

二维各向同性异向介质负折射特性仿真验证^{*}

孟繁义^{1)†} 吴 群¹⁾ 金博识¹⁾ 王海龙¹⁾ 吴 健^{1)‡}

1) (哈尔滨工业大学电子与信息技术研究院, 哈尔滨 150001)

2) (电波环境特性及模化技术国家重点实验室, 北京 102206)

(2006 年 1 月 16 日收到, 2006 年 3 月 18 日收到修改稿)

提出了一种工作在 C 波段的二维各向同性异向介质, 相比于以往的二维异向介质, 它除了具有二维各向同性的优点外, 还具有带宽更宽, 单元结构的尺寸更小, 构造也更简单的特点. 通过分别仿真验证异向介质的双负特性和负折射特性最终肯定上述异向介质的存在.

关键词: 各向同性异向介质, 宽频带, 小单元, 双负特性

PACC: 3220D, 4110H

1. 引 言

近年来, 异向介质在光学、电磁学、材料科学以及应用物理学领域受到越来越多的关注. 异向介质具有一系列反常的电磁特性, 比如双负效应(有效介电常数和有效磁导率同时为负)、后向波特性和(在其中传播的电磁波的相速与群速方向相反)、负折射特性(电磁波在左手介质与普通介质的交界面发生折射时折射角为负, 即入射角与折射角位于法线同侧)^[1-4]. 早在 1968 年 Veselago 就在理论上预言了异向介质及其反常电磁特性的存在^[5], 但由于在自然界中一直无法找到天然的异向介质, 在其后的近 30 年间, 有关异向介质的研究几乎未得到任何进展. 直到 2000 年 Smith 等人基于 Pendry 的研究成果, 通过将细导线阵列与 SRR 阵列合理布局, 制造出异向介质, 并通过验证异向介质的双负特性^[6]和负折射特性^[7]最终肯定了异向介质存在, 才使得有关异向介质研究进入实质性阶段. 然而上述的异向介质存在带宽窄、损耗大以及结构单元电尺寸大的问题, 再加之结构单元自身的各向异性使得它几乎无用武之地. 针对这样的问题, 有很多学者在新型异向介质设计方面展开研究. 到目前为止, 已有多种结构的异向介质被设计、制造出来, 主要有传输线型异向介质^[8]、双螺旋结构异向介质^[9]、S 形和双 S 形异向介

质^[10, 11]等. 然而现有异向介质的性能仍然有待提高, 其中包括需要进一步拓宽带宽、降低损耗、减小结构单元体积, 这里指的主要是上述三方面性能能够同时得到改善, 而不是一味地追求提高某一项性能而不惜以其他性能的降低作为代价. 同时, 对于二维甚至是三维异向介质而言, 更需要加强异向介质结构单元自身的对称性, 从而保证异向介质各向同性, 使其具有广泛的应用前景.

本文针对上述问题展开研究, 利用三维电磁场仿真软件设计了一种工作在 C 波段的宽频带小单元二维各向同性异向介质, 其相对带宽达到 63.3%, 在中心频率上结构单元电尺寸仅为 0.095. 本工作通过分别仿真验证异向介质的双负特性和负折射特性来最终肯定上述异向介质的存在. 首先, 对由上述异向介质构成的二维半无限大异向介质平板的电波传播特性进行了数值仿真, 并结合 NRW (Nicolson-Ross-Weir) 方法提取了该异向介质平板的有效介电常数和有效磁导率, 计算结果表明, 在 4.1—7.9 GHz, 有效介电常数和有效磁导率的实部同时为负值. 然后, 在上述的异向介质频段内, 分别对由异向介质构成的 26.6° 和 45° 楔形棱镜进行了用来验证负折射特性的仿真实验, 仿真结果表明, 在 4.1—7.9 GHz 频段上, 两种棱镜实验中折射波束与入射波束均位于法线同侧, 即折射角为负, 从而使异向介质的负折射特性得到验证.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60571026), 电波环境特性及模化技术国家重点实验室项目(批准号: 514860303HT0101)资助的课题.

