

多频与宽频超材料吸收器*

刘亚红[†] 方石磊 顾帅 赵晓鹏

(西北工业大学长安校区理学院, 西安 710129)

(2013年2月17日收到; 2013年3月22日收到修改稿)

提出了多频与宽频超材料吸收器结构模型, 该吸收器是由刻蚀在介质基板两面的金属图案组成, 其正面是由不同大小的金属铜圆片和金属铜圆环结构组合而成, 反面完全覆盖金属铜. 由于不同几何大小的圆片或圆环结构的谐振频率不同, 且是相互独立的. 因此通过将两种不同几何大小的圆片与圆环结构组合, 使其在不同频率谐振, 便可得到双频吸收器; 而将三种不同几何大小的圆片和圆环结构组合便可得到三频吸收器; 同理可得到四频吸收器. 同时, 通过研究吸收器的电场分布, 验证了不同几何大小的圆片或圆环结构在不同频率谐振. 若通过优化组合圆片和圆环结构, 使其谐振频率紧密相连则可得到宽频吸收器.

关键词: 吸收器, 超材料, 多频, 宽频

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.62.134102

1 引言

以左手材料为代表的电磁超材料由于其奇异特性如负电磁参数、负折射、完美透镜等而引起了极大关注. 电磁超材料由两个宏观的电磁参数表示: 介电常数 $\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ 和磁导率 $\mu = \mu_1 + i\mu_2$, 通过调节结构的几何参数、形状等调控电磁参数的大小. Pendry 等研究发现利用周期性排列的金属线和金属开口谐振环可以分别实现负介电常数^[1]和负磁导率^[2], 依据 Pendry 的设计思想, Smith 等首次制备出了微波段左手材料并观测到负折射^[3]. 目前科学家们已经设计了多种不同结构的左手材料模形如“S”形^[4], “双短杆对”形^[5], “Omega”形^[6], “树枝”形^[7], “渔网”形^[8], “蝴蝶结”形^[9], “H”形^[10], “纳米对”形等^[11]. 在左手材料的研究中, 为了得到负参数, 对电磁参数的实部关注较多, 而对于虚部的研究则较少. 事实上, 虚部的研究也极具科学意义与研究价值, 比如可以实现高吸收率的完全吸收器.

Landy 等^[12]利用超材料的设计思想, 首次设计了一种微波段超材料完全吸收器, 其对电磁波表现出既不透射也不反射的特性, 具有高达 99%的

完美吸收特性, 可用于热辐射的收集、隐身等领域. 基于 Landy 的设计理念, 研究者们设计了多种不同结构的完全吸收器, 研究频段从微波段扩展到 THz 频段、近红外频段、可见光频段^[13-30]. Yang 等^[13]设计了一种高吸收率的微波段完全吸收器, 在 10.5 GHz 处吸收率为 98%, 半功率吸收带宽为 0.5 GHz. Tao 等^[14]利用表面微机械加工技术制备了 THz 频段的超材料吸收器, 在 1.3 THz 处吸收率为 70%. 然而以上设计的吸收器, 吸收带宽均很窄, 极大限制了其应用. 因而, 越来越多的研究工作集中于多频与宽频超材料吸收器. Li 等^[15]设计了一种以“四个箭头”为结构单元的超材料吸收器, 可在 6 GHz 和 8 GHz 两个频率处实现高吸收率. Zhang 等^[16]提出了一种基于电谐振环结构的 THz 频段双频吸收器, 其在 0.45 THz 与 0.92 THz 具有高吸收率. Cui 等^[17,18]设计一种基于开口谐振环结构的三频吸收器, 可在 4.06 GHz, 6.73 GHz 和 9.22 GHz 分别实现 99%, 93%和 95%的高吸收率. 除了多频吸收器, 还有研究小组开展了宽频超材料吸收器的研究工作, 如 Xu 等^[19]利用开口谐振环之间的耦合作用设计了带宽为 1.6 GHz 宽频超材料吸收器. Cummer 等^[20]利用多层谐振环的组合结构实

* 国家自然科学基金(批准号: 11204241, 50936002, 51272215)和西北工业大学基础研究基金(批准号: JC201154)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yhliu@nwpu.edu.cn

现了相对带宽为 6.1% 的宽频吸收器. Lee 等^[21]也设计了一种半功率吸收带宽为 1 GHz 的吸收器. He 等^[22]利用多层结构设计了一种超宽带微波吸收器, 其吸收带宽达到近 7 GHz. 我们课题组利用^[23]两层树枝状结构单元实现了带宽为 2.8 GHz 的宽频吸收器.

