

新型八边形谐振环金属线复合周期结构 左手材料奇异性质研究*

孙明昭 张淳民[†] 宋晓平

(西安交通大学理学院, 非平衡物质结构及量子调控教育部重点实验室, 西安 710049)

(2009 年 5 月 13 日收到; 2009 年 11 月 20 日收到修改稿)

通过实验及仿真研究了基于 C 环的新型八边形开口谐振环金属线复合周期结构左手材料. 以金属铜八边形谐振环(SRRs)为基本单元的周期结构负磁导率材料, 与闭口环(CSRRs)结果对比发现八边形谐振环能产生很好的谐振效果即能产生负磁导率; 复合结构仿真结果显示, 八边形谐振环金属线复合结构实现负折射具有可行性. 设计、制作并实验和仿真研究了两种尺寸的八边形谐振环金属线复合周期结构左手材料, 实验结果显示, 分别在 9.8—15 GHz 和 9.5—15 GHz 出现良好负折射效应, 表明小尺寸材料负折射频段较宽但整体能量透过率较小. 通过与尺寸相近的传统 C 环样品实验对比发现八边形样品损耗较大, 但其负折射区域能量分布比例较大, 具有一定的优越性. 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, 在国防、通信等领域也具有广阔的应用前景.

关键词: 复合结构, 负折射, 八边形谐振环

PACC: 4110H, 7790

1. 引 言

1968 年 Veselago^[1]首次提出了“左手材料”的概念, 指出当介电常数 ω 和磁导率 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. 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. 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”.

1996 年 Pendry 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 年又接着发表论文, 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^[4]又走出了关键的一步, 先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材料的可能性, 然后在微波实验中首次合成了介电常数 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].

Smith 等^[6]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)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. 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, 即金属线阵列复合模型, 如图 1(b)所示.

对 C 环, 有

$$\omega_{m0}^2 = \frac{3lc_0^2d}{\pi Ln2cr^3},$$

* 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(批准号:2006AA12Z152), 国防基础科研计划(批准号:A1420080187), 国家自然科学基金(批准号:40875013, 40375010, 60278019)和陕西省科技攻关项目(批准号:2005K04-G18).

[†] 通讯联系人. E-mail: zem@mail.xjtu.edu.cn

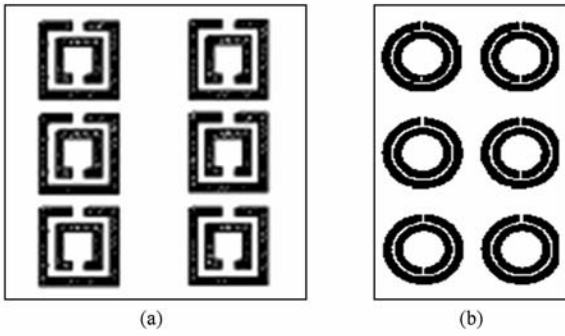


图 1 谐振环结构示意图 (a) 矩形; (b) C 形

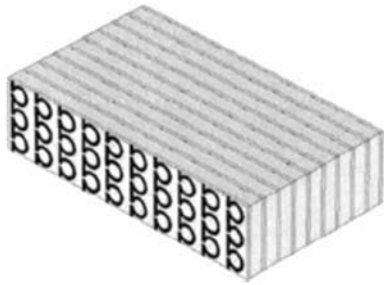


图 2 Ω 形负折射材料

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

$$\frac{\mu(\omega)}{\mu_0} = 1 - \frac{\omega_{mp} - \omega_{m0}^2}{\omega^2 - \omega_{m0} + i\gamma\omega}$$

γ 为损耗因子, ω_{m0} 为磁谐振频率, ω_{mp} 为磁等离子体频率. l 为两 C 环间距.

之前讨论过的开口谐振环即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^[8-24]. 2004 年, Ran 等^[7]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. 与之前的复合阵列模型相比损耗较小,频段宽,其结构如图 2 所示.

