

# 二维负磁导率材料中的缺陷效应\*

康 雷 赵 乾 赵晓鹏†

(西北工业大学电流变技术研究所,应用物理系,西安 710072)

(2004 年 1 月 6 日收到,2004 年 2 月 10 日收到修改稿)

研究了以金属铜六边形开口谐振环为基元的二维负磁导率材料的缺陷效应.利用电路板刻蚀技术制备了二维负磁导率材料样品.采用波导法测量了点缺陷和线缺陷对二维负磁导率材料 X 波段(8—12GHz)微波透射行为的影响.实验发现,无缺陷的二维负磁导率材料样品存在一个谐振频率,在稍大于该谐振频率的极窄区域内表现为负磁导率.点缺陷和线缺陷 SRR 的引入导致材料主谐振峰的强度下降、谐振频率发生移动,品质因数  $Q$  显著下降.缺陷的存在破坏了材料的周期性结构,从而引起其谐振峰的谐振强度和谐振频率发生变化.缺陷效应的研究不仅对了解微波段负磁导率材料的行为特征是非常重要的,而且对可见光及红外波段负磁导率材料的实现具有重要的指导意义.

关键词:负磁导率,缺陷效应,开口谐振环

PACC:4270Y,6170E,2570E

## 1. 引 言

金属开口谐振环(split ring resonators, SRR)是最近实现的一种新颖复合结构材料——“左手材料”(left-handed metamaterials, LHM)的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>.LHM 在某一频率范围内磁导率和介电常数同时为负,在其中传播的电磁波的相速度和群速度方向相反,因而表现出许多奇特的物理现象,如反常 Doppler 效应<sup>[4]</sup>、反常 Cherenkov 效应<sup>[5]</sup>、完美透镜效应<sup>[6-10]</sup>和负折射效应<sup>[11,12]</sup>等,在无线通讯、超灵敏传感器和医学诊断成像等领域具有潜在的应用前景<sup>[13]</sup>.以一定周期排列的金属丝表现为微波等离子行为,即存在一个等离子体频率  $\omega_p$ ,当电磁波的频率小于  $\omega_p$  时,该媒质具有负的介电常数<sup>[14,15]</sup>;金属 SRR 内外环间可以产生电磁波谐振,即存在一个谐振频率  $\omega_0$ ,周期排列的 SRR 仅在频率稍大于  $\omega_0$  的极窄区域内具有负的磁导率<sup>[16]</sup>,因而 SRR 的研究对于 LHM 的制备具有重要的意义.Gay-Balmaz 等通过实验和数值模拟研究了单个和多个相互耦合 SRR 的电磁谐振行为<sup>[17]</sup>.Markos 等模拟了环厚度、环开口、环几何尺寸等参数对周期性排列的 SRR 的微波

透射特性及谐振频率的影响<sup>[18]</sup>.缺陷效应在光子晶体中可产生重要的影响,已被广泛研究<sup>[19,20]</sup>.我们报道了微波段一维负磁导率材料中的点缺陷效应<sup>[21]</sup>,发现缺陷的引入可以调节主谐振频率和谐振强度,从而可调节其负磁导率特性,为可调节负磁导率材料的制备提供了新思路.本文研究二维负磁导率材料中由于列间相互作用引起缺陷效应变化.采用毫米量级的六边形 SRR 为结构基元,制备了二维负磁导率材料样品,利用波导法系统地研究了不同大小的点缺陷和线缺陷对样品微波透射行为的影响.

## 2. 样品制备及实验

本实验所用样品结构组成单元为铜六边形 SRR,它是由同心且开口位置成  $180^\circ$  的两个六边形开口环组成,内外两个谐振环间可以产生电磁波谐振.采用电路板刻蚀技术制备了一系列不同尺寸的铜六边形 SRR,利用六边形环内外环的内切圆直径表示 SRR 的几何参数( $d_1/d_2$ ,单位为 mm)如图 1(a)).电路板材料为 0.8mm 厚的环氧酚醛玻璃纤维.铜 SRR 的厚度为 0.02mm,线宽  $c = 0.3$ mm,开口  $g = 0.3$ mm.将六边形 SRR 以一定的周期排列成二维有序结构,调节某些 SRR 的几何尺寸大小,即引

\* 国家杰出青年基金(批准号 50025207)和国家自然科学基金(批准号 5027054)资助的课题.

