

基于正六边形多开口的新型双频带左手材料*

杨怀 王春华[†] 郭小蓉

(湖南大学信息科学与工程学院, 长沙 410082)

(2013年7月16日收到; 2013年9月17日收到修改稿)

本文提出了基于正六边形多开口的新型双频带磁谐振体. 在微波衬底材料的一面放置交错多开口的两个正六边形金属环, 多开口结构破坏了环间耦合电容, 从而使两环形成相对独立的两个谐振网络实现双频带效应. 最后将该谐振结构的另一面放置金属导线形成一个双频带的新型左手材料. 文中利用 HFSS 软件仿真和等效参数提取的方法, 分析和验证该结构的正确性.

关键词: 左手材料, 双频带, 多开口

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.63.014103

1 引言

左手材料是介电常数 ϵ 和磁导率 μ 都小于零的材料, 由于其具备很多优越的特性, 如负折射现象^[1]、逆多普勒效应^[2]等, 使其在微波滤波器及天线中具有重要应用^[3,4]. 早在1968年, Veselago^[5]就根据麦克斯韦方程组提出了著名的左手理论, 但是由于自然界不具备天然的此类材料, 这一理论一直都不被科学界所重视. 直到Smith等^[6]提出的SRR与金属导线的结合体首次验证了这一理论, 才开启了左手材料飞速发展的几十年.

在左手材料快速发展的几十年之中, 各种各样不同结构、不同形状、不同形式的左手材料结构不断地被提出. 例如对称环结构^[7], H形结构^[8], Ω 形结构^[9]、树枝形结构^[10]等. 但是上述结构都只是在单一频带满足左手特性, 而单一频带左手材料只能设计单频带的滤波器与天线. 在实际应用中, 常常需要双频带或多频带的滤波器与天线, 例如双模及多模无线通信收发机中的双模及多模滤波器与天线等^[11,12]. 但是目前对双频带及多频带左手材料的设计研究还比较少, 主要有Chen等人^[13]提出的双频带及多频带左手材料, 但该材料的单元结构为S图形, 需要在基板的两个版面刻蚀相反的两

个S图形才可以获得左手材料特性, 制作较为麻烦. Zhu等人^[14]提出了多重树枝结构的双频带及多频带左手材料, Wan等人^[15]提出了将不同尺寸组合在一起实现的双频带及多频带左手材料, 但是文献^[14,15]中的材料结构相对都比较复杂, 同时精确控制尺寸也不易. 最近李文强等人^[16]又提出了一种基于斜三角开口对环的双频带磁谐振结构, 但仅讨论使用该结构实现单频带左手材料. 最近刘亚红等人^[17]提出了双频带及多频带吸波器左手结构, 通过增加中心孔的数目实现多频带功能, 但是该结构较为复杂, 实现多频带需要开孔的数目较多.

近年来, 由于正六边形左手材料的结构简单及对称性好等优点引起了国内外学者的重视. 张淳民等人^[18]提出了三角形谐振环新型正六边形结构左手材料, 但该材料仅实现单频带功能. 郑晴等人^[19]提出了有无开口对正六边形结构左手材料负折射率的影响, 研究了缺陷对材料的调控特性, 但是该材料也只能实现单频带功能. Zhao等人^[20]和张富利等人^[21,22]则提出了单开口正六边形左手材料, 但是也只能实现单频带功能. 本文提出了一种新型正六边形多开口结构左手材料, 新材料结构比较简单, 能实现双频带功能, 同时该材料仅需在基板的单一版面刻蚀交错开口正六边形金属环就可获得

* 国家自然科学基金(批准号: 61274020)和湖南省高校重点实验室开放基金(批准号: 12K012)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: wch1227164@sina.com

双频带磁谐振特性, 制作相当方便. 交错开口避免了内外环之间电容耦合, 使得两环形成双谐振电路以实现双频带磁谐振. 最后通过金属导线与该谐振结构组合实现双频带左手材料. 本文利用 HFSS 仿真软件验证了谐振结构的 S 参数及散射特性, 同时利用 S 参数反演算法 [23] 提取了左手材料等效介电常数、等效磁导率、折射率和阻抗.

