

# 基于矩形谐振环的新型复合周期结构左手材料研究<sup>\*</sup>

孙明昭 张淳民<sup>†</sup> 宋晓平 梁工英 孙占波

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

(2009 年 1 月 14 日收到, 2009 年 2 月 11 日收到修改稿)

通过实验及仿真研究了基于矩形谐振环的新型三角形和三矩形开口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谐振环和三矩形谐振环(SRRs)为基本单元的周期结构负磁导率材料, 结果显示两种谐振环均能产生很好的谐振效果, 即能产生负磁导率. 设计、制作并实验和仿真研究了三角谐振环和三矩形谐振环金属线复合周期结构左手材料, 实验结果分别在 9.5—13.3 GHz 和 9.8—12.5 GHz 出现良好的负折射效应, 与仿真结果具有较好的一致性. 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, 负折射, 三角形谐振环, 三矩形谐振环

PACC: 4110H, 7790

## 1. 引言

自然界中大多数材料的介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  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,  $\epsilon$  表现为负值. 但迄今为止, 在自然界中没有发现  $\epsilon$  和  $\mu$  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  $\epsilon$  和  $\mu$  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<sup>[1]</sup>. 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  $\epsilon$  和  $\mu$  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.

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<sup>[2]</sup>. 1999 年, Pendry 等接着发表论文, 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<sup>[3]</sup>. 他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<sup>[4]</sup>, 然后在微波实验中合成了介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  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<sup>[5-7]</sup>. 这一重大进展重新激发了人们研究负折射率材料的兴趣, 左手材料成为了科学界的热门话题. 2003 年被 Science 杂志评为当年十大科学进展之一.

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.

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.

对 C 环, 有

$$\omega_{n0}^2 = \frac{3lc_0^2}{\pi \ln \frac{2c}{d} r^3},$$
$$\omega_{mp}^2 = \frac{1}{1 - \pi \frac{c}{d^2}} \omega_0^2,$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 40537031, 40875013, 40375010, 60278019), 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), 陕西省科技攻关项目(批准号: 2005K04-G18), 陕西省科学计划基金(批准号: 2004A15)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: zcm@mail.xjtu.edu.cn

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

$\gamma$  为损耗因子,  $\omega_{n0}$  为磁谐振频率,  $\omega_{mp}$  为磁等离子频率,  $l$  为两 C 环间距.

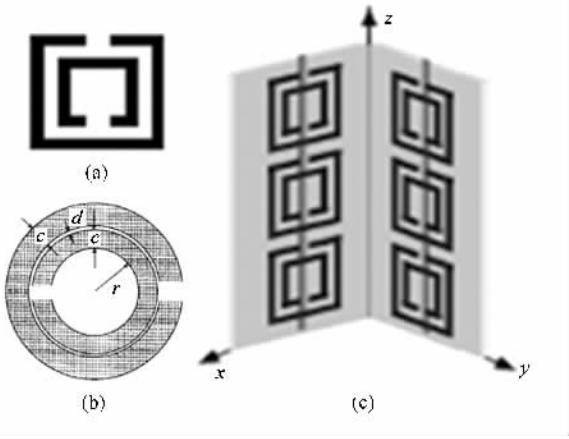


图 1 (a) 矩形谐振环结构 (b) C 形环谐振环结构 (c) 谐振环及金属线的空间结构

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 <sup>[1]</sup>  $\text{Ekan}$  等提出了一种新型的周期复合负折射率材料—— $\Omega$  形负折射率材料<sup>[7]</sup>.与之前的复合阵列模型相比损耗较小,频段宽.

本文基于矩形谐振环设计出新型三角形谐振环和三矩形谐振环金属线复合周期结构左手材料,其负折射性能较好,频段宽,不失为一种良好的新型周期结构左手材料.

2. 基于三角形以及三矩形谐振环实现负磁导率的仿真及分析

谐振环结构单元以及结构尺寸如图 2 所示,用 CST 微波工作室进行仿真,微波传输方向平行于谐振环平面,仿真得到频率与透射比  $S_{21}$  曲线如图 3 所示.

图 3 可以看出单个三角形谐振环的截止波段在 14 GHz 左右,单个三矩形谐振环的截止波段在 7.5 GHz 左右,都在我们的实验测量范围(7—15 GHz)之内,说明两种结构复合金属线实现负折射具有很高的可行性.

我们使两种开口谐振环二维单层  $5 \times 4$  排列,两个方向的环中心距都为 5 mm,微波传播方向平行于 SRR 平面,得到频率与透射比  $S_{21}$  曲线如图 4 所示.

