

文章编号:1005-6122(2005)05-0041-05

波导中开口谐振环的实验研究*

赵乾康 雷张富利 刘亚红 赵晓鹏

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

摘要: 金属开口谐振环(split ring resonators, SRRs)是组成负磁导率结构材料的基本结构单元。本文利用波导法系统地研究了六边形 SRRs 的微波透射、吸收以及传输相位随频率的变化特性。实验结果表明:单个 SRRs 的谐振频率随内外环间距的增加而减小,且传输相位在谐振频率处发生跃变;两个 SRRs 间的相互作用随其间距的变化而变化,即谐振频率随间距的增加而增加,且在谐振频率处吸收出现最大值;多个以一定间距排列的 SRRs 列的电磁谐振行为可由环的开口大小调控,且谐振频率随开口间距的增加而增加。SRRs 电磁谐振行为的研究对于左手材料的制备具有一定的指导意义。

关键词: 开口谐振环, 电磁谐振, 吸收

The Experimental Study of Split Ring Resonator in Waveguide

ZHAO Qian, KANG Lei, ZHANG Fu-li, LIU Ya-hong, ZHAO Xiao-peng

(Institute of Electrorheological Technology, Department of Applied Physics,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The split ring resonators (SRRs) are the unit cells of negative permeability metamaterials. We used a rectangular waveguide method to systematically investigate the transmission, absorption, and transmission phase of the hexagon SRRs. The results show that the resonance frequency of an individual SRRs decreases with the increase of the radial gap, and the transmission phase has a shift at the resonance frequency. The interaction between two identical SRRs is affected by the distance, and the resonance frequency increases with the distance. The absorption peak occurs near the resonance frequency in the SRRs system. The azimuthal gap can adjust the electromagnetic resonance behavior of the multi-SRRs system, and the resonance frequency increases with the azimuthal gap. The investigation of SRRs is instructive for the preparation of the left-handed metamaterials.

Key words: Split ring resonators, Electromagnetic resonance, Absorption

引言

“左手材料”(left-handed metamaterials, LHMs)是一种介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负的人工周期结构材料,由于其中传播的电磁场分量 E 、 B 与波矢 K 满足“左手定则”而得名^[1]。即其群速度与相速度方向相反,从而呈现出许多反常的物理光学现象,如负折射效应^[2,3]、反常多普勒效应^[4]、完美透镜效应^[5~8]。

自然界中的金、银和铝等材料在光频和红外波段具有负的介电常数,而某些铁磁和亚铁磁材料只

能在远小于光频时呈现负的磁导率,当频率接近红外时将不再显示磁性。因而利用自然界现存材料实现介电常数和磁导率同时为负不太可能^[9]。金属开口谐振环(split ring resonator, SRRs)的出现解决了高频段负磁导率的问题^[10]。SRRs由两个同心的开口金属环组成。通过改变 SRRs 的几何参数,如开口大小、环的几何尺寸、内外环间距以及组成材料的介电常数、电导率等,可以调节 SRRs 的电磁谐振行为。而由 SRRs 周期排列而成的结构材料在其谐振频率附近呈现出负的磁导率。因而,研究几何参数对 SRRs 电磁谐振行为以及多个 SRRs 间相互作用

* 收稿日期:2004-07-19;定稿日期:2004-08-26

基金项目:国家杰出青年基金(50025207)和国家自然科学基金(50272054)

用的影响对于深刻理解负磁导率材料实现的物理本质以及指导左手材料的制备具有很重要的意义。

本文设计制备了六边形 SRRs, 并采用波导法系统地研究了当 SRRs 几何参数变化时, 单个以及多个 SRRs 的微波透射、吸收以及传输相位随频率的变化特性。

1 样品制备及测试

实验制备了横截面分别为圆形和矩形的六边形 SRRs (如图 1 所示)。采用电路板刻蚀技术在 0.5mm 厚的环氧酚醛玻璃纤维上制备一系列不同尺寸的铜六边形 SRRs。SRRs 可由内外环的内切圆直径 e_2 、 e_1 , 径向间距 c 和开口间距 g 等参数描述。横截面为矩形的铜 SRRs 的厚度为 0.02mm, 线宽为 0.3 mm, 横截面为圆形的铜 SRRs 的截面直径 $\varphi = 0.14\text{mm}$ 。

