

左手材料的响应频段和单元尺寸关系的研究^{*}

吴俊芳^{1)†} 孙明昭²⁾ 张淳民²⁾

1) 西安工程大学理学院,西安 710048)

2) 西安交通大学理学院,西安 710049)

(2008 年 8 月 11 日收到,2008 年 9 月 12 日收到修改稿)

目前左手材料的负折射现象只发生在微波波段,通常把发生负折射现象的这个频率波段称为响应频段.由于左手材料的响应频段的频率很低,而常用的波源是太阳光或者是可见光,因此左手材料的应用受到极大的限制.如何使左手材料的响应频段从低频移到高频或者说从微波波段移到可见光波段是迫切需要解决的问题.在周期性结构的左手材料中影响响应频段的因素很多,例如周期性结构的单元形状、单元尺寸等等.文中通过改变周期性结构左手材料的单元尺寸实现了响应频段的移动,同时经实验和计算机模拟得到了单元尺寸和响应频段的关系即随着单元尺寸变小响应频段从低频移动到高频,并且响应频段展宽了.

关键词:左手材料,周期性结构,单元尺寸,响应频段

PACC:4110H,7790,0350D

1. 引言

1968 年前苏联科学家首先提出了左手材料的概念并且证明了该材料有许多反常的特性,例如负折射现象、逆多普勒效应等等^[1].但是由于这种材料在自然界中不存在,因此很长时间内左手材料没有引起人们的关注,直到 2001 年 Smith 等^[2]在实验室利用复合的周期性结构证明了负折射现象,从此左手材料才引起了人们的关注,尤其是在人们发现了利用左手材料可以制成高指向天线、完美透镜后^[3-15],左手材料就成了人们研究的热点.但是由于自然界不存在左手材料,只能通过人工搭建复合周期性结构的左手材料,这种左手材料在一定的频率范围出现负折射现象,目前只能在微波段出现负折射,而我们常见的波源是太阳光或者是可见光,因此左手材料的应用受到极大的限制.为了改变这种状态,许多研究者都把注意力集中在如何使响应频段从低频移到高频,甚至到可见光频段.人们都在从不同方面进行尝试,有从材料方面进行研究,也有从光子晶体的结构方面进行研究等等.由于目前在实验室是通过周期性结构的左手材料实现负折射现象的,因此,我们从周期性结构的左手材料入手,研究左手材料的

单元尺寸和响应频段的关系,通过调节周期性结构的左手材料的单元尺寸来实现响应频段的移动.

本文基于上述目标主要研究了周期性结构的左手材料的单元尺寸对响应频段的影响,即如何改变周期性结构的左手材料的单元尺寸来实现响应频段从低频移到高频.从计算机模拟和实验两方面进行研究,首先通过计算机模拟了矩形环周期性结构的左手材料的响应频段和单元尺寸的关系,并通过实验验证了这种关系的正确性.

2. 左手材料单元尺寸和响应频段关系的计算机模拟

我们所研究的周期性结构的左手材料是由矩形开口谐振环搭建而成的复合结构,其单元结构如图 1 所示,其中图 1(a)和 1(b)是同种形状的左手材料的单元结构,但是图 1(b)的单元结构的尺寸比图 1(a)小,如图所示尺寸.我们把图 1(a)叫原尺寸的结构,图 1(b)叫小型化结构.

对上述两种单元尺寸结构的左手材料进行计算机模拟,计算机模拟的两种单元尺寸的左手材料的结构图如图 2 所示,矩形开口谐振环为厚度为 0.03 mm 的铜膜.为了便于和开口矩形环进行比较,同时还模拟了矩形环闭合的情况.

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号:40537031)、国家自然科学基金(批准号:40375010,60278019)和陕西省教育厅科研基金(批准号:07JK261)资助的课题.

