

缺陷对左手材料内部能量分布的影响*

罗春荣 介晓永 赵乾 赵晓鹏**

西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072

摘要 研究了以金属铜六边形开口谐振环(split ring resonators, SRRs)和铜线为基本结构单元的左手材料内部能量分布状态. 利用波导测量线法测量了受X波段(8—12GHz)微波作用时左手材料及含空位和线缺陷左手材料内部电磁场能量分布. 实验发现左手材料样品只对其谐振频率9.6GHz及附近发生介电响应, 而对非谐振区频率几乎没有响应. 引入空位和线缺陷后, 导致左手材料内部的电磁场能量幅值整体减小, 最大下降幅度达23%. 认为缺陷的引入破坏了左手材料的周期性有序结构, 导致SRRs和铜线间的相互作用改变, 从而引起其内部电磁场能量变化.

关键词 左手材料 缺陷 电磁场能量分布

1968年, 前苏联科学家 Veselago 理论上研究了在一定电磁波频率范围内介电常数和磁导率能同时为负的材料, 提出这种材料能表现出反常 Doppler 效应、逆 Черенков 辐射等一系列奇异性, 并指出电场矢量、磁场矢量和波矢量三者服从左手定则, 称之为“左手材料(left-handed metamaterials, LHMs) [1]”. 1996年, Pendry 等相继提出理论模型, 采用周期性排列金属线(Wires) [2] 和金属开口谐振环(SRRs) [3] 分别实现材料的负介电常数和负磁导率特性. 随后, Shelby 和 Smith 等在此基础上探索并首次实现了微波段左手材料的人工制备, 同时还完成了该种左手材料的楔形棱镜的负折射率验证 [4-6]. 左手材料领域迅速成为国际上的研究热点. 近期, 不同外形的人工左手材料陆续见诸报端, 除了周期性排列金属线和金属开口谐振环组成的复合材料外, Ω 形金属结构与 S 形谐振结构等在微波频段均能表现出左手性质 [7,8].

上述实验均是 LHMs 的外场电磁响应行为, 而对 LHMs 内部的电磁行为研究的不多. 最近, Cummer 和 Popa 通过理论计算和实验研究了以

Wires 和 SRRs 为结构单元的 LHMs 内部的部分电磁行为, 发现在 LHMs 内微波场相速度矢量与能流矢量是反向的, 这在一定程度上反映了 LHMs 的特殊性质 [9], 并且在 LHMs 内部可以测量到 LHMs 外场不易探测的电磁参数. 前面我们已报道了在微波 X 波段一维和二维负磁导率材料及三维左手材料的缺陷效应, 发现缺陷的存在破坏了材料的周期性结构, 引起其谐振峰的谐振强度、谐振频率和通频带宽变化, 从而调谐材料特性 [10-12]. 然而对 LHMs 引入缺陷后内部电磁行为的研究至今未见报道. 本文利用波导测量线法实验研究了含缺陷 LHMs 内部的能量分布状态, 确定了空位及线缺陷对 LHMs 样品内部电磁场分布的影响.

1 样品制备与实验

在 0.6 mm 厚的环氧酚醛玻璃纤维板上利用电路板刻蚀技术制备了一系列等间距的金属铜正六边形 SRRs 和铜线, 铜层厚度 0.02 mm. 铜线的长、宽分别为 $h=9.9$ mm 和 $w=0.5$ mm. 单个 SRR 可由内外环的内切圆直径 d_1, d_2 , 线宽 c 与开口间距 g 描述,

2005-07-13 收稿, 2006-01-23 收修改稿

* 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), 航空基金(批准号: 05G53045)和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2004CB719805)资助项目

** 通讯作者, E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

其中 $d_1 = 1.0 \text{ mm}$, $d_2 = 2.2 \text{ mm}$, $c = 0.3 \text{ mm}$ 和 $g = 0.3 \text{ mm}$. 我们定义 $y-z$ 平面内的三个 SRR 和一条铜线为一个结构单元. 本文制备的样品为: 在纤维板上沿波矢量 K 方向(y 方向)有 8 个等间距的结构单元, 沿 x 方向为间距 5.0 mm 的两排, 组成周期性有序结构, 样品周期常数 $a = 5.0 \text{ mm}$, $b = 3.5 \text{ mm}$. 在样品

中引入两种不同类型的缺陷: (i) 在两排中部的相同位置处, 同时分别取走 $y-z$ 平面内的一个 SRR 构成空位缺陷; (ii) 在两排中部的相同位置处, 同时分别取走 $y-z$ 平面内的三个 SRR 构成线缺陷(如图 1(a), (b)).

