

同时实现介电常数和磁导率为负的 H 型结构单元左手材料*

刘亚红 罗春荣 赵晓鹏†

(西北工业大学电流变技术研究所,西安 710072)

(2006 年 11 月 24 日收到 2007 年 2 月 24 日收到修改稿)

基于用一种结构同时实现材料介电常数和磁导率为负的思想,提出了 H 型结构单元左手材料模型.采用矩形波导法测试表明,H 型结构单元在微波频率范围出现左手透射峰,并且可以由参数 t 对左手特性区域进行调控.同时利用相位法、棱镜折射法和散射参量法从实验和理论证明了在左手透射峰区域材料的折射率为负值,介电常数和磁导率亦同时为负.相对由金属开口谐振环与金属线两种结构组合实现的左手材料,H 型结构集磁谐振与电谐振于一体,结构简单、制备方便,对微波器件左手材料表现出更多的优越性.

关键词:左手材料,负折射,相位

PACC:4270Y,7430G,7785

1. 引言

左手材料(left-handed metamaterials, LHM)是一种介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负的人工周期结构材料^[1],具有许多奇异性质.LHM 可以应用于通讯系统以及资料储存媒介的设计,可用来制造容量更大的储存媒体^[2];等效负折射媒质电路可以有效拓宽器件频带,改善器件的性能^[3].将来,LHM 还将在无线通信发展中起到不可忽视的作用.但是,人们在自然界并没找到 LHM,应用则更是无从谈起.直到 20 世纪 90 年代后期,Pendry 等^[4,5]提出周期性排列的导电金属线(wire)和导电开口谐振环(split ring resonator, SRR)可以分别实现负介电常数 ϵ 和负磁导率 μ .依据 Pendry 的设计思想,Smith 等^[6,7]通过实验首次观测到了负折射现象的存在,该发现激起了研究者的极大兴趣^[8-17].

目前,LHM 多数都是由 SRR 和 wire 两种结构组合而成.Chen 等研究者^[18-20]另辟蹊径分别研究了将开口谐振环与金属线集合于一共的“弓”型、“Ω”型、“工”型结构单元 LHM,但是这几种结构仍然需要在一块介质基板的两面或者在两块介质基板上分别刻

蚀反对称的“弓”型、“Ω”型和对称的“工”型结构.此外,Soukoulis 等^[21]研究了一种长短线对结构 LHM,短金属线对结构提供负磁导率效应,长金属线对提供负介电常数效应.相对于由 SRR 与 wire 组合而成的 LHM,虽然结构简化但仍需要两种结构组合实现 LHM,没有真正将开口谐振环与金属线实现一体化设计.

本文提出了一种 H 型结构单元 LHM 模型,用这种结构只需要在一块介质基板的一侧采用电路板刻蚀技术刻蚀周期性排列的 H 型金属图案,就可以实现左手效应.利用矢量网络分析仪在微波频段观测到了左手透射峰,采用 CST(computer simulation technology)公司的高频三维电磁场 CST MICROWAVE STUDIO 仿真软件模拟了 H 型结构传输波谱,并分析了左手透射峰区域中 H 型结构单元一个周期的表面电流分布.通过测试不同数量结构单元的相位变化,表明电磁波在其中传播时存在相位超前,该透射峰区域表现为左手特性.同时通过棱镜折射法和散射参量法研究了 H 型结构的折射率,表明在左手透射峰区域其折射率为负.相比较由 SRR 和 wire 组合而成的 LHM,H 型单元具有结构简单,体积小等优点.在滤波器、微波天线等微波器件中有广阔应用前景.

