

光波段多频负折射率超材料^{*}

汤世伟 朱卫仁 赵晓鹏[†]

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)
(2008 年 7 月 14 日收到, 2008 年 9 月 2 日收到修改稿)

从光波段圆孔形双鱼网结构的负折射材料模型出发, 采用基于有限积分技术的 CST 软件系统研究了原胞结构的改变对负折射行为的影响. 数值仿真结果表明, 对原胞结构做微小调节也可获得负折射率频带的增大效应. 将双鱼网结构改为阶梯形孔洞和半球形孔洞结构, 可以在更多的频段里出现负折射率, 并且谐振频率发生了一定的红移. 半球形孔洞的双鱼网结构可以方便地用化学模板法制备, 这为从实验上实现红外及可见光波段的多频负折射材料提供了一种简单可行的方法.

关键词: 负折射率, 多频段, 双鱼网结构

PACC: 4270Y, 6170E, 2570E

1. 引 言

介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是描述介质电磁特性最基本的两个物理量. 1968 年, Veselago 从电磁场理论出发, 预言了 ϵ 和 μ 同时为负并不违反基本的物理原理, 并将这种材料定义为左手材料 (left-handed metamaterials, LHMs)^[1]. 2001 年, Smith 等人将开口谐振环 (split ring resonators, SRRs) 阵列和金属杆阵列组合在一起, 在微波频段第一次从实验上制备出左手材料^[2], 从而引起人们对左手材料的广泛关注. 左手材料表现出许多奇异的电磁特性, 如负折射现象^[3], 反常 Cherenkov 辐射^[4] 和完美透镜效应^[5]. 目前, 左手材料已经在微波、毫米波、THz 波、红外以及可见光波段被证实^[6-10]. 红外、可见光波段左手材料的结构模型有纳米棒对阵列和双鱼网结构等^[11-13], 其中双鱼网结构引起了广泛的研究.

在光子晶体中引入缺陷, 光子带隙中将生成缺陷模, 使原本处于带隙中的某些频率的光被允许存在, 从而产生许多奇特的性质^[14, 15]. 同样, 在左手材料中引入缺陷, 会破坏材料的周期性单元结构, 从而改变其电磁特性^[16-18]. Zhao 等^[19] 的研究表明引入 SRRs 缺陷会引起左手材料的左手效应的减弱, 并使得左手频段展宽. Zhao 等^[20], Zhu 等^[21] 发现 SRRs 和

杆之间一定程度上的位错可以使左手材料从单频变成双频. Zhu 等^[22] 设计了具有不同单元尺寸的左手材料, 获得了多频段的负折射率材料. 在周期性的左手材料中引入缺陷, 调控左手材料的电磁特性, 对左手材料的设计有重要的指导意义.

本文研究了圆孔形双鱼网结构负折射材料, 仿真结果发现对原胞结构做微小调节可以展宽负折射的频段. 进一步, 我们提出了阶梯形孔洞的双鱼网结构, 可以在多个频段同时实现负折射. Liu 等^[8] 提出了一种用聚合物微球胶体晶体为模板的方法来制备周期性的半球形纳米孔洞, 这种方法可以用来制备半球形孔洞的双鱼网结构. 与阶梯形孔洞的双鱼网结构相似, 我们的研究发现半球形孔洞的双鱼网结构可以在更宽的连续频段实现负折射.

2. 数值仿真

数值仿真采用基于有限差分技术的 CST Microwave Studio 软件. 对于双鱼网结构中, 我们选取金属为银, 金属银的介电常数在光波段符合自由电子德鲁特 (Drude) 模型, 其中银的等离子频率选取为 $\omega_p = 13.7 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$, 电子碰撞频率满足文献 [23]. 介质基板选取为 MgF_2 , 其介电常数为 1.9. 仿真采用周期性边界条件, 模拟平面波的激励, 计算反射和透射

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50632030), 国家重点基础研究发展计划(批准号 2004CB719805), 航空科学基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

参数.

