

非均匀缺陷环对微波左手材料的影响^{*}

罗春荣 康 雷 赵 乾 付全红 宋 娟 赵晓鹏[†]

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

(2004 年 7 月 29 日收到, 2004 年 11 月 3 日收到修改稿)

以金属铜六边形开口谐振环(SRRs)与金属铜线的组合为结构单元,研究了三维左手材料中的缺陷效应.利用电路板刻蚀技术制备了左手材料样品,采用波导法测量了 SRRs 构成的点缺陷和线缺陷对左手材料 X 波段(8—12 GHz)微波透射行为的影响.实验结果表明,引入不同尺寸 SRRs 构成的点缺陷,材料谐振峰强度下降,最多达 6 dB,相当于原来的 18.6%,谐振频率移动,通频带宽在 630—720 MHz 范围变化;引入不同尺寸 SRRs 构成三种取向的线缺陷时,材料谐振峰强度下降,最多达 11 dB,相当于原来的 34.1%,谐振频率红移、蓝移的情况都存在,通频带宽在 420—870 MHz 范围变化,线缺陷效应明显大于点缺陷的情形.这是由于缺陷的存在破坏了材料的空间周期性,从而引起左手材料与电磁波作用行为的变化.

关键词:左手材料,缺陷效应

PACC: 4270Y, 6170E, 2570E

1. 引 言

自 20 世纪 90 年代,人工周期性材料的研究逐渐成为全世界关注的焦点,其中以光子晶体的研究最为引人注目.人工周期结构研究的兴起使人们又能重新去认识一种非同寻常的材料——左手材料(left-handed metamaterials).左手材料满足介电常数和磁导率同时为负值,其中传播的电磁波遵循“左手定则”,这个概念最早由 Veselago^[1]提出.由于自然界中并不存在这种性质特异的材料,故在理论预言提出近 30 年的时间内,左手材料的研究基本处于停滞状态.1990 年代后期,Pendry 等^[2,3]相继提出分别实现负介电常数和负磁导率的周期排列金属线和开口谐振环(split ring resonators, SRRs)理论模型;2001 年 Shelby 等^[4]在此基础上首次制备了微波段左手材料.此后,文献 5—9 对金属线及 SRRs 与电磁波的相互作用行为进行了更为深入的研究,使人们对左手材料的认识逐渐走向深入.近来,反常 Doppler 效应、平板透镜成像等左手材料相关效应的研究工作^[10—12]陆续报道,左手材料领域已经成为新的研究

热点.

空间周期结构完整的光子晶体,由于介电常数的周期性变化而产生光子带隙结构,从而在宏观上表现为某些频率的光不能通过晶体.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,使原本处于带隙中的某频率的光被允许存在,从而产生许多奇特的性质^[13—16].光子晶体缺陷问题的研究已日臻完善并成为光子晶体应用的基础.左手材料同样有能带结构,但与光子晶体不同,其能带是选择透过性的,电磁波除某频段外均不能通过.类比光子晶体,左手材料缺陷效应的研究还未见报道.我们已经报道了 X 波段一维及二维负磁导率材料中的缺陷效应,发现缺陷的引入可调节谐振峰的谐振频率和共振强度,从而调控负磁导率材料的微波响应特性^[17,18].本文试图研究 SRRs 构成缺陷引起的三维左手材料微波透射行为的变化.采用电路板刻蚀方法制备了六边形 SRRs 与金属铜线组合为结构单元的三维左手材料,利用波导法系统地研究了 SRRs 点缺陷和不同取向的线缺陷对样品微波透射行为的影响.

^{*} 国家杰出青年科学基金(批准号:50025207)、国家自然科学基金(批准号:50272054)和国家重点基础研究发展规划(批准号:2004CB719805)资助的课题.

