

基于电流变液的可调谐负磁导率材料^{*}

王连胜 罗春荣 黄 勇 赵晓鹏[†]

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

(2007 年 9 月 12 日收到, 2007 年 10 月 23 日收到修改稿)

通过把负磁导率材料 SRR 阵列置于高性能电流变液中, 研究了电极加载方式、电流变液浓度、电流变液类型以及电场强度等因素对浸入电流变液中的 SRR 阵列谐振频率的影响. 实验表明, 电极加载方式对 SRR 阵列的磁响应有重要的影响, 在容器盒中充满电流变液之后 SRR 阵列的谐振频率往低频发生了移动, 并且可以通过改变外加电场强度来调节, 最大的调节范围为 130 MHz. 数值计算结果表明 SRR 阵列的有效磁导率在谐振频率附近为负值, 并且有效磁导率为负的频率范围也可以通过改变外加电场强度来调节.

关键词: 负磁导率材料, 谐振频率, 电流变液

PACC: 4270Y, 4745N, 8185

1. 引 言

最近, 左手材料以其独特的电磁性质引起了人们极大的关注^[1-4]. 传统的左手材料是由周期排布的开口谐振环(split resonant ring, SRR)和金属杆(rod)组成, 其中 SRR 能够对电磁场产生强烈的磁谐振并且其磁导率在谐振频率附近为负值^[5]. SRR 是由两个同心的开口金属环组成, 在入射电磁波的作用下可以等效成一个 LC 电路. 当磁场垂直于 SRR 时, SRR 内部产生感应电流, 从而引入了电感^[6,7]; 而电容 C 则一方面来源于内外环之间产生的电容, 另一方面来源于 SRR 开口缝处产生的电容, 因此可以通过改变 SRR 的物理尺寸和基底材料实现 SRR 在某一频率处的磁谐振. 但是上述方法都是被动的, 因而限制了它们的应用. 如何动态调节负磁导率材料的电磁性质成为当前左手材料研究领域的热点问题^[8-14]. 例如, 实验和计算已经证实, 在 SRR 的内部结构中加载变容二极管可以调控负磁导率材料的电磁行为, 这种方法首先被应用在超材料传输线中, 随后被用来调整 SRR 的谐振频率^[12]. Zhao 等人^[9]通过在 SRR 阵列中引入缺陷调节了 SRR 阵列的谐振频率, Zhao 等人^[10]利用液晶调节了 SRR 阵列的谐振频率.

电流变液(electrorheological fluids, ERF)通常是由高介电常数的固体颗粒分散在低介电常数的绝缘油中组成的悬浮液体. 它具有独特的性质, 未加外电场作用时, 固体颗粒均匀地分散在液体中, ERF 呈液态, 通常为牛顿流体; 施加外电场作用后, 颗粒迅速在电极间聚集形成与电场方向相平行的链状或柱状结构, 流体就会变成类固体, 并且其介电性质也会发生明显的变化^[15,16]. 根据 Markos 等人的研究结果^[17], 内嵌介质的介电常数对 SRR 的谐振频率有重要影响, 随着内嵌介质介电常数的增加, SRR 的谐振频率将会往低频发生移动. 结合 ERF 的上述性质, 当把 SRR 阵列置于 ERF 中并对其施加不同强度的电场作用时, 随着 SRR 阵列内嵌介质(ERF)的介电常数发生变化, SRR 阵列的谐振频率将会得到调节. 本文报道了一种由置于电流变液中的 SRR 阵列组成的可调谐负磁导率材料, 通过对电流变液施加不同强度的电场作用, SRR 阵列的谐振频率可以在一定范围内调节.

