

# 缺陷对左手材料负折射的调控行为<sup>\*</sup>

郑 晴<sup>1)</sup> 赵晓鹏<sup>1)†</sup> 李明明<sup>1)</sup> 赵 晶<sup>2)</sup>

1) 西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

2) 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

(2006 年 1 月 23 日收到, 2006 年 3 月 3 日收到修改稿)

采用电路板蚀刻技术制备左手材料样品, 由劈尖法分别研究了无缺陷和引入缺陷时左手材料的负折射特性. 实验结果表明, 引入两种点缺陷材料与无缺陷材料的功率峰值之比分别为 1.035 和 1.256, 且负折射率的绝对值分别增大了 9.6% 和 19.6%; 引入空位缺陷材料与无缺陷材料的功率峰值之比最大为 1.973, 最小为 0.364, 负折射率的绝对值最大增大了 68.3%, 最小增大了 9.6%. 缺陷的存在改变了左手材料周期性结构, 形成新的电磁谐振条件, 使其负折射率和功率峰值发生了变化, 实现了对左手材料负折射率的调控.

关键词: 左手材料, 负折射, 缺陷

PACC: 4270Y, 6170E, 7785

## 1. 引 言

左手材料(left-handed metamaterials)是一种介电常数  $\epsilon_{\text{eff}}$  和磁导率  $\mu_{\text{eff}}$  同时为负的人工周期性结构材料, 其特性受控于结构单元几何形状及空间分布. 左手材料中传播的电磁场分量  $E, B$  与波矢  $K$  满足“左手定则”, 电磁波相速度和群速度方向相反, 从而表现出许多奇异的物理光学特性, 如反常 Doppler 效应、反常 Cherenkov 效应、完美透镜效应、负折射效应<sup>[1-6]</sup>等.

目前, 左手材料基本问题的研究主要集中在其与电磁波相互作用上, 如透射行为、反射行为、负折射行为. 1999 年, Pendry 等<sup>[7]</sup>研究了周期排列的金属开口谐振环(split ring resonators, SRRs)的电磁响应行为, 发现其磁导率在谐振频率附近为负. 2001 年, 文献[8]将金属 SRRs 和金属杆排列成周期结构, 第一次从实验上证实了左手材料负折射的存在. 2003 年, Houck 等<sup>[9]</sup>对倾角不同的劈尖状左手材料样品进行了负折射率的测量, 结果发现不同入射角度下测量到的负折射率是一致的. 通过构成特性发现, 现有的左手材料是一种由一定的结构单元按照完整的空间周期排列而成的结构材料, 这种构成决定了其

电磁波响应特性唯一, 应用受到很大限制. 当对光子晶体进行掺杂即引入缺陷时, 带隙中将生成缺陷模, 使原本处于带隙中某频率的光被允许存在, 从而产生许多奇特的性质. 光子晶体缺陷问题研究已日臻完善并成为光子晶体的重要应用基础<sup>[10,11]</sup>. 左手材料中的缺陷同样会引起材料性质的许多变化, 本研究组对左手材料中缺陷效应进行了系统的研究, 取得了一些有意义的结果<sup>[12-16]</sup>. 本文通过在严格空间周期结构的左手材料中引入缺陷, 研究了缺陷对左手材料负折射行为的影响. 利用电路板蚀刻技术制备了金属铜六边形 SRRs 与金属杆组合为结构单元的左手材料, 采用劈尖法测量了无缺陷和引入缺陷时左手材料的负折射行为变化.

