

负磁导率材料的微波反射行为*

康 雷 赵 乾 赵晓鹏**

西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072

摘要 采用波导法研究了开口谐振环(split resonator rings, SRRs)负磁导率材料 X 波段(8—12 GHz)的微波反射行为. 通过电路板刻蚀技术制备了六边形 SRRs 为单元的二维及三维样品. 实验表明: 二维负磁导率材料样品反射率曲线形成反射峰, 其峰值点对应频率与材料谐振频率一致, 反射率变化达到 10 dB, 在谐振频率两侧较窄的区域反射微弱; 三维样品反射率曲线形成反射峰, 其峰值点位置与材料谐振频率一致, 调节晶格常数时材料反射行为变化较大; 负磁导率材料反射相位随频率增大, 二维样品在谐振频率处反射相位存在一个拐点.

关键词 负磁导率材料 反射行为

近年, 周期排列开口谐振环(split resonator rings, SRRs)与金属杆(wires)组合单元构成的左手材料(left handed materials, LHMs)因表现出光学、信息学等多方面的新奇特性而受到广泛关注, 成为科学及工程领域的研究热点^[1-3]. 左手材料具有同时为负值的介电常数 ϵ 和磁导率 μ , 因此又被称为“双负”材料. 材料的“双负”性质可由阵列排布的金属杆在小于其等离子体频率的区域和开口谐振环组成的单元在其谐振频率区域分别获得^[4, 5]. 由于自然界的材料只有在极少数情形才能表现出磁导率为负值的特异性质, 因此开口谐振环阵列构成的负磁导率材料的研究问题显得尤为突出. 目前, 有关左手材料的研究工作主要集中于其物理理论的深入、实现具有左手效应的新型材料以及利用其透射特性探讨光的负折射等奇异效应的实验研究等方面^[6-14]. 我们认为, 左手材料作为一种新型信息材料, 其反射问题的研究同样十分重要, 磁导率 $\mu < 0$ 的负磁导率材料的反射行为尤其值得关注. 本文通过电路板刻蚀技术制备了微波负磁导

率材料, 并采用矩形波导法实验研究了其 X 波段(8—12 GHz)的微波反射率及反射相位随频率的变化情况.

1 实验方法

1.1 负磁导率材料制备

本实验采用电路板刻蚀技术, 在电路板材料表面制备六边形开口谐振环(SRRs)阵列, 经过一定的空间排布形成负磁导率材料样品. 电路板材料为 0.8 mm 厚的环氧酚醛玻璃纤维, 金属铜厚度为 0.02 mm. 如图 1(a), 利用内、外环的内切圆直径表征开口谐振环的几何参数(d_1/d_2 , 单位 mm), 且开口 $g=0.3$ mm, 线宽 $c=0.3$ mm. 本实验制备了两种负磁导率材料样品: 如图 1(b) 所示, 将六边形 SRRs 以一定周期排列成二维有序结构, 制得二维负磁导率材料样品, 其中晶格常数 $a=7.0$ mm, $b=7.0$ mm; 如图 1(c) 所示, 将六边形 SRRs 以一定周期排列成三维有序结构, 制得晶格常数 $a=5.0$ mm, $e=3.3$ mm, 而 b 分别为 5.0, 7.0 和

2005-01-27 收稿, 2005-04-14 收修稿

* 国家杰出青年科学基金(批准号: 50025207), 国家自然科学基金(批准号: 50272054)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2004CB719800)资助

