

基于铁氧体基板的开口谐振环的可调微波左手特性研究^{*}

艾芬¹⁾ 白洋^{1)†} 徐芳¹⁾ 乔利杰¹⁾ 周济²⁾

1) 北京科技大学材料科学与工程学院环境断裂教育部重点实验室, 北京 100083)

2) 清华大学新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084)

(2007 年 10 月 16 日收到, 2007 年 12 月 5 日收到修改稿)

利用铁氧体的外场调制特性, 提出采用铁氧体作为金属环线结构的介质基板, 实现频率可调左手材料. 首先采用时域差分有限元方法数值模拟了基板材料参数变化的条件下, 开口谐振环的频率可调性规律. 随基板材料的介电常数或磁导率升高, 与开口谐振环负磁导率对应的透射谷频率将显著降低. 实验制备了一系列超高频软磁六角铁氧体, 利用外加磁场有效调制了其磁导率. 并通过实验表明, 通过调控外加磁场可以有效地调控开口谐振环负磁导率对应的透射谷频率.

关键词: 左手材料, 开口谐振环, 铁氧体, 可调

PACC: 4110H, 4225B, 4270Q, 7550G

1. 引言

1968 年, Veselago 从理论上提出同时具有负介电常数和负磁导率的材料^[1], 其具有负折射系数^[2,3]、反向波^[4]、逆多普勒效应^[5]等迥异于传统电磁介质的物理特性, 由于在该材料中电磁波的电场方向、磁场方向与波矢方向呈左手坐标系, 故该材料被称为左手材料(left-handed material, LHM). 上世纪 90 年代末, Pendry 先后提出可以用金属线阵列实现负介电常数^[6], 用开口谐振环(split-ring resonator, SRR)实现负磁导率^[7]. 2000 年, Smith 等人将二者结合, 制造出具有负折射特性的左手材料^[8,9], 引起了国际学术界的巨大震动, 左手材料的实验验证被《Science》评为 2003 年十大科学进展之一.

利用左手材料的奇异电磁特性可以突破传统介质的物理极限, 实现诸多新颖功能, 例如, 突破现有透镜的波长极限, 实现具有亚波长成像特点的‘完美透镜’^[10], 还可有效引导电磁波的传播路径, 实现真正的电磁隐身^[11,12]. 在左手材料的应用研究中最接近实用化的, 即利用左手材料拓展微波器件的设计, 开发具有高性能、新功能的产品. 目前, 利用左手材

料实现新型高指向性天线、可调天线罩、微波滤波器、陷波器、耦合器等微波器件的设想与研究已有很多报道^[13-15]. 为实现各种微波器件, 具有频率可调特性的左手材料成为受到国内外学者的广泛关注^[16,17]. Shadrivov^[18]和 Chen 等人^[13]分别提出在 SRR 结构中外加变容二极管来调节其频率特性. Degiron 等人设想在 SRR 结构中引入电导率可调的半导体来实现可调左手材料^[17]. Zhao 等人将 SRR 结构浸在液晶之中, 通过外加电场调节液晶的介电常数实现结构的频率可调性^[18]. 但是外加可调器件将会大大增加结构的复杂性, 而液晶又具有流动性与腐蚀性, 这均给可调左手材料的实际应用带来很大难度. 如可直接调节基板材料的介电常数或磁导率, 将有效简化可调左手材料的实现难度^[19], 大大推进其实用化进程. 功能陶瓷的电磁参数即具有很好的可调特性, 如钛酸锶钡铁电陶瓷的介电常数具有电场可调性^[20], 铁氧体的磁导率具有磁场可调性^[21]. 本文提出以功能陶瓷作为左手材料的介质基板, 利用外场调制实现可调左手材料. 首先采用时域差分有限元(FDTD)方法数值模拟了基板材料参数变化条件下, 开口谐振环的频率可调性规律, 并且实际制备出一系列超高频软磁铁氧体, 研究了外磁

^{*} 国家自然科学基金(批准号 50702005)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: baiy@mater.ustb.edu.cn

场作用下磁导率的变化规律. 本研究以新一代微波通讯为研究背景, 模型设计与模拟仿真均针对 3 GHz 附近频段, 实验部分也选用在该频段磁导率无色散的 Co_2Y 六角软磁铁氧体.

