

一种新颖的变异开口谐振环双频带磁谐振特异材料*

唐明春 肖绍球[†] 邓天伟 王 多 柏艳英 金大鹏 王秉中

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2010年4月10日收到; 2010年8月17日收到修改稿)

根据磁谐振等效电路原理, 设计出了工作在 X 波段的基于变异开口谐振环(split ring resonators)结构的新型双频带磁谐振特异材料. 由于内外环间具有弱耦合的优越特性, 所提出的磁谐振特异材料的两个工作频点可以较为方便地调节. 该研究成果为特异材料的多频带、宽带化提供有益的研究思路和设计方法.

关键词: 磁谐振特异材料, 双频带, 弱耦合

PACS: 41. 20. Jb, 42. 70. Qs, 78. 20. Ci

1. 引言

特异材料由于具有独特的性质而呈现出许多反常的物理光学现象而得到科学界的广泛重视, 如负折射效应、逆多普勒效应、完美透镜效应、逆 Cherenkov 辐射等^[1]. 广义地, 特异材料包括以下 3 类: 具有负介电常数的电谐振特异材料^[2]、具有负磁导率的磁谐振特异材料^[3]以及具有介电常数和磁导率同时为负的左手材料^[4-13]. 目前, 特异材料已在光学、太赫兹电磁波和微波等领域得到了初步应用, 展现出了一定的应用潜力^[14, 15], 同时对不同种类、不同性能特异材料的需求也在不断增加.

然而, 特异材料的研究和发展面临着诸多困难. 由于自然界中不存在自由的磁荷, 因而使得设计磁谐振特异材料变得极具挑战性. 尽管相关文献已经报道了各种磁谐振特异材料结构, 如单开口谐振环(splitring resonators, SRRs)^[16]、边耦合 SRRs^[4]、双面 SRRs^[15]、螺旋谐振器(spiral resonators)^[3, 17]等. 然而, 以上结构只能实现一个相当窄的工作频带, 使得其在工程中的广泛应用受到较大限制. 为了实现双工作频段、多工作频段和扩展工作频率范围, 目前的技术主要分为以下两方

面: 一方面是利用几个不均匀的相邻单元构成较大的混合单元^[18]; 另一方面是利用内环和外环相互连接而形成新的单环谐振器(single loop resonator)单元^[19]. 可是以上技术均存在相应的缺陷: 混合单元涉及多个不同结构单元、设计难度较大, 并且机械稳定度不高; 单环谐振器会在高频产生寄生的电谐振, 外圈与内圈的相互干扰较大.

本文基于传统的单 SRRs 产生磁谐振和环间耦合的物理机理, 通过加载同向单 SRRs、调节两环的中心位置等手段, 仿真设计出了一种双频带的 SRRs 磁谐振特异材料. 该特异材料结构不仅由于单元结构均一、设计简单, 而且易调节双频位置、不会产生高频的电谐振响应.

2. 单 SRRs 磁谐振分析

以单 SRR 单元为例, 进行等效电路模型分析. 图 1(a) 为一个边长为 a 的立方体单 SRR 单元, 其中 $r_1 - r_2 \ll r_1$, 不妨近似地表示为 $r_1 = r_2 = r$. 当沿着 y 轴方向施加一个随时间变化的磁场 H_0 时, 则 SRR 将产生感应电流 I , 而电流 I 在 SRR 上产生感应电压 U . 这可以用图 1(b) 的等效电路来解释, 其中 C 是 SRR 裂口处的等效电容, R 是环路的总电阻. 根

* 国家自然科学基金(批准号:60872034, 60971029)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET070154)、毫米波国家重点实验室基金(批准号:K200809)和航空科学基金(批准号:20090180007)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xiaoshaoqiu@uestc.edu.cn

