

一种基于金属开口谐振环和杆阵列的 左手材料宽带吸收器*

樊 京^{1)†} 蔡广宇²⁾

1) (南阳理工学院电子与电气工程系, 南阳 473004)

2) (南阳理工学院机电工程系, 南阳 473004)

(2009 年 11 月 9 日收到; 2009 年 12 月 22 日收到修改稿)

用数值仿真在微波 X 波段研究了金属开口谐振环和杆阵列这一最基本的谐振结构. 通过合理的参数调节, 这种结构在 10.91 GHz 附近可以表现出高达 98% 的吸收率, 并且半高峰宽达到 3.5 GHz. 用散射参量提取法计算其有效电磁参数, 发现在谐振频率附近其介电常数、磁导率和折射率的实部均为负值. 相比于传统的左手材料, 这种结构的电磁参数在谐振区域均具有较大的虚部, 是形成高吸收率的根本原因. 本文的左手材料吸收器在电磁加热、电磁隐身等领域具有许多潜在的应用.

关键词: 左手材料, 开口谐振环, 吸收器

PACC: 4110H, 4270Y

1. 引 言

介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是描述介质电磁特性最基本的两个物理量. 1968 年, Veselago 从理论上预言了 ϵ 和 μ 同时为负的材料, 并将这种材料定义为左手材料 (lefthanded metamaterial, LHM)^[1]. 2001 年, Shelby 等人^[2] 将开口谐振环 (split ring resonator, SRR) 阵列和金属杆阵列组合在一起, 在微波段第一次从实验上制备出左手材料, 并观察到了负折射现象, 从而引起人们对左手材料的广泛关注. 以最基本的 SRR 和杆阵列结构的谐振原理为基础, 研究者们演化出了许多不同的单元结构来实现 LHM, 如 S 形结构^[3], 双闭环环^[4], 短杆对^[5], 树枝单元^[6,7], 双鱼网结构^[8] 以及十字结构^[9]. 目前, 左手材料已经在微波、THz、红外以及声波波段被证实^[10-18], 并逐渐发展为超材料 (metamaterial) 这个新研究领域.

超材料的研究一般都试图尽量减小损耗, 以便更好地体现其负磁导率或负折射率特性. 但是, 最近的研究发现超材料中的损耗其实也具有很多潜在的应用. 2008 年 Landy 等人^[19] 研制出一种超材料

吸收器, 对于入射到其表面的电磁波既不反射也不透射, 达到电磁波完全吸收的科学标准. 随后, Tao 等^[20] 设计并制备了 THz 频段的宽角度超材料吸收器. 2009 年, Landy 等^[21] 报道了一种应用在 THz 的对极化方向不敏感的超材料吸收器. 这些基于超材料设计的完美吸收器可以广泛的应用于高效电磁加热装置, 也可以应用于电磁波的收集和探测装置, 如辐射热测量仪.

本文通过数值仿真进一步研究了金属 SRR 和杆阵列这一最基本的谐振结构. 数值仿真结果表明, 通过合理的参数调节, 这种结构可以在特定的频段表现为近乎完美的吸收率. 用散射参量提取法计算其有效电磁参数, 计算结果显示在一定的频段内其介电常数、磁导率和折射率的实部均为负值. 与传统的 LHM 不同, 本文提出的结构在电磁参数的实部为负的区域, 对应的虚部一般都非常大, 这是 LHM 形成高吸收率的根本原因. 本文的研究有助于进一步认识金属 SRR 和杆阵列的谐振行为, 拓宽了超材料设计的新思路. 同时, 本文中给出 LHM 吸收器与文献^[19-21] 相比具有较大的带宽, 更有利于在电磁加热、电磁隐身等领域的应用.

* 河南省杰出青年科学基金 (批准号: 0612002200), 河南省科技攻关计划 (批准号: 0623021600) 资助的课题.