2 磁谐振结构设计与分析

2.1 磁谐振结构设计

对于左手材料的设计, 获取小于零的等效磁导率是关键. 单独的负等效磁率材料在科学界也具有很大的潜在价值. 当电磁波从某一方向入射在具有特殊结构的介质材料上, 使其发生电磁感应而形成磁谐振现象是产生负磁导率的一类方法. 本文就是根据这一思想而设计出了一种基于正六边形多开口的磁谐振结构.

如图 1 所示为该磁谐振体的拓扑结构图. 其中图 1(a) 为提出的正多边形多开口环单元, 设计尺寸内环半径 $a = 3 \text{ mm}$, 环宽 $c = 0.3 \text{ mm}$, 两环间距 $e = 0.1 \text{ mm}$, 开口宽 $g = 0.2 \text{ mm}$. 图 1(b) 为该结构单元侧视图, 其中灰色为微波衬底材料 Roger RT/duroid 6006(tm), 黑色为上层铜环. 设计尺寸为衬底材料厚度 $d = 0.12 \text{ mm}$, 铜环厚度 $h = 0.04 \text{ mm}$.

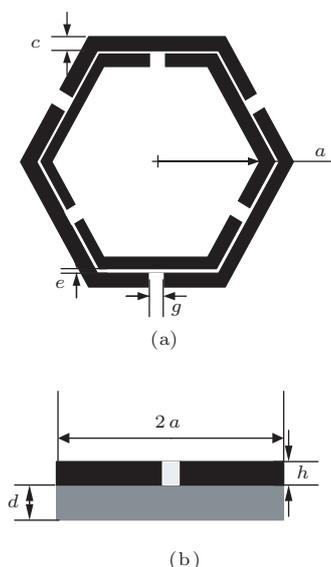


图 1 (a) 正六边形多开口谐振单元; (b) 谐振结构侧视图

2.2 谐振结构分析验证

电磁波入射在介质这一过程所发生的电磁感应现象是极其复杂的, 一般理论上分析都采用等效

的方法. 通过对结构等效电路的分析, 我们可以比较形象地把握出磁谐振现象. 本文通过对正六边形单开口、双开口以及提出的多开口相互之间进行比较, 验证了多开口对内外环之间耦合电容的影响, 得出了关于内外环各自谐振而产生双频带效应这一结论. 如图 2(a), (b) 分别为单开口、双开口正六边形谐振结构, 图中尺寸与图 1(a) 多开口正六边形大小一致. 当正六边形内环或者外环中只要有一边出现开口, 电磁波入射在结构中形成的电磁感应电流通过开口边时, 其电荷分布将不再是内外环分别具体等效正负电荷而产生电容效应, 开口结构将破坏环间耦合.

图 3 为正六边形开口结构等效电路图. 图 3(a) 为单开口正六边形等效电路, C_1 表示内环开口边两端等效电容, L_1 表示内环没有开口边等效电感, C_2 表示外环开口边两端等效电容, L_2 则表示外环没有开口边等效电感, C_c 表示内环与外环中都没有开口边的耦合电容. 图 3(b) 为双开口正六边形等效电路, 图中电容电感与图 3(a) 所表示一样. 图 3(c) 表示多开口正六边形等效电路, 图中电容与电感同 3(a) 所表示也一样.