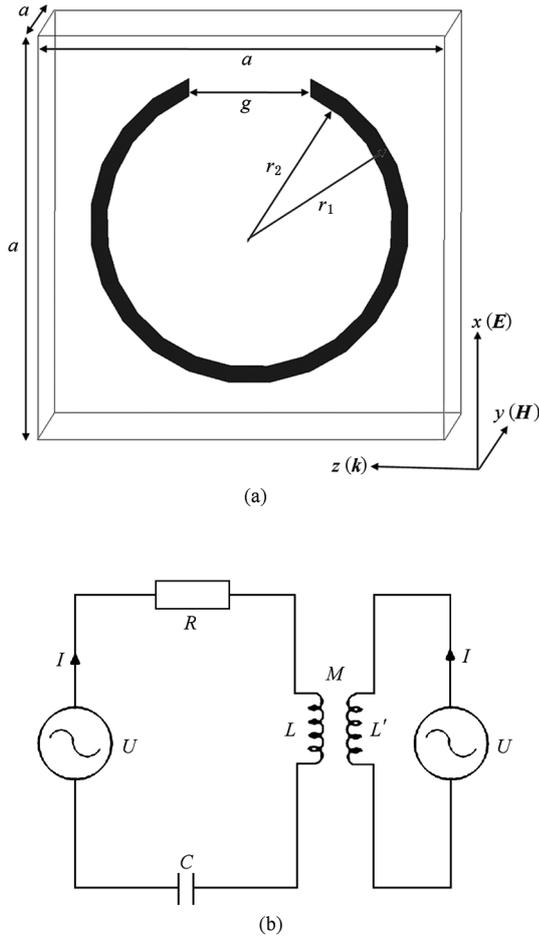


图1 单 SRR 结构 (a) 结构模型, (b) 等效电路模型

据电磁感应定律^[20], 电源 U 的值取决于外磁场 H_0 ^[21, 22], 有

$$U = i\omega\mu_0\pi r^2 H_0. \quad (1)$$

在图 1(a) 的电磁场环境中, y 方向的 SRR 环等效于无穷排列的螺线管, 若 SRR 排列足够密, 可以不考虑磁力线的边缘效应. 穿过 SRR 螺线管中的磁通量 Φ 为

$$\begin{aligned} \Phi &= \pi r^2 B \\ &= \pi r^2 \mu_0 n_1 I \\ &= \pi r^2 \mu_0 I / a. \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $n_1 = 1/a$ 表示沿着 y 方向单位长度的 SRR 螺线管匝数, 又因

$$\Phi = LI, \quad (3)$$

则由(2)与(3)式, 可得 SRR 的等效电感为

$$L = \mu_0 \pi r^2 / a. \quad (4)$$

因为相邻 SRR 之间存在相互耦合, 这里用互感 M 来表示它们之间的耦合系数. 由于 SRR 螺线管在 y 方向延伸到很远, 产生的去极化场将均匀地分布

在 xz 平面. 互感系数 M 可以表示为

$$\begin{aligned} M &= \frac{\Phi}{I} \\ &= \lim_{n_2 \rightarrow \infty} \frac{\pi r^2 \Phi_d}{n_2 a^2 I} \\ &= \lim_{n_2 \rightarrow \infty} \frac{\pi r^2}{n_2 a^2} (n_2 - 1) L \\ &= \frac{\pi r^2}{a^2} L \\ &= FL. \end{aligned} \quad (5)$$

其中 n_2 表示在 xz 平面的 SRR 螺线管的个数, Φ 是在电感 L 内的去极化场通量, $\Phi_d = (n - 1)LI$ 是总的去极化场通量, $F = \frac{\pi r^2}{a^2}$ 是在 xz 平面上一个 SRR 单元金属部分包括的面积占整个单元面积的比率. 故产生的感应电压又可表示为

$$U = RI + \frac{I}{-i\omega C} + (-i\omega L)I - (-i\omega M)I. \quad (6)$$

利用方程(1), (4)和(5), 可以得出 SRR 的感应电流为

$$I = \frac{-H_0 a}{(1 - F) - \frac{1}{\omega^2 LC} + i \frac{R}{\omega L}}. \quad (7)$$

而单位体积里的磁矩为

$$M_d = \frac{\pi r^2 I}{a^3}. \quad (8)$$

根据磁介质的本构关系

$$\begin{aligned} \mu(\omega) &= \frac{B/\mu_0}{B/\mu_0 - M_d} \\ &= \frac{H_0}{H_0 - M_d}. \end{aligned} \quad (9)$$