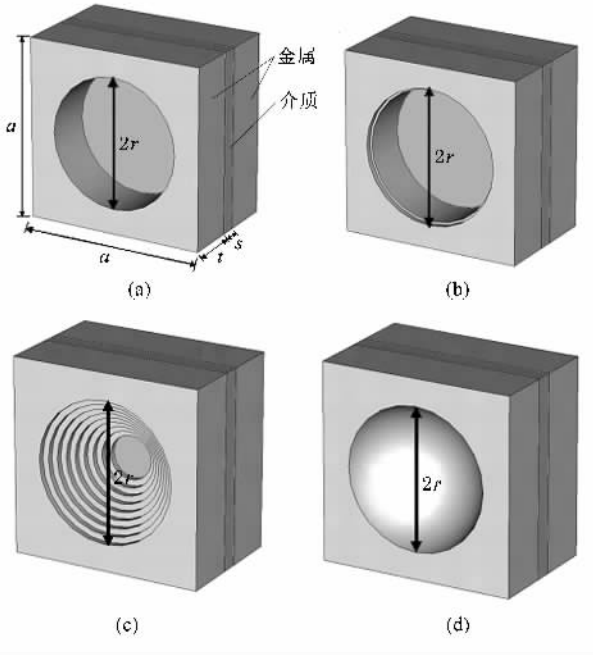


图 1 (a)圆孔状双鱼网结构 (b)对原胞结构做微小调节的双鱼网结构 (c)阶梯形双鱼网结构 (d)半球形双鱼网结构

我们参照文献 [9,10] 设计了一种圆形孔状的双鱼网结构(结构 1),这种结构单元(图 1(a))是在双层对称的银膜上打圆柱形的孔洞得到,金属银的厚度为 $t = 45 \text{ nm}$,单元晶格常数 $a = 160 \text{ nm}$,介质的厚度为 $s = 15 \text{ nm}$,圆柱形孔洞的半径为 $r = 58 \text{ nm}$.我们对圆柱形孔洞做微小调节(结构 2),如图 1(b)所示,在靠近银膜外表面的圆柱半径略微变大一点, $r = 60 \text{ nm}$,其他的参数都不变.进一步,我们将圆孔形双鱼网结构改造成图 1(c)所示阶梯形孔状的双鱼网结构(结构 3),这种结构的参数和图 1(a)中的一样, $r = 58 \text{ nm}$,只是原来的圆柱形孔洞变成阶梯形孔洞.再进一步,我们设计了图 1(d)所示的半径为 $r = 58 \text{ nm}$ 的半球形孔洞的双鱼网结构(结构 4),其他结构参数仍和图 1(a)所示的模型一样.

3. 结果与讨论

3.1. 改变原胞结构对负折射率的影响

我们对结构 1 和结构 2 进行了仿真,得到反射和透射曲线.根据散射参量法^[15]计算获得材料的折射率.两种结构的折射率曲线如图 2(a),2(b)所示.可以看到当电磁波垂直入到样品表面时,结构 1 在

