

doi:10.3788/gzxb20184707.0723002

# 基于一维金属开口谐振环的可调带通滤波器

张浩,童元伟

(上海理工大学 理学院,上海 200093)

**摘 要:**利用等效 LC 谐振电路,分析了开口环的谐振频率与等效电路电参数之间的关系.区别于传统微带传输线及附属开口环结构,本文设计了两种以开口环作为传输媒介的结构.对两种结构仿真和实验测试,实现了带宽分别为 300MHz 和 200MHz 的带通滤波器的设计,并在开口谐振环外环一侧加载变容二极管及偏置电路实现通带频率的连续可调.从表面电流密度分别分析了两种结构的传输特性,在通带内,方环的传输系数比圆环高 3dB,其中结构之间的等效间距是影响传输效率的一个重要因素.

**关键词:**超材料;电磁异性;金属开口环;可调性;带通滤波器

中图分类号:TN927+.23

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)07-0723002-7

## Tunable Pass-band Filter Based on One Dimensional Split Ring Resonant Structure

ZHANG Hao, TONG Yuan-wei

(College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Based on equivalent LC resonant circuit, the response between the resonance frequency and the electric parameters of the equivalent circuit were analyzed. Different from the traditional transmission line loaded with split-ring resonator structure, two different split-ring resonator structures were designed as the transmission medium. In consequence, two passband filters are achieved in this paper which bandwidth are 300 MHz and 200 MHz with square and circular split-ring resonator respectively, by loading with varactor and bias circuit in the split-ring resonator structure, two continuous tunable passband filters are finished in the end. The difference in surface current density between the square and circular split-ring resonator is given in this paper, the transmission coefficient of the square split-ring resonator is 3dB higher than the circular's within the passband, analysis shows the effective distance is one of important reason for the coupling efficiency.

**Key words:** Metamaterial; Specific electromagnetic properties; Metal split ring resonator; Tunable; Passband filter

**OCIS Codes:** 230.7408; 160.3918; 120.2440; 350.4010; 350.3618

## 0 引言

1968 年, Veselago 首次提出负折射率理论<sup>[1]</sup>, 从麦克斯韦方程分析了电磁波在介电常数和磁导率同时为负的介质中的传播特性. 20 世纪 90 年代, 随着人工周期性材料的发展, Pendry 提出了实现具有负折射率超材料的理论模型<sup>[2]</sup>. 2001 年由 Smith 等<sup>[3-5]</sup>根据 Pendry 的理论模型, 在微波波段制备出介电常数和磁导率同时为负的材料, 随后超材料在光学和电磁学等领域得到特别的青睐<sup>[6-9]</sup>.

在微波频率范围内, 由金属开口环(Split-Ring Resonator, SRR)组成的复合材料已经被证明具有负折

基金项目:国家自然科学基金(No.11504236)和教育部重点实验室开放课题(No.B14004)资助

第一作者:张浩(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为光子晶体,超材料. Email: 1228673887@qq.com

导师(通讯作者):童元伟(1971-),男,副教授,博士,主要研究方向为光子晶体. Email: tyw0991@usst.edu.cn

收稿日期:2018-01-28;录用日期:2018-03-09

<http://www.photon.ac.cn>

射率特性. 作为亚波长谐振器, SRR 可以限制电磁波在谐振频率附近的传输效率<sup>[10,11]</sup>. 同时由于磁场的极化方向沿着 SRR 的轴向方向, 使其可以作为微带线的附属结构用于制作特殊电磁材料, 另外在金属环上形成的感应电流回路表明其具有频率选择特性<sup>[12-13]</sup>. 微带线的导体周围加载 SRR 结构, 在传输特性上可以等效为陷波滤波器<sup>[14-15]</sup>, 同时比未加载 SRR 的微带线产生更深的陷波(即回波损耗更大). 考虑在一个二端口网络中, 以微带线为传输媒介, 加载附属 SRR 结构在谐振频率附近的耦合会形成陷波, 因此单独由 SRR 结构作为传输媒介将形成带通带隙. 将 SRR 等效为 LC 谐振电路, 其谐振频率会随着等效电路电参数而变化, 因此通过加载变容二极管及偏置电路可以实现连续可调带通滤波器的设计. 一维 SRR 周期结构的谐振频率随着结构参数而变化, 传输通带的带宽随 SRR 单元数量的增加而展宽, 因此这种结构的谐振频率和带宽都具有可调性.

