

基于三角谐振环的新型六边形谐振环金属线复合 周期结构左手材料性质研究^{*}

张淳民^{1)†} 孙明昭¹⁾ 袁志林²⁾ 宋晓平¹⁾

1) 西安交通大学理学院, 西安 710049)

2) 武汉邮电科学研究院, 武汉 430074)

(2008 年 7 月 1 日收到, 2008 年 8 月 2 日收到修改稿)

通过实验及仿真研究了三角谐振环组合新型六边形谐振环金属线复合周期结构左手材料. 仿真研究了以金属铜三角开口谐振环(SRRs)为基本单元的周期结构负磁导率材料, 与闭口环(CSRRs)结果对比发现三角开口谐振环能产生很好的谐振效果即能产生负磁导率, 并且多层单元仿真发现多个谐振环耦合能提高谐振频率并加宽谐振频段. 设计、制作并实验和仿真研究了三角开口环为基本单元的六边形谐振环金属线复合周期结构左手材料, 仿真结果在 9.8GHz 附近出现良好负折射效应, 实验验证在 9.3—10.8 GHz 出现良好负折射效应, 与仿真结果具有良好的-致性. 该研究对新型周期结构左手材料的研究、设计和研制具有重要的科学意义和应用前景.

关键词: 左手材料, 三角环组成的六边形谐振环, 负折射

PACC: 4270Y, 4110H, 7790

1. 引 言

介电常数 ϵ 及磁导率 μ 是决定电磁波在物质中传播属性的两个基本物理量. 自然界中大多数材料的 ϵ 和 μ 都为正值, 有些自然物质, 如金属和等离子体, 对频率低于其等离子体频率的电磁波而言, ϵ 表现为负值. 但迄今为止, 自然界没有发现 ϵ 和 μ 同时为负值的材料. 1968 年, Veselago 提出了“左手材料”的概念, 并指出当 ϵ 和 μ 都为负值时, 电矢量、磁矢量和波矢之间构成左手系, 区别于传统材料中的右手系. 所以, 他称这种假想的物质为左手性介质(left-handed materials, LHM), 同时还预言了其在频移、辐射、物辐射压、折射以及透镜成像等方面具有的种种奇妙性质^[1]. 因为左手材料的折射率为负值, 所以“左手材料”又名“负折射率材料”. 但是在此后的很长一段时间里, 因为自然界没有 ϵ 和 μ 同时为负值的材料, 且没有相关的实验事实支撑, 负折射率材料得不到足够的重视, 没有什么大的发展.

直到 1996 年, Pendry 等重新开启了这方面的研

究. 他指出, 可以利用细金属线阵列实现微波频段的负介电常数^[2]. 1999 年, Pendry 等阐述了如何通过组合开口谐振环结构实现负的磁导率, 并且给出了几种可行的物理模型^[3], 从理论上仔细地研究了细金属线阵列和开口谐振环阵列的电磁性质, 极大地推动了这一领域的发展. 紧接着, Smith 等又走出了关键的一步. 他们先在理论上研究了将细金属线阵列和开口谐振环阵列复合得到负折射率材料的可能性^[4], 然后在微波实验中合成了介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负值的材料, 并成功地在实验室中观测到了微波频段的负折射效应^[5,6]. 这一重大进展重新激发了人们研究负折射率材料的兴趣, 特别是高方向性天线、超级透镜等方面的应用^[7-23], 左手材料成为了科学界的热门话题.

Smith 等人最早实现且用实验展示的负折射率材料就是由矩形谐振环——细金属线阵列复合而成, 如图 1(a), (c) 所示. 细金属线阵列可以产生负介电常数, 谐振环阵列则可以产生负的磁导率, 在同一电磁波频段内将其复合, 则可以得到折射率为负值的负折射率材料.

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40537031), 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号: 2006AA12Z152), 国防基础科研计划项目(批准号: A1420080187), 国家自然科学基金(批准号: 40875013, 40375010, 60278019), 陕西省科技攻关项目(批准号: 2005K04-G18)资助的课题.