据我们所知, 目前多频吸收器的工作主要集中于双频带吸收器, 三频带吸收器、四频带吸收器研究较少; 而关于宽频吸收器, 文献采用多层技术或者采用遗传算法设计结构, 这便加大设计难度与制备难度. 针对以上问题, 本文设计了一种结构简单的基于圆片与圆环组合结构的多频与宽频超材料吸收器, 利用不同几何大小的圆片与圆环结构的组合, 实现了双频、三频、四频及宽频吸收, 并且通过调节圆片或圆环结构的大小可在任意频段实现多频和宽频高吸收率吸收器, 调控方法简单. 相比较与之前文献的吸收器, 该吸收器仅用单层微带刻蚀技术实现, 具有结构简单, 制备方便的特点, 同时其还具有高吸收率的优势, 可用于飞行器隐身、微波天线、通讯等领域.

2 设计思想与实验

超材料的吸收率可由下式表示:

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega), \quad (1)$$

这里 $A(\omega)$ 代表吸收, $R(\omega)$ 代表反射, $T(\omega)$ 代表透射. 由 (1) 式可知要实现具有完全吸收特性的超材料, 必须使透射和反射尽可能小. 要减小反射须保证介电常数和磁导率相等即 $\epsilon(\omega) = \mu(\omega)$, 这样保证其阻抗 $Z(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)/\mu(\omega)}$ 与自由空间阻抗 $Z_0(\omega)$ 相等 $Z(\omega) = Z_0(\omega)$, 本文通过对结构单元参数的优化设计保证阻抗匹配. 另一方面要保证透射很小, 由于本文设计的完全吸收超材料结构单元的背面是完全金属, 因此其透射为零.

超材料的结构单元可用等效的 LC 谐振电路模型描述, 其谐振频率受结构单元的几何参数影响, 不同几何参数的结构单元其等效的电容 C 、电感 L 不同, 因此由下式可知其谐振频率不同:

$$\omega \propto \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

由于超材料的谐振特性, 对于特定几何参数的结构单元, 其谐振频段较窄, 因而只能在窄频段实现完全吸收. 为了实现多频段与宽频段吸收特性, 可将不同几何尺寸的结构单元组合而实现. 文献^[18, 20, 21, 31, 32]证实不同几何尺寸的结构单元

其谐振频率不同, 而且其谐振频率还是相互独立的. 根据此设计思想, 本文设计了不同几何大小的圆片结构或者圆环结构, 并将其组合设计实现了多频、宽频超材料吸收器.

本文采用仿真与实验两种方法研究完全吸收器的谐振特性, 仿真采用基于积分法的 CST 微波工作室, CST 微波工作室是德国 CST (Computer Simulation Technology) 公司推出的高频三维电磁场仿真软件, 广泛应用于移动通信、无线通信、信号集成和电磁兼容等领域. 本文仿真条件设置如下: 波矢 K 沿 z 轴垂直于样品入射, 电场 E 沿 x 方向, 磁场 H 沿 y 方向. 实验采用 AV3618 矢量网络分析仪 (50 MHz—20 GHz) 与宽频段喇叭天线在微波暗室中测量, 实验测量装置示意图如图 1 所示, 图 1(a) 为透射测量装置示意图, 图 1(b) 为反射测量装置示意图.

3 多频超材料吸收器

3.1 设计与仿真

图 2 为设计的超材料吸收器结构单元, 吸收器的正面为金属铜圆片或圆环结构, 背面为全金属铜, 铜厚度为 0.035 mm, 电导率为 5.8×10^7 S/m. 本文采用厚度为 0.8 mm、介电常数为 4.6 的环氧玻璃纤维 (损耗角正切为 0.025) 作为超材料吸收器的介质基板. 图 2(a) 为设计的双频超材料吸收器结构单元, 正面为金属圆环, 其外半径 4.1 mm, 内半径为 1.1 mm, 排列方式如图所示, 反面是完全覆盖金属铜, 结构单元的大小为 $a_x \times a_y = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$. 采用 CST 微波工作室仿真得到的谐振图谱如图 3(a) 所示, 由于结构单元的背面是全金属, 其透射 S_{21} 为零, 而反射波谱 S_{11} 在 9 GHz 处出现谐振, 由公式^[12] $Abs = 1 - |S_{11}|^2$ 可得到该结构的吸收图谱, 其在谐振频率 9 GHz 处吸收率达到 98%, 半功率吸收带宽为 0.46 GHz.

为了实现双频吸收, 在此吸收结构单元的基础上增加半径为 3.5 mm 的圆片 2, 结构单元如图 2(b) 所示, 仿真得到的谐振图谱如图 3(b) 所示. 由图可知由于第二种圆片 2 的加入, 该结构在 10.36 GHz 产生了一个新谐振, 其吸收率为 96%. 由于圆片 2 的几何尺寸小于圆环 1 的几何尺寸, 因此其谐振频率 (10.36 GHz) 高于第一种圆环结构的谐振频率 (9 GHz). 两种不同大小的结构单元在两个不同频率谐振, 形成了双频吸收特性.

