

左手材料的反射特性与负折射率行为^{*}

郑 晴 赵晓鹏[†] 付全红 赵 乾 康 雷 李明明

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

(2005 年 2 月 4 日收到, 2005 年 6 月 17 日收到修改稿)

利用平板波导法研究了不同入射角度下周期排列开口谐振环负磁导率材料、周期排列金属杆负介电常数材料以及左手材料微波反射特性, 并利用劈尖法研究了左手材料的负折射特性. 实验结果表明: 负磁导率材料反射率曲线形成反射峰, 其对应的反射峰频率与材料的谐振频率一致; 负介电常数材料反射率接近 0 dB; 左手材料出现单个反射较小的反射峰, 其峰值反射率随入射角度的增大而变大, 即反射能力增强, 且反射峰与透射峰有相对频移. 劈尖法测量还表明, 左手材料在 9800 MHz 频率附近出现负折射现象, 其折射率 n 为 -0.796 .

关键词: 左手材料, 反射, 负折射率

PACC: 4270Y, 6170E, 2570E

1. 引 言

左手材料(left-handed metamaterials)是一种人工周期结构材料, 其特性受控于结构单元几何形状及其空间分布, 有效介电常数 ϵ_{eff} 和磁导率 μ_{eff} 同时小于零^[1]. 左手材料中传播的电磁场分量 E, B 与波矢 k 满足“左手定则”, 电磁波的相速度与群速度方向相反, 从而呈现出许多奇异的物理光学特性, 如反常 Doppler 效应、反常 Cherenkov 效应、完美透镜效应、负折射效应^[2-8]等.

目前, 对于左手材料的研究主要集中于其奇异的透射行为方面. 如 Pendry 等^[9]提出周期排列开口谐振环(split ring resonators, SRRs)在其谐振频率附近表现出有效磁导率 μ_{eff} 为负, 周期排列金属杆结构表现出类似于高通滤波器行为, 即低频时有效介电常数 ϵ_{eff} 小于零. Markos 等^[10]模拟了环厚度、环开口、环的几何尺寸等参数对周期排列 SRRs 的微波透射特性及谐振频率的影响. Shelby 等^[11]通过实验观察到微波频段电磁波通过左手材料与空气界面时发生“负折射”现象. 文献[12]采用类似的实验装置测量了不同左手材料的负折射率. 我们研究组设计了六边形 SRRs 并利用矩形波导法实验研究了由其周期排列形成的负磁导率材料和左手材料中的缺陷

效应, 取得了一些有意义的结果^[13-15]. 电磁波在介质分界面处的反射现象是电磁波与物质相互作用的一个基本的问题, 不仅具有理论意义而且具有非常重要的应用价值. 微波斜入射时左手材料的反射行为还未见报道. 对于斜入射的研究会深化对左手材料基本问题的理解, 必将拓展左手材料的应用范围. 本文利用平板波导法实验研究了不同角度入射到 SRRs 负磁导率材料、周期排列金属杆负介电常数材料以及左手材料的微波反射特性, 利用劈尖法研究了左手材料负折射特性, 测量了左手材料的负折射率.

2. 样品制备和反射测量装置

采用电路板刻蚀技术在 0.5 mm 厚的环氧酚醛玻璃纤维板上制备一系列铜六边形 SRRs 和铜杆, 经过一定的空间排布形成负磁导率材料和负介电常数材料, 铜的厚度均为 0.02 mm. SRRs 设计成六边形是由于六边形更接近于自然界中物质颗粒的形状, 并且调控 SRRs 的谐振参数使其谐振频率出现在 X 波段. 如图 1(a), 利用内、外环的内切圆直径 d_1, d_2 (单位 mm) 表征 SRRs 的几何参数, 且开口 $g = 0.3$ mm, 线宽 $c = 0.3$ mm, 铜杆长度 10.4 mm, 线宽 0.5 mm. SRRs 和铜杆一一对应且分别位于纤维板两侧,

^{*} 国家杰出青年科学基金(批准号: 50025207)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2004CB719800)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

以此为结构单元周期排列制得左手材料(如图 1(b)所示).