[†] E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

前面讨论的矩形谐振环——细金属线复合阵列模型,其理论基础就是 C 形谐振环——细金属线阵列复合模型,如图 1(b)(c)所示。

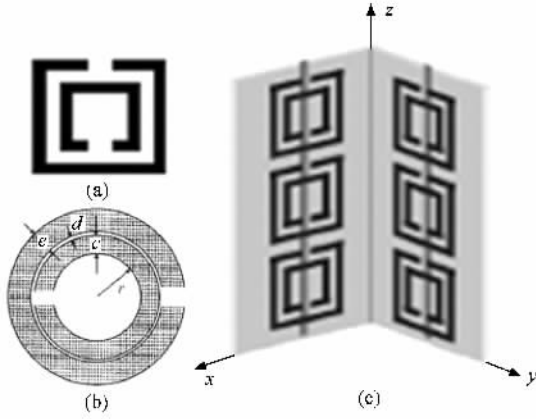


图 1 (a) 矩形谐振环结构 (b) C 形环谐振结构 (c) 谐振环及金属线的空间结构

对 C 环,有

$$\omega_{n0}^2 = \frac{2lc_0^2}{\pi \ln \frac{2c}{d} r^3},$$

$$\omega_{mp}^2 = \frac{1}{1 - \pi \frac{r^2}{a^2}} \omega_0^2,$$

$$\frac{\mu(\omega)}{\mu_0} = 1 - \frac{\omega_{mp} - \omega_{n0}^2}{\omega^2 - \omega_{n0} + i\gamma\omega},$$

γ 为损耗因子, ω_{n0} 为磁谐振频率, ω_{mp} 为磁等离子体频率, l 为两 C 环间距。

当入射电磁波的频率处于磁谐振频率 ω_0 和磁等离子体频率 ω_{mp} 之间时,磁导率为负值,即满足

$$\omega_0 < \omega < \omega_{mp}. \quad (1)$$

之前讨论过的开口谐振环——细金属线复合结构均可以作为负折射率材料的结构单元,但这种结构损耗大,频段宽度窄,而且制作和组装复杂。2004

年, Ran 等提出了一种新型的周期复合负折射率材料—— Ω 形负折射率材料^[7]。与之前的复合阵列模型相比损耗较小,频段宽,结构如图 2 所示。

本文基于三角谐振环设计出新型六边形金属线复合周期结构左手材料,与上述几种相比损耗较大,但负折射性能好,频段宽,不失为一种良好的新型周期结构左手材料。

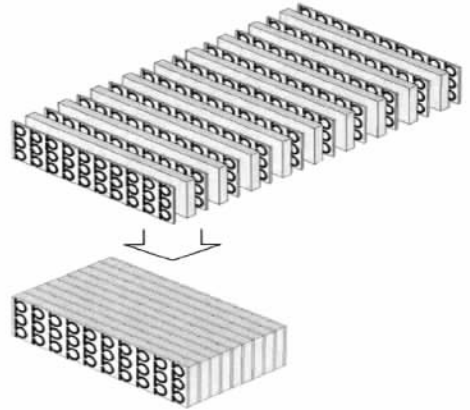


图 2 Ω 形负折射率材料

2. 基于三角谐振环实现负磁导率的仿真及分析

我们利用 CST Microwave Studio 软件进行仿真,结构单元以及结构尺寸如图 3 所示,首先使开口环二维单层 5×4 排列,两个方向的环中心距都为 6 mm,微波传播方向平行于 SRR 平面,得到频率与透射比 S_{21} 曲线如图 4 所示。

图 4 实线表示三角开口谐振环(SRRs) S_{21} 曲线,虚线表示同样尺寸的闭和三角环(CSRRs) S_{21} 曲线,通过对比可以发现在 2.9 GHz 附近的吸收峰在闭和三角环结果中没有出现,说明负峰代表负磁导率的

