

谐振频率可调的环状开口谐振器结构及其效应^{*}

张富利 赵晓鹏[†]

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)
(2006 年 11 月 14 日收到, 2007 年 1 月 8 日收到修改稿)

理论和实验研究表明, 开口谐振环 (SRRs) 中可以激励磁谐振从而实现负磁导率. 通过在 SRRs 结构中引入与其开口边平行的金属短杆设计并制备了新的磁谐振单元, 采用波导法系统研究了短杆对 SRRs 和左手材料的微波透射特性以及左手效应的影响. 实验和数值模拟表明, 金属短杆和 SRRs 开口边形成附加电容, 导致 SRRs 开口电容增大从而引起谐振频率降低. 随短杆长度 l 和短杆与 SRRs 间距 d 的增大, SRRs 谐振频率也随之减小和增加. 短杆的加入不影响 SRRs 的负磁导率特性, 改变短杆与 SRRs 间距 d 可实现左手材料特征峰和 $\mu' < 0$, ϵ' 反谐振频段以及 $n' < 0$ 频段的调控.

关键词: 开口谐振环, 金属短杆, 调控, 左手材料

PACC: 4270Y, 4745E

1. 引 言

左手材料 (left-handed metamaterials, 简记为 LHMs) 是一种介电常数 ϵ 和磁导率 μ 同时为负的人工周期材料^[1], 因具有反常 Doppler 效应^[2]、反常 Cherenkov 效应^[3]、完美透镜^[4]以及负折射效应^[5]等奇异特性, 成为应用物理、光学以及材料等领域的研究热点.

已经实现的左手材料是由 SRRs 和金属线阵列组合而成的周期结构. Pendry 等^[6]理论研究表明周期性排列的金属线结构表现出类等离子体行为, 当电磁波的频率小于等离子频率 ω_p 时, 该媒质具有负介电常数^[6], 而周期性排列的 SRRs 在频率稍大于磁谐振频率 ω_0 的极窄区域内具有负磁导率^[7]. 自 2001 年 Smith 等^[8,9]成功地制备微波段左手材料之后, 人们在左手材料的特性与机理等方面进行了卓有成效的研究. Gay-Balmaz 等^[10]通过实验和数值模拟研究了单个和多个相互耦合 SRRs 的电磁谐振行为. Aydin 等^[11]报道了 SRRs 排列的无序性对左手效应的影响. Koschny 等^[12]通过数值模拟研究了 SRRs 与金属线阵列的相互影响, 并提出了判别周期结构

是否为真正左手材料的方法. Dong 等^[13]利用全波分析法模拟了左手材料的负折射效应^[13]. 本课题组首先设计了六边形 SRRs 并研究了其缺陷效应对左手材料特性的影响, 取得了有益的结果^[14-18].

左手材料特征峰取决于 SRRs 磁谐振频率, 深入研究 SRRs 的磁谐振行为对左手材料的制备具有重要的科学意义和应用价值. 现已发表的研究结果主要集中于环的大小、开口、线宽和内外环间距等几何参数的影响^[19,20]. 本文通过在通常的 SRRs 中引入平行于开口边的金属短杆设计了新的谐振单元, 研究 SRRs 和左手材料由于金属短杆的加入引起微波透射特性及左手效应的变化. 利用电路板刻蚀技术制备了 SRRs 和左手材料样品, 采用波导法系统研究了金属短杆位置、短杆与 SRRs 间距以及短杆长度等参数对 SRRs 谐振频率和左手材料特征峰的影响, 并通过电磁参数提取程序分析了短杆对左手材料的 $\mu' < 0$, ϵ' 反谐振频段以及 $n' < 0$ 频段的调谐作用.