本文基于 C 环设计了八边形谐振环金属线复合周期结构左手材料,跟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.

2. 基于八边形开口谐振环实现负磁导率的仿真及分析

利用 CST Microwave Studio 软件进行仿真. 结构单元以及结构尺寸如图 3 (a) 所示,铜线宽度为 0.25 mm,厚 0.03 mm. 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 5 mm,微波传播方向平行于八边形开口谐振环 (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 SRRs 的 S_{21} 曲线,虚线表示同样尺寸闭和环 (CSRRs) 的 S_{21} 曲线. 通过对比可以发现,在 10 GHz 附近的吸收峰在 CSRRs 结果中没有出现,说明负峰代表负磁导率的产生,频率满足 (1) 式. 而 17 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 Bragg 散射引起的^[25].

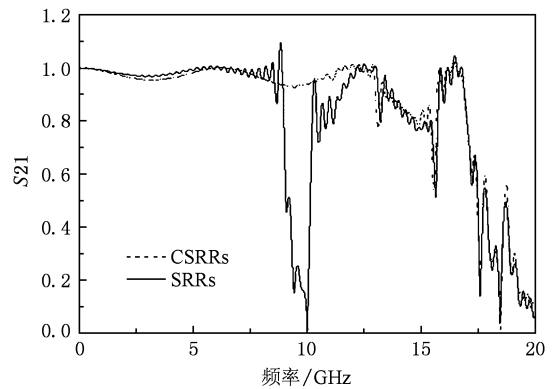


图 4 单层八边形谐振环仿真结果

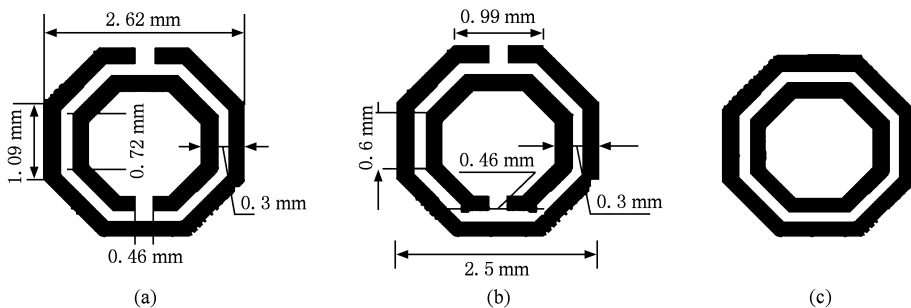


图 3 三角谐振环单元结构示意图 (a) 开口谐振环大尺寸; (b) 小尺寸; (c) 闭口环

3. 八边形谐振环金属线复合周期结构仿真及分析

为了研究多层谐振环耦合对谐振频率的影响,我们对复合结构里的金属线单独进行仿真,线长 9.8 mm,厚 0.03 mm,得到 S_{21} 曲线如图 6(a)所示,频率于 10 GHz 左右的电磁波不能通过,即介电常数为负值.使图 3(a)所示的八边形谐振环 3 层 3 维排列,层间距为 3.1 mm,得到频率与透射比 S_{21} 曲线如图 6(b)所示.从上图 6(b)可以看出,3 层八边形谐振环 10 GHz 附近的吸收波段明显变宽,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.

结合谐振环产生负磁导率的机理,我们仿真了图 5 中的复合结构,得到 S_{21} 曲线如图 7 所示;而取频率为 10GHz 时的能量透过直观图如图 8 所示.

