

# 基于 CSRR 的 SIW 和 HMSIW 小型化滤波器设计

赵杰<sup>1</sup>, 李丹<sup>1</sup>, 童创明<sup>1,2</sup>, 邹雄<sup>1</sup>

(1.空军工程大学防空反导学院,陕西西安 710051;2.毫米波国家重点实验室,江苏南京 210096)

**摘要** 为了实现滤波器的小型化,通过在基片集成波导(SIW)和半模基片集成波导(HMSIW)上表面加载互补开口谐振环(CSRR)可以降低原来的截止频率,并分析了CSRR参数变化与单元个数对传输性能的影响,从而设计了小型化的CSRR-SIW和CSRR-HMSIW滤波器。测量结果显示HMSIW滤波器的相对带宽是SIW滤波器的3倍以上,约为10.24%,而有效电路面积仅为SIW滤波器的一半,为 $31.8 \times 11.3 \text{ mm}^2$ 。测量结果与仿真结果基本吻合,验证了滤波器设计的有效性,2种滤波器可以广泛应用于微波毫米波系统中。

**关键词** 互补开口谐振环;截止频率;基片集成波导;小型化

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.03.007

**中图分类号** TN713; TN015 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)03-0029-04

## A Design of Novel Miniature Filters of SIW and HMSIW Based on Complementary Split-ring Resonators

ZHAO Jie<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, TONG Chuang-ming<sup>1,2</sup>, ZOU Xiong<sup>1</sup>

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;  
2. State Key Lab. of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to realize the miniaturization of filter, a complementary split ring resonator (CSRRs) is loaded on the upper-surface of substrate integrated waveguide (SIW) and half-mode substrate integrated waveguide (HMSIW) to reduce the original cutoff frequency. This paper analyzes the influence of parameter variation and element number of CSRR on the transmission performance so as to design novel miniature filters of SIW and HMSIW integrated CSRRs. The measurements show that the relative bandwidth of HMSIW filter is more than three times as wide as that of CSRR-SIW filter, i.e. about 10.24%, and the effective circuit area of it is only  $31.8 \times 11.3 \text{ mm}^2$ , i.e. about half of that of CSRR-SIW filter. The result shows that the designed filters are effective, and these two kinds of filters can be widely used in microwave and millimeter-wave systems.

**Key words:** complementary split ring resonator; cutoff frequency; substrate integrated waveguide; miniaturization

收稿日期:2013-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372033);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2011JM8025)

作者简介:赵杰(1966-),男,陕西西安人,副教授,主要从事微波毫米波电路与系统研究.E-mail:dycmtong@126.com

**引用格式:**赵杰,李丹,童创明,等.基于CSRR的SIW和HMSIW小型化滤波器设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(3):29-32. ZHAO Jie, LI Dan, TONG Chuang-ming, et al. A design of novel miniature filters of SIW and HMSIW based on complementary split-ring resonators[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(3): 29-32.

随着基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW)技术的发展与完善,其高Q值、低损耗、易集成的优点越来越广泛地应用于微波滤波器的设计中<sup>[1-4]</sup>。现代微波通信的快速发展对于微波电路提出了更高要求,滤波器的小型化成为国内外学者研究的热点。人工电磁结构的出现为滤波器的小型化提供了一个有效途径,利用电磁带隙结构(Electromagnetic Band-Gap, EBG)地面缺陷结构(Defected Ground Structure, DGS)和互补开口谐振环结构(Complementary Split Ring Resonator, CSRR)设计的滤波器层出不穷<sup>[5-9]</sup>。2009年, Yuan Dan Dong 在 SIW 上表面加载了方形 CSRRs, 所设计的一阶 SIW-CSRR 滤波器中心频率为 5.6 GHz, 带宽约为 200 MHz, 该滤波器降低了 SIW 的截止频率, 电路面积小于  $1.0 \times 2.0 \text{ cm}^2$ , 实现了 SIW 滤波器的小型化<sup>[9]</sup>。

