

基于介质谐振器原理的左手材料设计*

杨一鸣¹⁾ 屈绍波^{1)2)†} 王甲富¹⁾ 赵静波¹⁾ 柏鹏³⁾ 李哲³⁾ 夏颂²⁾ 徐卓²⁾

1)(空军工程大学理学院,西安 710051)

2)(西安交通大学电子材料与器件教育部重点实验室,西安 710049)

3)(空军工程大学综合电子信息系统研究中心,西安 710051)

(2010年8月5日收到;2010年9月6日收到修改稿)

本文通过对高介电常数介质基于介质谐振器理论进行分析,明确了利用高介电常数介质产生负介电常数或负磁导率的途径在于介质中产生具有 Lorentz 谐振形式的电磁响应的电偶极子或磁偶极子,指出了这种偶极子的产生来源于电磁波在介质中形成的驻波,而左手通带的形成正是由于电偶极子和磁偶极子之间的相互影响,破坏了驻波形成的条件所实现的. 模拟结果表明,通过将尺寸相同,介电常数不同的介质进行组合,使二者电谐振和磁谐振的频率点重合从而实现左手通带,最后利用高介电常数,低损耗的陶瓷进行样品制作并测试,测试结果证实了基于这一原理实现左手材料的可行性.

关键词: 全介质左手材料, 介质谐振器, 磁偶极子, 电偶极子

PACS: 42. 70. Nq, 78. 20. Ci, 76. 20.+ q, 77. 84. Cg

1. 引言

左手材料(left-handed metamaterials)是指在电磁波某些频段介电常数和磁导率同时为负的新材料. Veselago^[1]在1968年提出左手材料的概念后,由于自然界不存在介电常数和磁导率同时为负的材料,左手材料一直未受到重视. 直到2000年 Smith 等人^[2]才在 Pendry^[3]的理论基础上通过实验制备出介电常数和磁导率同时为负的左手材料,并由此引发了左手材料的研究热潮.

目前,关于左手材料的实现大体分为两种,一是利用含有金属的磁谐振器(如 SRR 环)和电谐振器(如开口金属线)分别实现负介电常数和负磁导率,通过组成阵列来同时实现“双负”^[4-9];另一种则是完全不含金属的全介质左手材料,比如 Holloway 等^[10]提出了用磁性小球实现电偶极子和磁偶极子的方法;Vendik 等^[11]提出了用两组不同尺寸的小球来实现双负的途径;Zhao 等^[12]利用高介电常数的 BST 方块实现了频率可调的负磁导率;Xu 等^[13]利用铁磁体和电介质组成的三明治结构实现

了在外加磁场条件下的可调左手材料. 由于基于全介质的左手材料与传统的含有金属的左手材料相比具有损耗更小,构成简单,更适合在更高频甚至光频实现“双负”以及各向同性等优点而备受关注.

但是传统的基于 Mie 散射理论的分析方法具有一定的缺陷,它要求散射体为球形,尺寸与在散射体中的波长可以比拟,但远小于背景介质中的波长. 实际上,从下文的模拟中可以看出,当散射体不是球形时,且尺寸不满足远小于背景介质中波长的条件时,同样可以实现电偶极子和磁偶极子.

本文通过对介质中出现的谐振模式进行研究,找到了一种新的基于介质谐振器理论的分析全介质左手材料的方法. 分析了介质中电谐振和磁谐振的来源,并通过将不同介电常数的介质进行组合,使二者电谐振和磁谐振的频率点重合从而实现左手通带,并进一步通过样品制作进行测试,证实了其可以实现“双负”通带的特性.

2. 基于介质谐振器的理论分析

对于单个孤立球形散射体,当电磁波进入到放置在背景材料(介电常数为 ϵ_b 、磁导率为 μ_b) 中的

* 国家自然科学基金(批准号:50632030, 10804130, 60871027)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn; yangyimingkd@sohu.com

球形散射体(半径为 r_0 , 介电常数为 $\epsilon_r = n^2$ (n 为散射体的折射率), 磁导率为 μ_r) 时, 其散射场的分布通过平面波展开后, 可以分解为多偶极子形式, 其第 m 级的电散射系数 a_m 和磁散射系数 b_m ^[14] 分别为

$$a_m = \frac{n\Psi_m(nx)\Psi'_m(x) - \Psi_m(x)\Psi'_m(nx)}{n\Psi_m(nx)\xi'_m(x) - \xi_m(x)\Psi'_m(nx)}, \quad (1)$$

$$b_m = \frac{\Psi_m(nx)\Psi'_m(x) - n\Psi_m(x)\Psi'_m(nx)}{\Psi_m(nx)\xi'_m(x) - n\xi_m(x)\Psi'_m(nx)}, \quad (2)$$

其中, $x = k_0 r_0$, $k_0 = \omega/c$ 是真空中波矢, Ψ_m, ξ_m 是 Riccati-Bessel 函数.