2. 样品制备及测试

实验采用的磁谐振单元是由通常的 SRRs 和平

^{*} 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2004CB719805) 国家自然科学基金 (批准号: 50632030) 和航空科学基金 (批准号: 05G53045) 资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

行于其开口边或底边的短杆(short wire)组成的,如图 1(a)(b)所示. 利用电路板刻蚀技术制备了 SRRs 和左手材料样品. 采用的 SRRs 内外环直径分别为 1.0 和 2.2 mm, 线宽 $c = 0.4$ mm, 开口 $g = 0.25$ mm. 短杆线宽 $w = 0.2$ mm, 利用 l 和 d 分别表征短杆的长度以及短杆与 SRRs 的间距. 左手材料是晶格长度为 5 mm 的一维结构. 如图 1(c)所示, SRRs 和金属线分别位于介质基板的两侧, 金属线长度为 9.9 mm, 线宽为 0.5 mm. 电路板材料为 1.5 mm 厚的聚四

氟乙烯纤维板($\epsilon_r = 2.65$).

采用矩形波导法系统研究了金属短杆位置、短杆与 SRRs 间距 d 以及短杆长度 l 对单个 SRRs 磁谐振频率以及左手材料特性频段的影响. 实验在 X 波段(8—12 GHz)进行, 使用的矩形波导为 BJ100(横截面积为 22.86 mm \times 10.16 mm). 待测样品沿波的传播方向置入波导中, 电磁波磁场垂直于 SRRs 平面, 电场平行于 SRRs 开口连线方向. 具体测量环境详见文献 [15].

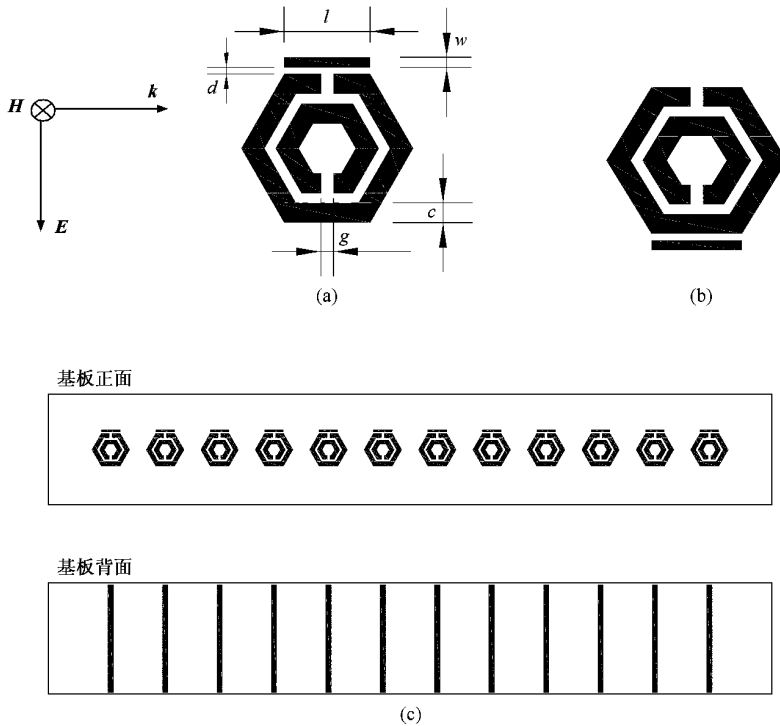


图 1 样品示意图 (a)短杆位于 SRRs 开口附近 (b)短杆位于 SRRs 底边附近, (c)左手材料

3. 实验结果及讨论

3.1. SRRs 谐振频率的调控

3.1.1. 金属短杆位置

设计并制备了短杆位于 SRRs 开口附近和短杆位于 SRRs 底边附近两种样品, 采用的短杆长度 $l = 2.0$ mm, 间距 $d = 0.05$ mm, 分别对其微波透射特性进行了实验测量和数值模拟, 并与通常的 SRRs 微波透射特性进行了对比, 结果如图 2 所示. 图 2(a)是通常的 SRRs 和短杆位于不同位置时实验测量的微波透射曲线. 由图 2(a)可见, 单个通常的 SRRs 的