* 国家重点基础研究发展计划(批准号 2004CB719805),国家自然科学基金(批准号 50632030)和国防基础研究资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

2. 样品制备与实验装置

2.1. 样品制备

采用电路板刻蚀技术制备 H 型结构 LHM, 在厚度为 1.0 mm 的环氧玻璃纤维介质基板(介电常数

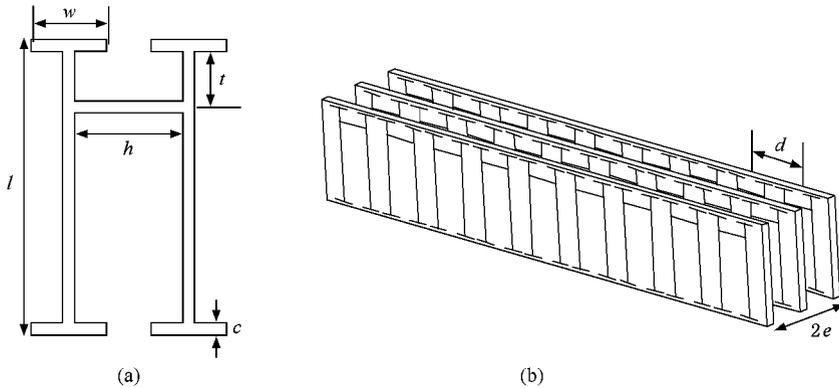


图 1 (a)H型结构单元;(b)样品

2.2. 实验仪器与装置

采用矩形波导法利用 AV3618 矢量网络分析仪分别测量了所制备样品在微波波段(频率范围为 7—12 GHz)的电磁响应行为. 矩形波导的横截面尺寸为 22.86 mm × 10.16 mm, 将待测样品置于波导中央, 电磁波波矢 K 平行于待测样品入射即沿 x 方向入射, 电场 E 平行于 y 轴, 磁场 H 平行于 z 轴. 实验装置如图 2.

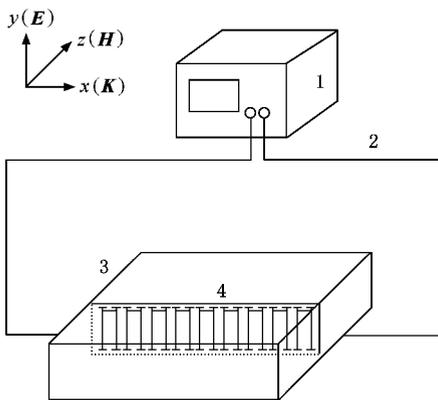


图 2 实验装置示意图 1 示 AV3618 矢量网络分析仪 2 示同轴电缆 3 示矩形波导 4 示待测样品

$\epsilon = 4.65$) 的一侧刻蚀周期性排列的 H 型金属铜图案, 制备了一系列 H 型样品, 参数为长度 $l = 9.5$ mm, 四个角长均为 $w = 2.5$ mm, 横杆长度 $h = 4$ mm, 线宽 $c = 0.3$ mm, 行间距 $d = 7$ mm, 列间距 $e = 5$ mm, 金属铜厚度 0.04 mm, 横杆离上角长之间的距离 t 分别为 2.0, 1.6, 1.4, 1.0 和 0.8 mm. 图 1 所示为设计的其中一种 H 型结构单元及样品.

3. 实验结果与分析

3.1. 实验结果

将制备的一系列 H 型样品分别置于矩形波导中, 利用矢量网络分析仪测其微波传输波谱(结果见图 3). H 型结构样品在微波波段某频率范围存在一个透射峰. 当 $t = 2$ mm 时, 左手透射峰出现在 7.525—8.025 GHz; 当 t 依次减小为 1.6, 1.4, 1.0 和 0.8 mm 时, 左手透射峰分别出现在 7.85—8.75 GHz, 8.375—9.375 GHz, 8.825—9.625 GHz, 9.1—9.725 GHz. 可见, 通过调节横杆到角长的距离 t 可以实现对左

