

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0405

一种宽频带超材料吸波体的设计及其特性

师小强, 弓巧侠, 段智勇, 马凤英, 朱志鲜

(郑州大学 物理工程学院, 郑州 450001)

摘要: 为了获得吸收率高、吸波带宽宽的超材料, 设计了一种谐振超材料吸波体. 该吸波体由多个开口圆环组成, 采用商业软件 CST Studio Suite 2009 频域求解器计算了其在 25~35 GHz 波段内的 S 参量, 并计算了其吸波率 $A(\omega)$, 在 28.4 GHz 处吸收率达到 86%, 带宽达到 3.5 GHz. 利用不同吸波频段的叠加效应, 设计了一种谐振超材料吸波组合体, 计算了在 25~35 GHz 波段的 S 参量, 在 29.7 GHz 处吸波率达 99.9%, 吸波带宽达到 3.1 GHz, 吸收率明显增加. 将 GHz 波段的结构缩小 1 000 倍, 在 THz 波段同样可以达到高吸收, 说明超材料吸波体可以通过对结构尺寸调节改变吸收波段. 同时, 对其阵列进行仿真计算, 发现不同的排列方式仿真结果不同. 由于各个谐振环之间的相互作用对吸收效果影响较大, 吸收率减小. 该吸波材料由金属组成, 能灵活地对介电常量和磁导率进行调节, 从而实现高吸收.

关键词: 吸波体; 超材料; 电谐振环; 吸收率

中图分类号: O441

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0405-4

Design and Characteristics of a Broad-band Metamaterial Absorber

SHI Xiao-qiang, GONG Qiao-xia, DUAN Zhi-yong, MA Feng-ying, ZHU Zhi-xian

(School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 45001, China)

Abstract: To obtain the high absorptivity and broad bandwidth, a resonant metamaterial absorber composed of split rings is designed and investigated numerically by employing the frequency domain solver of the commercial software (CST Studio Suite 2009). The calculated absorption spectrum in 25~35 GHz range shows that a very high absorption of 86% with a broad bandwidth of 3.5 GHz can be achieved. Moreover, its absorbing performances in THz frequency are investigated. The complex absorbing structure by combining the elementary absorber based on the superposition effect of absorption at different frequencies is also discussed. It is shown that the complex metamaterial absorber can reach a nearly perfect absorption of 99.9%, with the bandwidth of 3.1 GHz. To minify 1 000 times of the absorber size in GHz frequency, the perfect absorber can be achieved in the THz frequency, thus providing a means to dynamically control the absorbing band. Obviously, the absorption is increased largely when compared to that of the elementary absorbers. Meanwhile, different simulation results of diverse arrays can be calculated. Due to the interaction of the ring resonators, the absorption effect can be influenced and absorption rate decreased. This metamaterial consists entirely of metal structure which allows for maximization of the absorption through independent controlling the electrical permittivity and magnetic permeability.

Key words: Absorber; Metamaterial; Electric ring resonator; Absorptivity

0 引言

超材料(Metamaterial)通常是指人工微结构复

合材料,具有天然材料所不具备的超常物理性质,其行为主要取决于其中的人工设计结构^[1].随着电子技术的进步和信息社会的发展,电磁辐射干扰及危

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 51175479, 60907046, 10974183)和河南省教育厅科学技术研究重点项目(No. 1313140395)资助
第一作者:师小强(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为新型电磁超材料吸波体设计及特性. Email: shixiaoqiang888666@126.com
导师(通讯作者):弓巧侠(1977-),女,讲师,博士,主要研究方向为新型电磁材料设计及器件. Email: gqx1205@zzu.edu.cn
收稿日期:2012-11-01;录用日期:2013-01-07

害问题已经成为国际性的研究热点问题. 恶化的电磁环境不仅对人们日益依赖的通讯、计算机及各种电子系统造成干扰影响, 也会对人们的健康带来危害, 因此, 电磁辐射防护材料尤其是电磁波吸收材料在电子工业、船舶、航天、军事等很多领域发挥着越来越重的作用^[2-3]. 由于超材料表现出非常奇特的电磁效应现象而成为物理学和材料学等领域研究的热点^[4-5], 在微波、太赫兹和光学方面具有良好的应用前景^[6].

