

# 基于超材料的微波双波段吸收器\*

沈晓鹏<sup>1)2)</sup> 崔铁军<sup>1)†</sup> 叶建祥<sup>2)</sup>

1) (东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

2) (中国矿业大学物理系, 徐州 221116)

(2011年3月24日收到; 2011年4月27日收到修改稿)

基于闭合双环单元结构, 设计、仿真、测试了对偏振无依赖性的双波段超材料吸收器. 实验结果表明, 该设计在频率 4.06 GHz 和 6.66 GHz 存在两个显著吸收峰, 吸收率分别为 99.60% 和 95.83%, 并且在入射角达到 50° 时, 吸收率仍然保持在 83% 以上. 由于单元结构具有旋转对称性, 使得该吸收器对偏振不敏感, 能同时实现横电波和横磁波的双波段吸收. 吸收频率决定于闭合环大小, 调节闭合环尺寸能够灵活实现特定频率的吸收. 这些优点使我们的设计在多频谱成像、热辐射探测等应用中表现出较大的潜力.

**关键词:** 超材料, 吸收器

**PACS:** 81.05.Xj, 41.70.Jb

## 1 引言

完美吸收器广泛应用于微型测辐射热仪、光探测器、频谱成像等领域, 并可覆盖在物体表面完全吸收入射的电磁辐射用以隐身<sup>[1-4]</sup>. 基于超材料的吸收器由于能够实现对入射电磁波的完美吸收而引起科研人员的广泛关注<sup>[5-9]</sup>. 2008年, Landy 等首先提出了基于超材料的完美吸收器概念, 通过合理的设计和选择参数, 利用开口环、短截线和分隔层构成的电磁谐振器对入射电磁波的电磁分量产生耦合, 使入射到超材料表面的特定频率电磁波既不产生反射也不产生透射, 实现完美吸收<sup>[10]</sup>. Diem 等从理论和实验上展示了宽角度太赫兹波段吸收器, 垂直入射时吸收率达 99.7%, 入射角在 70° 时吸收率仍维持在 80% 以上<sup>[1]</sup>. Liu 等利用空间分布吸收能力不同的单元结构实现了红外波段的吸收成像, 首次展示了超材料用于高光谱成像的巨大潜力<sup>[2]</sup>. Hao 等设计了光波段的吸收器, 厚度仅为谐振波长的十五分之一, 实验上实现了 88% 的吸收率<sup>[11]</sup>. 目前多数吸收器对垂直入射的电磁波能达

到较高的吸收率, 但大都工作在单一波段, 对入射电磁波偏振模式敏感, 接收范围较小等, 限制了它们在光谱检测和相位成像等方面的广泛应用. 近来研究人员对超材料吸收器的研究从微波扩展到太赫兹波、红外和光波段, 进而追求更高的吸收率, 对入射偏振或入射角度不敏感, 以及宽频带, 多波段等. Tao 等利用尺寸不同的两个电谐振单元上下排列成一个复合单元结构, 较大单元在低频显示电容-电感谐振, 较小单元在高频体现偶极子谐振从而实现双吸收特性<sup>[12]</sup>. Wen 等则将两个电谐振单元左右排列, 在高低两个频率上利用电容-电感谐振实现双波段吸收<sup>[13]</sup>. 以上两种设计由于单元结构的非对称性, 对不同的偏振模式比较敏感, 随角度的增加吸收迅速降低. 我们利用方环嵌套的偶极子谐振单元组成紧凑型单元结构, 实现了微波段的双波段吸收, 在较大入射角情况下依然维持较高的吸收率. 我们采用的单元结构具有旋转对称性, 对任意偏振模式的电磁波都有很好的吸收特性. 理论和实验结果表明, 在入射电磁波的激励下, 每个方环单元都能维持独立的谐振特性, 复合结构的谐振

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60990320, 60990324, 60871016, 60901011)、中国矿业大学科技基金 (批准号: 2007A031) 和江苏省研究生创新基金 (批准号: CX09B\_045Z) 资助的课题.

