

基于小型化结构的各向同性负磁导率材料与左手材料*

刘亚红[†] 刘辉 赵晓鹏

(西北工业大学理学院, 西安 710072)

(2011年7月16日收到; 2011年12月13日收到修改稿)

提出了一种双面环各向同性结构单元模型, 理论与实验研究了其微波电磁谐振行为. 结果表明: 在电磁波平行入射和垂直入射条件下, 该结构可在同一频段实现磁谐振, 且在谐振频段磁导率为负; 当电磁波以不同角度斜入射时, 其产生负磁导率频段也保持不变, 即该结构的电磁特性不依赖于入射角度, 双面环结构具有各向同性的特点. 将双面环结构与金属线结构组合, 该组合结构具有负折射率. 另外, 双面环结构还具有小型化的优点, 在不增加结构单元几何尺寸的情况下, 通过在结构单元中引入金属化过孔的方法, 增加结构单元的电长度, 可使谐振频率大幅度地向低频方向移动, 使其在低频工作时仍保持小型化的优点. 在双面环结构中引入金属化过孔技术可使谐振单元的几何尺寸减小 50%, 在微波器件、滤波器、天线等领域有广阔的应用前景.

关键词: 负磁导率, 左手材料, 各向同性, 小型化

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

1 引言

左手材料 (left-handed metamaterials) 是一种介电常数和磁导率同时负的人工周期性结构材料, 由周期性排列的金属开口谐振环与金属线组成^[1-4], 由于其具有反常的光学、电磁学特性而成为研究热点. 经过近几年的发展, 左手材料研究已从微波频段拓展到红外波段以及可见光波段^[5-23]. 在左手材料的早期研究阶段, 电磁波的波矢方向平行于左手材料表面入射, 磁场垂直于开口谐振环平面, 开口谐振环可以等效为 LC 谐振器, 产生实现负磁导率的磁谐振; 电场平行于金属线, 产生实现负介电常数的电谐振; 当磁谐振和电谐振在同一频段时, 折射率便为负值. 随着对左手材料研究的深入^[14-19], 研究人员发现红外波段以及可见光波段的左手材料, 由于材料损耗影响, 必须将电磁波的波矢方向垂直于左手材料样品的表面入射, 比如“渔网”结构左手材料模型^[23-25], 通过对“渔网”结构单元的合理设计, 在电磁波垂直入射情况下也可产生左手行为. 因此, 无论是电磁波平行入

射还是垂直入射于左手材料, 通过对结构单元的优化设计均可产生左手行为. 目前, 左手材料的研究主要集中于电磁波以单一角度的方式入射 (平行入射或垂直入射), 这是由于所设计的左手材料大多为各向异性媒质, 因而如何设计各向同性左手材料已经成为科学界的又一个研究热点. Baena 等^[26] 研究了一种由开口谐振环构成的具有各向同性特点的频率选择表面结构, 此结构虽然具有各向同性优点, 但是它完全是由开口谐振环堆砌成的三维结构, 制备较为复杂. Casse 等^[27] 采用平板刻蚀技术制备了一种准三维的多层圆棒超材料, 但是由于采用特殊工艺制备导致费用非常昂贵.

本文提出一种基于金属化过孔的小型化双面环结构单元模型, 利用该结构单元模型可以制备各向同性负磁导率材料. 与文献^[26]的各向同性材料相比, 本文提出的各向同性负磁导率材料仅用单层结构, 具有结构简单、制备方便的特点. 通过对结构参数的优化设计, 在电磁波平行入射和垂直入射情况下, 可在同一频段实现负磁导率; 而当电磁波以一定角度斜入射时, 磁谐振频率也保持不变. 因

* 国家自然科学基金 (批准号: 50872113, 50936002) 和西北工业大学基础研究基金 (批准号: JC201154) 资助的课题.

[†] E-mail: yhliu@nwpu.edu.cn

此, 本文提出的双面环结构具有各向同性的优点, 可以用于制备各向同性负磁导率材料. 将双面环结构与金属线结构组合, 该组合结构的微波传输谱呈现出左手透射峰, 在左手透射峰区域折射率为负值. 另外, 本文提出的双面环结构还具有小型化的优点, 由于在结构单元中引入了金属化过孔技术, 相当于增加了结构单元的电长度, 可大幅度降低谐振频率, 使其在低频段工作时仍能保持小型化的特点.