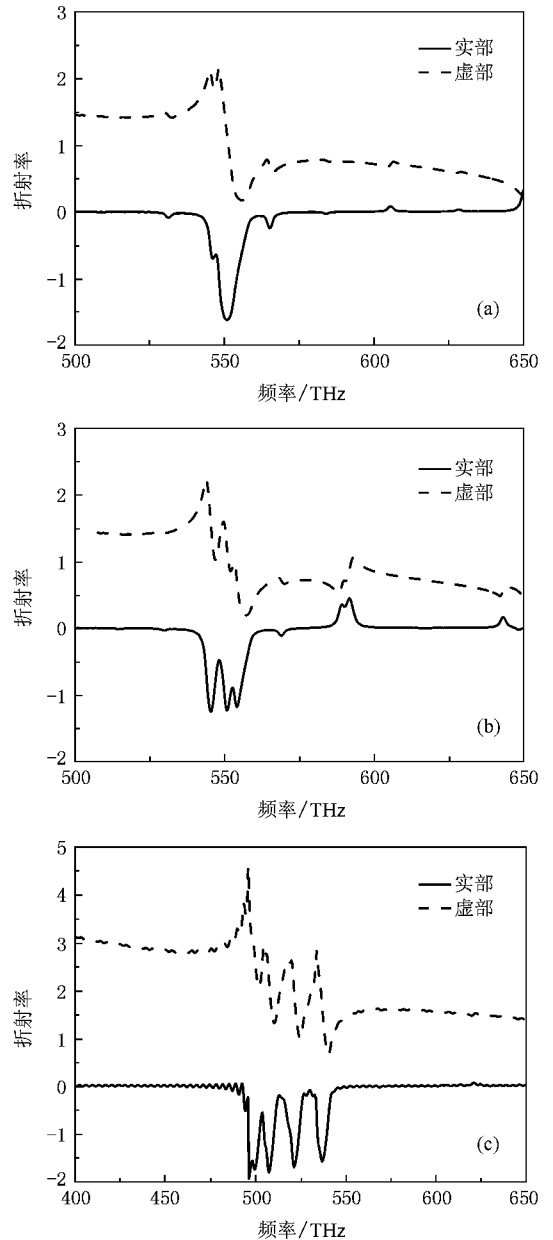


图 2 (a)结构 1 的折射率曲线 (b)结构 2 的折射率曲线 (c)结构 3 的折射率曲线

500 THz 附近出现了负折射.对于结构 2,我们发现在 500 THz 附近,原来单频段负折射率材料变为多频段,负折射的频段被展宽.

利用同样的方法,我们得到了结构 3(图 2(c))的折射率曲线.从图可以看出,与结构 1 和结构 2 相比,这种结构可以在更多的频段出现负折射率,负折射频段进一步展宽,并且谐振频率发生了明显的红移.以上结果表明,改变原胞结构,使双鱼网结构的孔洞具有不同的半径,分别对应不同的谐振,是产生多频段负折射的主要原因.我们将阶梯形孔洞的阶

梯数增加,可以使出现负折射的频段变得更多更密.当阶梯形孔洞的阶梯数趋向无限时,相当于图 2(d)所示的半球形孔洞,这种双鱼网结构(结构 4)可以在一个较宽的频段实现连续的负折射.

3.2. 改变原胞结构对损耗特性的影响

目前,反映负折射材料的损耗特性一般用 FOM 表示, FOM 定义为折射率的实部与虚部的比值的相

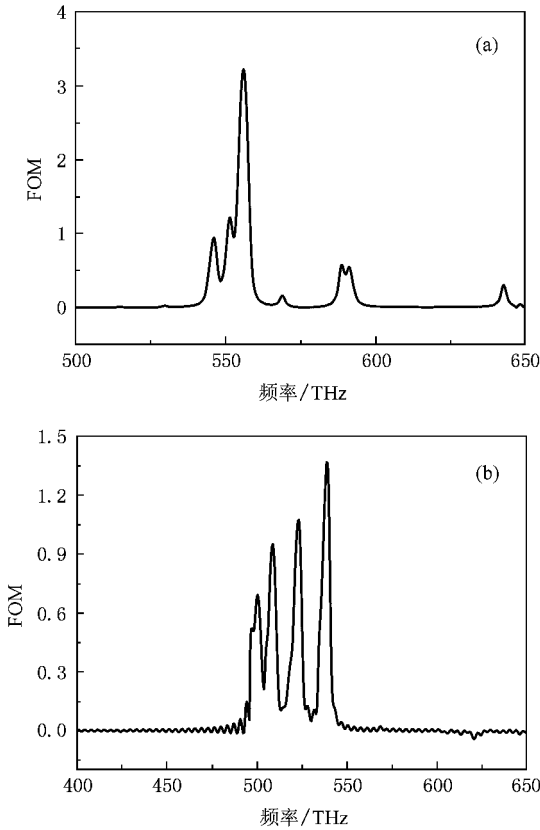


图 3 (a) 结构 2 的 FOM 值 (b) 结构 3 的 FOM 值

反数,即 $FOM = -\text{Re}(n)/\text{Im}(n)^{24}$, FOM 越大,则材料的损耗越小,负折射的特性就越好.我们计算了上述结构 2 和结构 3 特性参数 FOM.从图 3(a)可以看出,结构 2 在其谐振频率附近的 FOM 值达到了 3.2,远大于其他频率处的 FOM 值,所以在实际测量时,由于测量精度的限制可能只测量到一个透射峰.在实际制备圆形孔状双鱼网结构的样品时,不可避免地会有一些小的缺陷,从我们模拟的结果来看,在测量样品透射时还是只有一个透射峰.而阶梯形孔状的双鱼网结构(结构 3)的 FOM 值在多个频率处出现较大的值(图 3(b)),表明这种结构可以得到多个分立的透射峰.