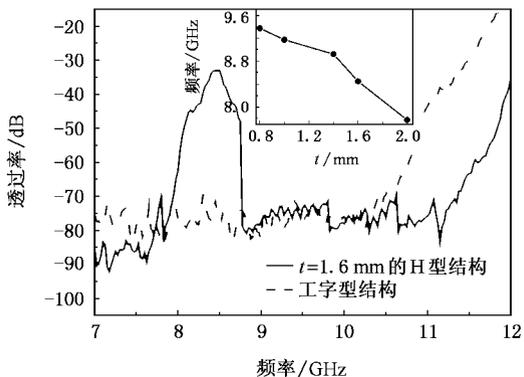


图 3 实验测得的 H 型结构与工字型结构的传输波谱

手透射峰的调节,当横杆不断向上移动即 t 减小时透射峰逐渐向高频移动,仅将 t 从 2 mm 减小为 0.8 mm,左手透射峰的中心频率就移动了 1.6 GHz. 因此,固定其他参数不变,调节 t 就可以有效的大幅度调节左手区域位置,方法非常简单.此外,本文还采用 CST MICROWAVE STUDIO 三维电磁场仿真软件对 H 型样品进行了仿真研究(图 4),模拟结果与实验结果基本吻合.由于模拟时没有考虑材料的损耗,导致模拟透射峰的强度比实验值偏高,实验样品加工精度以及介质基板介电常数与所建立的模型也有一定的误差,使模拟透射峰的位置与实验值也稍有偏差.

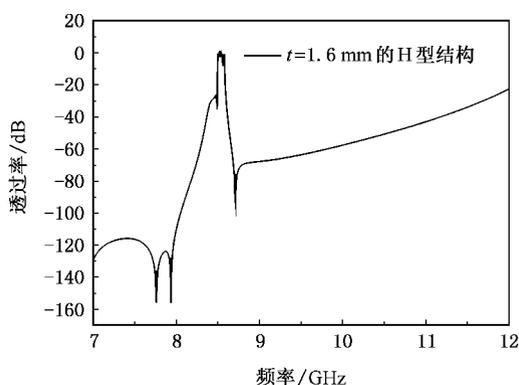


图 4 模拟的 H 型结构传输波谱

3.2. 结果分析

H 型阵列的单元结构是由两个工字和一个横杆组成,由于 H 型结构单元的两个工字型臂与电场方向平行,其可以产生电谐振,实现负介电常数. H 型结构与工字型结构有本质差别,单独的工字型结构仅可实现负介电常数^[22];在两个工字型结构中加一个横杆就是本文提出的 H 型结构,由于横杆的加入,使原本仅具有负介电常数的工字结构变为同时具有负介电常数和负磁导率的 H 型结构左手材料.图 3 给出了实验测得的 H 型和工字型结构的透射曲线,工字型阵列在 7—10.5 GHz 出现强度为 -80 dB 透射禁带,而 H 型阵列的透射波谱则是在工字型阵列的透射禁带内的某频段范围出现一左手透射通带,横杆的加入并不影响其负介电常数性能,反而使其同时又具有了负磁导率性能.图 5 分析了在左手透射峰区域中 8.25 GHz 频率处 H 型结构单元一个周期内分别相差 90° 相位的表面电流分布情况(选取的是 $l = 9.5$ mm, $a = 2.5$ mm, $h = 4$ mm, $\epsilon = 0.3$ mm,

$t = 1.6$ mm 的 H 型样品),箭头方向表示表面电流的方向,箭头的大小表示电流的强弱.从图 5 可看出 H 型结构单元的上半部分即横杆与上面两个角长之间有环型电流产生,依照 Pendry 的理论^[5],开口谐振环是由内外嵌套的同心双环结构组成,而且双环结构必须产生环型的电流元振荡,才能形成磁谐振,只有在磁谐振频段内其磁导率才为负. Soukoulis 等^[23]研究表明,负磁导率的实现并不一定需要内外嵌套的同心双环谐振结构,单环谐振结构同样可以实现磁响应和负磁导率.可以认为 H 型结构单元的上半部分即横杆与上面两个角长之间为一个单环谐振结构,其有环型电流产生,由电流 j 的磁偶极矩定义 $m = \frac{1}{2} \int r \times j dr$ 可知,图 5 中的感应电流分布仍可形成一个净磁矩,其方向与外加磁场相反,可实现负磁导率.环的其他结构由于电磁耦合等作用对此环是有影响的,而要讨论左手材料实现磁化的主因则主要看其是否有环型电流产生的磁极化响应.从图 5 还可看出,与通常的可实现负介电常数的金属棒阵列中均为一致的表面电流不同, H 型结构中两个工字臂的电流分布在不同相位时刻是有差别的,主要是由于 H 型结构不仅要受电场的激励产生极化,同时也受到磁场激励产生磁化, H 型结构的上半部分即横杆与上面两个角长之间构成的谐振单环磁化产生的环型电流会对左右工字型臂的电流分布造成一定影响,使左右两个工字臂的电流分布在不同