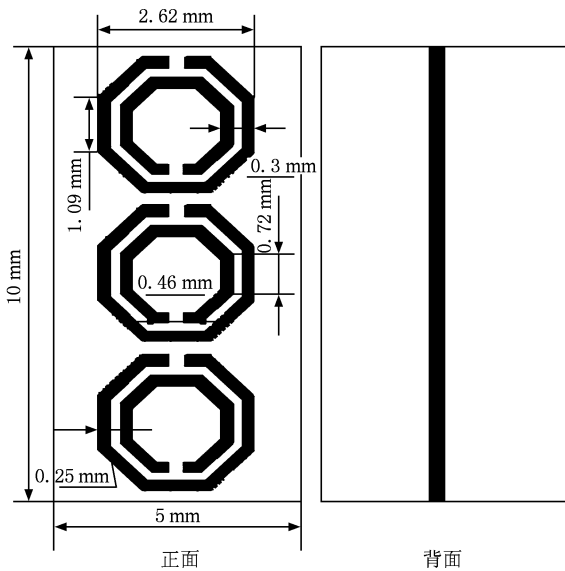


图 5 谐振环金属线复合单元结构图

复合结构的 S_{21} 曲线有些杂乱,并没有得到阶跃性的通带,说明此结构有一定的局限性,金属线阵列和谐振环阵列之间的相互作用也比较复杂,两种机制并不是简单的复合.在图 8 的 10 GHz 的电磁波透过直观图中,三角区域为复合周期结构,可以看出负折射效应比较明显,但是动态图不太稳定,一定程度上受相位的影响.通过仿真发现八边形谐振环金属线复合周期结构可以实现负折射,肯定其可行性.然后制作相应的样品进行实验验证.

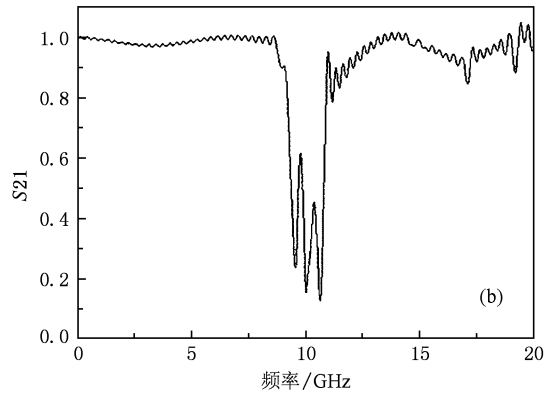
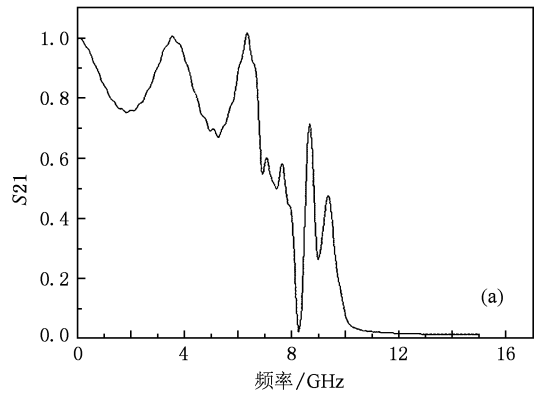