微波透射曲线在 11.14 GHz 附近出现了一个波谷, 说明 SRRs 发生了谐振, 其有效磁导率在该频点附近可能为负. 当短杆位于 SRRs 开口附近时, 其谐振频率降至 10.60 GHz, 与通常的 SRRs 相比谐振频率减小了 0.54 GHz. 当短杆位于 SRRs 底边时, SRRs 谐振频率仍位于 11.14 GHz, 其微波透射曲线除谐振峰强度稍有降低外(由 -5.65 dB 变为 -4.98 dB)几乎与通常的 SRRs 的微波透射曲线完全重合. 说明短杆位于 SRRs 底边对其谐振频率没有影响. 此外, 我们利用 CST Microwave Studio 软件对金属短杆位置的影响进行了数值模拟. 图 2(b)是通常的 SRRs 和短杆位于不同位置的数值模拟微波透射曲线. 由图 2(b)可见, 单个通常的 SRRs 谐振频率位于 11.0 GHz,

当短杆位于 SRRs 开口附近时, SRRs 谐振频率降至 10.43 GHz, 减小了 0.57 GHz, 而当短杆位于 SRRs 底边附近时, SRRs 谐振频率则没有变化. 数值模拟与实验结果完全符合.

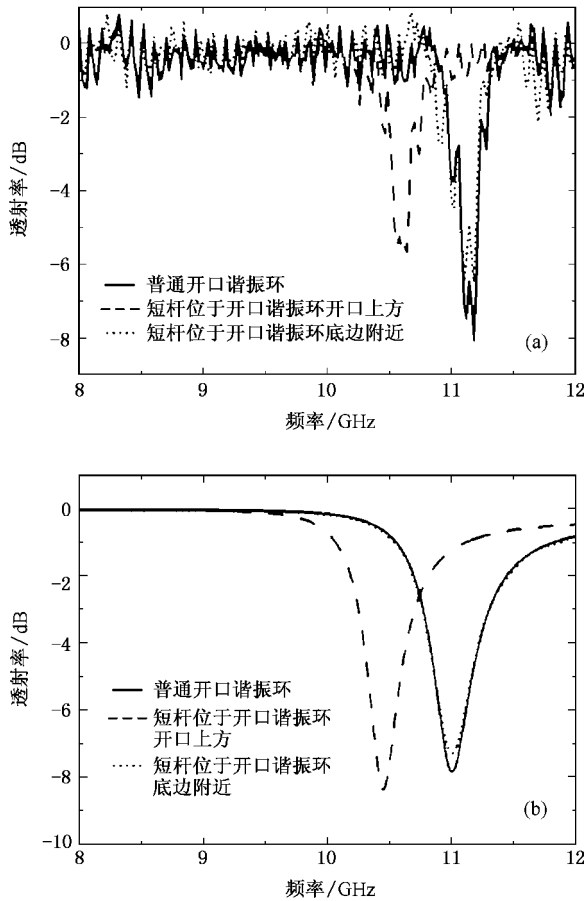


图2 通常的 SRRs 和短杆位于不同位置时 SRRs 微波透射曲线 (a) 实验测量 (b) 数值模拟

为进一步研究短杆对 SRRs 谐振频率影响的机理, 我们利用 CST Microwave Studio 软件对 SRRs 谐振频率处表面电流进行了监控. 图 3(a) 是短杆位于 SRRs 开口附近时, $f = 10.43$ GHz 的表面电流分布. 由图 3(a) 可见, 在外加磁场的驱动下, SRRs 表面电流呈环形分布, 且该环形电流的感应磁场与外加磁场方向相反. 短杆上的表面电流与 SRRs 开口边表面电流同向. 对图 3(a) 作进一步处理, 得到 SRRs 开口附近表面电荷分布示意图(图 3(b)). 从图 3(b) 可以看出, 开口的存在破坏了电荷原有的流动回路, 导致大量的异种电荷在 SRRs 开口的两边聚集, 在形成开口电容 C_g 的同时, 也在短杆与开口边之间形成了附加电容 C_f , SRRs 开口处的电容也由此变为

$$C'_g = C_g + C_f. \quad (1)$$

由(1)式可知, 短杆的加入造成 SRRs 开口处电容的增加, 导致 SRRs 总电容增大和谐振频率降低. 图 3(c) 和 (d) 分别是短杆位于 SRRs 底边附近, $f = 11.00$ GHz 时样品的表面电流分布和电荷分布. 由图 3(c) (d) 可见, 短杆与 SRRs 底边的表面电流流动方向相同, 短杆位于 SRRs 底边时, 两者之间没有形成有效电容, 短杆不能影响 SRRs 的谐振频率. 因此, 本文另一部分的工作主要研究位于 SRRs 开口边附近的短杆对其谐振频率的影响.