† E-mail: jingfan1976@163.com

2. 数值仿真

图 1(a)所示为本文设计的 LHM 吸收器的示意图,它是由金属 SRR 阵列和金属杆阵列所构成的.其中在 x, y 方向为周期性结构,在 z 方向只有单层.与传统的 LHM 设计相比较,这种结构中金属杆不是无限长的,而是具有一定长度的杆的周期性阵列,并且我们设计金属杆与 SRR 的中心位置存在一定的偏移.图 1(b)是局部的单元结构,其结构参数如下:SRR 的外环和内环边长分别为 $a = 2 \text{ mm}$, $b = 1.2 \text{ mm}$,环的开口宽度 $g = 0.3 \text{ mm}$,金属杆的长度 $l = 8.6 \text{ mm}$,所有金属的线宽均为 $w = 0.2 \text{ mm}$,介质基板为 FR4(环氧玻璃),其介电常数为 4.9,损耗角正切为 0.025,基板厚度 $h = 0.8 \text{ mm}$.金属杆与 SRR 的中心位置偏移为 $\delta = 0.75 \text{ mm}$.图 1(b)所示的 SRR/短金属杆结构的基本单元在 x, y, z 三个方向的晶格常数分别为 $d, 3d, d$,其中 $d = 3 \text{ mm}$.

本文的数值仿真采用基于有限积分技术的德国商用软件 CST Microwave Studio.本文中选取金属为铜,在微波频段,铜的电导率为 $5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$.仿真时,将 x 方向设为电边界(PEC), y 方向设为磁边界(PMC), z 方向为开放边界(Open),模拟周期性阵列在平面波的激励下的反射和透射参数.

3. 结果与讨论

3.1. 散射参数及吸收率分析

对上述结构作了数值仿真,得到反射和透射曲线,如图 2 所示, S_{11} 和 S_{21} 分别表示透射和反射的幅值.可以看到,与传统的 LHM 不同,本文提出的结构在 11GHz 附近同时出现了透射和反射的极小值.

定义反射率 $R = |S_{11}|^2$,透射率 $T = |S_{21}|^2$.因此材料的吸收率可表示为 $A = 1 - R - T = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$.

图 2 给出了这种结构的吸收率曲线.可以看到,在 10.91 GHz 处,出现了峰值为 98% 的吸收峰.并且这个吸收峰的带宽较大,半高峰宽(FWHM,吸收率在 50% 以上的带宽)达到了 3.5 GHz.这个带宽相比于中心频率 10.91 GHz 达到了 32%,远远高于文献[19]中介绍的 4%.这种宽频的吸收特性更有利于电磁加热和电磁屏蔽等方面的应用.

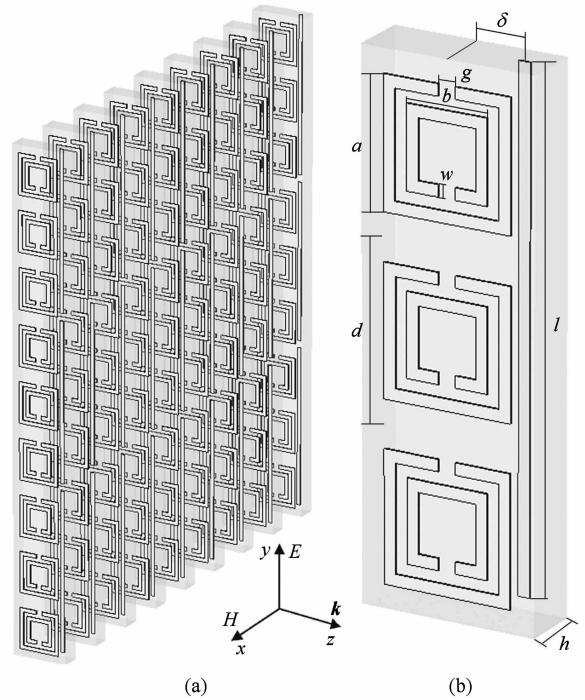


图 1 (a) 基于金属 SRR 和杆阵列的 LHM 吸收器示意图;(b) 局部的单元结构放大图及结构参数表示,其中 a, b 分别为 SRR 外环和内环的边长, g 为环的开口宽度, l 是金属杆的长度, δ 为金属杆与 SRR 中心位置的偏移.图中金属线的宽度一致均为 w ,介质基板的厚度为 h . x, y, z 三个方向的晶格常数一致均为 d

