

手性负折射率材料的最新进展

贾秀丽*, 王晓鸥, 周忠祥, 孟庆鑫
(哈尔滨工业大学理学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 阐述了手性负折射率现象的产生机制;总结了近几年国内外手性负折射率材料在仿真模拟和实验制备方面的研究进展;分析了手性负折射率材料的旋光性、手性参数、损耗等;介绍了手性负折射率材料在各个领域的应用。分析认为,探索手性负折射率材料的新机制、新方法和新材料,从而在可见光波段实现负折射率是未来手性负折射率材料的重要发展方向之一。

关键词: 负折射率材料;手性;旋光性;手性参数;损耗

中图分类号:TB34 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150804.0548

Latest progress on chiral negative refractive index metamaterials

JIA Xiu-li*, WANG Xiao-ou, ZHOU Zhong-xiang, MENG Qing-xin
(School of Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

* Corresponding author, E-mail: jiaxiuli_hit@163.com

Abstract: In this paper, we describe the mechanism of chiral negative refraction phenomenon, and summarize the research progress on simulations and experiments of metamaterial in recent years. Meanwhile, we analysis the optical activity, chiral parameters, losses and so on, and introduce the applications of chiral negative refraction materials in various fields. According to the analysis, we believe that it is one of important development directions for chiral negative refractive index materials to explore new mechanism, new methods and new materials, so as to achieve negative refraction in visible range in the future.

Key words: negative refractive index metamaterials; chirality; optical activity; chiral parameters; loss

1 引言

负折射率材料是在某一频段下折射率为负的新型超材料,这种材料源于1967年V. G. Veselago^[1]提出的假设,他预测在同时具有负介电常数和负磁导率的介质(又称双负型负折射率材料)中,电磁波矢量方向(相位的传播方向)与能量传播方向相反,电场 E 、磁场 H 、波矢 k 形成左手规则(又称左手材料),介质的折射率为负,这并不违背折射定律。

电磁波在负折射率材料中传播具有与常规材料不同的一些性质,常见的有:负折射效应及其隐身特性、逆多普勒效应^[2]、逆契柯夫辐射、负古斯-汉斯位移、完美透镜成像^[3-4]、后向波等。依据这些特殊性质,负折射率材料具有广泛的应用,例如军用雷达、天线技术^[5-7]、通信系统及器件、隐身技术^[8]、超灵敏军事探测、微波器件、生物安全成像、生物分子指纹识别、遥感、恶劣天气条件下的导航、微型谐振腔等方面。

实现负折射率的方法有很多,如双负型负折射率材料、光子晶体负折射率材料、手性负折射率材料等。其中具有渔网结构的双负型负折射率材料已经在可见光频段观察到负折射效应^[9],该渔网结构单元尺度在150 nm左右,在波长690 ~ 730 nm范围折射率可达-0.8。双负型负折射率材料要求在同一频带下同时实现负介电常数和负磁导率,故可实现负折射率的频带少,带宽窄,且共振带来巨大的损耗。减少损耗的方法并非简单的减小单元结构就能够实现,特别是在红外和可见光这样的高频区域,金属材料对光波传输的损耗尤为强烈,这些缺点大大制约了双负型负折射率材料的发展和应用^[10-11]。光子晶体负折射率材料的重要特性就是具有光子带隙(又称光子禁带)^[12],光子晶体负折射率材料器件具有体积小、寿命长、易于集成化等优点,得到了广泛的应用研究^[13]。虽然光子晶体负折射率材料有诸多优点,但是由于光子晶体对对称性和周期性要求都很高,轻微的不对称就会使光子带隙消失,所以在实验室中制备光子晶体负折射率材料非常困难。

2004年,Pendry首次提出利用手性介质实现

负折射率的方法^[14],将厚0.1 mm的金属片按倾斜角为 5° ,半径为5 mm,卷曲10匝形成“瑞士卷(Swiss roll)”结构,该手性结构能够在100 MHz实现负折射率,这种手性结构产生负折射率的机制源于结构本身的自感和相邻金属薄片之间的电容,当电流沿螺旋结构传输时,不仅可以产生磁极化,金属层之间的平行电流还可以产生电极化。与双负型负折射率材料形成机制不同,对于手性介质,当电磁波入射时除了自极化外还会产生交叉极化,即电场不仅可以实现手性介质的电极化,而且能够引起磁化,因此具有较强的旋光性。研究表明对于手性介质的有效折射率 $n_{\pm} = \sqrt{em} \cdot k$ (“ \pm ”对应右旋圆偏振波RCP和左旋圆偏振波LCP),无论介电常数和磁导率是否为负,只要当手性参数足够大时即可实现负折射率现象,因此,利用手性介质实现负折射率条件相对简单,且损耗小。手性介质避免了共振所带来的损耗,是实现可见光频率区域负折射率材料的一种有效方法,而且理论研究还表明,手性负折射率材料平板可实现圆极化波的亚波长聚焦,人们已经提出了手性负折射率材料的许多潜在应用,如波导、极化旋转器、天线等^[15]。