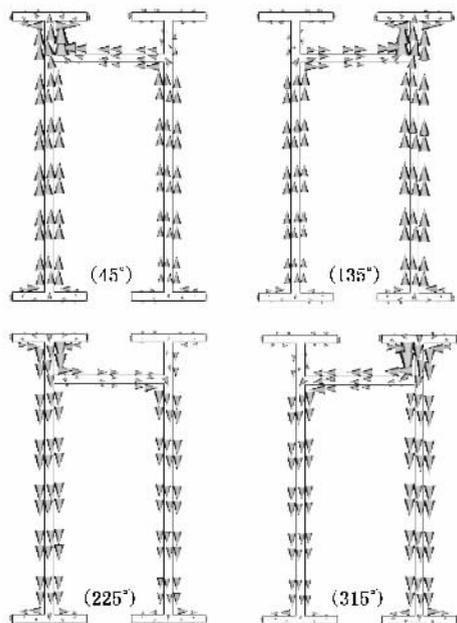


图 5 H 型结构单元在一个周期内相差 90° 相位的表面电流分布

相位时刻发生变化,但并不影响其负介电常数性能.

由于 H 型结构集电谐振与磁谐振一体,仅用一种简单结构便实现了左手行为,可方便的对左手透射区域进行调控.通过对 H 型结构中横杆位置的调节实现对左手透射峰的调控,可将 H 型结构单元的上半部分构成谐振单环与 LC 谐振电路相类比,环的谐振频率正比于 $1/\sqrt{LC}$,当横杆位置不断向上移动即 t 减小时, H 型结构的上半部分所围的面积减小,此时相当于结构的电容 C 不变、电感 L 减小,磁谐振频率便向高频移动,从而使左手透射峰也向高频移动(如图 3 所示).

4. 左手特性的证明

为了说明 H 型结构具有左手特性可以用来制备左手材料,采用以下 3 种方法证实,第一种方法通过实验测量电磁波通过不同结构单元数目的相位变化证明在左手特性区域存在相位超前,其相速度和折射率均为负;第二种方法采用 Smith 等的棱镜折射实验装置实验测量 H 型结构材料的折射率;最后,利用散射参量法理论计算其折射率.以下实验均用几何参数为 $l = 9.5 \text{ mm}$, $w = 2.5 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $c = 0.3 \text{ mm}$, $t = 1.6 \text{ mm}$ 的 H 型结构样品.

4.1. 相位变化

对于通常的右手材料,当电磁波在其中传播时,随着传播距离的增加,相位不断滞后;而对于 LHM,随着传播距离的增加,相位则越来越超前^[24, 25].

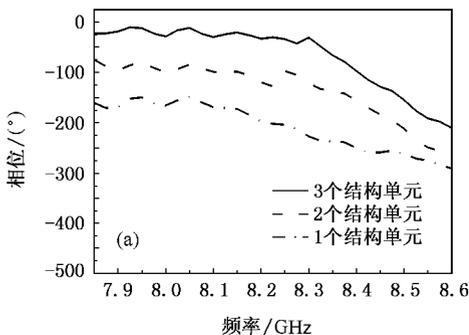
通常,相速度 v 定义为

$$v = c/n, \tag{1}$$

其中 c 是光速, n 是折射率.

另外,相速度 v 又可以写为

$$v = \omega/k, \tag{2}$$



其中 ω 为角频率, k 是波矢.

由(1)和(2)式可得

$$n = ck/\omega, \tag{3}$$

而

$$k = -\Delta\phi/L, \tag{4}$$

其中 $\Delta\phi$ 为电磁波传播一个结构单元的相位差, L 为一个结构单元的长度.将(4)式代入(3)式可得

$$n = -\frac{\Delta\phi}{L} \frac{c}{\omega}. \tag{5}$$

对于右手材料,由于相位滞后, $\Delta\phi$ 为负,由(5)式知道,折射率 n 为正值.对于 LHM,如果能观测到相位超前,那么 $\Delta\phi$ 应为正值,折射率 n 便为负值,由(1)式知相速度 v 也为负.