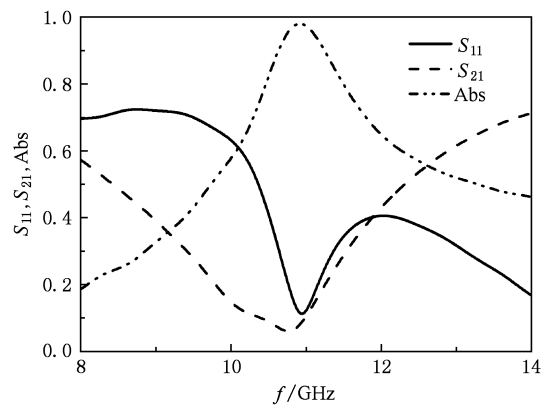


图 2 数值仿真得到的反射(S_{11}),透射(S_{21}),以及吸收率(absorptivity)

3.2. 感应电流分布

为了更好的了解本文提出的这种结构的谐振特性,我们在吸收率达到最大的频率点(10.91 GHz)通过仿真监控金属的表面感应电流.可以看到,对于金属 SRR,其内外环上感应出现的表面电

流旋转的方向相同,表现出很强的磁谐振响应.而金属杆上的感应电流呈现为偶极振荡模式,表现出电谐振响应.从电流分布可以看出,这种结构在 10.91 GHz 处同时具有电谐振和磁谐振,具有 LHM 的基本行为.

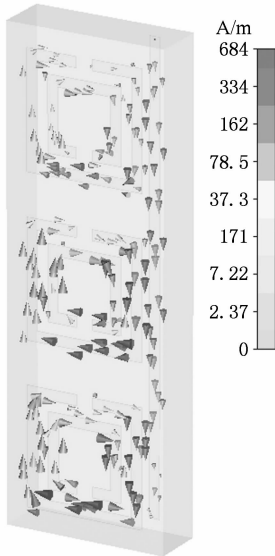


图3 在谐振频率 10.91 GHz 时 SRR 和杆的表面电流分布

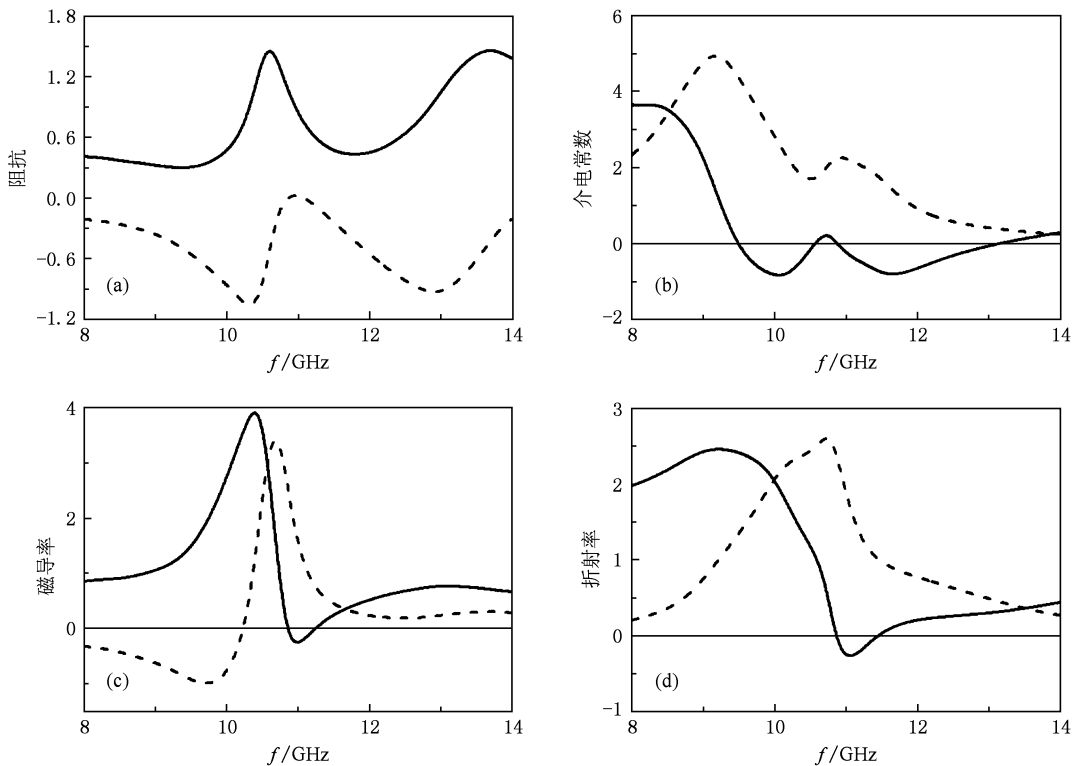


图4 散射参量法计算得到的有效电磁参数 (a) 阻抗;(b)介电常数;(c)磁导率;(d)折射率(其中实线表示实部,虚线表示虚部)