由(7)–(9)式得到

$$\mu(\omega) = 1 - \frac{F}{1 - \frac{1}{\omega^2 LC} + i \frac{R}{\omega L}}. \quad (10)$$

由(10)式可以得出, 当 $\text{Re}[\mu(\omega)] \rightarrow -\infty$ 时磁谐振频率为

$$\omega_{m0} = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (11)$$

当 $\text{Re}[\mu(\omega)] \rightarrow 0$ 以及磁等离子频率为

$$\omega_{mp} = \sqrt{\frac{1}{LC(1 - F)}}, \quad (12)$$

可知工作频率在 $\omega_{m0} < \omega < \omega_{mp}$ 时, 有效磁导率 $\text{Re}[\mu(\omega)] < 0$, 该特异材料产生磁谐振.

3. 双频带磁谐振特异材料设计

为了满足图 1(a) 的电磁场环境,将单 SRR 置于矩形波导仿真器里面,并利用波导仿真原理设计出相应的波导环境.具体的尺寸为 $a \times a \times a = 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$;波导中心位置放置金属 SRR 单元,具体的尺寸为 $r_1 = 1.96 \text{ mm}$, $r_2 = 1.76 \text{ mm}$, $g = 1.5 \text{ mm}$.边界条件设置如下:垂直于电场(x 轴)的边界(上下边界)为理想电边界,垂直于磁场(y 轴)的边界(前后边界)为理想磁边界,左右边界(z 轴)设为波导端口.波导空间的其余部分全部由介质 Taconic TLY(tm) 填充,其相对介电常数 $\epsilon_r = 2.2$,损耗角正切值为 0.0009.

由以上所述可知,该结构的工作频率满足 $\omega_{m0} < \omega < \omega_{mp}$ 的条件时将产生磁谐振,出现传输禁带.利用高频仿真软件 HFSS 10.0 进行仿真,得到其传输系数曲线.如图 2 所示,在 9.25 GHz 附近该结构产生了磁响应.

同样在图 1 的波导环境中,通过改变金属 SRR 的结构参数,即 $r_1 = 1.5 \text{ mm}$, $r_2 = 1.3 \text{ mm}$, $g = 0.2 \text{ mm}$,使得其工作的中心频率移动到 10.7 GHz 附近.为了便于对照,该仿真结果也示于图 2 中.

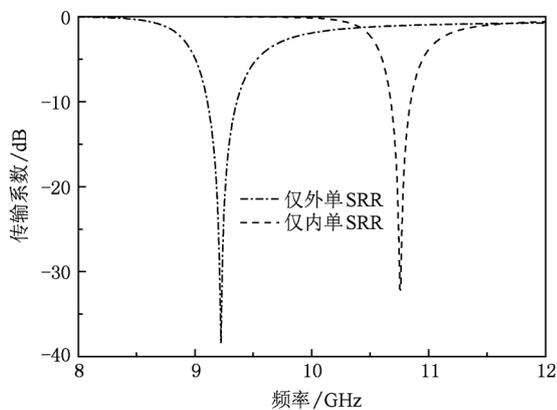


图 2 单 SRR 传输系数与频率之间的关系

在保持图 1(a) 波导环境不变的同时,将两个单环放置在同一中心位置,并且将内环的开口反向则可形成传统的边耦合 SRR 双环结构^[4],如图 3 所示.相对于单环结构,由于两环产生的感应电流方向相同,但是由于开口相反而使得外环和内环的感应电荷分布位置趋于相反而产生较大的环间感应电压,使得内外环产生较大耦合^[15].特别在外环与内环的半径近似时,由(11)式可知相当于在外环的

基础上增加了内环的电容和环间电容,使得工作频率有了较大的降低.如图 4 所示,其工作的中心频率降低到了 7.5 GHz.但是,该边耦合 SRR 仅仅只能产生一个较窄的磁谐振频带^[4].