2 样品制备与测试

2.1 样品制备

采用电路板刻蚀技术制备双面环结构单元样品, 选用厚度为 1.5 mm 的聚四氟乙烯介质基板 ($\epsilon_r = 2.65$), 结构单元的几何尺寸用以下参数表示: l 为双面环的边长, w 为线宽, g 为开口间隙, v 为双面环内臂的长度, d 为连接正反两面环的金

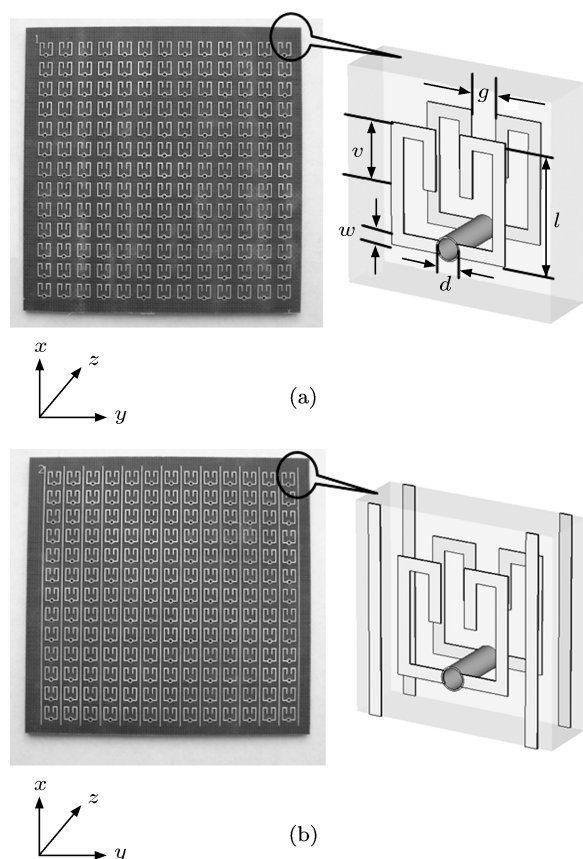


图 1 制备得到的样品 (a) 双面环结构; (b) 双面环与金属线的组合结构

属化过孔直径, t 为金属铜厚度, c 为晶格常数, 制备得到的双面环结构样品如图 1(a) 所示. 在双面环的两侧刻蚀金属线, 金属线的线宽也为 w , 长度

为 f , 制备得到的金属线与双面环组合的样品如图 1(b) 所示.

2.2 测试

本文采用实验与仿真相结合的方法研究双面环结构的电磁谐振行为. 实验采用 AV3618 矢量网络分析仪在微波屏蔽暗箱中测量样品的微波传输行为, 实验测试装置如图 2 所示. 电磁波平行入射时, 波矢 k 沿 y 轴方向 (波矢平行于样品), 电场 E 沿 x 轴方向, 磁场 H 沿 z 轴方向. 电磁波垂直入射时, 波矢 k 沿 z 轴方向 (波矢垂直于样品), 磁场 H 沿 y 轴方向, 电场 E 沿 x 轴方向. 电磁波斜入射时, 波矢方向与样品有一定的夹角, 当波矢与双面环的环面平行时, 定义为 0° (平行入射), 当波矢与双面环的环面垂直时, 定义为 90° (垂直入射).

仿真工具借助于基于积分法的 CST 微波工作室, CST 微波工作室是德国 CST (Computer Simulation Technology) 公司推出的高频三维电磁场仿真软件, 广泛应用于移动通信、无线通信 (蓝牙系统)、信号集成和电磁兼容等领域.

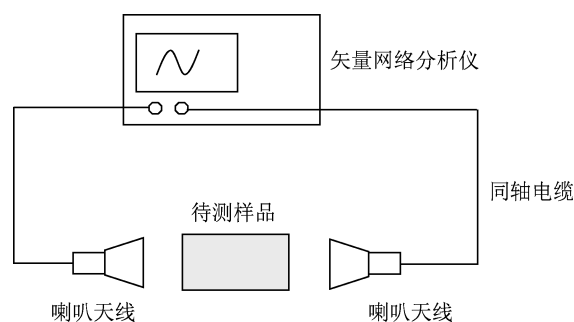


图 2 测试装置示意图

3 结果及讨论

3.1 各向同性负磁导率特性

文献 [3] 提出的开口谐振环是一种能产生磁响应的微结构单元, 可以产生磁谐振实现负磁导率. 当磁场垂直于开口谐振环时, 由法拉第电磁感应定律可知在开口谐振环内产生了感应电流, 从而引入了电感; 由于内外谐振环间存在的间隙和谐振环的开口间隙, 从而引入了电容. 因而开口谐振环就产生了与其几何尺寸和形状相关的 LC 谐振 [3], 并且磁谐振频率 ω

与 LC 谐振的电容 C 、电感 L 之间存在如下关系: $\omega = 1/\sqrt{LC}$. 不同几何参数的开口谐振环由于产生的电容、电感不同, 其谐振频率和谐振行为也不同, 因此通过调节结构单元的几何参数可调控谐振行为. 基于此理论, 本文从金属化过孔双面环结构的几何参数(开口间隙 g 、线宽 w 、内臂长 v 、边长 l) 出发, 通过对几何参数的优化设计得到各向同性结构单元.