2 国内外手性负折射率材料的进展

2.1 传统手性结构的新进展

传统的手性负折射率材料结构有“十”字型结构^[16]、“卍”型结构^[17]、“旋转玫瑰”型结构^[18]、“U”型结构^[19]等。2012年,G. Kenanakis等人^[20]利用已有5种手性结构,通过改变材料和几何参数将微波段手性负折射率材料延伸到太赫兹波段,反演得到的等效折射率和手性参数如图1所示。在仿真频率范围内,5种结构分别出现单频(图1(a))、双频(图1(d))和多频(图1(b)、(c)、(e))负折射率现象。近年来,通过结构和材料选择的优化使这些传统结构得到了一定的发展,如2012年,Li等人^[21]在传统“旋转玫瑰”结构基础上与“田”字形金属线结合实现了负折射率,如图2(a)所示,其中手性结构部分(“旋转玫瑰”)在响应频带获得较大手性参数和介电常数,可实现负折射率,而金属线部分(“田”)能够对响

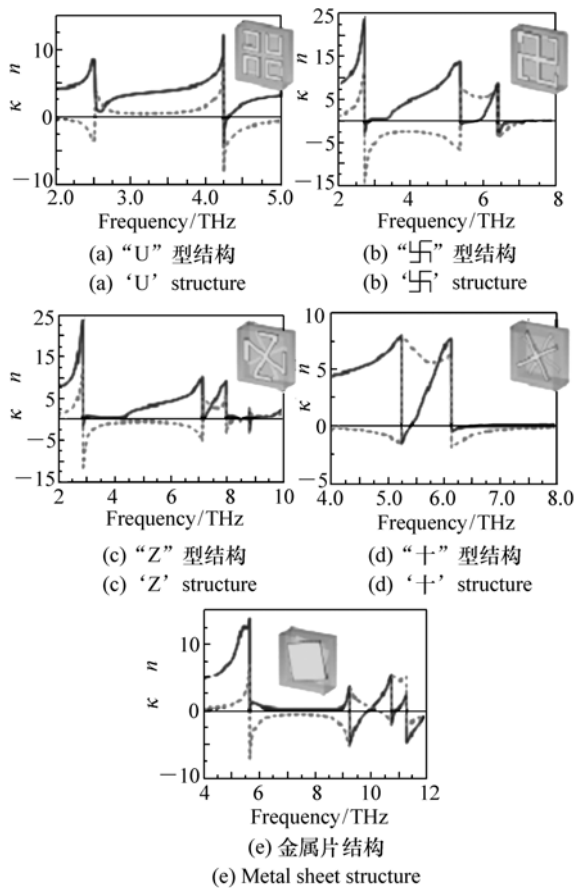


图1 5种手性结构

Fig. 1 Five kinds of chiral structure

应起到加强作用,即使在响应频率附近也能得到负折射率,因此加宽了负折射率频带。通过仿真和实验显示,该结构具有很高的品质因数($FOM = |\text{Re}(n)|/|\text{Im}(n)|$,即材料对光波传输的损耗),其中RCP在5.36~5.58 GHz品质因数达到50,LCP在5.13~5.29 GHz品质因数达到18,证明该结构对光波传输的损失非常小。高的品质因数在负折射率材料的设计中非常重要,尤其是在红外和可见光波段,品质因数越大损耗越低,越有可能实现高频区域负折射率材料。2010年,Zhao等人^[22]研究了双层4“U”型开口谐振环结构,上下两层结构旋转角为 90° 。实验结果表明,此结构具有很好的旋光性和圆二色性,在谐振频率为5.1和6.3 GHz处,RCP和LCP的透射谱有明显的差别,在5.1 GHz附近LCP的透射谱要比RCP的透射谱大7~8 dB,而在6.3 GHz附近,RCP的透射谱要比LCP的透射谱大3~4 dB,并得到了