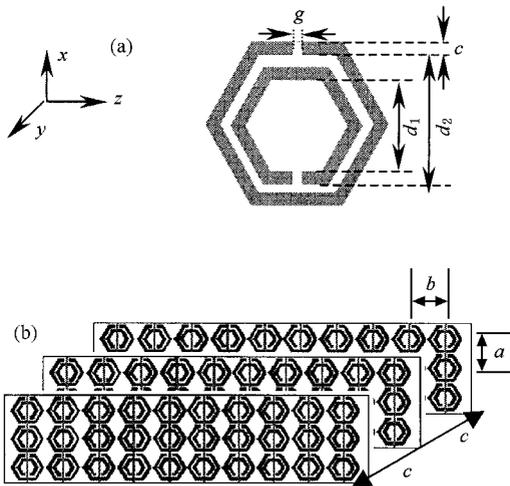


图 1 刻蚀法所制备的样品示意图 (a)开口谐振环(SRR), (b)左手材料样品

负磁导率材料、负介电常数材料及左手材料以相同的方式排列.沿 x 、 y 和 z 方向上 SRRs 的单元数分别为 3、29 和 9.其晶格常数为 $a = 3.47$ mm, $b = 5$ mm, $c = 5$ mm.

图 2 是研究样品反射特性装置示意图.样品置于上下两层铝板构成的平板波导中间,铝板间距为 10.6 mm,铝板前端构成圆盘状,半径为 15 cm.矩形平板波导两侧放置吸波材料,以使到达样品附近的波束可近似看作均匀平面波.由图 2 可见,入射波以一定的入射角入射到样品与空气的交界面处,并产生反射,微波检测器探头以圆心为轴,探测其相应反射角度下的功率值.实验中信号发生器频段为 X 波段(8—12 GHz).

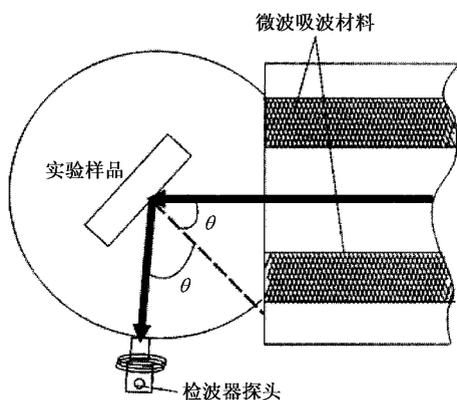


图 2 平板波导法反射测量装置示意图

3. 实验结果及分析

3.1. 不同入射角度下反射特性研究

选用入射角度为 35° 、 45° 和 55° 情况,对负磁导率材料、负介电常数材料、左手材料反射特性进行了研究.

3.1.1. 负磁导率材料反射特性

将负磁导率材料置于测量装置中进行反射测量.结果如图 3 所示.由图 3 可见,负磁导率材料样品在 X 波段反射率曲线形成反射峰,其对应的反射峰频率与材料的谐振频率一致.在 11200 MHz 频率处出现反射率极大值,形成反射峰.入射角为 35° ,反射峰处反射率为 -1.79 dB,约 66.23% 的能量由样品反射回来;入射角为 45° ,反射峰处反射率为 -0.82 dB,约 82.64% 的能量由样品反射回来;入射角为 55° ,反射峰处反射率为 -0.51 dB,约 89.29% 的能量由样品反射回来.

负磁导率材料在其谐振频率区域磁导率小于零, SRRs 的磁响应在材料谐振频率附近形成透射禁带,在透射禁带下降沿和上升沿频率位置电磁波被大量吸收,在谐振频率点吸收相对较少.根据能量守恒关系 $I_i = I_r + I_t + I_a$ (其中 I_i , I_r , I_t 及 I_a 分别是入射电磁波总能量、经材料反射、透射及吸收的电磁波能量),可知在材料谐振频率附近电磁波透射较小,其反射则较大.

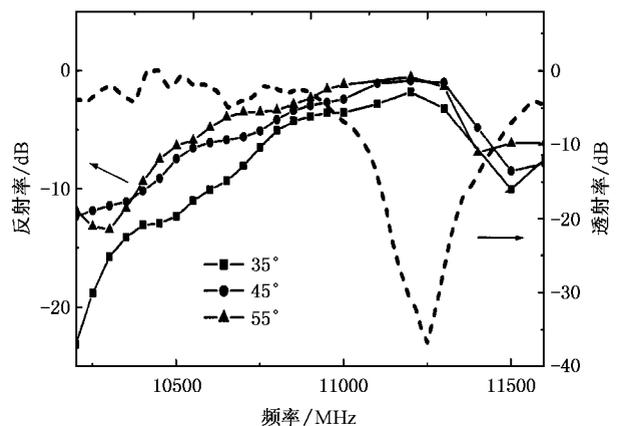


图 3 负磁导率材料微波反射和透射测量结果

3.1.2. 负介电常数材料反射特性

对负介电常数材料微波反射特性进行了研究,结果如图 4 所示.由图 4 可见,在 9000—12000 MHz

频段,不同入射角下金属杆的反射率最大值接近 0 dB,透射率最小值约为 -75 dB,此频段内材料的介电常数小于零.负介电常数材料的电磁波响应行为与等离子体相似,存在一个等离子体谐振频率 ω_p ,当频率 $\omega < \omega_p$ 时,电磁波全部被反射而没有能量透过,因而具有大的反射率.