本文将圆形 CSRR 运用于 SIW 滤波器的设计中, 首先分析 CSRR 单元传输特性, 然后设计加载多个 CSRR 单元的 SIW 滤波器, 并利用半模基片集成波导(Half Mode Substrate Integrated Waveguide, HMSIW)设计 CSRR 滤波器, 使得工作频率进一步减小, 有利于电路的小型化。实验结果较好地验证了设计的有效性。

## 1 CSRR 传输特性

### 1.1 CSRR 单元设计

利用 2 个形状相似的圆形开口环设计互补开口谐振环, 见图 1(a), 其开口方向相反, 开口大小均为  $e = 1 \text{ mm}$ , 环的宽度与 2 环之间的缝隙宽度均为  $c = 0.8 \text{ mm}$ , 外环的半径  $r = 4.1 \text{ mm}$ 。为分析加载 CSRR 对 SIW 传输性能的影响, 选取的 SIW 宽度  $W = 21.5 \text{ mm}$ , 厚度  $h = 1 \text{ mm}$ , 金属化通孔直径  $d = 0.4 \text{ mm}$ , 周期  $p = 0.8 \text{ mm}$ , 相对介电常数  $\epsilon_r = 2.65$ , 损耗角正切为 0.001。SIW 微带转接器尺寸为  $W_t = 9.6 \text{ mm}$ ,  $L_t = 19 \text{ mm}$ ,  $W_{30} = 2.9 \text{ mm}$ 。将一对 CSRR 以上下对称的形式加载到 SIW 上表面中, 总宽度为  $t = 8.6 \text{ mm}$ , 见图 1(b)。据文献[10]中截止频率计算公式, 可计算出 SIW 的截止频率为 4.75 GHz。

利用电磁仿真软件 HFSS11.0 对其进行仿真, 结果见图 2。可以看出: 当 SIW 加载一对 CSRR 时, SIW 在 4.25 GHz 附近产生了一个电磁带隙和传输零点, 插入损耗高于 60 dB, 说明 SIW 中的 CSRR 保留了自身的带阻特性, 会在某一频段内抑制电磁波的传输。同时, SIW 在 2.96~3.08 GHz 内产生了一个较好的传输通带, 回波损耗优于 10 dB, 插入损耗小于 0.8 dB, 这个通带低于 SIW 原来的截止

频率, 说明通过加载 CSRR 使得 SIW 内电场分布发生改变, 增加了表面电流路径, 从而降低了截止频率, 这种特性的出现有利于电路设计的小型化。

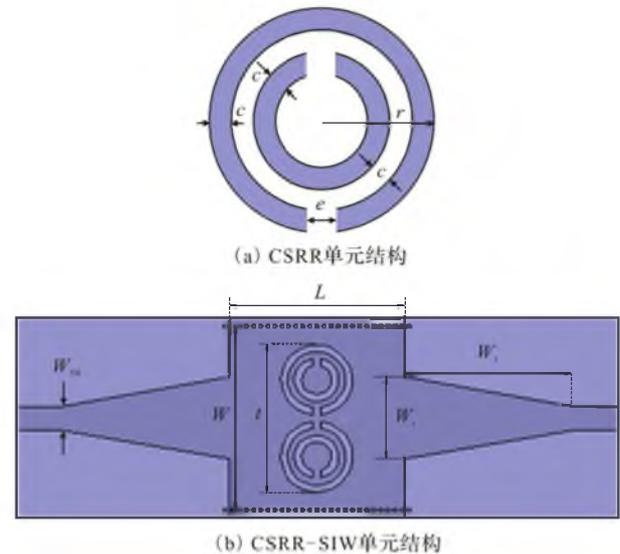


图1 CSRR单元与CSRR-SIW的结构图

Fig. 1 Configurations of CSRR element and CSRR-SIW

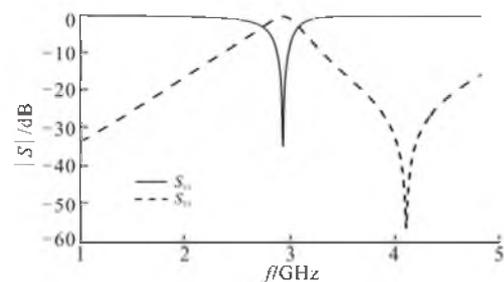


图2 SIW加载一对CSRR的仿真结果

Fig. 2 Simulations of SIW with double CSRR

### 1.2 CSRR 参数分析

分析 CSRR 的尺寸对谐振频率的影响, 通过改变  $r$ 、 $e$ 、 $c$  的大小来观察  $|S_{11}|$  的变化。参数设置见表 1, 单个变量变化时, 其他参数大小与 1.1 节中的相同。