从图 4 明显可以看出二维排列的谐振环截止波

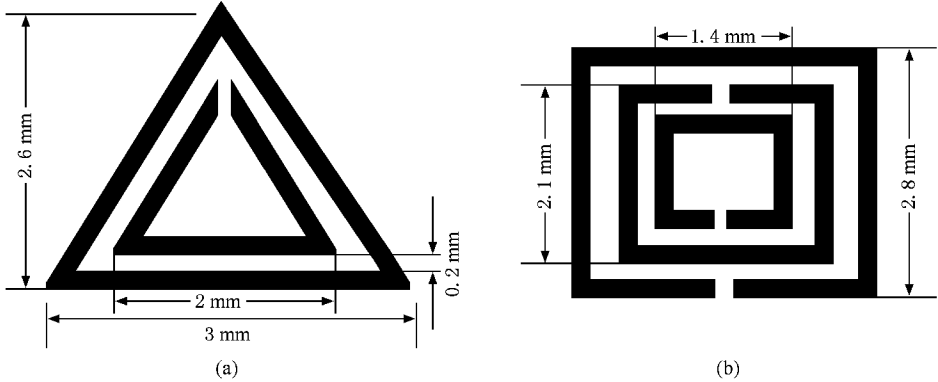


图 2 谐振环单元结构示意图 (a) 三角谐振环 (b) 三矩形谐振环

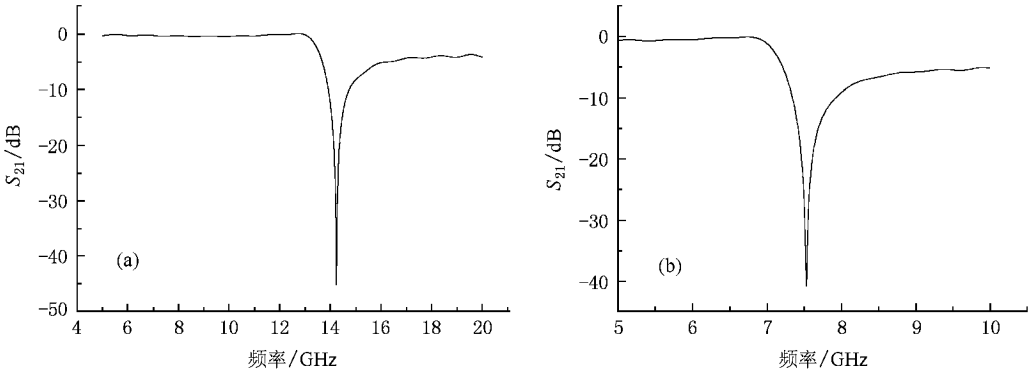


图 3 单个谐振环仿真结果 (a) 三角谐振环 (b) 三矩形谐振环

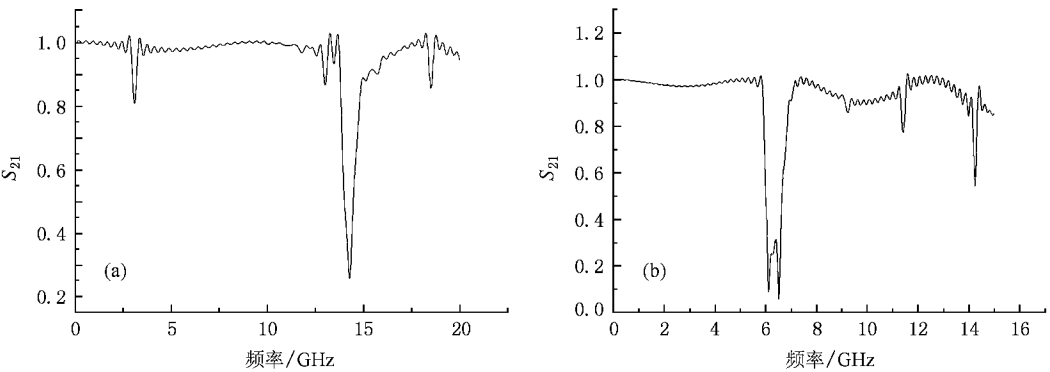


图 4 (a)二维三角谐振环阵列  $S_{21}$  曲线 (b)二维矩形谐振环阵列  $S_{21}$  曲线

段位置和单个谐振环基本一致,但有所加宽,多环耦合之后的两种谐振环阵列分别在 14.2 GHz 和 7 GHz 附近处于磁谐振频率和磁等离子频率之间,即磁导率为负值。