实验验证。2013年,Liu等人^[23]采用Babinet原理设计了一种新型互补“U”型孔洞手性负折射率材料,如图2(b)所示,金属选用Au,电介质采用聚酰亚胺,这两种材料对光波损耗小,是目前在红外和可见光波段实现负折射率最为常用的材料。仿真模拟显示该结构在140~300 THz红外波段通过调节“U”型孔洞的宽度实现了负折射率,说明负折射率的大小依赖于结构尺寸具有可调性,同时具有较强的旋光性,该结构在光学器件方面有很广泛的潜在应用。

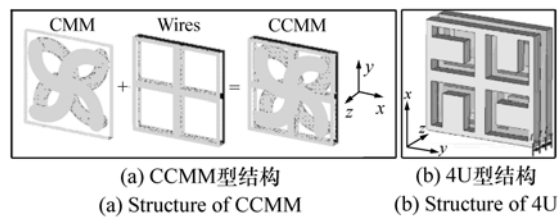


图2 传统手性结构的新进展

Fig. 2 New developments in conventional chiral structure

2.2 新型手性结构的进展

目前,研究者设计实现的新型手性结构负折射率材料很多,具有代表性的有:2012年Song等人^[24]设计的带开口“田”字型结构,如图3(a)所示,该结构能使较宽范围入射角的电磁波实现了 90° 的极化旋转,这种结构旋光性非常强,旋光角可达 $3400^\circ/\lambda$ 。通过仿真和实验得到的电磁场的分布情况可知,该结构的巨大旋光性来自于电偶极子和磁偶极子的交叉极化;2012年,W. Panpradit等人^[25]在微波段实现了高品质因数大负折射率的手性负折射率材料,该材料由双层共轭“ C_8 ”手性平面结构组成,如图3(b)所示,通过改变“ C_8 ”结构的弯曲角以及双层“ C_8 ”之间的旋转角等几何结构参数得到较大的手性,并在微波频段实现高负折射率,负折射率在-170左右;2013年,Xu等人^[26]采用扭曲的希尔伯特手性结构(Hilbert-shaped)制造了X波段(8~12 GHz)双频段圆极化波起偏器,如图3(c)所示,该结构比传统四重对称性结构(C_4)对极化敏感,产生手性参数很大,可在多个频带间实现共极化和交叉计划的转变,且线性极化波转化为圆极化波效率很高,同时具有大于20 dB的极化偏振消光比,在多功

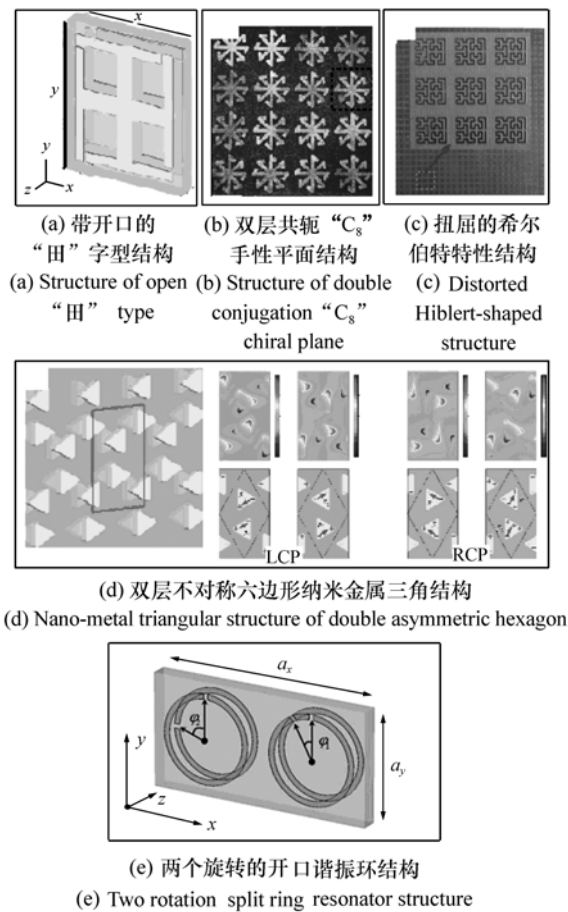


图 3 新型手性结构
Fig. 3 New chiral structures

能设备上有重要应用。2013 年, M. Giloon 等人^[27]仿真了双层不对称六边形排布的纳米金属三角结构,如图 3(d)所示,该结构的响应机制来源于手性对等离子体杂交模式的敏感,手性参数在对称和反对称等离子体模式中得到提高,使得 LCP 在 340 THz、RCP 在 380 THz 附近出现负折射率($n = -4$),从给出的 LCP、RCP 在响应频率下的电场分布情况看,同一平面内的两个三角金属片形成平行电偶极子,而上下两层的三角金属片则形成反平行电偶极子。2014 年, Li 等人^[28]设计了两个旋转的开口谐振环结构(一对夹角为 45° ,另一对夹角为 90°),如图 3(e)所示,仿真和实验显示 RCP 在 7.9 和 8.9 GHz、LCP 在 9.95 和 10.9 GHz 具有较强的旋光性,且响应频率对旋转角 φ 很敏感,通过调节 φ 可以很容易实现多频带的可调手性负折射率材料。