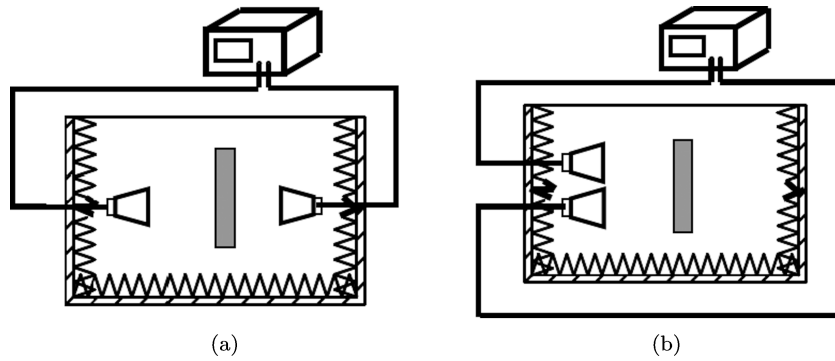


图1 实验装置示意图 (a) 透射; (b) 反射

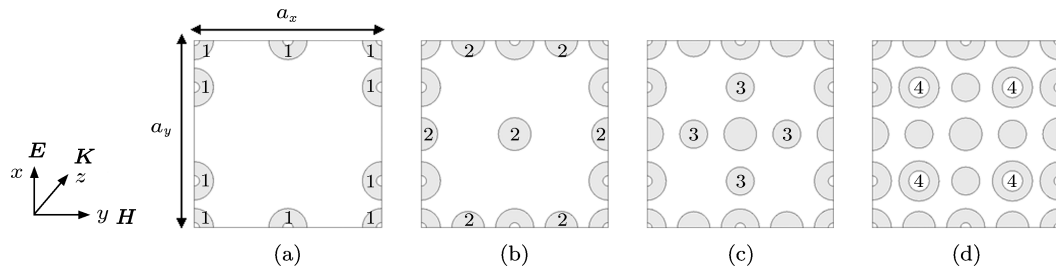


图2 超材料吸收器的结构单元 (a) 单频; (b) 双频; (c) 三频; (d) 四频

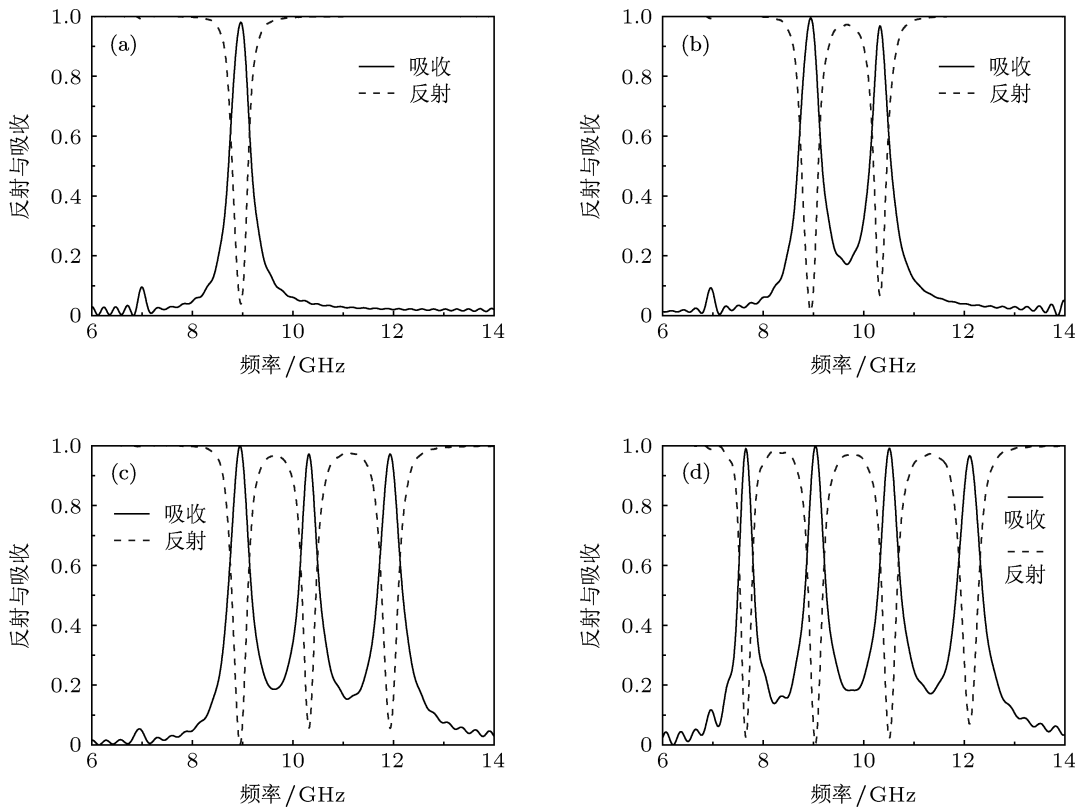


图3 仿真得到的吸收器谐振特性 (a) 单频; (b) 双频; (c) 三频; (d) 四频

在双频吸收器的基础上再增加半径 3.3 mm 的圆片 3, 设计的结构单元如图 2(c), 其谐振特性如图 3(c). 由图可知, 第三种圆片结构产生的谐振频率为 12 GHz, 其吸收率峰值为 96%. 由于圆片 3 的半径小于圆片 2 的半径, 因而在高频出现了第三个吸收峰, 实现了三频吸收.

在图 2(c) 的基础上添加了第四种结构——圆环 4, 其外半径为 4.3 mm, 内半径为 2.2 mm, 所设计的结构单元如图 2(d) 所示, 其谐振特性如图 3(d) 所示. 由于所加的第四种圆片的几何尺寸最大, 因而其在较低频率 7.65 GHz 出现谐振, 其吸收率峰值达到 98%, 实现了四频带吸收. 以上结果表明, 通过不同几何大小的圆片与圆环结构组合实现了多频吸收器.

为了探究多频吸收器产生的物理机理, 图 4 给出了四种吸收器的电场分布图. 图 4(a) 为单频吸收器在其谐振频率处的电场分布图, 由图可知在结构单元周围电场较强. 图 4(b) 是双频吸收器在 10.36 GHz 处的电场分布, 相比较与单频吸收器(圆环 1) 的电场分布, 圆片 2 周围的电场较强, 可知此频率处的谐振是由圆片 2 谐振产生, 同时其与圆环 1 的谐振是相互独立的. 