

Ku 频段小型化 SIW 滤波器的设计

滕 骏 赵 飞 魏 浩 魏 恒 唐 陆 瑶

(中国电子科技集团公司第五十四研究所通信软件与专用集成电路设计国家工程研究中心 石家庄 050081)

摘要: 本文对频带范围在 Ku 频段的小型化 SIW 滤波器进行了研究,采用了等效磁壁切割的方法获得四分之一模基片集成波导来满足小型化需求;根据不同的等效磁壁切割的方式可以得到两种不同的 QMSIW 结构,即三角形 QMSIW 结构与矩形 QMSIW 结构,然后对两种不同结构的 QMSIW 滤波器进行了研究;针对所设计 QMSIW 滤波器带外抑制能力不高的问题,采用在 QMSIW 谐振腔中加载互补开口谐振环达到提高带外抑制的目的;应用电磁仿真软件对提出的两种不同结构的 QMSIW 滤波器仿真模拟,得到结果:加载 CSRR 的矩形 QMSIW 结构滤波器的通带范围为 14.94~16.02 GHz,相对带宽为 6.97%,插入损耗优于 0.6 dB,回波损耗优于 15 dB,带外抑制优于 35 dB@19~20 GHz,尺寸为 $0.2 \times 0.314\lambda_g^2$;加载 CSRR 的三角形 QMSIW 结构滤波器的通带范围为 14.89~16.11 GHz,相对带宽为 7.87%,插入损耗优于 0.6 dB,回波损耗优于 17.2 dB,带外抑制优于 40 dB@19~20 GHz,尺寸为 $0.27 \times 0.27\lambda_g^2$ 。两款加载 CSRR 结构的 QMSIW 滤波器均采用氧化铝薄膜工艺加工并用 GSG 探针进行测试,经实际测验发现,测试结果与仿真结果基本吻合,符合预期。

关键词: 四分之一模基片集成波导;等效磁壁切割;Ku 频段滤波器;互补开口谐振环

中图分类号: TN713+.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Design of miniaturized SIW filters in the Ku-band

Teng Jun Zhao Fei Wei Hao Wei Heng Tang Luyao

(The 54th Research Institute of CETC, National Engineering Research Center of Communication Software and Asic Design, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In this paper, two miniaturized SIW filters in the Ku-band are investigated, and the equivalent magnetic wall cutting method is adopted to obtain the quarter mode substrate integrated waveguide in order to meet the required miniaturization specifications. Two distinct QMSIW configurations, designated as triangular QMSIW and rectangular QMSIW, are developed based on the distinct equivalent magnetic wall cuts. Subsequently, the QMSIW filters with two distinct structural configurations are subjected to investigation. However, the out-of-band rejection capability of the designed QMSIW filters is not high, and therefore the complementary split ring resonators are loaded in the QMSIW resonant cavity in order to improve the out-of-band rejection. Then we employ the electromagnetic simulation software to simulate the proposed QMSIW filters with the two different structural configurations, and obtain the ensuing results. The passband range of the rectangular QMSIW filter loading the CSRRs is from 14.94 to 16.02 GHz, with a relative bandwidth of 6.97%. The insertion loss is better than 0.6 dB, the return loss is better than 15 dB, and the out-of-band rejection is better than 35 dB@19~20 GHz, with a size of $0.2 \times 0.314\lambda_g^2$. The triangular QMSIW structure filter loading the CSRRs exhibits a passband range of 14.89~16.11 GHz, with a relative bandwidth of 7.87%. The insertion loss is better than 0.6 dB, the return loss is better than 17.2 dB, and the out-of-band rejection is better than 40 dB@19~20 GHz with a size of $0.27 \times 0.27\lambda_g^2$. Both modified QMSIW filters are processed using an alumina oxide thin film and tested with GSG probes and subsequent to the actual test, it is determined that the test results are essentially consistent with the simulation results and met the expectations.

Keywords: quarter-mode substrate integrated waveguide; equivalent magnetic wall cut; Ku-band filter; complementary split ring resonators

0 引言

滤波器具有频率选择功能,能够滤除无效信号并且选

择有效信号,是射频系统中非常重要的前端设备。随着现代通信系统的发展,对滤波器的小型化、高集成度、低插损以及高品质因数的需求愈发强烈。传统金属波导因其具有

低损耗、高品质因数的优点被广泛应用在通信系统中,但是体积大,加工成本高的缺点限制了其进一步的发展。基片集成波导(substrate integrated waveguide, SIW)结构继承了传统金属波导的优点,同时兼具了微带电路小尺寸、易加工集成、低成本的优点。因此,与上述 3 种类型滤波器相比较, SIW 滤波器更加能够满足现代通信发展的需要,研究小型化的 SIW 滤波器拥有十分广阔的应用前景。