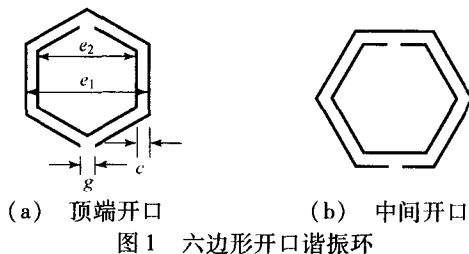


图 1 六边形开口谐振环

利用微波一体化矢量网络分析仪 (AV3618) 测量样品的 S 参数, 其信号发生器的频率为 50MHz ~ 20GHz。测量时将 SRRs 样品沿波的传播方向置于波导中, SRRs 所在平面平行于矩形波导短边, 其中传播的微波为 TE_{10} 波 (如图 2 所示)。由于所设计样品的谐振行为主要发生在微波 X 波段 (8 ~ 12GHz), 因而选择横截面为 $a \times b = 22.86 \times 10.16\text{mm}^2$ 的矩形波导。

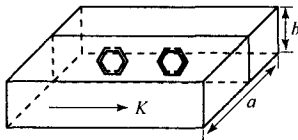


图 2 波导法测量谐振环微波谐振行为示意图

2 结果与讨论

2.1 开口位置对单 SRRs 谐振行为的影响

实验制备了开口位置不同 (中间开口和顶端开口) 几何参数相同的 SRRs, 其几何参数为 $e_1 = 2.5\text{mm}$, $e_2 = 2.0\text{mm}$, $g = 0.2\text{mm}$, $\varphi = 0.14\text{mm}$ 。微波透射测量曲线如图 3 所示。由图可见, 当开口位置由

顶端变为中间时, 其谐振频率由 9578MHz 变为 9543MHz, 同时透射率由 -2.57dB 变为 -3.66dB。因而, SRRs 的谐振行为受开口位置影响, 即谐振峰的位置和强度随开口位置的变化而改变。

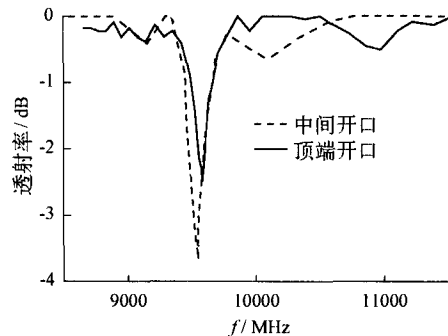


图 3 不同开口位置 SRRs 的微波透射曲线

2.2 径向间距对单 SRRs 谐振行为的影响

SRRs 电磁谐振行为受许多因素的影响, 如开口大小、位置、几何尺寸、内外环间距以及组成材料的介电常数、电导等。为了研究某参数对 SRRs 的电磁谐振行为的影响, 需要固定其余参数而仅改变该参数。径向间距的变化通过固定内环内切圆直径 $e_2 = 2.0\text{mm}$, 开口 $g = 0.3\text{mm}$, 改变外环内切圆直径 e_1 来实现。 e_1 以 0.2 mm 的步长由 2.0 mm 渐增至 4.6mm 制得一系列不同径向间距的单 SRRs。将单 SRRs 放入矩形波导中测量其微波透射行为。图 4 为不同径向间距 SRRs 的微波透射曲线, 这里只给出几条曲线。为了更加直观, 以径向间距为横坐标, 谐振频率为纵坐标作图 (如图 5)。

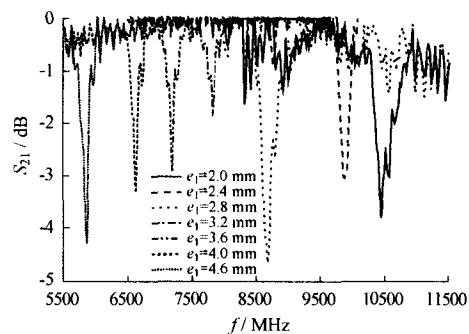


图 4 不同径向间距 SRRs 的微波透射曲线

由图 4 和图 5 可见, 单 SRRs 在某一频率会发生电磁谐振, 且谐振峰随径向间距变化而变化。谐振峰随径向间距的增加向低频移动, 当 e_1 由 2.0mm 渐增至 4.6mm 时, 其谐振峰由 10440MHz 渐移至 5862MHz。即径向间距可以大范围地调节 SRRs 的谐振行为, 当径向间距变化 2.6mm 时, 其谐振频率