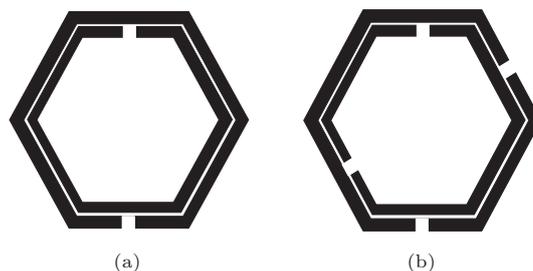


图 2 (a) 单开口正六边形谐振单元; (b) 双开口正六边形谐振单元

从三个不同开口正六边形磁谐振等效电路中, 我们可以看出内外环边的开口破坏了环间耦合电容, 使得内外环相互之间谐振电路的影响变小. 单开口与双开口正六边形谐振等效电路都具有环间耦合电容, 使得得到的谐振结构中表现为单频带特性. 但是多开口正六边形谐振结构则由于环间耦合电容消失, 最后得到的谐振结构表现为双频带特性. 分析图 3(c) 可以得到双频带磁谐振电路内环谐振为 $f_1 = 1/2\pi\sqrt{L_{a1}C_{a1}}$, 其中 $L_{a1} = 3L_1$, $C_{a1} = C_1/3$, 外环谐振则为 $f_2 = 1/2\pi\sqrt{L_{a2}C_{a2}}$, 其中的 $L_{a2} = 3L_2$, $C_{a2} = C_2/3$. 所以最后得到的两个谐振频率 f_1 与 f_2 分别为

$$f_1 = 1/2\pi\sqrt{L_1C_1}, \tag{1}$$

$$f_2 = 1/2\pi\sqrt{L_2C_2}. \tag{2}$$

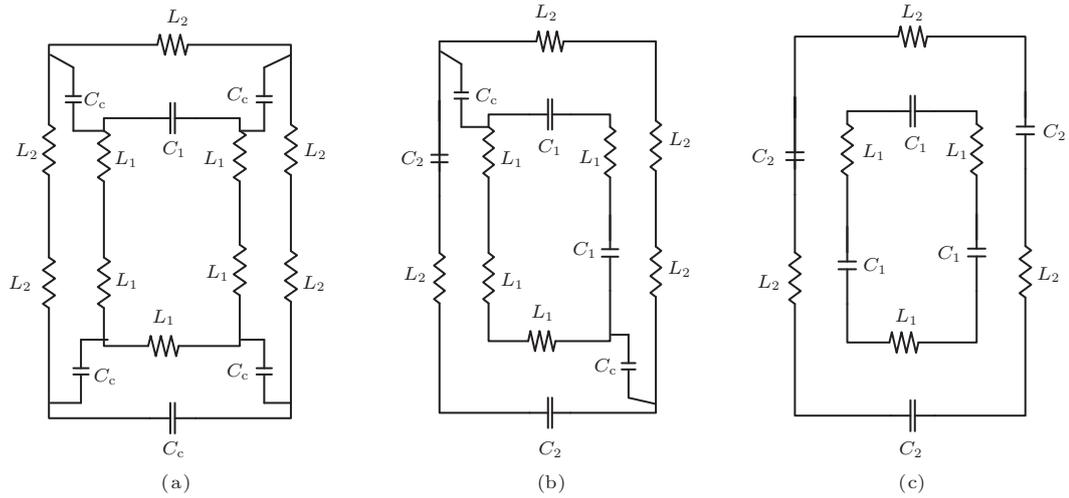


图3 (a) 单开口正六边形等效电路; (b) 双开口正六边形等效电路; (c) 多开口正六边形等效电路

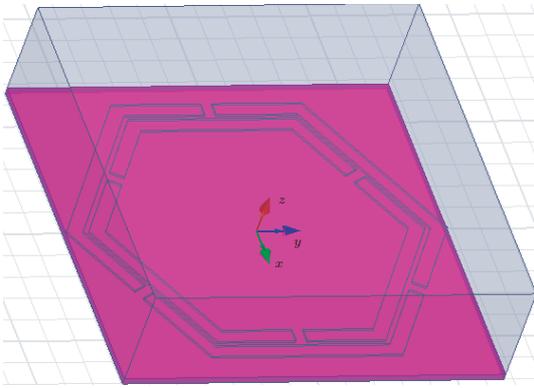


图4 多开口正六边形谐振结构仿真模型

文中最后采用仿真软件 HFSS 分别对单开口、双开口、多开口正六边形谐振结构进行模拟验证。如图 4 所示为本文提出结构的仿真示意图, 其中与 X 轴垂直的两个面壁设置为理想电边界 (PEC), 与 Z 轴垂直的两个面壁设置为理想磁边界 (PHC), TEM 波则从垂直 Y 轴的两个端口入射。单开口与双开口正六边形仿真模型与图 4 一样, 差别就在于内部金属环开口。通过仿真得到三个模型的 S 参数幅度与相位图形可以清楚地看出谐振频带区别。如图 5 (a) 为单开口正六边形谐振 S 参数幅度曲线, 图 5 (b) 为双开口正六边形谐振 S 参数曲线。其中