利用 AV3618 矢量网络分析仪分别测试了电磁波传播 1 个 H 型结构单元、2 个 H 型结构单元、3 个 H 型结构单元距离的传输曲线和相位曲线.从传输波谱(图 6)可以看到透射峰区域出现在 7.825—8.65 GHz 附近,而在此频率区间,从传输相位图(图 7(a))可以看出,当电磁波传播一个结构单元时,平均相位为 -208.5° ,当电磁波传播 2 个结构单元、3 个结构单元时,平均相位分别为 -136.5° , -66.7° ,

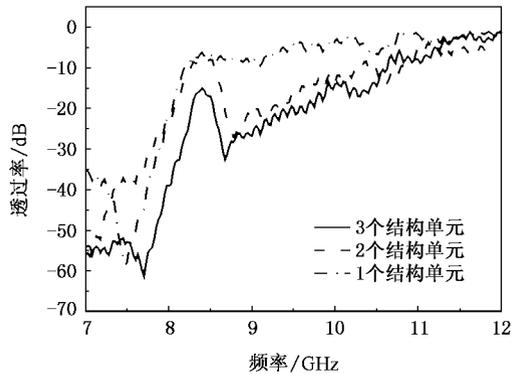


图 6 不同结构单元的 H 型样品传输波谱

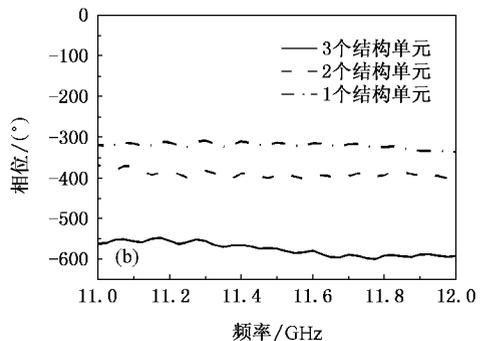


图 7 (a)不同结构单元的左手区域传输相位;(b)不同结构单元的右手区域传输相位

可以看出随着传播距离的增加即单元数目增多,相位的大小是减小的;而对于右手区域,选定 11—12 GHz,当电磁波分别传播 1 个结构单元、2 个结构单元、3 个结构单元时,平均相位分别为 -312.3° 、 -381.8° 、 -551.8° (图 7(b)),也就是说随着传播距离的增加,相位的大小也是增加的,这便是典型的右手材料相位变化特征。而这一频率区域的相位变化恰好与 7.825—8.65 GHz 频率区域相反,说明观测到的透射峰区域为左手特性区域,电磁波在其中传播时,相位是超前的, $\Delta\phi$ 为正值,由(5)式可知折射率 n 为负,由(1)式知相速度也为负。选择左手区域中 8.25 GHz 频率点,此时 $\Delta\phi = 85^\circ$, $L = 6.5 \text{ mm}$, $\omega = 2\pi f$, c 是光速,由(5)式计算得到折射率 n 为 -1.32 ,由(1)式知相速度 v 等于 $-0.76c$ 。

4.2. 棱镜折射实验

采用 Smith 等^[6]设计的棱镜折射实验装置测量了 H 型结构左手材料的折射率,实验装置图如图 8 所示。将 H 型结构左手材料制成直角三角形棱镜,长直角边与斜边的夹角为 26° ,电磁波沿着样品的长直角边垂直入射,进入棱镜内部波的方向不发生变化,在棱镜斜边处,入射波按一定的角度发生折射。图 8 中虚线为空气与样品斜边交界面的法线方向,对应的出射角度为 0° ;如果样品具有负折射率,则出射方向将位于图 8 中法线下方,其出射角度为负值;反之出射方向将在法线上方,其出射角度为正值。将检测器检测到的功率峰值对应的角度视为折射角,根据斯涅尔定律可计算样品的折射率。实验测试了入射电磁波频率为 8.25 GHz 时角度与检测器功率值的关系(图 9),在 -34° 出现了功率峰值,观测到了明显的负折射现象,由斯涅尔定律计算其折射率为 -1.28 。