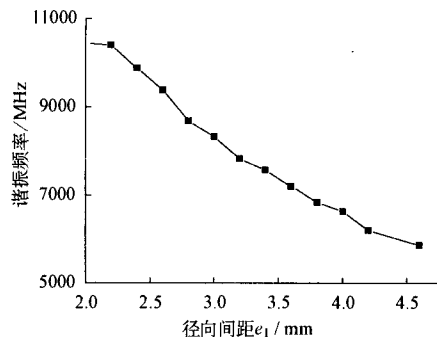


图 5 谐振频率随径向间距变化

却变化了 4578 MHz。径向间距的变化改变了 SRRs 内外环间的电磁耦合行为,从而导致其谐振频率的变化。周期性排列的 SRRs 的谐振频率随几何参数的变化关系为^[10,11]:

$$\omega_0^2 = \frac{3lc_0^2}{\pi r^3 \ln(2c/d)}$$

其中, l 为层间间距, c_0 为真空中的光速, r 为内环的半径, c 为环的线宽, d 为内外环间距即径向间距。由该式可见,当 l 、 r 和 c 等参数固定时,谐振频率随径向间距 d 的增加而增加。但由图 5 可见,谐振频率随径向间距的增大而减小。我们认为其主要原因该公式的实用条件是 $2c/d \gg 1$,而实验中的 SRRs 不满足该条件,因而得出了不同的实验结果。

为了深入研究单 SRRs 的电磁谐振行为,我们对其传输相位进行了测量(如图 6 所示)。

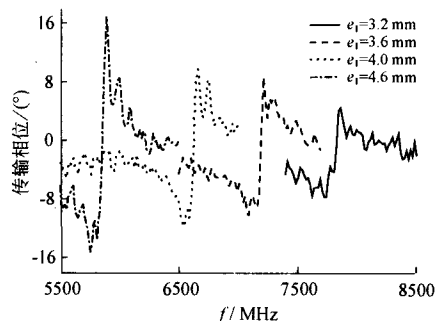


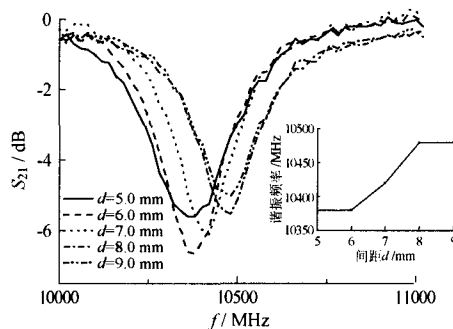
图 6 不同径向间距 SRRs 的传输相位随频率变化关系

由图 6 可见,不同径向间距 SRRs 的传输相位在其谐振频率处均发生跃变,而在远离谐振频率处相位趋于一定值。相位的跃变使得负磁导率的实现成为可能。置于微波场中的 SRRs,当微波场频率远小于或大于其谐振频率时,SRRs 发生磁化且其磁化方向同微波磁场方向一致,即其磁导率为正;当微波场频率在谐振频率附近时,由于谐振作用 SRRs 中储存了比微波磁场大得多的能量,当微波磁场方向

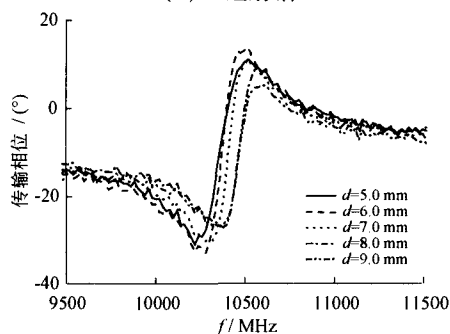
改变时,SRRs 的磁化却不受影响,即 SRRs 的磁化方向与微波磁场方向相反,因而实现了负磁导率。

2.3 两个 SRRs 间的相互作用

将两个相同参数的 SRRs ($e_1 = 2.2$ mm, $e_2 = 1.0$ mm, $g = 0.3$ mm) 以一定的间距 d 排成一列并沿波传播的方向置于波导中,研究间距 d 变化时,其电磁相互耦合作用的变化。



(a) 透射谱



(b) 相位

图 7 两个不同间距 SRRs 的微波透射曲线

图 7 为两个 SRRs 间的间距变化时透射和传输相位曲线。由图可见,两个 SRRs 间的相互作用随间距 d 的变化而变化。当 d 由 5.0 mm 变化到 9.0 mm 时,其谐振峰 10380 MHz 向高频移动到 10480 MHz,同时相位曲线在对应的谐振频率处发生跃变,与单 SRRs 的相位曲线一致。SRRs 间的间距发生变化时,其周围的电磁场产生不同的交叠作用,SRRs 的电磁耦合作用发生变化,导致其相互作用增强或减弱,从而 SRRs 的电磁谐振频率和谐振强度都发生变化。参考文献[12]模拟表明当两个 SRRs 间的间距小于 $\lambda/4$ 时,其谐振频率随间距 d 增加而增加。本实验结果与模拟吻合,当间距继续增加时,两个 SRRs 间相互作用已较弱,谐振频率趋于稳定值,基本不随间距 d 变化。