利用 SRR 的滤波特性已经取得了很多研究成果, 在 SRR 缺陷结构低通滤波器<sup>[16]</sup>, 微带线加载 SRR 陷波滤波<sup>[17]</sup>, 微波带通滤波器以及复合基板集成波导带通滤波器等多个交叉领域得到了研究应用<sup>[18-20]</sup>. 不同于上述模型, 本文将 SRR 作为传输媒介, 从等效 LC 谐振电路理论分析, 其谐振模式也是磁谐振. 通过数值仿真及实验证实, 在谐振频率附近 SRR 周围存在较强的磁场, 而远离谐振频率时磁场强度会迅速降低. 对比方形和圆形 SRR, 其传输特性也表现出明显的差异性. 仿真计算两种形状的表面电流密度, 结果在方环周围会产生更强的磁场. 这些研究将进一步丰富滤波器的设计方案以及微波频率信号传输方向的应用, 另外本文采用的外接可调电路也为射频电路集成化提供参考.

## 1 理论分析

Pendry 从等效介质理论分析, 首先提出利用金属微带线结构可以实现等效介电常数  $\epsilon_e < 0$ , 同时利用金属开口环结构实现等效磁导率  $\mu_e < 0$ . 以等效介质理论和麦克斯韦方程分析二维、三维超材料结构的研究已经较为成熟. 而对于一维微带线及其附属 SRR 结构, 文献[15]通过等效电路模型分析了其传输特性随电参数的变化关系, 并给出了谐振频率公式为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_o C_s + L_e C_s}} \quad (1)$$

式中  $C_s = C_e C_v / (C_e + C_v)$ ,  $L_e$  和  $C_e$  分别是 SRR 谐振环的等效电感和电容, 其值可以通过文献[21]估算.  $C_v$  是由外接偏置电路控制的可调电容,  $L_o$  是微带线的等效电感.

基于等效电路模型, 本文给出 SRR 单元结构(如图 1(a))及其对应的等效电路模型(如图 1(b)). 其中,  $L_1$  作为隔离器连接 SRR 与外接偏置电路, 防止 SRR 产生的表面电流泄露到外接电路. 综合式(1)分析, 在没有微带线的结构中(即, 谐振频率公式中忽略  $L_o$ ), 这种 SRR 单元结构的谐振频率可以写为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_s}} \quad (2)$$

为了验证式(2), 本文使用 CST 微波仿真软件模拟计算 SRR 单元的传输系数( $S_{21}$ ). 在理想条件下(无损耗), 且无外接电容( $C_v = 0$ ), SRR 的结构参数为  $g = 0.2 \text{ mm}$ ,  $d = 0.4 \text{ mm}$  (如图 1(a)), 外环的长和宽均为  $5 \text{ mm}$ , 基板采用相对介电常数为 10.2 的 FR4 材料, 厚度为  $1.27 \text{ mm}$ , 电路板上下表面敷以铜箔, 铜箔厚度均为  $0.035 \text{ mm}$ . 其中 SRR 的等效电感和电容由估算得到, 分别为  $L_e = 2.6 \text{ nH}$ ,  $C_e = 1.3 \text{ pF}$ , 因此由式(2)计算的谐振频率  $f_r = 2.75 \text{ GHz}$ . 仿真模拟得到的结果如图 2, 其中心频率  $f_{rs} = 2.76 \text{ GHz}$ , 这与式(2)计算得到结果基本一致, 式(2)得到验证. 考虑到这种模型是以 SRR 作为传输媒介, 因此传输系数的表现形式也有差异性. 以微带线为传输媒介, 会在谐振频率处产生一个深且窄的禁带, 而以 SRR 作为传输媒介在谐振频率处则是一个突出的通带.