近年来,学者们对 SIW 滤波器的研究已有诸多成果。例如在 SIW 结构上加载对称的耦合槽线可以在期望的频率实现谐振,得到双通带滤波器^[1]。对 K 变换器研究分析,采用虹膜耦合结构可以得到一款中心频率为 18 GHz 的 SIW 带通滤波器^[2]。然而, SIW 滤波器的尺寸大的特点却制约了其进一步的应用与发展。为了满足集成化的需求,需要更小尺寸的 SIW 滤波器。实现小型化的方式主要有两种,一种是采用多层结构减小滤波器的平面尺寸^[3-5],但其存在的问题为结构较为复杂。另外一种则是采用等效磁壁切割 SIW 结构^[6-11]的方法,其中四分之一模基片集成波导(quarter mode substrate integrated waveguide, QMSIW)滤波器便是采用等效磁壁切割得到小型化 SIW 滤波器的一种表现形式。QMSIW 滤波器相较于 SIW 滤波器,既能够保留 SIW 滤波器的功能特性,又能兼顾更小尺寸的需求。

虽然采用 QMSIW 结构滤波器实现了小型化,但是却出现了带外抑制能力不强的问题。带高带外抑制的主要方法是引入传输零点,而引入传输零点的方法却是多样的。例如,通过在 QMSIW 谐振腔上开槽可以引入传输零点提高滤波器的带外抑制能力以及减小插入损耗^[12-14];再者,将一种新型的多层双模微带谐振器与 QMSIW 谐振腔耦合得到四阶滤波器并且通过交叉耦合的方式也可引入传输零点,从而提升带外抑制度^[15]。同样,在滤波器顶部金属层中蚀刻缺陷微带结构引入传输零点也能提高滤波器的带外抑制水平^[16]。文献[17-18]则采用阶跃阻抗谐振器(step impedance resonator, SIR)结构以及使用阻抗补偿的方法引入传输零点设计了一款小型化高带外抑制滤波器。而文献^[19]则通过在传输主路上并联一个细长接地电感,在滤波器的通带右侧引入一个传输零点,得到一个高选择性、宽带外抑制、宽通带的滤波器。然而,采用以上结构的滤波器虽然带外抑制有了改善,但是它们的阻带较窄,插入损耗较大,结构还是十分复杂,难以满足低插损,宽阻带的需求。

本文对 QMSIW 谐振腔组成的带通滤波器进行了研究以实现小型化滤波器的设计,根据矩形谐振腔的特点和等效磁壁切割技术的应用,可得到两种结构形式的 QMSIW 谐振腔,即矩形 QMSIW 谐振腔和三角形 QMSIW 谐振腔。本文则针对两种不同结构的 QMSIW 带通滤波器带外抑制能力不强的问题,通过在每个谐振腔中加载合适的 CSRR 结构来提高带外抑制能力。

1 QMSIW 结构分析

一个完整的 SIW 谐振腔,其主模式电场分布相对于 X 轴和 Y 轴对称,能量主要集中在腔体中心。沿着 X 轴和 Y 轴的对称面切开 SIW 谐振腔,由于截面内部填充的是介质,外部与空气接触等效于开路,所以可将其近似等效为一个磁壁。基于等效磁壁切割是实现 SIW 滤波器小型化的一种方式,即沿着 SIW 结构的中心线等分切割就可以得到半模基片集成波导(half mode substrate integrated waveguide, HMSIW)结构,然后在沿 HMSIW 结构的中心线切割得到四分之一模基片集成波导(QMSIW)结构,同样的操作可以得到八分之一模基片集成波导结构以及十六分之一模基片集成波导结构等。如图 1 所示的为得到 QMSIW 结构的两种形式,即如图 1(a)所示的沿对角线切割和如图 1(b)所示的沿中心线切割,可以分别得到三角形 QMSIW 结构和矩形 QMSIW 结构。QMSIW 滤波器相较于 SIW 滤波器,体积减小了 75% 并且保留了 SIW 主要场分布的特点。

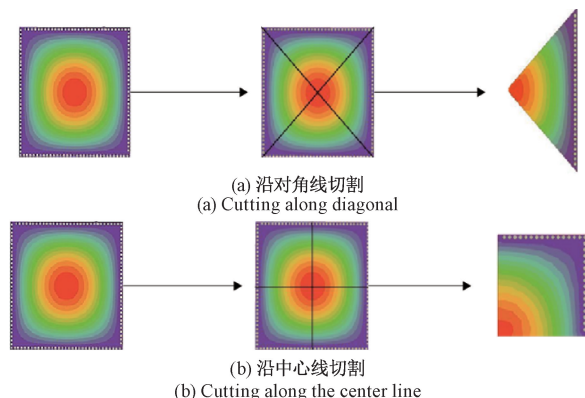


图 1 不同切割方式所得 QMSIW 结构

Fig. 1 QMSIW structures obtained by different cutting methods

如图 2 所示为一种 QMSIW 谐振腔的结构示意图。

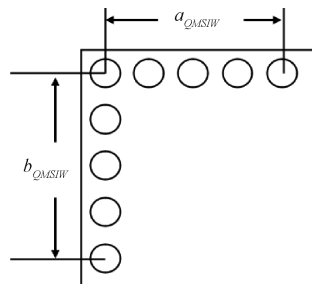


图 2 QMSIW 谐振腔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of QMSIW resonator