采用 CST 微波工作室仿真研究了双面环结构的几何结构参数对其电磁谐振行为的影响, 图 3 和图 4 分别为电磁波平行入射条件下和电磁波垂直入射条件下的仿真研究结果. 结果表明在电磁波平行入射和垂直入射两种条件下, 双面环结构的谐振频率随着结构边长 l 的增加均向低频方向移动. 分析原因如下: 对于谐振环结构单元, 产生的电感 L 可由下式决定:

$$L \propto \mu_0 \mu_r S w, \quad (1)$$

其中 S 为谐振环单元所围的面积. 当边长 l 增加时即谐振环单元所围的面积 S 增加, 从而使电感随之增加, 导致谐振频率向低频方向移动. 对于内臂长度 v , 仿真结果表明谐振频率随着其值的增加也向低频方向移动. 经分析认为, 这是由于 v 增加时, 其

产生的电容亦随之增加. 这里采用平行板电容器模型近似计算其产生的电容, 即

$$C \propto \varepsilon_0 \varepsilon_r S_1 / d_1, \quad (2)$$

其中, S_1 为平行板电容器极板的面积, d_1 为平行板电容器极板之间的距离. 当 v 增加时, S_1 随之增加, 从而导致电容增加, 与此同时电感也会稍有增加, 这里主要表现为电容的增加. 因此当 v 增加时, 由于电容值和电感值均增加而使谐振频率向低频方向移动. 对于线宽 w , 仿真结果表明谐振频率随着其值的增加也是向低频方向移动. 经分析认为, 这是由于线宽 w 增加时, 产生的电感也随之增加, 因此导致谐振频率向低频方向移动. 值得注意的是, 对于开口间隙 g , 仿真结果表明当电磁波平行入射时, 随着开口间隙 g 的增加, 其产生的电容减小(相当于电容器极板之间的距离增加), 从而导致谐振频率向高频方向移动; 而当电磁波垂直入射时, 仿真结果表明开口间隙 g 对谐振行为影响很小, 原因是由于垂直入射时电容主要由基板两侧双面环之间的距离(即基板的厚度)决定. 利用此特点, 当选定其他参数不变时, 可以通过调节开口间隙 g 将平行入射和垂直入射两种条件下双面环的谐振频段调节至相同的频段.

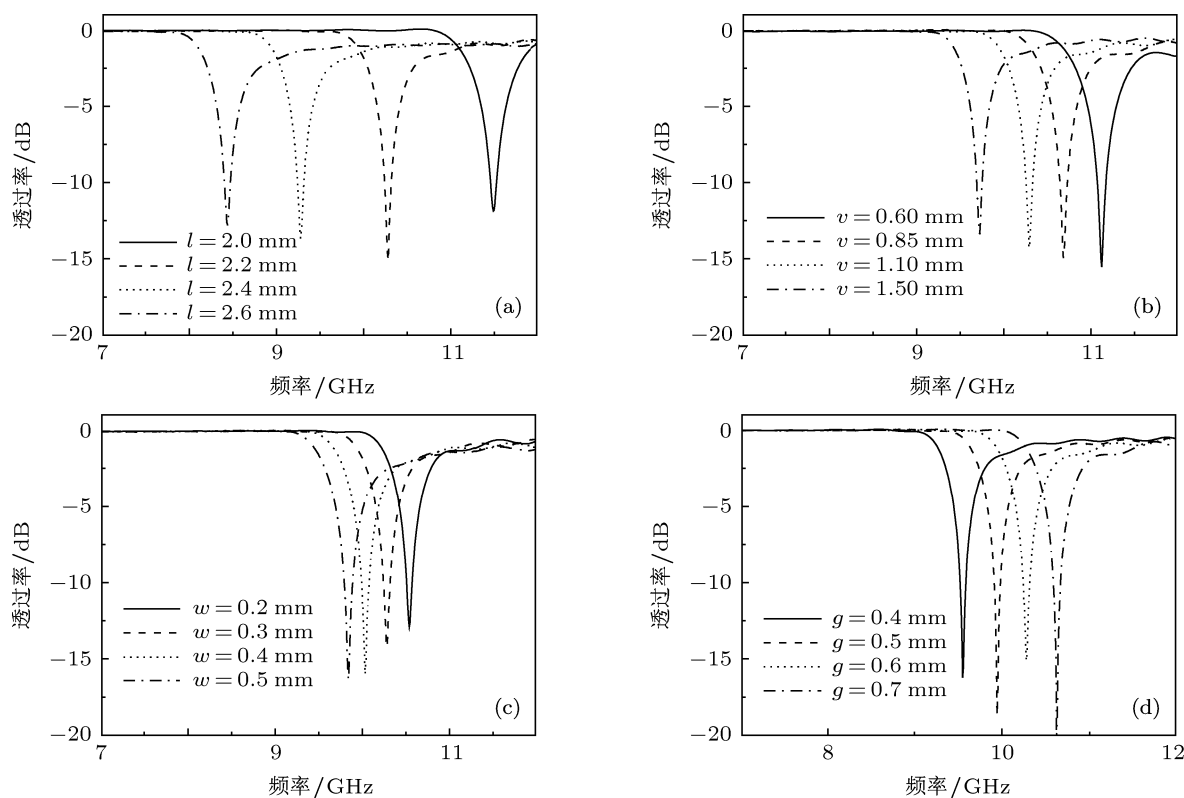


图 3 电磁波平行入射条件下, 双面环结构的几何参数对微波传输行为的影响 (a) 边长 l 对传输行为的影响; (b) 内臂长度 v 对传输行为的影响; (c) 线宽 w 对传输行为的影响; (d) 开口间隙 g 对传输行为的影响