** 通讯作者, E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

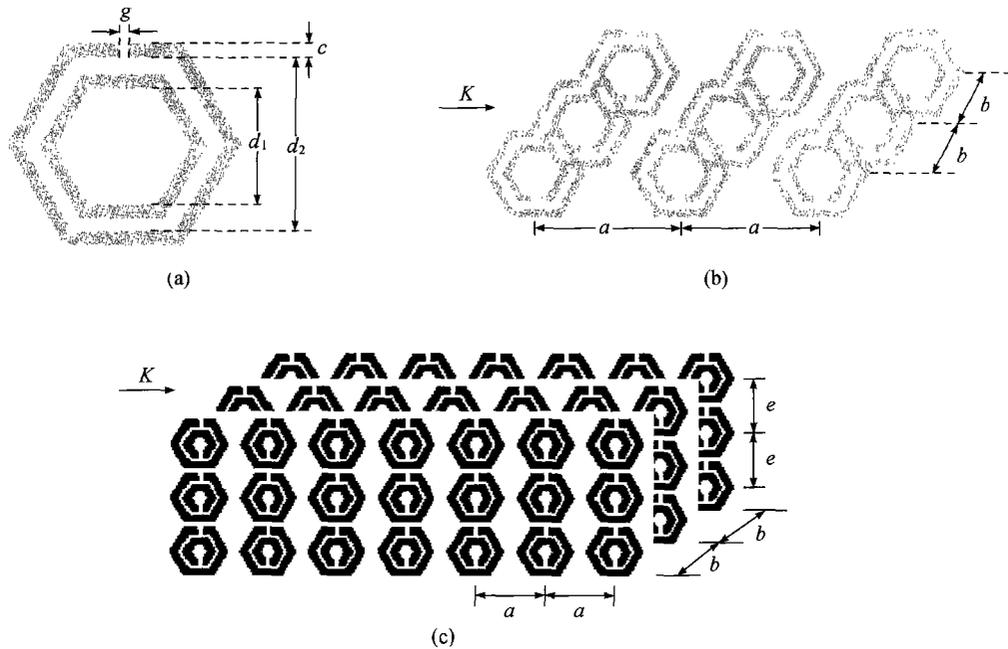


图1 刻蚀法所制样品示意图

(a) 开口谐振环 (SRR); (b) 二维负磁导率材料样品; (c) 三维负磁导率材料样品

9.0 mm 的 3 种三维负磁导率材料样品; 图 1(b), (c) 中 K 代表电磁波的传播方向。

1.2 实验方法

使用 AV3618 矢量网络分析仪, 采用矩形波导法测量二维及三维负磁导率材料样品 X 波段 (8—12 GHz) 的反射行为. 矩形波导的横截面尺寸为 $22.86 \text{ mm} \times 10.16 \text{ mm}$. 将待测样品沿波传播的方向置入波导中, SRRs 所在平面平行于矩形波导侧壁, 测量微波反射率随频率的变化关系. 测量装置示意图如图 2. 具有能量 $I_{\text{总}}$ 的入射微波经同轴电缆及波导转换器进入波导管自左向右传播, 与负磁导率材料样品作用后, 分别形成能量为 $I_{\text{反射}}$ 和 $I_{\text{透射}}$ 的反射波和透射波. 其中, 反射波沿入射波相反的方向传播至网络分析仪并计算得到反射率及反射相位; 透射波在继续传播的过程中被装置末端的小反射负载所消除, 以保证不产生与反射波同向的反射能量. 因此可以认为, 网络分析仪所检测到的反射波即为负磁导率样品反射的电磁波. 为了更全面地反映负磁导率材料与电磁波的相互作用, 在不改变样品状态的前提下, 实验还测量了样品的微波透射率随频率的变化关系, 具体测量装置见文献[11].

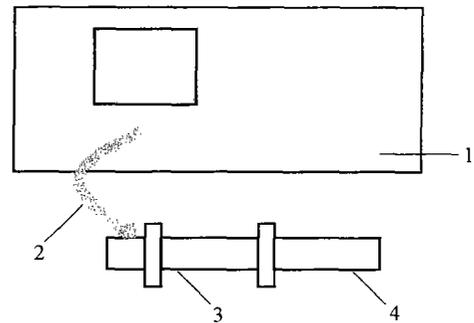


图2 波导法微波反射测量装置示意图

1. AV 3618 矢量网络分析仪; 2. 同轴电缆;
3. 波导 (样品室); 4. 小反射负载

2 结果与讨论

2.1 二维负磁导率材料样品的测量结果

1.0/2.2 SRRs 构成的二维负磁导率材料样品的微波反射率曲线及反射相位曲线如图 3 所示, 其中虚线为材料样品的微波透射率曲线. 如图所示, 材料的微波透射率形成禁带, 其极值对应的频率为材料的谐振频率, 且在谐振频率附近区域材料的磁导率为负值. 由图 3(a) 可见, 二维负磁导率材料样