要实现良好的吸波需要具备两个条件: 1) 入射的电磁波要尽可能地进入吸波材料而不被反射; 2) 材料要能将电磁波损耗吸收掉^[7]. 从理论上讲, 通过对特殊结构模型的优化设计, 实现 ϵ 和 μ 的完美匹配, 使吸波体与自由空间达到良好的阻抗匹配, 以降低电磁波的反射; 另外激励 ϵ 和 μ 的谐振, 使电磁波的透射很低, 这样就能实现对电磁波的高吸收^[8].

已经实现的超材料吸波体最早由 Landy 在 2008 年提出, 由单个电谐振环 (Electric Ring Resonator, ERR) 和短导线组合而成的结构, 其提出的超材料强吸波体在窄范围内能对入射电磁波达到近 100% 吸收^[9]; 程永志等设计的十字架圆环在 10.7 GHz 处吸收率达到 96%, 实验测得吸收带宽为 1.1 GHz^[10-11]; J Lee 等设计的吸波体在 9.75 和 10.3 GHz 处吸收率达到 98%, 带宽为 1 GHz^[12]; Li long 等设计的单个 TARs 结构, 在 6.6 GHz 和 7.9 GHz 处吸收率都达到 99%, 带宽分别为 0.25 GHz 和 0.3 GHz^[13]. 随着信息化时代的到来, 对吸波材料的需求有增无减, 对吸波材料的要求也越来越高, 厚度薄、质量轻、吸收频带宽, 吸收能力强 (薄、轻、宽、强) 的吸波材料成为发展的目标^[14-15].

现在的吸波材料面临的主要问题就是存在吸波频段比较窄, 本文设计了一种超材料吸波体, 在 28.4 GHz 处吸收率为 86%, 带宽达到 3.5 GHz; 另外, 利用不同吸波频段的叠加效应, 设计了一种谐振超材料吸波组合体, 在 29.7 GHz 处吸收率达 99.9%, 吸波带宽为 3.1 GHz, 并且拓展了其在 THz 频率范围内的性能, 能在相对宽频带范围内对垂直入射电磁波实现高吸收.

1 模型设计

实验采用的谐振单元由开口圆环 (图 1(a))、同心圆环 (图 1(b)) 与金属膜 (图 1(c)) 组成的结构如图 1(d). 经过大量的实验仿真和结构参数的优化设计, 得到理想的结构参量, 开口圆环的尺寸参量为半径 $r = 1.2$ mm, $e = 0.8$ mm, $w = 0.2$ mm, $d = 0.4$ mm. 同心圆环的尺寸参量为外环半径 $r_1 =$

2.0 mm, 半径 $r_2 = 1.6$ mm, 半径 $r_3 = 1.4$ mm, 半径 $r_4 = 1$ mm, 圆环的宽度 $t = r_1 - r_2$ 两个环中间间隔均为 0.2 mm, $w = 0.2$ mm, $d = 0.4$ mm, 金属膜取 12 mm × 8.4 mm 的长方形结构, 开口圆环、同心圆环与金属膜排列在高 $H = 12$ mm、宽 $L = 8.4$ mm、厚度为 0.8 mm 的 Al_2O_3 板 ($\epsilon = 2.28$, $\tan \delta = 0.04$) 的正反面, 电谐振环和金属膜的厚度均为 0.02 mm, 材料采用银.