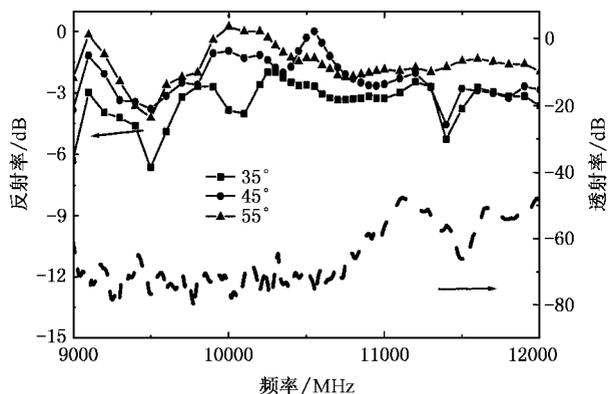


图4 负介电常数材料微波反射和透射测量结果

3.1.3. 左手材料反射特性

图 5(a) 是入射角为 35°、45° 和 55° 时左手材料的反射率和透射率随频率变化曲线. 由图 5(a) 可见, 在 10000—11000 MHz 频段内, 入射角为 35°, 其反射谱在 10650 MHz 频率处出现 -12.09 dB 的反射峰, 约 6.18% 的能量由样品反射回来; 入射角为 45°, 在 10700 MHz 频率处出现 -10.13 dB 的反射峰, 约 9.71% 的能量由样品反射回来; 入射角为 55°, 在 10650 MHz 频率处出现 -9.14 dB 的反射峰, 约 12.19% 的能量由样品反射回来. 其他频段反射很强, 接近于全反射.

左手材料透射行为测试表明, 透射峰位于 8950—10150 MHz 频段内, 处在周期排列 SRRs 和金属杆的禁带交叠处, 此时材料的介电常数和磁导率同时小于零. 反射峰相对于透射峰发生了约 1000 MHz 的频移. 在波导管中测量 x 方向上 SRRs 为 1 层时的左手材料, 发现其反射峰位于 8950—10150 MHz 频段内. 本实验左手材料在 x 方向上 SRRs 为 3 层, 则 SRRs 不仅与层内最近邻和次近邻 SRRs 发生相互作用, 而且还受到层间和斜对角 SRRs 的作用. 我们认为该相互作用是引起反射峰相对透射峰发生频移的原因.

由图 5(a) 可知, 随入射角度的增大左手材料反射率也变大. 电场垂直于入射面时, 据菲涅耳公式及斯涅尔定律, 电磁波由空气入射到介质表面时反射

系数 R 与入射角 θ 和折射率 n 的关系^[16] 为

$$R = \frac{|E_{02}|^2}{|E_{01}|^2} = \left(\frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right)^2. \quad (1)$$

由(1)式可以看出, 当折射率 n 一定时, 反射系数 R 随入射角 θ 的增大而增大. 由图 5(b) 可知, 左手材料反射率由 -12.09, -10.13 dB 变化到 -9.14 dB, 表明其反射峰处反射率随入射角度的增大而变大, 即反射能力增强.

