

基于单面金属结构的二维宽带左手材料*

陈春晖¹⁾ 屈绍波^{1)2)†} 徐卓²⁾ 王甲富¹⁾ 马华¹⁾ 周航¹⁾

1)(中国人民解放军空军工程大学理学院,西安 710051)

2)(西安交通大学电子材料与器件教育部重点实验室,西安 710049)

(2009年12月26日收到;2010年5月12日收到修改稿)

利用将磁谐振器与共面短金属导线相结合的思想,设计了一种基于单面金属结构的二维左手材料. 理论分析与仿真结果均表明该结构在某一频段同时具有负等效磁导率和负等效介电常数,并且相对左手带宽达到36%. 此外,该结构具有良好的容错能力,短金属导线宽度的变化对整体结构的谐振频率及通带宽度影响很小,这不仅有利于实际加工而且对于设计红外及太赫兹频率范围下的左手材料具有参考价值.

关键词: 左手材料, 磁谐振器, 宽频带, 容错性

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 73.20.Mf, 77.22.Ch

1. 引言

左手材料是一类新型人工电磁材料,由于其具有一些特殊的性质^[1],对其结构设计以及应用等方面的研究引起了有关领域的研究者的广泛兴趣. 左手材料最显著的特点是在某一频率范围下折射率为负值^[2]. 2000年,Smith等^[3]设计并制造出了左手材料样品,此后涌现出各种不同金属结构的左手材料. 目前,设计基于金属结构的左手材料主要有两种思路. 一种是使设计的结构在某一频段下同时具有负等效磁导率和负等效介电常数,由 $n = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}}$ 可得到负折射率. 另一种是利用设计出的结构所具有的旋光性,由 $n_{\pm} = n \pm \kappa$ (κ 为旋光系数) 实现负折射率^[4-6],使用该方法设计的结构不要求等效磁导率和等效介电常数同时为负值. 第一种方法对整体结构设计的要求较低,不需要整体结构具有旋光性,这更有利于提高结构设计时的简便性.

遵循第一种方法中等效磁导率和等效介电常数同时为负值的要求,研究者们设计出了各种不同类型的结构,有S型^[7],H型^[8],欧米加型^[9],耶路撒冷十字架型^[10],渔网型^[11,12]等. 负等效磁导率一般可以通过磁谐振来获得. 在这些结构中,要么利

用磁谐振器(开口谐振环^[13] 以及其变形结构^[14-16]) 要么利用介质板两面金属结构之间的耦合^[17] 或者结构单元之间的耦合^[10] 来获得磁谐振. 负等效介电常数可以通过金属导线阵列^[18] 或者利用电谐振器^[19,20] 的谐振区域来实现. 当磁谐振与电谐振在某一频率范围下重合时,就可以获得负折射率. 设计出结构简单,具有均匀各向同性,宽频带,低损耗等特点的左手材料一直是该领域研究者们所关注的热点问题.

本文将磁谐振器与共面短金属导线相结合,设计出了一种具有旋转对称性的单面金属结构,理论分析与仿真结果均表明该结构在7.0—10.1 GHz 折射率为负值,并且相对左手带宽达到36%. 同时,该结构具有良好的稳定性,短金属导线宽度的变化对整体结构的谐振频率及通带宽度影响很小.

2. 磁谐振器结构设计

对于磁谐振器,由于电磁感应,当电磁波平行入射时,磁场会在磁谐振器上产生感应电流并形成电流回路,磁谐振器中电容和电感作用形成LC谐振电路,在负谐振区域就会实现负等效磁导率. 由磁谐振器单回路镜像对称设计原理^[21],设计的二维磁谐振器单元结构如图1中所示,此结构基板为

* 国家自然科学基金(批准号:50632030, 60871027)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2009CB613306)和陕西省自然科学基金(批准号: SJ08F01)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