[†] E-mail: blade@hit.edu.cn

2. 二维各向同性异向介质构造

为了能够设计出性能优越的二维各向同性异向介质,本文首先选用文献[12]中提出的开口方环(split square ring resonator, SSRR)作为基本元素,并通过将两个 SSRR 相互正交地放置来形成二维各向同性异向介质单元——交叉开口方环(crossed split square ring resonator, CSSRR),如图 1 所示。在这里,SSRR 的结构尺寸与文献[12]相同,即 $a = b = 2.03 \text{ mm}$, $c = 0.05 \text{ mm}$, $d = 0.26 \text{ mm}$, $e = 0.13 \text{ mm}$,另外,裂缝宽度 0.13 mm ,采用的金属材料为铜。此时,一方面 SSRR 本身就是性能非常优良的一维异向介质单元,使得 CSSRR 完全有可能成为性能优良的二维异向介质单元,另一方面 CSSRR 具有自对称性,从而保证了由其构成的异向介质的二维各向同性。但需要注意的是,与文献[12]中一维结构相比,图 1 中平行于 XOY 平面(横向)的 SSRR 的引入势必会造成原 SSRR 在电波传播方向(纵向)上的电磁特性的改变,这种改变对异向介质性能造成的影响在结构设计之初是无法准确预料的,但却可以通过数值仿真的方法来确定。

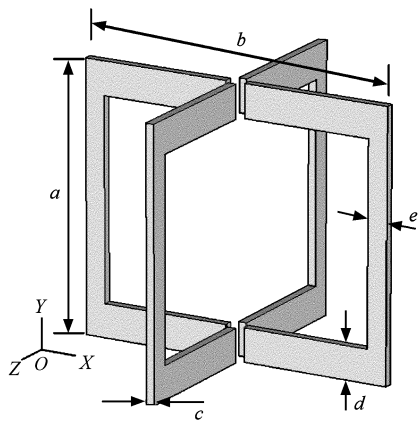


图 1 二维各向同性异向介质单元

在这种情况下,如图 2 所示的仿真模型在三维电磁场仿真软件 CST MWS 中被建立。仿真模型包括一个通过分别设立理想电壁(PEC)和对理想磁壁(PMC)对形成的二端口矩形波导;4 个 CSSRR 单元并列放置在波导中间,波导中填充相对介电常数为 4.4 的介质;在波导的每个端口上入射波均沿法向方向入射到波导中。在这种情况下,该模型能够对具有 4 个单元厚度的半无限大异向介质平板在垂直入

射电磁波照射下的传输和反射特性进行有效仿真。仿真得到的上述二端口波导的 S 参数幅度和相位随频率的变化曲线如图 3 所示。

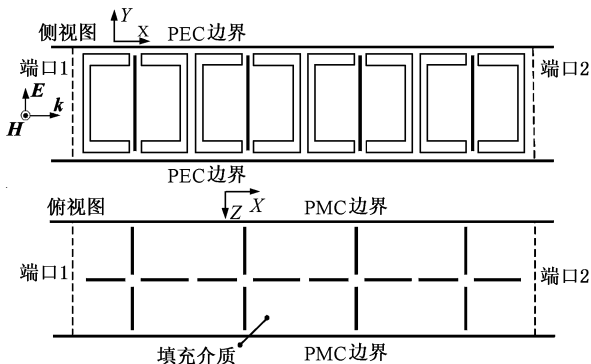


图 2 异向介质数值仿真模型结构

从图 3 可以看到:首先,这一组曲线与文献[12]中的一维异向介质平板的传输、反射特性曲线相比在总体趋势上相差不大,说明横向 SSRR 的引入并未对原 SSRR 在纵向上的电磁特性产生较大影响;其次,其通带性能良好,在 $4.1\text{—}7.9 \text{ GHz}$ (后面部分将证明异向介质工作在该频带)上 $|S_{21}| > -1.9 \text{ dB}$,这意味着平均每个结构单元的传输损耗小于 0.475 dB (文献[12]中为 1 dB)。当然,仅仅通过 S 参数还无法肯定异向介质存在,下面将通过分别观察异向介质的双负特性和负折射特性来证明异向介质的存在并确定其工作频带。