2. 实验方法

本文采用 CST microwave studio 对以铁氧体为基板的 SRR 结构的微波特性进行模拟仿真, 仿真计算中的 SRR 单元如图 1 所示. 为使 SRR 结构的谐振频率为 3 GHz 左右, 设计其结构参数为(如图 2 所示): $r = 0.8 \text{ mm}$, $d_c = 0.4 \text{ mm}$, $d = 0.8 \text{ mm}$, 缺口宽度 $g = 0.6 \text{ mm}$. 介质基板尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. 仿真设置为 y 方向上下边界设置为 PEC (perfectly electric conducting) 边界, x 方向设置为开放边界, z 方向设置为 PMC (perfectly magnetic conducting) 边界, 平面波从 x 方向入射, 电场 E 沿 y 方向, 磁场 H 沿 z 方向, 波矢 k 沿 x 方向.

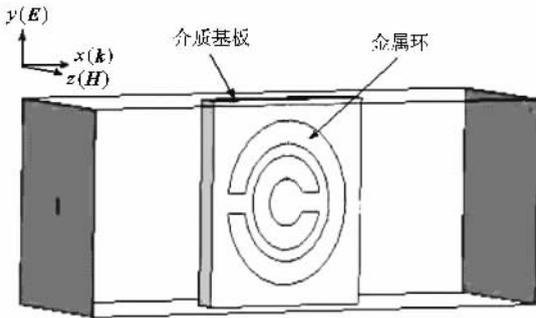


图 1 仿真计算中铁氧体基板的 SRR 单元示意图

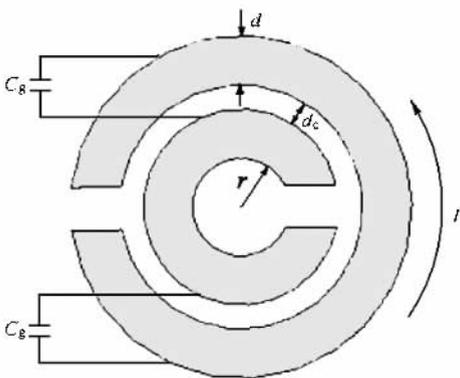


图 2 SRR 单元结构示意图, C_g 是 SRR 结构中的等效电容

实验中选用 Zn, Cu 掺杂的 Co_2Y 平面六角铁氧体 ($\text{Ba}_2\text{Co}_{1.2}\text{Zn}_{0.4}\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$), 研究外磁场作用下磁

导率的可调特性. 采用固相反应法制备样品, 以分析纯的 Fe_2O_3 , BaCO_3 , ZnO , CuO , Co_3O_4 为原料, 按摩尔比称取适量的原料粉体, 球磨 4 h 后混合, 在 1050°C 预烧成相, 然后干压成型, 在 1100°C 烧结成瓷. 采用 Agilent4991 和 HP4194 测试样品的介电常数和磁导率. 采用电路板刻蚀技术 (PCB) 在尺寸为 $34 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$ 的环氧玻璃纤维基板上刻蚀周期性排列的金属 SRR 图案, SRR 单元结构尺寸和仿真计算的相同. 将制得的 SRR 板与 $34 \text{ mm} \times 34 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的铁氧体块叠层复合, 使 SRR 图案与铁氧体相接触 (如图 3 所示).