[†] 通讯联系人. Tel: 029-88495950, E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

2. 样品制备及实验

实验采用电路板刻蚀技术,在电路板材料某一表面制备六边形 SRRs 阵列,在另一表面沿谐振环内外环开口连线方向制备金属铜线形成阵列;内外环开口连线方向的 3 个开口谐振环构成谐振环组,与另一表面对应的金属铜线组成结构单元,将结构单元以一定周期排列成有序结构,制得基底三维左手材料样品. 电路板材料为 0.8 mm 厚的环氧酚醛玻璃纤维,金属铜厚度为 0.02 mm. 利用六边形内外环直径表示开口谐振环的几何参数(d_1/d_2 , 单位为 mm) (如图 1(a)),且开口 $g = 0.3$ mm,线宽 $c = 0.3$ mm;用高度和宽度表示金属铜线的几何参数(h/w , 单位为 mm) (如图 1(b));调节某些开口谐振环的几何参数,即引入缺陷制得具有不同缺陷的左手材料样品(如图 1(c)). 本实验制备了含点缺陷和线缺陷的左手材料样品. 以 1.0/2.2 SRRs 组与 9.9/0.5 金属铜线的组合为结构单元的基底三维左手材料,晶格常数分别为 $a = 7.0$ mm, $b = 7.0$ mm, $e = 3.3$ mm. 通过将中间列中心结构单元中部的 SRR 移去或替换为不同尺寸的 SSR 形成点缺陷. 以 1.0/2.2 SRRs 与 9.9/0.5 金属铜线组合为结构单元的基底三维左手材料,晶格常数分别为 $a = 7.0$ mm, $b = 7.0$ mm, $e = 3.3$ mm,通过不同方式形成三种线

缺陷:第一种,将中间列中心结构单元的 3 个 SRRs 移去或替换为不同尺寸的 SRRs 组形成线缺陷 I;第二种,将中间列中心及其相邻结构单元中部的 SRRs 移去或替换为不同尺寸的 SRRs 组形成线缺陷 II;第三种,将每列中心结构单元中部的 SRRs 移去或替换为不同尺寸的 SRRs 组形成线缺陷 III.

使用 AV3618 矢量网络分析仪,采用矩形波导法测量带有缺陷的左手材料样品的 X 波段(8—12 GHz)透射行为,矩形波导的横截面尺寸为 22.86 mm × 10.16 mm. 将待测样品沿波传播的方向置入波导中,SRRs 所在平面平行于波导侧壁,测量微波透射随频率的变化关系(详细的测量装置见文献[17]).

3. 实验结果及讨论

3.1. 点缺陷样品测量结果

以 1.0/2.2 SRRs 与 9.9/0.5 金属铜线组合为结构单元的基底三维左手材料,当引入不同点缺陷时的微波透射曲线见图 2(a). 图 2(a)中,点缺陷的存在对谐振峰的谐振频率和谐振强度均有一定影响. 定义谐振峰峰值点所对应的频率为谐振峰的谐振频率,谐振强度用谐振峰高度值表征,取谐振峰基线为 -75 dB. 定义谐振峰 1/2 峰高处所对应的谐振峰宽度为通频带宽. 由图 2(a)可见,当引入点缺陷时,谐

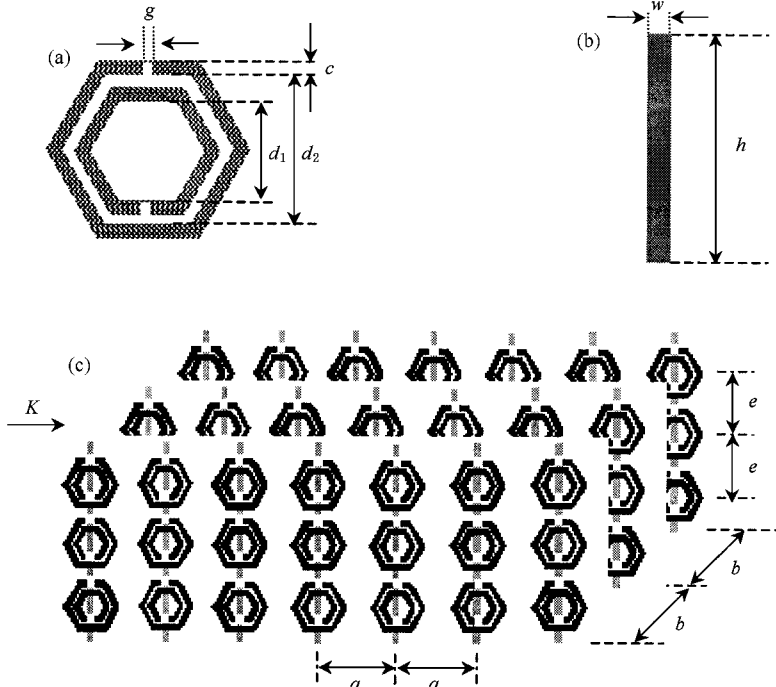


图 1 刻蚀法制备的样品示意图 (a) SRR (b) 金属线 (c) 三维左手材料样品

振峰的通频带宽由无缺陷时的 720 MHz 变化为引入 1.0/2.6 SRR 点缺陷时的 630 MHz.