3.1.2. 间距 d 的影响

调节短杆与 SRRs 间距 d 制得一系列 SRRs, 并实验和数值模拟了其微波透射特性. 图 4 是 SRRs 谐振频率随间距 d 的变化关系. 由图 4 可见, 当 d 由 0.05 mm 以 0.10 mm 的步长渐增至 0.50 mm 时, SRRs 谐振频率由 10.6 GHz 逐渐向高频移至 11.0 GHz. 数值模拟结果也表明, SRRs 的谐振频率随 d 的增加而增大. 图 3(b) 中短杆与 SRRs 开口形成的附加电容器用平板电容器模型近似处理, 则 C_f 与 l 和 d 的关系可由下式表示:

$$C_f \propto l/d. \quad (2)$$

由此可以看出, 短杆与 SRRs 间距 d 的增大将导致附加电容 C_f 减小, 造成 SRRs 总电容降低, 致使 SRRs 的谐振频率向高频移动.

3.1.3. 短杆长度 l 的影响

图 5 是 SRRs 谐振频率随短杆长度 l 的变化关系. 实验和数值模拟结果均表明, SRRs 谐振频率随着 l 的增大渐向低频移动. 当 l 由 0.5 mm 以 0.5 mm 的步长渐增至 3.5 mm 时, SRRs 谐振频率由 11.08 GHz 逐渐减小为 10.458 GHz. 数值模拟结果显示 SRRs 谐振频率由 10.898 GHz 降至 10.35 GHz. 当 l 较小时 ($l \leq 2.0$ mm), 谐振频率下降幅度较大, 而当 l 进一步增加时 ($l > 2.0$ mm), 谐振频率下降幅度变小.

由(1)(2)式可知, 短杆长度 l 的增加将引起附加电容 C_f 的增大, 进而导致 SRRs 总电容的增大和谐振频率的下降. 当 l 小于 SRRs 开口边的长度 (1.73 mm) 时, C_f 随着 l 的增加呈线性变化. 当 l 大于开口边长度并进一步增加时, 由于 SRRs 外形的缘故, 短杆的两端与 SRRs 间距 d 也将增大, 导致附加电容 C_f 随 l 增大的变化增幅减小和 SRRs 谐振频率移动幅度降低.