† E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn; 电话 029-88495950.

入缺陷制得具有不同缺陷的样品(图 1(b)). 本实验制备了点缺陷和线缺陷样品. 点缺陷样品分别以 1.0/2.2 和 1.0/3.0 SRR 为基准, 这里 2.2 和 3.0 分别是两种情形时的外环直径, 1.0 是内环直径, 1.0/2.2 和 1.0/3.0 指  $d_1/d_2$ . 晶格常数分别为  $a = 7.0\text{mm}$ ,  $b = 4.5\text{mm}$  和  $a = 7.0\text{mm}$ ,  $b = 9.5\text{mm}$ . 通过将

中心位置的 SRR 取走以形成空位点缺陷或替换为不同尺寸的 SRR 形成置换点缺陷. 线缺陷样品分别以 1.0/2.2 和 1.0/3.0 SRR 为基准, 晶格常数分别为  $a = 7.0\text{mm}$ ,  $b = 4.5\text{mm}$  和  $a = 7.0\text{mm}$ ,  $b = 7.5\text{mm}$ . 通过将中间一列平行于波矢的三个 SRR 取走形成空位线缺陷或替换为不同尺寸的 SRR 形成置换线缺陷.

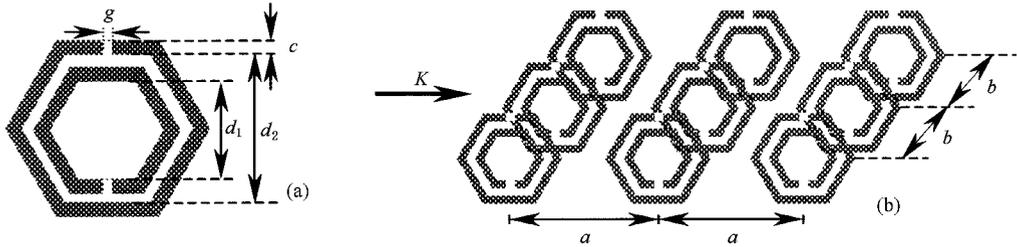


图 1 刻蚀法所制样品示意图 (a)开口谐振环(SRR)(b)二维 SRR 有序结构样品

采用矩形波导法测量带有缺陷的样品的微波 X 波段(8—12GHz)透射行为. 矩形波导的横截面尺寸为  $22.86\text{mm} \times 10.16\text{mm}$ . 将待测样品沿波的传播方向置入波导中, SRR 所在平面平行于矩形波导侧壁, 详细测试装置见文献 [21], 测量微波透射随频率的变化关系.

### 3. 实验结果及讨论

#### 3.1. 点缺陷样品测量结果

基准 SRR 为 1.0/2.2 和 1.0/3.0 的样品当引入不同点缺陷时的微波透射曲线(图 2(a))(b)).

由图 2 可见, 点缺陷的存在对主谐振峰的谐振频率和共振强度均有一定的影响. 谐振峰的品质因数  $Q$  表示 SRR 存储能量和平均损耗的能量之比, 可定义为谐振频率  $f_0$  与半最大全波的比值. 缺陷的引入使得谐振峰变宽, 导致品质因数  $Q$  减小, 对于基准为 1.0/2.2 的点缺陷样品, 其品质因数  $Q$  由无缺陷时的 73.6 减小为空位点缺陷时的 33.2, 对于基准为 1.0/3.0 的点缺陷样品, 其品质因数  $Q$  由无缺陷时的 60.34 减小为空位点缺陷时的 34.2. 为了更深入的研究点缺陷谐振环的几何尺寸对样品主谐振峰的影响, 以点缺陷谐振环与基准环的外环内切圆直径比  $\lambda$  为横坐标, 主谐振峰的谐振强度和谐振频率为纵坐标作图(图 3(a))(b)).