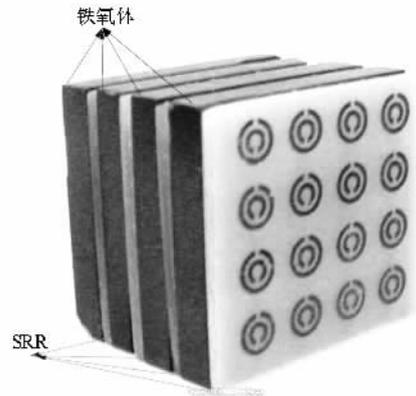


图 3 实验中以铁氧体为介质基板的 SRR 结构示意图

采用 HP8720ES 矢量网络分析仪测量材料的微波透射谱特性. 将样品置于 BJ32 标准波导 (波导截面尺寸为 $72 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$, 测量范围为 $2.6\text{--}3.95 \text{ GHz}$) 中心, 测量时将待测 SRR 样品沿波的传播方向置于波导中, 使 SRR 所在平面与波导侧壁平行, 波导中传播 TE_{10} 波, 即电磁波的磁场分量垂直于开口谐振环平面, 而电场分量则平行于谐振环平面. 实验中使用带特斯拉计的电磁铁施加外磁场.

3. 结果与讨论

3.1. SRR 结构的理论模型

Pendry 提出, SRR 结构可利用电子振荡产生磁等离子共振在特定频段实现负磁导率^[6], 而该结构实质上也可以等效为 LC 谐振电路, 看作是在两个电感之间串联了一个电容, 在谐振频率与等离子频率之间磁导率为负值, 其谐振频率由 SRR 结构中的等效电容和等效电感所决定. 由此, 我们可得到谐振频率 ω_0 和磁等离子频率 ω_{mp} 的表达式为^[22]

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}},$$

$$\omega_{mp} = \sqrt{\frac{1}{LC(1-F)}}, \quad (1)$$

在 $\omega_{mp} < \omega < \omega_0$ 的频率范围内, SRR 结构的有效磁导率为负值。(1)式中 L 表示一个 SRR 单元的等效电感值,它是由等效电路中通过线圈的感应电流所引起(如图 2),其数值与基板材料的磁导率成正比; C 表示等效电容值,它由两金属环间的电容决定,正比于基板材料的介电常数。因此,调节基板材料的磁导率和介电常数,就可以有效改变 SRR 结构的谐振频率,实现左手材料的可调控制。由(1)式可知,在保持其他参量不变的情况下,提高介电常数来增大 C ,或提高磁导率来增大 L ,均可以有效降低 SRR 结构的谐振频率。

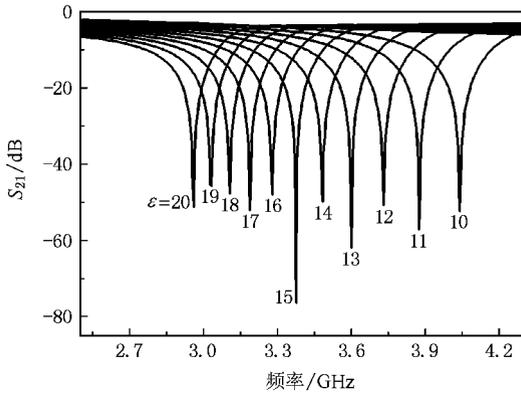


图 4 基板材料介电常数变化条件下 SRR 结构的微波透射谱

3.2. 仿真结果与讨论

采用 CST MW 模拟 SRR 结构的微波特性,改变介质基板的介电常数和磁导率。依据超高频软磁铁氧体的实际材料参数,选择基板材料的磁导率在 1—5 之间,介电常数在 10—20 之间。首先,保持基板材料的磁导率为 1,将其介电常数由 10 变化至 20, SRR 结构的微波透射谱如图 4 所示。依据 Maxwell 方程,电磁波在单负介质(磁导率为负或介电常数为负)内不能传播,即体现为一个电磁波禁带。在谐振频率附近 SRR 结构的磁导率为负值,所以透射参数 S_{21} 显现出一个明显的透射谷。随基板材料介电常数的不断增大,透射谷频率迅速向低频方向移动,当介电常数从 10 增加至 20,其谐振频率从 4.04 GHz 减少至 2.96 GHz。