根据 Clausius-Mossotti 方程^[15], 在满足波长远大于介质尺寸的条件下, 孤立散射体的等效介电常数 ϵ_{eff} 和等效磁导率 μ_{eff} 可写为

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{2(k_0 r_0)^3 + 6\text{j}fa_1}{2(k_0 r_0)^3 - 3\text{j}fa_1}, \quad (3)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{2(k_0 r_0)^3 + 6\text{j}fb_1}{2(k_0 r_0)^3 - 3\text{j}fb_1}, \quad (4)$$

其中 $f = 4\pi N r_0^3/3$, N 为单位体积中小球的个数.

根据 Mie 散射理论, 结合(1), (2)式有

$$a_1 = \text{j} \frac{2}{3} (k_0^2 \mu_b \epsilon_b)^{3/2} \frac{\epsilon_b - \epsilon_i F(\theta)}{2\epsilon_b + \epsilon_i F(\theta)} r^3,$$

$$b_1 = \text{j} \frac{2}{3} (k_0^2 \mu_b \epsilon_b)^{3/2} \frac{\mu_b - \mu_i F(\theta)}{2\mu_b + \mu_i F(\theta)} r^3,$$

其中

$$F(\theta) = \frac{2(\sin\theta - \theta\cos\theta)}{(\theta^2 - 1)\sin\theta + \theta\cos\theta},$$

$$\theta = k_0 a \sqrt{\epsilon'_i \mu'_i}.$$

从(3), (4)式可以看出, 除去 f, r_0, N 的影响外, 单个散射体的等效参数只分别与其第一级的电谐振系数 a_1 和磁谐振系数 b_1 有关, 适当的 a_1 和 b_1 可以使等效介电常数 ϵ_{eff} 和等效磁导率 μ_{eff} 为负, 也就是说要得到负介电常数和负磁导率, 散射体中就必须实现电谐振和磁谐振, 而电谐振和磁谐振则来源于散射体中形成的电偶极子和磁偶极子.

高介电常数的介质块工作在介质谐振器^[16] (DR) 模式下可以在内部实现电偶极子和磁偶极子, 从而产生电谐振和磁谐振. 高介电常数的介质块可以近似看成磁壁谐振器, 介电常数越大, 电磁能量就越集中在介质块内部. 介质谐振器的工作原理就是将高频电磁波引入电介质中, 借助于电磁波在电介质与自由空间的界面不断反射, 形成驻波, 产生震荡. 一个孤立的 DR 中的辐射场与电或磁的多极子辐射相似, 如偶极子, 四极子, 八极子等. 比如对于

DR 中应用最广泛, 加工最容易的圆柱形 DR 来说, 其可以激发出多种谐振模式, 包括: TE (transverse electric), TM (transverse magnetic), HEM (hybrid electromagnetic) 模式. 而其第一, 第二的谐振分别为 $\text{TE}_{01\delta}, \text{TM}_{01\delta}$ 模式, 其内部场可以分别等效为磁偶极子和电偶极子, 表现出磁响应和电响应, 因此在其谐振区可以分别产生负的磁导率和介电常数.

3. 模拟结果与讨论

首先考察单个介质柱的情况. 由于对于圆柱形 DR 来说, 要避免其他波模的干扰, 一般要求圆柱体的直径 d 与高度 h 之比 $d/h = 0.4-0.5$. 图 1 为对介电常数 $\epsilon = 70$, 半径 $r = 4.5 \text{ mm}$, 高度 $h = 4.5 \text{ mm}$ 的介质柱的模拟结果. 边界条件的设置为 x 方向上为开放边界 (open), z 方向上为电边界 ($E_t = 0$), y 方向上为磁边界 ($H_t = 0$). 从模拟得到的 S 参数图中可以看出在 5.15 GHz, 6.12 GHz 处分别出现了两个谐振. 从根据文献[17]计算得到等效参数(图 1(c))可知, 在 5.15 GHz 和 6.12 GHz 附近分别实现了负的磁导率和负的介电常数. 为了进一步证实这两个谐振的类型, 对 $f = 5.15 \text{ GHz}$ 和 $f = 6.12 \text{ GHz}$ 处的电场和磁场分布进行跟踪. 由图 2 可以看出, 在 5.15 GHz 处, 电场在介质柱中 xz 平面上(图 2(a))呈环形分布, 磁场在 xy 平面上(图 2(b))呈磁偶极子分布, 说明该处出现的是 $\text{TE}_{01\sigma}$ 谐振, 可以等效为磁谐振; 而在 6.12 GHz 处, 磁场在介质柱中 xy 平面上(图 2(c))呈环形分布, 电场在 xz 平面上(图 2(d))呈电偶极子分布, 说明该处出现的是 $\text{TM}_{01\sigma}$ 谐振, 可以等效为电谐振. 同时我们可以看出, 不管是形成的电偶极子还是磁偶极子, 其方向都是与波的传播方向相(x 方向)垂直的.