为了更深入地研究点缺陷谐振环的尺寸对谐振峰的影响,以点缺陷谐振环与基底谐振环的外环内切圆直径比 λ 为横坐标,谐振峰谐振频率、谐振强度为纵坐标作图(图 2(b)).由图 2(b)可见,以 1.0/2.2 SRRs 与 9.9/0.5 金属铜线组合为结构单元的基底三维左手材料样品中引入空位,1.0/2.0, 1.0/2.4 和 1.0/2.6 点缺陷 SRR 时,谐振峰谐振强度下降,由无缺陷时的 32.2 dB 下降至 1.0/2.4 SRRs 点缺陷存在时的 26.2 dB.当引入 1.0/2.4 点缺陷时谐振频率红移 120 MHz,引入其他尺寸点缺陷谐振频率变化不明显.

3.2. 线缺陷样品测量结果

以 1.0/2.2 SRRs 与 9.9/0.5 金属铜线的组合为结构单元的基底三维左手材料,当引入不同尺寸缺陷谐振环构成的线缺陷 I, II 和 III 时的微波透射曲线见图 3(a),图 4(a)和图 5(a).由图 3(a),图 4(a)

和图 5(a)可见,线缺陷的存在对谐振峰的谐振频率和谐振强度有一定影响.谐振峰的通频带宽由无缺陷时的 720 MHz 变化为 (i) 引入 1.0/2.4 SRRs 线缺陷 I 时的 540 MHz (ii) 引入 1.0/2.6 SRRs 线缺陷 II 时的 420 MHz 和引入 1.0/2.4 SRRs 线缺陷 II 时的 810 MHz (iii) 引入 1.0/2.6 SRRs 线缺陷 III 时的 690 MHz 和引入 1.0/2.4 SRRs 线缺陷 III 时的 870 MHz.

为了更深入地研究线缺陷谐振环的尺寸对谐振峰的影响,以线缺陷谐振环与基底谐振环的外环内切圆直径比 λ 为横坐标,谐振峰谐振频率、谐振强度为纵坐标作图(图 3(b),图 4(b),图 5(b)).

由图 3(b)可见,以 1.0/2.2 SRRs 与 9.9/0.5 金属铜线的组合为结构单元的基底三维左手材料中引入线缺陷 I,即引入沿波导管高方向的线缺陷空位、1.0/2.0 和 1.0/2.4 SRRs 时,谐振峰谐振强度有所下降,由无缺陷时的 32.2 dB 降至 1.0/2.4 SRRs 线缺陷 I 存在时的 21.2 dB.线缺陷 I 的引入使谐振峰谐振频率发生蓝移.