综合上面的文献可见,目前手性负折射率材料的研究工作已经涵盖仿真、制备和器件设计等方面,其中制备方法包括光刻技术、打印技术、光纤拉丝技术、模版沉积技术等微纳米加工技术^[29]。这些技术各有优缺点,打印和光纤拉丝技术不用掩模板或模版,制作过程得到简化,但是光纤拉丝技术受最小制作尺寸限制,高频区域负折射率材料的单元结构尺寸在纳米量级,所以光纤拉丝技术无法制作高频区域负折射率材料。模版沉积技术不需要光刻胶,制备过程简单,材料质量较其他方法有所提高,但是沉积过程会造成模版污染。目前二维平面负折射率材料多采用光刻技术。此外,多层光刻技术是制备三维立体负折射率材料的主要方法。但鉴于现有的实验条件、金属的趋肤深度和损耗等影响,目前在实验室中只能够制造出微波频段毫米量级的手性负折射率材料^[27-30]。

更高波段手性负折射率材料也不断被设计制作出来,2009 年, Shuang Zhang 在《PHYSICAL REVIEW LETTERS》上发表文章指出:采用手性微型电感电容(LC)谐振电路可以在 THz 波段实现负折射率^[31],该手性谐振器如图 4 所示,其中,图 4(a)是金制谐振器结构图(尺寸在 μm 量级;图 4(b)是手性谐振器等效 LC 谐振电路;图 4(c)

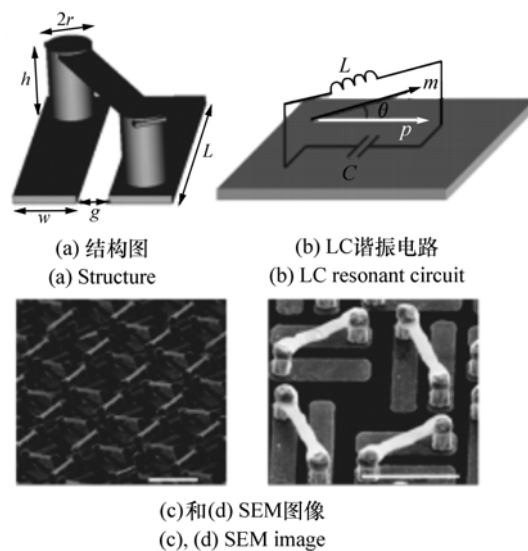


图 4 手性谐振器
Fig. 4 Chiral resonator

和 4(d)是在一定倾斜角度下 SEM 图像,该结构在 1~1.2 THz 之间左旋圆极化波存在一个负折射率频带。

3 可调谐手性负折射率材料

在实际应用中,双频、多频电磁超材料具有广泛的应用前景,如多频吸波器、多频工作的微波毫米波器件以及多模多频通信射频集成电路等,因此设计研制双频、多频已成为目前超材料研究重要方向之一。虽然手性结构负折射率材料与双负型负折射率材料相比能够实现上述双频、多频特性,但是其工作频段依旧相对较窄且不能调节,这极大地限制了电磁超材料的实际应用。初期,通过调节单元结构尺寸和材料可以实现对工作频率的调节,但是这种调节是非动态的^[32],因此,为了实现动态可调谐的多频电磁超材料,国内外众多学者提出了许多改进方法,如基于液晶、亚铁磁性材料、变容二极管、超导材料、结构位移等连续可

调谐的电磁超材料^[33]。2012 年, Jiangfeng Zhou 等人在《PHYSICAL REVIEW B》上发表文章指出采用飞秒脉冲激光激励硅基底"卐"字形手性负折射率材料(如图 5(a)所示)来提高材料的传输和旋光性,并降低了极化失真,如图 5(b)所示。同时,通过脉冲激光的激励,硅基底的传导系数增加抑制了结构材料的谐振响应,使手性减小,折射率从负变为正,如图 5(c)所示,同时不同的手性结构尺寸下可调谐范围也在变化,如图 5(d)所示,该种可调谐手性负折射率材料可以应用于超快速开关、频率调节器、相位调节器、记忆装置、电化学开关和主动偏振片等^[34]。