图 4(c) 是三频吸收器在 12 GHz 处的电场分布图, 结果表明圆片 3 周围的电场较强, 可知此频率处的谐振是由圆片 3 谐振所产生. 图 4(d) 是四频吸收器在 7.65 GHz 处的电场分布图, 相比较与其他结构单元, 圆环 4 周围的电场

较强. 综上可知, 不同几何大小的圆片结构或圆环结构在不同频率产生谐振, 同时其谐振是相互独立的, 没有相互耦合作用. 以此为设计依据, 通过更多种不同大小的结构单元组合便可实现更多频的吸收器.

3.2 实验

为了验证仿真结果采用电路板刻蚀工艺制备了超材料吸收器的实物样品如图 5 所示, 样品由 4×4 阵列的结构单元组成, 其几何尺寸为 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$. 图 6 是实验测试结果, 由图 6(a) 可知实验测得单频吸收器产生的谐振峰中心频率为 9.4 GHz, 吸收率峰值为 98%, 半功率吸收带宽为 0.43 GHz. 图 6(b) 是实验测量的双频吸收器的谐振图谱, 结果表明该结构在 9.15 GHz 和 10.9 GHz 两处发生谐振对应的吸收率峰值分别为 95% 和 91%. 图 6(c) 是三频吸收器的吸收图谱, 该吸收器在 9.05 GHz, 10.9 GHz 和 12.5 GHz 三个频率处发生谐振, 所对应的吸收率分别为 98.4%, 95.2% 和 92.2%. 图 6(d) 为四频吸收器的谐振波谱, 实验结果表明其在 7.79 GHz, 9.05 GHz, 10.9 GHz 和 12.6 GHz 四个频率处发生谐振, 所对应的吸收率分别为 98%, 98%, 96.2% 和 94%. 相比较于仿真结果, 实验测试的谐振频率均向高频偏移, 主要是由于加工误差以及实验中所用介质基板的介电常数不均一所导致.