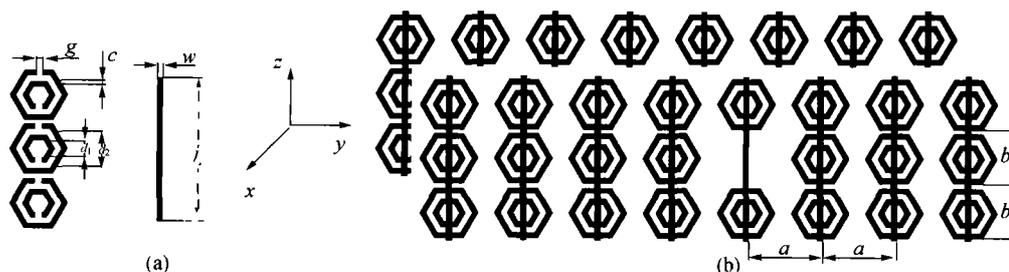


图 1 实验样品示意图

(a) 结构单元 (三个 SRR 和一条铜线); (b) 带空位缺陷的左手材料样品

在微波矢量网络分析仪(AV3618)上测量一系列样品在微波 X 波段的 S_{12} 参数. 参考 S_{12} 参数, 利用波导测量线法测量一系列样品内部的电磁场能量分布, 测量装置如图 2 所示. 两类测量装置的矩形波导横截面尺寸均为 $22.86 \text{ mm} \times 10.16 \text{ mm}$, 将待测样品沿波矢量 K 方向放入波导中, 铜线和电场矢量平行于 z 向, SRRs 在 $y-z$ 平面内对横向的磁场矢量响应.

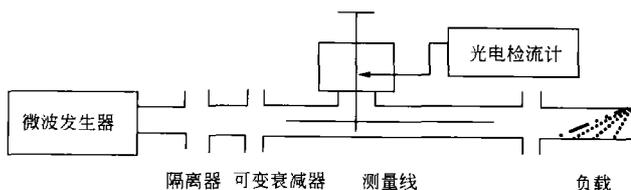


图 2 测量装置示意图

2 实验原理、结果与讨论

利用波导测量线法可以测量样品内的电磁场能量. 本文只需测量电磁场能量的相对大小, 而不必测量电磁场能量的绝对值, 这时可用晶体二极管检波器来检测. 晶体二极管检波器的伏安特性是非线性的, 其输出电流 I 与微波电场 E 之间的关系为

$$I = qE^n,$$

在小信号时, $n=2$, 即平方检波, 晶体二极管的输出电流与微波电磁场的功率成正比.

在矢量网络分析仪上测量一系列样品的 S_{12} 参数, 如图 3. 定义谐振峰值点对应的频率为谐振峰的谐振频率. 由图 3 知, 无缺陷、含空位和含线缺陷 3 类样品在 $9.2-10.2 \text{ GHz}$ 频段存在左手通带, 谐振频率为 9.6 GHz . 然后将一系列样品依次置于波导测量线中, 选定信号源发生频率, 利用同轴探针测量样品内的电磁场能量分布.

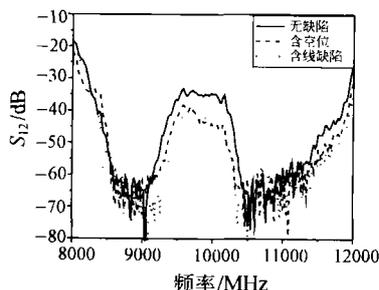


图 3 无缺陷、含空位与线缺陷左手材料样品的微波透射曲线

2.1 左手材料内部能量场状态

首先测量了无样品状态下, 波导测量线中空气介质的电磁场能量随位置的变化关系. 测量发现, 空气介质中电磁场能量随位置的变化幅度很小, 对样品内部场分布的影响可以忽略.