4 手性负折射率材料的应用进展

4.1 手性负折射率材料波导的新进展

电磁波在负折射率材料波导中的传播具有不同于常规波导中的传播特性,手性波导中电磁波的双模,为相位匹配提供了条件,固定模式的截止频率和特定频率下特异的传播常数能够运用到多通道网络中,利用手性负折射率材料波导器设计的光方向耦合器和光子开关具有更大的灵活性和保障。手性负折射率材料在信息、通信等领域有十分广阔的应用前景。所以,研究负折射率材料波导特别是手性负折射率材料波导对电磁器件和光子器件的研究和制备具有重要意义。

宁波大学董建峰课题组有着多年从事负折射率材料、手性负折射率材料和超材料波导的研究经验,该课题组在已有包含手性负折射率介质的各种波导如平板波导^[35-36]、平行板波导^[37]、金属衬底平板波导^[38]等理论研究的基础上提出了部分填充手性负折射率介质的平行板波导^[39],通过对导模特性曲线以及功率和能流进行的研究表明波导中出现了表面波模、功率流动方向与相位传播方向相反的后向波、功率储存、传播常数三值、模式交叉等现象。此外,还发现在某一频段,没有任何模式存在,即此波导中存在电磁波传播的禁带等手性负折射率材料波导的特异性能。

4.2 手性负折射率材料偏振转换器件的新进展

三维手性材料显示出圆双折射和圆二向色性,而二维手性材料显示出圆转换二向色性。三

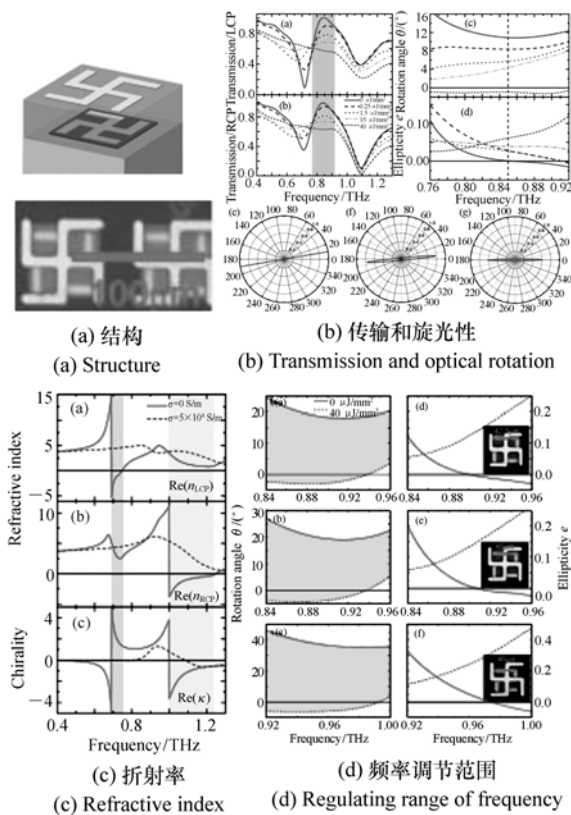


图 5 可调谐手性负折射率材料
Fig. 5 Tunable chiral metamaterials

维手性材料,圆双折射特性将旋转入射电磁波的偏振态,圆二向色性导致右旋、左旋圆偏振光不同的透射率,这两种现象都与光的传播方向无关。对于二维手性材料,圆转换二向色性导致右旋、左旋圆偏振光之间不同的圆转换效率,当光反向通过二维手性材料时,圆转换效率倒置,因此相同旋性的偏振光正反两个方向通过二维手性材料时透过率不同,导致非对称传输。2013 年, Kun Song 等人设计了一种频率可调谐的 90° 偏振转换器件,在微波、THz 波和光波段具有重要应用^[40],该材料结构由臂宽不均匀的“卍”型和金属线组成,

如图 6(a) 所示。2014 年, Cheng 等人^[41] 设计并制造一种完美圆极化起偏器,该起偏器由双层旋转 90° 的不对称开口谐振环手性单元组成,如图 6(b) 所示,这种结构可以调整入射电场的垂直成分以区分 y 极化波沿 $-z$ 轴方向传播的部分,并通过电子束光刻法制作了 20×20 个单元 ($200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$) 组成的平板,仿真和实验结果显示在 7.8 GHz 形成 RCP, 在 10.1 GHz 形成 LCP,同时具有 30 db 的极化偏振消光比^[42]。