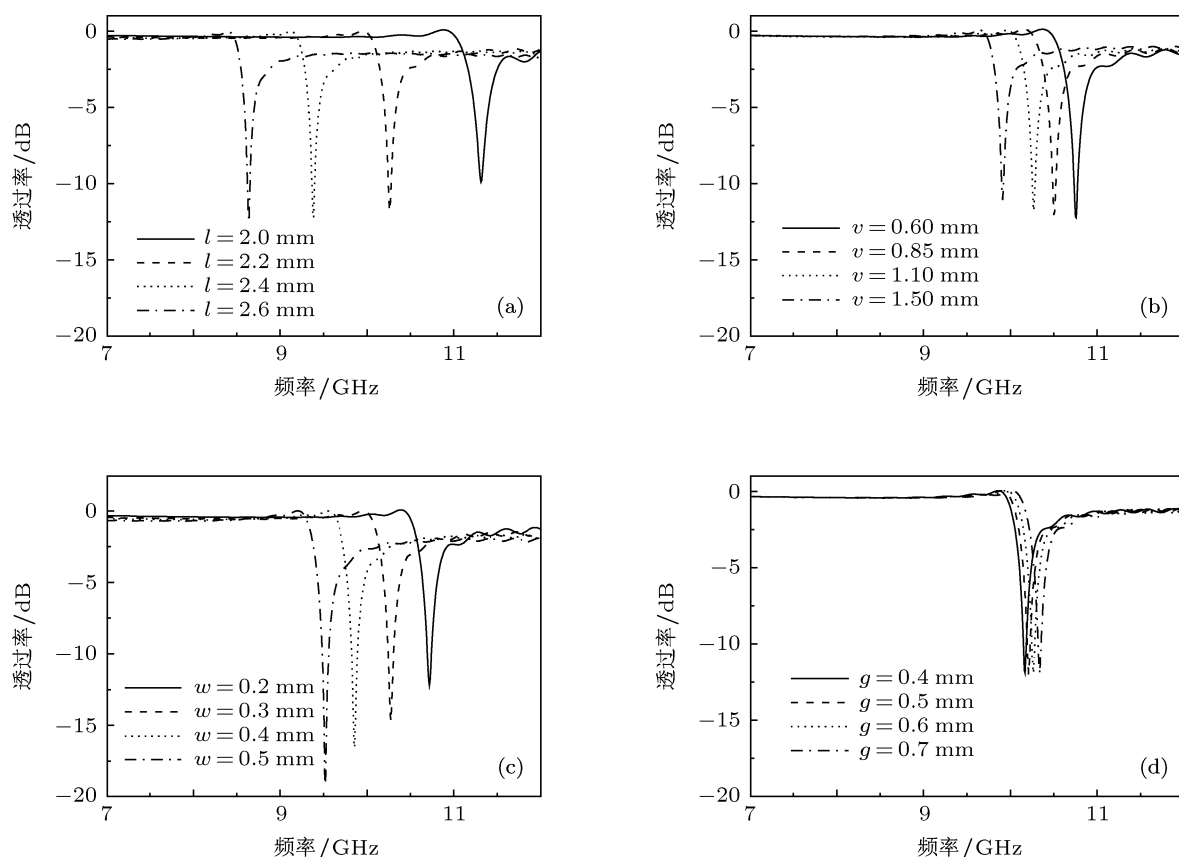


图4 电磁波垂直入射条件下, 双面环结构的几何参数对微波传输行为的影响 (a) 边长 l 对传输行为的影响; (b) 内臂长度 v 对传输行为的影响; (c) 线宽 w 对传输行为的影响; (d) 开口间隙 g 对传输行为的影响

通过研究双面环结构的几何参数对微波传输行为影响, 找到了最佳的几何参数, 使电磁波在垂直入射和平行入射条件下双面环结构均可产生谐振, 且谐振频段重合, 最终优化得到的结构单元几何参数为 $l = 2.2$ mm, $v = 1.1$ mm, $w = 0.3$ mm, $g = 0.6$ mm, 金属化过孔直径 $d = 0.5$ mm. 图 5(a) 为仿真得到优化的双面环结构微波传输图. 由图 5(a) 可知, 在电磁波平行入射和垂直入射两种情况下双面环结构的谐振行为基本相同, 均在 10.25 GHz 附近处发生谐振. 为了验证仿真结果, 实验测量了双面环结构的微波传输行为, 实验结果如图 5(b) 所示. 由图 5(b) 可知, 当电磁波平行入射和垂直入射时双面环结构也均在 10.25 GHz 附近发生谐振, 这与仿真结果相符.