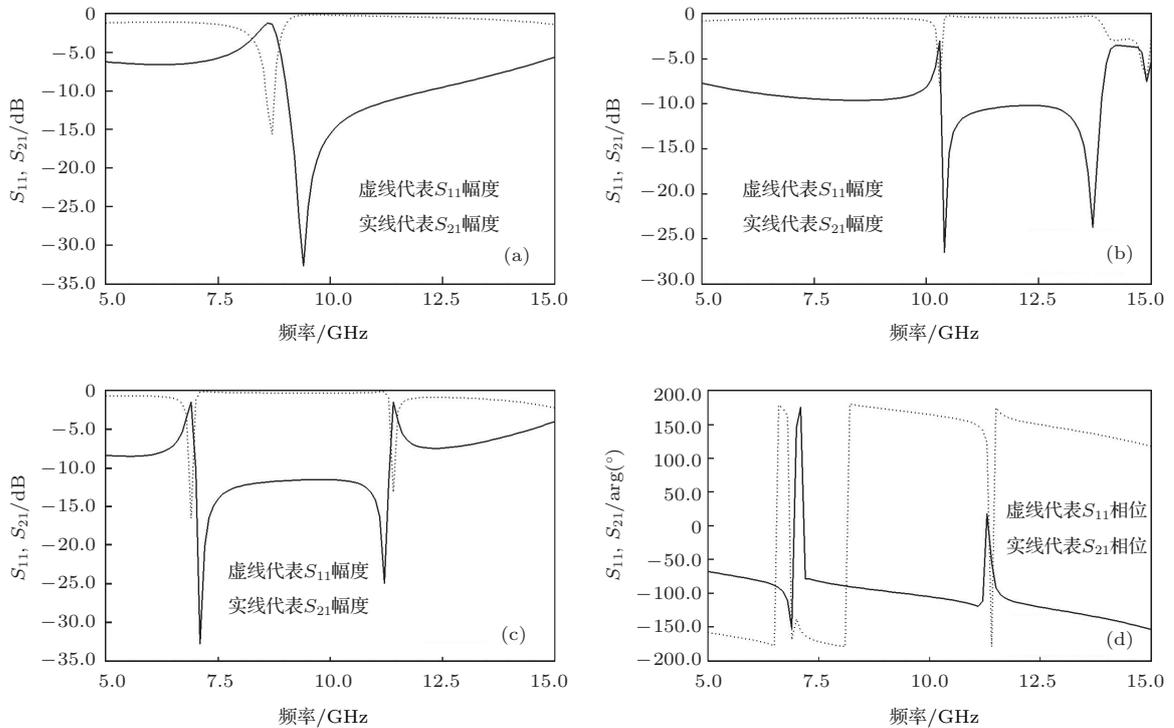


图5 (a) 单开口 S 参数幅度; (b) 双开口 S 参数幅度; (c) 多开口 S 参数幅度; (d) 多开口 S 参数相位

图5(a)中在频率8—9 GHz之间 S_{11} 与 S_{21} 都发生了突变,磁谐振表现非常明显:图5(b)中在频率10—10.5 GHz之间 S_{11} 与 S_{21} 也都发生了突变,但是13.5—14 GHz之间 S_{11} 没有发生突变,也就是说双开口依然表现为单频带谐振特性.图5(c),(d)则分别给出了多开口正六边形谐振 S 参数幅度与相位曲线,从图中可以看出在6—7.5 GHz与10.5—11.5 GHz之间 S 参数的幅度与相位都发生了突变,表现出非常明显的双频带特性.同时我们可以看出三个不同开口结构之间的谐振频率都不同,这也进一步从实验结果中验证了开口破坏了内外环间的耦合电容.