QMSIW 谐振腔的主模为 TE_{101} 模,其谐振频率计算公式为:

$$f = \frac{c}{2\pi \sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\pi}{2a_{QMSIW}}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{2b_{QMSIW}}\right)^2} \quad (1)$$

$$a_{eff}^{QMSIW} = \frac{1}{2}a_{eff}^{SIW} + \Delta a \quad (2)$$

$$b_{eff}^{QMSIW} = \frac{1}{2}b_{eff}^{SIW} + \Delta b \quad (3)$$

$$a_{eff}^{SIW} = a_{SIW} - \frac{d^2}{0.95 \times s} \quad (4)$$

$$b_{eff}^{SIW} = b_{SIW} - \frac{d^2}{0.95 \times s} \quad (5)$$

其中, d 、 s 分别为金属通孔直径和相邻通孔圆心到圆心的间隔; 而 Δa 、 Δb 则是为消除 QMSIW 谐振腔边缘效应所需的补偿宽度。根据所需频率范围和上述公式可以得到 QMSIW 谐振腔的初始尺寸。

2 QMSIW 滤波器设计

基于 QMSIW 的两种不同的结构, 设计两款 QMSIW 带通滤波器。根据谐振腔与微波电路的等效关系, 可得到如图 3 所示的等效电路, 其中 L_r 和 C_r 表示 QMSIW 谐振腔的等效电感与电容, L_s 则表示两谐振腔间的耦合。

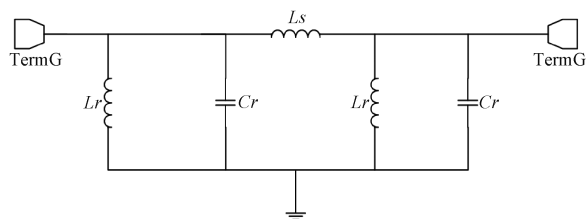
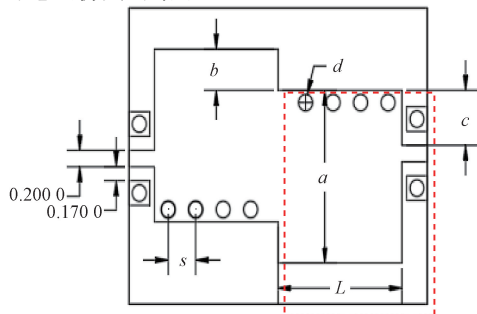


图 3 二阶 QMSIW 滤波器等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of second-order QMSIW filter

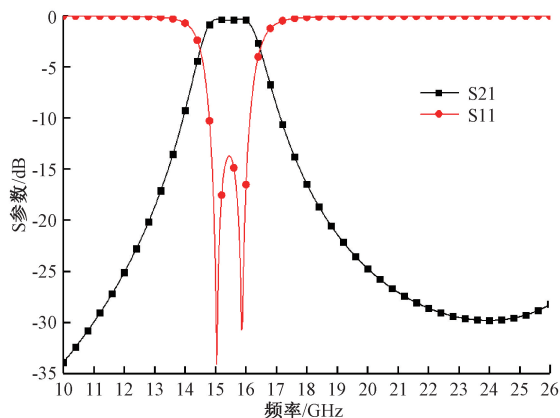
其中, $L_r = 54.85 \text{ pH}$, $C_r = 2.121 \text{ pF}$, $L_s = 0.41 \text{ nH}$ 。基于此原理设计 QMSIW 滤波器。如图 4(a) 所示为二阶矩形 QMSIW 滤波器的结构示意图, 如图 4(b) 为矩形 QMSIW 滤波器仿真结果图。

矩形 QMSIW 滤波器结构参数为 $a = 2.1 \text{ mm}$, $b = 0.5 \text{ mm}$, $L = 1.8 \text{ mm}$, $c = 0.67 \text{ mm}$, $s = 0.4 \text{ mm}$, $d = 0.2 \text{ mm}$, $h = 0.254 \text{ mm}$ 。分析所得结果, 矩形 QMSIW 滤波器的通带范围内, 带内插入损耗优于 0.5 dB , 回波损耗优于 15 dB , 尺寸为 $0.255 \times 0.353 \lambda_g^2$ 。如图 5(a) 所示为二阶三角形 QMSIW 滤波器的结构示意图, 如图 5(b) 所示为该滤波器的电磁仿真的结果。