FR4 板材 (相对介电常数 $\epsilon_r = 4.9$), 边长 $a = 4.5$ mm, 厚度 $t = 0.5$ mm. 基板的一面上刻有线宽 $w = 0.3$ mm 的铜线 (在图 1 中为深色部分), 厚度 $h = 0.03$ mm, 边长 $b = 3.5$ mm, 铜线间距 $g = 0.1$ mm, 臂长 $l = 1.6$ mm. 该结构在有效抑制电谐振干扰的同时排除了双各向异性. 建立等效电路模型, 如图 2 所示, 磁谐振频率为: $f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_m C_m}}$, 其中 $L_m = 8L_1, C_m = C/4$. 所以,

$$f_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{(8L_1)(C/4)}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{2L_1 C}}, \quad (1)$$

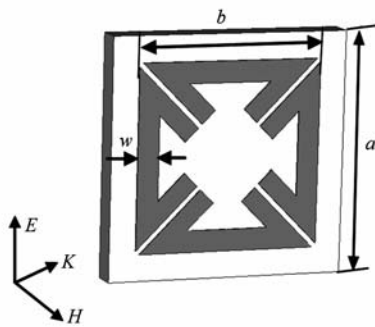


图1 磁谐振器单元

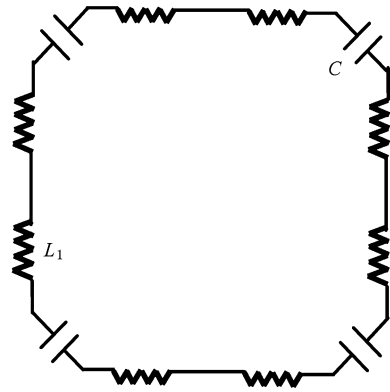


图2 磁谐振器等效电路

采用商业计算软件 CST Microwave Studio 对该结构进行仿真. TEM 波从模型的左端入射, 电场、磁场方向如图 1 中所示. 与电场方向垂直的两个边界设置为理想电边界 (PEB), 与磁场方向垂直的两个边界设置为理想磁边界 (PMB). 散射参数 S_{21} 如图 3 (a) 所示, 通过参数提取方法^[22], 提取得到结构的等效磁导率如图 3 (b) 所示, 在 8.9—11.4 GHz 范围内等效磁导率为负值. 数值仿真的结果与理论分析的结果相符合.

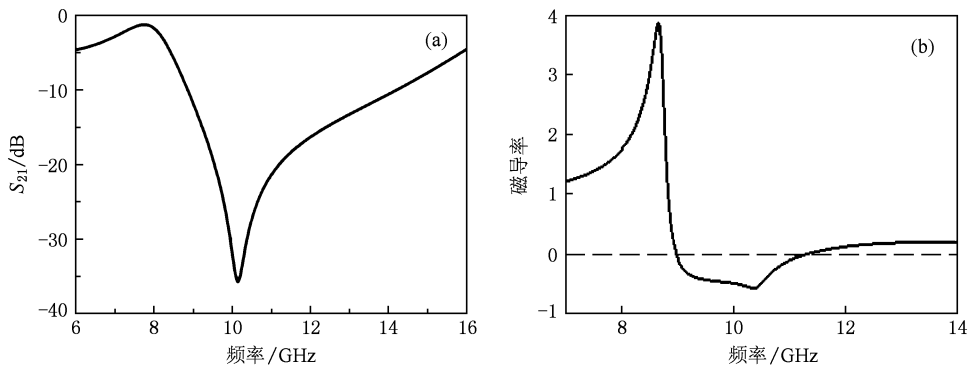


图3 磁谐振器的 S_{21} 和磁导率图 (a) 散射参数, (b) 磁导率

3. 左手材料结构设计

根据 Pendry 的理论^[18], 由金属导线阵列可实现负等效介电常数. 在不破坏整体结构的旋转对称性的前提下, 将磁谐振器与金属导线阵列相组合, 如图 4(a) 所示. 当电磁波在该结构中传播时, 位于介质板两侧的磁谐振器和金属导线会产生耦合, 增大了电磁波传播时的损耗. 为了降低损耗, 将金属导线与磁

谐振器设置在介质板的同侧, 如图 4(b) 所示. 而且这种共面的结构也更简单, 易于实际加工. 但在该结构中金属导线与磁谐振器之间存在耦合, 对磁谐振和电谐振的谐振频率产生干扰, 不利于负折射率的实现. 改进图 4(b) 中的结构, 将磁谐振器与共面的短金属导线相组合, 设计出的结构如图 4(c) 所示.