2. 实 验

本实验中使用的二维负磁导率材料样品是由刻蚀在 1.0 mm 厚的环氧玻璃纤维板(介电常数为 4.65)上的铜六边形开口谐振环(SRR)经过一定的

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50632030), 国家重点基础研究发展计划(批准号 2004CB719805)和国防基础科研项目资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

周期排列构成的,其中六边形开口谐振环如图 1 所示,具体尺寸为 $g = 0.3 \text{ mm}$, $d_1 = 1.0 \text{ mm}$, $d_2 = 2.2 \text{ mm}$, $c = 0.3 \text{ mm}$,晶格常数为 5 mm . 将上述二维负磁导率材料样品放置在充满电流变液的容器盒中构成了实验样品,其中容器盒采用聚四氟乙烯材料制

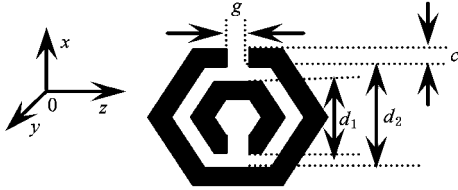


图 1 六边形开口谐振环

成并加载有电极. 实验主要研究了电极加载方式、电流变液浓度、电流变液类型以及电场强度等因素对浸入电流变液中的 SRR 阵列谐振频率的影响,最终利用电流变液在一定的范围内调节了负磁导率材料的谐振频率.

2.1. 电极加载方式对 SRR 阵列谐振频率的影响

电流变液在外加电场作用下其介电性质将会发生明显变化,电场强度越大变化越明显. 为了接下来的研究工作选择一种合适的电极加载方式,实验首先研究了在保持电极间距为 1 cm 的情况下不同电极加载方式对 SRR 阵列谐振频率的影响,不同电极加载方式的样品示意图如图 2 所示.

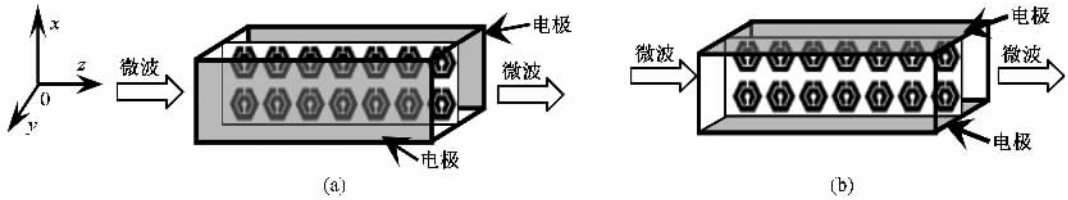


图 2 不同电极加载方式下的样品 (a)电极沿 y 方向放置;(b)电极沿 x 方向放置

对图 2 中所示的样品分以下三种情况进行透射测量:1)空气中 SRR 阵列的透过率,2)放入容器盒但未放置电极时 SRR 阵列的透过率,3)放入容器盒并放置电极时 SRR 阵列的透过率. 样品的 S 参数是采用 AV3618 微波一体化矢量网络分析仪测得

的,两个连接到矢量网络分析仪(AV3618)上的标准喇叭分别作为发射器和接收器,样品至发射器和接收器的距离都为 10 cm ,其中电磁波沿 z 轴传播,电场 E 沿 x 轴,磁场 H 沿 y 轴,测量结果如图 3 所示.

从图3中可以看出,当电极沿 x 方向放置时,

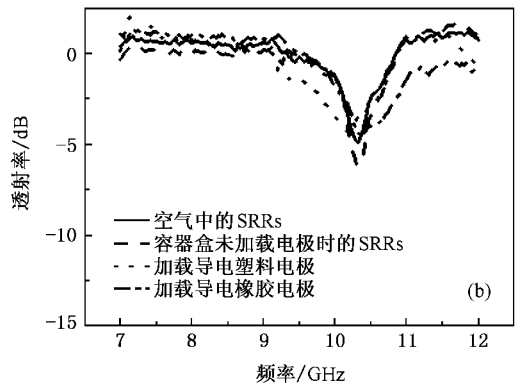
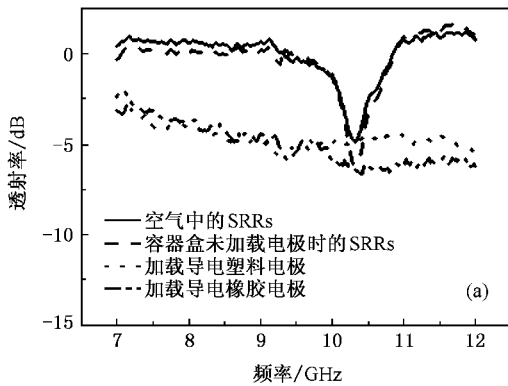