为了研究双面环结构的谐振峰特性, 采用散射参量法^[28,29] 分别计算得到了电磁波垂直入射和平行入射两种条件下双面环结构的磁导率(图 6). 由图 6 可知, 当电磁波平行入射时, 磁导率的实部在 10.24 GHz 处为 -1.46 ; 而当电磁波垂直入射时, 磁导率的实部在 10.24 GHz 处为 -2.05 . 双面环磁导率的实部在两种电磁波入射条件下均为负值, 说

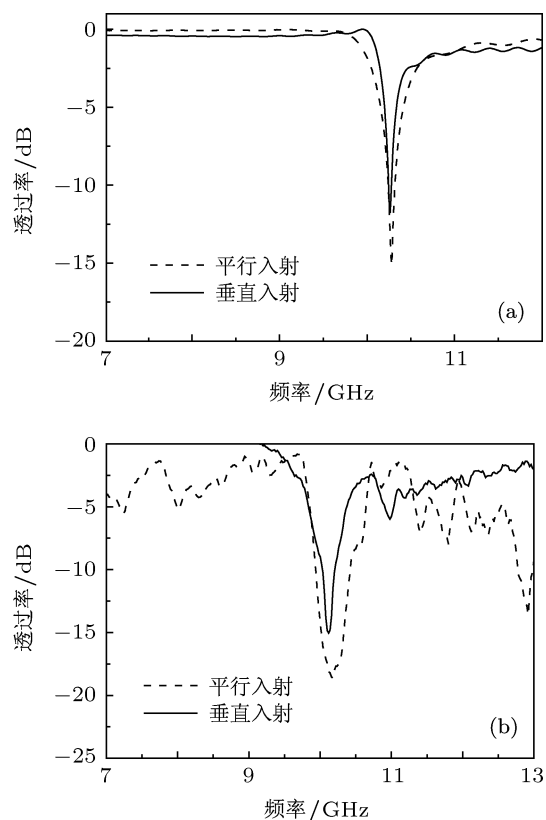


图5 双面环结构的微波传输图 (a) 仿真结果; (b) 实验结果

明双面环的谐振峰是由磁谐振引起的,但是计算得到的磁导率实部值在垂直入射和平行入射两种条件下稍有差别,主要是由于在两种情况下双面环的磁谐振强度稍有不同所导致.

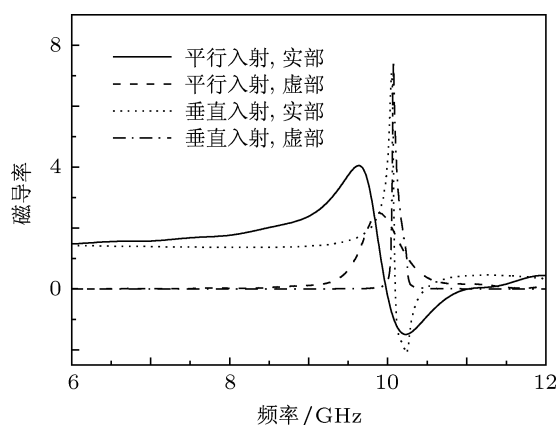


图6 散射参量法计算得到的双面环结构的磁导率

双面环结构产生磁谐振和负磁导率的原因可做如下分析:当电磁波平行入射时,双面环结构的负磁导率产生机制与文献[3]提出的开口谐振环相同,当磁场垂直于环面时,由法拉第电磁感应定律可知在开口谐振环内产生环绕磁场的环型感应电流,可产生一个磁矩 M , 并且其方向与外加磁场方向相反.由公式 $M = \chi_m H$ 和 $\mu_r = 1 + \chi_m$ 知,当磁响应足够强时, χ_m 为负值,从而实现负磁导率[3].当电磁波垂直入射时,负磁导率的产生机制与“渔网”结构类似[23,24],基板正反两面的金属会产生反平行感应电流,形成平行于金属表面的磁矩,并且其方向与外加磁场方向相反,从而产生负磁导率.由此可知,双面环结构在电磁波平行入射和垂直入射两种条件下均可实现负磁导率.

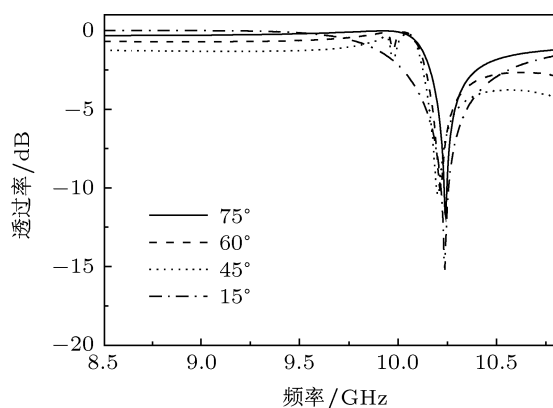


图7 电磁波在不同入射角度下的双面环结构微波传输图

图7给出了电磁波在不同角度斜入射条件下双面环结构的微波传输图.从图7可以看出,该结构在不同角度入射下,谐振峰均位于10.22 GHz附近.这与平行入射和垂直入射条件下的谐振峰位置基本相同,意味着双面环结构的谐振行为不依赖于入射角度.因此,双面环结构具有各向同性特点,可以用于制备各向同性负磁导率材料.