3 左手材料结构设计

由Pendry^[24]理论可知,金属导线可以实现负等效介电常数.通过金属导线与设计的新多开口正六边形磁谐振体进行有效组合就可以实现双频带左手材料.设计这一类左手材料时,需要注意将电谐振与磁谐振频率进行重叠即可.本文所设计的左手结构如图6所示,图6(a)给出了该结构的正面示意图,图6(b)则为该结构的侧视图.左手材料结构就是在磁谐振单元的微波介质另一面,加载一宽度为 $w = 0.15$ mm,厚度为 $h = 0.04$ mm的金属导线.

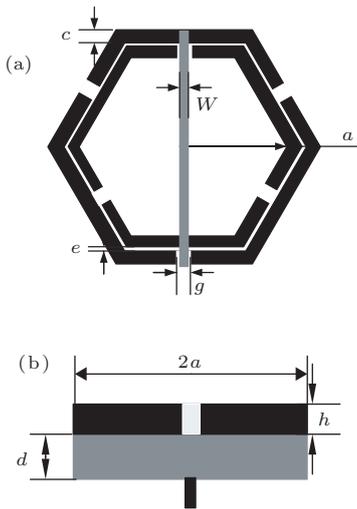


图6 (a)左手材料单元结构图;(b)左手材料侧视图

利用HFSS对该结构进行仿真建模,模型结构与图4一样,只在介质板另一面加载一条金属线,同时边界条件也与磁谐振模型一样.得到的 S 参数如图7所示,图7(a)为得到的 S 参数幅度曲线,在

以6.7 GHz和9.3 GHz为中心频率周围形成了一个通带;图7(b)为得到的 S 参数相位曲线,在通带以内相位也具有通带特性.为了更加深刻理解波沿着左手材料传播的色散特性,通过计算相位常数(3)式^[25]可以比较形象理解这一特性.图7(c)给出了该左手材料结构相位常数(β_p)的全波仿真图,从图中可以清楚地看出在通带内相位常数接近零.

$$\beta_p = \text{acos}[(1 - S_{11} \times S_{22} + S_{12} \times S_{21}) / 2 \times S_{21}]. \quad (3)$$

仅仅依靠 S 参数并不能说明该左手结构实现了等效负磁导率与负介电常数,根据HFSS仿真得到的散射参数,然后提取出其中的等效介电常数与磁导率^[23,26,27],是另一种有效的验证方法,本文所采用的为反演算法(NRW)^[23].首先由 S 参数计算出结构的特性阻抗 Z ((4)式)和折射率 n ((5)式),然后算出等效介电常数 ϵ ((6)式)与磁导率 μ ((7)式):

$$Z = \sqrt{\frac{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (4)$$

$$n = \frac{1}{kd} \text{acos} \left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2 \times S_{21}} \right), \quad (5)$$

$$\epsilon = n / Z, \quad (6)$$

$$\mu = n \times Z, \quad (7)$$

其中 k 表示波数, d 表示左手结构厚度.

图8给出了利用散射参数 S 进过反演算法得出的等效介电常数、等效磁导率、折射率和阻抗曲线,图8(a)为等效介电常数,从得出的等效介电常数实部(实线)可以看出在6.3—7.0 GHz与8.5—9.5 GHz之间其值为负数;图8(b)为等效磁导率示意图,在6.5—7.3 GHz与8.8—9.3 GHz之间其实部值也为负数;图8(c)为折射率曲线,图(d)为阻抗曲线.通过综合上述几个值,同时结合散射参数,最终可以验证在6.5—7.0 GHz与8.8—9.3 GHz实现双带左手结构.文中最后为了进一步论述说明新型多开口正六边形双频带左手材料的优点,在表1中列出了几类双频带左手材料以及与新结构类似的左手材料的相关参数.从表中我们可以看出新型左手材料,在图形上,是对称性极好且简单的一种.结构上,比文献^[13, 14, 16]都要简单.加工上,比文献^[13, 14, 16, 18]更加容易,并且只在衬底的单面加工.与文献^[19, 20, 21]虽然是相同的结构、加工,但新结构左手材料能够实现双频带.也就是说与传统左手材料相比较,新型正六边形多开口左手材料在性能上得到了很大的提升.