(a) 矩形 QMSIW 滤波器的结构示意图

(a) Schematic diagram of rectangular QMSIW filter

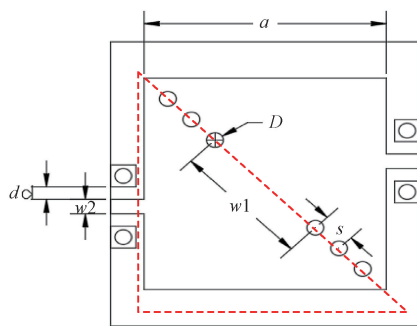


(b) 矩形 QMSIW 滤波器仿真结果图

(b) Simulated results of rectangular QMSIW filter structure

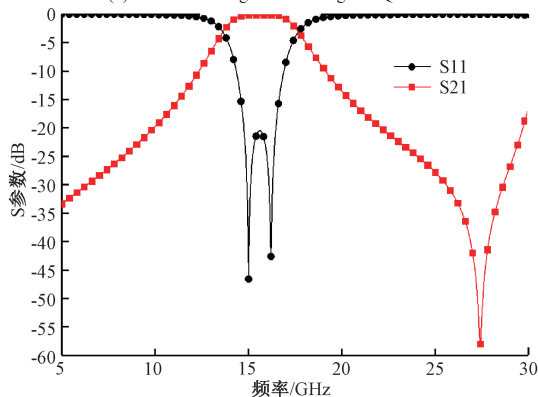
图 4 矩形 QMSIW 滤波器的设计

Fig. 4 The design of rectangular QMSIW filter



(a) 三角形 QMSIW 滤波器的结构示意图

(a) Schematic diagram of triangular QMSIW filter



(b) 三角形 QMSIW 滤波器的电磁仿真结果

(b) Simulated results of triangular QMSIW filter structure

图 5 三角形 QMSIW 滤波器的设计

Fig. 5 The design of triangular QMSIW filter

三角形 QMSIW 滤波器结构参数为 $a = 2.9 \text{ mm}$, $w1 = 1.7 \text{ mm}$, $d = 0.17 \text{ mm}$, $w2 = 0.2 \text{ mm}$, $s = 0.4 \text{ mm}$, $D = 0.2 \text{ mm}$, $h = 0.254 \text{ mm}$ 。分析所得结果, 三角形 QMSIW 滤波器的通带范围内, 插入损耗优于 0.2 dB , 回波损耗优于 20 dB , 尺寸为 $0.285 \times 0.285 \lambda_g^2$ 。

从上述两种 QMSIW 滤波器的仿真结果来看, 滤波器的尺寸有所减小, 但是在频段范围 $19 \sim 20 \text{ GHz}$ 的带外抑

制度均小于 20 dBc,说明滤波器的频率选择性不强。因此,需要采取一定的措施来提高这两款 QMSIW 滤波器的带外抑制水平。

3 加载 CSRR 结构的 QMSIW 滤波器设计

引入传输零点是提高带外抑制的一种有效手段^[20]。传输零点,即信号不能通过的频率点。通常使该频率点处虚拟开路形成全反射阻断能量的传输或形成虚拟短路把能量传导到地的方法引入传输零点。串并联电路引入传输零点的原理如图 6 所示。

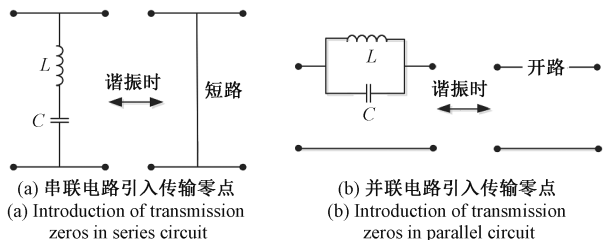


图 6 串并联电路引入传输零点原理

Fig. 6 Introduction of transmission zero principle in series-parallel connection

串联谐振电路谐振($\omega = 1/\sqrt{LC}$)时,其阻抗为 0,此时串联谐振电路处于短路状态;同理,并联谐振电路谐振($\omega = 1/\sqrt{LC}$)时,其导纳为 0 为,此时串联谐振电路处于开路状态。由此可知,在串联电路中串接并联谐振器或在并联电路中并联串联谐振器可以在滤波器的任意频点引入合适的传输零点。传输零点的位置与所串联或并联的谐振器的谐振频率相关。

在 QMSIW 谐振腔中加载互补开口谐振环(complementary split ring resonators, CSRR),是产生传输零点的一种有效手段,其本质是在 QMSIW 结构上串联一个并联谐振回路。CSRR 的工作原理为:当 CSRR 工作在谐振频率附近时,可以将其等效成一个电偶极子,它在谐振频率附近有负的介电常数,具有带阻效应,出现谐振吸收峰^[21]。基于此原理,CSRR 结构可以在微波电路中起到抑制寄生通带的作用。常见的 CSRR 结构及其等效电路如图 7 所示。