## 2. 样品制备及实验装置

采用电路板蚀刻技术在 1.0 mm 厚的环氧玻璃纤维板上制备一系列铜六边形 SRRs 和铜杆, 厚度均为 0.02 mm. SRRs 设计成六边形是由于六边形更接近于自然界中物质颗粒的形状, 通过调控 SRRs 的几何参数使其谐振频率出现在 X 波段. 如图 1(a)所示, 利用内外环的内切圆直径表征 SRRs 的几何参数( $d_1/d_2$ ), 且开口  $g = 0.3$  mm, 线宽  $c = 0.3$  mm,

<sup>\*</sup> 国家杰出青年科学基金(批准号: 50025207)、国家重点基础研究发展规划(批准号: 2004CB719805)和航空科学基金(批准号: 05G53045)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

铜杆长度为 11.5 mm, 线宽为 0.5 mm. SRRs 和铜杆一一对应且分别位于纤维板两侧, 以其为结构单元周期排列制得左手材料(如图 1(b)所示), 晶格常数分别为  $a = 5$  mm,  $b = 5$  mm 和  $e = 3.8$  mm.

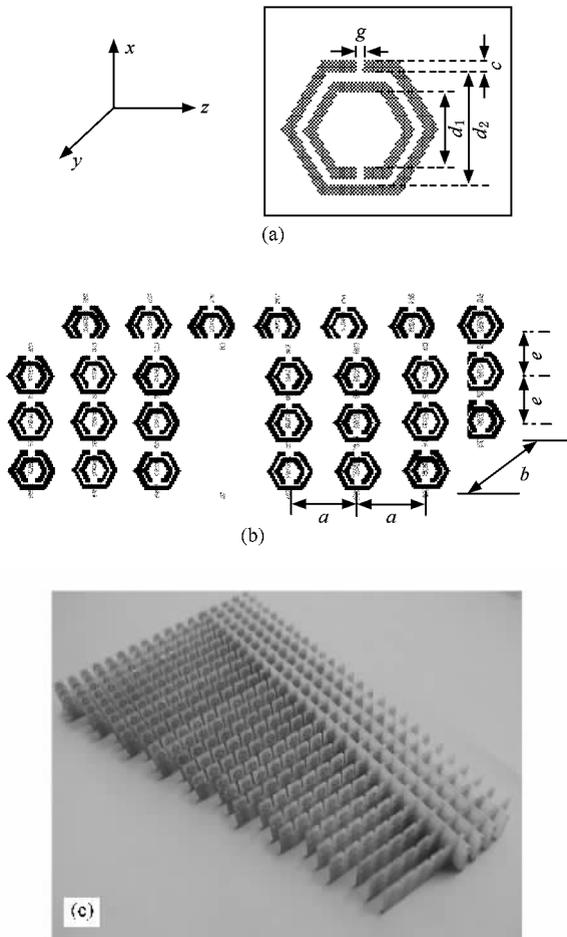


图 1 刻蚀法所制样品示意图 (a) SRR (b) 左手材料样品, (c) 劈尖状左手材料样品

将左手材料样品制成劈尖状(如图 1(c)所示), 其斜边与长直角边夹角为  $18.4^\circ$ , 装置如图 2 所示. 样品置于上下两层铝板构成的平板波导中间, 铝板间距为 11.7 mm, 铝板前端构成圆盘状, 半径为 15 cm. 矩形平板波导两侧放置吸波材料, 以使到达样品附近的波束可近似看作均匀平面波. 入射波从样品长直角边垂直入射, 以其斜边作为折射界面, 微波检测器探头以圆盘圆心为轴沿圆盘边缘转动, 探测某一角度的出射功率, 微波沿吸波材料及铝板形成的通路入射, 到达样品斜边的交界面并折射出去, 入射角为  $18.4^\circ$ . 图 2(a) 中虚线为空气与样品斜边交界面的法线方向, 对应的出射角为  $0^\circ$ . 如果此样品具有负折射率, 则出射方向将位于图中法线方向下

方, 反之, 出射方向将在法线上方. 根据斯涅尔定律, 当波束通过空气与介质的交界面时,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (1)$$

式中,  $n_1, n_2$  分别为空气与介质的折射率,  $\theta_1$  为入射角,  $\theta_2$  为折射角. 检测器探测到的出射功率的最大值为功率峰值, 其对应的角度为折射角, 根据(1)式得到左手材料的折射率.