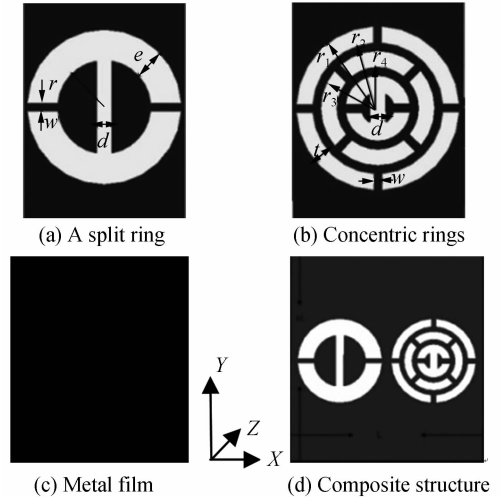


图 1 吸波体单元结构

Fig. 1 The schematic of absorber unit

2 结果分析

实验仿真采用 CST Microwave Studio 软件. 在 25~35 GHz 频段内, 对图 1(a)、(b)、(d) 单元结构模型进行仿真模拟. 在本文的模拟中, 仿真环境的背景材料设置为 Normal, 相当于单元结构置于空气之中, 电磁波沿 z 轴方向传播, 电场沿 x 轴方向, 磁场沿 y 轴方向. yz 平面设置为完美磁边界 (PMC), xz 平面设置为完美电边界 (PEC), 沿 z 轴方向设置为开放边界. 计算采用频域求解器进行仿真实验, 获得稳定的 S 参量曲线, 分别如图 2 中曲线 1、2、3 所示, S_{11} 曲线表示反射参量, S_{21} 曲线表示透射参量.

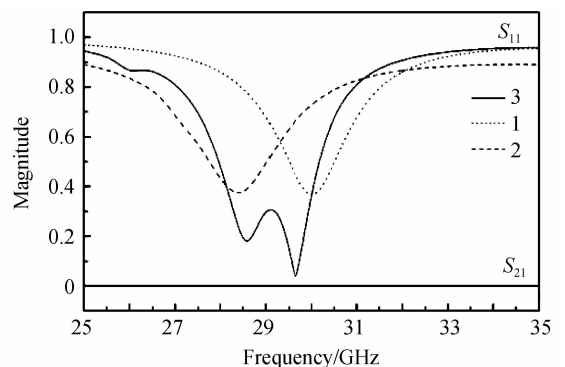


图 2 单元吸波体的散射参量

Fig. 2 Scattering parameters of a lattice of absorber

图 2 中曲线 1 表示开口圆环 (a) 的模拟仿真散

射结果,曲线 2 表示同心圆环(b)的模拟仿真散射结果,曲线 3 表示图 1(d)的模拟仿真散射结果.通过对比发现组合结构的吸波体吸收率变大,带宽基本上等于曲线 1、2 带宽的叠加之和.通过对曲线 3 提取仿真数据,在 29.7 GHz 处出现最小波谷,峰值达到最小值 $S_{11}=0.03$,反射率 $r(\omega)=|S_{11}|^2$ 为 0.09%,表示吸波体与自由空间实现了良好的匹配,绝大部分的电磁波进入了吸波体内部,而透射率 $t(\omega)=|S_{21}|^2$ 在全频段范围内可以认为是零,表示磁谐振和电谐振达到了同步.根据吸收率 $A(\omega)=1-|S_{11}|^2-|S_{21}|^2$ 计算可知在 29.7 GHz 处达到吸收峰,吸收率为 99.91%,实现完美吸收.吸收率结果见图 3 所示.图 3 中曲线表示各吸波体的吸收率 $A(\omega)$,在此只关注曲线 3,通过计算得到带宽为 3.1 GHz.