尽管 SRR 已经展现了很多传输特性, 为深入研究, 本文引入偏置电路作为动态控制系统. 为达到动态控制的目的, 在开口环的外环加载变容二极管并通过改变外加反向电压, 改变等效电路的电参数. 本文分别设计了方形和圆形 SRR 结构, 这种单排结构具有结构简单, 影响因素少以及易于外接电路设计的优点, 为可调滤波器的实验研究提供了一个很好的平台.

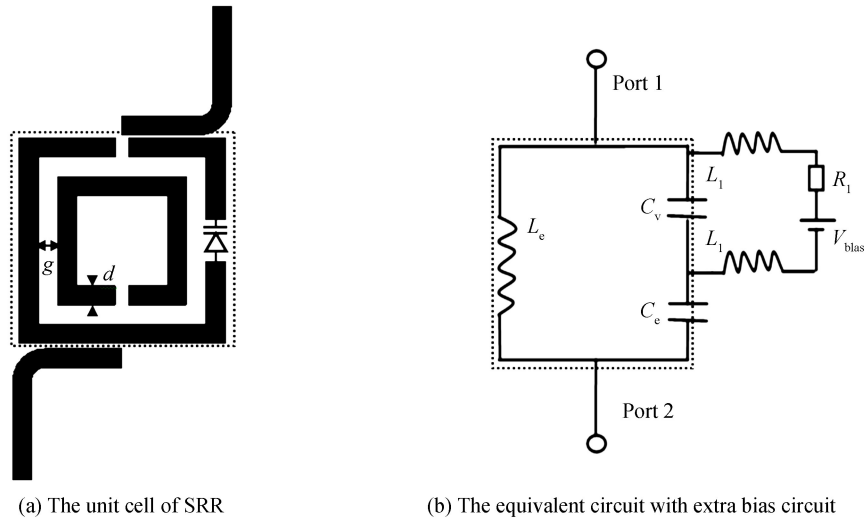


图1 二端口网络 SRR 单元结构及其等效电路图  
Fig.1 The unit cell of SRR and the equivalent circuit with extra bias circuit

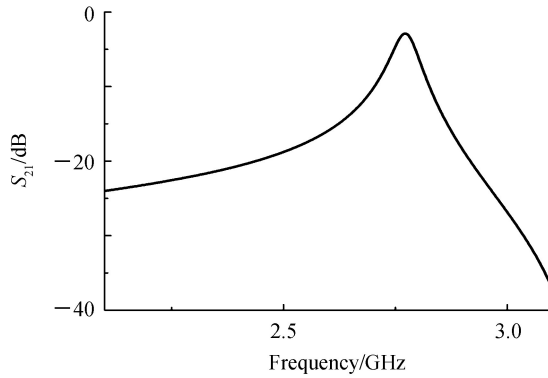
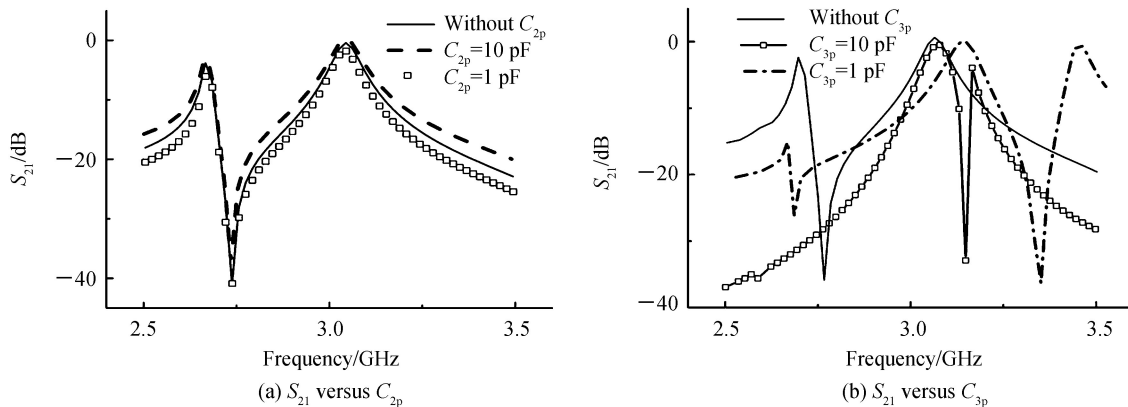
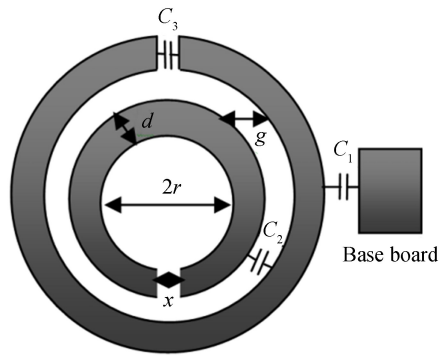