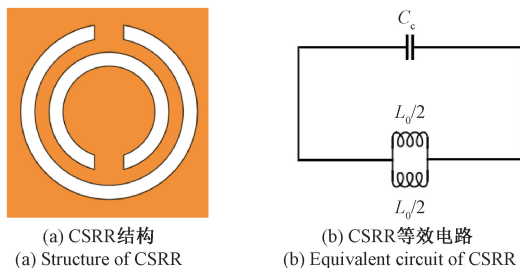


图 7 CSRR 一般结构及等效电路

Fig. 7 General structure and equivalent circuit of CSRR

在三角形 QMSIW 谐振腔中加载圆形 CSRR 结构,插入损耗优于 1.9 dB,损耗偏大^[22]。而对于不同的拓扑结构,加载与其形状匹配的 CSRR 结构能够减少不必要的电磁能量泄露,进而降低滤波器的插入损耗。因此本文针对不同拓扑结构的 QMSIW 滤波器,设计了不同结构的 CSRR。根据二阶 QMSIW 滤波器、CSRR 结构的等效电路以及引入传输零点的原理,可以得到加载 CSRR 结构的 QMSIW 滤波器等效电路图,如图 8 所示。

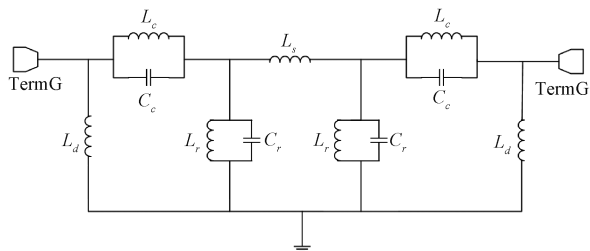


图 8 加载 CSRR 结构的二阶 QMSIW 滤波器等效电路图

Fig. 8 Equivalent circuit of second-order QMSIW filter loaded with CSRRs

其中, $L_r = 0.326$ nH, $C_r = 0.51$ pF, $L_s = 1.612$ nH, $L_c = 0.20$ nH, $C_c = 0.33$ pF, $L_d = 0.976$ nH。 L_r 和 C_r 表示 QMSIW 谐振腔的等效电感与电容, L_s 则表示两谐振腔间的耦合, L_c 和 C_c 则表示两谐振腔中加载的 CSRR 结构。

具体实现方法为在矩形 QMSIW 滤波器中加载矩形的 CSRR 结构,在三角形 QMSIW 滤波器中加载三角形的 CSRR 结构,保持结构的紧凑。其中,如图 9 所示为加载 CSRR 结构的矩形 QMSIW 滤波器。

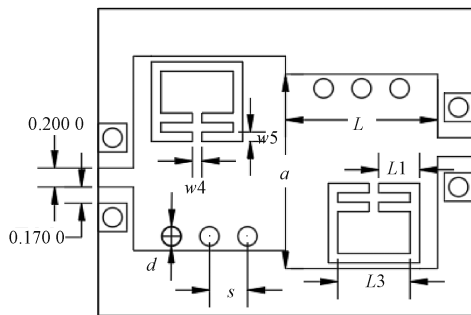


图 9 加载 CSRR 结构的矩形 QMSIW 滤波器

Fig. 9 Rectangular QMSIW filter loaded with CSRRs

改变 CSRR 的结构参数 w_4 和 L_1 ,分析 CSRR 结构各参数对 QMSIW 滤波器性能的影响,参数扫描结果如图 10 所示。

分析上述结果,改变 CSRR 结构的长度 L_1 和开口宽度 w_4 会改变等效电路中 L_c 和 C_c 的大小,进而影响 QMSIW 滤波器的中心频率的位置,回波损耗的大小以及带外传输零点的位置和带外抑制的强度。综合参数扫描的结果,最终取 $w_4 = w_5 = 0.1$ mm, $L_1 = 0.43$ mm, $a = 2.05$ mm, $b = 0.19$ mm, $L = 1.6$ mm, $s = 0.4$ mm, $d = 0.2$ mm,