利用介质谐振器理论可对图 1(b)中 S 参数中出现的禁带作如下解释: 在高介电常数 ($\epsilon > 30$) 的介质界面上, 磁场切向分量近似为零, 入射波与反射波的磁场切向分量近似相消, 合成场的磁力线近似垂直于介质界面. 在电磁理论中, 垂直于磁力线的壁, 称为磁壁, 故高介电常数的介质表面可近似看成磁壁, ϵ 越大, 电磁能量就越集中在介质块内部. 当一定频率的高频电磁波进入电介质中后, 借助于电磁波在电介质与自由空间的界面不断反射, 形成驻波而产生震荡, 从而实现谐振, 出现传输禁带. 也就是说散射体中形成驻波是实现负的等效参

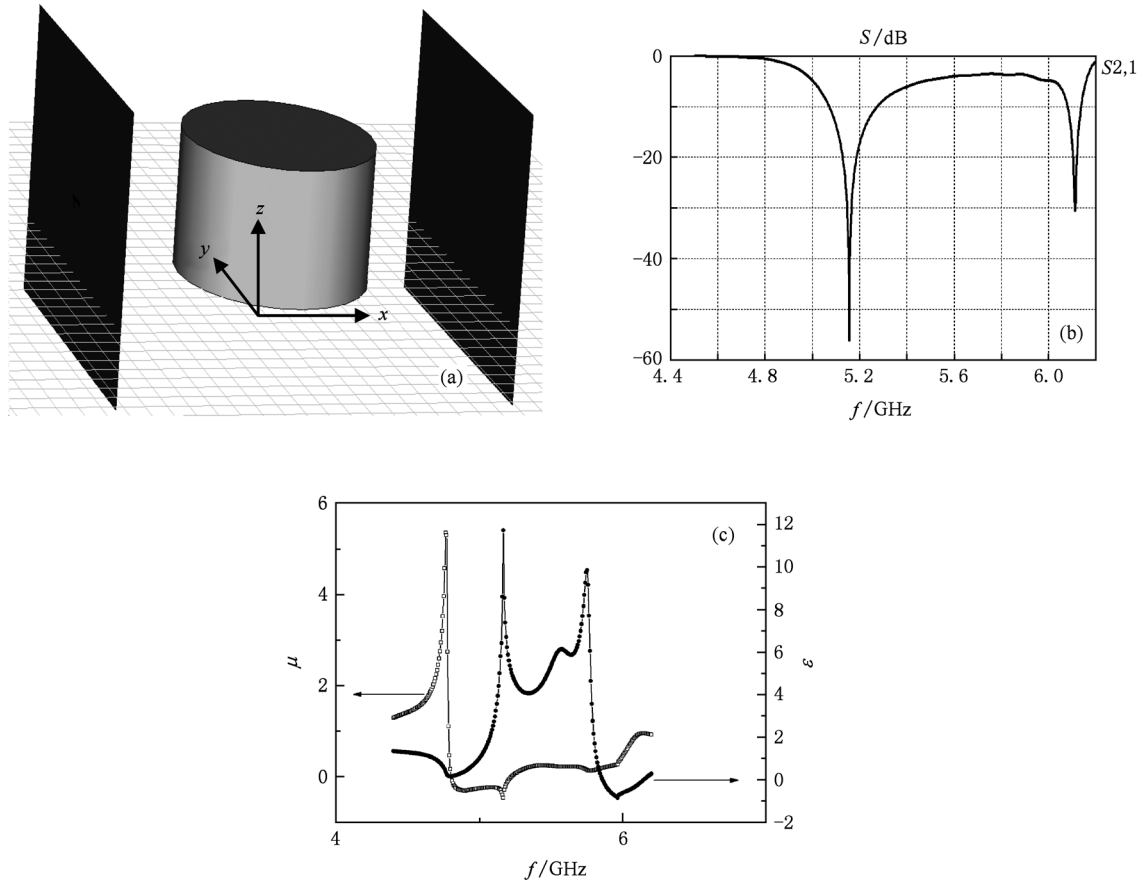


图1 (a) 对 $\epsilon = 70$, 半径 $r = 4.5$ mm, 高度 $d = 4.5$ mm 的介质柱的模拟; (b) 模拟得到的 S 参数; (c) 计算得到的等效参数