图2 无外接电容( $C_v=0$ )及偏置电路条件下开口环传输系数随频率变化关系  
Fig.2 The transmission coefficient of the SRR simulation results versus frequency without  $C_v$  and extra bias circuit

## 2 仿真及实验分析

在理论分析中, 本文采用等效电路的方法讨论了谐振频率随电参数的变化. 分析文献[13], SRR 总的等效电容由多部分组成, 如环与基板之间  $C_1$ , 内外环之间  $C_2$  以及内外环上的开口处  $C_3$  (如图 3(c)). 其中控制  $C_1$  实验设计较为困难且不利于集成化的趋势, 因此这里不考虑. 通过加载不同电容值仿真分析  $C_2$  和  $C_3$  的变化对传输特性的影响, 其中电容值  $C_{2p}$  和  $C_{3p}$  分别对应等效电容  $C_2$  和  $C_3$ , 仿真结果如图 3(a)、3(b) 所示. 当  $C_{2p}$  从 1 pF 增加到 10 pF 时, 图 3(a) 中的曲线几乎没有变化, 且与未加载电容时的结果一致, 即  $C_2$  对 SRR 总的等效电容的影响可以忽略. 而从图 3(b) 可以看出, 随着  $C_{3p}$  由 1 pF 增加到 10 pF, 谐振中心





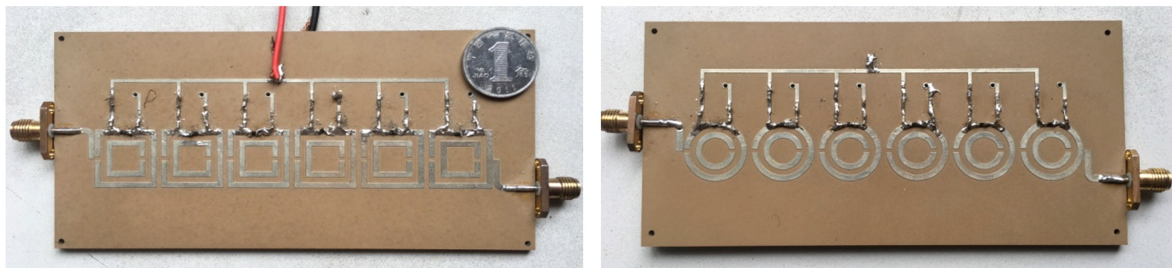
(c) The unit cell of circular SRR

图3 仿真圆环单元传输系数  $S_{21}$  随电容  $C_{2p}$  及  $C_{3p}$  变化关系

Fig.3 The transmission coefficient ( $S_{21}$ ) of circular SRR simulation results versus capacitance  $C_{2p}$  and  $C_{3p}$

频率从 3.16 GHz 移动到 3.08 GHz, 即  $C_3$  是影响 SRR 等效电容的一个主要因素. 因此, 本文将  $C_3$  作为实验设计的突破口. 为操作便捷, 在开口环的外环一侧留有开口用于安装变容二极管.