3.2. 左手材料

为验证金属短杆在调节 SRRs 谐振频率时是否改变了其负磁导率的特性, 下面主要研究金属短

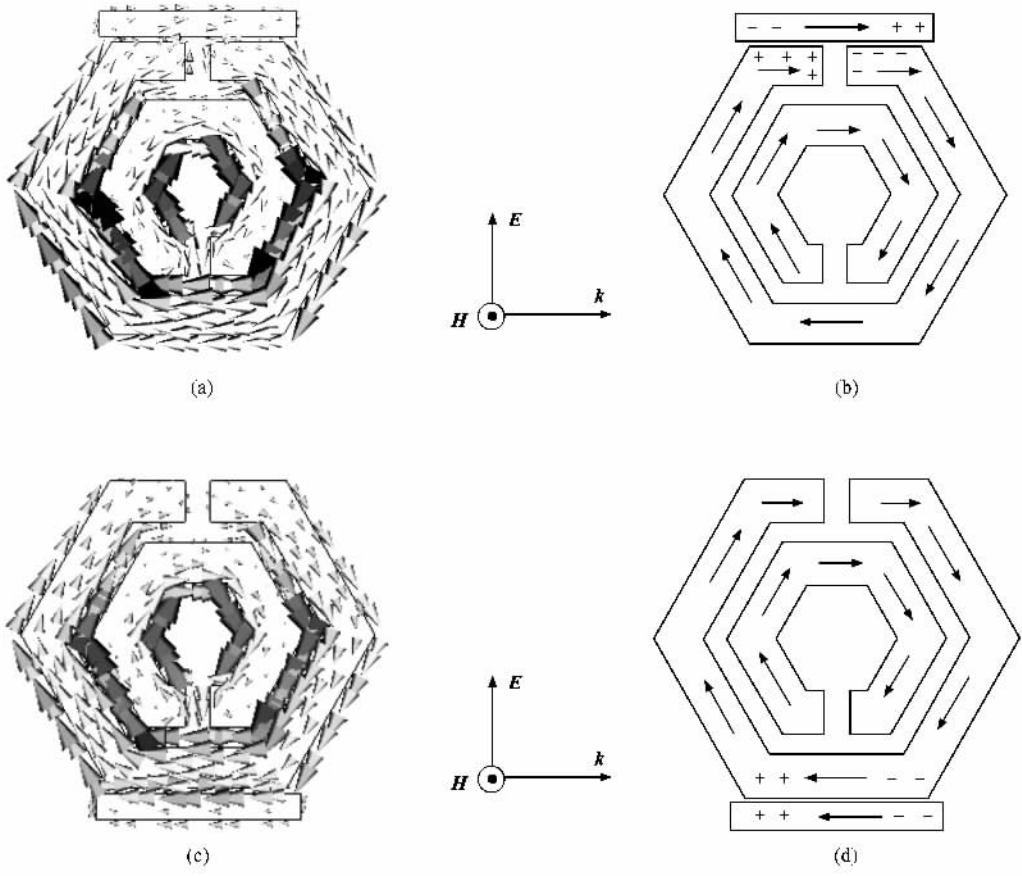


图3 短杆位于不同位置时,SRRs表面电流和表面电荷分布 (a) $f=10.43\text{ GHz}$,短杆位于SRRs开口附近时表面电流 (b) $f=10.43\text{ GHz}$ SRRs开口附近电荷分布 (c) $f=11.0\text{ GHz}$,短杆位于SRRs底边时表面电流 (d) $f=11.0\text{ GHz}$ SRRs底边附近电荷分布

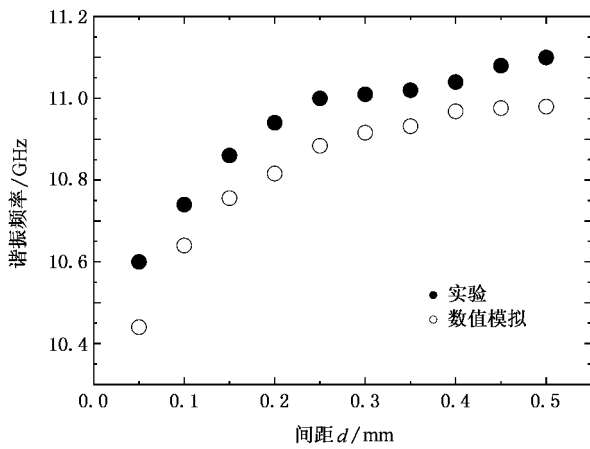


图4 当 $l=2.0\text{ m}$ 时,SRRs 谐振频率随 d 的变化关系

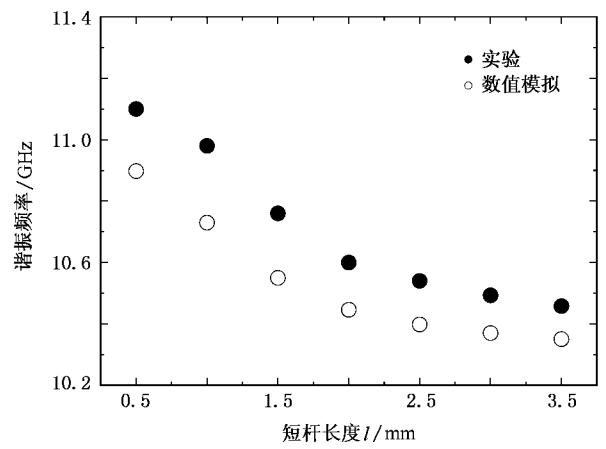


图5 当 $d=0.05\text{ mm}$ 时,SRRs 谐振频率与 l 的变化关系

杆对左手材料的特征峰及有效磁导率 μ' 、有效介电常数 ϵ' 以及折射率 n' 的影响.