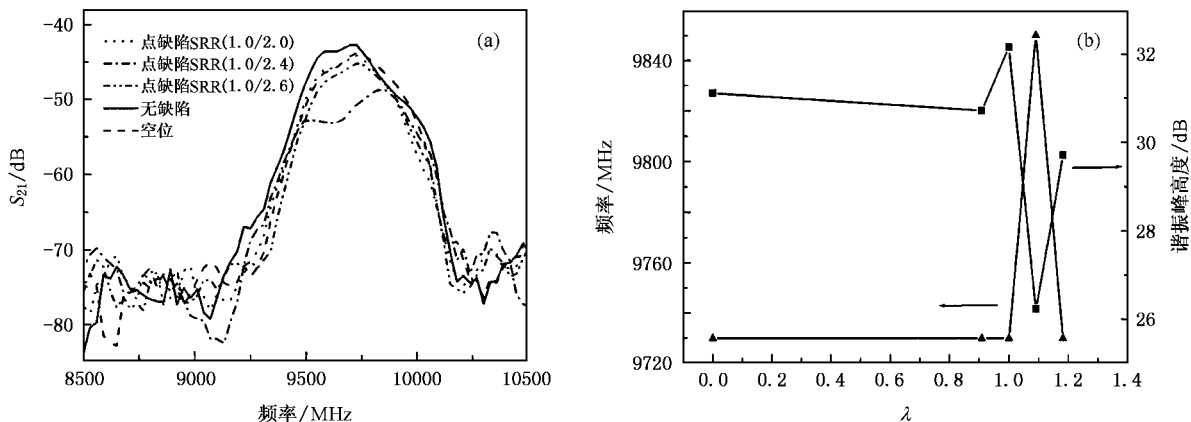


图 2 点缺陷样品的测量结果 (a)微波透射曲线,(b) S_{21} 参量及谐振频率随 λ 的变化曲线

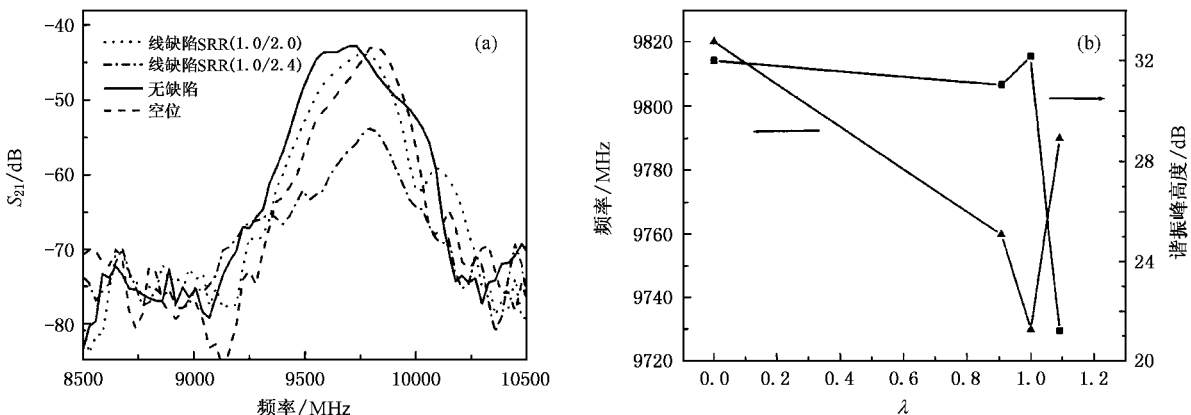


图 3 线缺陷 I 样品的测量结果 (a)微波透射曲线,(b) S_{21} 参量及谐振频率随 λ 的变化曲线

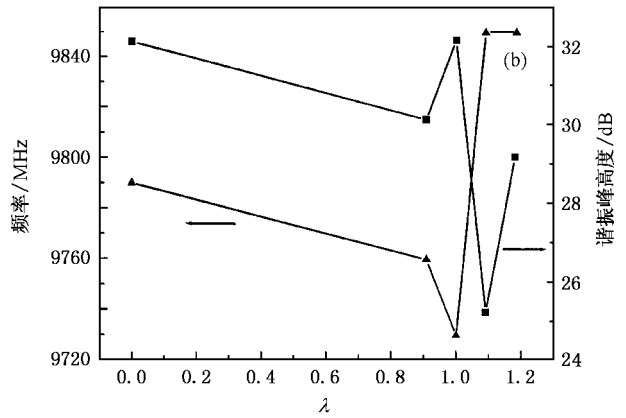
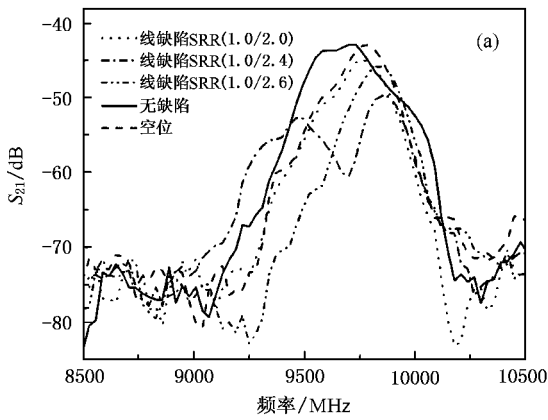