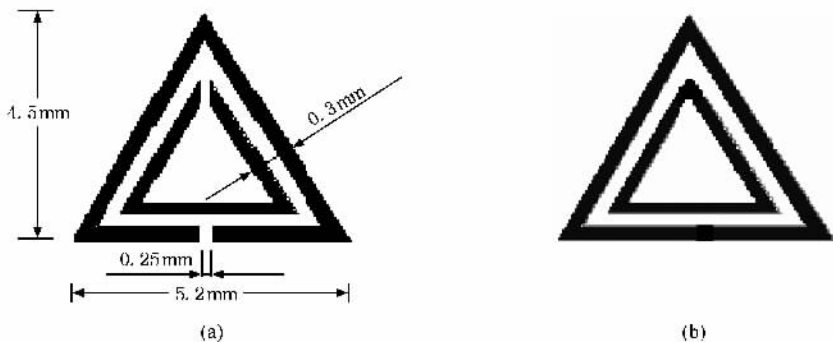


图 3 三角谐振环单元结构示意图 (a) 开口谐振环 (b) 闭口环

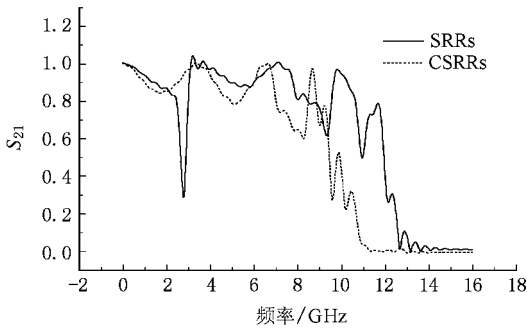


图4 单层三角谐振环仿真结果

产生, 频率满足(1)式. 而 13 GHz 以后的截止波段两种曲线都有出现, 说明不是负磁导率引起的, 可能是金属环电磁响应的结果或者是周期结构布拉格散射引起的^[81].

为了研究多个谐振环耦合对谐振频率的影响, 我们使谐振环三层三维排列, 层间距为 5 mm, 得到频率与透射比 S_{21} 曲线如图 5 所示.

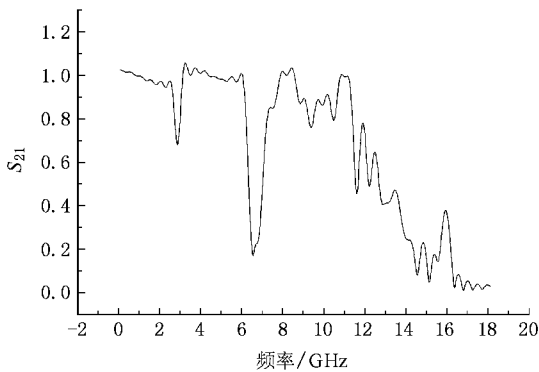


图5 三层三角谐振环仿真结果

从上图可以看出, 三层谐振环 2.9 GHz 附近的谐振吸收明显减弱, 说明单个三角环的谐振遭到破坏, 而负磁导率谐振频率则升高到 6.5 GHz 左右, 谐振频段也有所加宽, 说明多层耦合能提高谐振频率并加宽谐振频段, 具体耦合机理有待进一步研究. 下面我们将设计六个三角谐振环组合成六边形谐振结构并进行仿真和实验研究.

3. 三角谐振环组合六边形谐振环与金属线复合周期结构仿真及分析

如图 6 所示, 六边形周期结构的一个单元由六个小三角形状的开口谐振环组成, 用于产生负的磁导率; 基板背面覆细金属线, 用于产生负的介电常数; 二者复合在一起可以在谐振频率重叠区域内产生负的折射率.

六边形 SRRs 和金属线分别二维单层交叉排列如图 8(a), 单元中心距为 12 mm.

图 7 为金属线和六边形谐振环各自独立仿真得到的结果, 从图 7(a) 可以看出金属线阵列的等离子体频率在 15.5 GHz 左右, 低于此频率的电磁波都将被谐振环吸收, 也就是介电常数为负值. 图 7(b) 可看出频率在 10 GHz 和 14 GHz 之间的电磁波满足负磁导率条件. 综合图 7 的结果可以推断频率在 10 GHz 和 14 GHz 之间可能会出现负折射现象. 下面我们将两种机理结合, 对六边形谐振环金属线复合结构进行仿真研究.