[†] E-mail: wjf1969@163.com

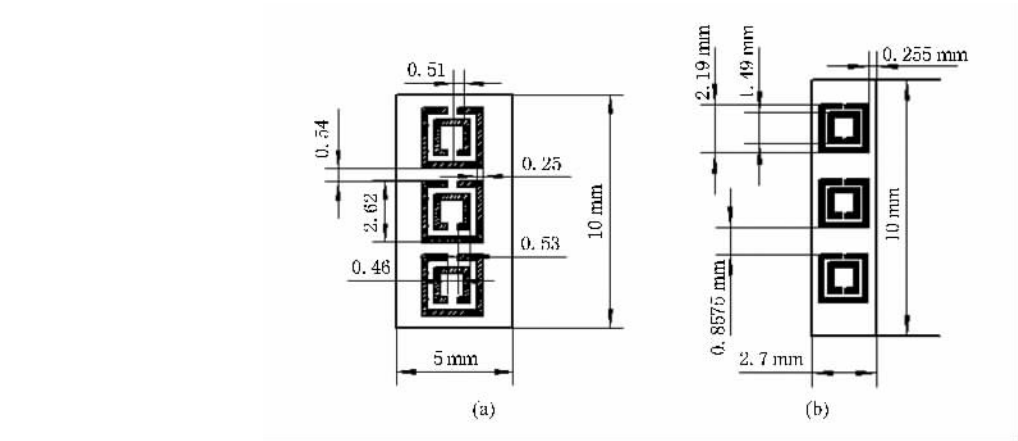


图 1 左手材料的单元结构 (a)原尺寸 (b)小型化尺寸

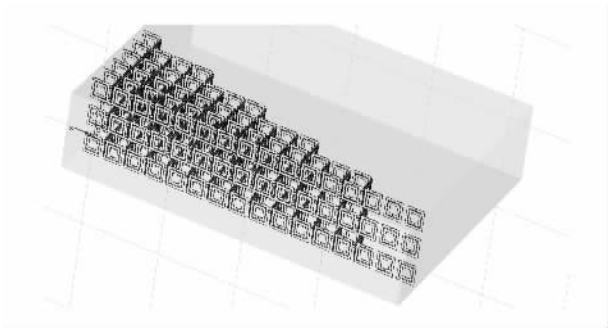


图 2 计算机模拟的左手材料的结构图

计算机模拟的结果如图 3 所示,纵坐标 S_{21} 表示能量通过率.图 3 (a)是模拟的闭合矩形环结果,图 3 (b)为原尺寸,图 3 (c)为小型化结构.从图我们可以看出,在图 3 (a)没有能量透过,图 3 (b)和 (c)则出现能量峰值,并且表现为负折射现象.在图 3 (b)中响应频段在 12—14.5 GHz,在图 3 (c)中响应频段在 11—16 GHz.从图 3 (b)和 (c)可以看到随着单元尺寸的小型化,响应频段从低频向高频移动,并且响应频段展宽了.