由图 3(a)可见, 基准 SRR 为 1.0/2.2 的样品引入点缺陷空位, 1.0/2.0, 1/2.6, 1.0/3.0, 1.0/3.4,

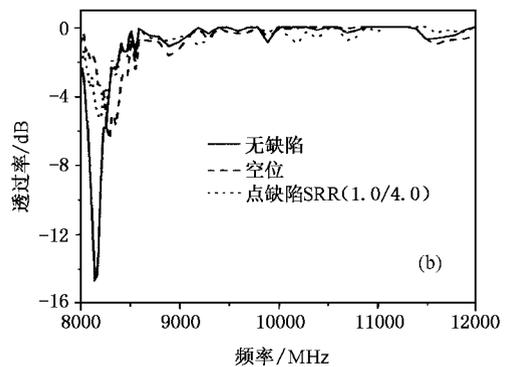
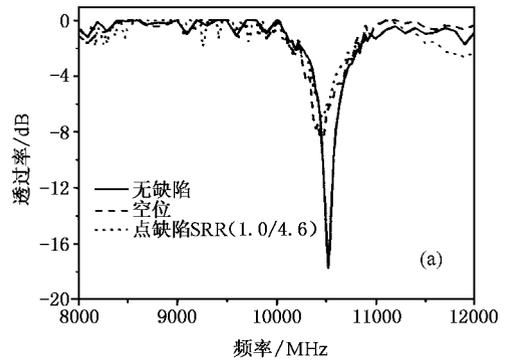


图 2 点缺陷样品的微波透射曲线 (a)基准 SRR 为 1.0/2.2 (b)基准 SRR 为 1.0/3.0

1.0/3.8, 1.0/4.0, 1.0/4.2, 1.0/4.6 SRR 时, 主谐振峰谐振强度大幅下降, 由无点缺陷时的  $-17.8\text{dB}$  降低到点缺陷 SRR 1.0/4.6 存在时的  $-7.0\text{dB}$ , 且其谐振强度随点缺陷 SRR 与基准 SRR 的几何尺寸比  $\lambda$  增大而减小. 缺陷对谐振峰的谐振频率的影响不大, 当缺陷 SRR 小于基准 SRR, 即  $\lambda < 1$  时, 其主谐振峰

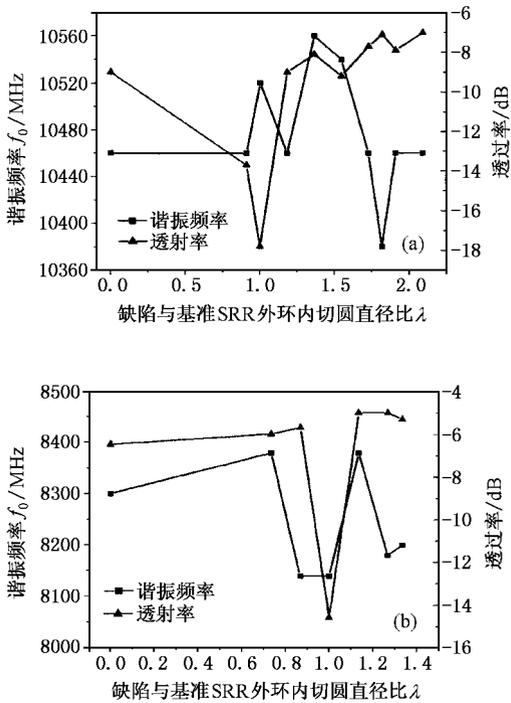


图3 谐振频率及透射率随点缺陷 SRR 与基准 SRR 的外环内切圆直径比变化曲线 (a)基准 SRR 为 1.0/2.2,(b)基准 SRR 为 1.0/3.0