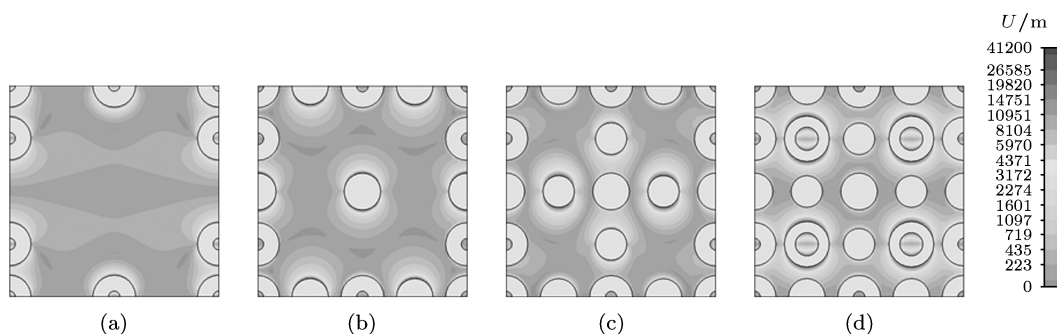


图 4 吸收器的电场分布图 (a) 9 GHz; (b) 10.36 GHz; (c) 12 GHz; (d) 7.65 GHz

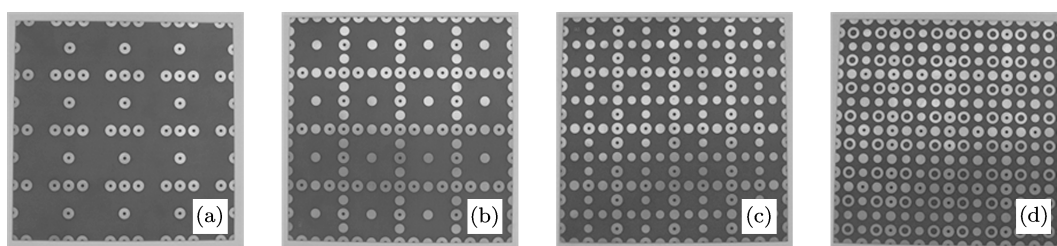


图 5 超材料吸收器的实物照片 (a) 单频; (b) 双频; (c) 三频; (d) 四频

4 宽频超材料吸收器

依据多频吸收器的设计思想, 通过对圆片或圆环结构单元的优化设计, 使不同圆片或圆环结构单元的谐振峰相连, 便可实现宽频吸收. 图 7 是采用 CST 微波工作室仿真优化设计的宽频吸收器结构单元, 吸收器的正面仍然为金属铜圆片或圆环结构, 背面仍为全金属铜, 采用厚度为 0.8 mm 介电常数为 4.6 的环氧玻璃纤维 (损耗角

正切为 0.025) 作为吸收器的介质基板. 为了增加吸收带宽, 第一种宽频吸收器是由三种不同大小的圆片单元组成, 其结构单元如图 7(a) 所示, 三种圆片的半径分别为 $r_1 = 3.0 \text{ mm}$, $r_2 = 3.1 \text{ mm}$, $r_3 = 2.9 \text{ mm}$, 排列方式如图所示, 结构单元的大小为 $a_x \times a_y = 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$. 图 8 为仿真得到的谐振波谱, 由反射曲线可知其在中心频率 12 GHz 发生谐振, 此处对应的吸收率为 97%, 半功率吸收带宽为 1.15 GHz (11.47—12.62 GHz).