### 3. 谐振环复合金属线周期结构仿真及分析

#### 3.1 三角形谐振环金属线复合阵列仿真及分析

为了研究多层谐振环耦合对谐振频率的影响,我们使三角谐振环三层三维排列,单元宽度 5 mm,层间距为 3.2 mm(如图 5),基板背面为金属线用以产生负介电常数。波传播方向平行于谐振环平面,得到  $S_{21}$  曲线如图 6(a)所示,取频率为 15 GHz 时的能量透过直观图如图 6(b)所示。

从图 6 可以看出,复合结构在谐振环阵列截止波段的 14.2 GHz 附近出现通带, $S_{21}$  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域性。金属线阵列和谐振环阵列之间的相互作用也

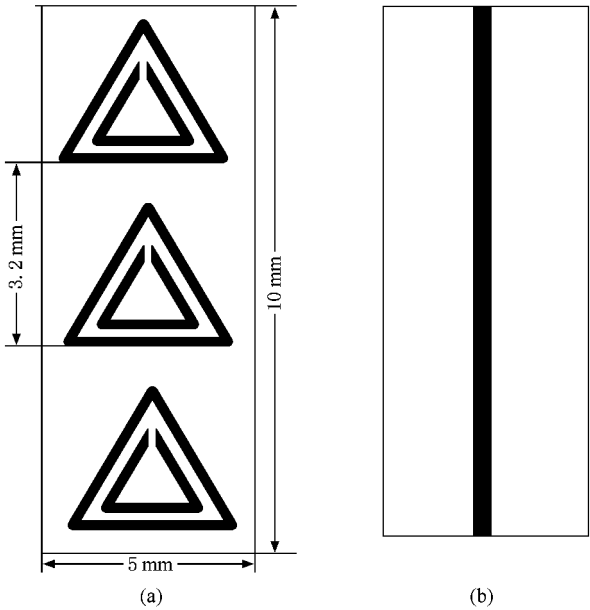


图 5 (a)基板正面 SRRs 排列 (b)基板背面的金属线

比较复杂,其影响不容忽视。15 GHz 的电磁波透过直观图负折射效应比较明显(如图 6(b)),但是动态图不太稳定,一定程度上受相位的影响。

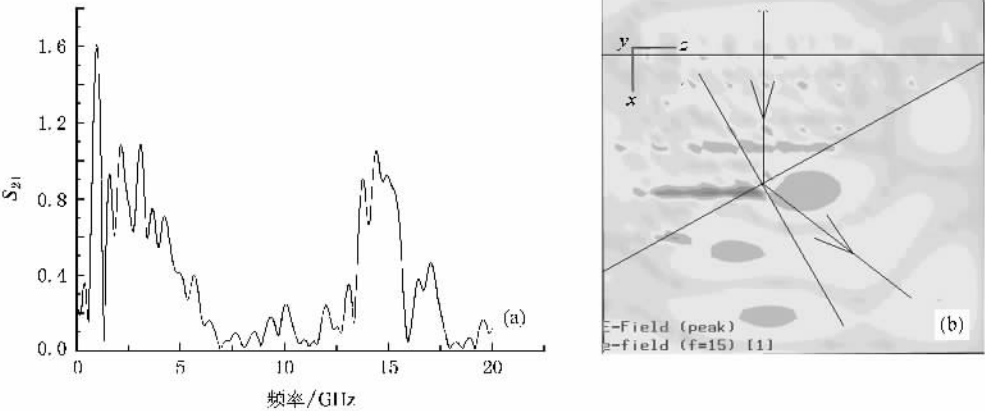


图 6 (a)复合阵列仿真  $S_{21}$  曲线 (b)频率为 15 GHz 的电磁波在复合阵列中的透过直观图

通过仿真发现三角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.

3.2. 三矩形谐振环金属线复合阵列仿真及分析

使三矩形谐振环金属线三层三维排列,层间距为 3.2 mm(类似于图 5)得到频率与透射比  $S_{21}$  曲线如图 7 所示.

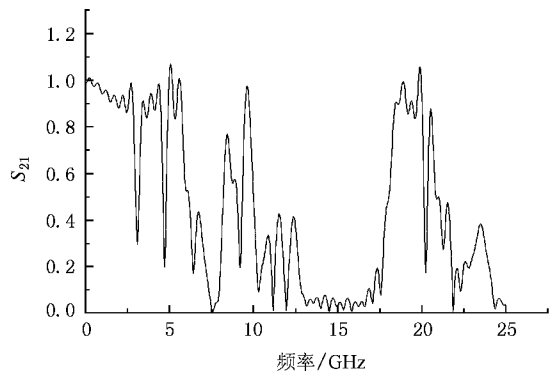


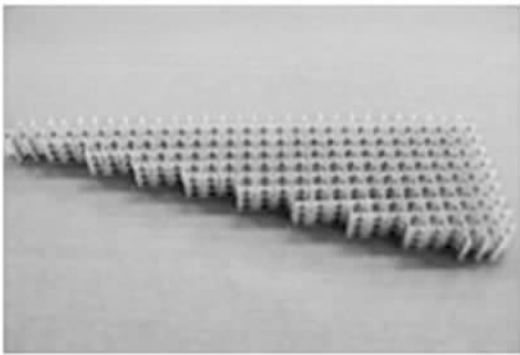
图 7 三矩形金属线复合阵列仿真  $S_{21}$  曲线

根据图 7 所示的结果,在谐振环的截止频段 7 GHz 附近出现通带,可能为负折射频带.并没得到阶跃性通带,说明此结构也有一定的局限性,待进一步改进.下面我们将制作相应的样品并进行实验验证.

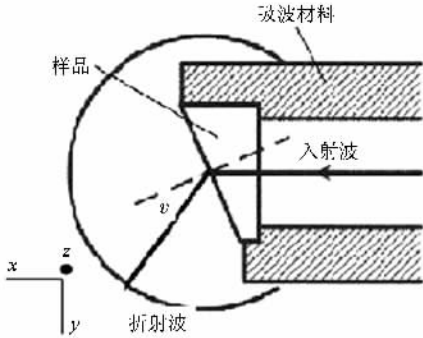
4. 梯形及三矩形金属线复合周期结构实验验证

根据如图 2 所示的结构,利用 FR4 印刷电路板覆铜将三角形和三矩形金属线复合周期结构制成棱镜样品如图 8(a),基板厚度为 0.3 mm,借助 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 8(b).得出实验结果如图 9 所示.

色阶表示能量强度(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,三角样品负折射频段大概在 9—13 GHz,三矩形样品负折射频段大概在 9—12.5 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,其电磁响应机理也比理论预计要复杂得多.



(a)



(b)

图 8 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

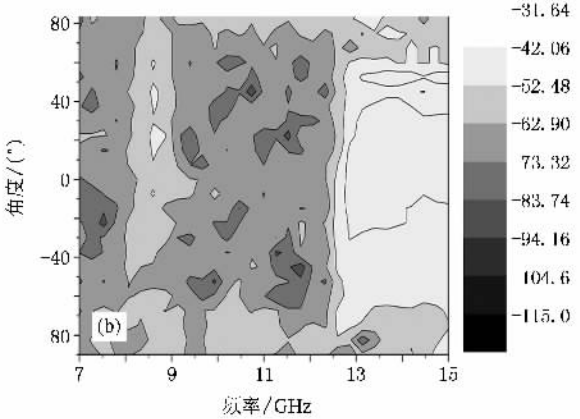
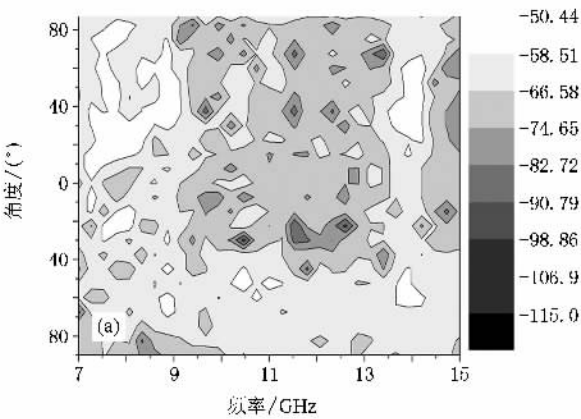
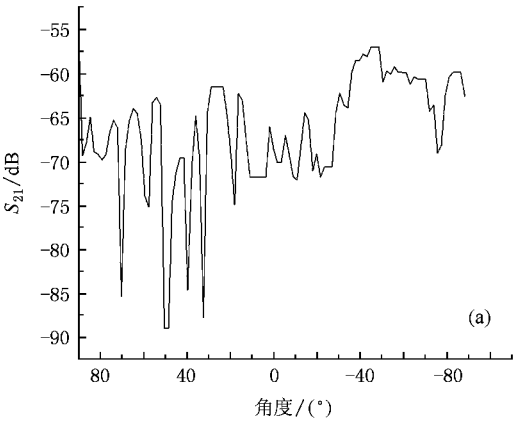


图 9 谐振环金属线复合周期结构样品透射率实验结果(dB) (a)三角形样品 (b)三矩形样品

我们选取两种材料负折射通带上的某个频率 ( 11 GHz ) 绘出两种样品折射角和透过率关系曲线如图 10 所示.