实验中信号发生器的频率为 8—12 GHz. 无缺陷时左手材料在 8.9 GHz 频率附近出现负折射现象, 折射率  $n$  为  $-0.281$ . 频率一定时, 左手材料的功率峰值和负折射率均稳定不变.

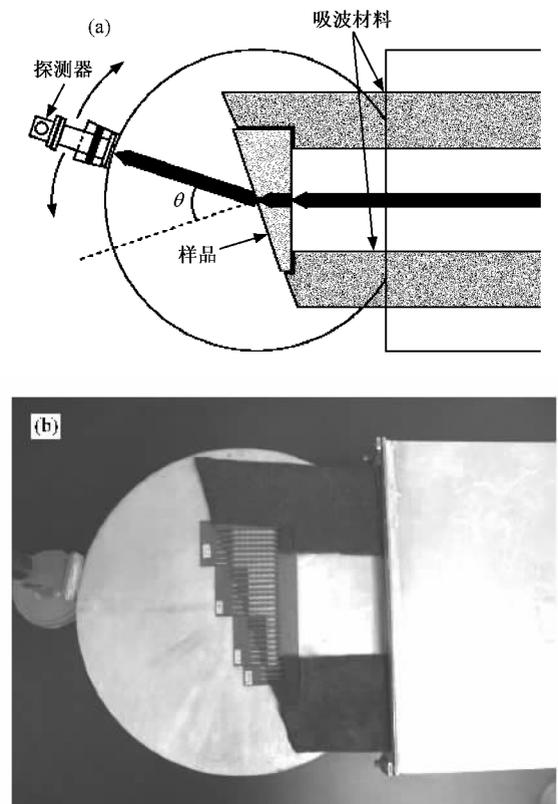


图 2 左手材料负折射测量装置示意图(a)和照片(b)

本实验研究了缺陷对左手材料负折射行为的调控. 引入两种类型的缺陷: 点缺陷和空位缺陷. 样品共 27 条, 从劈尖长底边数起, 第 14 条置于圆盘的中心位置, 将第 14 条中间沿  $x$  方向的三个 SRRs 移去形成点缺陷 I, 将第 11 条、第 14 条和第 17 条中间沿  $x$  方向的三个 SRRs 都移去形成点缺陷 II. 样品第 9 条到第 19 条中任移去一条形成空位缺陷 I, 首先移去第 14 条, 在此基础上将第 9 条到第 19 条任移去一条形成空位缺陷 II, 第 9 条到第 19 条, 两两相连移去形成空位缺陷 III.

### 3. 实验结果及讨论

#### 3.1. 点缺陷测量结果

无缺陷和引入点缺陷左手材料负折射测量结果如图 3 所示. 点缺陷的存在对功率峰值和负折射率均有一定影响. 由图 3 可见, 引入点缺陷 I 和 II 时, 其折射角度由无缺陷时的  $-5.1^\circ$  分别变化到  $-5.6^\circ$  和  $-6.1^\circ$ . 根据 (1) 式可计算出负折射率由无缺陷时的  $-0.281$  分别变化到  $-0.308$  和  $-0.336$ , 且引入缺陷与无缺陷材料的功率峰值之比分别为 1.035 和 1.256.