为拓展传输通带的带宽<sup>[22]</sup>, 本文采用六个 SRR 单元组成一维周期性结构. SRR 圆环单元结构如图 3 (c)所示, 其中最内环半径  $r = 3.5$  mm, 开口环的内外环线宽均为  $d = 1.5$  mm, 内外之间的间距  $g = 1.5$  mm, 开口宽度  $x = 1$  mm. 电路板采用双面印刷制作, 其中基板采用厚度为 3 mm, 介电常数 10.2 的复合介质材料, 电路板上下表面敷以铜箔, 铜箔厚度均为 0.035 mm. 在开口环外环的侧边开口用于焊接变容二极管, 外接控制电路如图 1(b)所示. 使用的变容二极管是 Philip BB181 系列(电压变化范围 0~30 V, 对应电容变化 13 pF~0.7 pF), 其电容随电压变化关系如图 5. 方形 SRR 单元结构的外环边长  $a = 16$  mm 等于圆环的直径, 同时内外环线宽( $d = 1.5$  mm)和内外环之间的间距( $g = 1.5$  mm)均与圆环一致. 图 4(a)和 (b)是两种结构加载外接偏置电路的实物图, 两种结构的外环一侧都有一个 3 mm 的开口, 用于安装可变电容器.



(a) Square SRRs

(b) Circular SRRs

图4 方环和圆环的实物图, 其一侧为外接偏置电路

Fig.4 The square and circular SRRs with extra bias circuit for experiment

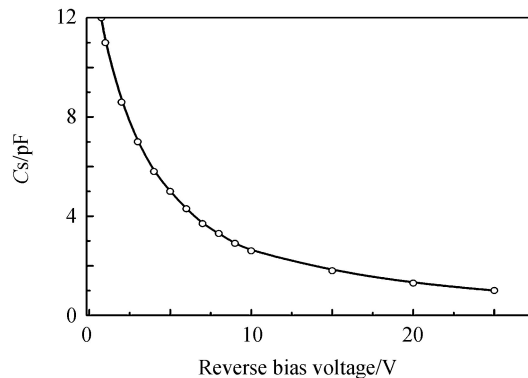


图5 变容二极管电容随反向电压变化关系

Fig.5 Capacitance of the variable diode versus the reverse bias DC voltage

利用 CST 仿真计算,本文采用加载离散电容的方式进行全波仿真得到  $S_{21}$  参量随频率的变化谱线.在对 SRRs 进行结构优化后,仿真结果如图 6(a)、7(a)所示.区别于传统微带线结构产生的传输禁带<sup>[23]</sup>,方环结构得到一个带宽约为 400 MHz 的通带,随着离散电容从 1 pF 增加到 12 pF,通带的中心频率从 2.38 GHz 下降到 2.08 GHz.在实验上,采用外接偏置电路控制变容二极管,  $S_{21}$  参量由 KEYSIGHT E5063A 网络矢量分析仪测得.实验结果如图 6(b),通带的带宽约为 300 MHz,略低于仿真的结果,这可能是实验材料加工误差影响的缘故.当电路反向电压从 30 V 降低到 0V 时,通带的中心频率从 2.38 GHz 偏移到 2.08 GHz,工作带宽为 25%(1.88~2.45 GHz).参考变容二极管电容随电压的变化关系,证实实验与仿真在传输系数随频率变化的关系的结果基本吻合.以圆环结构进行仿真和实验分析,其结构参数基本与方环一致.图 7(a)和(b)分别是仿真和实验结果,其中仿真得到的通带宽度约为 220 MHz.当加载电容从 1 pF 增加到 12 pF,通带的中心频率从 2.72 GHz 移动至 2.43 GHz.同时,实验结果得到的通带宽度约为 200MHz,外加反向电压从 30 V 降到 0 V,其中心频率从 2.6 GHz 偏移至 2.4 GHz,工作带宽为 16%(2.32~2.72 GHz),可以发现圆环的实验与仿真结果也一致.综上,无论是方环还是圆环,在传输系数与频率的响应图中都存在一个具有一定宽度的通带,这个通带的中心频率随等效电容变化,这也进一步证实了前面的理论分析.