六边形金属线棱镜仿真模型如图 8(a) 所示, 两个方向的单元中心距均为 12 mm, 电磁波从正前方入射, 频率设置 0—15 GHz, 得到 S_{21} 曲线如图 8(b)

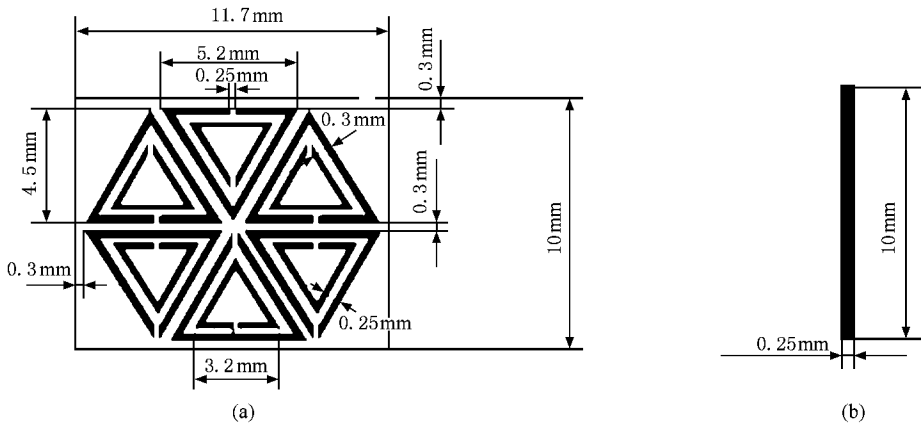


图6 三角谐振环组合六边形结构单元示意图 (a) 正面结构 (b) 反面结构

所示.

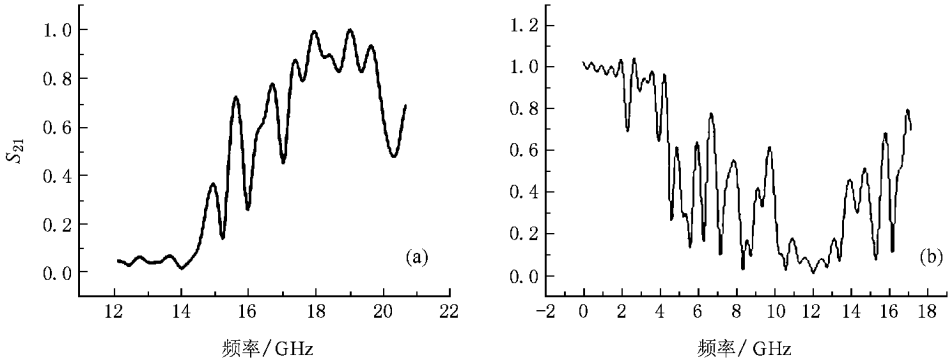


图 7 仿真结果 (a)金属线阵列 S_{21} 曲线 (b)六边形 SRRs 棱镜 S_{21} 曲线

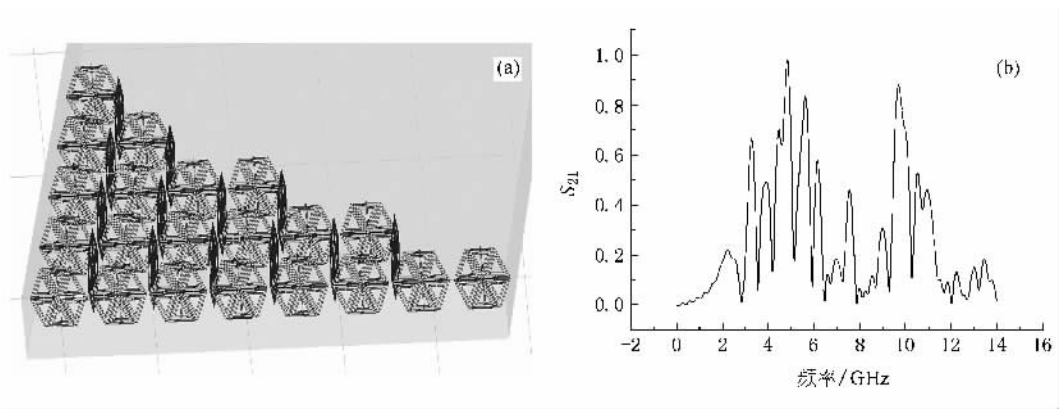


图 8 (a)六边形金属线复合结构棱镜试验模型 (b)仿真 S_{21} 曲线

按照图 8 (b)所示的结果,在 5 GHz 和 9.8 GHz 左右出现透射峰,按照前面的仿真结果推断 9.8 GHz 左右的透射峰可能是负折射峰,我们选择 9.4 GHz 观察能量透射直观图,得到如图 9 所示结果,而 5 GHz 左右的透射图没有出现负折射效应,说明非负折射引起的透射峰.