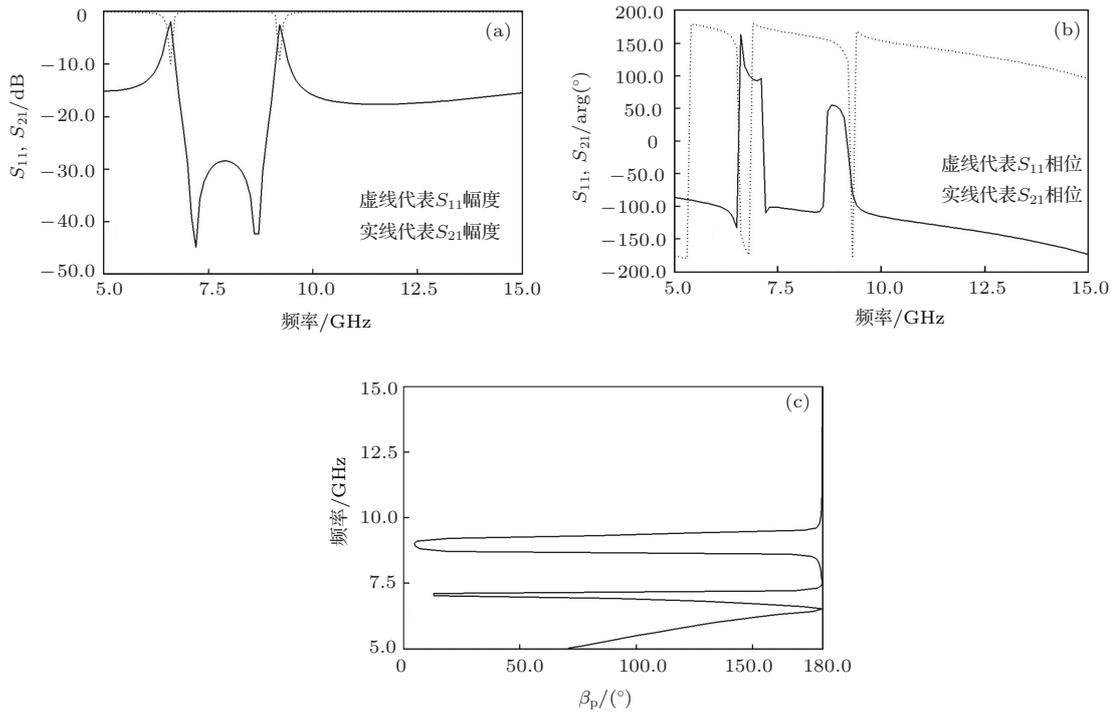


图7 (a) 单胞左手材料 S 参数幅度; (b) 单胞左手材料 S 参数相位; (c) 单胞左手材料相位常数

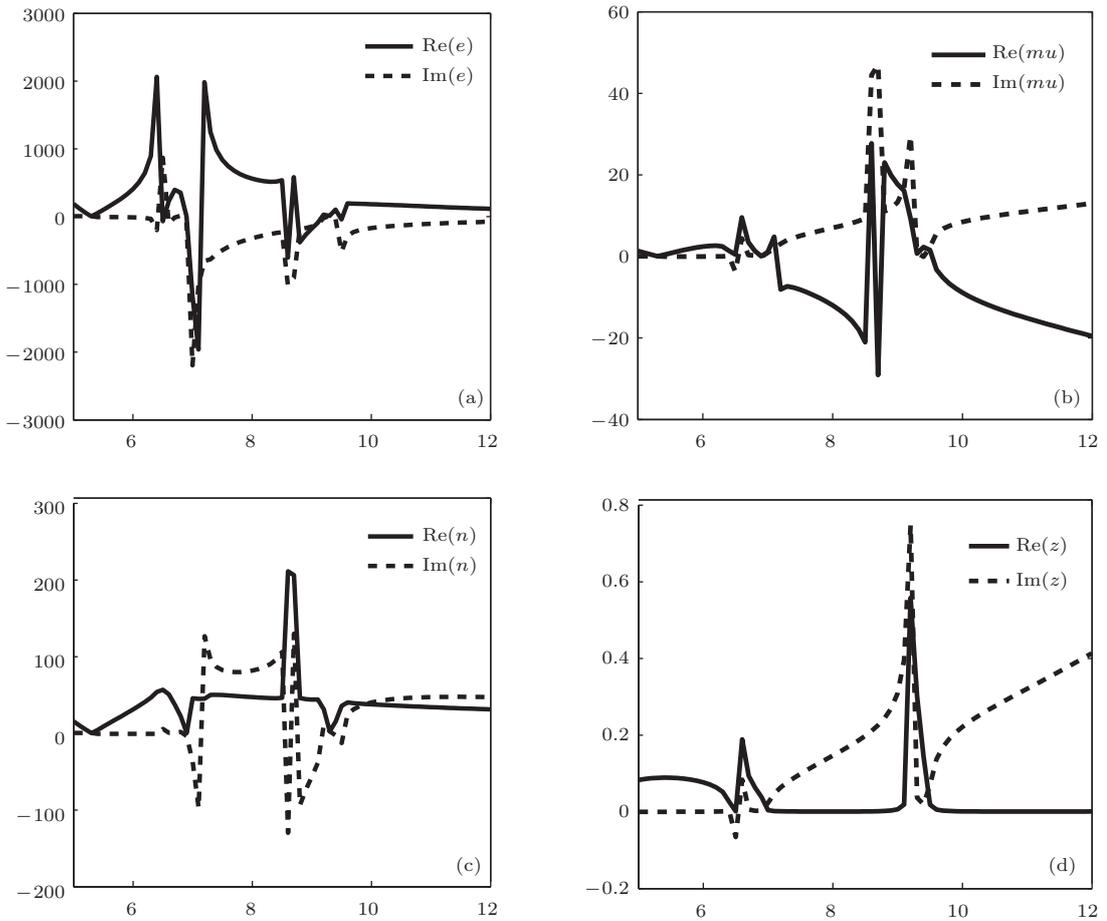


图8 (a) 等效介电常数 (实线代表实部, 虚线代表虚部); (b) 等效磁导率 (实线代表实部, 虚线代表虚部); (c) 折射率 (实线代表实部, 虚线代表虚部); (d) 阻抗 (实线代表实部, 虚线代表虚部)

表1 新型左手材料与传统左手材料性能比较

左手材料	图形形状	结构复杂程度	单面或双面刻蚀	加工难易程度	频带个数
文献 [13]	S形	较复杂	双面	较容易	双频带
文献 [14]	树枝形	复杂	双面	很难	双频带
文献 [16]	斜三角形	较简单	双面	较容易	单频带
文献 [18]	正六边形	简单	单面	较难	单频带
文献 [19—21]	正六边形	简单	单面	容易	单频带
本文	正六边形	简单	单面	容易	双频带

4 结 论

本文根据双频带磁谐振思想,提出了一种新型的多开口正六边形双频带左手材料结构.相比传统的双频带左手结构,新结构更易于设计、调整,同时新结构相对传统的不同尺寸的不同结构体更加简单方便.通过理论分析与仿真验证,该结构能够在6.5—7.0 GHz与8.8—9.3 GHz具有左手材料的传输特性.双频带左手材料结构的提出,对于利用左手材料实现双频带微波滤波器、耦合器、天线等器件,具有比较大的参考价值.