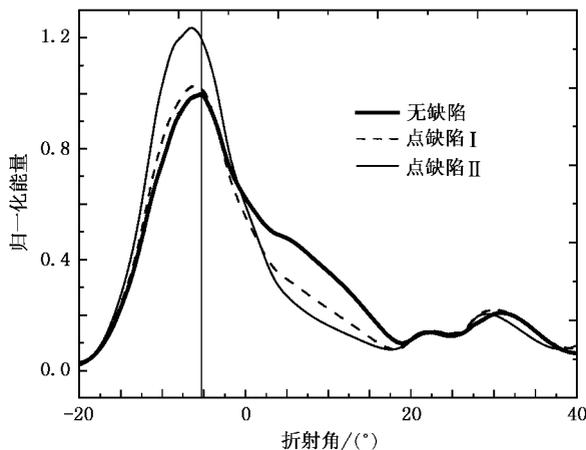


图 3 引入点缺陷时左手材料负折射测量结果

#### 3.2. 空位缺陷测量结果

引入空位缺陷 I, II 和 III 与无缺陷左手材料负折射测量结果见图 4、图 5 和图 6. 空位缺陷存在对功率峰值和负折射率均有一定影响. 相对于无缺陷左手材料, 由图 4(a) 可见, 引入空位缺陷 I 时功率峰值增大, 折射角度绝对值也增大故负折射率绝对值增大. 由图 4(b) 可见, 功率峰值减小且在角度为  $28^\circ$  处出现另一个功率峰, 折射角度绝对值增大故负折射率绝对值增大. 由图 5(a) 和图 6(a) 可见, 引入空位缺陷 II 和 III 时, 功率峰值减小, 折射角度绝对值增大故负折射率绝对值增大. 由图 5(b) 和图 6(b) 可见, 功率峰值减小且在角度为  $28^\circ$  处出现另一个功率峰, 折射角度绝对值增大故负折射率绝对值增大.

为了更清楚地研究空位缺陷对负折射行为的调控, 以移走的样品条数次序为横坐标, 负折射率和引入缺陷与无缺陷功率峰值之比为纵坐标作图(图

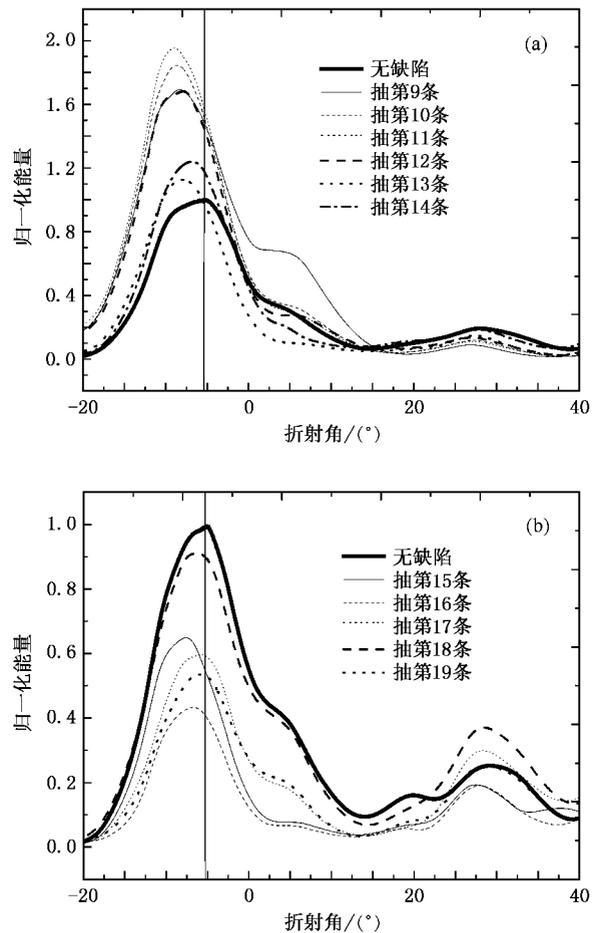


图 4 引入空位缺陷 I 时左手材料负折射测量结果 (a) 移去第 9 条—第 14 条 (b) 移去第 15 条—第 19 条

7). 由图 7 可见, 材料负折射率随着移走的样品条数次序不同而不同. 引入缺陷 I 时, 功率峰值之比最大为 1.973, 最小为 0.436, 负折射率由无缺陷时的  $-0.281$  最大变化到  $-0.473$ , 绝对值增大了 68.33%, 最小变化到  $-0.308$ , 绝对值增大了 9.6% (图 7(a)). 引入缺陷 II 时, 功率峰值之比最大为 0.735, 最小为 0.364, 负折射率由无缺陷时的  $-0.281$  最大变化到  $-0.473$ , 绝对值增大了 68.33%, 最小变化到  $-0.364$ , 绝对值增大了 29.5% (图 7(b)). 引入缺陷 III 时, 功率峰值之比最大为 1.576, 最小为 0.445, 负折射率由无缺陷时的  $-0.281$  最大变化到  $-0.473$ , 绝对值增大了 68.33%, 最小变化到  $-0.364$ , 绝对值增大了 29.5% (图 7(c)). 不同空位缺陷对左手材料的周期结构改变不同, 其缺陷效应差异较大.