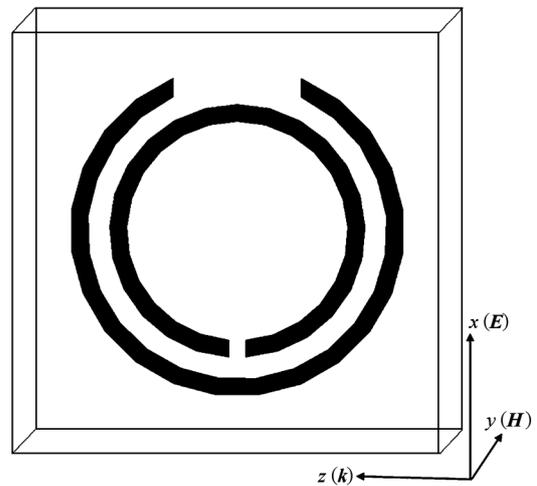


图 3 边耦合 SRR 单元

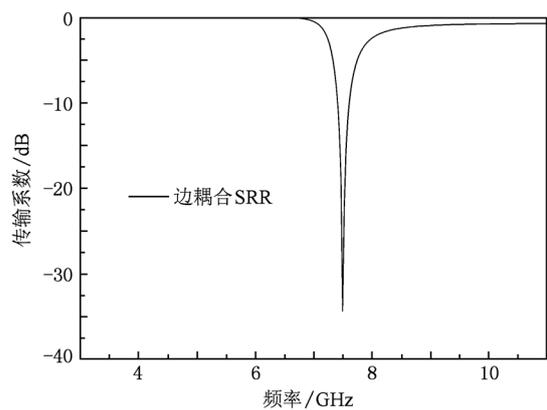


图 4 双环边耦合 SRR 传输系数与频率之间的关系

为了获得双频带的磁谐振特异材料,我们提出利用两个同向的 SRR 组成单元结构,如图 5 所示.在感应电流方向相同的情况下,由于开口位置相同而使得外环和内环的感应电荷分布位置趋于相同,从而使得两个环之间的耦合较弱.通过图 6 可知,该结构可以实现 9.15 和 11.2 GHz 附近两个工作频带.将该结果分别与图 2 和图 4 相比较可知:内外环之间的相互耦合效应已经得到明显改善;相对于外环,该结构对内环的谐振峰的位置和强度影响较大.