向低频发生移动,而当缺陷 SRR 大于基准 SRR,即  $\lambda > 1$  时,其主谐振峰发生移动,但移动的方向不确定。

由图 3(b)可见,基准 SRR 为 1.0/3.0 的样品引入点缺陷空位,1.0/2.2,1.0/2.6,1.0/3.4,1.0/3.8,1.0/4.0 SRR 时,主谐振峰谐振强度大幅下降,由无点缺陷时的  $-14.6\text{dB}$  降低到点缺陷 SRR 1.0/4.0 存在时的  $-5.3\text{dB}$ ,且其谐振强度随点缺陷 SRR 与基准 SRR 的几何尺寸比  $\lambda$  增大而减小.缺陷 SRR 的引入使得谐振峰向高频发生移动。

### 3.2. 线缺陷样品测量结果

基准 SRR 为 1.0/2.2 和 1.0/3.0 的样品当引入不同线缺陷时的微波透射曲线(图 4(a))(b))。

由图 4 可见,线缺陷的存在对主谐振峰和谐振频率和透射率均有一定的影响.线缺陷的引入使得谐振峰变宽,导致品质因数  $Q$  减小,对于基准为 1.0/2.2 的线缺陷样品,其品质因数由无缺陷时的 73.6 减小为线缺陷 1.0/4.6 SRR 时的 26.2.为了更深入研究线缺陷组成单元 SRR 的几何尺寸对样品主谐振峰的影响,以线缺陷谐振环与基准环的外环内切圆直径比  $\lambda$  为横坐标,主谐振峰和谐振频率和透射率为纵坐标作图(图 5(a))(b))。

