

# 基于双 Z 形金属条的双入射型左手材料研究\*

王海侠<sup>†</sup> 吕英华 张洪欣 吴艳玲

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

(2010 年 3 月 15 日收到; 2010 年 5 月 16 日收到修改稿)

提出了一种新型二维左手材料结构单元, 该结构由介质板及其两侧放置的两个反向对称的 Z 形金属条组成. 在电磁波垂直于介质板和平行于介质板入射两种情况下, 这种结构单元于 X 波段均表现出左手通带特性. 通过模拟仿真, 提取等效电磁参数, 建立等效磁谐振电路模型, 分析验证了该结构的左手特性. 并将双 Z 形结构与相似的工字形结构相比较, 发现在电磁波垂直入射时两种结构均出现相似的左手通带, 而在电磁波平行入射时, 只有双 Z 形结构实现了双负特性. 结果表明这种双 Z 形左手单元结构具有更优越的电磁波入射适应特性, 即实现了双入射型左手结构单元.

**关键词:** 双 Z 形结构, 二维, 左手材料, 双入射

**PACS:** 41. 20. Jb, 78. 20. Ci, 42. 25. Bs

## 1. 引言

在 1968 年, Veselago 提出了同时具有负介电常数和负磁导率的左手材料的概念<sup>[1]</sup>, 三十年后, 这种特殊的材料才得以以人工复合材料的方式实现. 最早的左手材料结构由开口谐振环与金属杆组合结构构成<sup>[2-4]</sup>, 利用金属杆的等离子体效应来实现负的介电常数, 利用开口谐振环的磁谐振来实现负的磁导率, 该种结构奠定了左手材料结构设计的理论基础, 同时也掀起左手材料研究的热潮<sup>[5-10]</sup>. 然而这种结构构造复杂, 带宽窄, 损耗大, 并且在结构尺寸上也有限制, 因此各种改进的结构不断地被提出. 左手材料结构的设计, 大体沿两种思路进行, 一种是继续保持电磁波平行于介质基板入射时, 实现双负特性, 如对称环结构<sup>[11]</sup>, 双 S 结构<sup>[12]</sup>,  $\Omega$  结构<sup>[13]</sup>, H 结构<sup>[14]</sup>等, 一种是电磁波垂直于介质基板入射时, 实现双负, 如金属线对结构<sup>[15]</sup>, 双工字形结构<sup>[16]</sup>, 渔网结构<sup>[17-19]</sup>等. 然而以往的结构难于在这两种入射情况下同时实现左手特性. 本文通过将两个反向对称的 Z 形金属条分别放置在介质基板两侧, 组成新型左手材料结构单元, 实现了在平行和

垂直于介质基板入射情况下的双入射二维左手特性. 在电磁波垂直于介质基板入射时, 单元结构响应与双工字形结构相似, 介质板两侧的 Z 形金属条相互耦合, 形成了磁谐振. 而在电磁波平行于介质基板入射时, 该结构响应又与双 S 结构类似, 前后 Z 形金属条交叉, 形成了对三角环形电流环路, 也形成了磁谐振. 又由于 Z 形金属条本身具有等离子体效应, 所以在 X 波段, 利用一种结构单元即可实现了二维左手特性. 本文应用三维电磁仿真软件 CST Microwave Studio 对该结构进行了模拟仿真, 通过 S 参数研究了它的双入射左手特性, 并结合电磁参数提取方法<sup>[20]</sup>, 提取了等效介电常数与等效磁导率, 进一步验证了两种入射情况下双负通带的存在. 将新型双 Z 形结构与工字形结构<sup>[16]</sup>进行比较, 虽然两者结构上非常相似(图 1(a), (b)), 但是本文仅利用一种 Z 形结构就实现了二维左手特性, 得到了双入射型左手结构单元.

## 2. 双 Z 形结构单元设计与验证

若要实现左手特性, 必须使得等效介电常数, 等效磁导率同时为负. 等效负介电常数较容易实

\* 国家自然科学基金(批准号: 60871081, 60671055, 60771060), 高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20070013002, 20070013004)和信息安全国家重点实验室(中科院研究生院)开放课题资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: whx81318@163.com

现,连续金属条以及与金属条类似的结构都可以在它们各自的电等离子体频率以下,实现负的介电常数.而等效负磁导率的实现,则要求结构单元能够形成磁谐振回路,并且磁谐振频率要低于电等离子体频率,才能够实现双负.