品反射率曲线形成反射峰，其反射率变化达到10 dB，峰值点对应频率与材料的谐振频率一致；9.7及11.0 GHz 频率附近二维负磁导率材料反射微弱。

由图3(b)可见，二维负磁导率材料样品的反射相位随频率增大，在材料谐振频率处反射相位存在一个拐点。

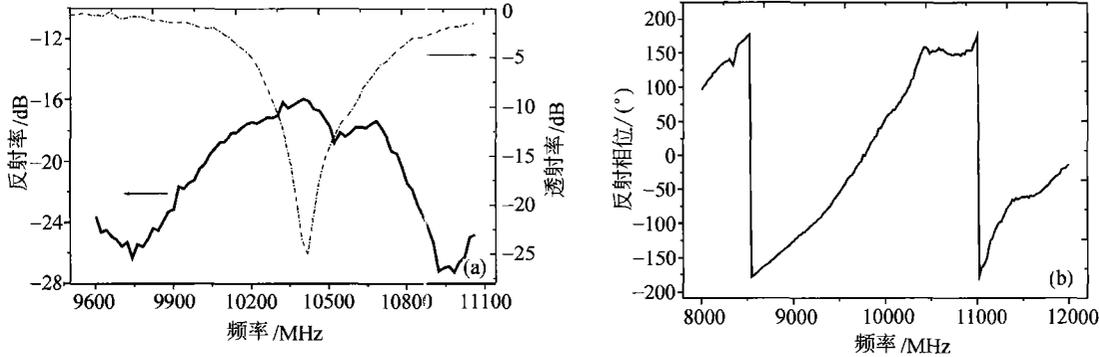


图3 二维负磁导率材料微波反射测量结果
(a) 反射率曲线；(b) 反射相位

2.2 三维负磁导率材料样品的测量结果

晶格常数 $a=7.0$ mm, $e=3.3$ mm 及 b 分别为 5.0, 7.0 和 9.0 mm, 1.0/2.2 SRRs 为单元构成的三维负磁导率材料样品在 X 波段的反射率曲线及反射相位曲线分别如图 4—6 所示，其中虚线为材料样品的微波透射率曲线。

导率材料样品 X 波段的反射率曲线在 10.8 GHz 附近形成峰值为 -7 dB 的反射峰，其峰值点对应频率与材料谐振频率一致；而在材料谐振频率低频端较窄频率区域反射微弱。由图 4(b)可见，晶格常数 $b=5$ mm 的三维负磁导率材料样品的反射相位随频率增大。

由图 4(a)可见，晶格常数 $b=5$ mm 的三维负磁

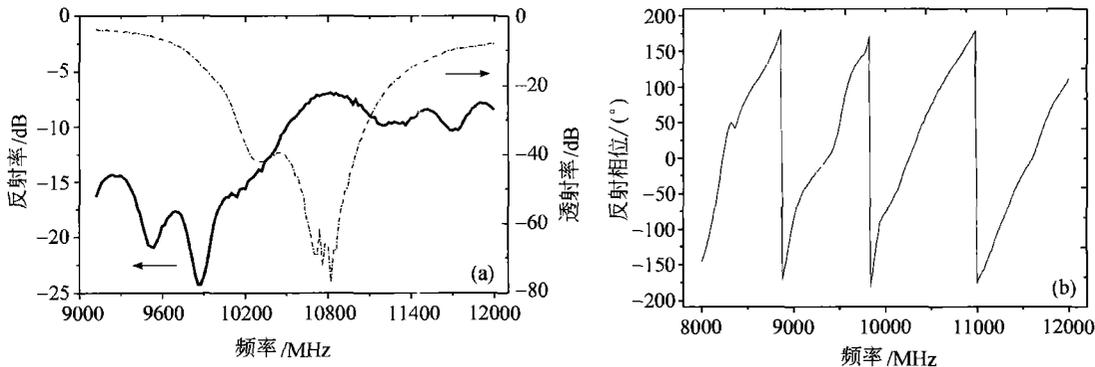
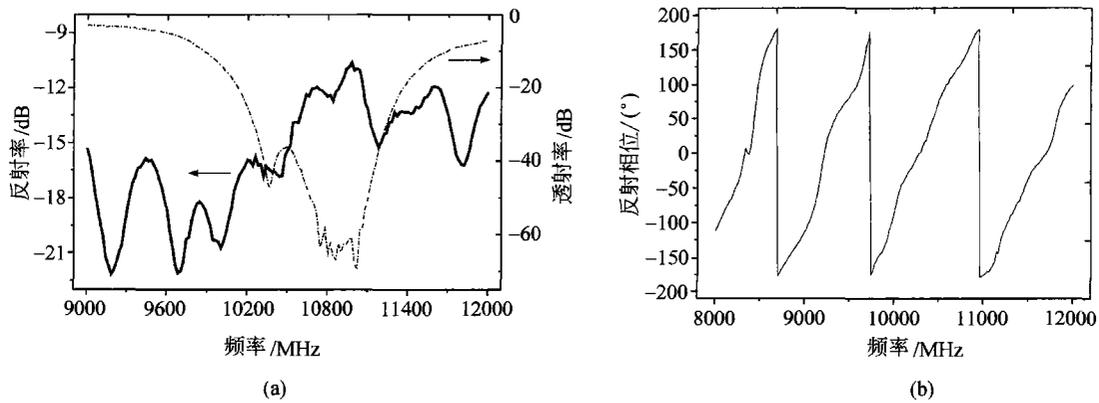