图 3 (a)电极沿 y 方向放置时各种情况下 SRR 阵列的透射曲线;(b)电极沿 x 方向放置时各种情况下 SRR 阵列的透射曲线

SRR 阵列的磁谐振基本保持不变,而当电极沿 y 方向放置时, SRR 阵列不能对入射电磁波产生磁谐振. 原因是当电极沿 y 方向放置时,电极严重干扰了电磁波的磁场分量从而影响了 SRR 阵列对电磁波的

磁响应;而电极沿 x 方向放置则对电磁波的磁场分量影响较小从而使得 SRR 阵列对电磁波的磁响应基本保持不变. 图中 SRR 阵列的 S_{21} 值出现大于零的情况主要是由两个因素造成的:一是样品的边缘

衍射效应,二是谐振结构 SRR 造成的场的局域化^[18].

2.2. 电流变液浓度对 SRR 阵列谐振频率的影响

基于 2.1 的实验结果,当 y 方向 SRR 阵列的单元数较多时,如果采用图 2(a)所示的电极加载方式,电极之间的距离将会比较大,这将会增加外加电

源的电压,所以接下来的实验研究采用图 2(b)所示的电极沿 x 方向放置的方式.为了使 SRR 阵列的谐振更加强烈,将 y 方向 SRR 阵列的单元数增加到 10 个,并将其放置在充满电流变液的容器盒中,容器盒上下两电极采用导电橡胶制成,间距为 1 cm.样品示意图如图 4 所示.

为了研究不同浓度的电流变液对 SRR 阵列谐

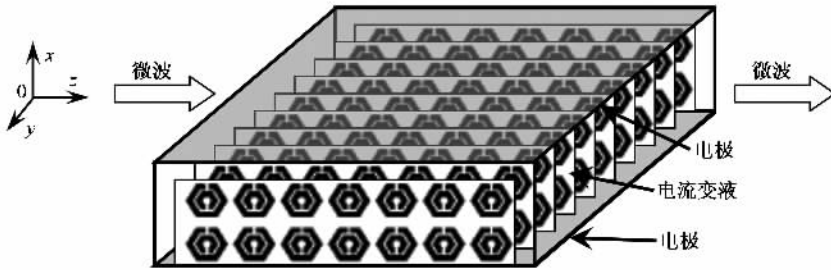


图 4 放置在充满电流变液的容器盒中的 SRR 阵列示意图

振频率的影响,对图 4 所示的 SRR 阵列分两种情况进行透射测量:1)容器盒中无电流变液时 SRR 阵列的透射率;2)容器盒中充满不同浓度的电流变液时 SRR 阵列的透射率.测量方法与 2.1 节相同,测量结果如图 5 所示.比较图 3(a)和图 3(b)可以看出 y 方

向 SRR 阵列单元数的增加增强了 SRR 阵列的谐振强度,并且容器盒使得 SRR 阵列的谐振频率从 10.23 GHz 移动到 9.97 GHz;从图 5(b)可以看出在 6—12 GHz 频段内不同浓度的淀粉电流变液都有一个吸收峰,随着浓度的增加吸收峰逐渐往低频发生

