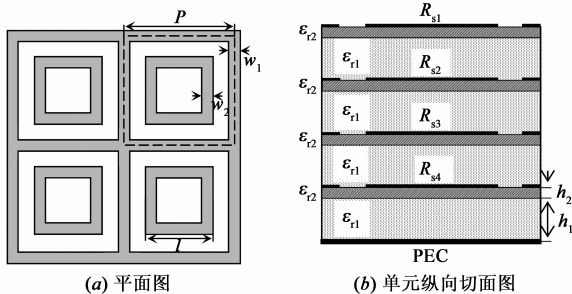


图1 超材料吸波体的结构示意图

该吸波体作为一种平面分层结构,一件四层结构的吸波体单元纵向切面如图1(b)中所示,其含有四层外形相同的电阻膜片,各层电阻膜片均附有两层介质衬底,其中底层为介质参数(ϵ_{r1})较低的泡沫层,厚度为 h_1 ;紧贴电阻膜片的介质层参数为 ϵ_{r2} ,厚度为 h_2 。各层电阻膜片下的介质层厚度及其参数均相同。

关于吸波体结构中的电阻膜片,现实中通常可将碳黑、水以及乳液按一定比例配成乳状液体,采用喷涂工艺制备得到,其厚度为几微米至几十微米不等。在对该吸波体的仿真分析过程中,可将其设为一种厚度很薄,电导率为 σ 的均匀导电媒质的三维立体结构;另外,为简化计算,可忽略电阻膜片的厚度,将其设为一表面电阻为 R_s 的二维平面结构。由于在电阻膜片的厚度很薄时,可完全忽略集肤效应,视电流密度在电阻膜片中不同深度处分布均匀,由此可简单地推导出其电导率 σ 与表面电阻 R_s 之间的关系式为: $R_s = 1/\sigma h$ 。当单元结构确定以后,我们先后将电阻膜片取为具有一

定电导率的三维立体结构和具有相应表面电阻的二维平面结构进行了分析,对多件吸波体的分析结果表明,两种模式所得分析结果基本上完全相同。

3 分析结果

我们运用电磁仿真软件(High Frequency Structure Simulator, HFSS)对不同结构层及尺寸的吸波体进行了有效分析。HFSS是Ansoft公司推出的一种基于有限元法的三维电磁仿真软件,其是世界上第一个商业化的三维结构电磁场仿真软件,业界公认的三维电磁场设计和分析的工业标准。HFSS软件中设有周期边界条件以及Floquet端口,其为分析周期性电磁结构的一种简明有效的方法。对于现所分析的吸波体,我们将其视为无限大的周期性平面结构,利用周期边界框出其中一个结构单元作为分析对象,利用Floquet端口引入任意方向的TE、TM入射波,求取其反射系数。

图1(b)中给出的含四层电阻膜片的吸波体单元,其结构参数现选定为: $P = 3.75\text{mm}$, $l = 2.7\text{mm}$, $w_1 = w_2 = 0.3\text{mm}$; $\epsilon_{r1} = 1.07$, $h_1 = 1.2\text{mm}$, $\epsilon_{r2} = 2.65$, $h_2 = 0.3\text{mm}$; 单层结构的厚度为 1.5mm , 四层吸波体总体厚度为 $h = 6.0\text{mm}$ 。电阻膜片均设为二维平面结构,经优化选择,四层电阻膜片的表面电阻分别取值为 $R_{s1} = 240.0\ \Omega/\text{square}$, $R_{s2} = 120.0\ \Omega/\text{square}$, $R_{s3} = 80.0\ \Omega/\text{square}$, $R_{s4} = 40.0\ \Omega/\text{square}$ 。另外,为考虑各层电阻膜片厚度的影响,同时将其设为一厚度为 0.05mm 的三维立体结构进行了分析,四层电阻膜片相应的电导率 σ 分别为83、166、250和500Siemens/m。该吸波体在垂直入射下求得的反射系数值由如图2所示。