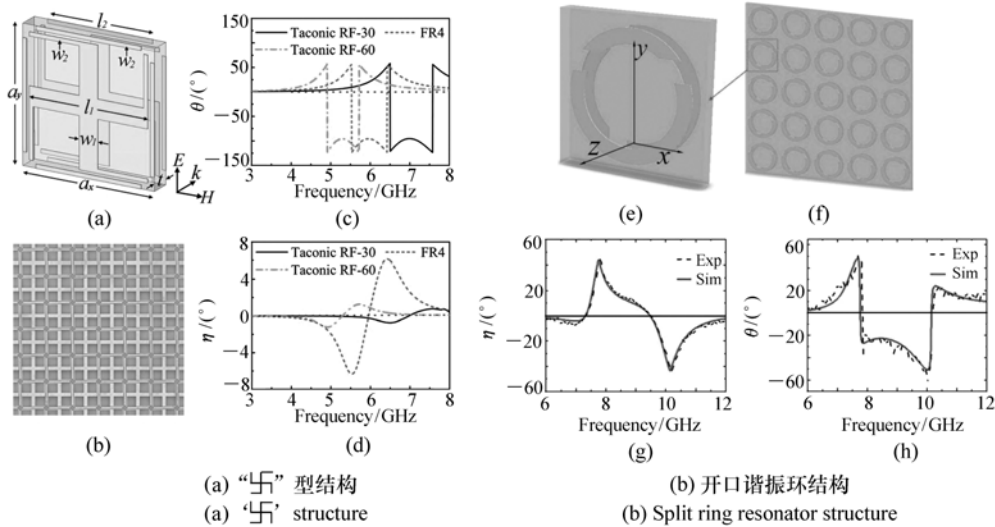


图 6 手性偏振转换器
Fig. 6 Chiral rotation device

4.3 手性负折射率材料吸收性能的新进展

手性负折射率材料由于本身谐振会带来巨大损耗,因此是很好的吸波材料,同时又具有手性参数可调、频带宽等优点,大多数手性材料具有正反面互易、双面吸收的特点,因此具有巨大的应用前景。图 7 是基于手性结构设计了一种极化不敏感和双面吸波的超材料吸波体。理论和仿真结果表明:该超材料吸波体在 5.83 GHz 对入射电磁波具有 95.9% 的双面强吸收,且对极化不敏感。



图 7 手性吸波体的结构
Fig. 7 Chiral absorbing materials

5 结束语

本文按照传统手性结构和新型手性结构分别介绍了国内外的最新进展,其中包括仿真发展的情况和实验制备的情况,详细地介绍了具有代表

性的手性结构实现负折射率的机制和优点。总结如下:第一,手性负折射率材料的机制已经为研究者所掌握,所以单纯的仿真模拟旨在指导实验制备和高频区域负折射率特性的探索;第二,如何实现手性负折射率材料是目前研究的热点;第三,高

频区域实现手性负折射率材料是难点,特别是可见光区域。

目前研究中存在的问题是在红外和可见光等高频区域只是单纯地仿真模拟,还没有实验制备方面的探索,制备方法和器件的研制主要集中在微波频段区域。

综上所述,未来手性负折射率材料的研究方向有:(1)理论上,可深入研究负折射率材料的基本特性、物理机制,构建更合理的结构模型;(2)对工作频段和方向性的控制上,目前大多数的负折射率材料的工作频段只能达到红外波段,且只能在一定角度的入射波下实现负折射,如果要实现隐身特性至少应该覆盖可见光频率区域,材料

的各向同性特性也需要考虑,才能使不同方向入射波在较宽的频率区域上得到控制;(3)在实验室制备上,目前平面工艺局限于很小的面积上,处于实验室测试阶段,如果要使手性负折射率材料实现产业化,还需提高相关制备工艺,向大体积、三维空间发展;(4)继续探索与新型手性负折射率材料设计及性能优化相关模拟仿真方法和光学器件的设计;(5)探索实现手性负折射率材料的新机制、新方法和新材料,来解决因为材料损耗等因素所带来的无法在可见光频段实现负折射率等难题;(6)手性负折射率材料与其他常规材料、超材料之间的相互作用也应该得到重视。

参考文献:

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability [J]. *Sov Phys Usp*, 1968, 10(4): 509.
- [2] CHEN J B, WANG Y, JIA B H, *et al.*. Observation of the inverse doppler effect in negative-index materials at optical frequencies [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 1749-4885.
- [3] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [4] SMITH D R. How to build a superlens [J]. *Science*, 2005, 308: 502-503.
- [5] 赵娜. 负折射率材料微带天线的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
ZHAO N. Study on the application of left-handed materials in microstrip antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- [6] XU H X, WANG G M, QI M Q, *et al.*. Ultra-small single-negative electric metamaterials for electromagnetic coupling reduction of microstrip antenna array [J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 21968-21976.
- [7] 王辰. 基于复合左右手传输线结构的新型多频、小型化天线研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
WANG CH. Research on novel multiband and compact antenna based on composite right/left-handed transmission lines structures [D]. Guangzhou: South China University of Technology Guangzhou, 2012. (in Chinese)
- [8] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [9] MUHAN C, JONGHO C, BYUNGSOO K, *et al.*. A flexible metamaterial with negative refractive index at visible wavelength [J]. *Current Applied Physics*, 2013, 13: 1723-1727.
- [10] 洪俊, 耿秋华, 徐键, 等. 光波段负折射率材料研究进展 [C]. 2007年微波毫米波会议论文集. 宁波, 2007: 1313-1318.
HONG J, GENG Q H, XU J, *et al.*. The development of negative index materials [C]. Proceedings of the 2007 Conference on Microwave Millimeter Wave, Ningbo, China, 2007: 1313-1318. (in Chinese)
- [11] 汪业龙. 光波段单层及多层渔网状结构负折射率波长响应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
WANG Y L. Wavelength response research of negative refractive index for single and multi-layer fishnet metamaterial in visible light band [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 张会, 张卫宇, 徐旺, 等. THz波段光子晶体带隙影响因素研究 [J]. *发光学报*, 2012, 33(8): 883-887.
ZHANG H, ZHANG W Y, XU W, *et al.*. Study on the influencing factors of photonic crystal's band gaps in THz waveband [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2012, 33(8): 883-887. (in Chinese)
- [13] 梁斌明, 胡艾青, 将强, 等. 光子晶体负折射效应在糖溶液浓度检测中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4):

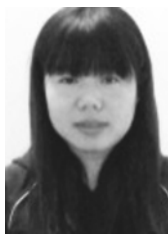
877-883.

LIANG B M, HU A Q, JIANG Q, *et al.*. Application of photonic crystal negative refraction effect to sugar solution concentration detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):877-883. (in Chinese)

- [14] PENDRY J B. A chiral route to negative refraction[J]. *Science*, 2004, 306(19):1353-1355.
- [15] 董建峰, 李杰. 单轴各向异性手征介质平板的反射和透射特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(6):064102.
DONG J F, LI J. Study of reflection and transmission characteristics on uniaxial anisotropic chirality medium flat[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(6):064102. (in Chinese)
- [16] DONG J F, ZHOU J F, KOSCHNY T, *et al.*. Bi-layer cross chiral structure with strong optical activity and negative refractive index[J]. *Opt Express*, 2009, 17(16):14172.
- [17] ZHAO R, ZHANG L, ZHOU J F, *et al.*. Conjugated swastika chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index[J]. *Opt Express*, 2010, 19:1504.
- [18] PLUM E, ZHOU J F, DONG J F, *et al.*. Metamaterial with negative index due to chirality[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, 79(3):035407.
- [19] LI Z, ZHAO R, KOSCHNY T, *et al.*. Chiral metamaterials with negative refractive index based on four "U" split ring resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010(97):081901.
- [20] KENANAKIS G, ZHAO R, STAVRINIDIS A, *et al.*. Flexible chiral metamaterials in the terahertz regime: a comparative study of various designs[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(12):1702-1712.
- [21] LI Z F, KAMIL B A, HUMEYRA C, *et al.*. Composite chiral metamaterials with negative refractive index and high values of the figure of merit[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6):6146-6156.
- [22] LI Z, ZHAO R, KOSCHNY T, *et al.*. Chiral metamaterials with negative refractive index based on four "U" split ring resonators[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010(97):081901.
- [23] LIU Y, CHENG Y Z, CHENG Z Z. A numerical parameter study of chiral metamaterial based on U-shaped structure in infrared region complementary[J]. *Optik*, 2014, 125:1316-1319.
- [24] SONG K, ZHAO X P, FU Q H, *et al.*. Wide-angle 90°-polarization rotator using chiral metamaterial with negative refractive index[J]. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 2012, 26(14-15):1967-1976.
- [25] PANPRADIT W, SONSILPHONG A, SOEMPHOL C, *et al.*. High negative refractive index in chiral metamaterials[J]. *J. Opt.*, 2012, 14:075101.
- [26] XU H X, WANG G M, QI M Q, *et al.*. Compact dual-band circular polarizer using twisted Hilbert-shaped chiral metamaterial[J]. *Optics Express*, 2013, 1(21):24912-24921.
- [27] GILOANN M, ASTILEAN S. Negative index optical chiral metamaterial based on asymmetric hexagonal arrays of metallic triangular nanoprisms[J]. *Optics Communications*, 2014, 315:122-129.
- [28] LI M H, GUO L Y, YANG H L. Experimental and simulated study of dual-band chiral metamaterials with strong optical activity[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 6(10):2381-2385.
- [29] 潘学聪, 姚泽瀚, 徐新龙, 等. 太赫兹波段超材料的制作、设计及应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(3):283-296.
PAN X C, YAO Z H, XU X L, *et al.*. Fabrication, design and application of THz metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3):283-296. (in Chinese)
- [30] ZARIFI D, SOLEIMANI M, NAYYERI V. A novel dual-band chiral metamaterial structure with giant optical activity and negative refractive index[J]. *J. Electromagn. Waves and Appl.*, 2012, 26:251-263.
- [31] ZHANG S, PARK Y, LI J, *et al.*. Negative refractive index in chiral metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(2):023901.
- [32] 顾超, 屈绍波, 裴志斌, 等. 一种极化不敏感和双面吸波的手性超材料吸波体[J]. *物理学报*, 2011, 60(10):107801.
GU CH, QU SH B, PEI ZH B, *et al.*. A insensitive polarization and double absorption chiral metamaterials absorber[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(10):107801. (in Chinese)
- [33] 丁玉斌. 基于可调谐手征结构负折射率材料的数值研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2013.