在改进后的结构中金属短线的线宽为 w , 厚度为 h . 当电磁波平行入射时, 一方面磁场作用在短金属导线上的效应很弱, 基本可以忽略, 电场作用在

短金属导线上实现负介电常数;另一方面短金属导线的加入没有形成新的电流回路,故对原有磁谐振器中的磁响应影响很小. 同时短金属导线的加入也不会破坏原有结构的对称性.

用 CST Microwave Studio 软件对图 4(c)中的结构单元进行仿真,边界设置与磁谐振器仿真设置相

同. 散射参数 S_{21} 如图 5(a) 所示,等效磁导率(实线)、等效介电常数(虚线)如图 5(b)所示. 折射率(实线为实部(Re),虚线为虚部(Im))如图 6 所示. 添加短金属导线后,磁导率在 7.0—10.2 GHz 为负值,介电常数在 7.0—16.5 GHz 为负值,折射率在 7.0—10.1 GHz 为负值,相对带宽达到 36%.

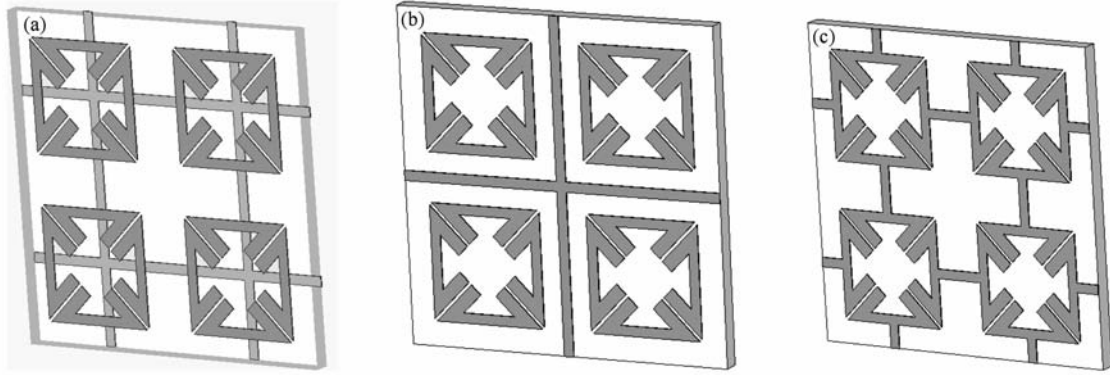


图 4 单面金属结构设计 (a)磁谐振器与金属导线阵列相组合,(b)金属导线与磁谐振器设置在介质板同侧,(c)磁谐振器与共面的短金属导线相组合

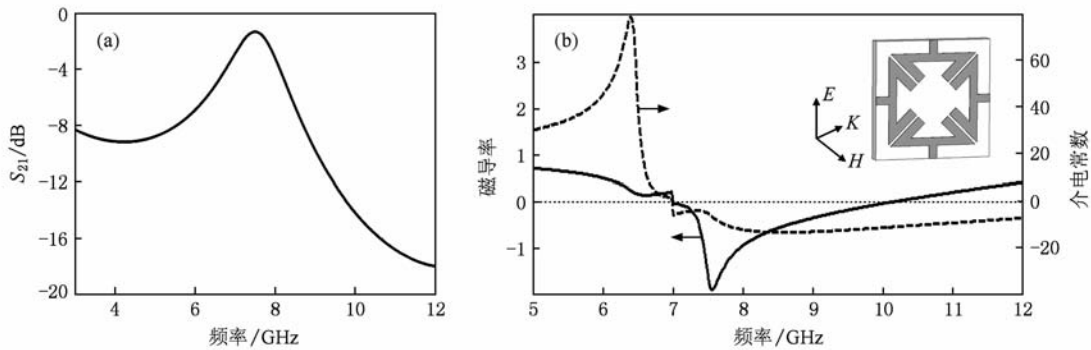


图 5 单元结构的 S_{21} 参数与等效磁导率和等效介电常数 (a) S_{21} 参数,(b) 等效磁导率和等效介电常数

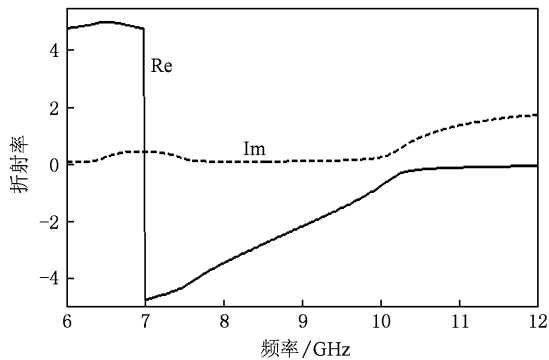


图 6 改进后单元结构的折射率

当仅考虑平行于电场方向的短金属导线时,建