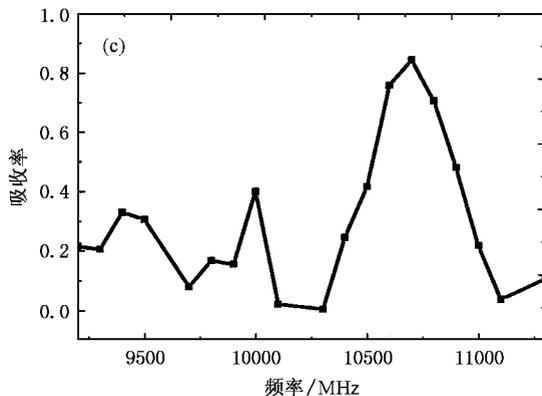
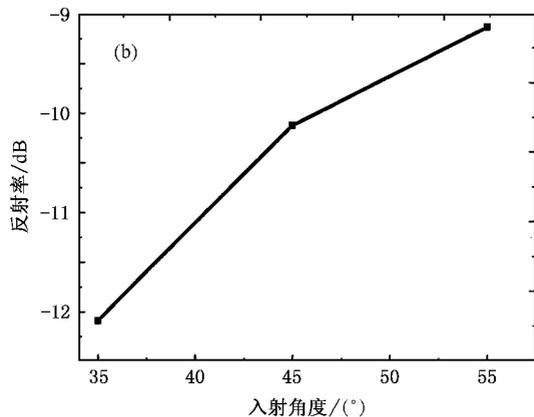
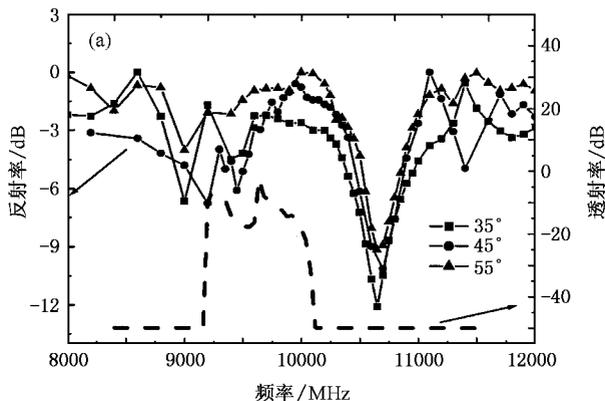


图5 左手材料的微波特性 (a)左手材料微波反射和透射测量结果 (b)反射峰处反射率随入射角度变化曲线 (c)左手材料由微波反射率和透射率测量结果推算出的吸收率随频率变化曲线

根据能量守恒定律,由左手材料反射率和透射率测量结果可推算出左手材料的微波吸收性能.如图 5(c)所示,左手材料的吸收率曲线在其谐振环的谐振频率附近形成吸收峰,而在 8950—10150 MHz 频段吸收率相对较小.

3.2. 左手材料负折射率行为

将左手材料样品制成劈尖状,其斜边与长直角边夹角为 18.43° ,装置如图 6 所示.入射波从样品长直角边垂直入射,以其斜边作为折射界面,微波检测器探头以圆盘圆心为轴沿圆盘边缘转动,探测某一角度的出射功率,微波沿吸波材料及铝板形成的通路入射,到达样品斜边的交界面并折射出去,入射角为 18.43° .图 6 中虚线为空气与样品斜边交界面的法线方向,对应的出射角为 0° .如果此样品具有负折射率,则出射方向将位于图中法线下方,反之出射方向将在法线上方.检测器所检测到的功率峰值所处角度为折射角,据斯涅尔定律得到样品折射率.

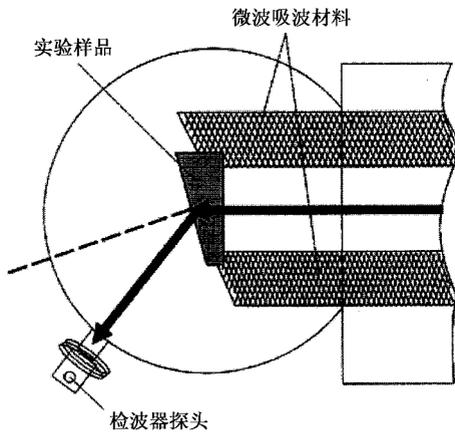


图 6 左手材料负折射测量装置示意图

图 7(a)给出聚四氟乙烯(Teflon)出射功率随折射角度的变化曲线,算得其折射率为 1.31,与理论值基本相符.

实验在入射波频率为 9400,9800,10000,11200 MHz 下测试了左手材料负折射行为,结果如图 7(b)所示.由图 7(b)可见,在 9400 MHz 频率下,正折射和负折射角度方向都出现了功率峰值,负方向峰值比正方向略高;在 10000 MHz 频率下,整个方向几乎无能量输出;在 11200 MHz 频率下,正折射方向出现了 4 个功率峰,但能量都较小;在 9800 MHz 频率下,负折射角度方向(其中中心在 -14.57° 左右)存在一个较大功率峰,此时其正折射角度方向功率输出很小.这

表明 9800 MHz 频率附近存在很好的负折射结果,据斯涅尔定律,折射率 n 为 -0.796 .