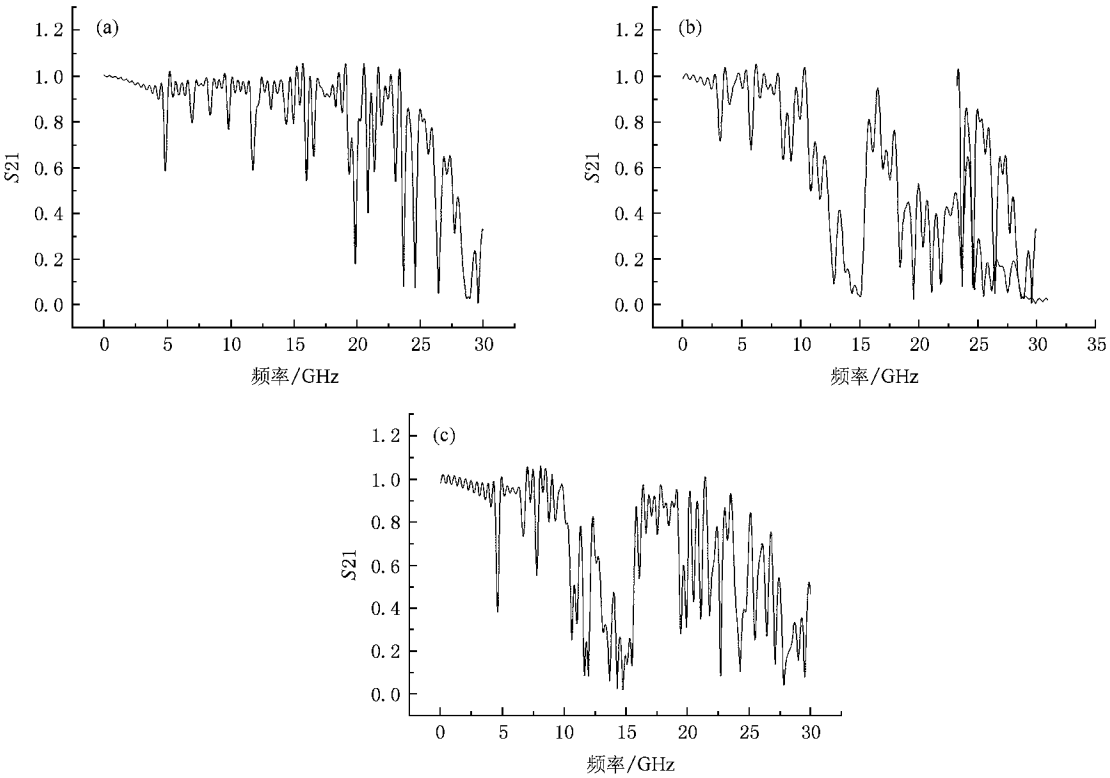


图 3 计算机模拟的单元尺寸与响应频段关系 (a)闭合矩形环 (b)模拟的开口谐振环原尺寸 (c)模拟的开口谐振环小型化结构

3. 左手材料单元尺寸和响应频段关系的实验

我们根据图 1 制作两种单元尺寸的左手材料的样品如图 4 所示,并通过实验来证明左手材料单元尺寸和响应频段的关系.

实验结果如图 5 所示,明亮的部分代表能量较大,从图 5 可以看到实验样品出现了负折射现象,折射角在负方向,表明我们的样品是左手材料.图 5 (a)是原尺寸的实验结果,从图 5(a)可以看到响应频段在 8.5—12.5 GHz 之间,图 5(b)是小型化的实验结果,从图 5(b)可以看到响应频段在 8.5—13.2 GHz 之间.从实验结果我们可以看到随着单元

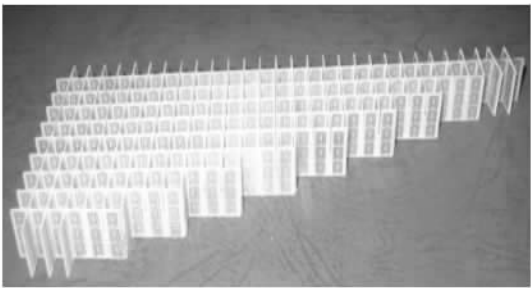


图 4 左手材料的样品

尺寸的小型化,响应频段从低频移向了高频,并且响应频段展宽了,这个结论和我们计算机模拟结果基本相符.