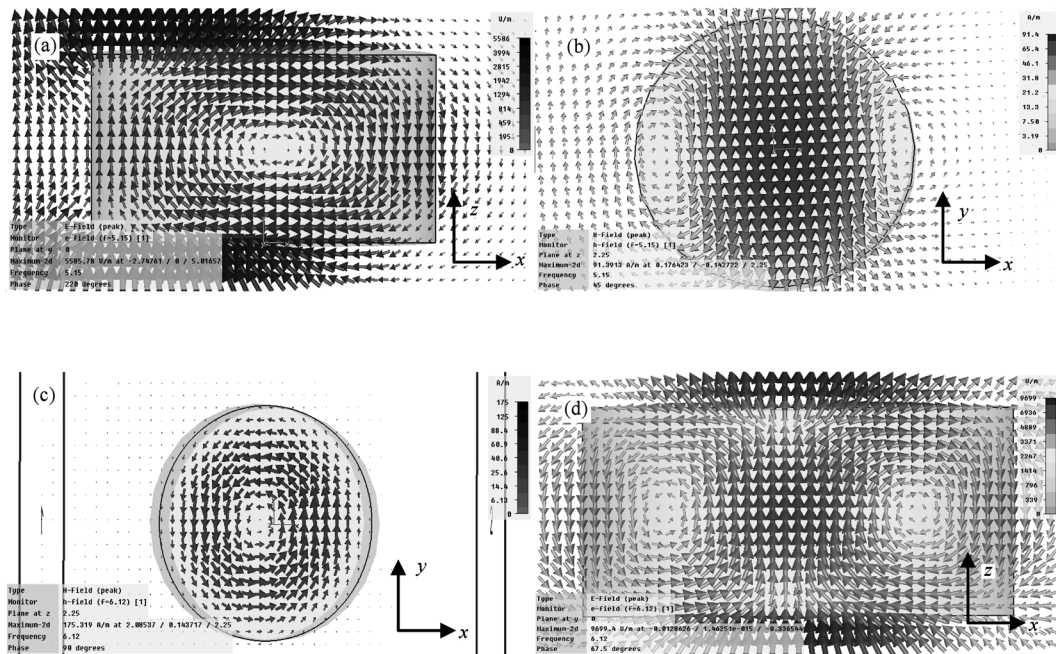


图2 (a) $f = 5.15$ GHz 处 xz 平面上的电场分布; (b) $f = 5.15$ GHz 处 xy 平面上的电场分布; (c) $f = 6.12$ GHz 处 xy 平面上的磁场分布; (d) $f = 6.12$ GHz 处 xz 平面上的磁场分布

数内在原因,负的等效参数是散射体中形成驻波的外在表现.

图3为将介电常数 $\epsilon = 70$, 半径 $r = 4.5$ mm, 高度 $h = 4.5$ mm 的介质柱1和 $\epsilon = 50$, 半径 $r = 4.5$ mm, 高度 $h = 4.5$ mm 的介质柱2进行组合后模拟得到的 S 参数与单独的介质柱1和介质柱2模拟得到的 S 参数的对比. 介质柱排列方向与波的传播方向垂直, 间距为 4.5 mm, 边界条件的设置与之前的模拟相同. 从图中可以看出, 在 6.12 GHz 附近原本介质柱1和介质柱2分别都为禁带的地方出现一个通带.