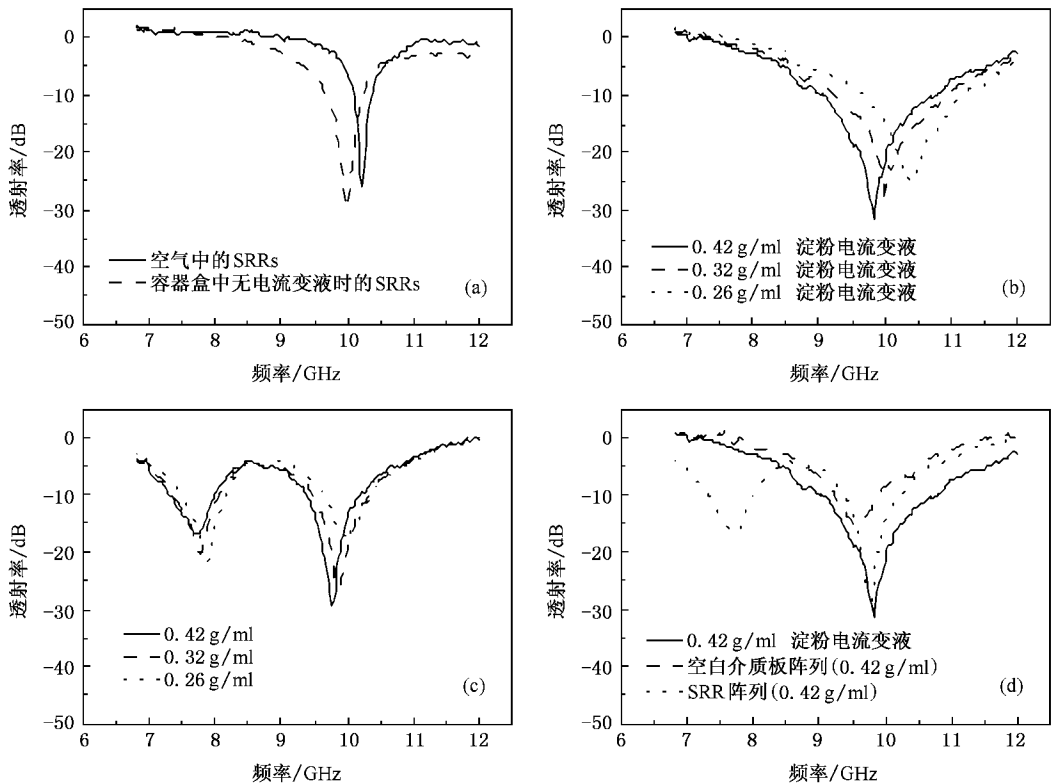
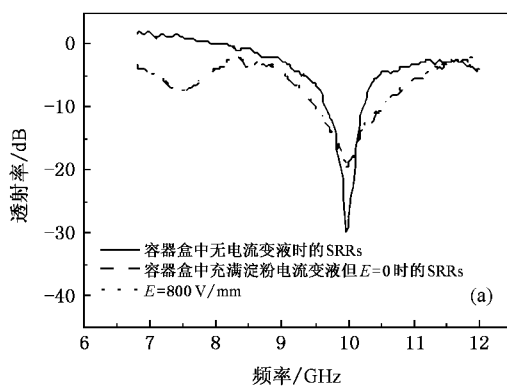


图 5 (a)容器盒中无电流变液时 SRR 阵列的透射;(b)不同浓度电流变液的透射;(c)容器盒中充满不同浓度的电流变液时 SRR 阵列的透射;(d)容器盒中充满电流变液时空白介质板阵列与 SRR 阵列透射对比

移动. 图 5(c) 显示, 将 SRR 阵列放置在充满电流变液的容器盒中之后样品的透射出现了两个吸收峰, 一个在 7.80 GHz 附近, 另一个出现在 9.97 GHz 附近. 通过分析得出 7.80 GHz 附近的吸收峰是由于 SRR 阵列的谐振引起的, 而 9.97 GHz 附近的吸收峰主要是由于电流变液引起的, 为此将空白介质板阵列和 SRR 阵列分别放置在充满电流变液的容器盒中进行透射测量, 测量结果如图 5(d) 所示. 从图 5(d) 中可以看出放置在充满电流变液的容器盒中的空白介质板阵列在 7.80 GHz 附近没有出现吸收峰, 只在 9.97 GHz 附近出现了一个吸收峰, 而放置在充满电流变液的容器盒中的 SRR 阵列分别在 7.80 和 9.97 GHz 附近出现了两个吸收峰, 故认为 7.80 GHz 附近的吸收峰是由于 SRR 阵列的谐振引起的, 而 9.97 GHz 附近的吸收峰是由于电流变液引起的. 图 5(c) 中, SRR 阵列的谐振频率在容器盒中充满电流变液之后由 9.97 GHz 移动到 7.80 GHz, 这是由于 SRR 的谐振频率 ω 与其周围内嵌介质的介电常数 ϵ_b 关系密切, 详细的定量分析表明 $\omega^2 \propto 1/\epsilon_b$ [17, 19]. 实验中用电流变液(介电常数大于 1)取代空气(介电常数为 1)作为 SRR 阵列的内嵌介质, 将增大介质介电常数, 所以将 SRR 阵列放入充满电流变液的容器盒中之后谐振频率向低频移动. 另外随着电流变液浓度的减小其平均介电常数逐渐减小导致了 SRR 阵列的谐振频率(7.80 GHz) 逐渐往高频发生移动.