表1 CSRR 参数变量设置

Tab.1 Dimensions of CSRR mm

标号	$r$	$e$	$c$
1	3.9	0.4	0.2
2	4.1	0.7	0.3
3	4.3	1.0	0.4

仿真结果见图 3。可以看出, 3 个参数的变化都会使 SIW 的谐振频率发生变化, 当外环半径  $r$  增大, 或开口宽度  $e$  减小, 或谐振环宽度  $c$  减小时, 谐振频率都会减小。但是  $e$  对谐振频率的影响明显小于其他 2 个参数, 这是由于  $e$  的变化对 SIW 表面电流路径改变不大, 因而对传输性能的影响较小。由

以上分析可以得出,要降低 SW-CSRR 滤波器的工作频率,可以适当增大  $r$ ,减小  $e$  和  $c$ ,但考虑到带内损耗,参数设置还需要通过进一步仿真优化来确定。

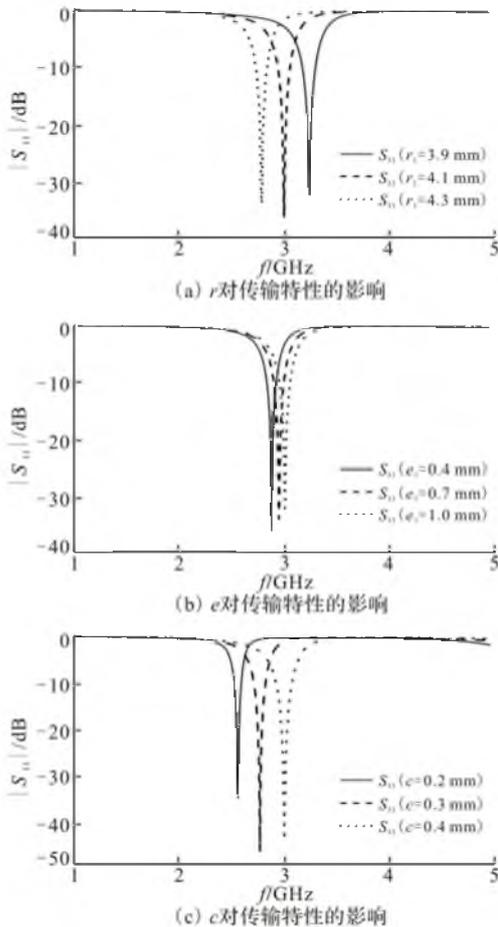


图 3 参数变化对传输特性的影响

Fig. 3 Impacts on transmission characteristic of dimensions

## 2 CSRR-SIW 带通滤波器设计

在 SIW 上表面蚀刻一对 CSRR 时,产生的通带范围较窄,带外抑制也不够强。因此分析在 SIW 的上表面加载 2 对 CSRR 时对其传输性能的影响,结构图与实物照片见图 4。SIW 的长度  $L = 31.8$  mm,2 对 CSRR 的间距  $g = 7$  mm,其他参数与上一节相同。仿真与测试结果见图 5。

由图 5 可以看出:CSRR-SIW 滤波器仿真的中心频率为 3.04 GHz,在 2.98~3.09 GHz 的通带内,最大插入损耗为 0.36 dB,回波损耗优于 20 dB,相对带宽为 2.97%。此外,该滤波器在 4.27 GHz 产生了传输零点,并且带外抑制达到了 75 dB。实测的中心频率为 3.01 GHz,相对带宽为 3.66% (2.95~3.06 GHz),带内最大差损为 1.34 dB,在 4.2 GHz 处的带外抑制达到了 70 dB。实测与仿真结果吻合较好。有效电路面积为  $31.8 \times 22.5 \text{ mm}^2$ 。