图 9 中三角区域为棱镜样品模型,可以看出当频率在 9.4 GHz 时复合周期结构表现出明显的负折射效应,与前面的推断基本符合.9.8 GHz 左右出现负透射峰,说明三角谐振环组合六边形模型在理论上是可行的.但是复合后的负折射频段和 SRRs 及金属线单独仿真的谐振频段有些出入,这是两种机理(SRRs 和金属线阵列)相互影响的结果.本文最后一部分将对此结果进行实验验证.

下面将定性分析六边形周期结构的特殊负折射效应.对单个小三角形状的开口谐振环结构来说,其谐振频率也位于 $[\omega_{m0}, \omega_{mp}]$ 之内,符合一般的变化趋势.与之前的矩形开口谐振环、C 形开口谐振环周期结构类似,六边形周期结构中的每一个小单元(三角开口谐振环)即是一个小的谐振单元,能够产生负的磁导率,不失为一般性.

但是当将六个小三角形状的开口谐振环组合成一个大的六边形单元时,其必将产生很多特殊的效应,包括谐振频段的移动,原因有以下几个:1)每个小三角形状的开口谐振环对外界电磁场发生电磁谐

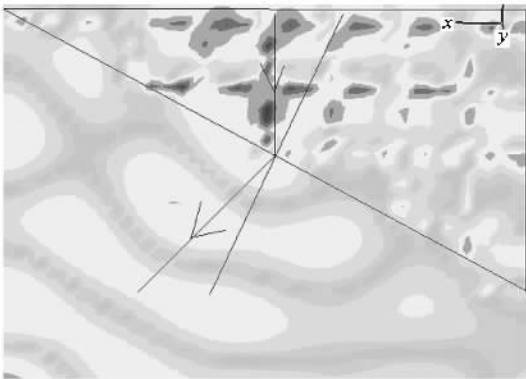


图 9 六边形金属线复合结构仿真 9.4 GHz 频率透过直观图

振响应,同时它们各自之间也存在着相互的电磁干扰,各自的谐振条件遭到破坏,将会使得处于一个三角单元负折射频段内的电磁波不能顺利通过,有可能被各个小三角形状的开口谐振环吸收了,而新的谐振条件会产生新的谐振频段.2)同时,相应的金属结构增多了,而金属结构对电磁波存在着极大的电磁吸收,必将加大各个频率的损耗,很多频率的电磁波都会被吸收掉,所以很多频段的透过率会降低.下面将实验验证以上推断.

4. 六边形金属线复合周期结构样品制作与实验验证

根据如图 6 所示的结构,利用 FR4 印刷电路板覆铜将六边形金属线复合周期结构制成棱镜样品如图 10(a),基板厚度为 0.3 mm.根据实验设置入射角约为 20°,借助 HP8756A 标量网络分析仪和平板波导进行验证和分析.

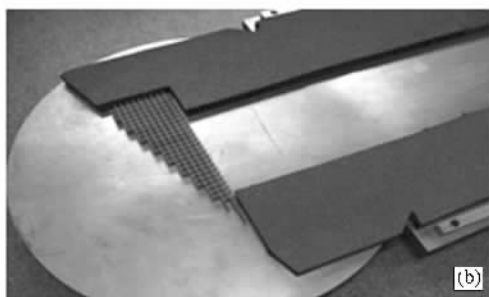
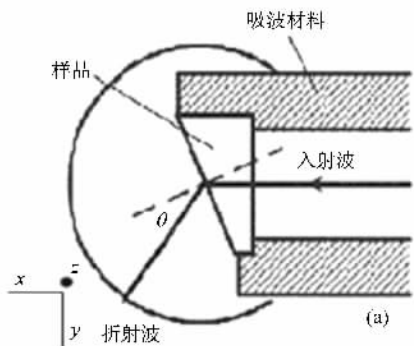