图 6 金属线阵列和 3 层八边形谐振环的 S_{21} 曲线 (a) 金属线阵列; (b) 三层八边形谐振环

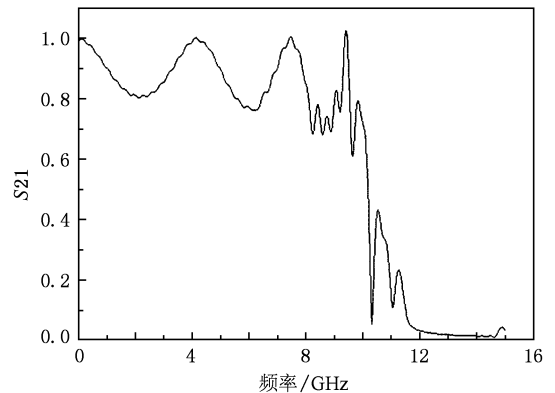


图 7 八边形金属线复合阵列仿真 S_{21} 曲线

4. 八边形谐振环金属线复合周期结构实验验证

根据如图 3 所示的结构,利用 FR4 印刷电路板覆铜将八边形金属线复合周期结构制成如图 9(a)所示的棱镜样品,基板厚度为 0.3 mm,借助

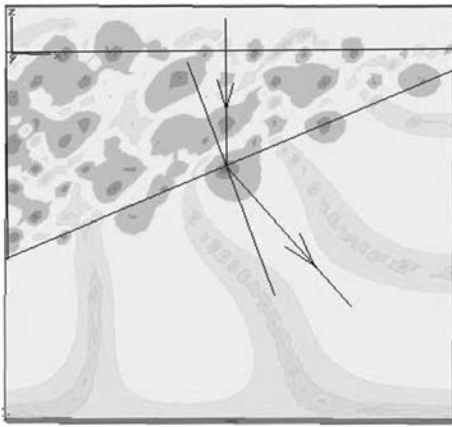


图 8 频率为 10GHz 的电磁波在复合周期结构中的传播直观图

HP8756A 标量网络分析仪和平板波导进行验证和分析,实验装置如图 9(b).

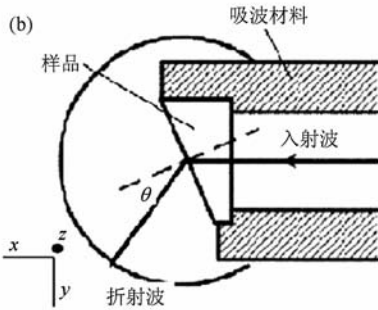
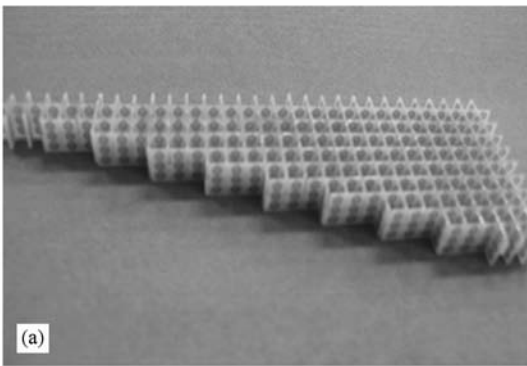


图 9 周期结构样品实验验证 (a) 样品实物照片, (b) 实验装置示意图

图 10 中的色阶表示能量强度,单位为分贝 dB,可以看到正负角度都有能量分布,且部分频段大部分能量都分布在负角度区域,大八边形样品负折射频段大概在 9.8—15 GHz,小八边形样品负折射频段大概在 9.5—15 GHz. 能量的分布既有较强的规律性又有些杂乱,说明两种结构都有一定的局限性,待进一步优化^[26,27].

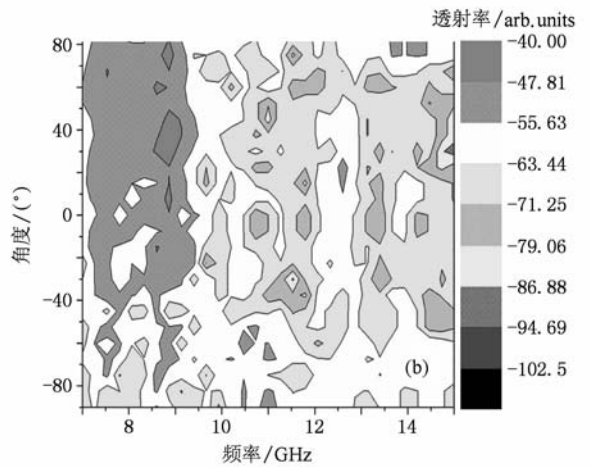
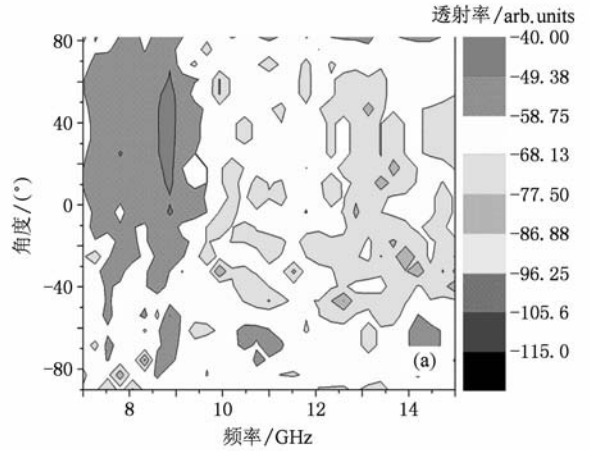