同样,保持基板材料的介电常数为 15,改变磁

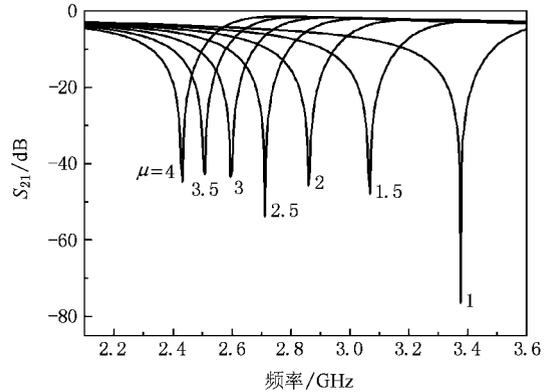


图 5 基板材料磁导率变化的条件下 SRR 结构的微波透射谱

导率,从 1 变化到 4,计算仿真 SRR 结构的微波特性,透射参数 S_{21} 如图 5 所示。随着基板材料磁导率的不断增大, SRR 结构的谐振频率逐渐向低频移动,当磁导率由 1 增至 4,透射谷频率从 3.38 GHz 降至 2.43 GHz。仿真计算结果与理论分析符合良好。

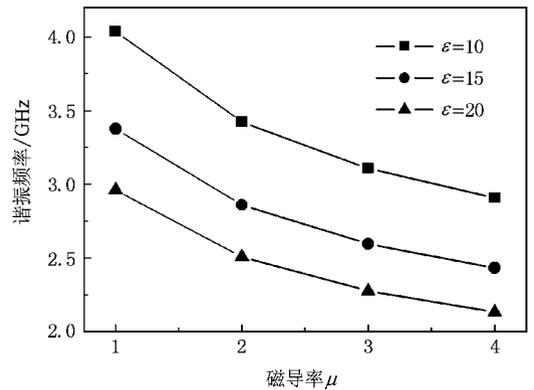


图 6 不同介电常数条件下基板材料磁导率变化引起 SRR 结构谐振频率的变化规律

图 6 总结了不同介电常数条件下 SRR 谐振频率 f_r 随基板材料磁导率 μ 的变化规律。可以看出,随介电常数或磁导率提高 f_r 单调下降,而且当介电常数固定时, f_r 随 μ 提高而非线性下降,这是由于基板材料的磁导率 μ 与 SRR 结构的等效电感 L 成正比关系,而 f_r 反比于 \sqrt{L} 。这使得磁导率变化率相同条件下,磁导率数值越低, f_r 的变化量越大。由于软磁材料在 GHz 频段的磁导率均很低,所以 f_r 与 μ 之间的非线性关系更有利于通过改变 μ 调节左手结构的频率特性。

仿真计算结果证实通过改变基板材料的介电常数或磁导率实现左手材料的频率可调性是完全可行

的. 多种功能陶瓷的电磁参数均具有可调性, 可以被用作基板材料, 例如铁电陶瓷钛酸锶钡的介电常数就具有场致可调特性, 而磁性陶瓷铁氧体的磁导率也具有场致可调特性. 相比较而言, 在微波频段铁氧体磁导率的可调变化率更大, 因此作为左手材料金属环线结构的基板材料将可获得更好的频率可调性. 因此, 在进一步研究工作中, 我们研究了超高频软磁铁氧体的电磁参数在外磁场调制下的变化规律.

3.3. Y型平面六角铁氧体磁导率的外场调制特性

针对新一代无线通讯技术的频率要求, 并与仿真结果相对应, 基板材料需要满足磁导率在 3 GHz 附近频段无色散的要求, 因此我们选择了 Co_2Y 平面六角铁氧体. 铁氧体磁导率的高频磁谱主要受畴壁共振与自然共振的影响, Co_2Y 平面六角铁氧体具有极强的平面磁晶各向异性, 最大程度抑制了磁壁移动, 磁化过程仅存在磁畴转动一种机理, 因此磁谱中没有畴壁共振的影响^[23], 同时极强的平面磁晶各向异性也使其自然共振频率高达 8 GHz 左右, 这样 Co_2Y 的磁谱在自然共振频率以下不存在色散. 为调节烧结特性并适当提高磁导率, 我们在实验中选择 Zn, Cu 掺杂的 Co_2Y 铁氧体 ($\text{Ba}_2\text{Zn}_{0.4}\text{Co}_{1.2}\text{Cu}_{0.4}\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$).