图 10 (a) 实验装置示意图 (b) 实验装置

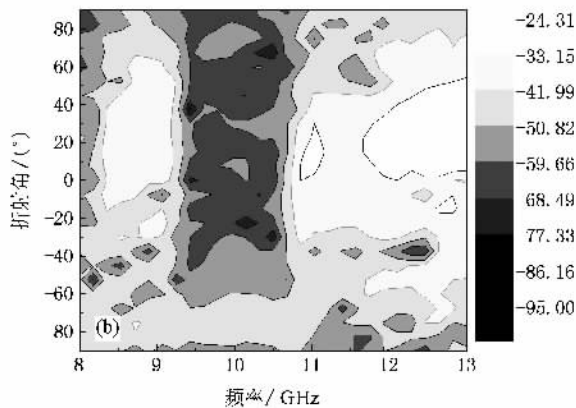
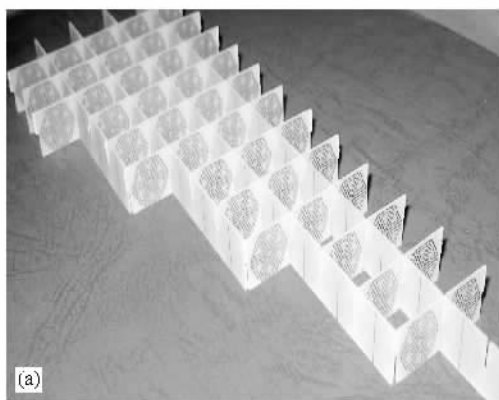


图 11 (a) 样品照片 (b) 微波透射率 (dB) 与频率及折射角关系图

通过棱镜实验,得到如图 11 和图 12 所示的实验结果,分析得出如下结论:

1)大部分频段内的电磁波能量损耗较大,透过率都在 -30 dB 以下.这样正和理论分析的完全一致,因为很多频率的电磁波不是被谐振吸收了,就是被金属结构吸收了.

2)负折射频段大约是 9.3—10.8 GHz,说明此频段的电磁波刚好处于六个三角开口谐振环耦合之后谐振频段低于金属线等离子体谐振频率的波段,属于可通过频率区间范围之内,故可以顺利通过,且出现在发生负折射现象的位置,折射率为负值.

3)从图 11 可以看出频率为 10 GHz 的能量负折

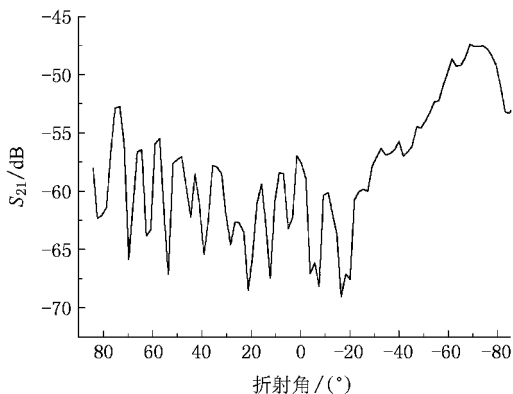


图 12 频率 10 GHz 时折射角与透过率的关系曲线

射部分强度远大于正角度折射部分,表现出良好的负折射性能。

5. 结 论

通过实验与仿真方法对新型三角开口谐振环组合的新型六边形左手材料样品进行了深入研究,得出了以下结论:

1. 仿真研究了三角开口谐振环阵列,发现单层三角开口谐振环在 2.9 GHz 附近产生负磁导率,并且三层谐振环仿真结果显示多环耦合能提高并加宽谐振频段,进一步设计并仿真研究了三角开口谐振环组合六边形谐振环,并且复合金属线阵列后在 9.8 GHz 左右出现良好的负折射效应,说明三角开口谐振环组合六边形金属线复合周期结构左手材料具有可行性。