然后将待测样品依次放入波导测量线中, 第一个结构单元的中心位置为 28 mm, 最后一个结构单元的中心位置为 63 mm, 引入缺陷的位置在 48 mm 处. 首先选取信号源发生频率与样品的谐振峰的谐振频率相同, 即 9.6 GHz, 移动同轴探针到测量线的中间部位, 调节可变衰减器和调谐活塞使光电检流计显示最大, 此时波导测量线处于最佳工作状态. 其次, 探针依次置于样品每个结构单元的中心位置处, 在微波 X 波段每 0.1 GHz 选取信号源发生频率, 测量电磁场能量随信号源发生频率和样品位

置的变化关系, 3 类样品的三维测量结果分别如图 4(a), (b) 和 (c) 所示. 由图 4 可知, 3 类样品都对谐振频率 9.6 GHz 及附近的 9.4, 9.5, 9.7, 9.8 和 9.9 GHz 响应, 而对 9.4—9.9 GHz 频段之外的非谐振区频率几乎没有响应, 并都在 9.6 GHz 处出现能量峰值. 在文献[8]图 3 中, 在其所用样品的谐振频率处测量到与负折射率相关的能量峰, 因此样品的谐振峰的谐振频率是研究左手材料性质的重要参量之一.

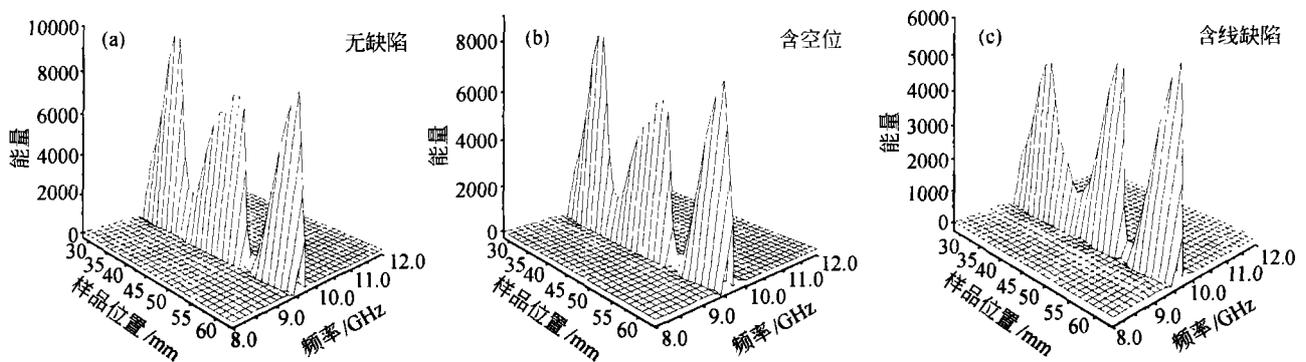


图 4 3 类左手材料样品内部电磁场能量分布示意图

(a) 无缺陷; (b) 含空位; (c) 含线缺陷

2.2 点缺陷与线缺陷引起的能量变化

当波导测量线信号源发生频率选取样品左手通带内频率 9.6 GHz 时, 以金属 SRRs 和铜线组合为结构单元的左手材料, 取走某些部位的 SRR 构成的空位缺陷和线缺陷样品内部的电磁场能量归一化结果如图 5(a) 所示. 由图 5(a) 知, 无缺陷样品、含空位缺陷样品和含线缺陷样品内部的电磁场能量依

次减小, 即对两类缺陷, 取走 SRR 的数量越多, 样品内部的电磁场能量下降的幅度越大. 在归一化最大值 34 mm 处, 最大下降幅度为 23%. 图 5(b) 为由图 4(a), (b) 和 (c) 得到的缺陷引入位置处 3 类样品内部电磁场能量与频率的变化关系, 与图 5(a) 比较可知两项测量结果一致. 缺陷的引入使样品内部的电磁场能量整体下降.

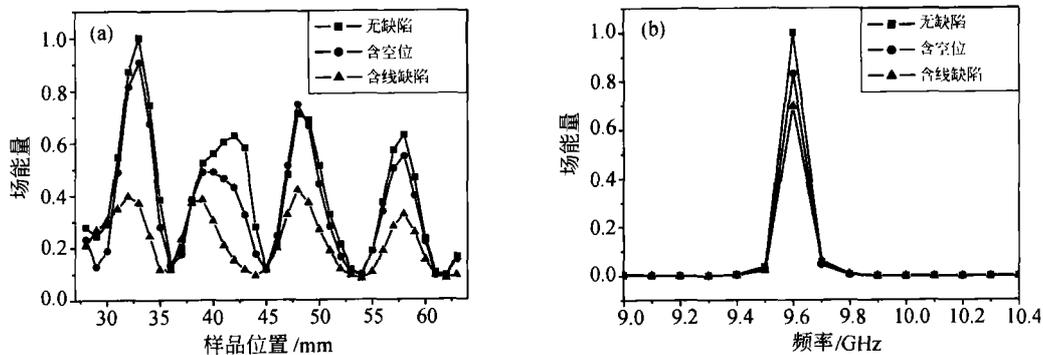


图 5 3 类左手材料样品内部电磁场能量变化关系

(a) 能量与样品位置关系; (b) 能量随频率变化关系

当波导测量线信号源发生频率选取样品左手通带频段之外的频率时,测量发现样品内部电磁场能量几乎为零.因此,样品对非谐振区频率不发生介电响应,这与2.1的实验结果吻合.