3.3. 有效电磁参数提取

利用仿真得到的散射参数(包括相位),根据用散射参量法^[22]计算获得上述结构的有效电磁参数.图4为计算得到的有效阻抗、介电常数、磁导率和折射率.从图4(a)的阻抗曲线可以看到,在 10.91 GHz(即吸收率最大的频率)处,本文的 LHM 的有效阻抗值为 $0.98 + 0.02i$,非常接近空气的等效阻抗 1,表明这种结构与周围空间的阻抗匹配比较完美,具体表现为图2中的反射曲线在该频率附近出现接近于零的极小值.同时,从图4(b),(c),(d)中可以看出,介电常数、磁导率和折射率的实部在 10.87—11.23GHz 频段内均为负值,证实这种结构确实是 LHM.传统的 LHM,在谐振区域其电磁参数一般都具有比较小的虚部^[16,23].相反,本文的结构在电磁参数实部为负的区域均表现为较大的虚部,表明这种结构具有相当大的损耗.

目前,反映 LHM 的损耗特性一般用 FOM (figure of merit) 表示,FOM 定义为折射率的实部与虚部的比值的相反数,即 $FOM = -\text{Re}(n)/\text{Im}(n)$ ^[24],FOM 越大,则材料的损耗越小.本文计算了上述 LHM 的 FOM 值.从图5可以看出,相比传统

的 LHM^[16,24], 这种 LHM 在负折射率区域的 FOM 非常小, 最大值仅为 0.16. 这表明本文的 LHM 具有非常大的损耗, 这与图 2 中的吸收率的计算结果很好地符合.