图 10 复合周期结构样品透射率实验结果 (a) 大八边形样品, (b) 小八边形样品

为了明确谐振环结构对实验结果的影响,我们同时做了尺寸相近的传统 C 环金属线复合周期结构左手材料的实验,其结果如图 11 所示.

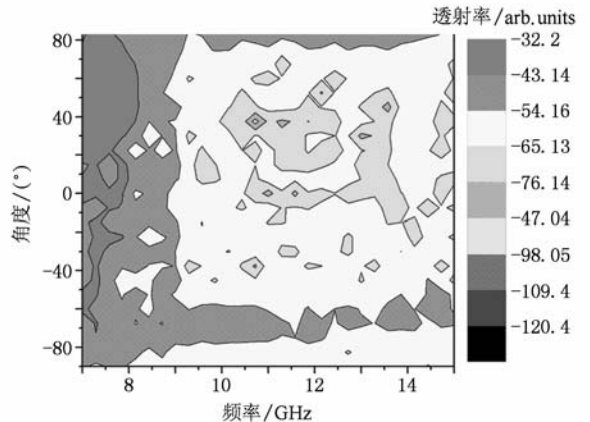


图 11 尺寸相近的 C 环金属线复合周期结构棱镜试验结果

从图 10 和图 11 可以看出,大部分频段内的电磁波能量损耗较大,通过率都在 -30dB 以下. 因为很多频率的电磁波不是被谐振吸收了,而是被金属结构吸收了,基板对能量的透过率也有很大的影响. 另外能量在正负角度都有分布. 这说明两种结构都有局限性,其电磁响应也比较复杂,但能量负折射部分强度大于正折射区域且更加稳定,表现出较好的负折射效应.

5. 结 论

本文通过仿真和实验两种方法对两种不同尺寸的八边形开口谐振环组合金属线周期结构左手材料样品进行研究,得出以下结论: 1) 通过仿真八边形谐振环阵列在 10GHz 附近产生负磁导率,进一步设计并仿真研究了八边形谐振环与金属线复合周期结构,并且仿真结果显示此结构可以在一定波

段实现负折射. 最后通过电路板刻蚀制作了相应左手材料样品并进行实验验证,两种尺寸样品分别在 $9.8\text{—}15\text{GHz}$ 和 $9.5\text{—}15\text{GHz}$ 出现较好的负折射效应,可见随着谐振环尺寸的减小,负折射频段加宽,但是透过率相应减小. 2) 实验结果显示,能量在正负角度都有分布,负折射频段大部分能量分布在负角度区域,表现出较强的规律性,但并不是理想的完全负折射通带. 说明两种结构有一定的局限性,待进一步改进. 3) 通过与尺寸相近的 C 环样品实验结果对比发现,八边形样品负折射频段透过率较 C 环低,但负折射区域能量分布比例较大,有一定的优越性. 本文基于传统的 C 环设计出八边形谐振环金属线复合周期结构左手材料,并且测试结果显示在某一频段具有较好的负折射效应,对新型周期结构型左手材料的设计和具有重要的指导意义.

感谢研究生高鹏对论文所做的校订.