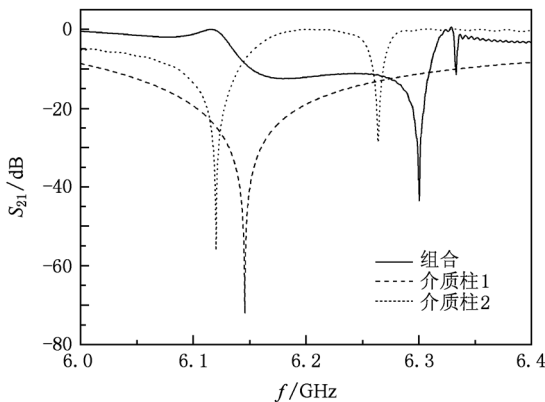


图3 介质柱1和介质柱2组合的模拟 S 参数

为了确定通带出现的原因,对通带处的电磁场进行跟踪(如图4),发现:首先,在 $f = 6.12$ GHz 处,介质柱1(浅色)中形成了一个电偶极子(图4(a)右浅色部分),而介质柱2(深色)中出现一个磁偶极子(图4(a)左深色部分),这证明二者中确实出现了谐振,与单独对介质柱1和介质柱2的模拟结果相同;其次,介质柱1中形成的电偶极子其方向始终垂直于波的入射方向,与单独介质柱中的情况并无不同,但是与单独的一个介质柱的谐振不同,形成的磁偶极子的方向并不是垂直于波的入射方向,而是在平面上沿逆时针转动. 而根据之前的研究,单独的介质柱在谐振时,其形成的偶极子方向应该是与波的传播方向垂直的,即应与图4(b),(d)中相位为 90° 和 270° 时的磁偶极子的方向相同;而在组合后磁偶极子与波的传播方向相垂直时(即相位为 90° 和 270° 时),正是电偶极子最强的时候(如图(b),(d)). 这是由于电谐振的 Q 值高于磁谐振^[18],使得电谐振的耦合效应强于磁谐振,这也充分说明了电偶极子对磁偶极子的影响,使得磁偶极子发生偏转,从而破坏了在介质柱中形成驻波的条件,

使得波可以进行传播,形成通带.

4. 实验结果及讨论

选取高介电常数、低损耗的微波陶瓷 $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3\text{-La}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$ 进行样品制作. 利用以 HP 8720ES 网络矢量分析仪为基础搭建的谐振腔测试系统和波导测试系统(如图5(a))进行分别进行陶瓷介电常数、损耗的测试和样品 S_{21} 参数测试.

谐振腔法测得的陶瓷的性能参数为:陶瓷1的谐振频率 $f_{01} = 3.9318$ GHz, 品质因数 $Q_1 = 600$, 介电常数 $\epsilon_1 = 85$, 损耗 $\delta_1 = 0.0017$; 陶瓷2的谐振频率 $f_{02} = 3.485$ GHz, 品质因数 $Q_2 = 620$, 介电常数 $\epsilon_2 = 107$, 损耗 $\delta_2 = 0.0016$, 满足实验要求.

测试样品如图5(b)所示,其中1#样品是由介电常数为85的陶瓷1(浅色)组成的,2#样品是由介电常数为107的陶瓷2(深色)组成的,3#样品是由陶瓷1和陶瓷2间隔组成的,间距约为2 mm. 所有样品都放置在介电常数接近1的泡沫上,测试时,泡沫基板的长边和短边分别对应波导的长边和短边. 测试采用 BJ-70 波导,波导口大小为 34.849 mm \times 15.799 mm,测试频率为 5.38—8.17 GHz,采样点数为 401 个.

实验结果如图6所示. 图6(a)为样品1实验测得的 S_{21} 参数,图6(b)为根据 S_{21} 参数计算得到的等效介电常数和等效磁导率. 从 S_{21} 参数中可以看出,在 7.25 GHz 附近出现了一个传输禁带,说明该处出现了一个谐振,而矩形介质谐振器的第一个谐振模式为 TE_{110} 型,其内部场分布可以看着一个磁偶极子,从而在谐振负区可以实现负的磁导率,这一点从等效参数中可以看出. 需要指出的一点是,在 7.25 GHz 处,介电常数出现的是谐振,而磁导率出现的是反谐振,这一点与 Smith 等^[19] 的研究是一致的,并且从 2# 样品的等效参数中也可以看出这一点. 同样,图6(c),(d)分别是介电常数为110的方块的 S_{21} 参数和等效参数,同样在 6.3 GHz 和 7.25 GHz 处分别出现了一个谐振,分别实现了负的磁导率和负的介电常数. 样品3的 S_{21} 参数如图6(e)所示,从图中可以看出,在 7.25 GHz 附近样品1,2分别出现传输禁带的地方出现了一个通带(如图阴影所示),这是因为该处在不同介电常数的陶瓷中分别产生了电谐振和磁谐振,从而产生了负介电常数

和负磁导率,使得该处形成一个“双负”通带. 从计算得到 S_{21} 参数(图 6(f)) 中也可以看出,在 7.25 GHz 频率附近 3# 样品的等效介电常数在

7.35—7.53 GHz 为负值,而等效磁导率在 7.38 GHz—7.48 GHz 为负值,也就是实现了一个 100 MHz 的“双负”通带.

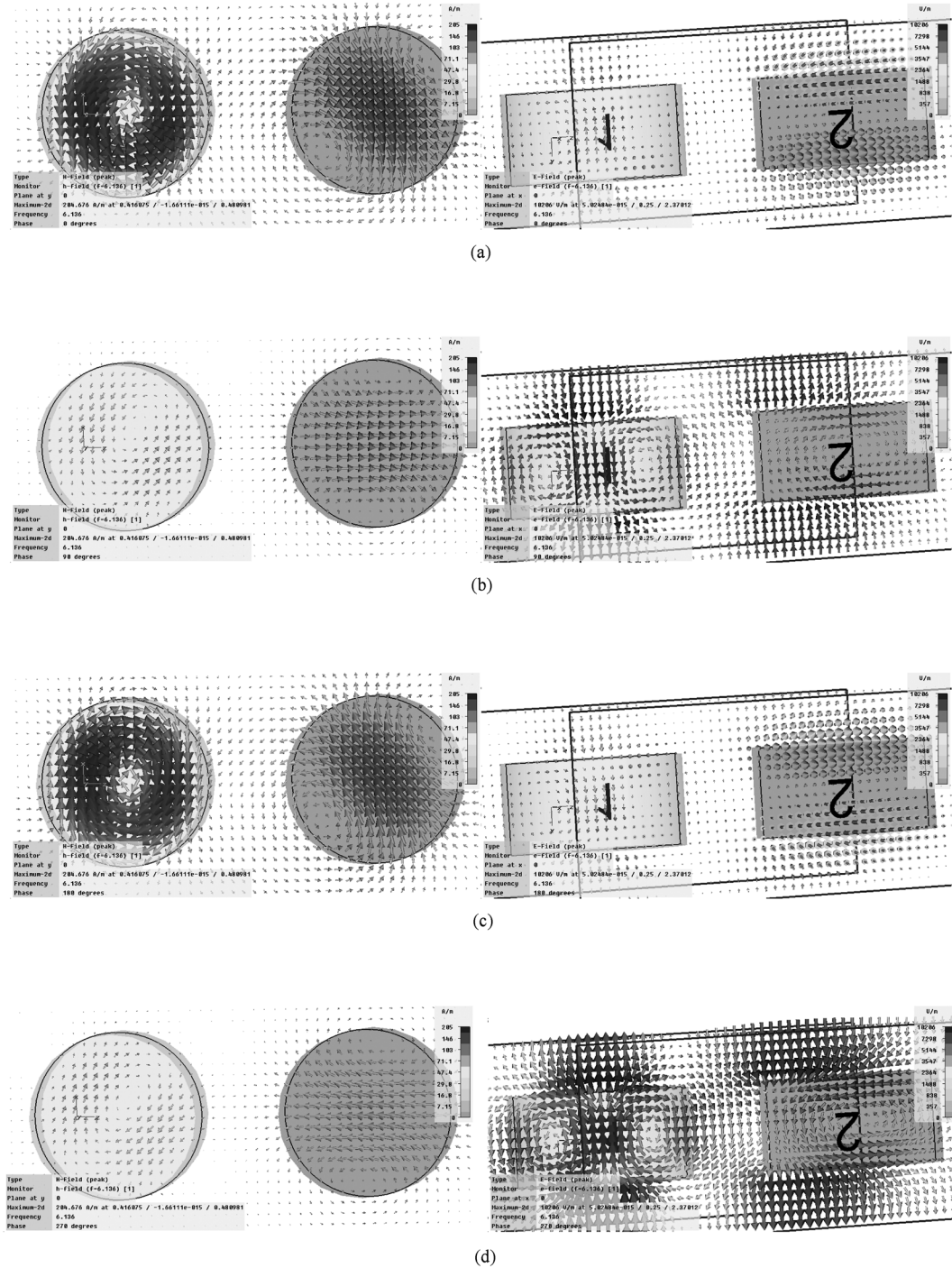


图 4 6.136 GHz 处四个不同相位的电场和磁场分布图 (a) 相位 0° 时的磁场(左)和电场(右);(b) 相位 90° ;(c) 相位 180° ;(d) 相位 270°