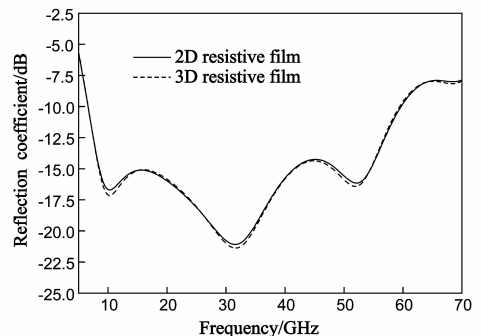


图2 超材料吸波体在垂直入射下的反射系数值

图2中数据表明:该吸波体的吸波效果好,吸波频带超宽;在垂直入射下,其反射系数为 -10dB 以下、吸波率大于90%的第一吸波频带位置为 $6.8\text{GHz} \sim 59.6\text{GHz}$,频段覆盖系数达8.76:1,相对带宽为159.0%; -15dB 以下的吸波频带位置为 $8.6\text{GHz} \sim 41.3\text{GHz}$;另外,将电阻膜片先后取为二维平面结构以及厚度为 0.05mm 的三维立体结构时,所得出的反射系数基本上

完全相同.

为考虑各个单元结构参数对该吸波体吸波性能的影响,我们先后将其横向扩大,纵向压低分别进行了分析,其分析结果如图 3 中所示.横向扩大时,扩大系数为 1.33,高度不变,单元周期 $P = 5.0\text{mm}$, $w_1 = w_2 = 0.4\text{mm}$,此时反射系数变化不大;纵向压低时,系数为 0.67,周期不变,总体厚度为 $h = 4.0\text{mm}$,此时,其吸波频带略有上升.

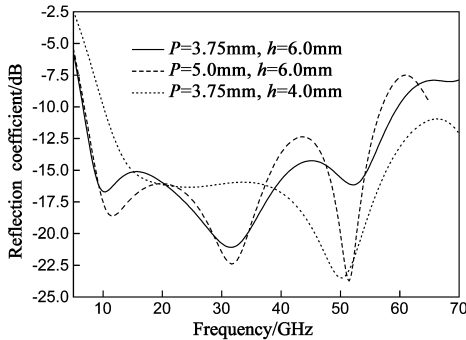


图 3 不同单元结构大小的超材料吸波体的反射系数值

另外,关于该吸波体在斜入射下的吸波性能,其在不入射角的 TE、TM 波入射下的分析结果如图 4 中所示,图中数据表明:该吸波体具有极化不敏感和宽入射角特性,对入射角为 45° 的 TE 和 TM 波均能保持超宽带吸波.

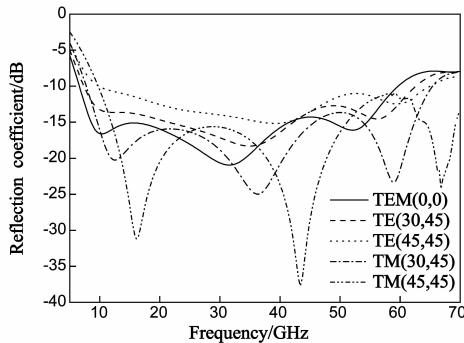


图 4 不同入射角下超材料吸波体的反射系数值

上述分析的吸波体为一四层结构,各层结构的结构参数相同,只是电阻膜的表面电阻值不同.现在保持单层的结构参数不变,先后将吸波体设为两层至五层进行了分析.当取为两层时,由上至下各层电阻膜片表面电阻值分别为 $140, 65.0 \Omega/\text{square}$;三层时, $200, 120, 60.0 \Omega/\text{square}$;五层时, $360, 260, 140, 80, 60.0 \Omega/\text{square}$.不同层次吸波体在垂直入射下的分析结果如图 5 所示,图中给出的反射系数表明:当取为两层时,仍能保持宽频带吸波,只是吸波频带位置有所上升,吸波率大于 90% 的吸波频带为 $12.7\text{GHz} \sim 65.6\text{GHz}$;取为三层时,吸波频带要低,为 $9.1\text{GHz} \sim 53.6\text{GHz}$;取为五层时,吸波效

果更好,吸波频带更宽,为 $5.6\text{GHz} \sim 63.0\text{GHz}$,带内吸波效果要稳定, -15dB 以下的吸波频带位置为 $6.7\text{GHz} \sim 46.6\text{GHz}$.