上述异向介质平板的有效介电常数和有效磁导率可以利用 NRW 方法从 S 参数中提取出来^[13],该方法在这种情况下适用性和正确性已在文献[12, 14]中得到充分证明。

图 5、6 分别给出了利用 NRW 方法计算得到的有效介电常数和有效磁导率的频率变化曲线,可以看到在 $4.1\text{—}7.9 \text{ GHz}$ 频带上有效介电常数和有效磁导率的实部同时为负值,虚部近似为零,这正是异向介质所特有的电磁特性,即双负特性。需要注意的是,此时的有效介电常数和有效磁导率变化趋势很相似,如果经过进一步计算还可以得到在 $4.1\text{—}7.9 \text{ GHz}$ 上有效介电常数与有效磁导率之比的算术平方根(有效波阻抗)平稳地分布在 $2.83\text{—}2.85$ 之间,而这与填充在 CSSRR 周围的均匀介质的波阻抗值 2.1 是较为接近的,由此可以认为正是这样宽频带范围内的阻抗匹配条件保证了由 CSSRR 构成的异向介质平板能够具有如图 3(a)所示的优良的通带特性。

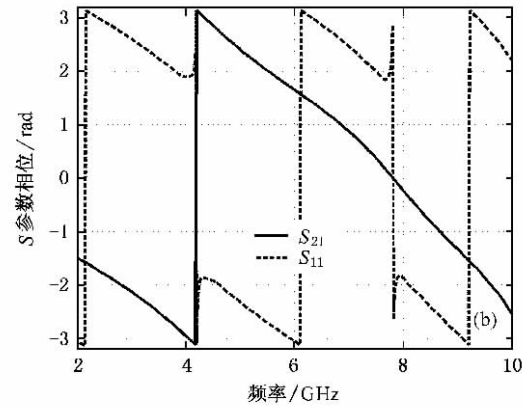
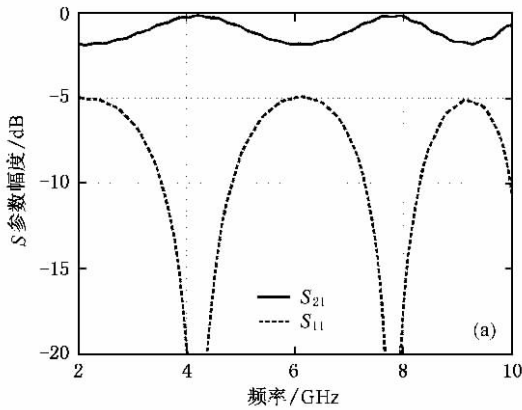


图3 异向介质平板的S参数幅度、相位曲线 (a) S参数幅度变化曲线 (b) S参数相位变化曲线

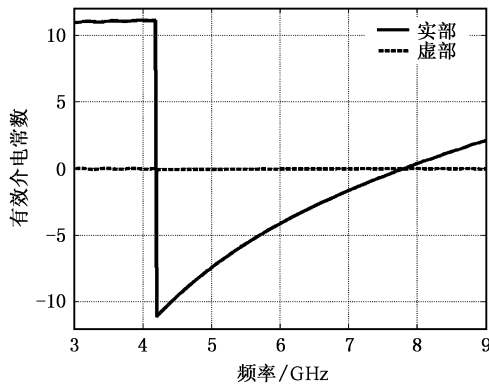


图4 有效介电常数随频率的变化曲线

3. 负折射特性的仿真验证

在本节 26.6° 、 45° 两种角度的异向介质楔形棱镜被用来进行负折射仿真实验,仿真结果表明在两种角度的楔形棱镜仿真实验中在 $4.1\text{--}7.9\text{ GHz}$ 频段上均观测到负折射现象,即入射波束与折射波束位于法线同侧.