图4 三维负磁导率材料 ($b=5$ mm) 微波反射测量结果
(a) 反射率曲线；(b) 反射相位

由图 5(a)可见，晶格常数 $b=7$ mm 的三维负磁导率材料样品 X 波段的反射率曲线在 11.0 GHz 附近形成峰值为 -10 dB 的反射峰，其峰值点对应频率与材料谐振频率一致；而在材料谐振频率两侧较

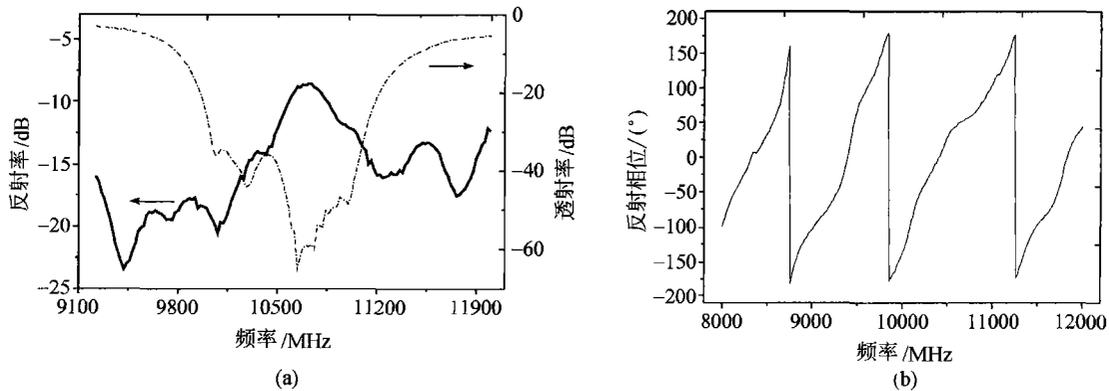
窄频率区域反射微弱。由图 5(b)可见，晶格常数 $b=7$ mm 的三维负磁导率材料样品的反射相位随频率增大。

图5 三维负磁导率材料 ($b=7\text{ mm}$) 微波反射测量结果

(a) 反射率曲线; (b) 反射相位

由图 6(a)可见, 晶格常数 $b=9\text{ mm}$ 的三维负磁导率材料样品 X 波段的反射率曲线在 10.6 GHz 附近形成峰值为 -9 dB 的反射峰, 其峰值点对应频率与材

料谐振频率一致; 而在材料谐振频率两侧较窄频率区域反射微弱. 由图 6(b)可见, 晶格常数 $b=9\text{ mm}$ 的三维负磁导率材料样品的反射相位随频率增大.