双Z型结构单元如图1(a)所示,利用单个Z形金属条的电响应,来实现负的介电常数,而利用介质板前后两个反向相对的Z形金属条之间的耦合实现磁谐振(两种入射情况下,磁谐振回路不同).单元结构尺寸参数为, $w = 4\text{ mm}$ ,  $h = 10\text{ mm}$ ,  $s = 3\text{ mm}$ ,  $t = 1\text{ mm}$ ,介质板宽  $a = 6\text{ mm}$ ,高  $h = 10\text{ mm}$ ,厚  $d = 1\text{ mm}$ ,基板介电常数为9.8.无论对于垂直于介质板入射的电磁波还是平行于介质板入射的电磁波,电场极化方向均为  $y$  方向,因此在这两种情况下,Z

形金属条的电响应机理完全相同,与连续金属条一致,均可以实现负的等效介电常数,而磁谐振响应却完全不同,下面将分别进行理论分析和验证.

### 2.1. 电磁波垂直于介质板入射

在电磁波垂直于介质板入射的情况下,当应用三维电磁仿真软件 CST 对双Z结构进行仿真时,在结构单元的  $x, y$  方向分别设为周期边界条件,  $z$  方向设置入射端口.设入射平面电磁波的电场极化方向沿  $y$  向,通过仿真得到的  $S$  参数如图2(a)所示,可以看出在8 GHz 附近出现通带.应用参数提取的方法提取其等效介电常数  $\epsilon$  和等效磁导率  $\mu$ ,图2(b)中给出了  $\epsilon$  和  $\mu$  的实部部分,可见在与图2(a)相对应的8.05—8.3 GHz 的频带内出现双负.

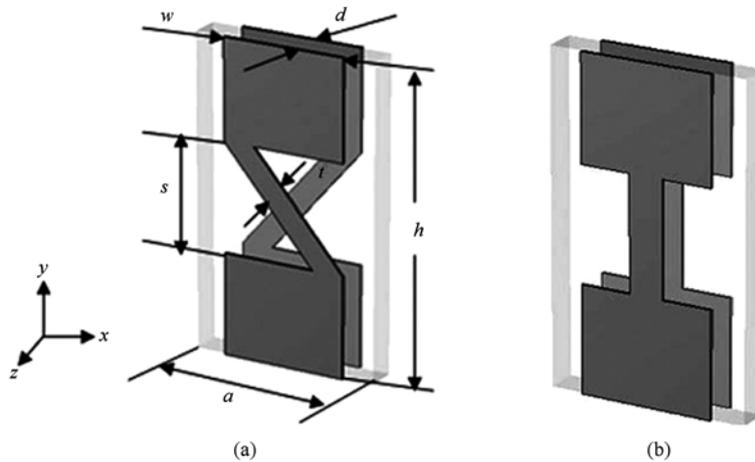


图1 两种相似结构 (a) 双Z形结构;(b) 双工字形结构

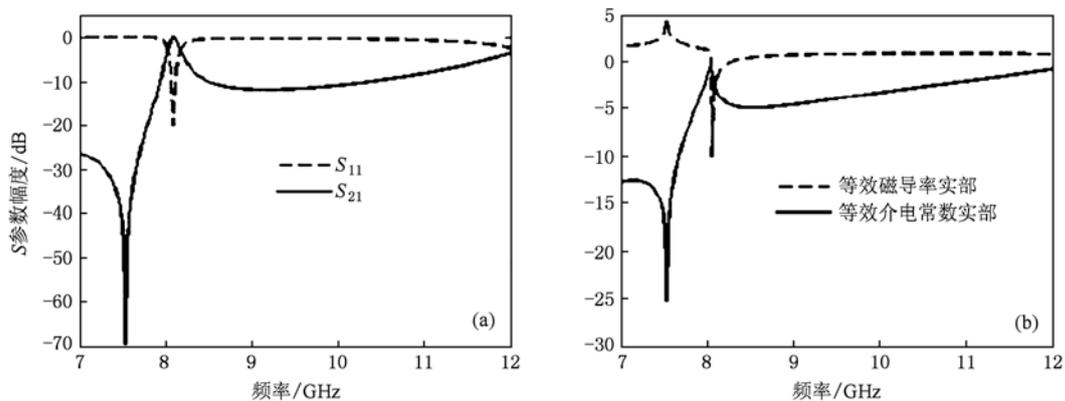


图2 电磁波垂直入射双Z形结构时,得到(a)S参数曲线,(b)对应S参数提取的等效电磁参数(实部)