2.3. 不同类型的电流变液对 SRR 阵列谐振频率的影响

这里研究了同一电场强度下的淀粉电流变液和氧化钛电流变液对 SRR 阵列谐振频率的影响. 样品的构造与 2.2 节相同, 其中两个间距为 1 cm 的导电橡胶电极与外界高压直流电源相连, 为电流变液提供沿 x 方向的静电场. 在同一外加电场强度下对置入不同类型电流变液中的 SRR 阵列分别进行透射测量, 测量方法与 2.1 节相同, 测量结果如图 6 所示. 可以看出在同一电场强度下, 浸入淀粉电流变液中的 SRR 阵列的谐振频率没有发生明显的移动, 而浸入氧化钛电流变液中的 SRR 阵列的谐振频率往低频移动了 104 MHz. 对电流变液施加电场后, 其中的固体颗粒聚集成沿电场方向的链柱结构, 电流变液由各向同性介质变为各向异性介质, 其介电性能也发生明显的变化, 沿电场方向介电常数增加, 同时随电场强度增大电流变液的介电常数也一直增加 [20, 21]. 因此, 当 SRR 阵列嵌入电流变液介质后, 在外电场作用下, 电流变液的介电常数随外加电场增加从而导致了 SRR 阵列的谐振频率继续向低频移动. 进一步分析认为在 800 V/mm 的电场强度下淀粉电流变液的平均介电常数没有发生明显的变化, 而氧化钛电流变液的平均介电常数则明显增加, 导致了 SRR 阵列的谐振频率往低频发生移动.

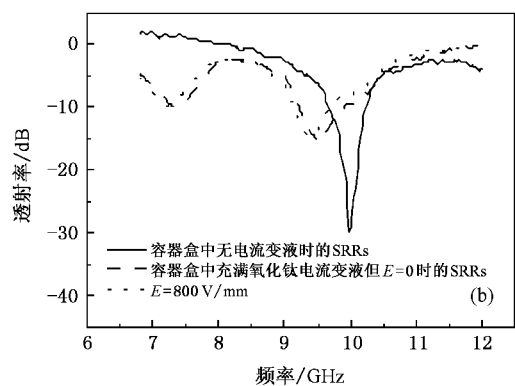


图 6 同一电场强度下不同类型的电流变液对 SRR 阵列谐振频率的影响 (a) 采用 0.42 g/ml 淀粉电流变液; (b) 采用体积浓度为 20% 的氧化钛电流变液

2.4. 电场强度变化导致氧化钛电流变液对 SRR 阵列谐振频率的影响

电流变液在外加电场作用下其介电性质将会发生明显变化. 为了研究不同电场强度下的电流变液

对 SRR 阵列谐振频率的影响, 实验采用体积浓度为 20% 的氧化钛电流变液, 测量了对电流变液施加不同强度的电场作用时 SRR 阵列的透过率. 样品的构造及测量方法与 2.2 相同, 测量结果如图 7 所示.