3.2.1. 左手材料特征峰

图6是通常的左手材料(无金属短杆)和加入金

属短杆的左手材料的微波透射曲线.由图6可见,通常的左手材料微波透射曲线在 $10.70\text{--}11.32\text{ GHz}$ 出现了一个透射峰.由于金属线阵列在整个 X 波段都表现为禁带(图中未给出),而该透射峰恰好位于

SRRs 谐振频率的附近,且 SRRs 与金属丝为异面分布,避免了 SRRs 与金属丝间相互作用对周期结构特性的影响,因此可以判定该透射峰为左手特征峰.当周期结构引入金属短杆后,左手特征峰发生了明显的移动.当 $d = 0.05 \text{ mm}$ 时,左手特征峰出现在 $10.42\text{--}10.80 \text{ GHz}$,与通常的左手材料相比其特征峰红移了近 0.5 GHz .由于左手特征峰是材料的负磁导率和负介电常数共同作用的结果,特征峰的出现表明金属短杆的引入没有改变 SRRs 负磁导率特性.此外,当金属短杆与 SRRs 间距 d 由 0.05 mm 以 0.10 mm 的步长逐渐增至 0.45 mm 时,左手材料特征峰发生了明显的蓝移,由原来的 $10.42\text{--}10.82 \text{ GHz}$ 蓝移至 $10.64\text{--}11.20 \text{ GHz}$,蓝移幅度最高可达 0.42 GHz .

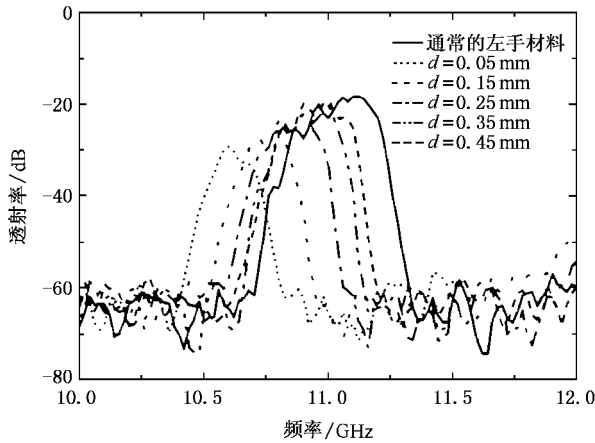


图6 通常的左手材料和加入金属短杆的左手材料的微波透射曲线

3.2.2. 左手材料电磁参数

通过对周期结构单元的散射参数分析获取有效磁导率 μ' 、有效介电常数 ϵ' 以及折射率 n' 是判别材料是否为真正的左手材料的重要方法^[21, 22].该方法要求激励波为横电磁波,实验需要在自由空间完成,这给实验测量带来了一定的困难.本文利用数值模拟得到结构单元的散射参数以及相位信息,并通过电磁参数提取程序^[21]获取材料的有效磁导率 μ' 、有效介电常数 ϵ' 以及折射率 n' .

图7是通常的左手材料和加入金属短杆的左手材料的 μ' 、 ϵ' 以及 n' 随频率变化曲线.由图7可见,通常的左手材料有效磁导率 μ' 在 $10.860\text{--}11.324 \text{ GHz}$ 频段为负值,其有效介电常数实部 ϵ' 在整个 X 波段($8\text{--}12 \text{ GHz}$)都小于零,且在 SRRs 谐振频段附近表现为反谐振.由文献^[23]可知,这是由于材料的

周期结构引起的,现象本身并不违反物理规律.折射率实部 $n' < 0$ 则位于 $10.43\text{--}11.42 \text{ GHz}$.从图7还可以看出,材料在 $10.43\text{--}10.86 \text{ GHz}$ 频段和 $11.324\text{--}11.42 \text{ GHz}$ 频段内磁导率和介电常数并不同时为负,周期结构负的折射率是由于较大的介质损耗^[24]引起的.然而由于自然界现有的材料并不具有负的折射率,该频段仍具有重要的物理意义.