#### 3.3. 讨 论

左手材料通常是以 SRRs 与金属导线的组合为

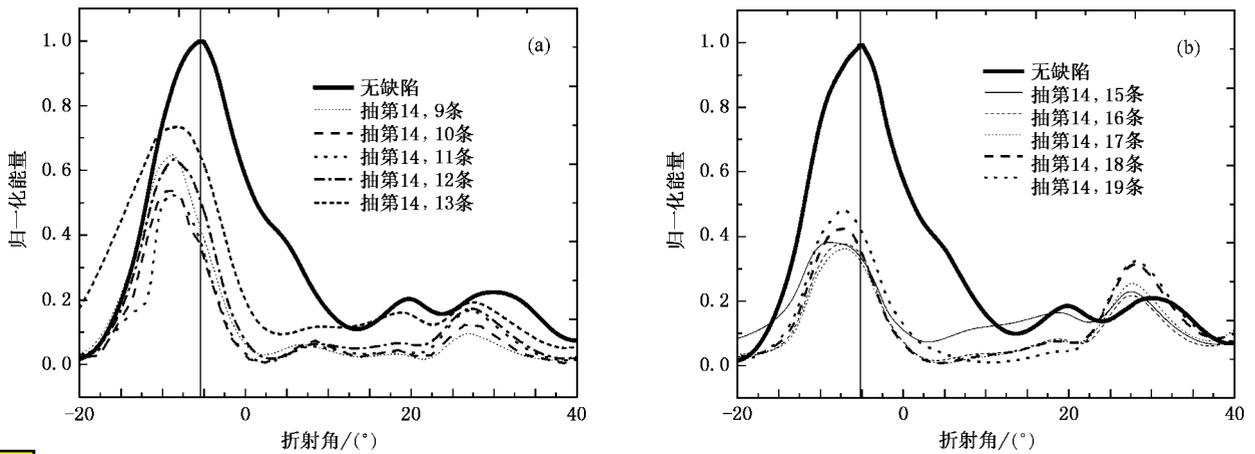


图5 引入空位缺陷II时左手材料负折射测量结果 (a)在移去第14条的基础上再移去第9条—第13条 (b)在移去第14条的基础上再移去第15条—第19条

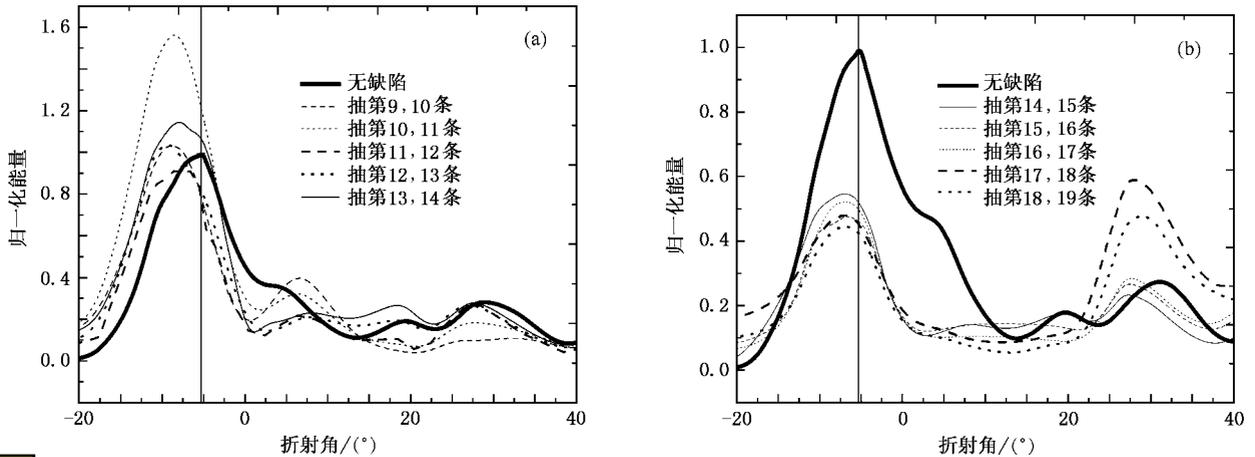


图6 引入空位缺陷III时左手材料负折射测量结果 (a)两两相连移去第9条—第14条 (b)两两相连移去第15条—第19条

结构单元,通过空间周期排列而成.对于完整周期材料,在电磁波作用下各结构单元通过电磁耦合形成电磁谐振状态.在一定波段内透射曲线形成谐振峰,此时材料的介电常数和磁导率同时小于零.根据材料的折射率定义可知

$$n = \sqrt{\epsilon} \times \sqrt{\mu}. \quad (2)$$

本文实验中微波从劈尖状左手材料样品的直角边垂直入射,到达样品斜边与空气的交界面并折射出去.根据(1)式知,  $n_1 = 1$ , 所以可得

$$n_2 = \frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1}. \quad (3)$$

结合(1)(2)式得到

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \sqrt{\epsilon} \times \sqrt{\mu}. \quad (4)$$

由文献[17,18]知,左手材料的介电常数和磁导率可表示为

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)}, \quad (5)$$

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\omega\Gamma}. \quad (6)$$

此前本课题组对SRRs的缺陷效应进行了研究[12,13],实验发现缺陷的引入改变了材料结构单元的周期性,空位附近SRRs之间有效距离增加,其相互耦合作用发生了变化,SRRs的谐振频率 $\omega_0$ 增大,向高频方向移动.由(6)式知,当 $\omega_0$ 增大,其他参数不变的情况下,材料负磁导率 $\mu(\omega)$ 绝对值增大,而介电常数 $\epsilon(\omega)$ 变化不大.由(4)式知,入射角 $\theta_1$ 不变的情况下,折射角 $\theta_2$ 绝对值增大,可知其折射率