3.2 左手特性

在双面环结构单元的两侧分别刻蚀金属线,制备成双面环与金属线的组合结构,金属线的几何参数为线宽 $w = 0.3 \text{ mm}$, 长度 $f = 65 \text{ mm}$.从仿真和实验两方面研究了该组合结构的微波电磁传输行为,结果如图8所示.图8(a)为仿真结果,当电磁波平行入射时在10.2 GHz附近出现一个透射峰,此透射峰的位置与双面环结构的磁谐振位置一致;当电

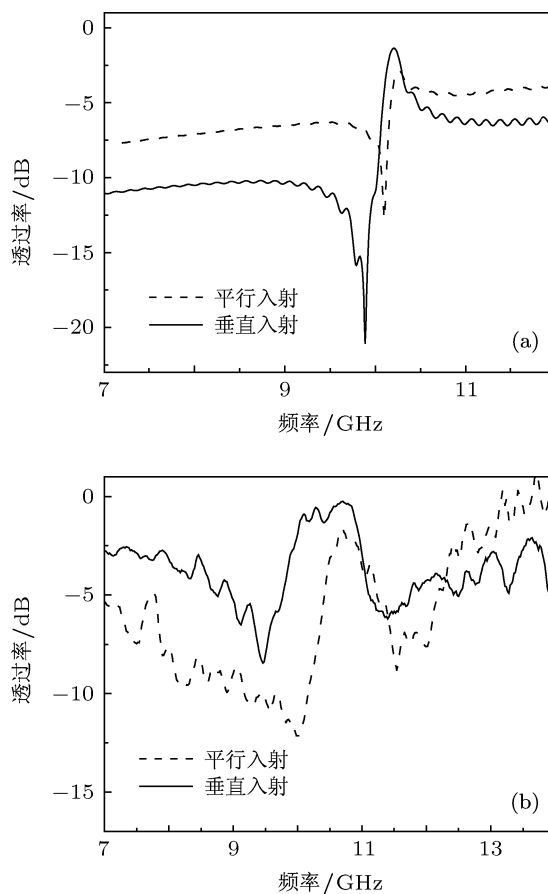


图8 双面环与金属线组合结构的微波传输图 (a) 仿真结果; (b) 实验结果

磁波垂直入射时,在出现磁谐振的位置也观测到一个透射峰,并且此透射峰的位置与平行入射时的

透射峰位置相同. 图 8(b) 是相应的实验结果, 在电磁波垂直入射和平行入射两种情况下也都观测到左手透射峰. 与仿真结果相比, 实验中观测到了更明显的左手透射峰. 这是由于在仿真计算中为节省计算机资源仅用了少量的结构单元导致左手透射峰较弱, 而实验中采用了多个结构单元组成的阵列即整块左手材料, 因而观测到了更明显的左手透射峰.

采用散射参量法计算了双面环与金属线组合结构的电磁参数, 计算得到的结果如图 9 所

示. 图 9(a) 为计算得到的折射率. 从图 9(a) 可以看出: 电磁波平行入射时, 在 10.25 GHz 处折射率为 -1.8 ; 电磁波垂直入射时, 在 10.17 GHz 处折射率达到 -3.1 . 计算结果还表明, 在平行入射和垂直入射两种情况下, 折射率为负的频段基本一致. 图 9(c) 和 (d) 是计算得到的磁导率和介电常数, 结果表明在折射率为负的频段, 介电常数和磁导率亦同时为负. 这说明双面环结构与金属线的组合结构在电磁波平行入射和垂直入射条件下都具有左手特性.