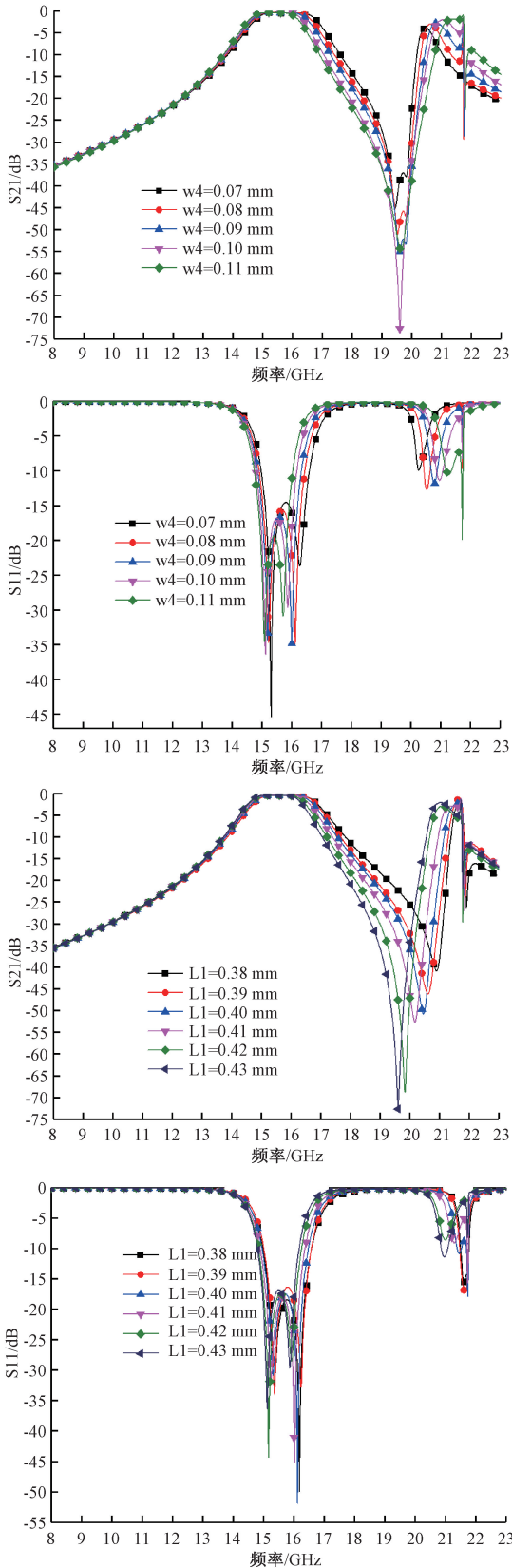


图 10 CSRR 结构各参数对 QMSIW 滤波器的影响
Fig. 10 Influence of structure parameters of the CSRRs on the performance of rectangular QMSIW filter

$h=0.254\text{ mm}$ 。最终的仿真结果如图 11 所示。

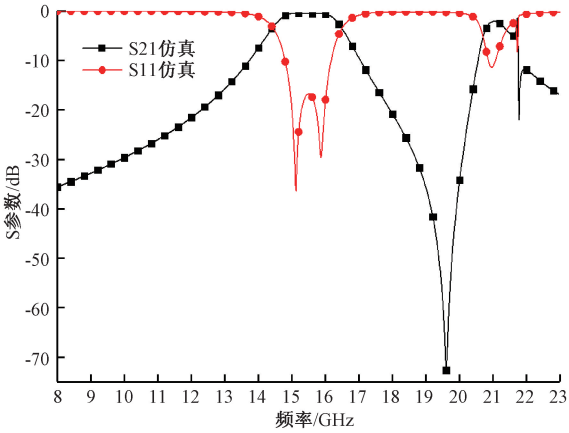


图 11 加载 CSRR 结构矩形 QMSIW 滤波器仿真结果图
Fig. 11 Simulated result of rectangular QMSIW filter with CSRRs

仿真结果显示:加载 CSRR 结构的矩形 QMSIW 滤波器通带范围为 $14.94\sim16.02\text{ GHz}$,相对带宽为 6.97% ,插入损耗优于 0.6 dB ,回波损耗优于 15 dB ,该滤波器在 $19\sim20\text{ GHz}$ 范围内产生了一个传输零点,带外抑制 $>35\text{ dBc}@19\sim20\text{ GHz}$,滤波器的尺寸为 $0.2\times0.314\lambda_g^2$ 。

如图 12 所示为加载 CSRR 结构的三角形 QMSIW 带通滤波器。

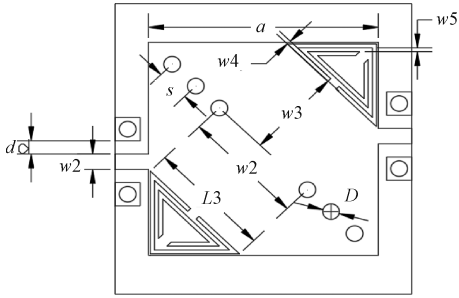
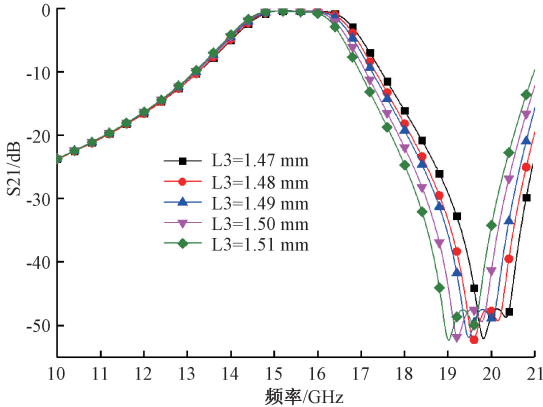