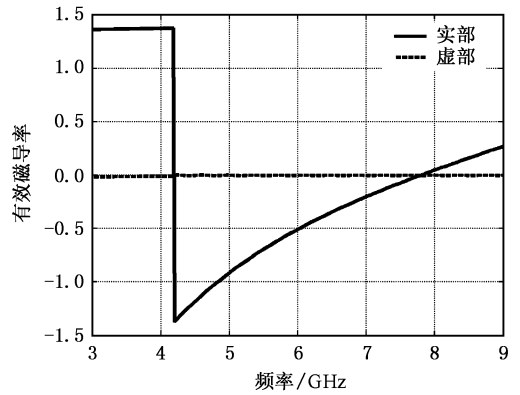


图5 有效磁导率随频率的变化曲线

仿真模型如图6所示,CSSRR被以阶梯形式放置在平行于XZ平面的两块金属平板中间,而这两块金属板间的其他地方则填充介电常数为4.4的均匀介质,此时CSSRR与图1中所示保持相同的姿态,并且沿Y方向每放置一个CSSRR,则沿X方向放置两个,这样就形成了一个具有 26.6° 角的楔形棱镜.另外,平行于Y轴的4个端面均被设置成理想匹配层(PML)边界,这样就可以保证不会由于边界的反射而影响实验的结果.电场极化方向为Y方向的均匀平面波由标有“1”的端口沿Z方向入射,它将通过由CSSRR构成的楔形块,并在楔形块与周围均匀介质的交界面处发生折射与反射,被折射和反射的电磁波将在PML边界处被吸收,在这种情况下就可以通过电场能量在空间上的分布来判断由“1”端口入射的电磁波在楔形块的作用下是发生了正折射(入射波束与折射波束位于法线两侧)还是负折射(入射波束与折射波束位于法线同侧).

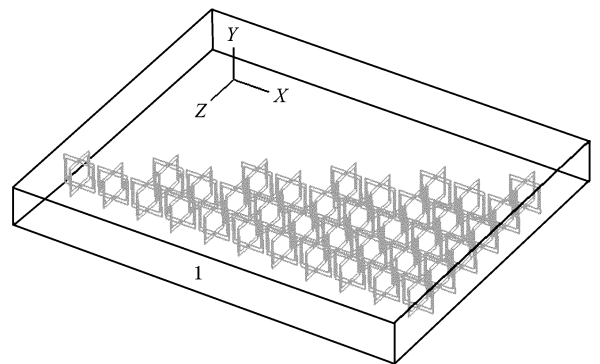


图6 26.6° 棱镜负折射仿真实验结构图

图7给出了在上述仿真实验中分别在 4 GHz 和 7.5 GHz 频率上电场分布的等高线图,其中粗实线

代表波束，细虚线为均匀介质与楔形块交界面的法线。从图 7(a)中可以看出，在 4 GHz 时为正折射，入射波束与折射波束位于法线两侧；而从图 7(b)，(c)(d)可以看出，在 5 GHz、6 GHz、7.5 GHz 时存在明显的负折射，即入射波束与折射波束位于法线同