2.4 两个 SRRs 的微波吸收特性

对于 SRRs 系统,在谐振频率附近出现透射峰,

该频率附近的微波能量是象光子晶体在其禁带中一样被全反射了,还是被系统吸收了?为弄清此问题,测量了 SRRs 系统的微波吸收特性。采用单端口 S_{11} 反射校准后,将样品置于波导中并在波导终端加一短路器,测量其吸收特性,实验结果如图 8 所示。

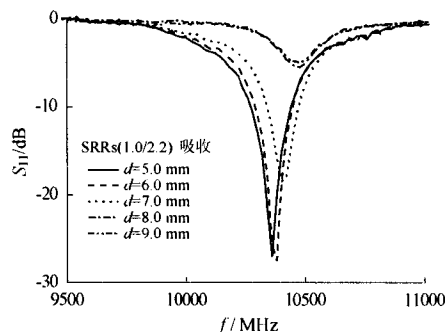


图 8 2 个 SRRs 系统的微波吸收谱

由图可见,对于不同间距的两 SRRs 系统,其微波吸收曲线均出现了吸收峰,在该峰处其吸收最大,且吸收峰位置与其谐振频率对应。不同间距的 SRRs 的吸收峰值不同,当间距较小时其相互作用较大,系统的储能较大,即微波吸收较大,随着间距的增大其相互作用减小,系统的储能较小,即微波吸收较小。因而,SRRs 系统出现的带隙与光子晶体的带隙不同,能量不是全反射了,而是由系统存储并损耗掉了。

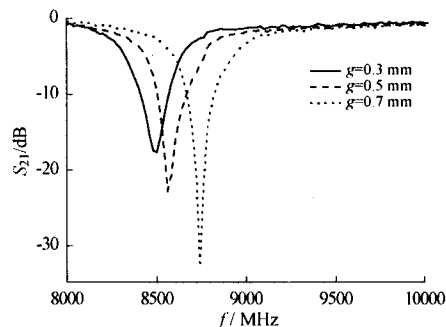
2.5 多个 SRRs 间相互作用

研究 SRRs 的开口大小对多个 SRRs 间相互作用的影响。将 7 个间距 $d = 7.0\text{ mm}$ 相同参数的 SRRs ($e_1 = 3.0\text{ mm}$, $e_2 = 1.8\text{ mm}$) 排成一列并沿波传播的方向置于波导中,研究开口大小同时变化对于其相互作用的影响。图 9 为 7 个 SRRs 的开口 g 分别为 0.3 mm 、 0.5 mm 、 0.7 mm 时的微波透射特性。

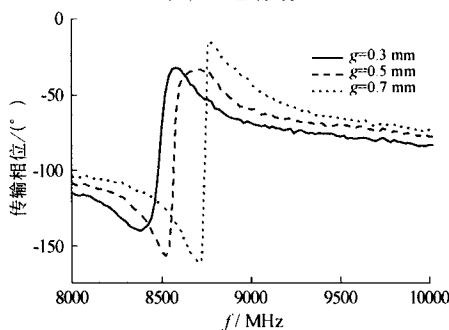
由图可见,7 个 SRRs 组成的谐振环列,当开口间距 g 发生微小变化时,其微波透射行为发生很大变化。当 g 由 0.3 mm 增至 0.7 mm 时,其谐振峰由 8700 MHz 向高频移动到 9080 MHz ,同时透射峰的强度亦逐渐增加。由相位曲线可见,在谐振频率附近相位发生跃变,与其透射峰吻合。即谐振频率随开口 g 的增加而增加。同时我们也做了开口 g 对其它几种不同参数的 SRRs 微波透射行为的影响,得出了一致的规律。