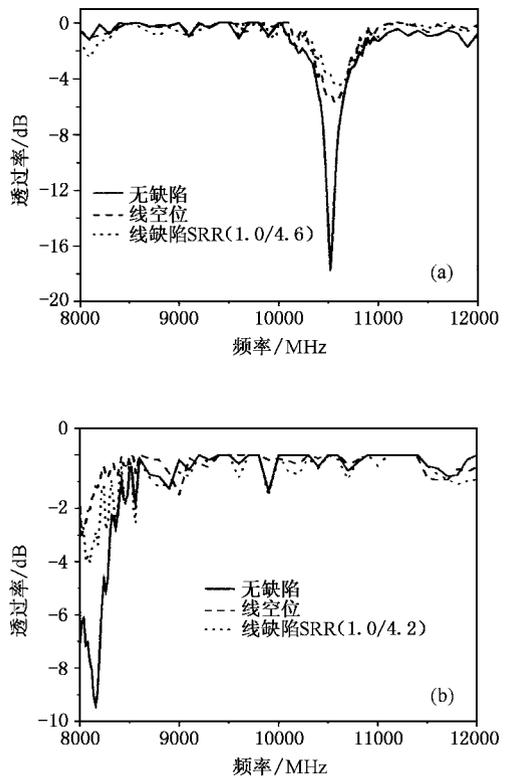


图4 线缺陷样品的微波透射曲线 (a)基准 SRR 为 1.0/2.2,(b)基准 SRR 为 1.0/3.0

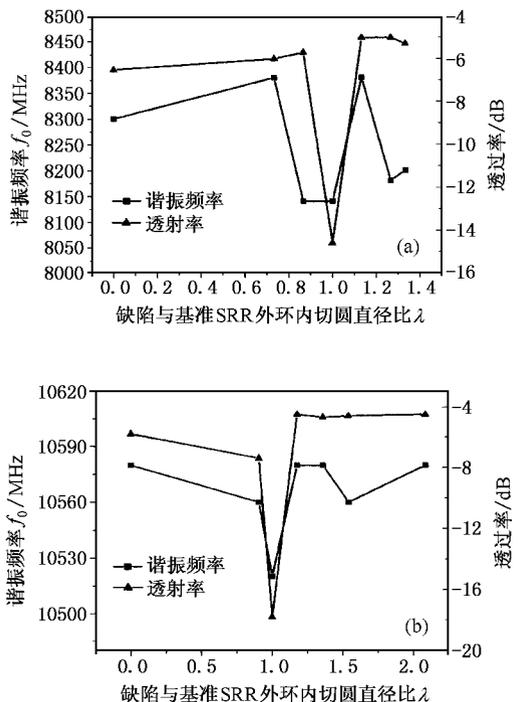


图5 谐振频率及透射率随线缺陷 SRR 与基准 SRR 的外环内切圆直径比变化曲线 (a)基准 SRR 为 1.0/2.2 (b)基准 SRR 为 1.0/3.0

由图 5(a)可见,基准 SRR 为 1.0/2.2 的样品引入与波矢平行的线缺陷空位,1.0/2.0,1.0/2.6,1.0/3.0,1.0/3.4,1.0/4.6 SRR 时,主谐振峰谐振强度大幅下降,其谐振强度由无线缺陷时的  $-17.8\text{dB}$  降低到线缺陷 SRR 1.0/4.6 存在时  $-4.5\text{dB}$ ,且线缺陷 SRR 与基准 SRR 的几何尺寸比  $\lambda$  越大,其谐振强度越小.线缺陷使得谐振峰向高频移动.

由图 5(b)可见,基准 SRR 为 1.0/3.0 的样品引入与波矢平行的线缺陷空位,1.0/2.2,1.0/2.6,1.0/3.0,1.0/3.4,1.0/3.8,1.0/4.0,1.0/4.2,1.0/4.6 SRR 时,主谐振峰谐振强度大幅下降,其谐振强度由无线缺陷时的  $-9.4\text{dB}$  降低到线缺陷 SRR 1.0/4.2 存在时  $-4.0\text{dB}$ .线缺陷使得谐振峰向低频移动.

### 3.3. 讨论

二维负磁导率材料是由 SRR 按照一定的周期在空间排列而形成的有序结构,无缺陷时 SRR 间的电磁场相互耦合作用较强,电磁谐振作用达到最大,谐振峰变得深而窄,因而具有较大的品质因数  $Q$ .当将样品中心的 SRR 取走形成空位点缺陷时,SRR 的周期分布遭到破坏,空位附近基准 SRR 间的有效距离增加,SRR 间的相互耦合作用减弱,从而其主谐振峰的谐振强度变小,谐振频率由于相互作用发生变化而移动.当将空位替换为不同大小的缺陷 SRR 时,缺陷 SRR 因其几何结构特征而与电磁波产生谐振作用,同时在其周围产生电磁场,该电磁场与基准 SRR 所产生的电磁场及入射电磁场间发生耦合作用,破坏了 SRR 的周期性排列,样品中电磁场分布在缺陷附近发生畸变,导致主谐振强度和谐振频率发生变化.线缺陷是由多个相同尺寸的 SRR 排列成一行而构成,与点缺陷相比,其对样品的周期性破坏

较大,因而线缺陷使得主谐振强度的幅值变化较大.缺陷的存在破坏了材料的周期性结构,导致谐振峰变宽,谐振强度下降,品质因数  $Q$  减小.

二维负磁导率材料中的点缺陷效应比一维负磁导率材料中的点缺陷效应强,点缺陷的引入使得二维样品的主谐振峰强度下降 61%,而一维样品仅下降 39%.在一维样品中,相互作用主要为点缺陷 SRR 与同列中的基准与其他列的基准 SRR 产生相互作用.而在二维样品中,点缺陷 SRR 除与同一列中的基准 SRR 相互作用外,还与其他列的 SRR 产生相互作用,因而点缺陷对二维样品的影响比一维样品强.