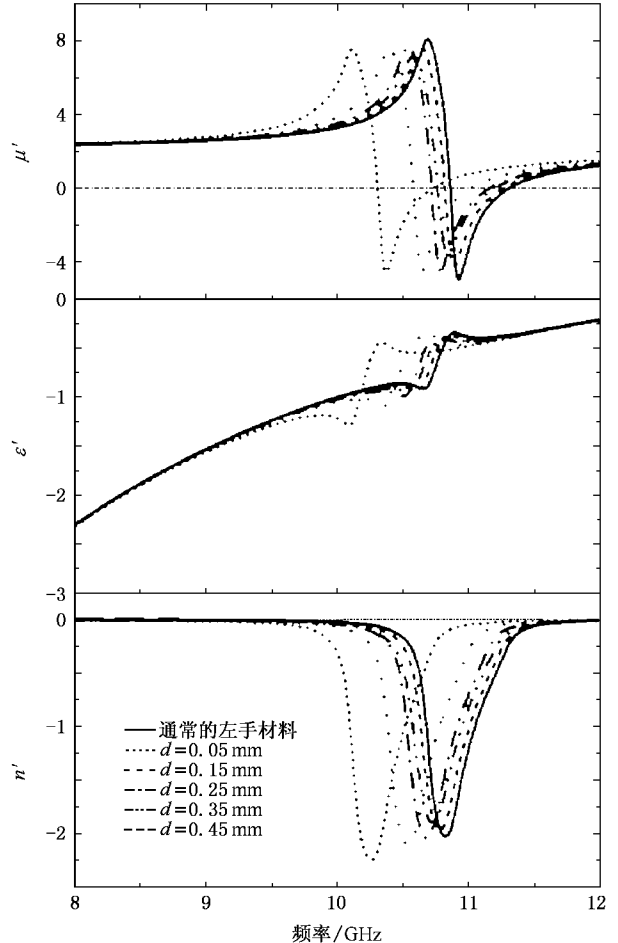


图7 左手材料的 μ' 、 ϵ' 以及 n' 随频率变化曲线

当金属短杆引入通常的左手材料后,周期结构 ($d = 0.05 \text{ mm}$) 在 $10.304\text{--}10.716 \text{ GHz}$ 频段的磁导率实部为负,表明金属短杆的引入并没有影响 SRRs 负磁导率的特性,但是与通常的左手材料相比,其 $\mu' < 0$ 频段向低频发生了明显的移动.当金属短杆与 SRRs 间距 d 由 0.05 mm 以 0.10 mm 的步长渐增至 0.45 mm 时, $\mu' < 0$ 、 ϵ' 反谐振频段以及 $n' < 0$ 频段均发生了蓝移,其中 $\mu' < 0$ 频段由 $10.304\text{--}10.716 \text{ GHz}$ 蓝移至 $10.812\text{--}11.256 \text{ GHz}$, $n' < 0$ 频段则由 $9.744\text{--}10.90 \text{ GHz}$ 蓝移至 $10.252\text{--}11.44 \text{ GHz}$.这与波导管中左手材料的实验结果相符合.