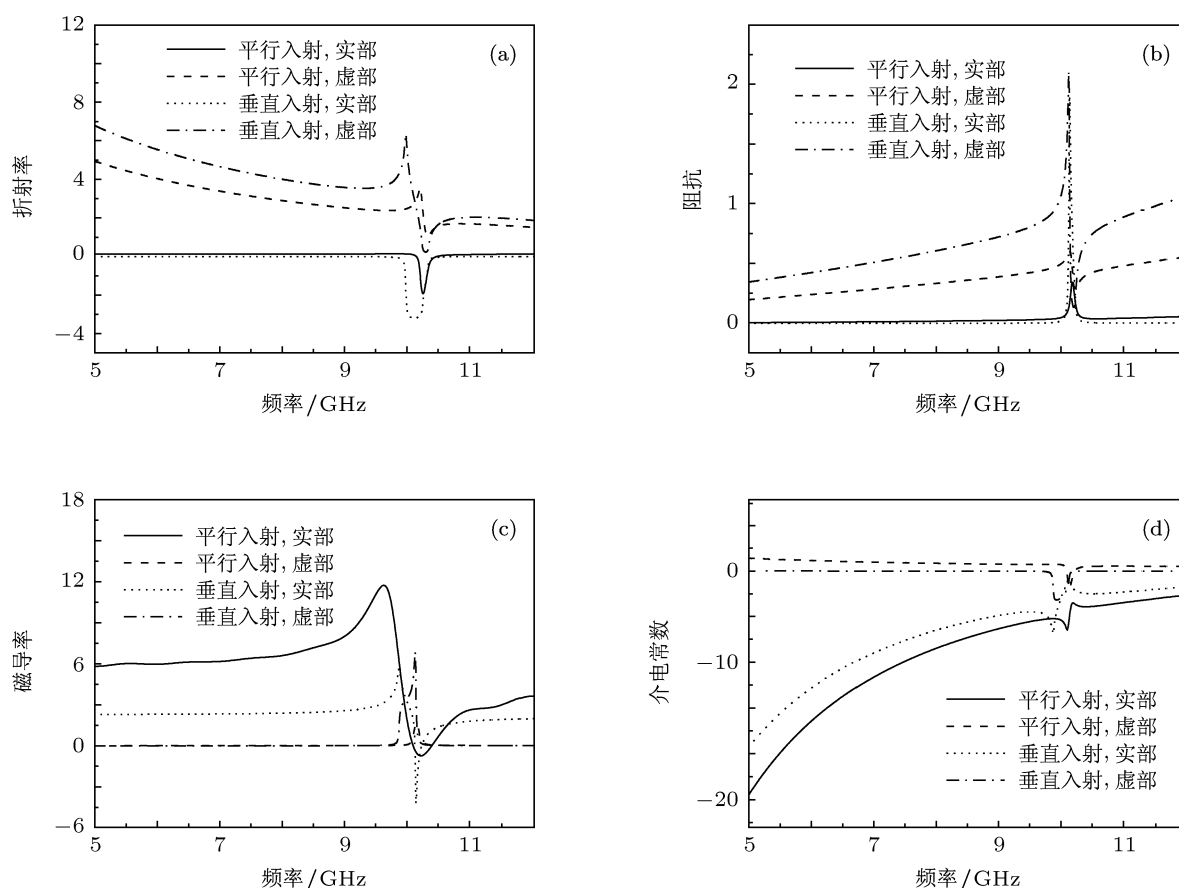


图 9 散射参量法计算得到的双面环与金属线组合结构的电磁参数 (a) 折射率; (b) 阻抗; (c) 磁导率; (d) 介电常数

3.3 小型化结构单元

基于金属化过孔的双面环结构是一种小型化的磁谐振单元. 由于在双面环结构单元中引入了金属化过孔技术, 连通了基板两面的谐振环, 增加了结构单元的电长度, 与没有金属化过孔的结构单元相比, 谐振频率大幅度地向低频方向移动, 使其在低频工作时仍能保持小体积的优点. 实验和仿真分别研究了有金属化过孔双面环和无金属化过孔双面环的微波电磁传输行为 (图 10). 图 10(a) 为

仿真得到的微波传输图, 由此可见金属化过孔双面环的中心谐振频率为 10.24 GHz; 而无金属化过孔双面环在 21.4 GHz 处发生谐振. 如果要使无金属化过孔双面环在 10.24 GHz 处发生谐振, 则必须增加结构单元的几何尺寸, 本文通过在双面环结构中加入金属化过孔便可在不增加结构单元几何尺寸的条件使谐振频率大幅度地向低频方向移动. 图 10(b) 是相应的实验结果, 由此可知实验结果与仿真结果相符. 通过在双面环结构中引入金属化过孔技术使结构单元的几何尺寸减小了 50%.

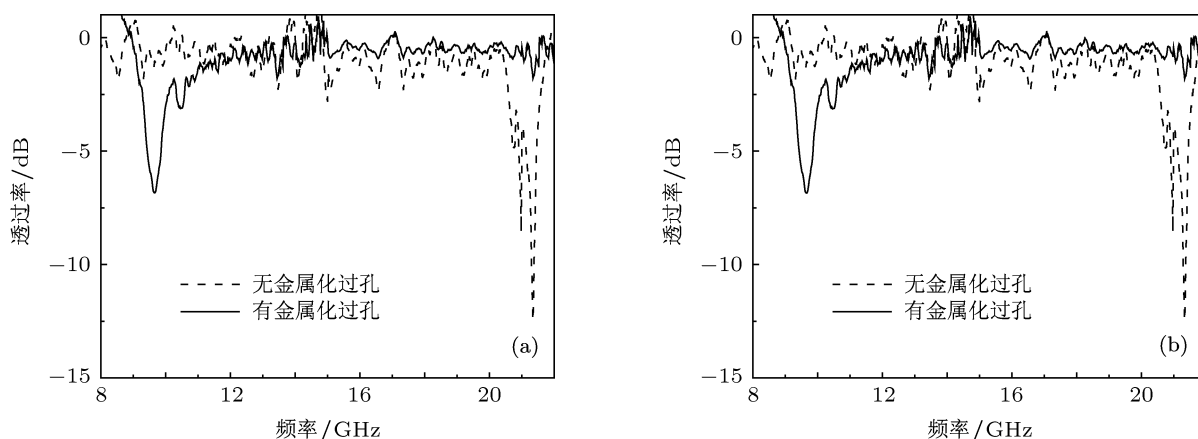


图 10 无金属化过孔双面环结构和有金属化过孔双面环结构的微波传输图 (a) 仿真结果; (b) 实验结果

4 结论

设计了一种基于金属化过孔的双面环结构单元. 通过对结构单元几何参数的优化设计, 在电磁波平行入射、垂直入射、斜入射条件下该结构都在同一谐振频段实现负磁导率, 说明其具有各向同性的优点, 可用于制备各向同性负磁导率材料. 将