进一步研究内环与外环中心的相对位置对磁谐振峰的影响,如图 7 所示.为了便于对比,我们固

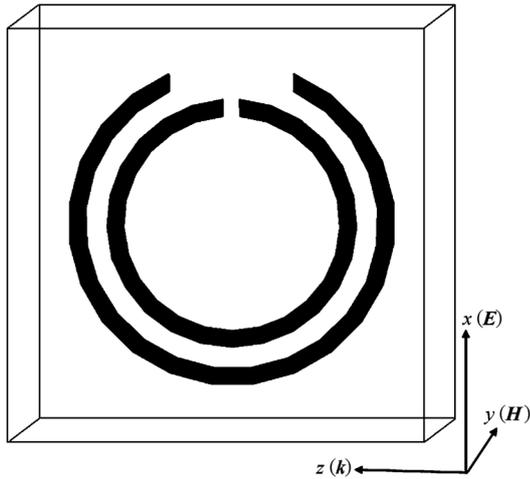


图5 同向 SRR 单元

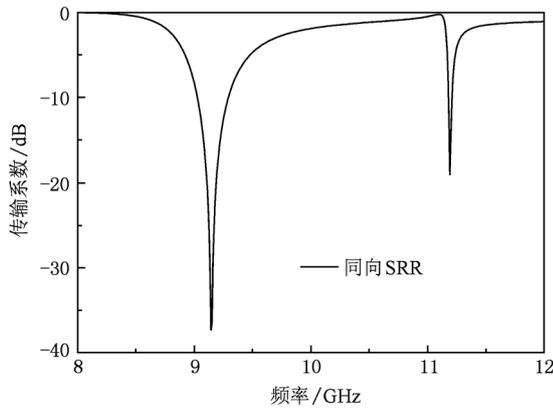


图6 同向 SRR 的传输系数和频率的关系

定内环,通过调节外环的位置进行数值研究,并且以 x 轴的正方向确定为移动参量 d 的参考方向,数值分析结果如图 8 所示. 将外环从上面 $d = 1.5 \text{ mm}$ 逐步下移到 $d = -2 \text{ mm}$ 处,内外环的相互耦合不断减小,使得内环的谐振峰频率逐渐降低,谐振强度不断增大. 将该结果与图 2 相比较可知,当移动到 $d = -2 \text{ mm}$ 时,内环与外环的谐振频率和谐振强度与分别放置两单环时的效果几乎相同,在这种情况下下的内外环之间的互耦抑制度达到最佳,互耦效应可以忽略. 所以,图 7 变异 SRR 的等效电路模型可以简单地视为两个互不干扰的等效电路模型(如图 1 (b) 所示),分别工作在各自谐振频带.

图 9 给出了在高频带和低频带谐振峰的电流感应分布. 在 $f = 9.125 \text{ GHz}$ 的低频时,较强的感应电流分布在外环而呈现磁谐振,而内环只有较少电流分布. 同样地,在 $f = 10.72 \text{ GHz}$ 的高频时,较强的感应

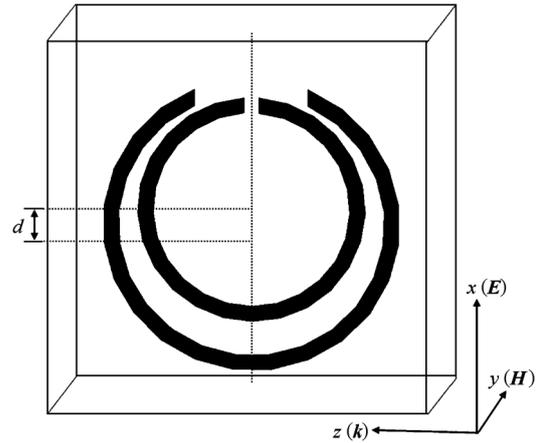


图7 变异的 SRR 结构图

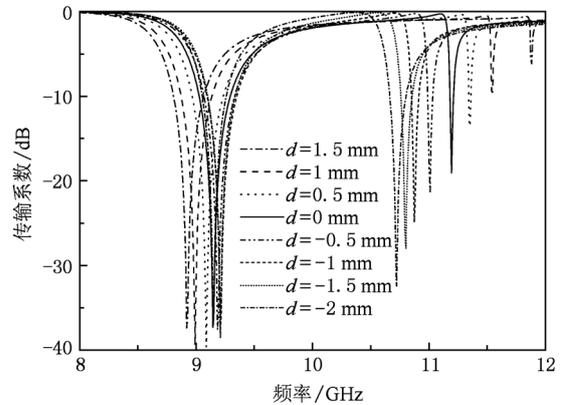


图8 内外环的相对位置对谐振峰的影响

电流分布在内环而呈现磁谐振,外环也只有极少的电流分布. 结果进一步证实了在该种情况下内外环之间的耦合效应得到了很好的抑制.

下面通过提取变异的 SRR 结构的反射系数和传输系数的幅度和相位,研究该结构的磁谐振特性,所得结果如图 10 所示. 考虑到该变异的 SRR 单元的物理尺寸约为波长的 $1/6$,所以提取有效介电常数和有效磁导率很有必要. 这里,采用文献[23]的方法提取该特异材料结构相应的有效介电常数和有效磁导率,图 11 (a) 和 (b) 分别给出了有效介电常数和有效磁导率的实部和虚部. 在相对介电常数保持为正的同时,有效磁导率在 $8.88\text{--}9.39 \text{ GHz}$ 和 $10.56\text{--}10.85 \text{ GHz}$ 两个频带同时为负(与图 8 和图 9 的结果相符). 根据 (11) 和 (12) 式,该结构较好地实现了双频带的磁谐振.