-
- [1] Veselago V G. 1968 *Soviet Phys. USPEKHI* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE* **47** 2075
- [4] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [5] Shelby R, Smith D R, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 489
- [6] Shelby R A, Smith D R, Schulz S 2001 *Science* **292** 77
- [7] Huangfu J, Ran L, Chen H 2004 *Appl Phys Lett.* **84** 1537
- [8] 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]
- [9] Peng Z H, Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Wu F Q 2006 *Acta. Phys. Sin.* **55** 6374 (in Chinese) [彭志红、张淳民、赵葆常、李英才、吴福全 2006 物理学报 **55** 6374]
- [10] 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]
- [11] 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]
- [12] Zhang C M, He J 2006 *Opt. Express* **14** 12561
- [13] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2006 *Optik* **117** 265
- [14] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2004 *Appl. Opt.* **43** 6090
- [15] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2004 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **68** 15
- [16] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2003 *Opt. Commun.* **227** 221
- [17] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B 2002 *Opt. Commun.* **203** 21
- [18] Zhang C M, Yan X G, Zhao B C, 2008 *Opt. Commun.* **281** 2050
- [19] Zhang C M, Xiang L B, Zhao B C 2000 *Proc. SPIE* **4087** 957
- [20] Zhang C M, Zhao B C, Yuan Y, He J 2006 *Proc. SPIE* **6032** T320
- [21] Zhang C M, Zhao B C, Xiang L B, Li Y C, Peng Z H 2006 *Proc. SPIE* **6150** 15001
- [22] Zhang C M, Zhao B C, Li Y C, Ye J Y 2007 *Proc. SPIE* **6279** D2791
- [23] Zhang C M, Yuan Z L, Sun M Z, Wu J F, Gao P 2009 *Appl. Opt.* **49** 281
- [24] Zhang C Z, Zhao B C, Yuan Z L, Huang W J 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 085401
- [25] Aydin K, Guven K 2004 *Opt. Lett.* **29** 2623
- [26] Zhang C M, Ming Z S, Yuan Z L, Song X P 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 1758 (in Chinese) [张淳民、孙明昭、袁志林、宋晓平 2009 物理学报 **58** 1758]
- [27] Ming Z S, Zhang C M, Song X P, Liang G Y, Sun Z P 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 6179 (in Chinese) [孙明昭、张淳民、宋晓平、梁工英、孙占波 2009 物理学报 **58** 6179]

Octagonal split resonant rings composite metal-wires to realize negative refraction *

Sun Ming-Zhao Zhang Chun-Min[†] Sun Xiao-Ping

(*Non-equilibrium Condensed Matter and Quantum Engineering Laboratory of the Key Laboratory of Ministry of Education;*

School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 13 May 2009; revised manuscript received 20 November 2009)

Abstract

Traditional C-shaped split resonant ring (SRR) composite metal wire periodic structure is studied through simulation and experiment. Comparing the simulation result of negative permeability material based on periodic structure of octagonal SRR with that of closed split resonant rings (CSRRs), we find that octagonal SRRs can produce negative permeability. A new kind of left-handed material combined with octagonal resonators and copper wires is designed, and the simulation result shows that the structure has good left-hand property in a certain frequency band. Experimental samples of two different sizes are fabricated, in which negative refraction happens in ranges of 9.8—15 GHz and 9.5—15 GHz separately: small size sample has more broad negative band but lower transmission rate. By comparison with the experiment result of C-shaped sample we find that the octagonal SRR has a high transmission rate, but energy transmitting through new designed structure shows a more proportion in negative field, which demonstrates better negative behavior. This has important significance on design and study on new periodic structures of left-handed materials.

Keywords: composite structure, negative refraction, octagonal resonator

PACC: 4110H, 7790

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40537031), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA12Z152), the National Defense Basic Scientific Research Project (Grant No. A1420080187), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40875013, 40375010, 60278019), the Science and Technology Key Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2001K06-G12, 2005K04-G18).

[†] Corresponding author. E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn