

电流变液调控的连通树枝状结构左手材料*

罗春荣 王连胜 郭继权 黄 勇 赵晓鹏†

(西北工业大学电流变技术研究所, 西安 710072)

(2008 年 6 月 24 日收到, 2008 年 7 月 8 日收到修改稿)

设计了结构单元连通的单一树枝状结构材料模型, 通过把连通的树枝状结构材料置于高性能电流变液中, 研究了电极间距、内嵌介质的介电常数以及电场强度等对浸入电流变液中树枝状结构左手材料透射峰的影响. 实验结果表明, 电极间距对样品的左手峰有重要的影响, 在容器盒中充满电流变液之后样品的左手峰向低频方向移动; 通过改变外加电场强度可以调节左手透射峰, 最大调节范围可达 140 MHz.

关键词: 连通树枝结构, 电流变液, 介电常数, 左手峰

PACC: 4270Y, 4745N, 8185

1. 引 言

左手材料由于一系列奇特的电磁特性而受到广泛关注^[1-3]. Pendry 等提出用周期排列的金属杆^[4]和金属开口谐振环^[5]可以实现负介电常数和负磁导率. Smith 将两种结构结合起来, 通过棱镜实验观测负折射获得了微波段左手材料^[6]. 左手材料的一个关键问题是必须使得介电常数和磁导率在同一频段为负值, 在金属杆和金属开口谐振环之后, 人们设计了 Ω 形结构^[7]、U 形结构^[8]、金属棒对结构阵列^[9]等用来实现左手材料, 并将其应用于非线性传输线^[10, 11]. 我们课题组提出一种树枝状结构单元模型^[12]来实现左手材料. 该模型由树枝各分支构成的开口六边形环可以在多个谐振频率下产生磁谐振, 树枝自身还能产生电谐振^[13, 14]. 因此, 这种结构不需要用杆来提供负介电常数, 只需要适当调节自身结构参数就可以达到 ϵ 和 μ 同时为负, 从而可以实现负介电常数和负磁导率的一体化设计而实现左手效应^[15, 16].

近来, 可调谐左手材料成为人们研究的热点^[17-24]. 国内外很多课题组采用各种方法希望对左手材料的电磁特性进行调谐, 并取得了一些结果. Zhao 等^[18]在 SRR 阵列中引入缺陷调节了 SRR 阵列的谐振频率; Zhao 等^[20]通过温度的改变, 实现了对

绝缘陶瓷立方体阵列组成的三维绝缘复合材料负磁导率的连续可逆调谐. 但是, 这些方法仅是对负的介电常数或者负的磁导率进行调谐, 而同时对两者以至于左手透射通带进行调谐却很少见报道. 如所周知电流变液在外加电场的作用下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, 流体会变成类固体, 并且其介电性质也会发生明显的变化^[25, 26]. 研究表明, 通过改变外加电场强度, 电流变液显示出光学特性随电场可调节的特征^[27-29], 不仅如此, 电流变液微波透射率的变化也可由外电场调控^[30]. 据此, 我们研究了电流变液对金属开口谐振环阵列(SRRs)谐振频率以及树枝状结构左手通带的调谐行为, 发现了它们的可调谐性^[31, 32]. 但是, 电极的采用和排布对材料的电磁响应行为有一定影响, 同时也增加了工作的复杂性. 本文设计了一种新的结构模型, 将左手树枝状结构单元连接起来, 既产生电磁响应又兼为电极, 研究了电极间距、内嵌介质介电常数以及外加电场强度等因素对树枝状结构材料微波透射行为的影响, 实现了对左手透射通带的调谐.

2. 实 验

利用 AutoCAD 和 Protel 软件设计了结构单元连通的单一树枝状结构, 然后采用电路板刻蚀技术在

* 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), 国防基础科研项目资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

电路板上制备了双面和单面的上述材料(图 1(b)和(c)所示). 实验所用的电路板为环氧酚醛玻璃纤维, 厚度为 1 mm, 结构单元的厚度为 0.02 mm, 线宽 $w = 0.3$ mm, $a = 2$ mm, $b = 0.9$ mm, $c = 0.9$ mm, $\theta = 45^\circ$. 将图 1(b)和(c)所示的树枝状结构按照不同的间距组合成树枝状结构材料构成了实验样品, 其中连通的金属树枝状结构既作为研究的对象又作为电极, 容器盒面板采用微波透过率极高的硬纸材料制成. 实验主要研究了电极间距、内嵌介质的介电常数、电

流变液以及对其施加的电场强度等因素对树枝状结构材料左手通带的影响, 最终利用电流变液在一定的范围内调节了树枝状结构左手材料的透射峰. 测量过程中样品的 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. 电磁波平行入射, 磁场矢量垂直于树枝单元, 电场矢量平行于树枝单元.

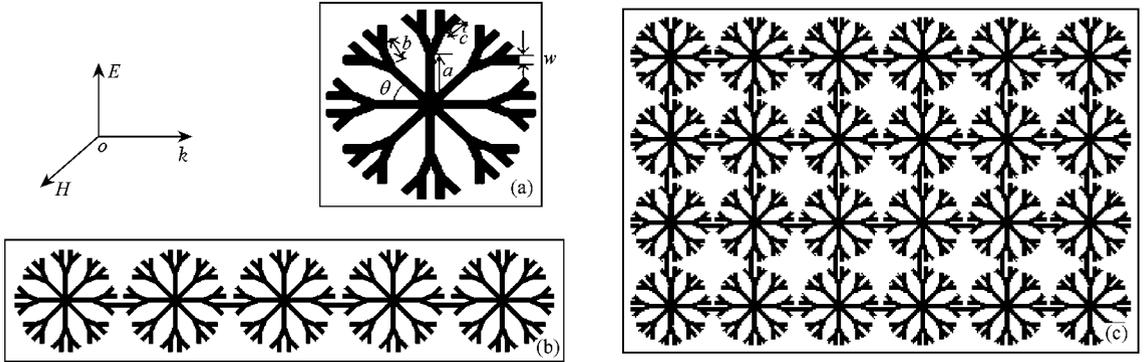


图 1 树枝状结构材料示意图 (a)树枝状结构材料基本单元 (b)将树枝状结构单元连接起来构成的样品 1 (c)将树枝状结构单元连接起来构成的样品 2

3. 实验结果与讨论

3.1. 电极间距对样品透射的影响

电流变液在外加电场作用下其介电性质将会发生明显的变化, 电场强度越大变化越明显, 并且不同介质板之间的树枝状结构单元之间存在一定的电磁耦合作用. 为了研究不同介质板之间树枝状结构单元的电磁耦合作用对其微波透射行为的影响以及选

择一种合适的电极间距以便对电流变液施加较小的电压, 实验过程中首先将上述图 1 中(b)和(c)样品按照不同的间距组合成阵列并分别作为电极, 研究了电极间距对样品透射的影响, 不同间距的样品透射测量结果如图 2 所示.

从图中可以看出, 由图 1(b)所示的结构组成的不同间距的树枝状结构材料在 10.32—11.48 GHz 范围出现一个透射通带, 透射峰的极大值位于 11.02 GHz, 通带带宽为 1.16 GHz. 随着电极间距的增加透射峰的位置逐渐向高频方向发生移动并且强

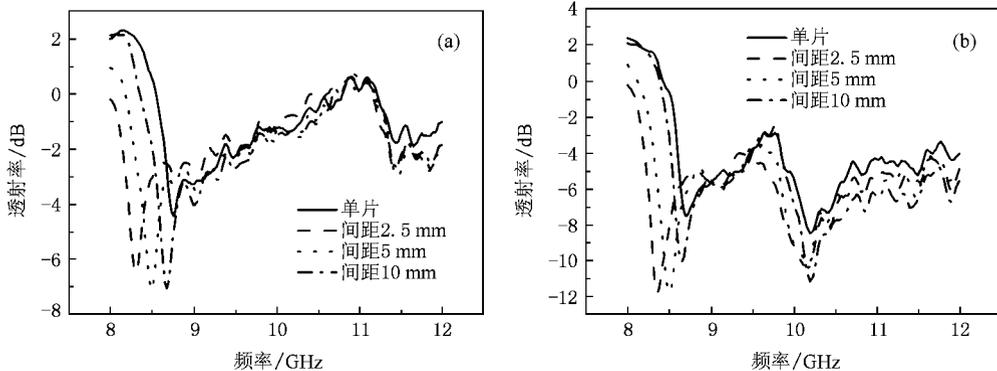


图 2 不同间距的树枝状结构材料透射 (a)图 1(b)所示的结构 (b)图 1(c)所示的结构

度逐渐增强. 而由图 1(c)所示的结构组成的不同间距的树枝状结构材料在透射曲线上也出现一个透射通带. 随着电极间距的增加通带的位置逐渐往高频方向发生移动并且强度逐渐增强.

采用 CST 微波软件进行了模拟. 图 3 是样品 1 和样品 2 两种结构在电磁波平行入射时透射曲线的实验和模拟结果. 图 3(a)是样品 1(5 × 1 × 2 阵列)在

电极间距为 5 mm 时的透射曲线, 其中实验所得到的透射峰较模拟结果发生红移是因为样品 1 尺寸相对于发射喇叭较小, 在微波暗室中进行实际测量时损耗较大所造成的. 图 3(b)是样品 2(6 × 4 × 4 阵列)在电极间距为 4mm-6mm-4mm 时的透射曲线, 透射峰极大值在 10.5 GHz 处实验和模拟结果得到很好的符合.

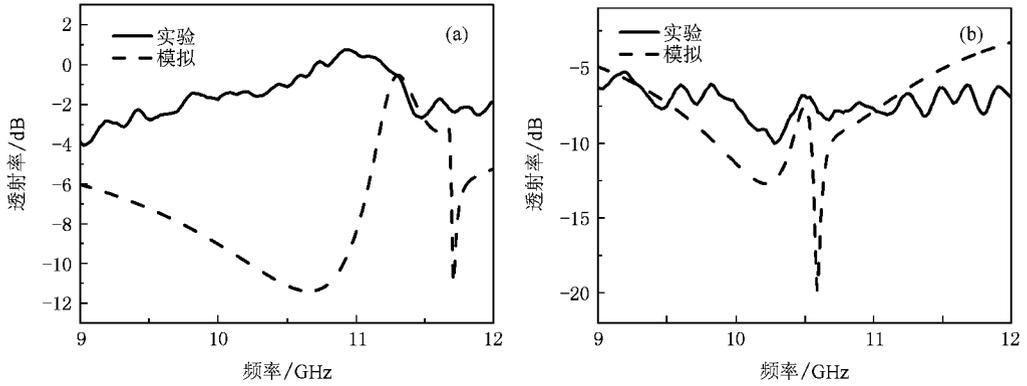


图 3 两种样品透射曲线的实验和模拟结果 (a)图 1(b)所示结构组成的样品 1 (b)图 1(c)所示结构组成的样品 2

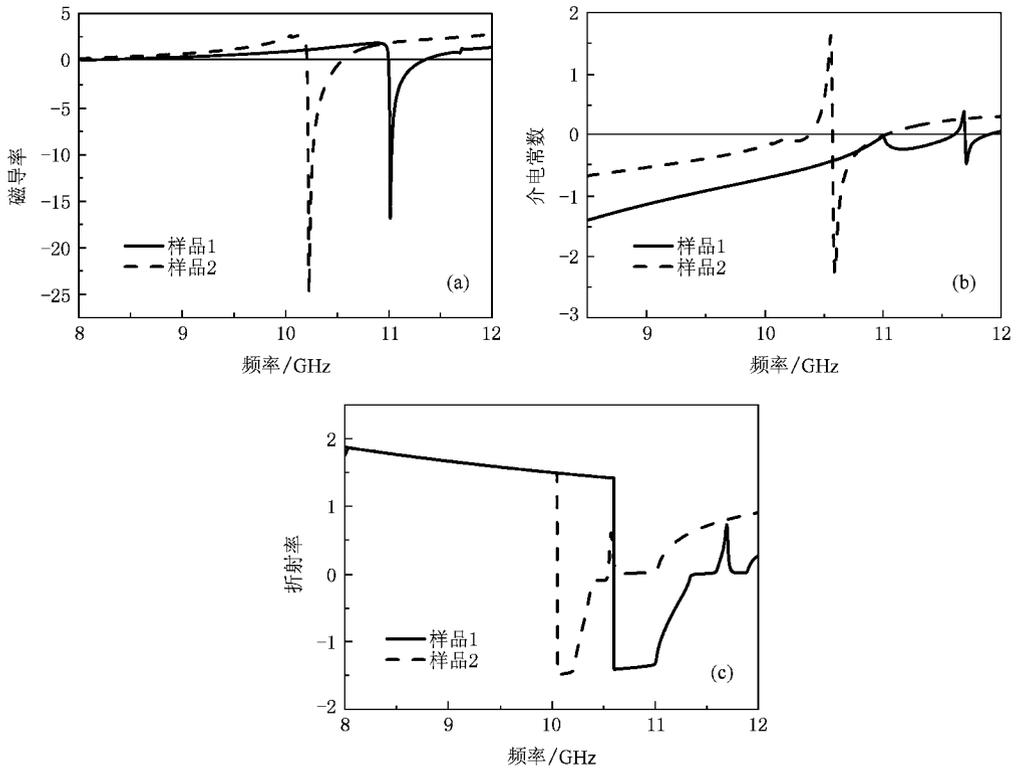


图 4 根据模拟结果计算得到的两种样品的磁导率、介电常数和折射率 (a)磁导率 (b)介电常数 (c)折射率

图 4 是散射参量法计算的结果. 从图(a)(b), (c)可以看出, 样品 1 在 11.304 GHz 附近磁导率、介

电常数和折射率均为负值, 样品 2 在 10.5 GHz 附近磁导率、介电常数和折射率也均为负值, 两种样品均

表现出了左手效应。

3.2. 内嵌介质对样品透射的影响

树枝状左手材料的内嵌介质对微波透射行为影响较大,内嵌介质的改变将影响树枝状左手材料单元各分支、单元之间以及不同介质板之间的电磁耦合进而影响到材料自身的电容。为了详细研究内嵌介质的介电常数对树枝状结构材料左手通带的影响,将上述间距为 5 mm 的样品置于不同介电常数的内嵌介质中研究了内嵌介质的介电常数对样品透射的影响,不同介电常数内嵌介质下的样品透射测

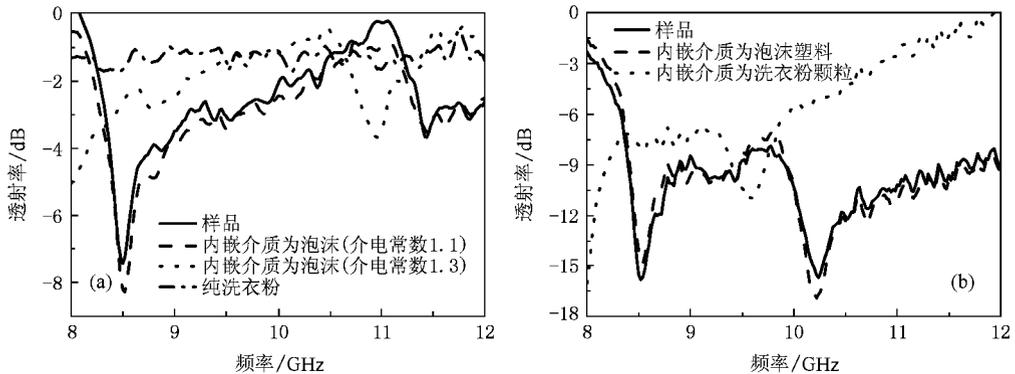


图 5 间距为 5 mm 的树枝状结构材料在不同介电常数的内嵌介质下的透射 (a)图 1(b)所示的结构 (b)图 1(c)所示的结构

3.3. 电流变液以及施加的电场强度对样品透射的影响

电流变液在外加电场的作用下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变化,因此电流变液可以作为树枝状结构材料的内嵌介质,通过改变对电流变液施加的电场强度实现可谐调树枝状结构左手材料。为了研究不同电场强度下的电流变液对上述样品 1 和样品 2 树枝状结构材料透射的影响,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样品的透射率。实验中将连通的树枝状结构作为电极并连接到外加电源上用于对电流变液施加电场。在平行入射的情况下,逐步测量得出在以下三种条件下样品的透射曲线:1)自由空间中;2)向盒中注入电流变液但无外加电场时;3)注入电流变液并施加不同电场强度时样品的透射,测量结果如图 6 所示。

从图 6(a)可以看出,由图 1(b)所示结构组成的

量结果如图 5 所示。

从图中可以看出由图 1(b)所示的结构组成的树枝状结构材料在不同介电常数的内嵌介质下左手峰均发生了移动,随着内嵌介质介电常数的增加,左手峰的位置逐渐向低频方向发生移动。由图 1(c)所示的结构组成的树枝状结构材料的通带随着内嵌介质介电常数的增加,通带的位置逐渐向低频方向发生移动。分析原因主要是内嵌介质的改变影响了树枝状结构材料单元各分支、单元之间以及不同介质板之间的电磁耦合进而影响到材料自身的电容,电容值的变化致使其左手通带发生红移。

树枝状结构材料在自由空间中的透射曲线在 11.02 GHz 处出现一个透射峰,由图 3 可知,此峰为左手峰;当向盒子中注入电流变液但不施加外电场时,左手透射峰红移,移动到了 10.1 GHz;当对电流变液施加 1200 V/mm 外加电场时,左手透射峰继续向低频发生移动,最大移动范围为 100 MHz。

从图 6(b)可以看出,由图 1(c)所示的结构组成的间距为 4 mm-6 mm-4 mm 的树枝状结构材料阵列在自由空间中透射曲线在 10.5 GHz 处出现一个透射峰,由图 3 可知,此峰为左手峰;当向盒中注入体积分数为 20% 的氧化钛电流变液后,左手透射峰向低频移动到 9.9 GHz;当对电流变液分别施加 800 V/mm,1000 V/mm,1200 V/mm 外加电场时,左手透射峰的位置发生红移,分别移动到 9.82 GHz,9.80 GHz,9.76 GHz,往低频依次移动了 80 MHz,100 MHz,140 MHz。

氧化钛电流变液中的样品的左手峰的位置发生移动的物理机理如下:电流变液的介电常数相比于空气要大,往盒中注入电流变液后,树枝状左手材料的电响应和磁响应发生频率都向低频移动^[15],且两

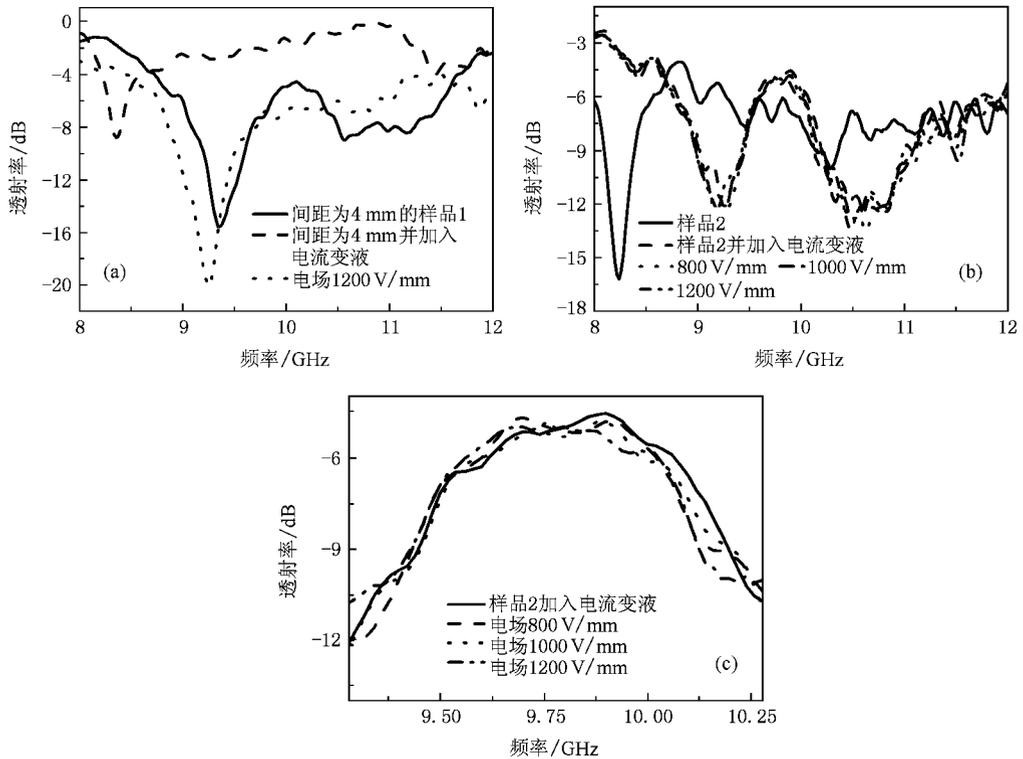


图6 样品置于电流变液中并施加不同电场强度时的透射图 (a)样品1在不同情况下的透射 (b)样品2在不同电场强度下的透射 (c)图(b)的放大图

者仍重叠于同一频段,故树枝状结构阵列的左手峰位置发生红移.当加上外电场后,电流变液在外加电场作用下,固体颗粒沿电场方向极化并形成链状结构,沿电场方向的介电常数相比加电场前增大,故树枝状左手材料的透射峰继续向低频发生移动.

4. 结 论

本文利用高性能电流变液调节了连通树枝状结构左手材料的透射峰,将树枝状结构单元连接起来作为研究对象,既增强了结构单元之间的电磁谐振,又可以作为对电流变液施加电场时的导电电极,从而避免了加载电极所带来的测试复杂性及损耗.研

究了电极间距,内嵌介质的介电常数以及对电流变液施加的外加电场强度等对树枝状结构材料左手峰的影响.实验结果显示,随着电极间距的增加左手峰的位置逐渐向高频方向发生移动;将树枝状结构材料置于不同介电常数的内嵌介质中随着介电常数的增加左手峰的位置逐渐向低频方向发生移动;在容器盒中充电流变液之后树枝状结构左手材料的左手峰向低频方向发生移动;可以通过改变外加电场强度来调节左手透射峰,最大调节范围为140 MHz.此调节原理不仅应用于微波频段,而且可以扩展到THz和可见光频段,它独特的性质在新型材料器件中有着巨大的应用潜力.

[1] Wiltshire M C K, Pendry J B, Yong I R, Larkman D J, Gilderdale D J, Hajnal J V 2001 *Science* **291** 849

[2] Parazzoli C G, Greigor R B, Li K, Koltenbah B E C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 107401

[3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966

[4] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773

[5] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **47** 2075

[6] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77

- [7] Huangfu J ,Ran L ,Chen H ,Zhang X ,Chen K ,Grzegorzczak T M , Kong J A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1537
- [8] Enkrich C ,Wegener M ,Linden S ,Burger S ,Zschiedrich L ,Schmidt F ,Zhou J F ,Koschny T ,Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 203901
- [9] Shalaev V M ,Cai W ,Chettiar U K ,Yuan H K ,Sarychev A K , Drachev V P ,Kildishev A V 2005 *Opt. Lett.* **30** 3356
- [10] Kengne E ,Liu W M 2006 *Phys. Rev. E* **73** 026603
- [11] Kengne E ,Chui S T ,Liu W M 2006 *Phys. Rev. E* **74** 036614
- [12] Zhou X ,Fu Q H ,Zhao J ,Yang Y ,Zhao X P 2006 *Opt. Express* **14** 7188
- [13] Yao Y ,Zhao X P 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 124904
- [14] Liu H ,Zhao X P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 191904
- [15] Zhou X ,Zhao X P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181908
- [16] Zhu W R ,Zhao X P ,Ji N 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 011911
- [17] Degiron A ,Mock J J ,Smith D R 2007 *Opt. Express* **15** 1115
- [18] Zhao X P ,Zhao Q ,Kang L ,Song J ,Fu Q H 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [19] Zhao Q ,Kang L ,Du B ,Li B ,Zhou J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 011112
- [20] Zhao Q ,Du B ,Kang L ,Zhao H J ,Xie Q ,Li B ,Zhang X ,Zhou J ,Li L ,T ,Meng Y G 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 051106
- [21] Chen H T ,Padilla W J ,Zide J M O ,Gossard A C ,Taylor A J ,Averitt R D 2006 *Nature* **444** 597
- [22] Hou B ,Xu G ,Wong H K ,Wen W F 2005 *Opt. Express* **13** 23
- [23] Zhao H J ,Zhou J ,Zhao Q ,Li B ,Kang L ,Bai Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 131107
- [24] Gil I ,Garcia J ,Bonache J ,Martin F ,Sorolla M ,Marque R 2004 *Electron. Lett.* **40** 21
- [25] Zhao X P ,Yin J B ,Tang H 2007 *Smart Materials and Structures : New Research* (USA : Nova Science Publishers) p1—66
- [26] Zhao X P ,Yin J B 2002 *Chem. Mater* **14** 2258
- [27] Zhao X P ,Luo C R ,Zhang Z D 1998 *Opt. Engin.* **37** 1589
- [28] Zhao X P ,Zhao Q ,Gao X M 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 4309
- [29] Zhao Q ,Zhao X P ,Qu C Z ,Xiang L Q 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1985
- [30] Fan J J ,Zhao X P ,Gao X M ,Cao C N 2002 *J. Phys. D : Appl. Phys.* **35** 88
- [31] Huang Y ,Zhao X P ,Wang L S ,Luo C R 2008 *Prog. Nat. Sci.* **18** 907
- [32] Wang L S ,Luo C R ,Huang Y ,Zhao X P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3571 (in Chinese)[王连胜、罗春荣、黄勇、赵晓鹏 2008 物理学报 **57** 3571]

Tunable effects of connective dendritic left-handed metamaterials based on electrorheological fluids^{*}

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

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

(Received 24 June 2008 ; revised manuscript received 8 July 2008)

Abstract

We experimentally studied the tunable effects of connective dendritic left-handed metamaterials based on electrorheological fluids. Three influencing factors—the distance of electrodes ,the permittivity of embedding media ,and the intensity of applied electric fields—are discussed respectively. The experimental results show that the distance of electrodes exhibits an important effect on the transmission peak of the samples. The left-handed transmission peak shifts to lower frequency when the electrorheological fluids infiltrate. Moreover ,by changing the intensity of electric field ,the left-handed transmission peak can be modulated actively ,and the maximum shift is up to 140 MHz.

Keywords : connective dendritic structure , electrorheological fluids , permittivity , left-handed transmission peak

PACC : 4270Y , 4745N , 8185

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation (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