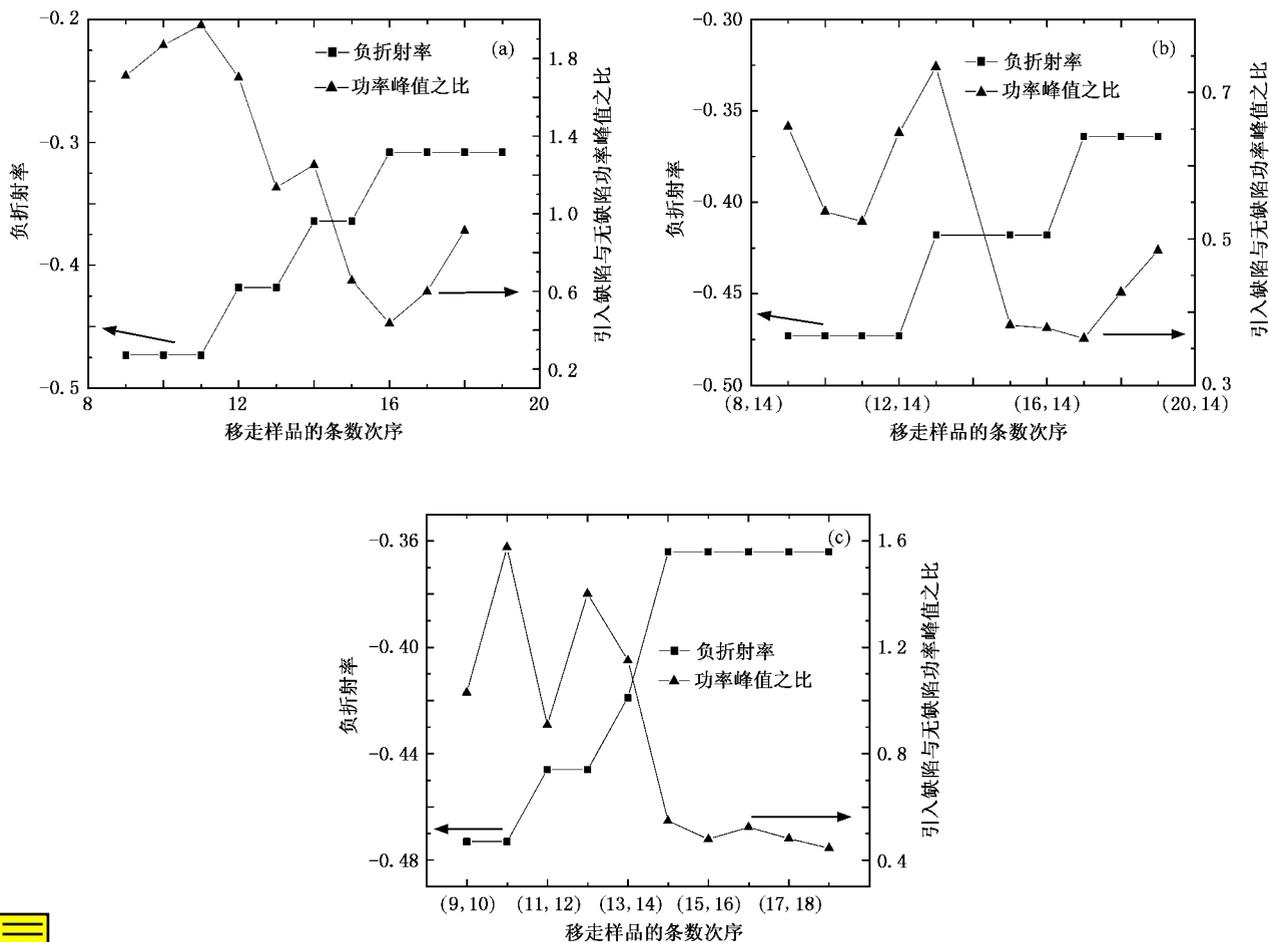


图 7 引入空位缺陷时负折射率和功率峰值之比随移走的样品条数次序的变化关系 (a)空位缺陷 I (b)空位缺陷 II (c)空位缺陷 III

绝对值增大.引入点缺陷 I 和 II 时,功率峰值之比分别为 1.035 和 1.256,负折射率由无缺陷时的  $-0.281$ 变化到  $-0.308$  和  $-0.336$ ,绝对值增大了 9.6%和 19.6%.与点缺陷相比,空位缺陷对材料的周期性破坏更大,从而使功率峰值和负折射率的变化也更大.引入空位缺陷 I,功率峰值之比在 0.436—1.973 范围内,负折射率在  $-0.308$ — $-0.473$  范围内变化,绝对值增大了 9.6%—68.33%;引入空位缺陷 II 和 III,功率峰值之比在 0.364—1.576 范围内,负折射率在  $-0.364$ — $-0.473$  范围内变化,绝对值增大了 29.5%—68.33%.上述实验结果表明,引入缺陷后左手材料折射率绝对值增大与理论分析相一致.

通过实验,我们发现缺陷的引入使材料的负折射率和功率峰值均发生了变化,从一定程度上实现了对左手材料负折射率的调控.当然,还需要进一步从理论上提出缺陷存在对左手材料与电磁场相互作用

的普遍规律,相关研究正在进行中.