图4 线缺陷Ⅱ样品的测量结果 (a)微波透射曲线,(b) S_{21} 参量及谐振频率随 λ 的变化曲线

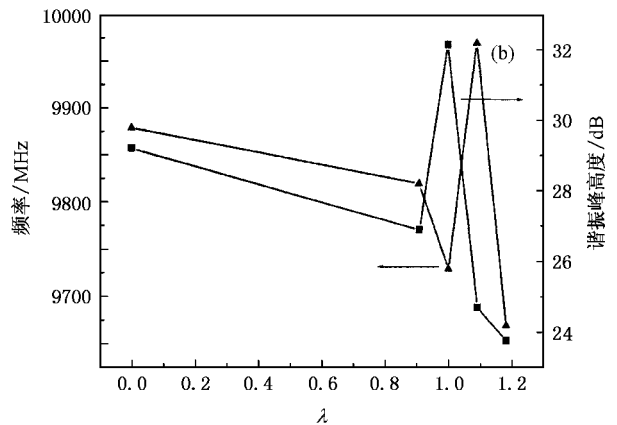
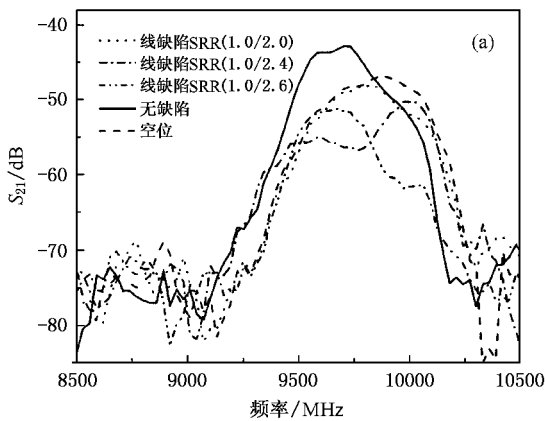


图5 线缺陷Ⅲ样品的测量结果 (a)微波透射曲线,(b) S_{21} 参量及谐振频率随 λ 的变化曲线

由图4(b)可见,以1.0/2.2 SRRs与9.9/0.5金属铜线的组合为结构单元的基底三维左手材料中引入线缺陷Ⅱ,即引入沿波导管宽方向的线缺陷空位,1.0/2.0,1.0/2.4和1.0/2.6 SRRs时,谐振峰谐振强度有所下降,降至1.0/2.4 SRRs线缺陷Ⅱ存在时的25.2 dB.线缺陷Ⅱ的引入使谐振峰谐振频率发生蓝移.

由图5(b)可见,以1.0/2.2 SRRs与9.9/0.5金属铜线的组合为结构单元的基底三维左手材料中引入线缺陷Ⅲ,即引入沿波导管长边方向的线缺陷空位,1.0/2.0,1.0/2.4和1.0/2.6 SRRs时,谐振峰谐振强度有所下降,降至1.0/2.6 SRRs线缺陷Ⅲ存在时的23.8 dB.线缺陷Ⅲ对谐振峰的谐振频率影响如下:当 $\lambda < 1$ 时,谐振峰谐振频率发生蓝移;当 $\lambda > 1$ 时,谐振峰谐振频率红移和蓝移的情况都存在.

3.3. 讨 论

微波段三维左手材料以SRRs与金属铜线的组

合为结构单元,通过空间周期排列形成.无缺陷时,左手材料各结构单元通过电磁耦合形成稳定的电磁谐振状态,谐振峰有固定的谐振频率、谐振强度以及通频带宽.点缺陷的引入破坏了材料结构单元的周期性,形成新的谐振条件,从而导致谐振峰的谐振频率、谐振强度及通频带宽发生改变;引入1.0/2.4点缺陷时谐振强度下降了6.0 dB,相当于原来数值的18.6%;引入1.0/2.4点缺陷时谐振频率蓝移120 MHz;引入不同尺寸的点缺陷,通频带宽在630—720 MHz范围变化.线缺陷由多个相同尺寸的SRRs按一定取向排列构成,与点缺陷相比,其对材料的周期性破坏较大,从而线缺陷使得谐振峰的变化也较大;引入1.0/2.4线缺陷Ⅰ时谐振强度下降了11.0 dB,相当于原来数值的34.1%;引入1.0/2.6线缺陷Ⅲ时谐振频率红移60 MHz,引入1.0/2.4线缺陷Ⅲ时谐振频率蓝移240 MHz;引入不同尺寸、取向的线缺陷,通频带宽在420—870 MHz范围变化.缺陷的存在破坏了材料结构的周期性,导致谐振峰的谐振