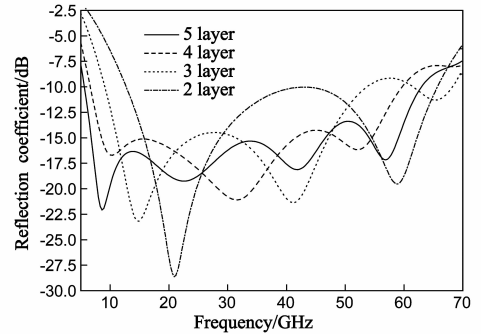


图 5 不同层次的超材料吸波体的反射系数值

最后,我们就上述五层吸波体在斜入射下的吸波效果进行了分析,其分析结果如图 6 所示,图中可以看出,由于吸波体总体结构的增厚,其吸波频带要宽而且要低,在入射角为 45° 的 TM 波入射下, -15dB 以下的吸波频带为 $9.8\text{GHz} \sim 61.7\text{GHz}$.

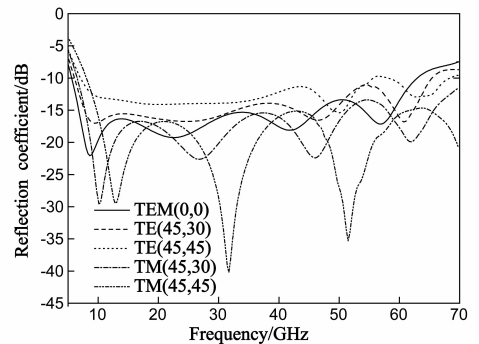


图 6 五层超材料吸波体在斜入射下的反射系数值

4 结论

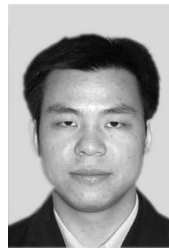
本文基于多层电阻膜片设计了一种超宽带的超材料吸波体.该吸波体结构单元由一种环形电阻膜片在含导体底面的分层介质基板上多层叠加而成,各层电阻膜片形状相同,表面阻值不同.一件四层吸波体的仿真分析结果表明:该吸波体在垂直入射下吸波率大于 90% 的吸波频带位置为 $6.8\text{GHz} \sim 59.6\text{GHz}$;同时具有极化不敏感和宽入射角特性,对入射角为 45° 的 TE 和 TM 波仍能实现超宽带吸波.另外,对不同层次的多件吸波体的分析表明:随电阻膜片层次的增加,其吸波效果更好,吸波频带变宽,带内吸波效果更稳定.一件五层吸波体在入射角为 45° 的 TM 波入射下, -15dB 以下的吸波频带仍可至 $9.8\text{GHz} \sim 61.7\text{GHz}$.