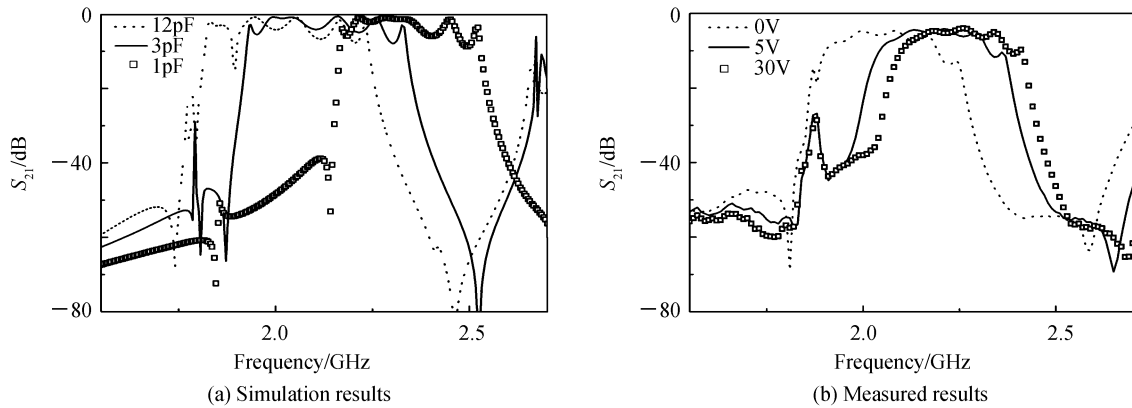


图 6 仿真及实验方环传输系数随频率变化关系

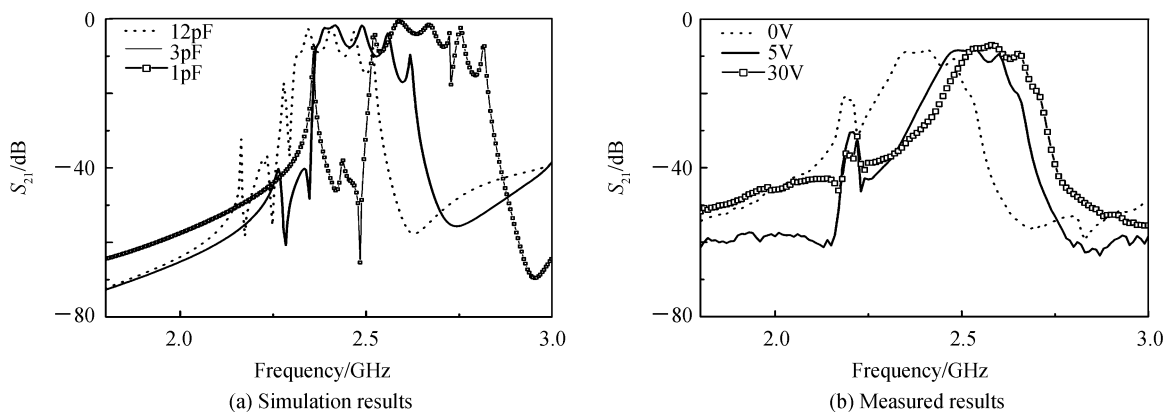
Fig.6 The transmission coefficient ( $S_{21}$ ) of the square SRRs simulate and experimental

图 7 仿真及实验圆环传输系数随频率变化关系

Fig.7 The transmission coefficient ( $S_{21}$ ) of the circular SRRs simulate and experimental

通过对比方环和圆环在仿真及实验上得到的  $S_{21}$  参量与频率响应结果,发现二者在通带带宽及插入损耗方面存在差异性.实验测得方环的通带带宽约为 300 MHz,而圆环是 200 MHz.方环最小插入损耗为 -5 dB,而圆环为 -8 dB,方环在通带带宽及插入损耗的表现都要优于圆环.为研究这种差异性,进而模拟计算了两种结构的表面电流密度分布(如图 8 所示).二者磁谐振形成的表面电流主要集中在开口环的外环,这说明磁谐振过程主要由外环引起.方环的表面电流密度大于圆环,证明方环在磁谐振过程中耦合能力更

强. 分析引起这种差异的原因可能是因为方环结构中, 环与引导线之间、环与环之间等效距离更短(如图 9 所示), 因此更容易发生电磁耦合, 插入损耗更低, 单元结构之间形成感生电容进一步扩展了通带的带宽.

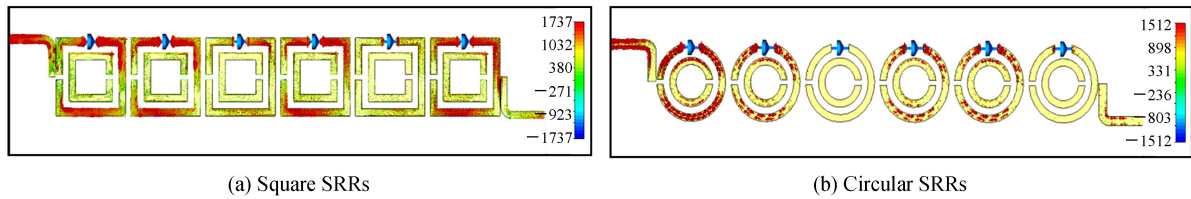


图 8 开口环表面电流密度分布, 其中方环的监视频率  $f_s=2.26$  GHz, 圆环为  $f_c=2.62$  GHz

Fig.8 The surface current density distribution of SRRs, monitor frequencies are  $f_s=2.26$  GHz and  $f_c=2.62$  GHz in square and circular SRR respectively

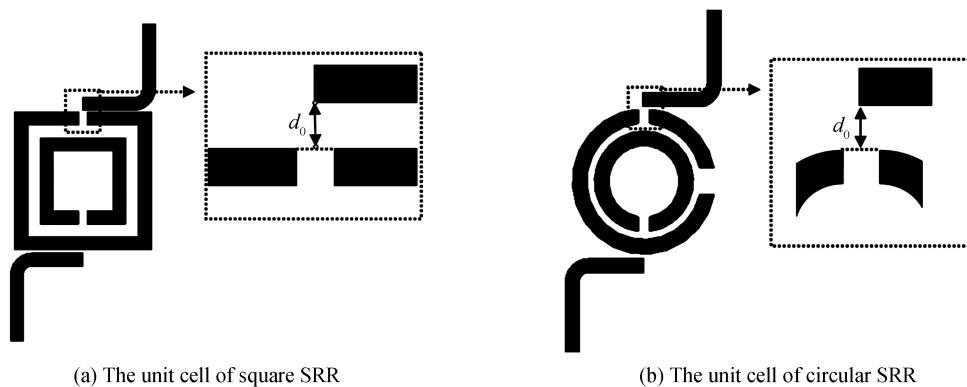


图 9 两种 SRR 单元结构, 其中  $d_0$  大小均为 0.2 mm, 在引导线与开口环之间发生耦合时, 方环等效距离小于圆环

Fig.9 The unit cell of two kinds of SRR,  $d_0=0.2$  mm, consider the electromagnetic coupling between the guide line and the opening ring, the equivalent distance of square is less than circular

### 3 结论

本文以 SRR 为例研究了具有奇异电磁性质的超材料, 从等效 LC 电路模型分析了谐振频率随等效电参数的变化关系. 本文设计了两种 SRR 传输媒介结构, 并通过加载变容二极管及偏置电路实现了传输通带的连续可调. 两种结构的仿真与实验结果基本保持一致, 通过分析表面电流密度认为由于在方环结构中, 环与外接引导微带线之间、环与环之间的等效耦合间距小于圆环, 因此方环的通带宽度及传输效率均优于圆环. 这些研究将对丰富基于微波超材料滤波器的设计具有积极意义.