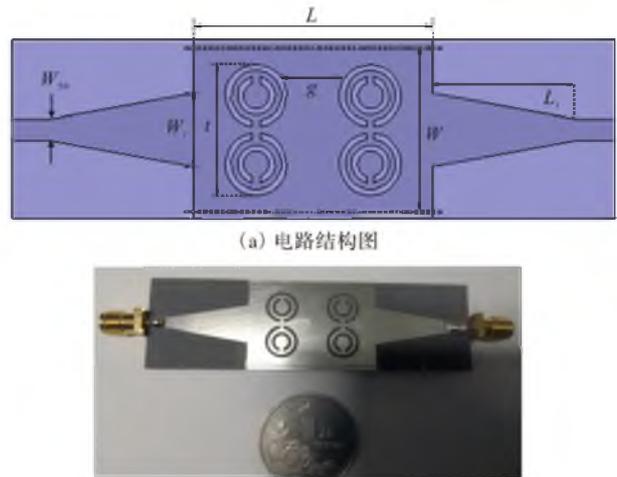


图 4 CSRR-SIW 滤波器  
Fig.4 CSRR-SIW filter

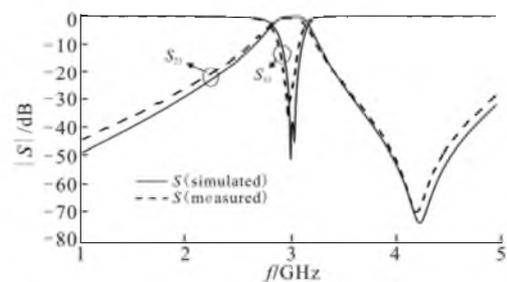


图 5 CSRR-SIW 滤波器的测试结果  
Fig.5 Measurements of CSRR-SIW filter

## 3 CSRR-HMSIW 带通滤波器设计

半模基片集成波导在电路的小型化设计中更具优势,当 HMSIW 上表面金属尺寸为 SIW 的一半时,其具有与 SIW 相似的传输特性。根据 HMSIW 与 SIW 的转换关系,设计并加工了 CSRR-HMSIW 滤波器,见图 6。 $t = 4.3$  mm,  $g = 4.8$  mm,其他参数与 CSRR-SIW 滤波器相同。

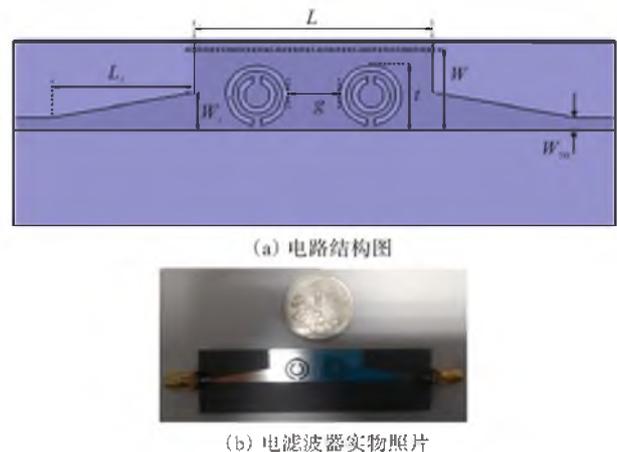


图 6 CSRR-HMSIW 滤波器  
Fig.6 CSRR-HMSIW filter

仿真与实测结果见图7。CSRR-HMSIW滤波器仿真的-20 dB带宽为10.24% (2.91 ~ 3.23 GHz), 实测带宽与仿真结果相似, 但频率发生了约50 MHz的偏移, 带内最大插损为1.43 dB, 高于仿真结果1.0 dB左右, 这主要是由介质损耗和SMA接头损耗引起的。滤波器测量的最大带外抑制达到了46.4 dB, 表现出了良好的滤波性能。