† E-mail: tjcui@seu.edu.cn

是分立单元结构谐振的线性组合. 因此, 可以利用一个、两个、三个甚至更多个方环组合方便地实现单波段、双波段、三波段及更多波段的吸波器设计. 谐振频率反比于方环尺寸, 通过选用不同的外径尺寸实现特定的频率吸收, 体现出很大的灵活性.

## 2 吸收器设计

我们的设计结构如图 1 所示. 图 1(a), (b) 分别为吸收器的正面、侧面视图, 图 1(c) 为实物图片. 该吸收器由三层构成: 上层嵌套的闭合双环、底层的金属背板及间隔介质层. 闭合环及背板为金属铜, 电导率  $\sigma = 5.8 \times 10^7$  s/m, 厚度为  $t_1$ . 介质层为 FR4, 介电常数和损耗正切分别为  $\epsilon = 4.4$ ,  $\tan \delta = 0.02$ , 厚度为  $t_2$ . 单元结构周期为  $a$ , 内外环宽度分别为  $L_1$  和  $L_2$ , 线宽为  $w$ .

等效媒质理论成功地用于指导、表征、解释基于超材料的各种设计, 如负折射、超透镜、电磁隐身、吸收器等. 入射电磁波的电、

磁分量在超材料结构中产生电磁谐振, 等效介电常数  $\epsilon(\omega) = \epsilon_r(\omega) + i\epsilon_i(\omega)$ , 磁导率  $\mu(\omega) = \mu_r(\omega) + i\mu_i(\omega)$ . 通过合理的优化设计, 可以使得电磁波在单层超材料的入射表面处  $\epsilon(\omega) = \mu(\omega)$ , 阻抗  $z(\omega) = \sqrt{\frac{\mu(\omega)}{\epsilon(\omega)}} = 1$ , 与自由空间实现完美匹配, 反射率  $R(\omega) = \frac{z(\omega) - z_0}{z(\omega) + z_0} = 0$ . 出射面则相反, 使尽可能不匹配, 透射率  $T(\omega) \rightarrow 0$ . 这样, 通过同时降低透射率和反射率, 使得吸收率  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$  达到最大, 实现对电磁波的完美吸收. 由于采用金属底板, 简化了设计, 同时最大限度地保证了透射率  $T(\omega) = 0$ , 则吸收率  $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) = 1 - R(\omega)$ .

采用基于有限积分法的商用电磁仿真软件 CST Microwave Studio<sup>TM</sup> 对图 1(a) 中的双环结构进行优化, 得到的各项结构参数如下 (单位为 mm):  $a = 10$ ,  $L_1 = 9.5$ ,  $L_2 = 7.2$ ,  $t_1 = 0.018$ ,  $t_2 = 0.8$ ,  $w = 0.5$ . 仿真得到的吸收率和反射率如图 2. 在频率  $f_1 = 4.02$  GHz,  $f_2 = 6.59$  GHz 存在两个吸收峰 I, II, 吸收率分别为 99.91%, 97.85%.

采用基于有限积分法的商用电磁仿真软件 CST Microwave Studio<sup>TM</sup> 对图 1(a) 中的双环结构进行优化, 得到的各项结构参数如下 (单位为 mm):  $a = 10$ ,  $L_1 = 9.5$ ,  $L_2 = 7.2$ ,  $t_1 = 0.018$ ,  $t_2 = 0.8$ ,  $w = 0.5$ . 仿真得到的吸收率和反射率如图 2. 在频率  $f_1 = 4.02$  GHz,  $f_2 = 6.59$  GHz 存在两个吸收峰 I, II, 吸收率分别为 99.91%, 97.85%.