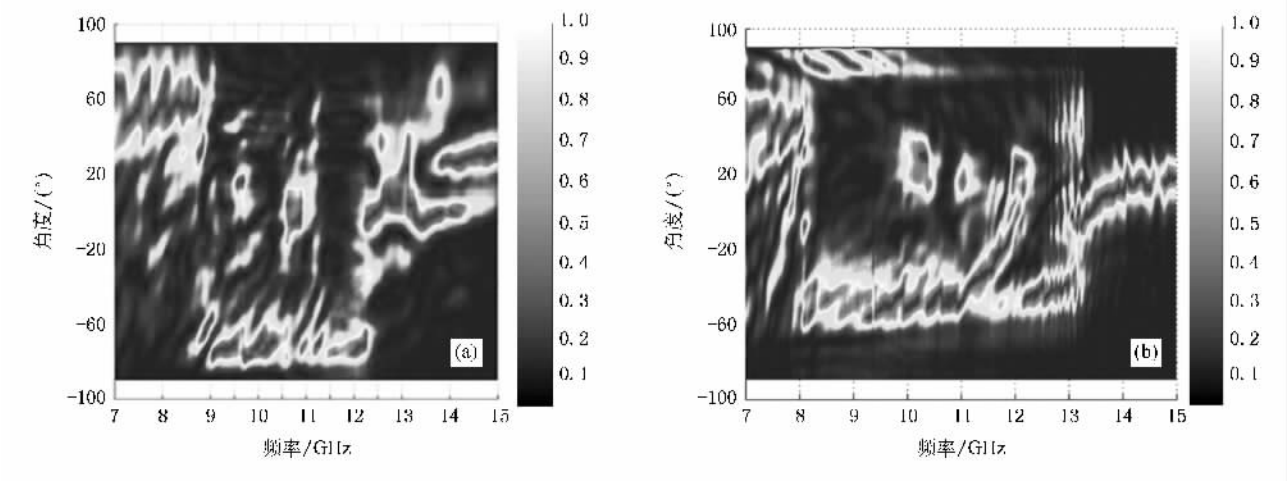


图 5 左手材料单元尺寸和响应频段关系的实验结果 (a)原尺寸 (b)小型化

比较计算机模拟结果和实验结果,我们发现实验结果和计算机模拟在响应频段上有微小的差异,这主要是计算机模拟是在理想状态下,而实验要受到镀铜厚度的均匀性、样品搭建的均匀性、空间结构的均匀性及其他实验条件的影响.

4. 结 论

通过计算机模拟和实验验证,研究了左手材料

的单元尺寸和响应频段的关系,即随着单元尺寸的小型化,响应频段从低频移向了高频,并且响应频段展宽了.根据研究,我们可以通过周期性左手材料的单元尺寸的小型化实现响应频段的移动.如果能够使周期性左手材料的单元尺寸小到纳米级,响应频段有望提高到可见光频段,这就大大地提高了左手材料的应用范围,可广泛地应用于军事和日常生活,将带来不可估量的经济效益.

[1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509

[2] Shelby R A , Smith D R , Schultz S 2001 *Science* **292** 77

[3] Ziolkowski R W 2001 *Phys. Rev. E* **64** 056625

[4] Smith D R , Padilla W J , Vieret D C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184

[5] Ziolkowski R W 2001 *Phys. Rev. E* **64** 056625

[6] Shi H Y , Jiang Y Y , Sun X D , Guo R H , Zhao Y P 2005 *Chin. Phys.* **14** 1571

[7] Jiang T , Chen Y , Feng Y J 2006 *Chin. Phys.* **15** 1154

[8] Kong J A , Wu B L , Zhang Y 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2084

- [9] Hu Y H , Fu X Q , Wen S C , Su W H , Fan D Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2970
- [10] Chen H S , Ran L , Huangfu J , Zhang X , Chen K , Grzegorzczk T M , Kong J A , 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [11] Huangfu J , Ran L , Chen H , Zhang X , Chen K , Grzegorzczk T M , Kong J A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **90** 1098
- [12] Zheng Q , Zhao X P , Fu Q H , Zhao Q , Kang L , Li M M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5683 (in Chinese) [郑 晴、赵晓鹏、付全红、赵 乾、康 雷、李明明 2005 物理学报 **54** 5683]
- [13] Pendry J B , Holden A J , Robbins D J , Stewart W J 1999 *IEEE Tran.* **47** 2075
- [14] Pendry J B , Holden A J , Stewart W J , Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [15] Li H Y , Wu Z S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 833 (in Chinese) [李海英、吴振森 2008 物理学报 **57** 833]

The relationship between resonant frequency band and cell size in left-handed materials^{*}

Wu Jun-Fang^{1,†} Sun Ming-Zhao²⁾ Zhang Chun-Min²⁾

¹) School of Science , Xi 'an Polytechnic University , Xi 'an 710048 , China)

²) College of Science , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an 710049 , China)

(Received 11 August 2008 ; revised manuscript received 12 September 2008)

Abstract

By now , the negative refraction phenomenon occurs only in the microwave band in the left-handed materials , and this frequency band is called resonant frequency band. The application of the left-handed materials is greatly limited because the resonant frequency is low , and the source of wave is usually sun light or visible light. How to shift the resonant frequency from low frequency to high frequency , even to the visible light band , is an important and urgent research problem. Many parameters of the periodic structures will greatly affect the resonant frequency , including the shapes and sizes. The resonant frequency is shifted by adjusting the cell size. The relation that the resonant frequency band can be shifted and broadened from low frequency to high frequency with the reducing cell size , is obtained by simulation and experiment.

Keywords : left-handed materials , periodic structures , cell size , resonant frequency band

PACC : 4110H , 7790 , 0350D

^{*} Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No.40537031) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.40375010 , 60278019) , and the Science Research Fund of the Education Department of Shaanxi Province , China (Grant No.07JK261) .

[†] E-mail : wjfl969@163.com