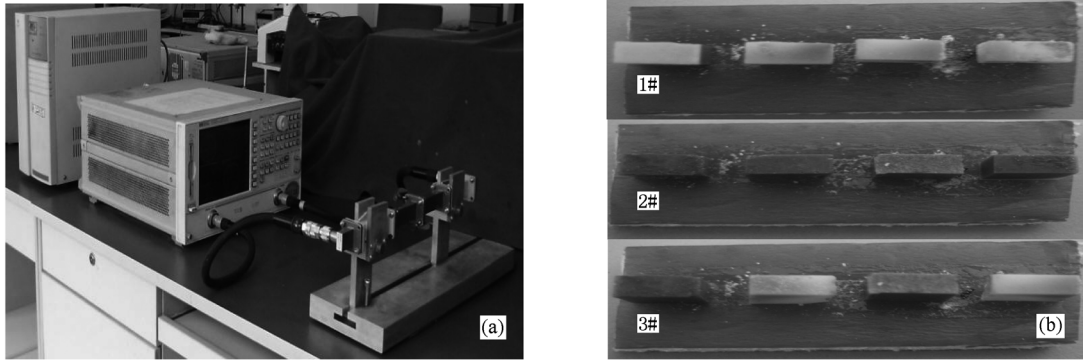


图5 (a)基于矢量网络分析仪的测试系统;(b)测试样品

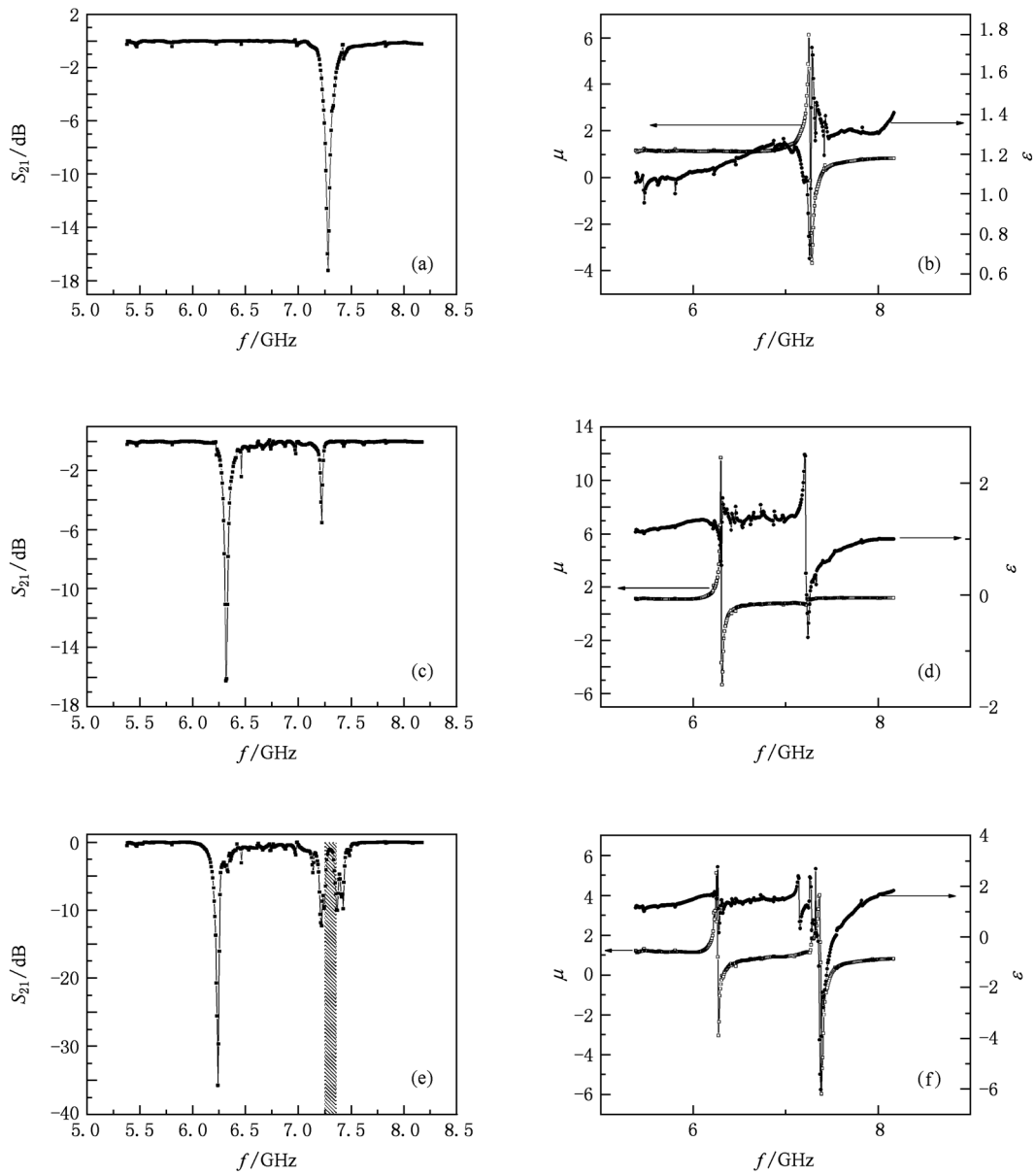


图6 (a),(c),(e)分别是样品1,样品2,样品3测得的 S_{21} 参数;(b),(d),(f)分别是计算得到的样品1,样品2,样品3的等效参数

5. 结 论

通过介质谐振器理论对介质柱中出现的谐振模式进行分析,找到了一种新的分析全介质左手材

料的方法,通过模拟,分析了其电谐振和磁谐振的来源,通过将不同介电常数的介质柱进行组合,使二者电谐振和磁谐振的频率点重合从而实现左手通带. 利用高介电常数,低损耗的陶瓷进行样品制作并测试,证实了其可以实现左手通带的特性.

- [1] Veselago V G. 1968 *Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [3] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **47** 2075
- [4] Xi S, Chen H, Wu B I, Kong J A 2008 *Progress in Electromagnetics Research.* **84** 279
- [5] Ran L, Huangfu J, Chen H, Zhang X, Cheng K, Grzegorzczk T M, Kong J A 2005 *Progress in Electromagnetics Research* **51** 249
- [6] Yang Y M, Qu S B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1031 (in Chinese) [杨一鸣、屈绍波 2009 物理学报 **58** 1031]
- [7] Zhao S C, Liu Z D, Wu Q X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 014211
- [8] Ma H, Qu S B, Xie F, Xu Z, Zhang S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3961 (in Chinese) [马华、屈绍波、谢峰、徐卓、张松 2009 物理学报 **58** 3961]
- [9] Wang J F, Qu S B, Ma H, Xu Z, Yang Y M, Zhang J Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5015 (in China)
- [10] Holloway C L, Kuester E F, Baker-Jarvis J, Kabos P 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 2596
- [11] Vendik O G, Gashinova M S 2004 *Artificial 2004 Microwave Conference*, 34th European 3 1209
- [12] 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
- [13] Xu F, Bai Y, Qiao L J, Zhao H J, Zhou J 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 114104
- [14] Bohren C F, Huffman D R 1983 *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley-Interscience, New York
- [15] Sihvola A 1999 *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*, IEE Electromagnetic Waves Series **47** (The Institution of Electrical Engineers, Stevenage, Herts, UK, 1999)
- [16] Darko Kajfez, Pierre Guillon 1998 *Dielectric Resonators* second edition (Atlanta: Noble Publishing Corporation) p9