2.3 材料内部不同位置能量分布

由图5(a)发现,归一化后在样品33 mm处达到最大.在缺陷引入位置48 mm处,含空位缺陷和含线缺陷样品的场能量依次由无缺陷样品的0.7变化至0.74和0.33.在离缺陷引入位置48 mm较远的43 mm处,场能量由无缺陷的0.58降至0.33和0.12.

能量随位置分布呈周期性变化,周期约为10 mm,样品相邻结构单元内电磁场能量呈强-弱-强变化分布.

信号源发生频率9.6 GHz处,微波在自由空间的波长为31.25 mm,约是样品沿波矢量 K 方向周期常数5 mm的6倍,此时样品近似为一种连续均匀介质.在每个结构单元内,电磁场能量连续变化.

2.4 讨论

本文是通过在样品中取走SRRs引入缺陷的,缺陷的引入破坏了样品的周期性结构,使样品内部的电磁场能量衰减.无缺陷时,SRRs间的电磁场耦合作用较强,SRRs和铜线的相互作用使左手材料的电磁场能量较大.当将样品中一定位置的SRR取走形成缺陷时,SRRs的周期性分布遭到破坏,SRRs之间的平均间距变大,导致SRRs间的耦合作用变弱,SRRs与铜线间的相互作用减弱,从而使左手材料内部的电磁场能量衰减.线缺陷与空位缺陷相比,前者对样品的周期性破坏更大,对样品内电磁场能量的分布影响随之更大.引入缺陷对改变左手材料内的电磁场能量分布具有重要意义.

3 结论

本文研究了含缺陷左手材料内部的能量分布状态.采用波导测量线法测量了缺陷对样品内部电磁场能量分布的影响.得到以下结果:

(1) 无缺陷、含空位和线缺陷3类样品在9.2—10.2 GHz频段存在左手通带,谐振频率约为9.6 GHz.

(2) 3类样品都只对谐振频率9.6 GHz及附近的频率响应,而对9.4—9.9 GHz频段之外的非谐

振区频率几乎没有响应,并且都在9.6 GHz处出现能量峰值.

(3) 无缺陷、含空位和线缺陷3类样品内部的电磁场能量依次减小.缺陷的引入使样品内部的电磁场能量整体下降,最大下降幅度达23%.

(4) 样品内部能量随位置分布呈周期性变化,周期约为10 mm,样品相邻结构单元内电磁场能量呈强-弱-强变化分布.

缺陷的引入破坏了左手材料的周期性有序结构,SRRs和铜线间的电磁相互作用变弱,从而引起其内部电磁场能量降低.

参 考 文 献

- 1 Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability. *Sov Phys Usp.* 1968, 10(4): 509—514
- 2 Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Phys Rev Lett.* 1996, 76: 4773—4776
- 3 Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47: 2075—2084
- 4 Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Phys Rev Lett*, 2000, 84: 4184—4187
- 5 Shelby R A, Smith D R. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 489—491
- 6 Shelby R, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 2001, 292(5514): 77—79
- 7 HuangFu J T, Ran L X, Chen H S, et al. Experimental confirmation of negative refractive index of a metamaterials composed of Ω -like metallic patterns. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 1537—1539
- 8 Chen H S, Ran L X, HuangFu J T, et al. Negative refraction of a combined double S-shaped metamaterial. *Phys Rev E.* 2004, 70: 057605(1—4)
- 9 Steven A. Cummer, Bogdan-Ioan Popa. Wave measured inside a negative refractive index metamaterial. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 4564—4566
- 10 赵 乾, 赵晓鹏, 康 雷, 等. 一维负磁导率材料中的缺陷效应. *物理学报*, 2004, 53(7): 2206—2211
- 11 康 雷, 赵 乾, 赵晓鹏. 二维负磁导率材料中的缺陷效应. *物理学报*, 2004, 53(10): 3379—3382
- 12 罗春荣, 康 雷, 赵 乾, 等. 缺陷对三维左手材料的影响. *物理学报*, 2005, 54(4): 1607—1611