参考文献

[1] C Caloz, T Itoh. Electromagnetic Metamaterials: Transmission

- Line Theory and Microwave Applications [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2006. 2 - 3.
- [2] J B Pendry, A J Holden, W J Stewart, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Physical Review Letter, 1996, 76(25): 4773 - 4776.
- [3] J B Pendry, A J Holden, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11): 2075 - 2084.
- [4] V G Veselago. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509 - 514.
- [5] R A Shelby, D R Smith, S Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77 - 79.
- [6] D R Smith, D Schurig, et al. Limitations on sub diffraction imaging with a negative refractive index slab [J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(10): 1506 - 1508.
- [7] D Schurig, J J Mock, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. Science, 2006, 314(5801): 977 - 980.
- [8] D R Smith, J B Pendry. Homogenization of metamaterials by field averaging [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2006, 23(3): 391 - 407.
- [9] X D Chen, T M Grzegorzczak, B I Wu, et al. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials [J]. Physical Review E, 2004, 70(1): 016608.
- [10] M C Wiltshire, J B Pendry, I R Young, et al. Microstructured magnetic materials for RF flux guides in magnetic resonance imaging [J]. Science, 2001, 291(5505): 849.
- [11] D R Smith, W J Padilla, D C Vier, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184 - 4187.
- [12] M Gokkavas, K Guven, I Bulu, et al. Experimental demonstration of a left-handed metamaterial operating at 100GHz [J]. Physical Review B, 2006, 73(19): 193103-1 - 193103-4.
- [13] T J Yen, W J Padilla, N Fang, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. Science, 2004, 303(5663): 1494 - 1496.
- [14] S Linden, C Enkrich, M Wegener, et al. Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz [J]. Science, 2004, 306(5700): 1351 - 1353.
- [15] S Zhang, W Fan, N C Panoiu, et al. Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials [J]. Physical Review Letters, 2005, 95(13): 137404-1 - 137404-4.
- [16] G Dolling, M Wegener, C M Soukoulis, et al. Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength [J]. Optics Letters, 2007, 32(1): 53 - 55.
- [17] S Enoch, G Tayeb, P Sabouroux. A metamaterial for directive emission [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(21): 213902-1 - 213902-4.
- [18] Q Y Wen, H W Zhang, Y S Xie, Q H Yang, Y L Liu. Dual band terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization [J]. Physical Review Letters, 2009, 95(24): 241111.
- [19] N I Landy, S Sajuyigbe, J J Mock. Perfect metamaterial absorber [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [20] N I Landy, C M Bingham, et al. Design theory and measurement of a polarization insensitive absorber for terahertz imaging [J]. Physical Review B, 2009, 79(12): 125104.
- [21] B Zhu, Z Wang, C Huang. Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2010, 101(2): 231 - 239.
- [22] A N Lagarkov, V N Kisel and V N Semenenko. Wide-angle absorption by the use of a metamaterial plate [J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2008, 1(1): 35 - 44.
- [23] H Tao, C M Bingham, A Strikwerda, D Pilon. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization [J]. Physical Review B, 2008, 78(24): 241103.
- [24] Y Avitzour, Y A Urzhumov, G Shvets. Wide angle infrared absorber based on a negative-index plasmonic metamaterial [J]. Physical Review B, 2009, 79(04): 045131.

作者简介



林宝勤 男. 1976年10月出生于湖南醴陵, 2006年获国防科技大学电子科学与技术专业博士学位, 现为空军工程大学信息与导航学院讲师, 主要研究领域为人工电磁材料、雷达隐身技术等.

E-mail: aflbq@sina.com

魏伟 男. 1963年6月出生于陕西西安, 现为空军工程大学信息与导航学院副教授, 主要研究领域为电磁散射及超宽带技术等.

E-mail: WEIWEI99297@YAHOO.COM.CN

达新宇 男. 1961年4月出生于陕西眉县, 现为空军工程大学信息与导航学院教授, 博士生导师. 主要研究方向为无线通信与电磁防护技术.

E-mail: kgkxy2008@163.com

杜思深 男. 1962年8月出生于陕西礼泉, 西安电子科技大学毕业, 空军工程大学信息与导航学院副教授, 主要研究领域为雷电及电磁武器防护等.

E-mail: 949327701@qq.com

李伟 男. 1978年11月出生于山东济宁, 2006年获国防科技大学信息与通信系统专业博士学位, 现为空军工程大学信息与导航学院副教授. 主要研究方向为新体制雷达和综合电子战.