下面通过分别调节两环的开口宽度 g 来调节两个频带的中心工作频率. 在其他结构参量不变的

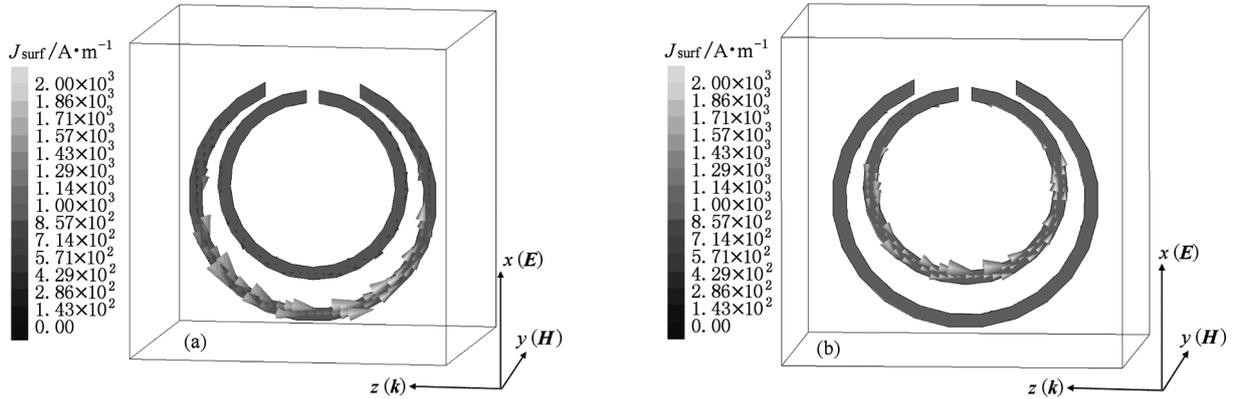


图9 两个谐振峰的电分布 (a)9.125 GHz, (b)10.72 GHz

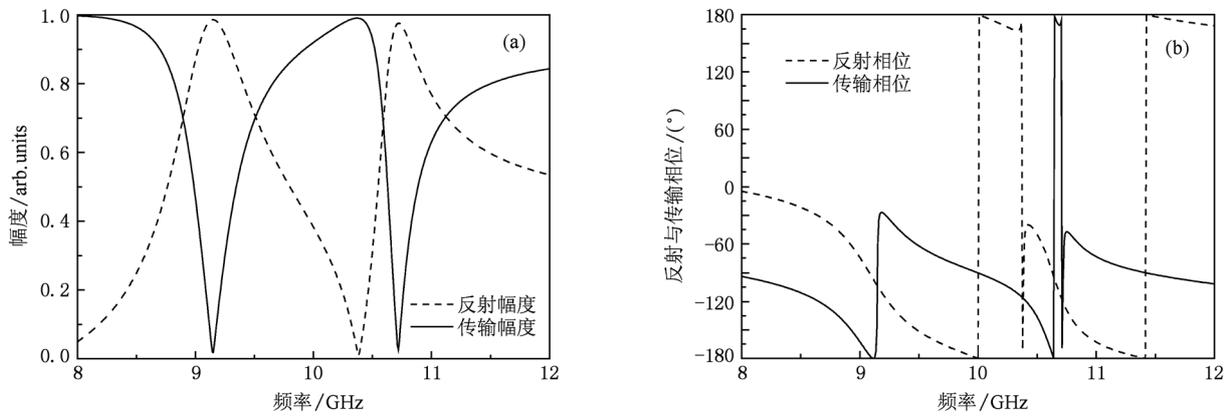


图10 反射系数和传输系数随频率的变化关系 (a)幅度,(b)相位

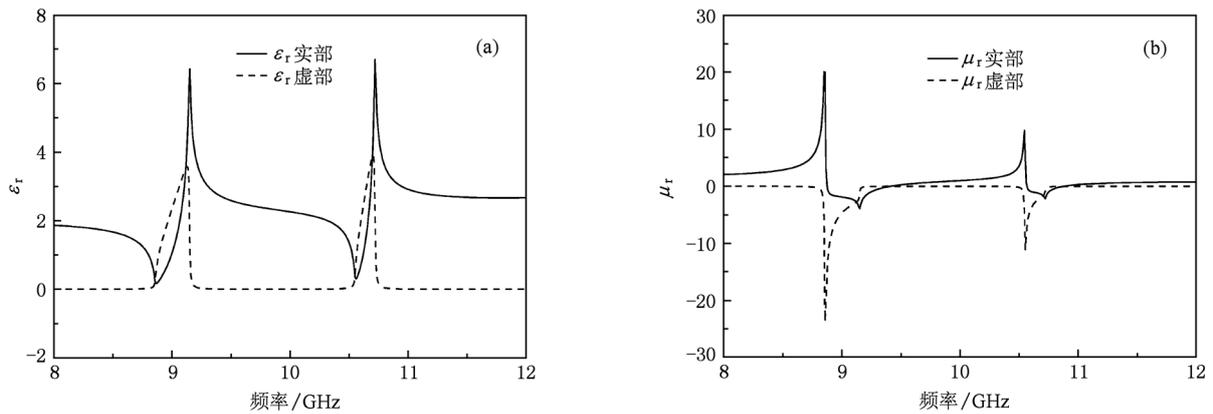


图11 有效介电常数和有效磁导率随频率的变化 (a)有效介电常数,(b)有效磁导率

情况下,仅调节外环的开口宽度 g .如图12(a)所示,外环的开口宽度对高频带(由内环磁谐振引起的禁带)几乎没有影响;然而随着开口宽度的增加,使外环开口电容减小,从而导致谐振频率增大.在其他结构参量不变的情况下,仅调节内环的开口宽