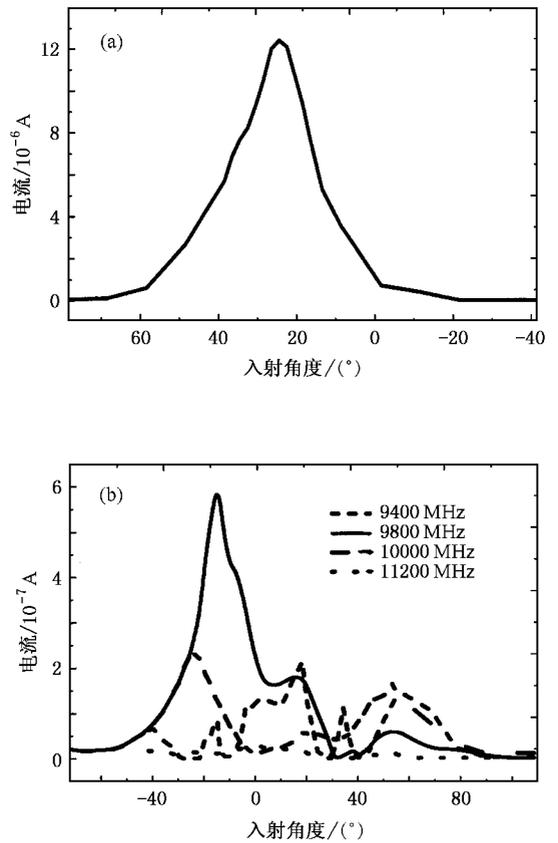


图 7 左手材料负折射行为的测量结果 (a)聚四氟乙烯出射功率随折射角度变化曲线 (b)左手材料在不同频率下出射功率随折射角度变化曲线

4. 结 论

本文设计并利用电路板刻蚀技术制备了由铜六边形 SRRs 和铜杆周期排列而成的左手材料.利用平板波导法研究了不同角度入射到样品表面的微波反射特性,并利用劈尖法研究了左手材料的负折射特性.实验表明:负磁导率材料反射率曲线形成反射峰,其对应的反射峰频率与材料的谐振频率一致;负介电常数材料反射率接近 0 dB;左手材料出现单个反射较小的反射峰,其峰值反射率随入射角度的增加而变大,即反射能力增强,且反射峰与透射峰有相对频移,分析认为不同层间 SRRs 的相互作用是导致其频移的原因.劈尖法测量表明,左手材料在 9800 MHz 频率附近出现负折射现象,其折射率 n 为 -0.796 .

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Luo C Y , Ibanescu M H , Johnson S G *et al* 2003 *Science* **299** 368
- [3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [4] Fang N , Zhang X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 161
- [5] Wiltshire M C K , Pendry J B , Young I R *et al* 2001 *Science* **291** 849
- [6] Gomez-Santos G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 77401
- [7] Shen J T , Platzman P M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3286
- [8] Houck A A , Brock J B , Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [9] Pendry J B , Holden A J , Robbins D J *et al* 1999 *IEEE Trans. Microwave Theor. Techniq.* **47** 2075
- [10] Markos P , Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 36622
- [11] Shelby R , Smith D R , Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [12] Huangfu J , Ran L , Chen H *et al* 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1357
- [13] Zhang F L , Zhao Q , Liu Y H *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [14] Zhao Q , Zhao X P , Kang L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) 赵 乾、赵晓鹏、康 雷 2004 物理学报 **53** 2206]
- [15] 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]
- [16] Wu S H , Ding S Z 1993 *Electromotion Mechanics* (Xi'an :Xi'an Jiaotong University Press) in Chinese] 吴寿 、丁士章 1993 电动力学(西安 :西安交通大学出版社)]

Reflection and negative refraction of left-handed metamaterials at microwave frequencies^{*}

Zheng Qing Zhao Xiao-Peng[†] Fu Quan-Hong Zhao Qian Kang Lei Li Ming-Ming

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

(Received 4 February 2005 ; revised manuscript received 17 June 2005)

Abstract

We experimentally investigated the microwave reflection of the negative permeability material composed of periodical arrays of the copper split-ring resonators (SRRs). The negative dielectric materials are composed of periodical arrays of copper wires and left-handed material (LHMs) in a planar slab waveguide , and the microwave is incident to the surface in different directions . We also investigated the negative refraction through a prism fabricated from the LHMs . The experimental results show that for the negative permeability materials , there is a reflection peak at the resonance frequencies of the SRRs , and the reflectivity of the negative dielectric material is closed to 0 dB . A single smaller reflection peak occurs in the reflected curve of the LHMs , the reflectivity of which increases with the incident direction , that is , the reflection increases . The reflection peak has a shift with respect to the transmission peak . It is demonstrated that negative refractive index of -0.796 occurs in the LHMs at the frequency of 9800 MHz .

Keywords : left-handed metamaterials , reflection , negative refractive index

PACC : 4270Y , 6170E , 2570E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 50025207) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB719800).

[†] Corresponding author . E-mail : xpzhao@nwpu.edu.cn