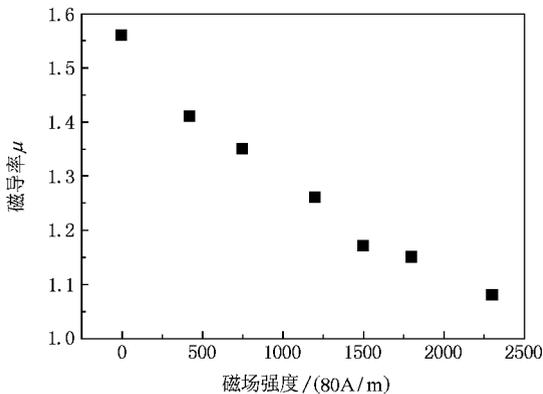


图7 不同外加磁场强度下铁氧体磁导率的变化规律

为有效调控铁氧体的磁导率, 我们测试了材料的磁导率随外加磁场强度的变化规律(如图7所示). 可以看出随磁场强度增加材料的磁导率显著降低. 材料磁导率的高低取决于材料的磁感应强度随交变磁场变化的程度, 变化越剧烈, 材料的磁导率越高. 若一个外加的直流偏场与交变磁场同时作用于样

品, 材料内畴转和壁移运动都会受到限制. 原子的自旋磁矩更偏向于转到平行于直流偏场的方向. 因此, 材料的磁感应强度不能像没有直流偏场时那样随交变磁场自由变化, 由此导致材料的磁导率随直流磁场强度的增加而下降. 实验结果表明: 当外加磁场从 0 增至 160 kA/m 时, 材料的磁导率从 1.55 降低至 1.08. 对应前面的仿真计算结果, 该磁导率变化率将会导致 SRR 结构谐振频率变化 305 MHz.

3.4. 实验结果与讨论

进一步, 我们通过实验测量了以铁氧体为介质基板的 SRRs 结构的微波透射谱随外加磁场的变化规律(如图8所示), 随着基板材料磁导率的不断增大, SRR 结构的谐振频率逐渐向低频方向移动, 当外加磁场由 40 kA/m 增至 184 kA/m 时, 透射谷频率从 2.83 GHz 升至 3.15 GHz. 由于外加磁场有效调控基板铁氧体的磁导率, 使铁氧体磁导率随外加磁场的不断增加而下降, 由前文提到, 基板材料的磁导率 μ 与 SRR 结构的等效电感 L 成正比关系, 而 f_r 反比于 \sqrt{L} . 因此在保持其他条件不变的情况下增大外加磁场, 则会引起磁导率数值变低, f_r 的值逐渐变大. 实验结果与仿真计算结果及理论分析符合良好.

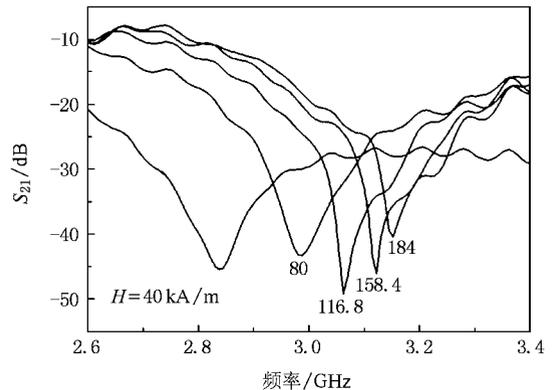


图8 不同外加磁场下以铁氧体为基板的 SRRs 结构的微波透射谱

4. 结 论

本文结合有限元仿真计算和实验结果表明可以通过调节基板材料的电磁参数来调控 SRR 的频率特性. 随基板材料介电常数或磁导率的增加, SRR 谐振频率向低频方向移动, 同时我们也在实验上证明铁氧体的磁导率可以通过外加磁场调控来进行调

控,进一步我们由实验验证通过调控外加磁场可以有有效的调控 SRRs 的谐振频率. 具有负磁导率的 SRR 是构成左手材料的基本单元,由于金属线阵列对外加磁场不敏感,因此外磁场调制 SRR 频率特性

的研究,可直接指导相应可调左手材料的研究. 该研究为可调左手材料的实现提供可一条简单易行的新方法,推动可调左手材料微波器件的研究开发,可以促进其在新一代无线通讯技术中的应用.