由于Z形结构与工字形结构非常相似,在相同单元尺寸的情况下,对两种结构进行了比较.在电

磁波垂直入射,仿真条件完全相同的情况下,得到两种结构的传输参数如图3所示.由S参数可以看

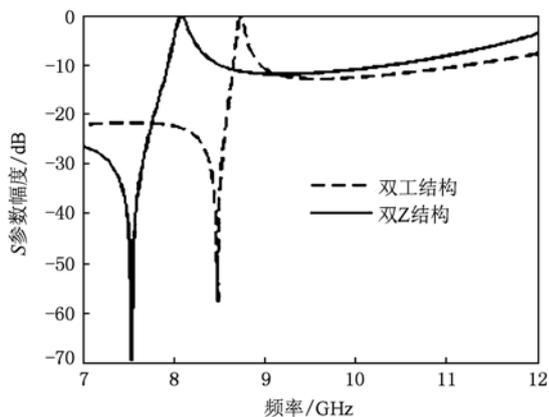


图3 垂直入射时双Z结构与双工字结构S参数比较

出,双Z形结构与双工字形结构具有几乎完全一致的电磁响应,只是Z形结构磁谐振频率向低频移动约0.7GHz.这是因为在x方向磁场的作用下,二者具有相同的磁场作用机理,即等效磁谐振回路相同,由图4(a)中电磁波垂直入射时,双Z结构在谐振点8.2GHz前后两金属条上的电流分布来看,与

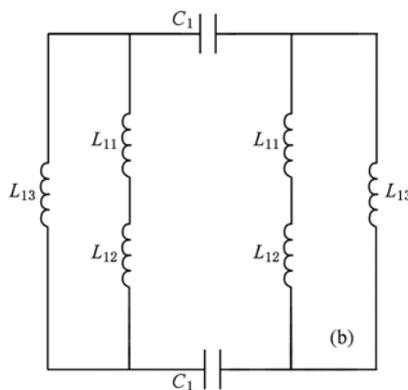
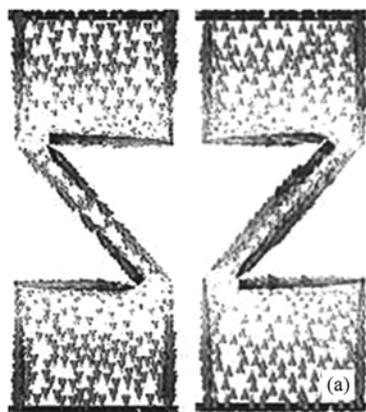


图4 电磁波垂直入射时(a)在谐振频点(8.1GHz)的前后Z形金属条上的电流分布,(b)由电流分布推出的双Z形结构等效磁谐振电路图

### 2.2. 电磁波平行于介质板入射

在电磁波平行入射的情况下,单元结构的y,z方向分别设为周期边界条件,x方向设置入射端口.设平面电磁波沿x轴方向入射,电场极化方向仍为y方向.通过CST仿真得到的S参数如图5(a)所示,提取的等效电磁参数如图5(b)所示.可以看出,在频段8.85—9.45GHz出现了双负特性.

在电磁波平行入射的情况下,负介电常数仍然由Z形金属条产生,而负磁导率的产生机理与垂直

文献[16]中工字形结构基本一致,不同之处只在于,Z形结构较宽部分除了存在与斜向部分方向相反的纵向电流外,还存在与斜向部分方向相同的横向电流,因此根据文献[11]中的分析理论,得到等效电路图如图4(b)所示,其中C<sub>1</sub>为介质板前后两个Z形金属条之间的耦合电容,L<sub>11</sub>为中间斜向部分的等效电感,L<sub>12</sub>为Z形较宽部分横向电流所对应的等效电感,L<sub>13</sub>为较宽部分纵向电流对应的等效电感,L<sub>11</sub>与L<sub>12</sub>串联,再与L<sub>13</sub>形成并联电路.与工字形结构相比,由于Z形金属条中间部分的改变,增大了磁谐振回路的面积,增加了电感L<sub>12</sub>,根据磁谐振频率的表达式

$$f_m = \omega/2\pi = 1/2\pi \sqrt{LC}$$

$$= 1/(L_{11}C_1 + L_{12}C_1) + 1/L_{13}C_1/2\pi. \quad (1)$$

可以看出电感L<sub>12</sub>引入,使得f<sub>m</sub>向低频移动.因此双Z结构相对双工字结构,在实现相同频率的谐振时就相对具有了更小的单元尺寸.