图 12 加载 CSRR 结构的三角形 QMSIW 滤波器
Fig. 12 Triangular QMSIW filter loaded with CSRRs

改变该 QMSIW 滤波器的 CSRR 结构的结构参数,分析 CSRR 结构各参数对滤波器性能的影响,其参数扫描结果如图 13 所示。



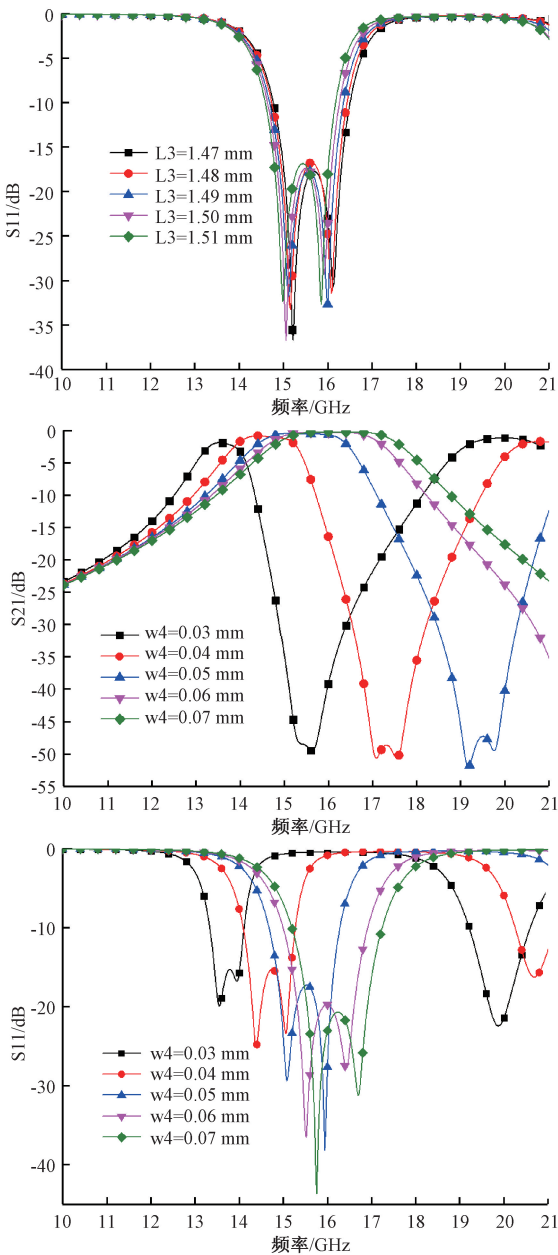


图 13 CSRR 结构各参数对 QMSIW 滤波器的影响

Fig. 13 Influence of structure parameters of the CSRRs on the performance of triangular QMSIW filter

分析上述结果,CSRR 结构的长度 L_1 和开口宽度 w_4 改变等效电路中 L_c 和 C_c 的大小,进而影响 QMSIW 滤波器的中心频率的位置,回波损耗的大小以及带外传输零点的位置和带外抑制的强度。综合参数扫描的结果,最终取 $w_5 = w_4 = 0.05$ mm, $L_3 = 1.51$ mm, $a = 2.75$ mm, $w_3 = 1.16$ mm, $w_1 = 1.7$ mm, $dd = 0.17$ mm, $w_2 = 0.2$ mm, $s = 0.4$ mm, $D = 0.2$ mm, $h = 0.254$ mm。最终的仿真结果如图 14 所示。