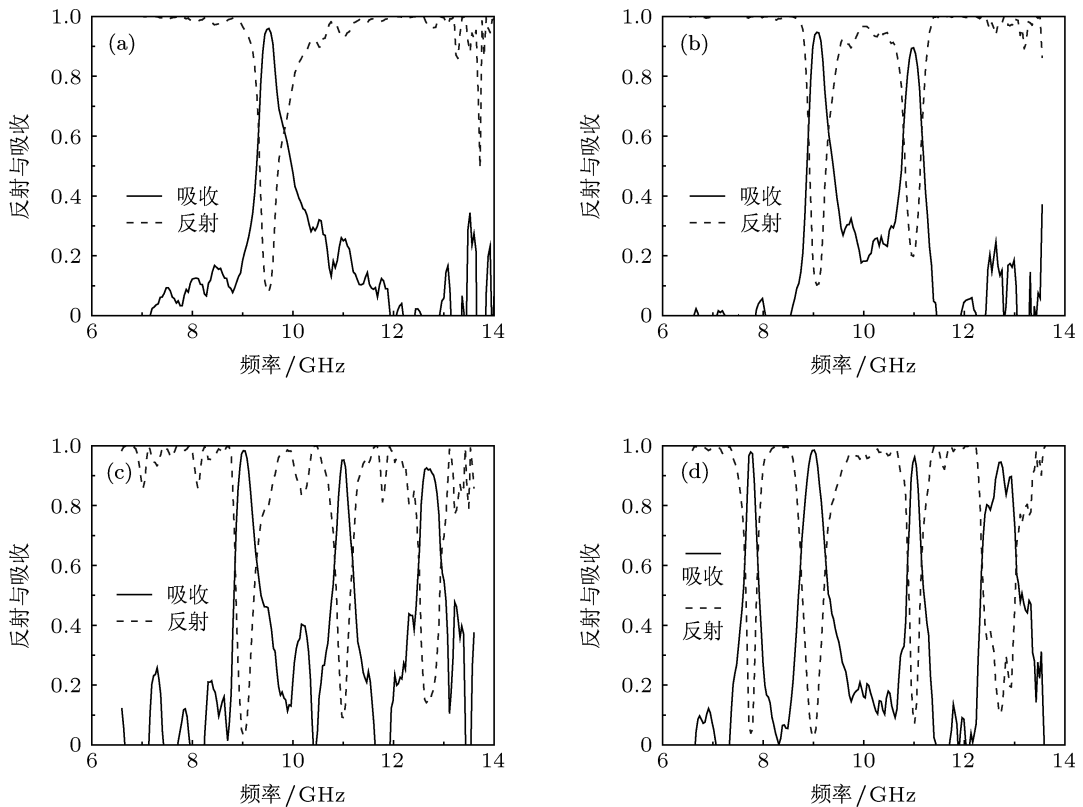


图 6 实验测量的吸收器谐振波谱 (a) 单频; (b) 双频; (c) 三频; (d) 四频

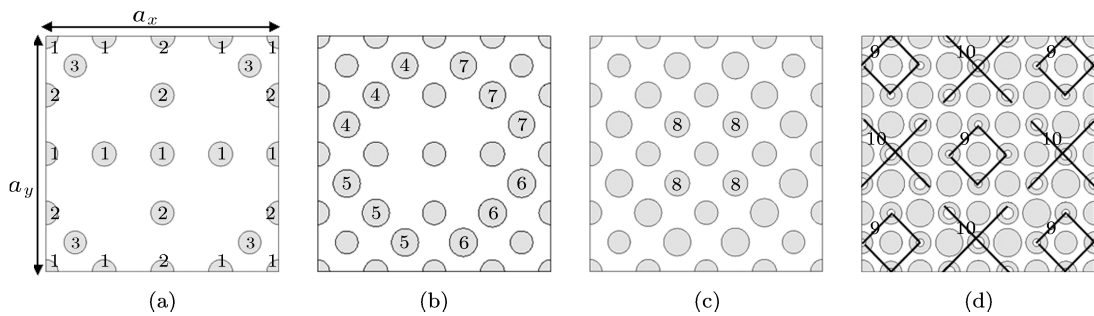


图 7 宽频吸收器的结构单元 (a) 第一种结构; (b) 第二种结构; (c) 第三种结构; (d) 第四种结构

为了进一步增加吸收带宽,在第一种结构的基础上增加了四种不同大小的圆片结构而构成第二种吸收器结构单元如图 7(b) 所示,增加的四种圆片半径分别为 $r_4 = 3.3 \text{ mm}$, $r_5 = 3.4 \text{ mm}$, $r_6 = 3.5 \text{ mm}$, $r_7 = 3.6 \text{ mm}$. 由图 8 的谐振波谱可见,相比较于第一种吸收器,其谐振带宽增加. 由于所加的四种圆片结构的半径均较第一种吸收器的圆片半径大,因而其带宽向低频方向展宽,半功率吸收带宽达到了 2.39 GHz ($10.21\text{--}12.6 \text{ GHz}$),但是其在 11.44 GHz 吸收率较低,为了提高此频率的吸收率,通过 CST 多次优化设计表明若在第二种结构单元的基础再增加一种半径为 $r_8 = 3.2 \text{ mm}$ 圆片 8,可提高 11.44 GHz 频率处的吸收率,所设计的结构单元如图 7(c) 所示 (第三种结构).

为了进一步加宽吸收带宽和提高吸收率,在第三种结构单元的基础上再填充两种圆环结构,9 号圆环以四个为一组填充,其内外半径分别为 2.8 mm 和 1.5 mm . 10 号圆环以五个为一组填充,其内外半

径分别为 2.8 mm 和 1.0 mm ,设计的第四种结构单元如图 7(d) 所示. 由图 8 的谐振波谱可知,相比较与前三中结构该吸收器具有极高的吸收率,半功率吸收带宽达到了 2.57 GHz ($10.3\text{--}12.87 \text{ GHz}$).

为了验证仿真结果,采用电路板刻蚀工艺制备了四种宽频吸收器的实物样品如图 9 所示,实验样品由 3×3 阵列结构单元组成,其几何尺寸为 $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$. 图 10 是实验测量的宽频吸收器的谐振特性,由图可知对于第一种吸收器,吸收率峰值为 93% ,半功率吸收带宽为 1.06 GHz ($11.92\text{--}12.98 \text{ GHz}$). 第二种吸收器的吸收峰值为 96% ,但在 11.85 GHz 处吸收率较低,这与仿真结果一致,实验测得的半功率吸收带宽为 2.03 GHz ($10.82\text{--}12.85 \text{ GHz}$); 第三种吸收器的吸收峰值为 97.6% ,半功率吸收带宽为 2.24 GHz ($10.75\text{--}12.97 \text{ GHz}$); 第四种吸收器的吸收带宽为 2.5 GHz ($10.75\text{--}13.25 \text{ GHz}$); 实验结果与仿真结果符合.