入射时完全不同.从结构的z方向看去,双Z结构组成了两个相对的三角形,在z向磁场的作用下,在磁谐振点形成两个方向相同的电流环(图6(a)),此响应又与双S结构响应机理完全一样,其等效电路如图6(b)所示,L<sub>2</sub>为Z形金属条的等效电感,C<sub>2</sub>为Z形结构上(下)半较宽部分之间的的耦合电容,C<sub>3</sub>为Z形结构中间斜向交叉部分的耦合电容.由于电磁波在不同的入射方向时,产生的磁谐振不同,从而产生不同的感生电流,以至于影响了电响应,因此图5(b)中提取的介电常数与图2(b)提取的介电

常数虽然均为负值,但数值大小不同. 在电磁波平行入射情况下,将双Z结构仿真结果与双工结构进行比较,如图7所示. 可以发现,由于工字结构因为

其单个结构左右完全对称,不能形成磁谐振回路,因此并不存在左手通带;而双Z结构出现了左手通带. 虽然双Z结构单元与双工结构单元在结构上相近,

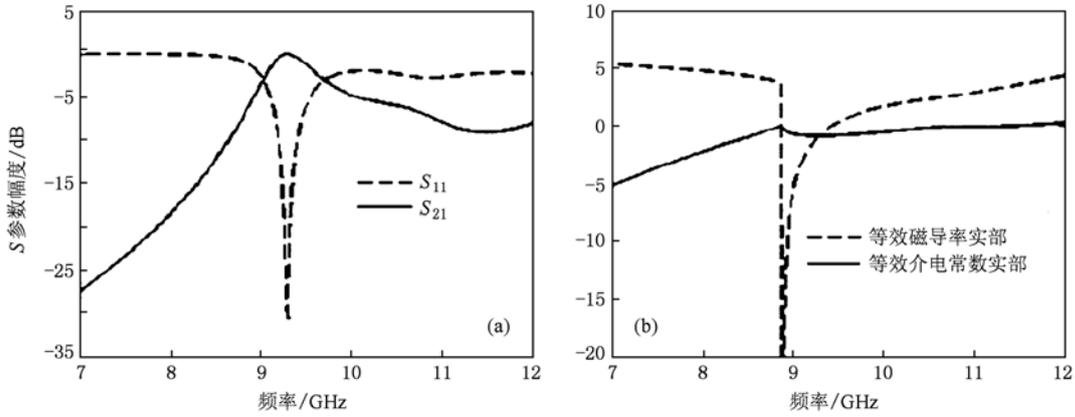


图5 电磁波平行入射双Z结构时(a)S参数曲线,(b)对应S参数提取的等效电磁参数(实部)

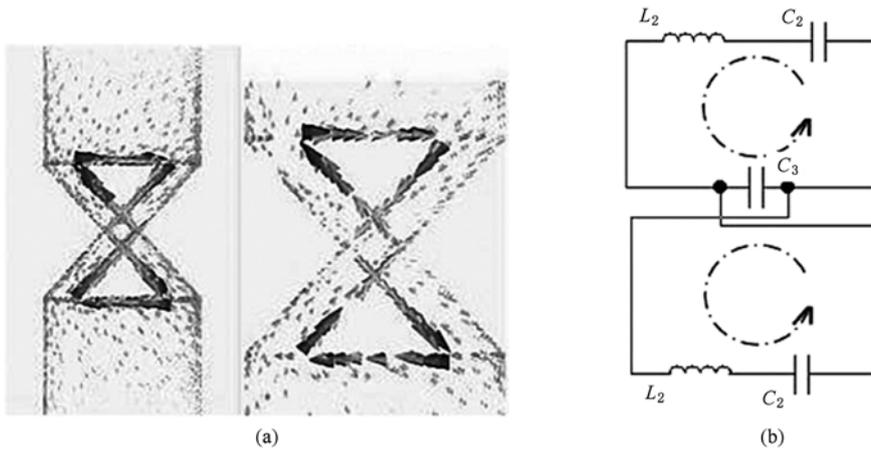


图6 电磁波平行入射时(a)在谐振点9.3 GHz 双Z结构的电流分布,右侧为双Z结构交叉部分的放大图,(b)由电流分布推出的双Z结构等效磁谐振电路图

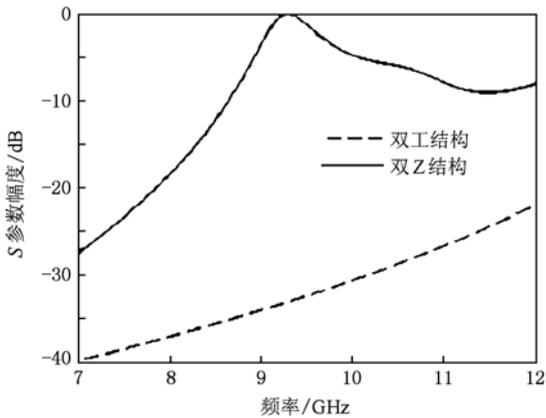


图7 电磁波平行入射时双Z结构与双工结构传输参数比较

但是双Z结构单元却具备了双入射二维左手特性.