强度、谐振频率及通频带宽发生改变。

通过实验,我们发现缺陷的引入使材料的谐振峰发生变化,从电磁波传播的角度看,缺陷的引入改变了材料电磁波透过频率、透过强度以及透过频宽;从“左手”特性的角度看,这种变化将改变材料可能存在的“左手”特性。通过缺陷的引入,从一定程度上实现了对左手材料微波响应行为的调控。当然,还需进一步从理论上提出缺陷存在时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

本文研究了三维左手材料的缺陷效应,采用波导法测量了点缺陷和线缺陷对三维左手材料 X 波段微波透射行为的影响。实验得到以下结果。

1)以 1.0/2.2 六边形 SRRs 与 9.9/0.5 金属铜线的组合为结构单元的基底三维左手材料与电磁波作

用形成谐振峰,在谐振峰频率区域内材料呈现“左手”特性。

2)基底材料中引入不同尺寸点缺陷时,谐振峰强度最多下降 6 dB,相当于原来数值的 18.6%,谐振频率蓝移 120 MHz,通频带宽在 630—720 MHz 范围变化。

3)基底材料中引入不同尺寸 SRRs 构成三种取向的线缺陷时,谐振峰强度最多降低了 11 dB,相当于原来数值的 34.1%,谐振频率红移和蓝移的情况都存在,红移最多为 60 MHz,蓝移最多为 240 MHz,通频带宽在 420—870 MHz 范围变化。

4)材料中引入线缺陷时的缺陷效应大于点缺陷的情形。

缺陷的存在破坏了材料结构的周期性,改变了谐振条件,从而使其谐振峰发生变化。缺陷效应的研究对于可调控左手材料的实现有着重要的指导意义。

-
- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J *et al* 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **47** 2075
- [4] Shelby R, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [5] Smith D R, Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
- [6] Smith D R, Padilla W J, Vier D C *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [7] Luo C Y, Ibanescu M, Johnson S G *et al* 2003 *Science* **299** 368
- [8] Smith D R, Schultz S 2002 *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [9] Gay-Balmaz P, Maccio C, Martin O J F 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2896
- [10] Seddon N, Bearpark T 2003 *Science* **302** 1537
- [11] Patanjali V P, Wentao T L, Plarenta V *et al* 2003 *Nature (London)* **426** 404
- [12] Luo C Y, Ibanescu M, Johnson S G *et al* 2003 *Science* **299** 368
- [13] Jiang H, Chen H, Li H *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 5386
- [14] Povinelli M L, Johnson S G, Joannopoulos J D *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 1069
- [15] Painter O, Lee R K, Scherer A *et al* 1999 *Science* **284** 1819
- [16] Yokoyama H 1992 *Science* **256** 66
- [17] Zhao Q, Zhao X P, Kang L *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵 乾、赵晓鹏、康 雷等 2004 物理学报 **53** 2206]
- [18] 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]

Effect of nonuniform-defect split ring resonators on the left-handed metamaterials^{*}

Luo Chun-Rong Kang Lei Zhao Qian Fu Quan-Hong Song Juan Zhao Xiao-Peng[†]

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

(Received 29 July 2004 ; revised manuscript received 3 November 2004)

Abstract

We have investigated the defect effect in three-dimensional (3-D) left-handed metamaterials , consisting of an array of repeated unit cells of copper wires and hexagon split ring resonators (SRRs) on strips of standard circuit board material . By measuring the X-band transmission through this metamaterial with different point- and linear-defected SRRs , we find that the resonance frequency , its value and passband of transmission peaks , changes markedly . It is suggested that such tunable left-handed properties may arise from the symmetry breaking of SRRs in the metamaterials .

Keywords : left-handed metamaterials , defect effect

PACC : 4270Y , 6170E , 2570E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation for Outstanding Young Researchers of China (Grant No. 50025207) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50272054) , and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB719805) .

[†] Corresponding author . Tel 029-88495950 , E-mail : xpzhao@nwpu.edu.cn