从图 7(a) 可以看出, 在 800 V/mm 的电场强度下

SRR 阵列的谐振频率往低频移动了 104 MHz,而在图 7(b)中,在 1333 V/mm 的电场强度下 SRR 阵列的谐振频率往低频移动了 130 MHz,原因是电场强度越大电流变液的平均介电常数增加越明显进而导致 SRR 阵列的谐振频率往低频移动的范围更大. 虽然这里的调节范围有限,但是通过改进电流变液和外加电压可以实现 SRR 阵列的谐振频率在更大范围内的调节. 将上述电流变液换成硅油,透射测量(数据没有给出)显示 SRR 阵列的谐振频率不受外加电场强度的影响,这充分说明以上的电调节行为是由于电流变液引起的.

在没有外加电场作用下 SRR 阵列的有效磁导率可以通过以下公式计算得出：

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

其中 F 为内环的体积分数, Γ 为损耗因子. 对于图 1 所示的 SRR 单元, $F = 0.05$, $\Gamma = 10^{10}/4\pi$. 根据上述公式,计算得出图 7 中各种情况下 SRR 阵列的有效磁导率如图 8 所示. 从图 8 可以看出,不同情况下 SRR 阵列的有效磁导率在谐振频率附近是负的,并且有效磁导率为负的频率范围可以通过改变外加电场强度来调节.

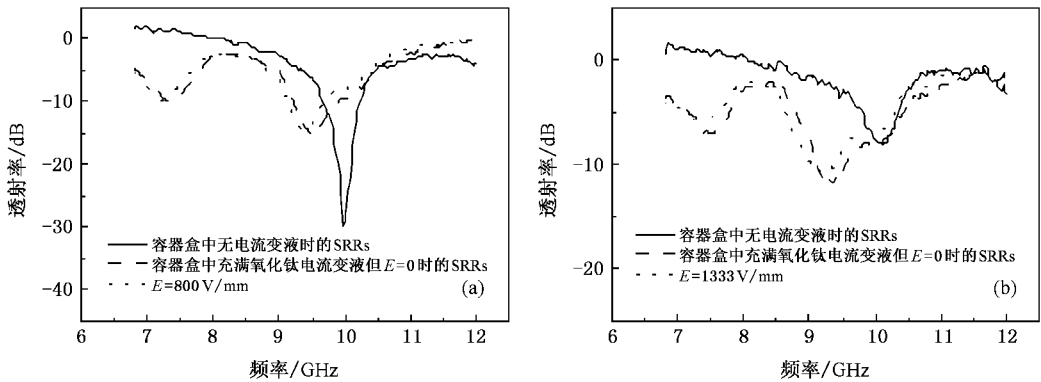


图 7 不同电场强度下的电流变液对 SRR 阵列谐振频率的影响 (a)电极间距为 1 cm($E = 800$ V/mm); (b)电极间距为 6 mm ($E = 1333$ V/mm)

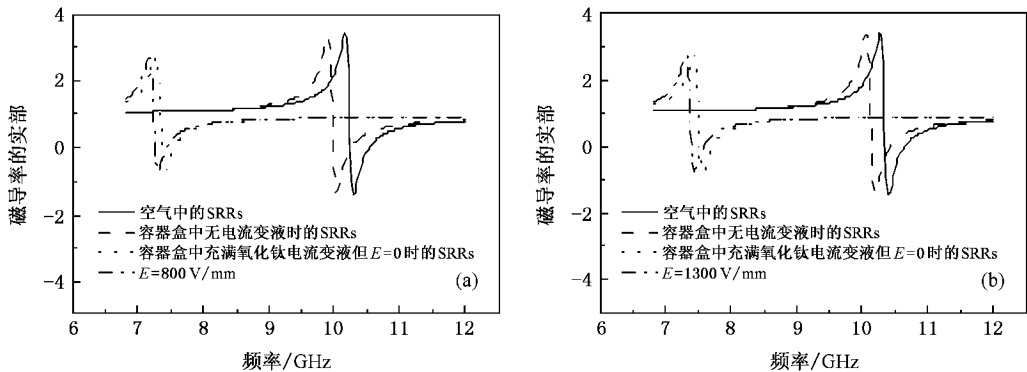


图 8 (a)图 7(a)中不同情况下 SRR 阵列的有效磁导率;(b)图 7(b)中不同情况下 SRR 阵列的有效磁导率

3. 结 论

本文利用高性能电流变液调节了 SRR 阵列的谐振频率,研究了电极加载方式、电流变液浓度、电流变液类型以及电场强度等因素对浸入电流变液中的 SRR 阵列谐振频率的影响. 实验结果显示,当电