度 g .如图12(b)所示,内环的开口宽度对低频带(由外环磁谐振引起的禁带)几乎没有影响;然而随着开口宽度的增加,使内环开口电容减小,从而导致谐振频率增大.可见相对于文献[19]提出的单环谐振器,该结构不仅结构简单、不会产生寄生的电

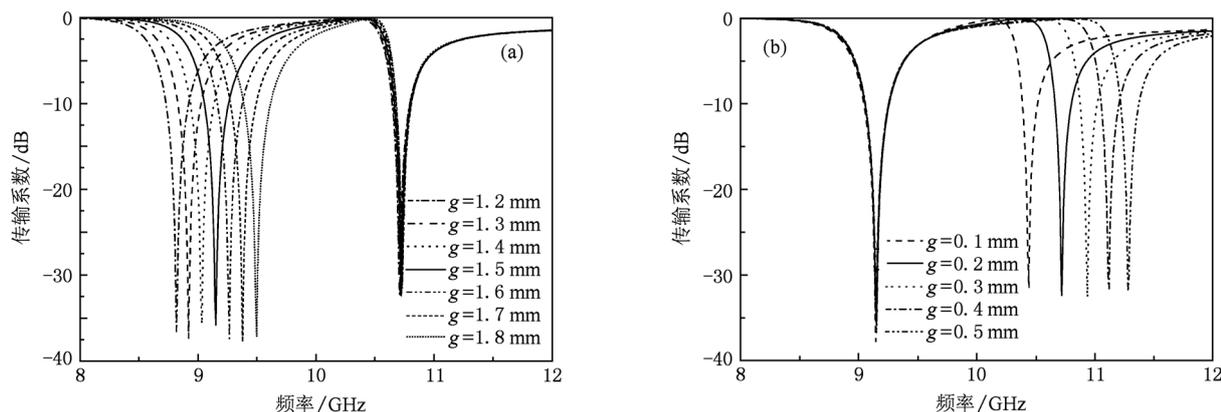


图 12 内外环的开口宽度 g 与工作频率的关系 (a) 调节外环开口宽度, (b) 调节内环开口宽度

谐振, 并且较易调节各自的工作频点而不会相互影响.

4. 结 论

对单环磁谐振模型进行了详细的理论分析, 并结合等效电路模型, 通过调节环间的相对位置, 成

功地将原来单环结构变异成一种同向的双 SRR 新型磁谐振结构. 该结构相对于传统的边耦合 SRR 结构, 具有良好双频带特性, 并且结构简单、易于调节、有利于实现工程化. 该研究对多频带、宽带特异材料研究提供了明确的方向和较为具体的研究思路.