### 3. 结 论

基于左手材料单元设计原理,设计了双入射型二维左手材料——反面对称双Z形结构单元. 通过对双入射型结构单元左手特性的理论分析,仿真及等效电磁参数提取,验证了在电磁波垂直入射和电磁波平行入射时,分别在频段 8.05—8.3 GHz, 8.85—9.45 GHz 均出现了左手通带. 通过对双Z结构单元与已有的双工形结构进行比较,发现在电磁波垂直入射时,两种结构具有相同的电磁响应,但

是双 Z 结构具有更小的相对单元尺寸. 在电磁波平行入射时, 由于磁谐振机理不同, 双工字形结构只具有电响应, 左手通带消失, 而双 Z 结构仍然表现

出左手通带特性. 因此, 相比于工字形结构, 双 Z 形结构增加了一维左手特性, 这种双入射型二维左手材料具有更优越的电磁波入射适应性.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2057
- [4] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [5] Shi H Y, Jiang Y Y, Sun X D, Guo R H, Zhao Y P 2005 *Chin. Phys.* **14** 1571
- [6] Jiang T, Chen Y, Feng Y J 2006 *Chin. Phys.* **15** 1154
- [7] Hu Y H, Fu X Q, Wen S C, Su W H, Fan D Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2970
- [8] Schuring D, Mork J J, Smith D R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041109
- [9] Zhang H X, Bao Y F, Lu Y H, Chen T M, Wang H X 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1645
- [10] Zhuo S C, Yan C C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 360 (in Chinese) [卓士创、闫长春 2010 物理学报 **59** 360]
- [11] Grzegorzczak T M, Moss C D, Lu Jie, Chen X D, Pacheco J Jr, Kong J A 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 2956
- [12] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [13] Ran L, Huangfu J, Chen H, Li Y, Zhang X, Chen K, Kong J A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 073102
- [14] 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]
- [15] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [16] Zhang S, Qu S B, Ma H, Xie F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3961 (in Chinese) [张松、屈绍波、马华、谢峰、徐卓 2009 物理学报 **58** 3961]
- [17] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
- [18] Mary A, Rodrigo S G, Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 103902
- [19] Menzel C, Paul T, Rockstuhl C, Pertsch T, Tretyakov S, Lederer F 2010 *Phys. Rev. B* **81** 035320
- [20] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 1516

## Study on double incidence left-handed material composed of double Z-shaped metal strips<sup>\*</sup>

Wang Hai-Xia<sup>†</sup> Lü Ying-Hua Zhang Hong-Xin Wu Yan-Ling

(School of electronic engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 15 March 2010; revised manuscript received 16 May 2010)

### Abstract

A new 2D left-handed material structural unit is proposed by setting two reversely symmetrical Z metal strips on each side of the dielectric substrate respectively. The structure can present left-handed properties in X waveband, with electromagnetic waves incident either perpendicularly or parallel to the plane of the substrate. By means of numerical simulation, extracting the effective permittivity and permeability from S parameters and building the equivalent magnetic resonance circuits of the structure, the left-handed property is further analyzed and verified. And by comparing the double Z-shape unit with the traditional H-shape unit, it is shown that they have similar responses of presenting left-handed pass band when electromagnetic waves are incident perpendicularly to the substrate, but only the double Z-shape unit can achieve left-handed features when electromagnetic waves are incident parallel to the substrate. The results indicate that the double Z-shape left-handed structural unit is superior to the traditional H-shape structure, namely, the double Z-shape can redound to design left-handed structural unit for double dimension incidence of electromagnetic waves.

**Keywords:** double Z-shape structure, left-handed material, two - dimensional, double dimension incidence

**PACS:** 41. 20. Jb, 78. 20. Ci, 42. 25. Bs

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60871081, 60671055, 60771060), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant Nos. 20070013002, 20070013004) and Open Fund of the National Key Laboratory of Information Security (Graduate School of Chinese Academy of Sciences), China.

<sup>†</sup> E-mail: whx81318@163.com