- [1] Veselago V G 1968 *Soviet Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Houck A A , Brock J B , Chuang I L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 137401
- [3] Zhen Q , Zhao X P , Fu Q H , Zhao Q , Kang L , Li M M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5683 (in Chinese) [郑 晴、赵晓鹏、付全红、赵 乾、康 雷、李明明 2005 物理学报 **54** 5683]
- [4] Luo C Y , Ibanscu M , Johnson S G , Joannopoulos J D 2003 *Science* **299** 368
- [5] Seddon N , Bearpark T 2003 *Science* **302** 1573
- [6] Pendry J B , Holden A J , Stewart W J , Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4733
- [7] Pendry J B , Holden A J , Robbins D J , Stewart W J 1999 *IEEE T Microw Theory* **47** 2075
- [8] Smith D R , Kroll N 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2933
- [9] Shelby R A , Smith D R , Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [10] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [11] Schurig D , Mock J J , Justice B J 2006 *Science* **314** 977
- [12] Pendry J B 2006 *Science* **312** 5781
- [13] Chen H S , Wu B L , Ran L X 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 3509
- [14] Burokur S N 2005 *IEEE Antenn. Wirel. Protag. Lett.* **4** 1536
- [15] Liu L , Caloz C , Chang C C 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5560
- [16] Zhang F L , Zhao X P 2007 *Acta. Phys. Sin.* **56** 4461 (in Chinese) [张富利、赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 4461]
- [17] Luo C R , Kang L , Zhao Q , Fu Q H , Song J , Zhao X P 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣、康 雷、赵 乾、付全红、宋 娟、赵晓鹏 2005 物理学报 **54** 1607]
- [18] Shadrivov I V , Steven K , Morrison 2006 *Opt. Exp.* **14** 9345
- [19] Degiron A , Mock J J , Smith D R 2007 *Opt. Exp.* **15** 1115
- [20] Sun X H , Zhu B L , Liu T , Li M Y 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 4103
- [21] Bai Y , Zhou J , Yue Z X , Gui Z L , Li L T 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 3901
- [22] Chen H S 2006 *Doctoral Dissertation* (Zhejiang University) [陈红胜 2006 博士论文(浙江大学)]
- [23] Liao S B 2000 *Ferromagnetism* (Beijing Science Press) (in Chinese) [廖绍彬 2000 铁磁学 (北京 : 科学出版社)]

Research on the tunable left-handed properties of split-ring resonator with ferrite substrate^{*}

Ai Fen¹⁾ Bai Yang^{1)†} Xu Fang¹⁾ Qiao Li-Jie¹⁾ Zhou Ji²⁾

1 *Key Laboratory of Environmental Fracture (Ministry of Education), University of Science and Technology Beijing , Beijing 100083 , China)*

2 *State Key Laboratory of New Ceramics and Fine Processing , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)*

(Received 16 October 2007 ; revised manuscript received 5 December 2007)

Abstract

The left-handed material , whose permittivity and permeability are simultaneously negative , has some exotic electromagnetic properties , and is one of the most absorbing subjects in recent physical academic domain. This paper suggests that a tunable left-handed metamaterial can be realized by using ferrite as the substrate of metallic wire structure , owing to the field dependence of ferrite 's permeability. Finite element method was used to simulate the effect of substrate properties on the effective properties of a metamaterial slab. With the rise of substrate permittivity or permeability , the resonance frequency drops significantly. Ferroplana has been prepared , and the field dependence of its permeability was studied.

Keywords : left-handed material , split-ring resonator , ferrite , tunable

PACC : 4110H , 4225B , 4270Q , 7550G

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50702005).

[†] Corresponding author. E-mail : baiy@mater.ustb.edu.cn