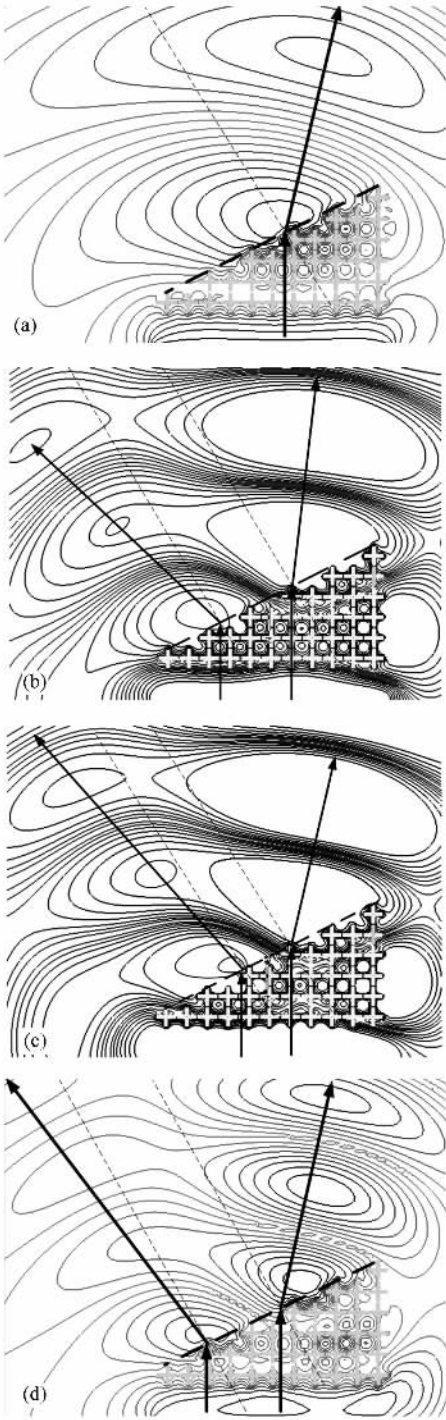


图 7 26.6°楔形棱镜折射实验电场分布 (a)4 GHz (b)5 GHz ; (c)6 GHz (d)7.5 GHz

侧，另外，还应注意的，在出现负折射的同时仍然存在较强的沿正折射方向的“漏波”，这一现象在图 7(d)中表现得尤为明显，这是由于一方面 CSSRR 的尺寸还没有达到远远小于工作波长的要求，在 7.5 GHz 时大约为十分之一个工作波长，从而使得由其构成的异向介质不够“均匀”和“致密”，类似一种稀疏多孔的结构；另一方面，上述的不均匀性在楔形块的斜面上表现得尤为突出，从而使得电磁波在这样的斜面上并不能完全根据理想均匀介质的折射定律进行折射和反射，而是有相当一部电磁能量在 CSSRR 复杂的寄生参量影响下最终以“漏波”或是散射波的形式在斜面上泄漏或是散射出去。

图 8 给出了 45°楔形棱镜仿真实验中分别在 7.5 和 9 GHz 频率上电场分布的等高线图。从图中可以看到，在 7.5 GHz 时，入射波束与折射波束位于法线同侧，即发生负折射，而在 9 GHz 时，入射波束与折射波束位于法线两侧，即发生正折射，但需要注意的是，此时的入射角大于折射角，即此时楔形块的折射系数小于周围介质的折射系数 2.1，而这样的结论正好与图 5 的结果相符。

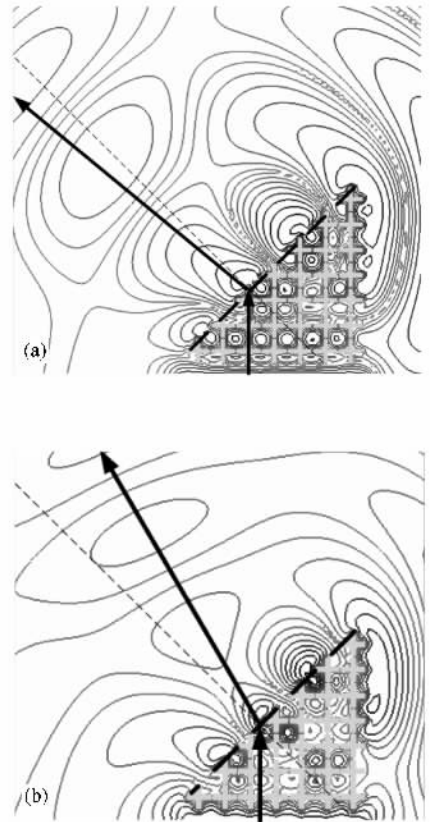


图 8 45°楔形棱镜折射实验电场分布 (a)7.5GHz (b)9 GHz

4. 结 论

本文设计了一种工作在 4.1—7.9 GHz, 相对带宽达到 63.3%、中心频率上结构单元电尺寸为 0.067 的 C 波段二维各向同性异向介质. 表 1 比较了目前几种主要的二维异向介质的性能, 可以看出本文提出的异向介质在带宽、均匀性(结构单元体积)和对称性方面均具有一定的优势. 本文分别利用 NRW 方法和棱镜折射仿真实验的方法对文中异向介质的双负特性和负折射特性进行了仿真验证, 结果表明在双负特性存在的频段负折射特性也相应地

表现出来, 而在其他频段只能观察到普通的正折射现象, 从而最终肯定了本文提出的异向介质的客观存在性. 本文提出的异向介质由于其优越的电磁性能使得现有异向介质可望在短时期实现实用化, 同时, 其设计方法也对进一步设计性能更为优良的异向介质具有指导意义.