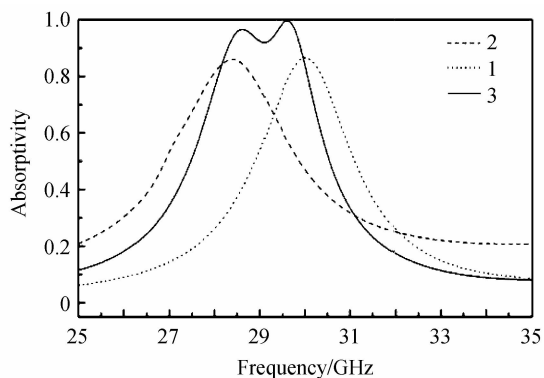


图 3 单元吸波体的吸收率

Fig. 3 The absorptivity of a lattice of absorber

超材料吸波体的响应频率取决于其几何结构,将图 1(d)对应的结构单元不变,将尺寸同比例缩小 1 000 倍,在 THz 频段同样可获得完美吸收,如图 4 所示,在 26.86 THz,吸收率为 96%,带宽为 4.8 THz.

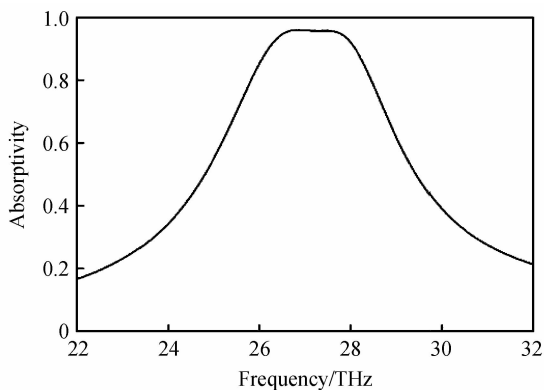


图 4 单元吸波体结构缩小后的吸收率

Fig. 4 The absorptivity of the unit absorber structure reduced

电磁波在吸波材料内的损耗主要是由基底金属介质的欧姆损耗和大电场作用下的电介质损耗引起的.本文通过在 CST 软件中设置监视器分析了能量的损耗,并分析了损耗来源,图 5 是吸波体的能量吸收情况,图 5(a)为圆环结构的能量损耗,图 5(b)为

电介质层的能量损耗,图 5(c)为金属膜的能量损耗.通过图 5 发现,(a)图圆环结构的损耗较小,(b)图电介质的损耗比较明显,(c)图金属层的损耗最大,吸收了大量的电磁波,金属膜的四个部位有明显的吸收,是由于金属圆环的面积较小,主要的吸收在电介质层和金属膜层.另外,在基板更换为 FR4 材料的情况下,通过仿真发现,吸波效率有很明显的下降,吸波峰的位置偏移且峰值变小,对于不同的基底材料,其谐振频率不同,所以我们可以根据不同的需要选择不同的基底材料,这也充分说明电介质损耗是电磁波吸收的重要来源.

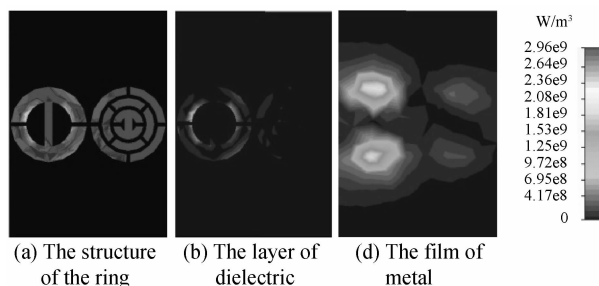


图 5 能量损耗示意图

Fig. 5 The schematic of the loss of energy

在设计吸波材料的时候不仅要尽可能地提高损耗,而且还要考虑另一个关键因素,即入射波的阻抗匹配问题,介质表面对电磁波的反射系数尽可能的小,电磁波入射到介质表面能量最大限度地透入介质而被吸收.因为电磁超材料的能对电谐振和磁谐振容易调控的特点,所以通过合理匹配磁导率和介电常量实现对入射电磁波的高吸收.通过调节材料厚度,结构开口大小等可以对磁谐振和电谐振进行微调,达到优化阻抗匹配,提高吸收能力的目的.