参考文献

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science*. **292** 77
- [2] Seddon N, Bearpark T, 2003 *Science*. **302** 1537
- [3] Marta Gil, Jordi Bonache, Joan Garcia-Garcia, Jesus Martel, Ferran Martin 2007 *IEEE Trans. MTT* **55** 1296
- [4] Tang M C, Xiao S Q, Guan J, Bai Y Y, Gao S S, Wang B Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074214
- [5] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [6] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [7] Grzegorzczak T M, Moss C D, Lu J, Chen X D, Pacheco J Jr, Kong J A 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 2956
- [8] 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]
- [9] Ran L, Huangfu J, Chen H, Li Y, Zhang X, Chen K, Kong J A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 073102
- [10] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6078 (in Chinese)[张燕萍, 赵晓鹏, 保石, 罗春荣 2010 物理学报 **59** 6078]
- [11] Wang S, Guo M S, Chan W 2007 *Microwave and Opt. Tech. Lett.* **49** 2726
- [12] Li T P, Wang G M, Liang J G, Zhang C X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 194201 (in Chinese)[李天鹏, 王光明, 梁建刚, 张晨新 2012 物理学报 **61** 194201]
- [13] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczak T M, Kong J A 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5338
- [14] Zhu W R, Zhao X P, Guo J Q, 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241116
- [15] Wang J F, Qu S B, Yang Y M, Ma H, Wu X, Xu Z, 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 014105
- [16] Li W Q, Cao X Y, Gao J, Liu T, Yao X, Ma J J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 154102 (in Chinese)[李文强, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 姚旭, 马嘉俊 2012 物理学报 **61** 154102]
- [17] Liu Y H, Fang S L, Gu S, Zhao X P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 134102 (in Chinese)[刘亚红, 方石磊, 顾帅, 赵晓鹏 2013 物理学报 **62** 134102]
- [18] Zhang C M, Sun M Z, Yuan Z L, Song X P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1758 (in Chinese)[张淳民, 孙明昭, 袁志林, 宋晓平 2009 物理学报 **58** 1758]
- [19] Zheng Q, Zhao X P, Li M M, Zhao J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6441 (in Chinese)[郑晴, 赵晓鹏, 李明明, 赵晶 2006 物理学报 **55** 6441]
- [20] Zhao X P, Zhao Q, Zhang F L, Zhao W, Liu Y H 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 99
- [21] Zhang F L, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4661 (in Chinese)[张富利, 赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 4661]
- [22] Zhang F L, Zhao Q, Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [23] Smith D R, Vier D C, Koschny Th, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [24] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [25] Caloz C, Itoh T 2005 *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications* New York: Wiley
- [26] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 1516
- [27] Szab'o Z, Park G H, Hedge R, Li E P 2010 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **58** 2646

A novel dual-band left-handed metamaterials composed of multi-defects hexagonal structure*

Yang Huai Wang Chun-Hua[†] Guo Xiao-Rong

(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(Received 16 July 2013; revised manuscript received 17 September 2013)

Abstract

This paper presents a novel dual-band magnetic resonance with multi-defect hexagonal structure. Staggered defects double hexagonal metal rings was put on a microwave substrate. So the coupling capacity of the two rings was damaged. Then the dual-band magnetic resonance has been obtained. The traditional structure of dual-band is very complicated. But the new structure is simple and the size is also very easy to control. Finally, we combined the novel structure with metal wires to make dual-band left-handed metamaterials. From the result of the HFSS simulation, this left-handed metamaterials has obtained dual-band at 6.5—7.0 GHz and 8.8—9.3 GHz. The dual-band left-handed structure has a great influence on the microwave filter, antenna, and other microwave devices.

Keywords: left-handed material, dual-band, multi-defects

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf, 78.20.Ci

DOI: [10.7498/aps.63.014103](https://doi.org/10.7498/aps.63.014103)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61274020), and the Open Fund Project of Key Laboratory in Hunan Universities of China (Grant No. 12K012).

[†] Corresponding author. E-mail: wch1227164@sina.com