### 4. 结 论

本文研究了缺陷对左手材料负折射行为的调控.利用劈尖法分别研究了无缺陷和引入缺陷时左手材料负折射特性.实验结果表明:相对于无缺陷情形,引入两种点缺陷材料与无缺陷材料的功率峰值之比分别为 1.035 和 1.256,且负折射率的绝对值分别增大了 9.6%和 19.6%;引入空位缺陷材料与无缺陷材料的功率峰值之比最大为 1.973,最小为 0.364,负折射率的绝对值最大增大了 68.33%,最小增大了 9.6%.不同空位缺陷对材料的周期结构改变不同,其缺陷效应差异较大.缺陷的存在改变了材料原有的周期性结构,形成新的谐振条件,从而导致材料负折射率和功率峰值的变化,实现了对左手材料负折射率的调控.

- [ 1 ] Luo C Y , Ibanescu M H , Johnson S G *et al* 2003 *Science* **299** 368 7837
- [ 2 ] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [ 3 ] Fang N , Zhang X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 161
- [ 4 ] Wiltshire M C K , Pendry J B , Young I R *et al* 2001 *Science* **291** 849
- [ 5 ] Gomez-Santos G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 77401
- [ 6 ] Shen J T , Platzman P M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3286
- [ 7 ] Pendry J B , Holden A J , Robbins D J *et al* 1999 *IEEE Trans. Microwave Theor. Techniq.* **47** 2075
- [ 8 ] Shelby R , Smith D R , Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [ 9 ] Houck A A , Brock J B , Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [ 10 ] Vileneuve P R , Fan S H , Ioannopoulos J D 1996 *Phys. Rev. B* **54**
- [ 11 ] Kee C S , Kim J E , Park H Y 1998 *Phys. Rev. E* **58** 7908
- [ 12 ] Zhao Q , Zhao X P , Kang L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 ( in Chinese ) [ 赵 乾、赵晓鹏、康 雷 2004 物理学报 **53** 2206 ]
- [ 13 ] 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 ]
- [ 14 ] Zhao X P , Zhao Q , Zhang F L *et al* 2006 *Chin Phys. Lett.* **23** 99
- [ 15 ] Zhang F L , Zhao Q , Liu Y H *et al* 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [ 16 ] Zheng Q , Zhao X P , Fu Q H *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5683 ( in Chinese ) [ 郑 晴、赵晓鹏、付全红等 2005 物理学报 **54** 5683 ]

## Regulating ability of defects on the negative refraction of left-handed metamaterials<sup>\*</sup>

Zheng Qing<sup>1)</sup> Zhao Xiao-Peng<sup>1)†</sup> Li Ming-Ming<sup>1)</sup> Zhao Jing<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> *Institute of Electrorheological Technology , Northwestern Polytechnical University , Xi'an 710072 , China*

<sup>2)</sup> *Department of Electrical Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China*

( Received 23 January 2006 ; revised manuscript received 3 March 2006 )

### Abstract

We have investigated the defect effect on negative refraction of the left-handed metamaterials ( LHMs ). The printed circuit boards with LHMs are fabricated using a shadow mask/etching technique . The negative refraction of wedge-shaped LHMs samples with and without defects is investigated respectively . The experimental result shows that when two kinds of point defects are introduced into the sample , the ratio of the maximum power of samples with point defects to that without defects are 1.035 and 1.256 , and the absolute value of the negative refraction index increases by 9.6% and 19.6% , respectively . When three kinds of vacant defects are introduced into the sample , the ratios of the maximum power of samples with vacant defects to that without defects have the highest value of 1.973 and the lowest value of 0.364 , and the absolute values of the negative refraction index have increased by 68.33% and 9.6% accordingly . We think that the defect breaks the periodic structure of the sample , resulting in a new condition of the electromagnetism resonance which leads to the changes of the negative refraction index and the maximum power . So we can regulate the negative refraction index of LHMs by adjusting the defects .

**Keywords :** left-handed metamaterials , negative refractive , defect

**PACC :** 4270Y , 6170E , 7785

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation for Outstanding Young Researchers of China ( Grant No. 50025207 ) , the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2004CB719805 ) and the Aeronautical Science Foundation of China ( Grant No. 05G53045 ) .

<sup>†</sup> Corresponding author . E-mail : xpzhao@nwpu.edu.cn