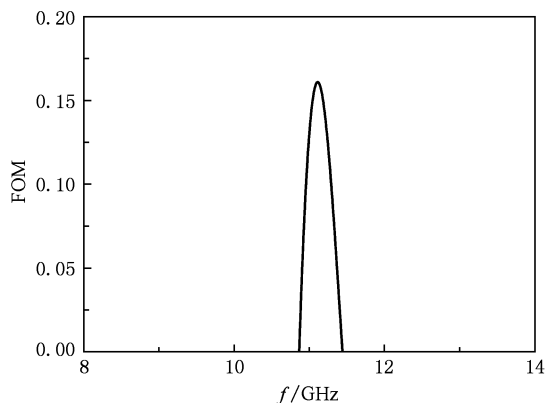


图 5 在负折射率频段计算得到的 FOM 值

4. 结 论

本文用数值仿真在微波 X 波段进一步研究了金属 SRR 和杆阵列这一最基本的谐振结构. 与传统

的金属 SRR 和杆阵列的 LHM 相比, 由于金属杆从无限长变为有限长的阵列, 在相邻两杆之间引入了额外的电容, 改变了原有的谐振模式, 同时金属杆与 SRR 中心位置的偏移, 破坏了结构的对称性, 因此给这种结构带来了很大的损耗. 数值仿真显示, 这种结构在 10.91 GHz 附近表现出了高达 98% 的吸收率, 并且半高峰宽达到 3.5 GHz (带宽百分比达 32%). 用散射参量提取法计算了这种有效电磁参数, 发现在谐振频段附近其介电常数、磁导率和折射率的实部均为负值. 相比与传统的左手材料这种结构的电磁参数在谐振区域均具有较大的虚部, 我们认为这是形成高吸收率的根本原因. 本文的研究有助于进一步认识金属 SRR 和杆阵列的谐振行为, 拓宽了超材料设计的新思路. 同时, 本文的 LHM 吸收器在电磁加热、电磁隐身等领域都具有许多潜在的应用. 由于本文的左手材料吸收器采用了 SRR 结构, 需要电磁波平行入射, 平行入射结构的缺点是厚度相对较厚, 本文的吸收器厚度为 $d = 3$ mm, 这是平行入射左手材料吸收器比较难克服的缺点. 如果将双层的 SRR 改成多层嵌套的 SRR 或 Swiss Roll^[25] 结构, 有望将平行入射左手材料吸收器的厚度进一步降低.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Hys. Usp.* **10** 509
- [2] Shelby R, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [3] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczak T M, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [4] Dong Z G, Xu M X, Lei S Y, Liu H, Li Tao, Wang F M, Zhu S N 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 064101
- [5] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101(R)
- [6] Zhu W R, Zhao X P, Guo J Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241116
- [7] Zhu W R, Zhao X P 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 095311
- [8] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T, Soukoulis C M, Economou E N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
- [9] Zhu W R, Zhao X P 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 074212
- [10] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, Ulin-Avila E, Genov D A, Bartal G, Zhang X 2008 *Nature* **455** 376
- [11] Yen T J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N, Zhang X 2004 *Science* **303** 1494
- [12] Zhu W R, Zhao X P, Ji N 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 011911
- [13] Zhang S, Fan W, Minhas B K, Frauenglass A, Malloy K J, Brueck S R J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 137404
- [14] Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2007 *Opt. Lett.* **32** 53
- [15] Sun M Z, Zhang C M, Song X P, Liang G Y, Sun Z B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6179 (in Chinese) [孙明昭、张淳明、宋晓平、梁工英、孙占波 2009 物理学报 **58** 6179]
- [16] Dolling G, Enkrich C, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2006 *Opt. Lett.* **31** 1800
- [17] Wu J F, Sun M Z, Zhang C M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3844 (in Chinese) [吴俊芳、孙明昭、张淳明 2009 物理学报 **58** 3844]
- [18] Luo C R, Wang L S, Guo J Q, Huang Y, Zhao X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3214 (in Chinese) [罗春荣、王连胜、郭继权、黄勇、赵晓鹏 2009 物理学报 **58** 3214]
- [19] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [20] Tao H, Bingham C M, Strikwerda A C, Pilon D, Shrekenhamer D, Landy N I, Fan K, Zhang X, Padilla W J, Averitt R D 2008 *Phys. Rev. B* **78** 241103(R)
- [21] Landy N I, Bingham C M, Tyler T, Jokerst N, Smith D R, Padilla W J 2009 *Phys. Rev. B* **79** 125104
- [22] Smith D R, Schultz S, Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104

- [23] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Gu C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3224 (in Chinese) [王甲富、屈绍波、徐卓、张介秋、马华、杨一鸣、顾超 2009 物理学报 **58** 3224]
- [24] Garcia-Meca C, Ortuno R, Salvador R, Martinez A, Marti J 2007 *Opt. Express* **15** 9320
- [25] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2075

Broadband lefthanded metamaterial absorber based on split ring resonator and wire array^{*}

Fan Jing^{1)†} Cai Guang-Yu²⁾

1) (Department of Electronics and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

2) (Department of Mechanical and Electrical Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

(Received 9 November 2009; revised manuscript received 22 December 2009)

Abstract

We studied the basic resonance structure of split ring resonator (SRR) and wire array at microwave X-band numerically. With proper design of parameters, this structure could achieve the absorptivity as high as 98% near the frequency of 10.91 GHz, and the FWHM of which is greater than 3.5 GHz. The scattering parameter retrieval method is employed to calculate the effective electromagnetic parameters. It is found that, close to the resonance frequency, the real components of the effective permittivity, permeability, and refractive index are all negative. However, the imaginary components of the electromagnetic parameters seem to be very large in the resonance region, which is the main reason of the high absorptivity. The broadband lefthanded metamaterial absorber presented in this paper has potential applications such as in electromagnetic heating and electromagnetic hiding.

Keywords: lefthanded metamaterial (LHM), split ring resonator (SRR), absorber

PACC: 4110H, 4270Y

^{*} Project supported by the Outstanding Youth Foundation of Henan Province, China (Grant No. 0612002200), and the Key Science and Technology Program of Henan Province, China (Grant No. 0623021600).

[†] E-mail: jingfan1976@163.com