3 结论

金属开口谐振环是组成负磁导率结构材料的基



(a) 透射谱



(b) 相位

图 9 7 个 SRRs 的微波透射曲线

本结构单元,其电磁谐振行为的研究对于左手材料的制备具有一定的指导意义。本文设计并利用电路板刻蚀技术制备了一系列不同几何参数的六边形 SRRs,利用波导法系统地研究了六边形 SRRs 的微波透射、吸收以及传输相位随频率的变化特性,得出了以下结论:径向间距可以大范围的调节 SRRs 的谐振行为,单个 SRRs 的谐振频率随内外环间距即径向间距的增加而减小,当径向间距变化 2.6 mm 时,其谐振频率却变化了 4578 MHz ,且传输相位在谐振频率处发生跃变;两个 SRRs 间的相互作用随其间距的变化而变化,且当间距小于 $\lambda/4$ 时,谐振频率随间距的增加而增加;SRRs 系统在谐振频率处出现吸收最大值,其带隙不同于光子晶体带隙,能量不是全反射了,而是由系统存储并损耗了;多个以一定间距排列的 SRRs 列的电磁谐振行为可由环的开口大小调控,且谐振频率随开口间距的增加而增加。

参考文献

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability. Sov Phys Usp, 1968, 10 (4): 509 ~ 514
- [2] Houck A A, Brock J B, Chuang I L. Experimental observation of a left-handed material that obeys Snell's law. Phys Rev Lett, 2003, 90 (13): 137401-1

- [3] Parazzoli C G, Greigor R B, Li K, et al. Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law. *Phys Rev Lett*, 2003, 90 (10): 107401-1
- [4] Seddon N, Bearpark T. Observation of the inverse Doppler effect. *Science*, 2003, 302:1537 ~ 1540
- [5] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 3966 ~ 3969
- [6] Shen J T, Platzman P M. Near field imaging with negative dielectric constant lenses. *Appl Phys Lett*, 2002, 80:3286 ~ 3288
- [7] Fang N, Zhang X. Imaging properties of a metamaterial superlens. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 161 ~ 263
- [8] Parazzoli C G, Greigor R B, Nielsen J A, et al. Performance of a negative index of refraction lens. *Appl Phys Lett*, 2004, 84 (17):3232 ~ 3234
- [9] Pendry J B, Smith D R. Reversing light with negative refraction. *Physics Today*. 2004, 57(6):37 ~ 47
- [10] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47: 2075 ~ 2084
- [11] Markos P, Soukoulis C M. Numerical studies of left-handed materials and arrays of split ring resonators. *Phys Rev E*, 2002, 65: 036622
- [12] Gay-Balmaz P, Martin Olivier J F. Electromagnetic resonances in individual and coupled split-ring resonators. *J Appl Phys*, 2002, 92 (5): 2929 ~ 2936

赵乾 男,29岁,西北工业大学博士研究生。主要从事复杂流体光学行为和新型电磁材料“左手材料”的研究。

E-mail: ermrlab@nwpu.edu.cn

赵晓鹏 男,47岁,西北工业大学教授、博士生导师、国家杰出青年科学基金获得者,西北工业大学智能材料与结构中心主任。长期从事智能材料与结构研究,2001年开始左手材料研究。发表科研论文200余篇,其中SCI检索92篇,EI检索85篇,引用400多次,申请和授权中国发明专利60余项。

E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

(上接第33页)

- [5] 杜耀惟. 层间缝隙倾角交替放置以抑制波导窄边阵交叉极化的初步探讨. *天线技术*,1987
- [6] 林昌禄,聂在平,等. *天线工程手册*. 电子工业出版社,2002
- [7] Johnson R C, Jasik H. *Antenna Engineering Handbook*. 2nd ed New York: McGraw-Hill, 1984
- [8] Shahrokh Hashemi-Yeganeh, Elliott R. S. Analysis of un-tilted edge slot excited by tilted wires. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1990, 38(11): 1737 ~ 1745
- [9] Hirokawa J, Kildal P-S. Excitation of an untilted narrow-wall slot in a rectangular waveguide by using etched strips on a dielectric plate. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1997, 45(6): 1032 ~ 1037
- [10] Hamadallah M. Frequency limitations on broad-band performance of shunt slot arrays. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1989, 37(7): 817 ~ 826
- [11] Brown K W. Design of waveguide slotted arrays using commercially available finite element analysis software. *IEEE AP-S Digest*,1996: 1000 ~ 1003
- [12] 金林,何国瑜. 平板裂缝天线阻抗匹配设计的研究. *微波学报*,2000,16(4):373 ~ 377

汪伟 男,1969年生,安徽人,华东电子工程研究所工程师,2005年在上海大学通信与信息工程学院获工学博士学位,主要从事微波系统与天线研究。

金剑 男,1981年生,江苏人,华东电子工程研究所工程师,主要从事天线研究。

钟顺时 男,1939年生,浙江人,上海大学教授,博士生导师,研究方向为:天线、微波和电磁理论。