2. 通过电路板刻蚀研究,制作了六边形金属线复合周期结构左手材料并进行了实验验证,在 9.3—10.8 GHz 出现良好负折射效应。

3. 通过对比发现,实验和仿真结果有较小的出入,实验结果在 9.3—10.8 GHz 出现负折射效应,而仿真结果负折射频段为 9—11.5 GHz,峰值在 9.8 GHz 左右。误差除了受仿真精度的影响之外,覆铜基板对实验结果也有一定的影响,还有样品制作时的尺寸误差,试验条件限制等都是误差造成的原因。

4. 开口谐振环金属线复合周期结构是最传统的左手材料,本文通过利用开口三角谐振环组合,设计出了新型的六边形金属线复合周期结构左手材料,测试结果显示在某一频段具有良好的负折射效应,对新型周期结构型左手材料的研究、设计和研制具有重要的指导意义。

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Tran.* **47** 2075
- [3] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [4] Smith D R, Padilla W J, Vieret D C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [6] Shelby R A, Smith D R, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 489
- [7] Chen H S, Ran L, Huangfu J, Zhang X, Chen K, Grzegorzczak T M, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [8] Kong J A, Wu B L, Zhang Y 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2084
- [9] Hu Y H, Fu X Q, Wen S C, Su W H, Fan D Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2970
- [10] Huangfu J, Ran L, Chen H, Zhang X, Chen K, Grzegorzczak T M, Kong J A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **90** 1098
- [11] Zheng Q, Zhao X P, Fu Q H, Zhao Q, Kang L, Li M M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5683 [in Chinese] 郑 晴、赵晓鹏、付全红、赵乾、康 雷、李明明 2005 物理学报 **54** 5683]
- [12] Ziolkowski R W 2001 *Phys. Rev. E* **64** 056625
- [13] Ye J Y, Zhang C M, Zhao B C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 67 (in Chinese) [叶健勇、张淳民、赵葆常 2008 物理学报 **57** 67]
- [14] Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红、张淳民、赵葆常等 2006 物理学报 **55** 6374]
- [15] Yuan Z L, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6413 (in Chinese) [袁志林、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 6413]
- [16] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]
- [17] Zhang C M, He J 2006 *Optics Express* **14** 12561
- [18] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B *et al* 2006 *Optik.* **117** 265
- [19] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [20] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **68** 15
- [21] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2003 *Opt. Commu.* **227** 221
- [22] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2002 *Opt. Commu.* **203** 21
- [23] Zhang C M, Yan X G, Zhao B C 2008 *Opt. Commu.* **281**(8) 2050

Study on new periodic structures of left-handed material composed of hexagonal SRRs and metal wires^{*}

Zhang Chun-Min^{1)†} Sun Ming-Zhao¹⁾ Yuan Zhi-Lin²⁾ Song Xiao-Ping¹⁾

¹ *School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

² *Wuhan Research Institute of Post & Telecommunication, Wuhan 430074, China*

(Received 1 July 2008; revised manuscript received 2 August 2008)

Abstract

We studied new left-handed material composed of hexagonal split resonant rings (SRRs) based on trigonal resonators and metal wires through simulation and experiment. Simulated negative permeability material based on periodic structures of trigonal SRRs, in contrast to simulation result based on closed split resonant rings (CSRRs), we found that the trigonal SRRs can generate negative permeability, and multilayer SRR simulation shows the coupling can enhance the resonant frequency and broaden resonant frequency band. We designed a new kind of left-handed material combined with hexagonal resonator based on trigonal resonators and copper wires. Simulation shows that the structures have good left-handed property. We have fabricated experimental samples which show negative refraction when the frequency lies in 9.3—10.8 GHz range. This has important significance on design and study of new types of periodic structures of left-handed materials.

Keywords : left-handed material, negative refraction, trigonal split resonant rings

PACC : 4270Y, 4110H, 7790

^{*} Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031), National High Technology Research and Development Program of China 863 (Grant No. 2006AA12Z152), National Defence Basic Scientific Research Project (Grant No. A1420080187), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40875013, 40375010, 60278019) and the Shanxi Program of Science and Technology, China (Grant No. 2005K04-G18).

[†] E-mail : zcm@mail.xjtu.edu.cn