图6 三维负磁导率材料 ($b=9\text{ mm}$) 微波反射测量结果

(a) 反射率曲线; (b) 反射相位

2.3 讨论

本文利用波导法实验研究了二维及三维负磁导率材料的反射性质, 实验得到: 由 $1.0/2.2\text{ SRRs}$ 构成的二维负磁导率材料与电磁波发生谐振, 在谐振频率附近分别形成透射禁带及反射率峰, 且反射峰值点对应频率与材料谐振频率一致; 二维负磁导率材料反射率变化达到 10 dB , 材料对谐振频率两侧较窄频率区域的电磁波反射微弱; 相同结构单元构成的三维负磁导率材料的反射行为受晶格常数的影响较大, 晶格常数改变时, 反射峰值变化, 峰值点对应频率发生移动, 但始终与材料谐振频率一致; 负磁导率材料反射相位随频率增大, 且二维负

磁导率材料的反射相位曲线在材料谐振频率处存在一个拐点. 现有理论认为: 开口谐振环阵列构成的负磁导率材料, 由于其特殊的空间结构而在某频率与电磁波发生谐振, 在谐振频率区域磁导率 $\mu < 0$; 开口谐振环的磁响应在材料谐振频率点相对于外场发生相位跃变, 从而形成透射禁带, 同时, 在透射禁带下降沿和上升沿频率位置电磁波被大量吸收. 由 $I_{\text{总}} = I_{\text{反射}} + I_{\text{透射}} + I_{\text{吸收}}$ 的能量守恒关系出发 (其中 $I_{\text{总}}$, $I_{\text{反射}}$, $I_{\text{透射}}$ 及 $I_{\text{吸收}}$ 分别是波导管内入射的电磁波总能量、经材料反射、透射及吸收的电磁波能量), 可推知在材料谐振频率附近, 本文负磁导率材料反射率的实验结果与以上理论吻合的很好. 另

外,负磁导率材料透射相位仅在谐振频率处发生相位跃变,从而标示了材料固有的谐振特性.本文中二维负磁导率材料反射相位曲线在材料谐振频率处有一个拐点,因此我们认为反射相位同样能够标示材料的谐振特性.相对于二维情形,三维负磁导率材料谐振更强,因此形成透射禁带及反射峰的效应更强.负磁导率材料的电磁波响应行为紧密受控于材料的结构.三维情形时改变晶格常数,即改变材料结构,谐振单元相互作用发生变化,表现为材料透射禁带及反射行为的改变.

3 结论

实验研究了二维及三维负磁导率材料的反射行为.采用矩形波导法测量了 $1.0/2.2$ SRRs 为单元的二维和三维负磁导率材料在X波段(8—12 GHz)的微波反射率及反射相位.得出,二维负磁导率材料样品存在一个谐振频率 $f_{2D}=10.3$ GHz,在该频率附近区域,材料反射率曲线形成反射峰,而在谐振频率两侧较窄区域电磁波反射微弱;三维负磁导率材料反射率曲线也形成反射峰,但不同晶格常数的样品反射峰值不同,峰值点频率与材料谐振频率一致;负磁导率材料反射相位随频率增大,且二维负磁导率材料的反射相位曲线在材料谐振频率处存在一个拐点.

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: 509

2 Shelby R, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 2001, 292: 77

3 Seddon N, Bearpark T. Response to comment on "observation of the inverse Doppler effect". *Science*, 2003, 302: 1537

4 Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 4773

5 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

6 Koschny T, Kafesaki M. Effective medium theory of left-handed materials. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 107402

7 Falcone F, Lopetegui T, Laso M A G, et al. Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 197401

8 Smith D R, Rye P M, Mock J J, et al. Enhanced diffraction from a grating on the surface of a negative-index metamaterial. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 137405

9 Pendry J B. A chiral route to negative refraction. *Science*, 2004, 306: 1353

10 Yen T J, Padilla W J, Fang N, et al. Terahertz magnetic response from artificial materials. *Science*, 2004, 303: 1494

11 赵 乾, 赵晓鹏, 康 雷, 等. 一维负磁导率材料中的缺陷效应. *物理学报*, 2004, 53: 2206

12 康 雷, 赵 乾, 赵晓鹏. 二维负磁导率材料中的缺陷效应. *物理学报*, 2004, 53: 3379

13 康 雷, 罗春荣, 赵 乾, 等. 面状分布缺陷谐振环对左手材料微波效应的影响. *科学通报*, 2004, 49: 2407

14 罗春荣, 康 雷, 赵 乾, 等. 非均匀缺陷环对微波左手材料的影响. *物理学报*, 2005, 54: 1607