双面环结构与金属线结构组合, 可制备成左手材料. 利用散射参量法计算了该组合结构的电磁参数, 结果表明在介电常数和磁导率同时为负的频段, 折射率也为负. 本文提出的结构单元模型为设计各向同性左手材料提供了一种方法. 此外, 基于金属化过孔的双面环结构单元具有小型化优点, 可用于设计结构紧凑的微波器件, 极具应用价值.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2075
- [4] Shelby R, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [5] Zhou X, Fu Q H, Zhao J, Yang Y, Zhao X P 2006 *Opt. Express* **14** 7188
- [6] Zhao X P, Zhao Q, Zhang F L, Zhao W, Liu Y H 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 99
- [7] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红, 罗春荣, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [8] Gong B Y, Zhao X P 2011 *Opt. Express* **19** 289
- [9] Zhou X, Zhao X P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181908
- [10] Zhu W R, Zhao X P, Gong B Y, Liu L H, Su B 2011 *Appl. Phys. A* **102** 147
- [11] Liu Y H, Song J, Luo C R, Fu Q H, Zhao X P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 934 (in Chinese) [刘亚红, 宋娟, 罗春荣, 付全红, 赵晓鹏 2008 物理学报 **57** 934]
- [12] Zhu W R, Zhao X P, Ji N 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 011911
- [13] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3187 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 张燕萍, 赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 3187]
- [14] Yen T J, Padilla W J, Fang N, Vier D C, Smith D R, Pendry J B, Basov D N, Zhang X 2004 *Science* **303** 1494
- [15] Linden S, Enkrich C, Wegener M, Zhou J F, Koschny T, Soukoulis C M 2004 *Science* **306** 1351
- [16] Zhang S, Fan W J, Minhas B K, Frauenglass A, Malloy K J, Brueck S R J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 037402
- [17] Qi R, Yu X L, Li Z B, Liu W M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 185301
- [18] Ji A C, Sun Q, Xie X C, Liu W M 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 023602
- [19] Liang Z X, Zhang Z D, Liu W M 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 050402
- [20] Nguyen V C, Chen L, Halterman K 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 233908
- [21] Furlani E P, Baev A 2009 *Phys. Rev. E* **79** 026607
- [22] Jin Y, He S L 2010 *Opt. Express* **18** 16587
- [23] Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2007 *Opt. Express* **15** 11536
- [24] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T, Soukoulis C M, Economou E N 2007 *Phys. Rev. E* **75** 235114
- [25] Zhou J F, Koschny T, Zhang L, Tuttle G, Soukoulis C M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 221103
- [26] Baena J D, Jelinek L, Marqués R, Mock J J, Gollub J, Smith D R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 191105
- [27] Casse B D F, Moser H O, Lee J W, Bahou M, Inglis S, Jian L K 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 254106
- [28] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [29] Chen X D, Grzegorzczak T M, Wu B I, Pacheco J Jr, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608

Isotropic negative permeability metamaterials and left-handed metamaterials based on miniature structure*

Liu Ya-Hong[†] Liu Hui Zhao Xiao-Peng

(School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(Received 16 July 2011; revised manuscript received 13 December 2011)

Abstract

We propose an isotropic structure based on double split-ring resonator. We investigate experimentally and numerically the electromagnetic resonant properties of the proposed structure. The result shows that when the electromagnetic wave transmits in the directions parallel and perpendicular to the plane of the split ring resonator, respectively, the resonant bands having the negative permeability both arise at the same frequencies. However, when the electromagnetic wave transmits with oblique angle, the resonant characteristic is still unchanged. That is to say, resonant characteristic of the proposed structure is independent of incidence angle. This result indicates that the proposed structure is an isotropic medium. Combining the proposed double split-ring resonator structure with the wires, the left-handed metamaterial with negative refractive index can be obtained. In addition, the proposed structure has the merit of the miniaturization due to adding the metallic via-hole, which can increase the electric length of the structure. As a result, the resonant frequency of the structure shifts toward lower frequency greatly without increasing the dimension of the structure, and then the structure is still compact in the low frequency case. The introduction of the metallic via-hole can reduce the dimension of the structure by 50%. Therefore, the proposed structure will be a good candidate in the microwave applications such as antennas, filter, among others.

Keywords: negative permeability, left-handed metamaterials, isotropic, miniaturization

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50872113, 50936002) and the Foundation for Fundamental Research of Northwestern Polytechnical University, China (Grant No. JC201154).

[†] E-mail: yhliu@nwpu.edu.cn