[1] Caloz C, Itoh T 1969 *Electromagnetic Metamaterials : Transmission Line Theory and Microwave Applications ; the Engineering Approach* (Hoboken: John Wiley & Sons) pp39—47

[2] Tang M C, Xiao S Q, Gao S S, Guan J, Wang B Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1851 (in Chinese) [唐明春、肖绍球、高山山、官 剑、王秉中 2010 物理学报 **59** 1851]

[3] Baena J D, Marqués R, Medina F 2004 *Phys. Rev. B* **69** 014402

[4] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184

[5] Zheng 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]

[6] 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]

[7] Zhang G M, Peng J C, Jian Z J, Huang X Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1847 (in Chinese) [张高明、彭景翠、翦知渐、黄小益 2006 物理学报 **55** 1847]

[8] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红、罗春荣、赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]

[9] Zheng Q, Zhao X P, Li M M, Zhao J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6441 (in Chinese) [郑 晴、赵晓鹏、李明明、赵 晶 2006 物理学报 **55** 6441]

[10] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Xia S, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Wu X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1847 (in Chinese) [王甲富、屈绍波、徐 卓、夏 颂、张介秋、马 华、杨一鸣、吴 翔 2010 物理学报 **59** 1847]

[11] Zhang S, Qu S B, Ma H, Xie F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3961 (in Chinese) [张 松、屈绍波、马 华、谢峰、徐 卓 2009 物理学报 **58** 3961]

[12] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Wu X, Lu L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4018 (in Chinese) [王甲富、屈绍波、徐 卓、张介秋、马 华、杨一鸣、吴 翔、鲁 磊 2010 物理学报 **59** 4018]

[13] Liu Y H, Song J, Luo C R, Fu Q H, Zhao X P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 934 (in Chinese) [刘亚红、宋 娟、罗春荣、付全红、赵晓鹏 2008 物理学报 **57** 934]

[14] Tang M C, Xiao S Q, Guan J, Bai Y Y, Gao S S, Wang B Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074214

[15] Marqués R, Medina F, Rafii-El-Idrissi R 2002 *Phys. Rev. B* **65** 144440

[16] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977

[17] Buell K, Mosallaei H, Sarabandi K 2007 *IEEE Trans. Anten. Propag.* **55** 1074

[18] Ekmekci E, Topalli K, Akin T, Turhan-Sayan G 2009 *Opt. Express* **17** 16046

[19] Ekmekci E, Turhan-Sayan G 2010 *Electron. Lett.* **46** 5

- [20] Xie C F, Rao K J 2006 *Electromagnetic Fields and Electromagnetic Waves* (Beijing: Higher Education Press) p70 (in Chinese) [谢处方、饶克谨 2006 电磁场与电磁波 (北京: 高等教育出版社) 第 70 页]
- [21] Chen H S 2005 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [陈红胜 2005 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [22] O' Brien S, Pendry J B 2002 *J. Phys: Condensed Matter* **14** 6383
- [23] Smith D R, Vier D C, Kosechny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617

A novel dual-band evolved split ring magnetic resonance metamaterial*

Tang Ming-Chun Xiao Shao-Qiu[†] Deng Tian-Wei Wang Duo Bai Yan-Ying Jin Da-Peng Wang Bing-Zhong

(*Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*)

(Received 10 April 2010; revised manuscript received 17 August 2010)

Abstract

A novel dual-band evolved magnetic metamaterial operating at X-band is proposed in the paper, which is compounded by evolved split ring resonators based on the principle of magnetic resonance. The dual frequencies can be easily adjusted due to its excellent performance of weak mutual coupling between the outer ring and the inner ring. Our work provides the helpful research ideas and design methods for multiple-band and wideband metamaterials.

Keywords: magnetic resonance metamaterial, dual-band, weak mutual coupling

PACS: 41. 20. Jb, 42. 70. Qs, 78. 20. Ci

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60872034, 60971029), the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET070154), the Foundation of State Key Laboratory of Millimeter Waves, China (Grant No. K200809), and the Aviation Science Foundation of China (Grant No. 20090180007).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaoshaoqiu@uestc.edu.cn