表 1 几种主要的二维异向介质相对带宽、电尺寸比较

结构	双螺旋结构 ^[9]	双 S 结构 ^[10]	SRR/Rods ^[15]	CSSRR 结构
相对带宽/%	13.3	46	12.2	63.3
中心频率电尺寸	0.13	0.12	0.16	0.095
结构单元自对称性	不具备	不具备	不具备	具备

- [1] Zhuang F, Shen J Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 955 (in Chinese)
[庄 飞、沈建其 2005 物理学报 **54** 955]
- [2] Pendry J B 2004 *Science* **306** 1353
- [3] Luo C R, Kang L, Zhao Q, Fu Q H, Song J, Zhao X P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣、康 雷、赵 乾、付全红、宋 娟、赵晓鹏 2005 物理学报 **54** 1607]
- [4] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H 2004 *Acta Phys. Sinica.* **53** 2206 (in Chinese) [赵 乾、赵晓鹏、康 雷、张富利、刘亚红等 2004 物理学报 **53** 2206]
- [5] Veselago V G 1968 *Soviet Physics Usp.* **10** 509
- [6] Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
- [7] Shelby R A, Smith D R, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2001 *App. Phys. Lett.* **78** 489
- [8] Caloz C, Itoh T 2002 *IEEE Ante. Prop. Soci. Int. Symp.* **2** 412

- [9] Lagarkov A N, Semenenko V N, Kisel V N, Chistyayev V A 2003 *J. Magn. Magn. Mat.* **161** 258
- [10] Chen H, Ran L, Huangfu J, Zhang X, Chen K, Grzegorzczak T M, Kong J A 2005 *App. Phys. Lett.* **86** 1
- [11] Chen H, Ran L, Huangfu J, Zhang X, Chen K, Grzegorzczak T M, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [12] Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2185 (in Chinese) [孟繁义、吴 群、吴 健等 2006 物理学报 **55** 2185]
- [13] Ziolkowski R W 2003 *IEEE Trans. Ante. Prop.* **51** 1516
- [14] Meng F Y, Wu Q, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2194 (in Chinese) [孟繁义、吴 群、吴 健 2006 物理学报 **55** 2194]
- [15] Smith D R, Rye P, Vier D C, Starr A F, Mock J J, Perram T 2004 *IEICE Trans. Electronics E* **87** C 359

Numerical verification of the NIR features for 2-D isotropic LHM^{*}

Meng Fan-Yi^{1)†} Wu Qun¹⁾ Jin Bo-Shi¹⁾ Wang Hai-Long¹⁾ Wu Jian¹⁾²⁾

1) *School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*

2) *National key Laboratory of Electromagnetic Environment, Beijing 102206, China*

(Received 16 January 2006 ; revised manuscript received 18 March 2006)

Abstract

A 2-D isotropic left-handed metamaterial (LHM) in C band with broad bandwidth and low loss is designed. The size of its unit cell is much smaller and configuration of its unit cell is symmetrical compared with previous LHM. The double negative (DNG) feature and the negative index of refraction (NIR) feature are verified by numerical simulation to prove the existence of the LHM. The numerical results show that the DNG and NIR phenomenon appear simultaneously as predicted.

Keywords : isotropic LHM , broad band , miniaturized unit cell , DNG feature

PACC : 3220D , 4110H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60571026) , and Fund for the National Key Laboratory of Electromagnetic Environment (Grant No. 5148603003HT0101) .

[†] E-mail : blade@hit.edu.cn