4. 结 论

本文利用数值仿真方法研究了改变原胞结构对双鱼网结构左手材料负折射行为的影响.我们首先设计了谐振频率在 500 THz 附近的圆形孔状双鱼网结构,在此基础上将银膜外表面的圆柱半径略微变大,结果显示当在圆形孔状双鱼网结构中对原胞结构做微小调节,负折射频段从单频变为多频,出现负折射的频段被展宽.将双鱼网结构改为阶梯形孔洞的双鱼网结构,这种结构可以在更多的频段里出现负折射率,频段进一步展宽,从特性参数 FOM 可以看出其可以出现多个透射峰.这些结果表明改变双鱼网结构左手材料的原胞结构,形成新的谐振条件,从而导致材料负折射率的变化,实现了对负折射材料折射率的调控.我们设计的半球形孔洞的双鱼网结构可以方便地用化学模板法制备,为光波段的负折射材料的设计提出了新的思路和方法.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Shelby R, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [3] Houck A A, Brock J B, Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [4] Parazzoli C G, Gregor R B, Li K, Koltenbah B E C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401
- [5] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [6] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [7] 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
- [8] Liu H, Zhao X P, Yang Y, Li Q W, Lv J 2008 *Adv. Mater.* **18** 2050
- [9] Zhang S, Fan W, Minhas B K, Frauenglass A, Malloy K J, Brueck S R J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 137404
- [10] Dolling G, Wegener M, Soukoulis C M, Linden S 2007 *Opt. Lett.* **32** 53
- [11] Shalaev V M 2006 *Nature Photon.* **1** 41
- [12] Soukoulis C M, Linden S, Wegener M 2007 *Science* **315** 47
- [13] Busch K, Freymann G, Linden S, Mingaleev S, Tkeshelashvili L, Wegener M 2007 *Phys. Rep.* **44** 101
- [14] Jiang H, Chert H, Li H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5386
- [15] Povinelli M L, Johnson S G, Joannopoulos J D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1069

- [16] 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]
- [17] 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]
- [18] Zheng Q , Zhao X P , Li M M , Zhao J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6641 (in Chinese) [郑 晴、赵晓鹏、李明明、赵 晶 2006 物理学报 **55** 6641]
- [19] Zhao X P , Zhao Q , Kang L , Song J , Fu Q H 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [20] Zhao X P , Zhao Q , Zhang F L , Zhao W , Liu Y H 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 99
- [21] Zhu W R , Zhao X P , Ji N 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 011911
- [22] Zhu W R , Zhao X P , Guo J Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241116
- [23] Johnson P B , Christy R W 1972 *Phys. Rev. B* **6** 4370
- [24] Dolling G , Enkrich C , Wegener M , Soukoulis C M , Linden S 2006 *Opt. Lett.* **31** 1800

Multiband negative index metamaterials at optical frequencies^{*}

Tang Shi-Wei Zhu Wei-Ren Zhao Xiao-Peng[†]

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

(Received 14 July 2008 ; revised manuscript received 2 September 2008)

Abstract

Based on the fishnet negative index metamaterials (NIMs) of circular-shaped holes operating at optical frequencies , the influence of modifying the hole shape is studied using the commercial software package CST Microwave studio. Numerical simulations show that , even a tiny modification may lead to broadening of the negative refractive band. So we designed two fishnet NIMs of the gradient holes and half-global holes. Compared with the fishnet NIMs of circular-shaped holes , these two structures can realize negative refraction at multi-frequency bands , and the resonance frequencies exhibit an obvious red-shift. We present a chemical technique for preparing the fishnet NIMs of half-global holes , which is a simple and feasible way to realize multiband negative index metamaterials at optical frequencies.

Keywords : negative refraction , multi-band , fishnet structure

PACC : 4270Y , 6170E , 2570E

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

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