理论上,介电常量和磁导率是表征吸波体电磁特性的本征参量,从介质对电磁波吸收的角度考虑,在实部足够大的基础上虚部越大越好.图 6 为圆环宽度 t 分别为 0.3 mm、0.4 mm、0.5 mm 吸波体的

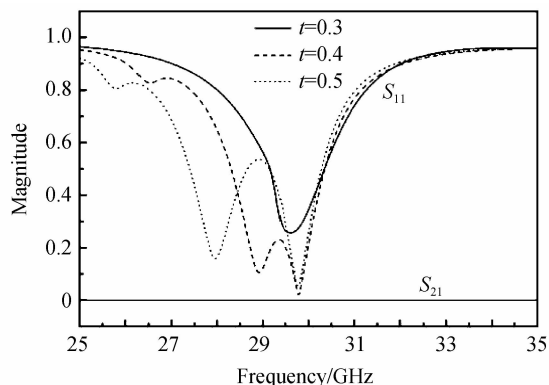


图 6 仿真提取吸波体 $t=0.3, 0.4, 0.5$ 的反射参量 S_{11} 和透射参量 S_{21}

Fig. 6 Reflectance S_{11} and transmission S_{21} of the simulated scattering parameters for absorber at $t=0.3, 0.4, 0.5$

反射参量和透射参量.随着 t 从 0.3 mm 增大到 0.5 mm,透射参量没有变化,反射参量向低频方向移动,吸波带也随 t 的增加而向低频方向移动.在 t 从 0.3 mm 到 0.5 mm 的变化过程中,超材料的吸收性能先增大后减小,向两边成减小趋势.可见折射参量的虚部受到影响,阻抗也随着 t 的变化而变化,在 0.4 mm 处阻抗匹配最好,反射最小.通过改变圆环宽度可以影响阻抗匹配,达到优化吸波性能的目的.

对吸波体阵列进行仿真分析,采取 4 个圆谐振环叠加组成的阵列,对其阵列分别进行仿真分析,对于不同的排列方式仿真结果也不相同,结果如图 7 所示.曲线 4 对应的吸波体在 29.1 GHz 处吸收率

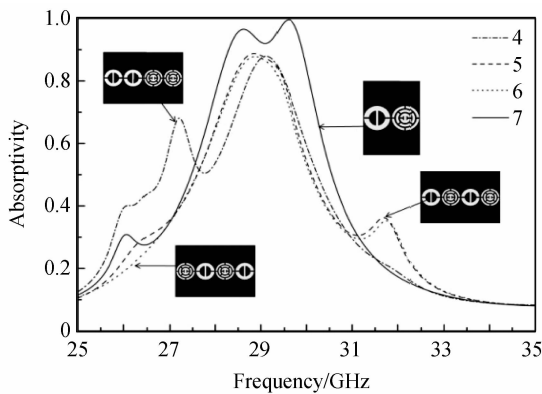


图 7 吸波体阵列的吸收率

Fig. 7 The absorptivity of the array of the absorber

为 87.9%,曲线 5 的在 28.8 GHz 处吸收率为 88.8%,曲线 6 的在 28.9 处吸收率为 87.8%.由图可以看出,2 个圆环结构排列的仿真结果比 4 个圆环结构排列的结果吸收率高,带宽也宽,说明电磁波垂直入射在两个圆环结构时,吸波体产生共振,相互之间影响较小,磁波得到了最大程度的吸收,当电磁波垂直入射在四个结构时,各圆环之间产生共振并相互影响,使共振减弱,导致吸收率下降,带宽变小.

3 结论

基于不同频段的叠加效应,本文设计了一种性能优良的宽频带近乎完美吸收的超材料吸波体.通过对该结构进行模拟计算,发现在 29.7 GHz 处可以达到 99.9%的,近乎完美的光学吸收性能,而且其带宽为 3.1 GHz.另外,通过缩小结构单元尺寸,该结构在 THz 波段也有非常好的吸收性能,在 26.86 THz 处的吸收率达到 96%,带宽为 4.8 THz.因此,基于该结构的超材料吸波体在微波暗室、天线、电磁污染治理等方面具有很大的应用前景.并且通过将不同吸收波带的亚波长结构单元进行组合,拓宽吸收波带,克服其窄带吸收的缺点,为超材料吸波体的理论研究及各种功能器件设计奠定基础.