4. 结 论

SRRs 是组成负磁导率结构材料的基本结构单元,其电磁谐振行为的研究对于左手材料的制备具有指导意义.本文通过在 SRRs 结构中引入平行其开口边的金属短杆设计了新的磁谐振单元,研究了短杆对 SRRs 的谐振频率以及左手材料特征峰的影响,取得了如下结果:与通常的 SRRs 相比,金属短杆与 SRRs 开口边形成了新的附加电容,促使 SRRs 开口处电容值增大,导致 SRRs 谐振频率降低,降幅

最高可达 0.54 GHz,而金属短杆位于 SRRs 开口底边时则对 SRRs 的谐振频率没有影响.SRRs 谐振频率随金属短杆与 SRRs 间距 d 的增加而增大,随金属短杆长度增大而减小,金属短杆的引入并未改变 SRRs 负磁导率的特性.左手材料特征峰随 d 的增大而发生蓝移,当 d 增大 0.45 mm 时,特征峰由 10.42—10.82 GHz 蓝移至 10.64—11.20 GHz,且 $\mu' < 0$, ϵ' 反谐振频段以及 $n' < 0$ 频段均随之蓝移.相关研究工作有助于进一步丰富 SRRs 和左手材料的调谐方法.

- [1] Veselago V G 1968 *Soviet Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Seddon N, Bearpark T 2003 *Science* **302** 1573
- [3] Luo C Y, Ibanescu M, Johnson S G, Joannopoulos J D 2003 *Science* **299** 368
- [4] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [5] Houck A A, Brock J B, Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [6] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [7] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **47** 2075
- [8] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [9] Smith D R, Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
- [10] Gay-Balmaz P, Martin O J F 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 2929
- [11] Aydin K, Guven K, Katsarakis N, Soukoulis C M, Ozbay E 2004 *Opt. Express* **12** 5896
- [12] Koschny T, Kafesaki M, Economou E N, Soukoulis C M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 107402
- [13] Dong Z G, Zhu S N, Liu H 2006 *Chin. Phys.* **15** 1772
- [14] Zhang F L, Liu Y H, Zhao Q, Zhao X P 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [15] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H, Luo C R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese)[赵乾、赵晓鹏、康雷、张富利、刘亚红、罗春荣 2004 物理学报 **53** 2206]
- [16] 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]
- [17] Kang L, Luo C R, Zhao Q, Song J, Fu Q H, Zhao X P 2004 *Chin. Sci. Bull.* **49** 2407 (in Chinese)[康雷、罗春荣、赵乾、宋娟、付全红、赵晓鹏 2004 科学通报 **49** 2407]
- [18] Luo C R, Jie X Y, Zhao Q, Zhao X P 2006 *Prog. Nat. Sci.* **16** 912 (in Chinese)[罗春荣、介晓永、赵乾、赵晓鹏 2006 自然科学进展 **16** 912]
- [19] Weiland T, Schuhmann R, Greegor R B, Parazzoli C G, Vetter A M, Smith D R, Vier D C, Schultz S 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 5419
- [20] Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036622
- [21] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2004 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [22] Chen X, Grzegorzczak T M, Wu B I, Pacheco J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [23] Koschny T, Markoš P, Smith D R, Soukoulis C M 2003 *Phys. Rev. E* **68** 065602
- [24] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **74** 041101

Tunable split ring resonator and its effect^{*}

Zhang Fu-Li Zhao Xiao-Peng[†]

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

(Received 14 November 2006 ; revised manuscript received 8 January 2007)

Abstract

It has been theoretically and experimentally shown that split ring resonators (SRRs) can be used as a negative permeability medium near its magnetic resonance frequency. In this paper , a new structure for magnetic resonance has been designed by introducing a short wire into the common SRRs. The effects of short wire on the transmission characteristics of SRRs and left-handed metamaterials (LHMs) are experimentally and numerically investigated. The results show that an additional capacitor , formed by short wire and the gap side of SRR , leads to higher capacitance around the gap and lower the resonance frequency of SRRs. The resonance frequency of SRRs decreases with the length of short wire , but increases with the distance between short wire and SRRs. The short wire has no significant influence on the negative permeability of SRR. It is also demonstrated that the left-handed transmission peak , negative permeability , antiresonance frequency of permittivity and negative refractive index of LHMs could be tuned by controlling the distance between the short wire and the SRR.

Keywords : split ring resonators , short wire , tunable , left-handed metamaterials

PACC : 4270Y , 4745E

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2004CB719805) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50632030) and the Aeronautical Science Foundation of China (Grant No. 05G53045).

[†] Corresponding author. E-mail : xpzhao@nwpu.edu.cn