极沿电磁波的 E 方向放置时, SRR 阵列的磁谐振基本保持不变,而当电极沿电磁波的 H 方向放置时, SRR 阵列不能对入射电磁波产生磁谐振;在容器盒中充满电流变液之后 SRR 阵列的谐振频率往低频发生了移动,并且可以通过改变外加电场强度来调节,最大的调节范围为 130 MHz. 数值计算结果表明 SRR 阵列的有效磁导率在谐振频率附近为负值,并

且有效磁导率为负的频率范围也可以通过改变外加电场强度来调节. 此调节原理不仅应用于微波频段内的左手材料, 而且可以扩展到 THz 和可见光频段

内的左手材料中, 它独特的性质在新型材料器件中有着巨大的应用潜力.

-
- [1] Houck A , Brock J B , Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [2] Parazzoli G , Gregor R B , Li K , Koltenbah B E C , Tanielian M 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401
- [3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [4] Seddon N , Bearpark T 2003 *Science* **302** 1537
- [5] Pendry J B , Holden A J , Robbins D J , Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2075
- [6] Marques R , Mesa F , Martel J , Medina F 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 2572
- [7] Sauviac , Simovski C R , Tretyakov S 2004 *Electromagnetics* **24** 317
- [8] Aydin K , Ozbay 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 24911
- [9] Zhao X P , Zhao Q , Kang L , Song J , Fu Q H 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [10] Zhao Q , Kang L , Du B , Li B , Zhou J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 11112
- [11] Degiron A , Mock J J , Smith D R 2007 *Optics Express* **15** 1115
- [12] Shadrivov I V , Morrison S K , Kivshar Y S 2006 *Optics Express* **14** 9344
- [13] Chen H T , Padilla W J , Zide J M O , Gossard A C , Taylor A J , Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [14] Padilla W J , Taylor A J , Highstrete C , Lee M , Averitt R D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 107401
- [15] Zhao X P , Yin J B 2002 *Chem. Mater* **14** 2258
- [16] Zhao X P , Yin J B , Tang H 2007 *Smart Materials and Structures : New Research* (USA : Nova Science Publishers) p1—66
- [17] Markos P , Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 36622
- [18] Aydin K , Bulu I , Guven K , Kafesaki M , Soukoulis C M , Ozbay E 2005 *New Journal of Physics* **7** 168
- [19] Kafesaki M , Koschny T H , Penciu R S , Gundogdu T F , Economou E N , Soukoulis C M 2005 *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* **7** S12
- [20] Conrad H , Chen Y 1995 *Progress in Electrorheology* (New York : Plenum Press) p55
- [21] Wen W J , Men S Q , Lu K Q 1997 *Phys. Rev. E* **55** 30153020

Electrically tunable negative permeability metamaterials based on electrorheological fluids^{*}

Wang Lian-Sheng Luo Chun-Rong Huang Yong Zhao Xiao-Peng[†]

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

(Received 12 September 2007 ; revised manuscript received 23 October 2007)

Abstract

We experimentally studied the effects of certain factors, such as the ways of loading of electrodes, the concentration of ER fluids, the type of ER fluids and intensity of applied electric fields, on the resonant frequency of split-resonant ring array infiltrated in ER fluids. The experimental results show that the way of loading of electrodes has important effects on the magnetic resonance of SRR array. The resonant frequency of SRR array shows a red-shift when the ER fluid is infiltrated, the maximum shift of about 130 MHz was obtained through the adjustment of the applied electric-field. Numerical simulation demonstrates that the permeability of SRR array is negative near the resonant frequency, and the frequency range of negative permeability can be dynamically tuned by the applied electric-field.

Keywords : negative permeability metamaterials, resonance frequency, ER fluids

PACC : 4270Y, 4745N, 8185

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

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