立该结构的等效电路,如图 7 所示,表明该结构的设计既符合磁谐振器的单回路镜像对称设计原理,也符合电谐振器的双回路镜像对称设计原理^[21]. 短金属导线的电感为 L_2 ,近似认为与磁谐振器中的电感 L_1 相同,即 $L_1 \approx L_2$. 考虑垂直于电场方向的短金属导线的电感 L_2 ,计算整体结构中的电容和电感,可得磁谐振频率为

$$f'_m = \frac{1}{2\pi \sqrt{(3L_1)C}} = \frac{\sqrt{6}}{3} \frac{1}{2\pi \sqrt{2L_1C}}, \quad (2)$$

与(1)式结果相比较,添加短金属线后,磁谐振频率降低并且为原结构的 $\sqrt{6}/3$. 如图 3 中所示磁谐振器的谐振频率 $f_m = 8.9$ GHz,如图 5(b) 中所示,添加短金属导线后结构的磁谐振频率 $f'_m = 7.0$ GHz \approx

8.9· $\sqrt{6}/3$ GHz. 短金属线的添加改变了结构中的电感, 在电场方向产生电谐振的同时降低了原有磁谐振的频率, 使该结构同时具有负等效磁导率和负等效介电常数. 理论分析与仿真结果相符合.

在传统磁谐振器与连续金属导线组合的结构中, 金属导线的宽度影响磁谐振和电谐振的频率以及通带的宽度^[23]. 改变该结构中短金属导线的宽度, 并进行仿真, 结果如图 8 所示. 短金属导线宽度的变化对整体结构的磁谐振频率、电谐振频率以及通带宽度的影响均不大, 基本可以忽略不计. 结果表明该结构具有良好的容错能力, 有利于实际加工. 同时, 当磁谐振器的尺寸减小时, 可以相应的减小短金属导线的尺寸, 设计出左手材料结构, 这对于设计红外及太赫兹频率范围下的左手材料也具有参考价值.