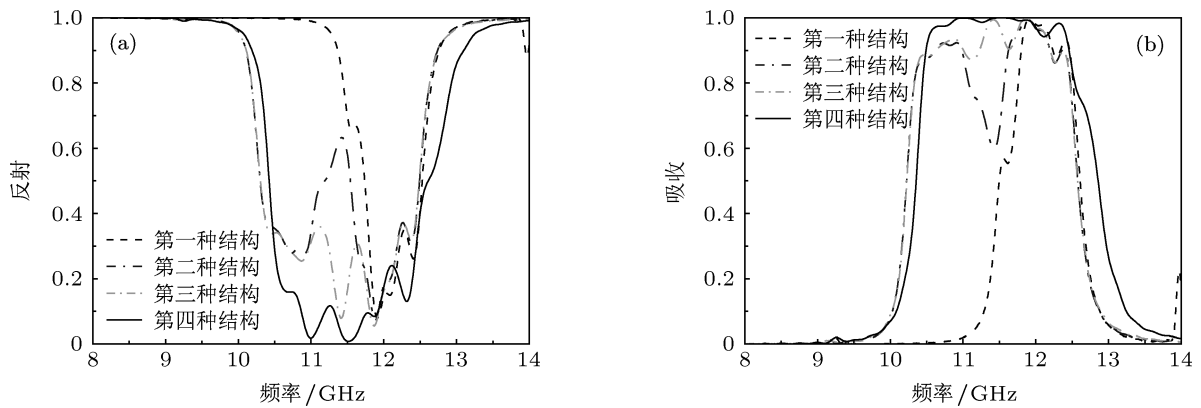


图 8 仿真的宽频吸收器谐振特性 (a) 反射; (b) 吸收

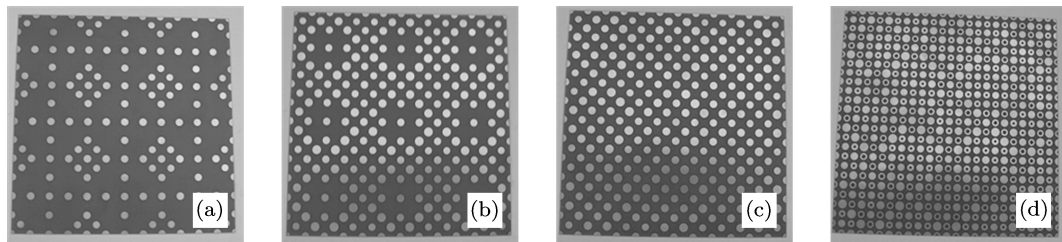


图 9 宽频超材料吸收器的实物照片 (a) 第一种结构; (b) 第二种结构; (c) 第三种结构; (d) 第四种结构

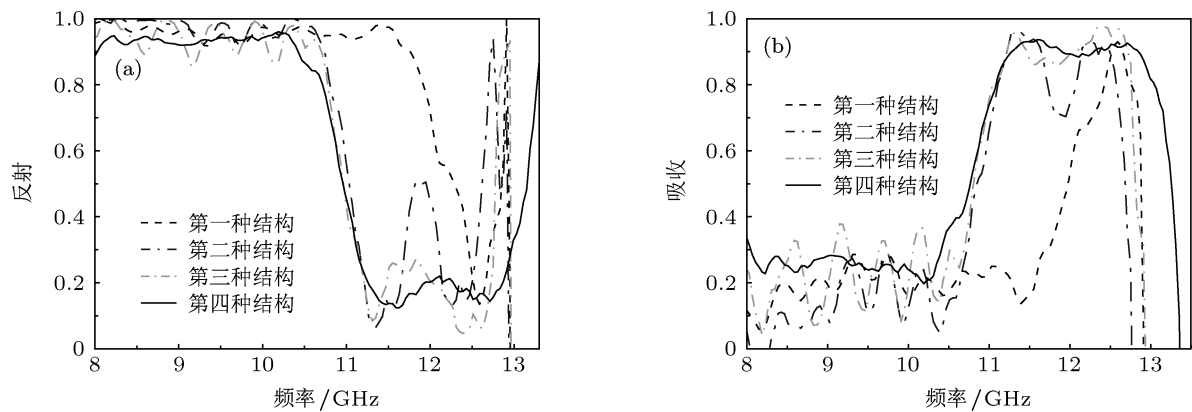


图 10 实验测量的宽频吸收器的谐振特性 (a) 反射; (b) 吸收

5 结论

本文提出了一种多频带和一种宽频带超材料吸收器模型, 并通过数值模拟与实验研究了吸收器的谐振行为. 超材料吸收器模型由不同几何尺寸的金属圆片和金属圆环结构组合而成, 通过调节圆片结构或者圆环结构的种类和大小可以实现双频段、三频段和四频段吸收. 宽频段吸收则是通过优化组

合圆片结构或者圆环结构, 使每种圆片或圆环结构的谐振吸收峰相连, 所设计的宽频吸收器带宽可达 2.5 GHz. 本文设计的吸收器可通过调控圆片或圆环结构的种类和几何尺寸在任意频段实现多频和宽频吸收. 此外, 本文的吸收器仅由单层结构实现, 具有结构简单、制备方便等特点, 同时其还具有高吸收率的优点.