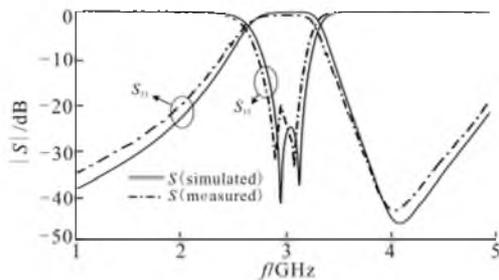


图7 CSRR-HMSIW滤波器测试结果

Fig.7 Measurements of CSRR-HMSIW filter

通过图5与图7的对比可以发现, CSRR-SIW滤波器与CSRR-HMSIW滤波器具有相近的中心频率和相似的带内损耗, 但是后者的通带是前者的3倍以上, 而且其有效电路面积仅为 $31.8 \times 11.3 \text{ mm}^2$ , 约为前者的一半。

## 4 结语

通过对上表面蚀刻CSRR的SIW传输特性进行分析, 设计并加工了CSRR-SIW和CSRR-HMSIW滤波器, 仿真与测试结果表明CSRR-SIW和CSRR-HMSIW滤波器都将电路原有的截止频率从4.75 GHz降低到了3.0 GHz以下, 并产生了较好的滤波器特性, 有利于设计小型化的滤波器。其中CSRR-HMSIW滤波器的相对带宽是CSRR-SIW滤波器的3倍以上, 约为10.24%, 而有效电路面积仅为 $31.8 \times 11.3 \text{ mm}^2$ , 约为CSRR-SIW滤波器的一半。测量结果与仿真结果吻合较好, 验证了该滤波器设计的有效性。

### 参考文献(References):

- [1] Li Rongqiang, Tang Xiaohong, Xiao Fei. Design of substrate integrated waveguide transversal filter with high selectivity[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2010, 20(6): 328-330.
- [2] Szydowski L, Lamecki A, Mrozowski M. Design of microwave lossy filter based on substrate integrated waveguide (SIW)[J]. IEEE microwave and wireless components letters, 2011, 21(5): 249-251.
- [3] Zou Xiong, Tong Chuangming, Yu Dingwang. Design of an X-band symmetrical window bandpass filter

based on substrate integrated waveguide[C]// 2011 cross strait quad-regional radio science and wireless technology conference. Harbin China: [s. n.], 2011: 571-574.

- [4] Wu Linsheng, Zhou Xilang, Yin Wenyan, et al. A new type of periodically loaded half-mode substrate integrated waveguide and its applications[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2010, 58(4): 882-893.
- [5] 李丹, 童创明, 彭鹏, 等. 新型S形EBG结构的超宽带基片集成波导带通滤波器[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(3): 54-57.
- LI Dan, TONG Chuangming, PENG Peng, et al. A new ultra-wideband bandpass filter of substrate integrated waveguide(SIW) based on S-shaped EBG[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2013, 14(3): 54-57. (in Chinese)
- [6] Kim T, Seo C. A novel photonic band-gap structure for low-pass filter of wide stop-band[J]. IEEE microwave guided wave letters, 2000, 10(1): 13-15.
- [7] 付树洪, 童创明, 李西敏. 一种新颖的开口环地面缺陷结构低通滤波器[J]. 电波科学学报, 2009, 24(6): 1115-1118.
- FU Shuhong, TONG Chuangming, LI Ximin. A novel split-ring resonator defected ground structure low-pass filter[J]. Chinese journal of radio science, 2009, 24(6): 1115-1118. (in Chinese)
- [8] Gil M, Bonache J, García J G, et al. Composite right left-handed metamaterial transmission lines based on complementary split rings resonators and their applications to very wideband and compact filter design [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2007, 55(6): 1296-1304.
- [9] Dong Yuandan. Substrate integrated waveguide loaded by complementary split-ring resonators and its applications to miniaturized waveguide filters[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2009, 57(9): 2211-2223.
- [10] Li Yan, Wei Hong. Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines[J]. IEE proceedings microwave antennas and propagation, 2005, 152(1): 35-42.

(编辑: 田新华)