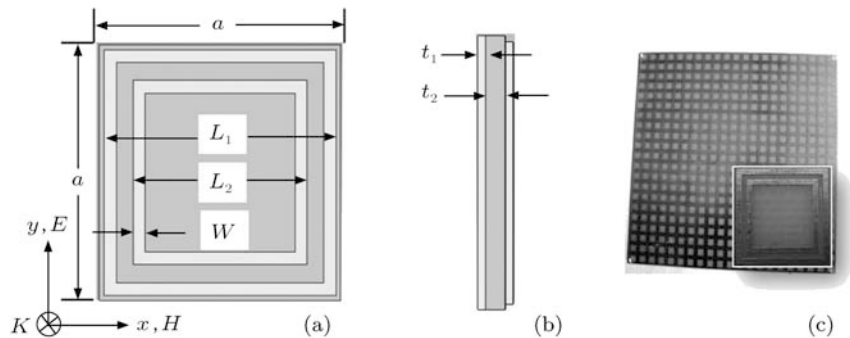


图 1 (a) 双波段吸收器结构示意图; (b) 侧视图; (c) 测试样品图片, (c) 中插图为放大的单元结构

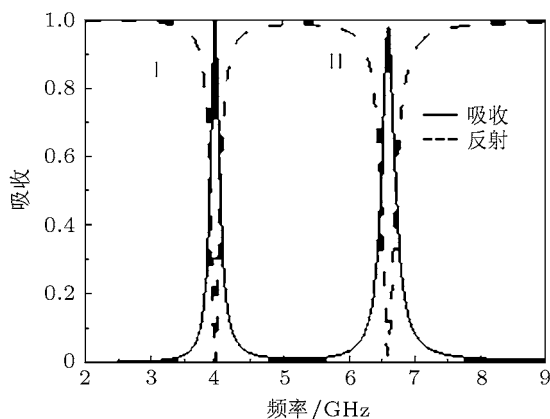


图 2 仿真的双波段吸收器的反射 (虚线) 和吸收 (实线) 曲线

## 3 实验及理论分析

仿真结果表明可以利用双环结构实现双波段完美吸收, 我们接着加工了样品并进行了测试. 加工的样品如图 1(c) 所示. 利用电路板刻蚀技术, 在面积为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的 FR4 介质板刻蚀了 400 个单元结构. 在微波暗室中, 利用安捷伦网络分析仪 (PNAE 8363), 两个宽带双脊喇叭作为发射源和接收器对样品进行了测试. 不同入射角度下测试得到样品的反射率, 与对应角度下入射到相同大小金属背板的反射率归一化, 得到不同角度下

吸收器的反射率, 利用公式  $A(\omega) = 1 - R(\omega)$  得到吸收器的吸收率. 入射角为  $5^\circ$  时的吸收率曲线如图 3(实线) 所示. 作为对比, 同时也绘出了仿真得到的吸收曲线(虚线). 可以看出, 实验与仿真结果符合得非常好.

实验结果表明, 在频率  $f_1 = 4.06 \text{ GHz}$ ,  $f_2 = 6.66 \text{ GHz}$  存在两个吸收峰 I, II, 对应的吸收率分别为 99.60%, 95.83%. 与仿真结果相比, 吸收峰 I 基本相同, 吸收峰 II 下降了 2.02%, 并伴随有 80 MHz 的蓝移. 这种差别主要源于两个原因: 一是加工误差和所用材料的真实介电常数与仿真参数之间有差别, 二是样品的有限大小和测量是在非垂直入射(两喇叭张角为  $10^\circ$ ) 条件下进行的有关.