## 4. 结 论

本文研究了二维负磁导率材料中的缺陷效应.采用矩形波导法测量了点缺陷和线缺陷对二维负磁导率材料 X 波段微波透射行为的影响.实验发现:基准 SRR 为 1.0/2.2 和 1.0/3.0 的样品存在一个谐振频率,即  $f_{1.0/2.2} = 10520\text{MHz}$ ,  $f_{1.0/3.0} = 8140\text{MHz}$ ,在靠近其谐振频率上侧的极窄区域内样品可能具有负的磁导率;点缺陷 SRR 的引入导致样品主谐振峰强度最大下降 61%,谐振频率变化 240MHz,品质因数  $Q$  由无线缺陷时的 73.6 减小为空位点缺陷时的 33.2;线缺陷 SRR 的引入导致样品主谐振峰强度最大下降 75%,谐振频率变化 60MHz,品质因数  $Q$  由无线缺陷时的 73.6 减小为线缺陷时的 26.2.缺陷的存在破坏了材料的周期性结构,从而引起其谐振峰的谐振强度和谐振频率发生变化.缺陷效应的研究对于可调谐负磁导率材料的实现具有重要的指导意义.

[1] Shelby R, Smith D R and Schultz S 2001 *Science* **292** 77

[2] Smith D R and Kroell N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933

[3] Smith D R *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184

[4] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509

[5] Luo C Y *et al* 2003 *Science* **299** 368

[6] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966

[7] Fang N and Zhang X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 161

[8] Wiltshire M C K *et al* 2001 *Science* **291** 849

[9] Gomez-Santos G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 077401

[10] Shen J T and Platzman P M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3286

[11] Houck A A, Brock J B and Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401

[12] Parazzoli C G, Greer R B, Li K, Koltenbah B E C and Tanielian M 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401

[13] Podolskiy V A, Sarychev A K and Shalaev V M 2002 *Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials* **11** 65

[14] Pendry J B *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773

[15] Gay-Balmaz P, Maccio C and Martin O J F 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2896

[16] Pendry J B *et al* 1999 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **47** 2075

[17] Gay-Balmaz P and Martin O J F 2002 *J. Appl. Phys.* **93** 2929

[18] Markos P and Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036622

- [ 19 ] Villeneuve P R , Fan S H and Joannopoulos J D 1996 *Phys. Rev. B* **54** 7837 E 58 7908
- [ 21 ] Zhao Q *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 ( in Chinese ) 赵 乾 等 2004 物理学报 **53** 2206 ]
- [ 20 ] Kee C S , Kim J E , Park H Y and Chang K J 1998 *Phys. Rev.*

## The defect effect in the two-dimensional negative permeability material<sup>\*</sup>

Kang Lei , Zhao Qian , Zhao Xiao-Peng<sup>†</sup>

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

( Received 6 January 2004 ; revised manuscript received 10 February 2004 )

### Abstract

The defect effect in the two-dimensional ( 2D ) negative permeability material , consisting of copper hexagon split ring resonators ( SRRs ) , is investigated . The printed circuit boards with SRRs on one side are fabricated using a shadow mask/etching technique . We use a rectangular waveguide system to measure the X-band transmission in 2D negative permeability materials with different dot and line defects . The measured data shows that there is only one resonance frequency and high quality factor  $Q$  for a 2D negative permeability material without defects . The main resonance frequency has a shift and the resonant peak value decreases when the defect SRRs are introduced into the samples . We consider that the defect SRRs break the periodic structure of the samples , which results in the shift of the main resonance frequency and the resonant intensity . The investigation of the defect effects is important not only for the understanding of the characteristics of the negative permeability material , but also for the realization of the left-handed metamaterials in the infrared and visible region .

**Keywords** : negative effective permeability material , defect effect , split ring resonators

**PACC** : 4270Y , 6170E , 2570E

<sup>\*</sup> Project supported by the Funds for Outstanding Young Researchers from the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 50025207 ) and the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 5027054 ) .

<sup>†</sup> E-mail : xpzha@nwpu.edu.cn ; Tel 029-88495950 .