- [17] Chen X D, Tomasz M, Wu B I, Pacheco J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [18] Akram Ahmadi, Hossein Mosallaei 2008 *Phy. Rev. B* **77** 045104
- [19] Smith D R, Schultz S, Markos P, Soukoulis C M 2010 *Phys. Rev. B* **65** 195104

All-dielectric left-handed metamaterial design based on dielectric resonator theory*

Yang Yi-Ying¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)2)†} Wang Jia-Fu¹⁾ Zhao Jing-Bo¹⁾
Bai Peng³⁾ Li Zhe³⁾ Xia Song²⁾ Xu Zhuo²⁾

1) (Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

3) (Synthetic Electronic Information System Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 5 August 2010; revised manuscript received 6 September 2010)

Abstract

By analyzing dielectric cube with high permittivity based on dielectric resonator theory, a new approach to the analyzing of left-handed metamaterials simultaneously with negative permittivity and negative permeability is proposed. The approach indicates that dipoles with Lorentz-type resonance electromagnetic responses can realize negative effective parameters in their negative resonant region. The dipole originates from standing wave in high permittivity dielectric cube. By combining electric dipole with magnetic dipole together, the interaction between two kinds of dipoles will destroy the standing wave and realize a left-handed passband. Numerical simulations indicate that by combining dielectric cubes with same sizes but different permittivities together, the electric resonant frequency and the magnetic resonant frequency can be coincident. Finally, experiments are carried out to verify the feasibility of all-dielectric left-handed metamaterial constructed by this means.

Keywords: all-dielectric metamaterial, dielectric resonator, electric dipole, magnetic dipole

PACS: 42.70.Nq, 78.20.Ci, 76.20.+q, 77.84.Cg

* Projects supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50632030, 10804130 and 60871027).

† Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn; yangyimingkgd@sohu.com