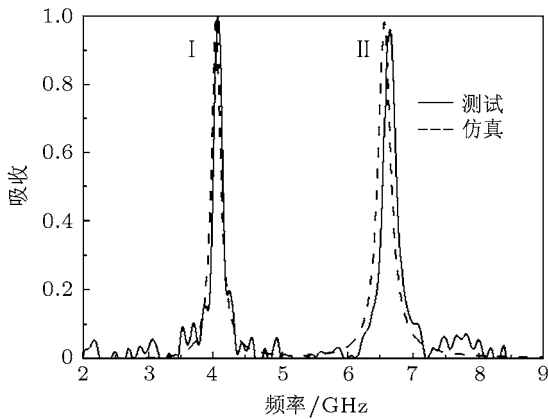


图3 测试(实线)和仿真(虚线)的样品吸收曲线

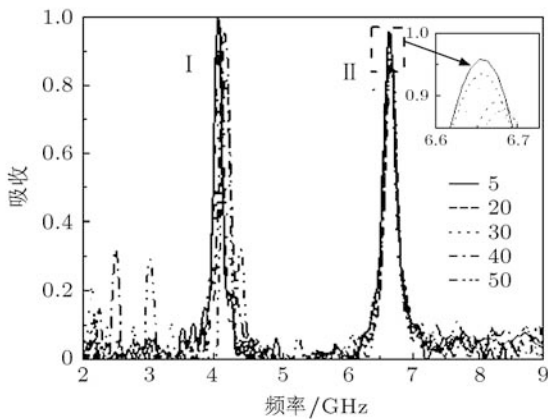


图4 不同入射角时的吸收率 插图为吸收峰 II 附近的吸收分布

我们进一步测试了斜入射条件下吸收率随入射角的变化情况, 如图 4 所示. 随入射角的增加, 吸收率缓慢减小. 在入射角达到  $50^\circ$  的情况下, 吸收峰 I 的吸收率为 83.38%, 吸收峰 II 的吸收率为 88.27%, 两个吸收峰依然保持较高的吸收率. 同

时, 图 4 中放大的吸收峰 II 显示, 吸收峰随入射角度的增加, 产生了 27 MHz 的蓝移. 吸收峰 I 随入射角增大, 同样也伴随着蓝移的产生, 但幅度较小, 约为 12 MHz. 实验结果表明, 该结构在大角度入射情况下, 依然保持较好的吸收特性.

为了明确双波段吸收产生的原因, 我们监测了在两个吸收频率的表面电流分布, 如图 5 所示. 图 5(a), (b) 为吸收峰 I 时上下表面的表面电流分布, 图 5(c), (d) 为吸收峰 II 时上下表面的表面电流分布. 表面电流分布表明, 入射电磁波的电场分量与上层金属环左右两侧的金属臂产生了电偶极子响应, 在外电场驱动下, 电荷沿竖直方向谐振, 电场主要集中在金属环上下两边. 电偶极子的谐振频率  $\omega_e \propto c/2L_i\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ <sup>[14]</sup>,  $c$  为真空中的光速,  $L_i (i = 1, 2)$  为对应闭合环的边长,  $\epsilon_{\text{eff}}$  为闭合环上下两臂附近的等效介电常数. 入射电磁场的磁场分量穿透上层金属, 在上下两层金属之间产生水平方向的磁谐振, 相应地在上层金属环的两侧边及对应的下金属底板上激发反向电流. 当电响应激发的等效介电常数  $\epsilon(\omega)$  和磁响应激发的等效磁导率  $\mu(\omega)$  接近时, 则可实现与自由空间的阻抗匹配, 从而实现入射电磁波的完美吸收. 由于谐振频率与环边长成反比, 边长越大, 谐振频率越小, 因此, 外环对应频率较低的吸收 I, 内环对应频率较高的吸收峰 II.

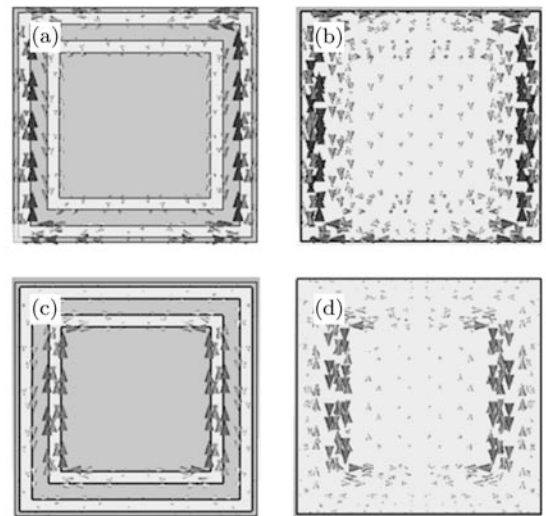


图5 吸收频率  $f_1 = 4.02 \text{ GHz}$  (a), (b) 和  $f_2 = 6.59 \text{ GHz}$  (c), (d) 时表面电流分布 (a), (c) 上层闭合环; (b), (d) 下层金属底板

我们进一步分析了保持内环半径不变条件下吸收峰随外环边长的变化规律, 如图 6. 可以看出,

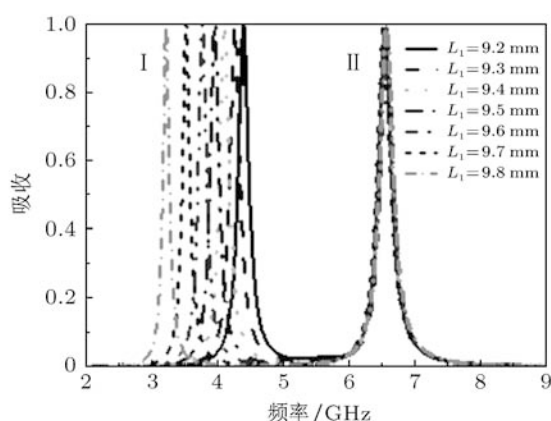


图6 内环  $L_2 = 7.2$  mm 保持不变, 吸收峰 I 随外环外径  $L_1$  变化而变化, 吸收峰 II 保持不变

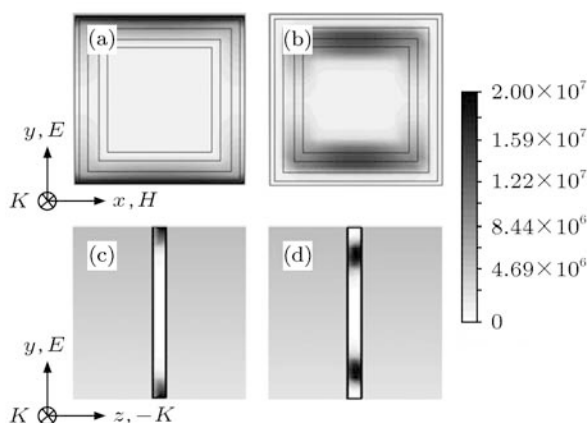


图7 吸收频率  $f_1 = 4.02$  GHz (a), (c) 和  $f_2 = 6.59$  GHz (b), (d) 时的能量损耗分布 (a), (b) 为紧贴上层金属环的正面截图; (c), (d) 为  $x = 5$  mm 处的侧面截图

随外环边长的增加, 吸收峰 I 相应地发生红移, 符合  $\omega_e \propto c/2L_i\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$  标示的变化规律. 数据显示, 每增加 1 mm, 吸收峰移动  $\sim 0.16$  GHz. 由于内环不变, 吸收峰 II 保持不动. 在保持内外环间距足够大 ( $> 0.7$  mm) 以消除两者相互耦合, 两个吸收峰的幅度基本保持不变. 同样的规律也适用于外环不变内环边长变化的情况. 这些表明, 双环结构的双波段吸收器吸收峰来源于每一个环的单独谐振, 谐振频率反比于闭合环边长. 在保持一定距离以消除耦

合的条件下, 可以利用单环、双环、三环甚至更多闭合环的嵌套以实现单波段、双波段、三波段、多波段的吸收器设计.

在电磁波沿  $-z$  轴垂直入射的情况下, 两个吸收频率下的能量损耗分布如图 7 所示. 图 7(a), (c) 是吸收峰 I 对应的能量损耗分布. 图 7(b), (d) 是吸收峰 II 对应的能量损耗分布. 两个吸收频率下的能量损耗来源于闭合环上下两金属边的金属损耗及其下方临近介质 FR4 的介质损耗. 其中, 介质损耗是主要的. 在谐振频率下, 上下两金属边及对应的金属底板是电荷集中的区域, 两者之间存在较强的极化电场, 入射电磁波的大部分能量集中到该区域并以热能的形式损耗在介质中.