- [1] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2075
- [3] Shelby R, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [4] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczuk T M, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [5] Dolling G, Enkrich C, Wegener M, Zhou J F, Soukoulis C M, Linden S 2005 *Opt. Lett.* **30** 3198
- [6] Huangfu J, Ran L, Chen H, Zhang X, Chen K, Grzegorzczuk T M, Kong J A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1357
- [7] Zhou X, Zhao X P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181908
- [8] Fedotov V A, Mladonov P L, Prosvirnin S L, Zheludev N I 2005 *Phys. Rev. E* **72** 056613
- [9] Zhou X, Liu Y H, Zhao X P 2010 *Appl. Phys. A* **98** 643
- [10] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [11] Shalae V M, Cai W, Chettiar U K, Yuan H K, Sarychev A K, Drachev V P, Kildishev A V 2005 *Opt. Lett.* **30** 3356
- [12] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [13] Cheng Y, Yang H 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 034906
- [14] Christopher M B, Tao H, Liu X, Averitt R D, Zhang X, Padilla W J 2008 *Opt. Express* **16** 18565
- [15] Li L, Yang Y, Liang C 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 063702
- [16] Wen Q Y, Zhang H W, Xie Y S, Yang Q H, Liu Y L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 241111
- [17] Shen X P, Cui T J, Zhao J M, Ma H F, Jiang W X, Li H 2011 *Opt. Express* **19** 9401
- [18] Li H, Yuan L H, Zhou B, Shen X P, Cheng Q, Cui T J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 014909
- [19] Xu Y Q, Zhou P H, Zhang H B, Chen L, Deng L J 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 044102
- [20] Gu S, Barrett J P, Hand T H, Popa B I, Cummer S A 2010 *J. Appl. Phys.* **108** 064913
- [21] Lee J, Lim S 2011 *Electro. Lett.* **47** 8
- [22] Ding F, Cui Y, Ge X, Jin Y, He S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 103506
- [23] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 张燕萍, 赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3187]
- [24] Zhu W R, Zhao X P 2010 *European Physical J. Appl. Phys.* **50** 21101
- [25] Wang J, Chen Y, Hao J, Yan M, Qiu M 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 074510
- [26] Lin C H, Chern R L, Lin H Y 2011 *Opt. Express* **19** 415
- [27] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, Wang J, Pang Y Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 108901 (in Chinese) [孙良奎, 程海峰, 周永江, 王军, 庞永强 2011 物理学报 **60** 108901]
- [28] He Y F, Gong R Z, Wang X, Zhao Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5261 (in Chinese) [何燕飞, 龚荣洲, 王鲜, 赵强 2008 物理学报 **57** 5261]
- [29] Wang X D, Ye Y H, Ma J, Jiang M P 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 094101
- [30] Quan B G, Li C, Sui Q, Li J J, Liu W M, Li F, Gu C Z 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1243
- [31] Zhao X P, Zhao Q, Kang L, Song J, Fu Q H 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [32] Zhu W R, Zhao X P, Ji N 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 011911

Multiband and broadband metamaterial absorbers*

Liu Ya-Hong[†] Fang Shi-Lei Gu Shuai Zhao Xiao-Peng

(School of Science, Chang'an Campus, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(Received 17 February 2013; revised manuscript received 22 March 2013)

Abstract

Multiband and broadband metamaterial absorbers have been proposed in the paper. The proposed absorbers are composed of metallic copper patterns on both sides of a dielectric layer. One side consists of metallic circular patches and metallic annular patches, and the other side is of metallic ground plane. Each distinct metallic circular patch unit cell or annular patch unit cell has one distinct resonant peak in a very narrow band, and these unit cells are independent of one another. Therefore, combining two different unit cells which resonates at different frequencies can obtain dual-band absorber. Based on the theory, combining three different unit cells can obtain tri-band absorber, and combining four different unit cells can obtain the absorber which resonates at four different frequencies. In addition, the electric field distribution verifies that each distinct unit cell resonates at a different frequency. Broadband metamaterial absorber can be obtained according to the optimized combination of the different unit cells. Increasing the number of different unit cells broadens the frequency range when their resonances are closely packed together, thereby resulting in a broadband resonance.

Keywords: absorber, metamaterial, multiband, broadband

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.62.134102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11204241, 50936002, 51272215), and the Foundation for Basic Research of Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. JC201154).

[†] Corresponding author. E-mail: yhliu@nwpu.edu.cn