#### 参考文献

- [1] VESELAGO V G. Reviews of topical problems: the electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and  $\mu$ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4): 509-514.
- [2] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **85**(18): 3966-3969.
- [3] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, *et al.* Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, **84**(18): 4184-4187.
- [4] SMITH D R, SCURING D, PENDRY J B. Negative refraction of modulated electromagnetic waves[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(15): 2713-2715.
- [5] SMITH D R, VIER D C, PADILLA W J, *et al.* Loop-wire medium for investigating plasmons at microwave frequencies [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **75**(10): 1425-1427.
- [6] LI Hai-yang, ZHANG Ye-wen, HE Li, *et al.* Tunable filters based on split-ring resonator and its electromagnetic band gap[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1772-1776.  
李海洋, 张冶文, 赫丽, 等. 基于开口环的可调谐滤波器及其电磁带隙[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1772-1776.
- [7] TONG Yuan-wei, ZHANG Ye-wen. The tunable defect modes in the comb-like photonic crystals[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2011, **53**(7): 1652-1656.
- [8] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, *et al.* Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977-980.
- [9] ZHAO Ya-juan, WANG Dong-hong, ZHANG Rong, *et al.* A compact tunable filter based on metamaterial structure[J].

- Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(6): 0616005.
- 赵亚娟, 王东红, 张榕, 等. 基于超材料结构的小型化可调滤波器[J]. 光子学报, 2017, **46**(6): 0616005.
- [10] SHADRIVOV I V, MORRISON S K, KIVSHAR Y S. Tunable split-ring resonators for nonlinear negative-index metamaterials[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(20): 9344-9349.
- [11] SHELBY R A, SMITH D R, NEMATNASSER S C, *et al.* Microwave transmission through a two dimensional isotropic left-handed metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **78**(4): 489-491.
- [12] AYDIN K, GUVEN K, OZBAY E, *et al.* Effect of disorder on magnetic resonance band gap in split-ring resonator structures[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(24): 5896-5901.
- [13] AYDIN K, BULU I, GUVEN K, *et al.* Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs[J]. *New Journal of Physics*, 2005, **7**(7): 168-168.
- [14] GIL I, GARCIA G J, BONACH J, MARTIN F, *et al.* Varactor-loaded split ring resonators for tunable notch filters at microwave frequencies[J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(21):1347-1348.
- [15] GIL I, GARCIA G J, BONACH J, *et al.* Tunable metamaterial transmission lines based on varactor-loaded split-ring resonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(6):2665-2674.
- [16] WU Bian, LI Bin, LIANG Chang-hong. A novel SRR defected ground structure for lowpass filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, **29**(12): 3020-3023.
- 吴边, 李斌, 梁昌洪. 一种新型 SRR 缺陷地面结构低通滤波器[J]. 电子信息学报, 2007, **29**(12): 3020-3023.
- [17] ZHANG Yan, HONG Wei, YU Chen, *et al.* Kuai planar ultrawideband antennas with multiple notched bands based on notched slots on the patch and/or split ring resonators on the feed line[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, **56**(9): 3063-3068.
- [18] BONACHE J, GIL I, MARTIN F, *et al.* Novel microstrip bandpass filters based on complementary split-ring resonators[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(1): 265-271.
- [19] ZHANG Qiao-Li, YIN Wen-yan, HE S, *et al.* Compact substrate integrated waveguide(SIW) bandpass filter with complementary split-ring resonators(CSRRs)[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2010, **20**(8): 426-428.
- [20] HORESTANI A K, MIGUEL D, NAQUI J, *et al.* S-shaped complementary split ring resonators and their application to compact differential bandpass filters with common-mode suppression[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2014, **24**(3): 149-151.
- [21] MARQUES R, MESA F, J. MARTEL, *et al.* Comparative analysis of edge and broadside coupled split ring resonators for metamaterial design theory and experiments[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, **51**(10): 2572-2581.
- [22] LAI X, LI Q, QIN P Y, *et al.* A novel wideband bandpass filter based on complementary split-ring resonator[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2008, **1**(1): 177-184.
- [23] MARTIN F, FALCONE F, BONACHE J, *et al.* Miniaturized coplanar waveguide stop band filters based on multiple tuned split ring resonators[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2003, **13**(12): 511-513.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No.11504236), Opening Project of the Ministry of Education key Laboratory (No.B14004)

引用格式: ZHANG Hao, TONG Yuan-wei. Tunable Pass-band Filter Based on One Dimensional Split Ring Resonant Structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7):0723002

张浩, 董元伟. 基于一维金属开口谐振环的可调带通滤波器[J]. 光子学报, 2018, **47**(7): 0723002