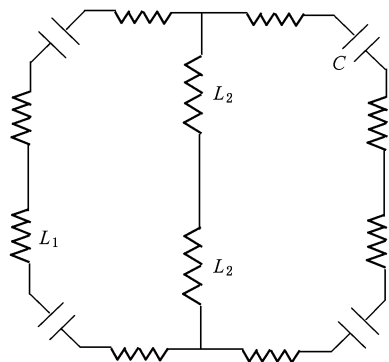


图 7 改进后单元结构的等效电路

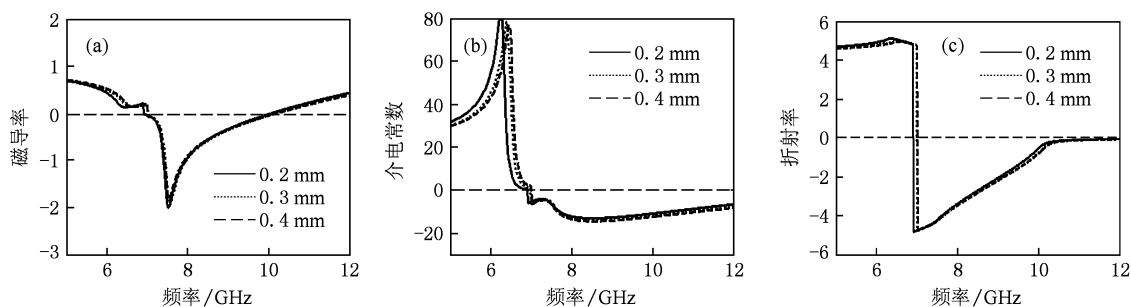


图 8 金属导线宽度变化时, 单元结构的磁导率, 介电常数和折射率变化图 (a) 磁导率, (b) 介电常数, (c) 折射率

4. 结 论

本文将磁谐振器与共面短金属导线相结合, 设计出了一种基于单面金属结构的二维左手材料, 该结构在 7.0—10.1 GHz 具有负折射率, 并且相对带

宽达到 36%. 该结构有效地克服了结构设计中的双各向异性, 同时短金属导线宽度的变化对整体结构的谐振频率及通带宽度影响很小, 具有良好的容错能力. 这些使该结构更易于实际加工而且对于设计红外及太赫兹等高频范围下的左手材料具有重要意义.

[1] Sivukhin D V 1957 *Opt. Spektrosk* **3** 308
 [2] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
 [3] Smith D R, Willie Padilla J, Vier D C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
 [4] Plum E, Zhou J, Dong J, Fedotov V A, Koschny T, Soukoulis C M, Zheludev N I 2009 *Phys. Rev. B* **79** 035407
 [5] Pendry J B 2004 *Science* **306** 1353
 [6] Rogacheva A V, Fedotov V A, Schwanecke A S, Zheludev N I 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 177401
 [7] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczak T M, Kong J A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 151909
 [8] 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]
 [9] Verney E, Sauviac B, Simovski C R 2004 *Phys. Lett. A* **331** 244
 [10] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Fu Z T, Ma H, Yang Y M 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 155413
 [11] Dolling G, Enkrich C, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2006 *Science* **312** 892
 [12] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T, Soukoulis C M, Economou E N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
 [13] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theor. Techniq.* **47** 2075
 [14] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
 [15] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977

- [16] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Gu C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3324 (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** 3324]
- [17] Lv J H, Yan B R, Liu M H, Hu X W 2009 *Phys. Rev. E* **80** 026605
- [18] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [19] Schurig D, Mock J J, Smith D R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041109
- [20] Padilla W J, Aronsson M T, Highstrete C, Lee M, Taylor A J, Averitt R D 2007 *Phys. Rev. B.* **75** 041102
- [21] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Yang Y M, Ma H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5015 (in Chinese)[王甲富、屈绍波、徐卓、张介秋、杨一鸣、马华 2008 物理学报 **57** 5015]
- [22] Li Z F, Aydin K, Ozbay E 2009 *Phys. Rev. E* **79** 026610
- [23] Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036622

A two-dimensional broad pass-band left-handed metamaterial based on single-sided metallic structure *

Chen Chun-Hui¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)2)†} Xu Zhuo²⁾ Wang Jia-Fu¹⁾ Ma Hua¹⁾ Zhou Hang¹⁾

1) (Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Key Laboratory of Electronic Materials Research Laboratory, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 26 December 2009; revised manuscript received 12 May 2010)

Abstract

Through connecting magnetic resonators and coplanar short metallic wires together, a two dimensional left-handed metamaterial based on single sided metallic structure was proposed. Theoretical analysis and simulated results indicated that this construction exhibited negative effective permittivity and permeability simultaneously in a certain frequency range. Its relative negative refraction pass-band reached 36%. Meanwhile, this construction guaranteed relatively stable tolerance of errors. The resonant frequency and the width of the pass band are insensitive to the change in the width of the short metallic wires, which facilitates its fabrication and is of meaning for designing left-handed metamaterial in infrared or terahertz range.

Keywords: left-handed metamaterials, magnetic resonators, broad pass-band, tolerance of errors

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 73.20.Mf, 77.22.Ch

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50632030, 60871027), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2009CB613306) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. SJ08F01).

† Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn