

非对称开口六边形谐振单环的 微波透射特性*

姚 远¹⁾ 赵晓鹏^{1)†} 赵 晶²⁾ 周 欣¹⁾

1) 西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

2) 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

(2005 年 12 月 23 日收到 2006 年 1 月 24 日收到修改稿)

受自然界树型结构的启发, 设计了分叉树型微结构单元, 用电路板刻蚀技术制作了非对称开口六边形谐振单环及其组合结构. 采用计算机模拟和实验研究了单个和多个谐振环在微波段(7—12 GHz)的电磁响应行为. 研究表明, 该结构具有负磁导率特性, 开口谐振环几何尺寸影响环的磁谐振频率, 两环间距较小时出现二次谐振; 带高级分支的辐射状环列相对于不带分支环列透射峰向低频移动. 实验和模拟结果相符.

关键词: 负磁导率, 开口谐振环, 透射率

PACC: 4270Y, 6170E

1. 引 言

介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是描述连续媒质电磁波传播特性最基本的两个物理量. Veselago^[1] 从理论上研究了 ϵ 和 μ 同时为负的材料, 并定义为左手材料. 左手材料有许多奇特的电磁特性, 如反常多普勒效应、反常 Cherenkov 辐射^[2]、负折射现象^[3, 4] 和完美透镜效应^[5] 等. 但是, 这种奇特性质的材料在自然界中却不存在. 20 世纪 90 年代末, 英国科学家 Pendry 等^[6] 研究发现周期性排列的导电金属线的介电常数在其等离子体谐振频率下为负, 并且发现金属开口谐振环 (split ring resonators, SRRs) 的等效磁导率在一定范围内表现为负值^[7]. 文献 [8] 把这两种材料排列在一起, 在微波实验中首次观察到了负折射现象, 获得了左手材料, 从而引起人们对左手材料的关注并展开了一系列有意义的研究工作.

左手材料中实现负磁导率的微结构单元大多为内外嵌套开口双环^[9, 10], 本课题组研究了内外嵌套的开口六边形双环^[11—14]. 这种内外嵌套式结构的材料多为电路板刻蚀或光刻技术制作, 要做到能在红外和可见光波段响应的材料, 需要结构尺寸大约在几十到几百纳米数量级, 对加工技术的要求非常高,

自然界中存在的树型结构, 可以看作是六边形单环的准周期分布. 这种树型结构通过化学生长等手段较容易做到纳米尺度, 从而可能实现红外和可见光波段的等效负磁导率磁响应. 此外, 文献 [15] 指出, 负磁导率的实现并不一定需要开口双环结构, 开口单环结构同样具有磁响应和负磁导率的性质. 据此, 我们设计了一种非对称开口六边形谐振单环微结构单元, 并且研究了一个环或两个以及多个环排列成准周期结构的微波透射行为.

2. 样品制备及实验

本文从实验和模拟两方面来研究非对称开口六边形单环的微波透射特性. 所采用的样品由文献 [11—14] 中的正六边形 SRRs 演变而来, 与树型结构有一定的相似性, 如图 1. 采用电路板刻蚀技术制备了一系列不同尺寸的单个铜六边形 SRRs, 环厚度为 0.02 mm, 线宽 0.3 mm, 电路基板材料为 0.8 mm 厚的环氧酚醛玻璃纤维. 样品 S 参数用 AV3618 型微波一体化矢量网络分析仪测量获得, 其信号发生器频率为 50 MHz—20 GHz. 测量时将 SRRs 样品沿波的传播方向置于矩形波导中, 波导横截面尺寸为 22.86 mm × 10.16 mm. SRRs 所在平面平行于矩形波

* 国家杰出青年科学基金(批准号: S0025207)、国家重点基础研究发展规划(批准号: 2004CB719805)和航空科学基金(批准号: 05G53045)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

导窄壁,波导中传播 TE_{10} 模.

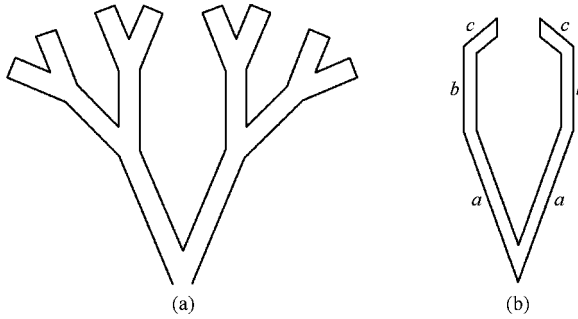


图 1 树型结构及非对称开口六边形谐振单环 (a)树型结构, (b)非对称开口六边形谐振单环

对六边形 SRRs 微波透射特性进行了模拟,如图 2 所示. 模拟软件为 CST Microwave Studio,它是德国 CST 公司开发的基于有限积分法的高频无源微波器件及天线仿真软件包. 它可仿真谐振腔、平面结构、电磁兼容及各类天线和天线阵列,能给出 S 参量、天线方向图等结果.

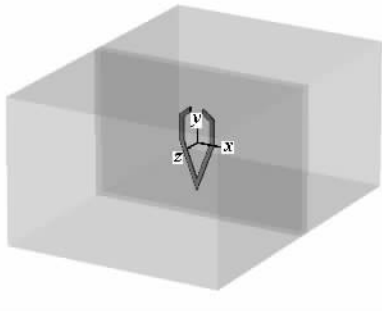


图 2 六边形 SRRs 模拟环境示意图

3. 结果及讨论

3.1. 一个开口六边形谐振单环

3.1.1. 边长对磁谐振的影响

为了便于说明,在图 1 中已将环的各边编号. 实验所用环边长为 $a = 3 \text{ mm}$, $b = 1.8 \text{ mm}$, $c = 1.08 \text{ mm}$. 在实验中观察了 SRRs 的透射曲线,并与模拟结果相比较(图 3),可以看出模拟和实验中环均在 8.900 GHz 左右产生较强的谐振峰. 为了检验此谐振峰是否为磁谐振,文献 [16] 提出一个简单而实用的实验方法,即将 SRRs 的开口闭合,如果谐振峰消失,则此谐振峰为磁谐振. 我们将实验所用样品环的开口闭合,得到样品透射曲线(见图 3),原来的谐振峰 (8.9 GHz) 消失,说明该谐振峰为磁谐振. 由公式

$\mu_r = 1 + \chi_m$ 和 $M = \chi_m H$ 可知,开口谐振环必须产生环型的电流元振荡,形成与原磁场相反的磁矩且足够强时才能产生负的磁导率. 图 4 是环在 $f = 8.9 \text{ GHz}$ 时表面电流及其磁场分布的模拟结果,此时环表面形成环型电流,产生了磁谐振. 数值计算得到环阵列(晶格常数分别为 3 mm , 6.5 mm , 2.5 mm) 的磁导率^[17,18]与频率的关系即磁色散曲线如图 5 所示. 在环的磁谐振频率附近其磁导率为负值,在 $f = 8.9 \text{ GHz}$ 处相对磁导率实部为 -1.0536 .

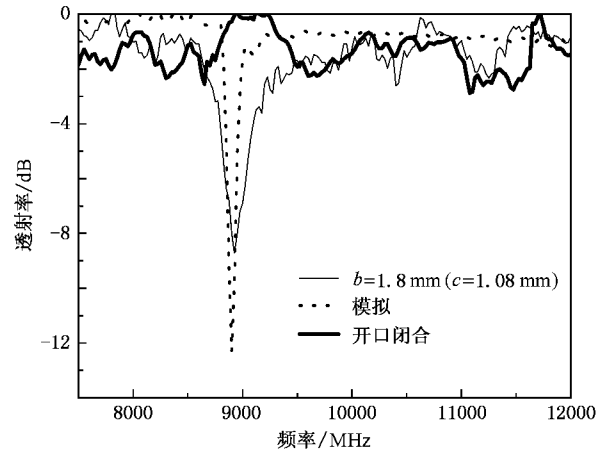


图 3 一个非对称六边形 SRRs 的微波透射曲线

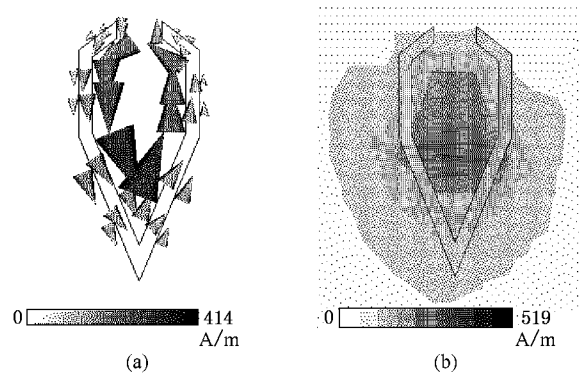


图 4 非对称六边形 SRRs 谐振时($f = 8.9 \text{ GHz}$)表面电流及其磁场分布的模拟结果 (a)表面电流 (b)磁场分布

改变 SRRs 的各边长会对环的磁谐振频率产生影响. 图 6 是环的 b 边变化时的透射曲线. 当 b 边由 2.4 mm 变为 1.2 mm 时,环的谐振频率由 8.075 GHz 变化到 9.975 GHz . 说明环的几何尺寸变小时,谐振频率向高频方向移动.

3.1.2. 高级分支结构对磁谐振的影响

本文以下所有实验和模拟采用如图 7 所示的样

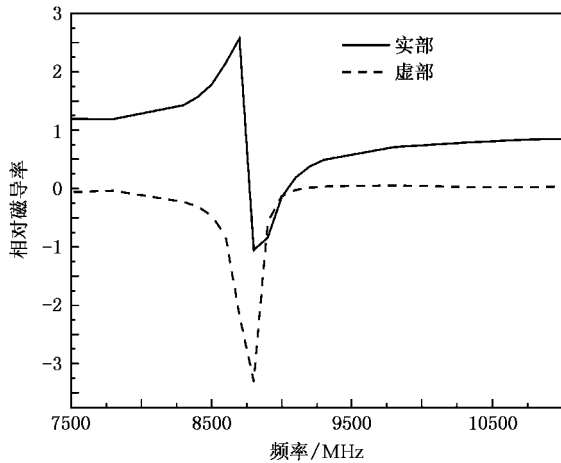
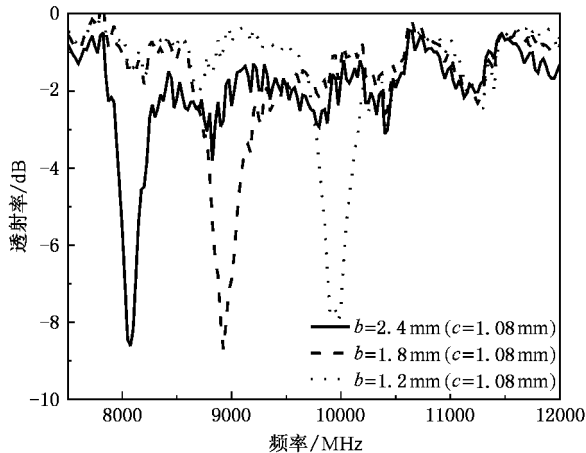


图5 非对称六边形 SRRs 的磁色散曲线

图6 不同边长 b 的六边形 SRRs 的微波透射曲线

品环,尺寸均为 $a = 3 \text{ mm}$, $b = 1.2 \text{ mm}$, $c = 0.48 \text{ mm}$. 实验测得原始样品环在 11.525 GHz 产生较强的磁谐振,如图 8 所示.在环的开口端增加高级分支结构后的样品环,谐振频率变为 10.775 GHz .在环左右两侧增加二级、三级分支即环成为树枝状结构时,测得谐振频率为 9.175 GHz .环的谐振频率可以近似由 LC 振荡回路定性分析,由 $\omega = (LC)^{-1/2}$ 可知,增加高级分支结构使环面积增加,等效电感 L 增大,因此谐振频率向低频方向移动.高级分支构成的环形结构自身可能在高频段会产生磁谐振,本文对此不作详细讨论.

3.2. 两个开口六边形谐振单环

3.2.1. 环间距对磁谐振的影响

实验时,将两环沿波的传播方向竖直并排放置,

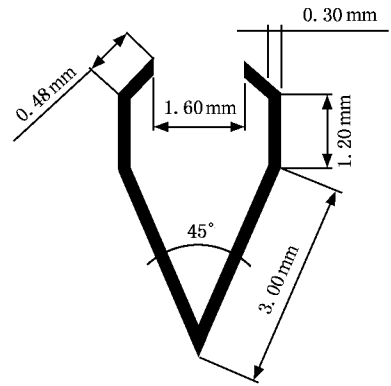


图7 非对称六边形开口谐振单环

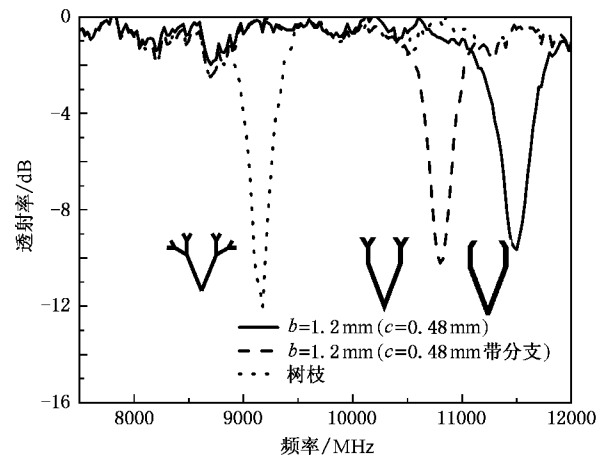


图8 带高级分支结构 SRRs 的微波透射曲线

设两环的中心距离为 d_x .图 9(a)是环间距 $d_x = 3 \text{ mm}$ 时透射曲线的实验与模拟结果对比图.从图 9(a)可以看出,环在 $f = 8.625 \text{ GHz}$ 和 $f = 9.308 \text{ GHz}$ 附近分别产生了两次谐振,实验与模拟结果非常符合.图 9(b)和(c)分别是 $f = 8.616 \text{ GHz}$ 和 $f = 9.308 \text{ GHz}$ 时模拟环表面电流分布情况.在谐振时环表面形成环形电流,图 9(b)中两环电流方向一致.由磁矩的定义

$$m = \frac{1}{2} \oint \mathbf{r} \times \mathbf{j}_s dS$$

可知,两环形成的磁矩方向一致,两环磁矩相互叠加增强,因此有更强的磁响应,表现在透射曲线中有更深的透射峰.图 9(c)中两环电流方向相反,但两环表面电流大小不同,形成的磁矩不完全抵消,因此在透射曲线中表现为一较浅的透射峰.

实验中我们得到了如图 10 所示的结果:当两环间距 $d_x = 3 \text{ mm}$ 时透射曲线呈现明显的双峰,其中

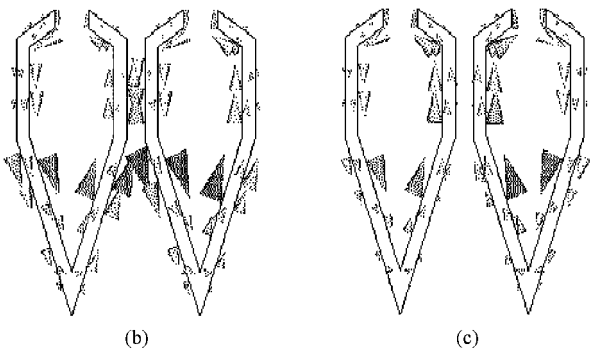
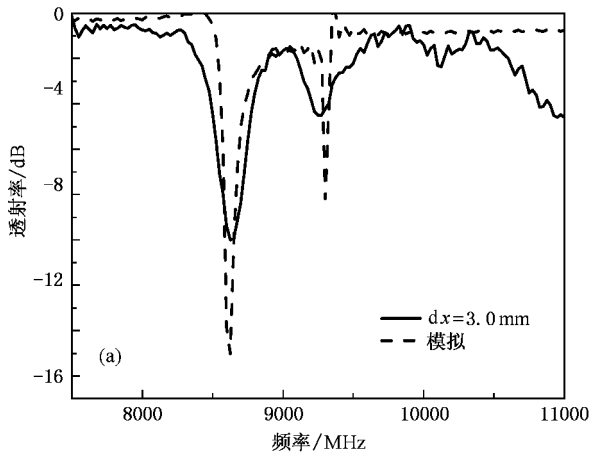


图9 环间距 $dx = 3 \text{ mm}$ 时透射曲线及其模拟表面电流分布
 (a) 实验测试的透射曲线 (b) $f = 8.616 \text{ GHz}$ 时的模拟结果 (c) $f = 9.308 \text{ GHz}$ 时的模拟结果

一峰对应频率低于单环谐振频率,另一峰对应频率高于单环谐振频率.随着距离的增加,谐振双峰逐渐靠近.当 $dx = 6 \text{ mm}$ 时,合并为一个透射峰,且其谐振频率比单个谐振环的谐振频率略微向高频方向移动.由此可以认为:距离较近时两环具有较强的耦合作用,形成谐振双峰;距离增大则耦合作用减弱,双峰合并;当间距大于一定距离之后,两环无相互影响.

3.2.2. 双环组合时的磁谐振

由于树型结构的特殊性,即可以看作由六边形环排列成的准周期分布,所以对这种六边形环的组合作了研究.图 11 表明双环竖直并列组合在一起时的谐振频率(8.425 GHz)比倾斜组合的双环谐振频率(10.550 GHz)低,透射峰的深度也明显较浅,并且带高级分支结构的双环谐振频率向低频方向移动.

3.3. 三环组合及辐射状环列

3.3.1. 三环组合对谐振频率的影响

图 12 是三环并列组合在一起时的实验和模拟

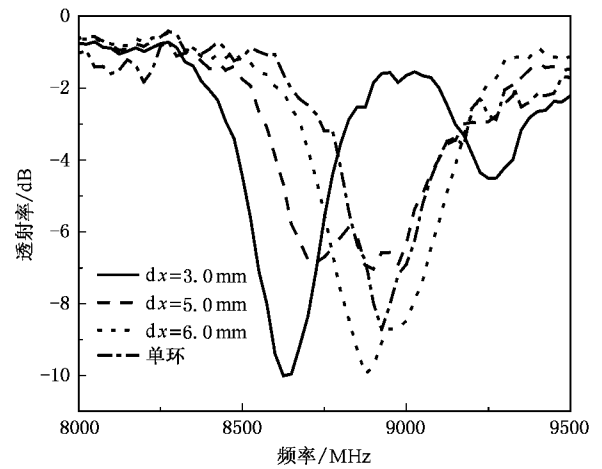


图 10 不同环间距 dx 的两环微波透射曲线

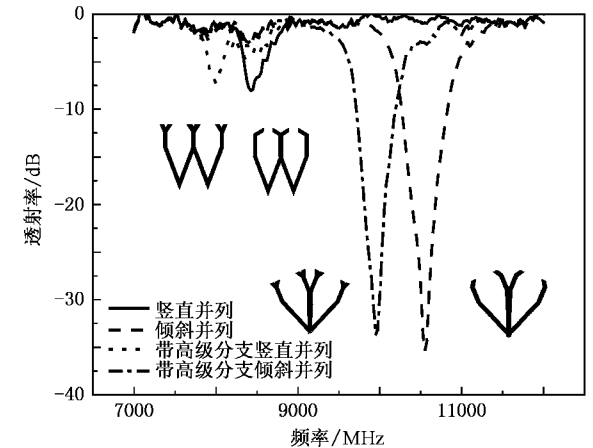


图 11 双环组合的微波透射曲线

透射曲线,两曲线相符较好.三环并列组合结构在 9.525 和 10.600 GHz 处发生两次谐振.图 13 中将三环与两环的透射曲线进行对比:三环主谐振频率比两环谐振频率略向高频方向移动,并且透射峰的深度增加;开口端带高级分支结构的环谐振频率向低频方向移动.

3.3.2. 辐射状环列

图 14(a)是由六边形环组合成的辐射状环列及其透射曲线.图 14(b)所用样品在辐射状环列的各个开口端增加了高级分支结构.可以看到,带分支的辐射状环列由于高级结构的影响,透射峰相对于不带分支环列向低频方向移动 0.25 GHz 左右.辐射状环列由于对称性结构,在一定程度上容易实现各向同性,并且相对于单环有更宽的谐振频带和更强的磁谐振响应特性,由此可以获得性能优异的左手材料.

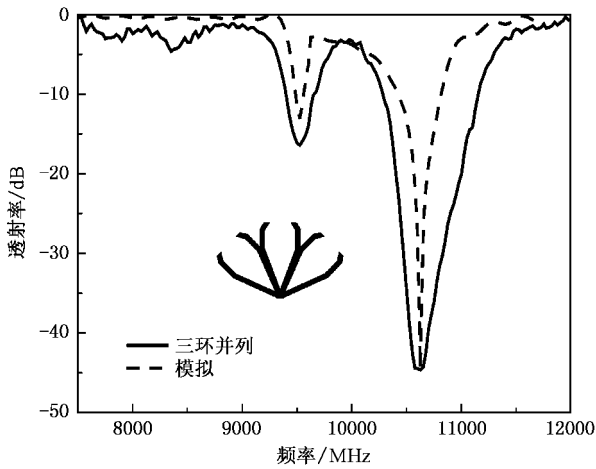


图 12 三环组合的微波透射曲线

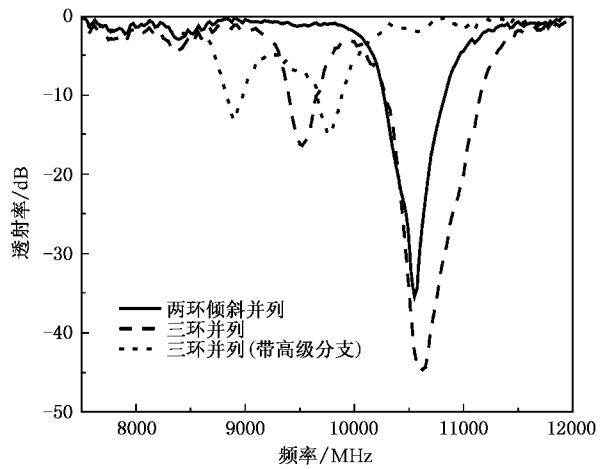


图 13 两环组合与三环组合的微波透射曲线

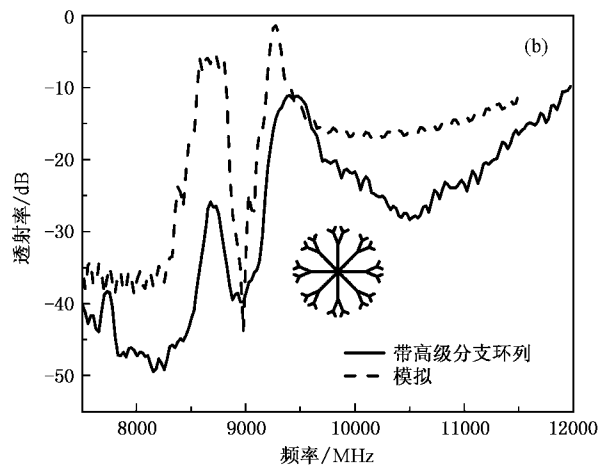
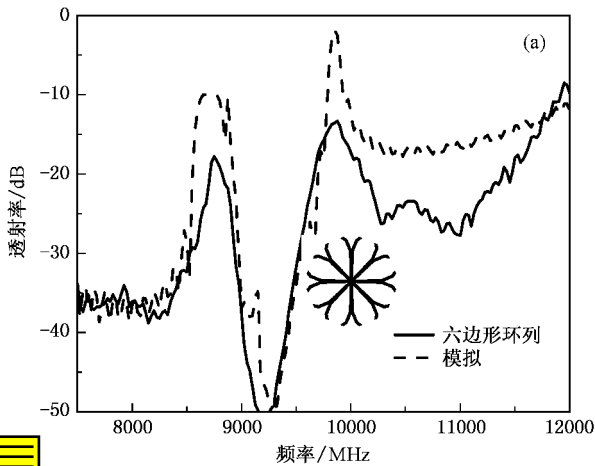


图 14 辐射状环列的透射曲线 (a)六边形环构成的辐射状环列 (b)带高级分支辐射状环列

4. 结 论

本文从模拟和实验两方面研究了构成树型结构的非对称开口六边形谐振单环在微波段(7—12 GHz)的电磁响应行为。

1)实验表明一个开口六边形单环在7—12 GHz频段表现出磁谐振现象;对样品环行为进行了计算机模拟,理论计算和实验结果相符;通过数值计算得到了样品环的磁色散曲线,在谐振频率附近样品环磁导率为负值。

2)SRRs的几何尺寸影响谐振频率,当环的尺寸变大时,谐振频率向低频方向移动;SRRs的几何结

构也会影响谐振频率,环的开口端增加高级分支结构,谐振频率向低频方向移动。

3)两个六边形单环竖直并排放置时,随间距增大透射曲线双峰逐渐靠近,到一定距离合并成单峰,模拟与实验相符。

4)三环并列组合环列发生两次谐振;由六边形单环构成的辐射状环列,带高级分支环列相对不带分支环列透射峰向低频方向移动。

由于非对称开口六边形谐振单环可看作是树型结构的组成单元,对其微波透射特性的研究有助于理解树型结构的电磁响应特征.利用物理化学手段便于制得红外和可见光波段的左手材料。

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Luo C Y , Ibanescu M , Johnson S G 2003 *Science* **299** 368
- [3] Houck A A , Brock J B , Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [4] Parazzoli C G , Gregor R B , Li K *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401
- [5] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [6] Pendry J B , Holden A J , Stewart W J *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [7] Pendry J B , Holden A J , Robbins D J *et al* 1999 *IEEE Trans. Microwave Theor. Techniq.* **47** 2075
- [8] Shelby R , Smith D R , Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [9] Shelby R , Smith D R , Nemat-Nasser S C *et al* 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 489
- [10] Smith D R , Padilla W J , Vier D C *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [11] Kang L , Zhao Q , Zhao X P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3379 (in Chinese) [康 雷、赵 乾、赵晓鹏 2004 物理学报 **53** 3379]
- [12] Zhang F L , Zhao Q , Liu Y H *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [13] Zhao X P , Zhao Q , Kang L *et al* 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [14] Luo C R , Kang L , Zhao Q *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣、康 雷、赵 乾等 2005 物理学报 **54** 1607]
- [15] Kafesaki M , Koschny T , Penciu R S *et al* 2005 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **7** S12
- [16] Koschny T , Kafesaki M , Economou E N *et al* 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 107402
- [17] Smith D R , Vier D C , Kroll N *et al* 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2246
- [18] Werner D H , Mittra R 2000 *Frontiers in Electromagnetics* (Piscataway : IEEE Press) p754

Microwave transmission behavior of the single dissymmetrical hexagonal split-ring resonators *

Yao Yuan¹⁾ Zhao Xiao-Peng^{1)†} Zhao Jing²⁾ Zhou Xin¹⁾

¹⁾ Institute of Electrorheological Technology , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China)

²⁾ Department of Electrical Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

(Received 23 December 2005 ; revised manuscript received 24 January 2006)

Abstract

Inspired by the dendritic geometry in nature , we designed the single dissymmetrical hexagonal split ring resonators (SRRs). The SRRs were fabricated on one side of the dielectric substrate using shadow mask/etching technique. By experiments and computer simulations , we have researched the microwave transmission behavior of the SRRs in the frequency band of 7—12 GHz. The results show that , for an individual hexagonal SRR , the resonance frequency is affected by the size of the SRR ; for two SRRs , there are two resonance peaks in the transmission curve when they are close to each other. For three SRRs or the radialized rings , the resonance frequency of the structure with high-level branches shifts towards lower values compared with that with no branches. The simulations are in agreement with the experimental results.

Keywords : negative effective permeability , split ring resonators , transmission coefficient

PACC : 4270Y , 6170E

* Project supported by the National Natural Science Foundation for Outstanding Young Researchers of China (Grant No. 50025207) , the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB719805) and the Aeronautical Science Foundation of China (Grant No. 05G53045).

† Corresponding author. E-mail xpzha@nwpu.edu.cn