(本文带宽指最大吸收峰值的一半的频率范围).

参考文献

- [1] LIU Yu, LU Jun, SONG Kun, *et al.* Preparation and optical properties of visible metamaterials on flexible film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1176-1180.
刘宇, 吕军, 宋坤, 等. 光波段柔性基超材料制备及光学性质[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1176-1180.
- [2] ZHAO Xiao-liang, CAO Yan-gui, ZHAO Ran, *et al.* The optimization design of electromagnetic parameters of high-performance dielectric type absorption in S band[J]. *Development and Application of Materials*, 2010, **25**(4): 44-47.
赵小亮, 曹燕归, 赵冉, 等. S 带高性能介电吸波体电磁参数的优化设计[J]. *材料开发与应用*, 2010, **25**(4): 44-47.
- [3] ADAM J D, DAVIS L E, DIONNE G F, *et al.* Ferrite devices and materials[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 721-737.
- [4] SMOLYANINOV I I, HUNG Y J, DAVIS C C. Magnifying superlens in the visible frequency range[J]. *Science*, 2007, **315**(5819): 1699-1701.
- [5] HU Chang-shou. 可调谐超材料吸波体的数值仿真研究[D]. 湖北: 湖北工业大学, 2011: 1-43.
- [6] LI Xuan-lei, LIU Chang-jun. A novel kind of metamaterial based on dielectric resonator[J]. *Information And Electronic Engineering*, 2010, **8**(4): 407-410.
李悬雷, 刘长军. 一种基于介质谐振器的新型电磁超材料[J]. *信息与电子工程*, 2010, **8**(4): 407-410.
- [7] LIU Ling-yun, HU Chang-shou, GUO Biao. Research on absorbing properties of metamaterial absorber[J]. *Materials Review*, 2010, **24**(5): 1-3.
刘凌云, 胡长寿, 郭彪. 超材料吸波体吸波特性研究[J]. *材料导报*, 2010, **24**(5): 1-3.
- [8] HU Chang-shou, LIU Ling-yun, PEI Jia-zheng. Study of a polarization insensitive metamaterial absorber[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, **8**(4): 83-86.
胡长寿, 刘凌云, 裴嘉政. 对电磁波极化不敏感超材料吸波体的研究[J]. *光学与光电技术*, 2010, **8**(4): 83-86.
- [9] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, *et al.* Perfect Metamaterial Absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(20): 207402-207405.
- [10] CHENG Yong-zhi, YANG He-lin, CHENG Zheng-ze, *et al.* A planar polarization-insensitive metamaterial absorber[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2011, **9**(1): 8-14.
- [11] CHENG Yong-zhi, YANG He-lin. Design, simulation and measurement of metamaterial absorber [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(3): 34906-34909.
- [12] LEE J, LIM S. Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance[J]. *Electronics Letters*, 2011, **47**(1): 1-2.
- [13] LI Long, YANG Yang, LIANG Chang-hong. A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin meamaterial absorber with three resonant modes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **110**(5): 63702-63706.
- [14] WAN Jian-bo, XIAO Hong-liang, CHEN Gui-bo, *et al.* Influence of ring FSS on improving characteristics of rader absorbing materials [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(3): 296-300.
汪剑波, 肖洪亮, 陈桂波. 圆环单元 FSS 对改善吸波体雷达吸波特性的影响[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(3): 296-300.
- [15] GAO Yong-fang, SHI Jia-ming. Design and research on absorbing properties of a kind of double-layer absorbing materials[J]. *Surface Technology*, 2010, **39**(2): 93-95.
高永芳, 时家明. 一种双层吸波材料的制备与吸波特性研究[J]. *表面技术*, 2010, **39**(2): 93-95.