## 4 结论

本文设计了基于双闭合环结构的超材料双波段吸收器, 实验和仿真结果符合得非常好. 在保持一定距离的情况下, 每个环的谐振频率都是独立的, 谐振频率与环边长成反比. 由于采用了嵌套闭合环的紧凑结构, 采用不同数目、不同大小的环组合, 可以方便地实现单波段、双波段、三波段甚至更多波段的吸收. 单元结构具有的旋转对称性使其  $x$  偏振和  $y$  偏振有一样的响应, 即无偏振依赖性. 同时, 我们的设计可以在大角度 ( $50^\circ$ ) 入射条件下依然保持 83% 以上的吸收, 且厚度 ( $0.836$  mm) 仅 (约为工作波长 ( $\lambda_1 = c/f_1 = 73.89$  mm) 的百分之一. 这种极薄的、大角度、无偏振依赖性、多波段的吸收器有望在多频成像、热探测等科技领域发挥重要作用. 由于电磁场的标度不变形, 我们的设计不仅适用于微波段, 也可在太赫兹、光波段发挥作用.

感谢南京大学电子工程系赵俊明老师在样品测试中的指导和帮助.

- [1] Diem M, Koschny T, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 33101
- [2] Liu N, Mesch M, Weiss T, Hentschel M, Giessen H 2010 *Nano Lett.* **10** 2342
- [3] Liu X L, Starr T, Starr A F, Padilla W J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 207403
- [4] Noor A, Hu Z 2010 *Iet. Microw. Antenna P* **4** 667

- [5] Gu C, Qu S B, Pei Z B, Xu Z, Liu J, Gu W 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 027801 (in Chinese) [顾超, 屈绍波, 裴志斌, 徐卓, 刘嘉, 顾巍 2011 物理学报 **60** 027801]
- [6] Cheng Y Z, Xiao T, Yang H L, Xiao B X 2010 *Acta Phys. Sin.* (in Chinese) **59** 5715 [程用志, 肖婷, 杨河林, 肖柏勋 2010 物理学报 **59** 5715]

- [7] Fan J, Cai G Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6084 (in Chinese) [樊京, 蔡广宇 2011 物理学报 **59** 6084]
- [8] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6078 (in Chinese) [张燕萍, 赵晓鹏, 保石, 罗春荣 2010 物理学报 **59** 6084]
- [9] Zhu B, Feng Y J, Zhao J M, Huang C, Jiang T A 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 51906
- [10] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [11] Hao J M, Wang J, Liu X L, Padilla W J, Zhou L, Qiu M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 251104
- [12] Tao H, Bingham C M, Pilon D, Fan K B, Strikwerda A C, Shrekenhamer D, Padilla W J, Zhang X, Averitt R D 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 225102
- [13] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241111
- [14] Padilla W J, Taylor A J, Highstrete C, Lee M, Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 107401

## Dual band metamaterial absorber in microwave regime\*

Shen Xiao-Peng<sup>1)2)</sup> Cui Tie-Jun<sup>1)†</sup> Ye Jian-Xiang<sup>2)</sup>

1) (State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China)

2) (Department of Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(Received 24 March 2011; revised manuscript received 27 April 2011)

### Abstract

We report on the design, the fabrication and the measurement of a microwave dual band absorber in microwave regime. The single unit cell consists of two closed ring resonators and a metallic ground plane separated by an FR4 layer. Experimental results show that the absorber has two distinctive absorption peaks at frequencies 4.06 GHz and 6.66 GHz with absorptions 99.60% and 95.83%, respectively, and the absorptivity drops in a wide range of incident angle. Fourfold rotational symmetry of the geometry makes the absorber insensitive to transverse electric and transverse magnetic polarization. The dual band absorber is a promising candidate as absorbing elements in multi-frequency imaging and thermal detection, due to its multi-band absorption performance, polarization-insensitivity, and wide angle of incidence.

**Keywords:** metamaterial, absorber

**PACS:** 81.05.Xj, 41.70.Jb

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 60990320, 60990324, 60871016, 60901011), the Science Foundation of China University of Mining and Technology (Grant No. 2007A031), and the Graduate Innovation Program of Jiangsu Province, China (Grant No. CX09B\_045Z).

† E-mail: tjcui@seu.edu.cn