4.3. 散射参量法计算折射率

采用散射参量法理论计算了 H 型结构材料的介电常数 ϵ 、磁导率 μ 、折射率 n ^[26,27]。散射参量法是一种确定有效媒质电磁参量的常用方法,具体的计算方法与计算过程见文献[26,27],以下是该方法用的主要公式:

$$T = \begin{pmatrix} \cos(kd) & -\frac{z}{k} \sin(kd) \\ \frac{k}{z} \sin(kd) & \cos(kd) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

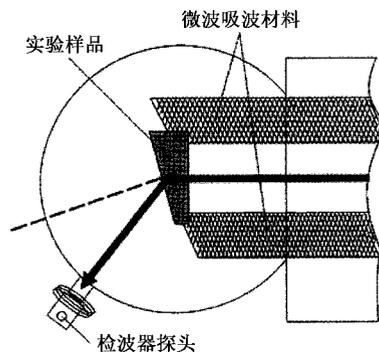


图 8 棱镜折射实验装置图

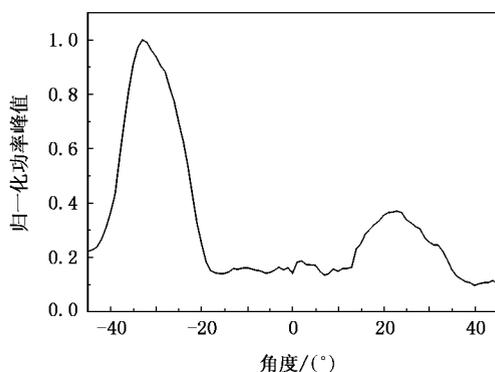


图 9 出射功率值与角度的关系

$$\cos(kdn) = \frac{1}{2S_{21}}(1 - S_{11}^2 + S_{21}^2), \quad (7)$$

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (8)$$

进而由 $\epsilon = n/z$, $\mu = nz$ 得到介电常数与磁导率。

计算所得到的 ϵ , μ , n 与频率的关系曲线如图 10 所示。点划线表示介电常数 ϵ 与频率的变化关系,在 7—10 GHz 介电常数 ϵ 为负;虚线表示磁导率 μ 与频率的变化关系,在 8.18—8.65 GHz 频段范围,磁导率 μ 小于零;实线表示折射率 n 与频率的变化关系,可以看出在 8.1—8.65 GHz 折射率 n 为负。在介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负的频率区域折射率 n 也为负,这段频率区域就表现出左手特性。对于 $t = 1.6 \text{ mm}$ 的 H 型样品,从上文的传输波谱可知其左手透射峰位置在 7.85—8.75 GHz 附近,而计算得到的负折射率区域 8.1—8.65 GHz 恰好位于此透射峰区域范围内。可见,实验中观测到的透射峰确实为左手峰,说明由 H 型结构制备的材料具有左手特性。

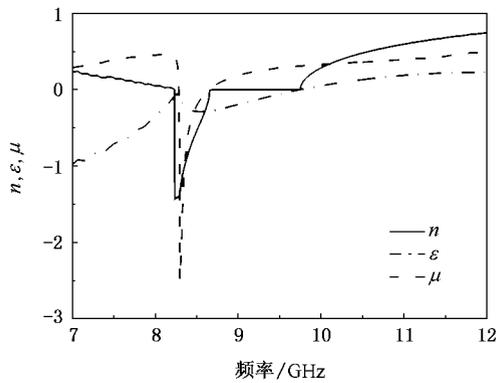


图 10 介电常数 ϵ 、磁导率 μ 、折射率 n 与频率的变化曲线

当频率为 8.25 GHz 时,由图 10 可知,折射率为 -1.42 ,而利用棱镜折射实验计算的折射率为 -1.28 ,分析认为主要是由于散射参量法模拟计算时没有考虑材料损耗而导致误差产生,而同频率点用相位方法得到的折射率为 -1.32 ,分析认为主要

是由实验测量中相位变化的误差引起的.虽然 3 种方法测得的折射率有所偏差,但在左手区域其折射率均为负值,表现出左手特性行为,因此 H 型结构可以用来制备左手材料.