- DING Y B. Numerical Study on the negative refractive materials based on tuning chiral structure[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2013. (in Chinese)
- [34] 文光俊. 多频电磁超材料关键技术及应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- WEN G J. Research on key techniques and applications of multi-band electromagnetic metamaterials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [35] JIN Y, HE J L, HE S L. Surface polaritons and slow propagation related to chiral media supporting backward waves[J]. *Phys Letters A*, 2006, 351: 354-358.
- [36] ZHANG C, CU T J. Chiral planarwave guide for guiding single-mode backward wave[J]. *Opt Commun*, 2007, 280(2): 359-363.
- [37] 董建峰, 柳斌. 手征负折射平行板波导中模式的新特性[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(4): 597-600.
- DONG J F, LIU B. Novel characteristics of modes in chiral negative refraction parallel-plate wave guide[J]. *Chinese J. Science*, 2008, 23(4): 597-600. (in Chinese)
- [38] DONG J F. Surface wave modes in chiral negative refraction grounded slab wave guides[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, 95: 153-166.
- [39] 董建峰, 裴春乐, 杨硕. 部分填充手征负折射率介质的平行板波导[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(5): 892-898.
- DONG J F, PEI C L, YANG S. The parallel-plate wave guide partially filled with chiral negative refractive index medium [J]. *Chinese J. Radio Science*, 2014, 29(15): 892-898. (in Chinese)
- [40] SONG K, ZHANG X P, LIU Y H, *et al.*. A frequency-tunable 900-polarization rotation device using composite chiral metamaterials[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103: 101908.
- [41] CHENG Y Z, GONG R Z, CHENG Z Z, *et al.*. Perfect dual-band circular polarizer based on twisted split-ring structure asymmetric chiral metamaterial[J]. *Applied Optics*, 2014, 3(25): 5763-5768.
- [42] ZHOU J F, DIBAKAR R C, ZHAO R K. Terahertz chiral metamaterials with giant and dynamically tunable optical activity [J]. *Physical Review B*, 2012, 86: 035448.

作者简介:



贾秀丽(1983—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,讲师,2010年于内蒙古工业大学获得硕士学位,主要从事手性负折射率材料方面的研究。E-mail: jiaxiuli_hit@163.com



周忠祥(1965—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1987年于吉林大学获得学士学位,1997年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光电功能材料与器件、电磁波与等离子体相互作用、非线性光学与光学信息处理等方面的研究。E-mail: zhouzx@hit.edu.cn



王晓红(1960—),女,黑龙江鸡西人,教授,博士生导师,1990年、2006年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光学非线性方面的研究。E-mail: wxo@hit.edu.cn



孟庆鑫(1973—),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,硕士生导师,2005年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事多功能材料的电磁性能及其在电磁波调制方面的研究。E-mail: mengqx@hit.edu.cn