通过棱镜实验 ,得到如图 9 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 ,通过

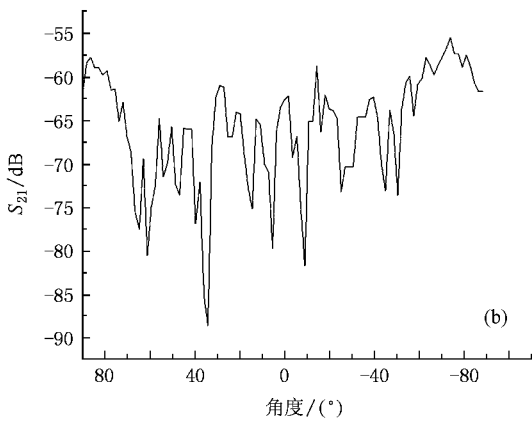


图 10 频率为 11 GHz 的电磁波折射角与透过率关系曲线( dB ) ( a )三角形样品 ( b )三矩形样品

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 )三角样品和三矩形样品负折射频段分别大约是 9.3—13.2 GHz 和 9—12.5 GHz ,说明此频段的电磁波刚好处于谐振环阵列截止波段和金属线阵列截止波段的重叠区域 ,折射率为负值 .

3 )图 10 可以看出频率为 11 GHz 的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新型三角开口谐振环和三矩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. 仿真发现三角形谐振环阵列和三矩形谐振环阵列分别在 14 GHz 附近和 7.5 GHz 附近产生负磁导率 ,进一步设计并仿真研究了三角形开口谐振环和三矩形开口谐振环与金属线复合周期结构 ,并且

仿真结果显示两种结构都可以在在一定波段实现负折射 ,说明两种结构实现负折射具有可行性 .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 ,两种结构分别在 9.5—13.3 GHz 和 9.8—12.5 GHz 应出现较好的负折射效应 .

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. 通过对比发现 ,实验和仿真结果基本一致 ,但不是理想符合 ,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 .

开口谐振环金属线复合周期结构是最传统的左手材料 ,本文基于传统的矩形谐振环设计出三角谐振环和三矩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研究具有重要的指导意义 .

[ 1 ] Veselago V G 1968 *Soviet Physics 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 Transactions on Microwave Theory and Techniques* **47** 2075

[ 4 ] Smith D R , Padilla W J , Vier D C , Nemat-Nasser SC , Schultz S 2000 *Phys . Rev . Lett .* **84** 4184

[ 5 ] Shelby R A , 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

# Study on new period structures of left-handed material based on rectangular resonators and metal wires<sup>\*</sup>

Sun Ming-Zhao Zhang Chun-Min<sup>†</sup> Song Xiao-Ping Liang Gong-Ying Sun Zhan-Bo

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

*School of science* , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an 710049 , China )

( Received 14 January 2009 ; revised manuscript 11 February 2009 )

## Abstract

We studied the new left-handed material consisting of triangular and three rectangular split resonant rings ( SRRs ) based on rectangular resonators and metal wires through simulation and *experiment*. Simulated negative permeability material based on periodic structures of triangular and three rectangular SRRs , we found that two kinds of SRRs can generate negative permeability. We designed new kinds of left-handed materials consisting of two kinds of resonators based on rectangular resonators and copper wires , simulation shows the structures have good left-handed property in some frequency bands. We also fabricated *experimental* samples in which waves under go negative refraction when the frequency bands are 9.5—13.3 GHz and 9.8—12.5 GHz respectively. This has important significance on design and study of new periodic structures of left-handed materials.

**Keywords** : left-handed material , negative refraction , triangular resonator , three rectangular resonator

**PACC** : 4110H , 7790

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant Nos. 40537031 , 40875013 , 40375010 , 60278019 ) , the National High Technology Research and Development Program of China( Grant No. 2006AA12Z152 ) , the National Defense Basic Scientific Research Program of China ( Grant No. A1420080187 ) , the Key Science and Technology Program of Shaanxi Province , China( Grant No. 2005K04 – G18 ) , and Science Foundation of Shaanxi Province , China( Grant No. 2004A15 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : zcm@mail.xjtu.edu.cn