5. 结 论

提出了一种 H 型结构单元左手材料模型,不同于通常的左手材料需要由金属开口谐振环与金属线两种结构组合而成,这种结构可以同时实现介电常数和磁导率为负值.实验与数值模拟研究表明,H 型结构在微波频率范围呈现左手特性,并且可以由参数 t 对左手特性区域进行调控.采用相位法、棱镜折射法和散射参量法,分别从实验和理论证明 H 型结构具有左手特性,在左手特性区域存在相位超前并且相速度为负,在介电常数 ϵ 、磁导率 μ 同时为负的频率段,折射率 n 也为负值.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Liu L, He S L 2004 *Opt. Express* **12** 4835
- [3] Eleftheriades G V, Iyer A K, Kremer P C 2002 *IEEE Trans. Microwave Theor. Techniq.* **50** 2702
- [4] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [5] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theor. Techniq.* **47** 2075
- [6] Shelby R, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [7] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [8] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H, Luo C R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵 乾、赵晓鹏、康雷、张富利、刘亚红、罗春荣 2004 物理学报 **53** 2206]
- [9] 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]
- [10] Zhang F L, Zhao Q, Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [11] Zhou X, Fu Q H, Zhao J, Yang Y, Zhao X P 2006 *Opt. Express* **14** 7188
- [12] Zhao X P, Kang L, Song J, Fu Q H 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [13] Zhao X P, Zhao Q, Zhang F L, Zhao W, Liu Y H 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 99
- [14] Feng Z F, Zhang X D, Wang Y Q, Li Z Y, Cheng B Y, Zhang D Z 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 247402
- [15] Jiang H T, Chen H, Li H Q, Zhang Y W, Zhu S Y 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5386
- [16] Feng L, Liu X P, Lu M H, Chen Y B, Chen Y F, Mao Y W, Zi Y, Zhu Y Y, Zhu S N, Ming N B 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 014301
- [17] Ao X Y, He S L 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 101112
- [18] Chen H, Ran L, Huangfu J, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczak T M, Kong J A 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5338
- [19] Ran L, Huangfu J, Chen H, Li Y, Zhang X, Chen K, Kong J A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 073102
- [20] Zhou J F, Koschny T, Zhang L, Tuttle G, Soukoulis C M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 221103
- [21] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101(R)
- [22] Zilokowski R W 2003 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **51** 1516
- [23] Kafesaki M, Koschny T, Penciu R S, Gundogdu T F, Economou E N, Soukoulis C M 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** S12
- [24] Aydin K, Guven K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 124102
- [25] Woodley J F, Wheeler M S, Mojahedi M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066605
- [26] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [27] Chen X D, Grzegorzczak T M, Wu B I, Jr Pacheco J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608

H-shaped structure of left-handed metamaterials with simultaneous negative permittivity and permeability *

Liu Ya-Hong Luo Chun-Rong Zhao Xiao-Peng[†]

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

(Received 24 November 2006 ; revised manuscript received 24 February 2007)

Abstract

We introduce a structure made of periodic arrays of H-shaped metallic pattern that offers a potentially simple approach in building left-handed metamaterials with simultaneous negative permittivity and permeability. We have investigated experimentally the transmittance in the rectangle waveguide and found unambiguously a passband that can be tuned easily at microwave frequencies by changing the parameter t . Using phase shift experiment, prism refraction experiment and S-parameter retrieval method, we have confirmed that the H-shaped metamaterials have negative refractive indices, negative permittivity and negative permeability at the passband frequencies. Compared with the conventional left-handed metamaterials consisting of arrays of wires and split ring resonators, H-shaped left-handed metamaterials show not only magnetic resonance but also electric resonance, so they will be a good candidate in the microwave applications due to their simple structure and easy preparation.

Keywords : left-handed metamaterials, negative refraction, phase

PACC : 4270Y, 7430G, 7785

*Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB719805), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50632030) and the Defense Basic Research Program of China.

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