根据所得仿真结果,加载 CSRR 结构的三角形 QMSIW 滤波器通带范围为 14.89~16.11 GHz,相对带宽

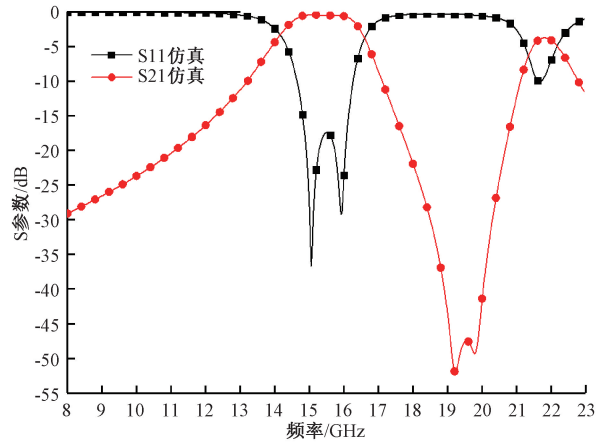


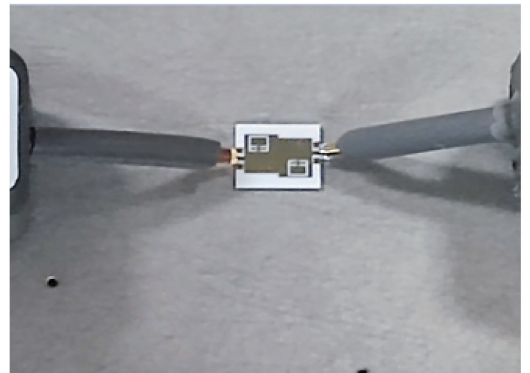
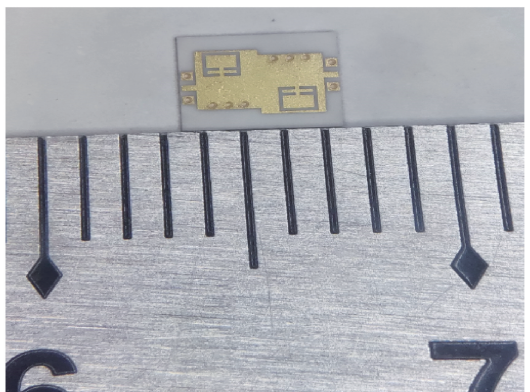
图 14 加载 CSRR 结构三角形 QMSIW 滤波器仿真结果图

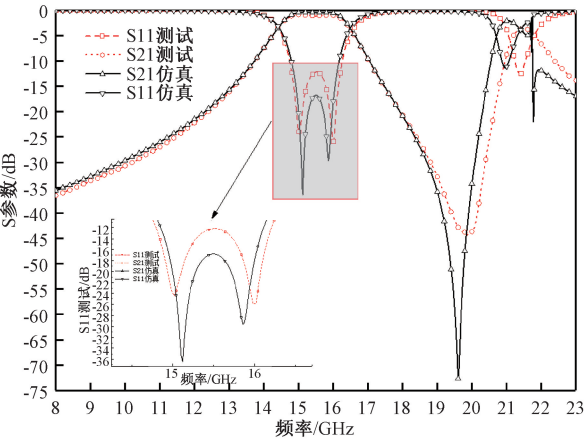
Fig. 14 Simulated result of triangular QMSIW filter with CSRRs

为 7.87%,插入损耗优于 0.6 dB,回波损耗优于 17.2 dB,该滤波器在 19~20 GHz 范围内产生了两个不同的传输零点,带外抑制 > 40 dBc @ 19~20 GHz,滤波器的尺寸为 $0.27 \times 0.27 \lambda_g^2$ 。

4 实测与结果分析

改进后的矩形 QMSIW 带通滤波器采用薄膜工艺加工并使用 GSG 探针进行测试,将最终的结果与实物测试的结果对比,结果如图 15 所示。

(a) 测试图
(a) Diagram of test(b) 实物加工图
(b) Physical picture



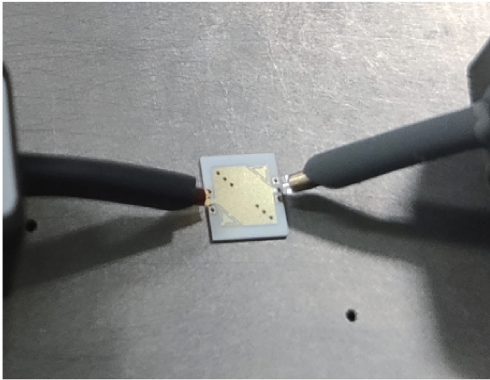
(c) 加载CSRR结构的矩形QMSIW滤波器仿真与实测结果对比
(c) Comparison of simulated results and measured results of rectangular QMSIW filter loaded with CSRRs

图 15 加载 CSRR 结构的矩形 QMSIW 滤波器实物与仿真
Fig. 15 The simulated results and measured results of rectangular QMSIW filter loaded with CSRRs

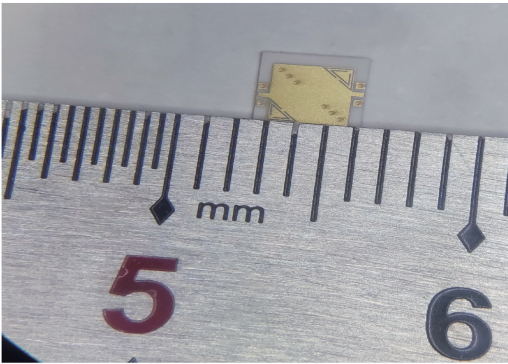
经过测试可以发现:实测结果与仿真结果基本一致,但是由于加工精度的问题,导致回波损耗由 -16 dB 变为 -13 dB ,略有恶化。

改进后的三角形 QMSIW 带通滤波器采用薄膜工艺加工并使用 GSG 探针进行测试,将最终的结果与实物加工的结果对比,其结果如图 16 所示。

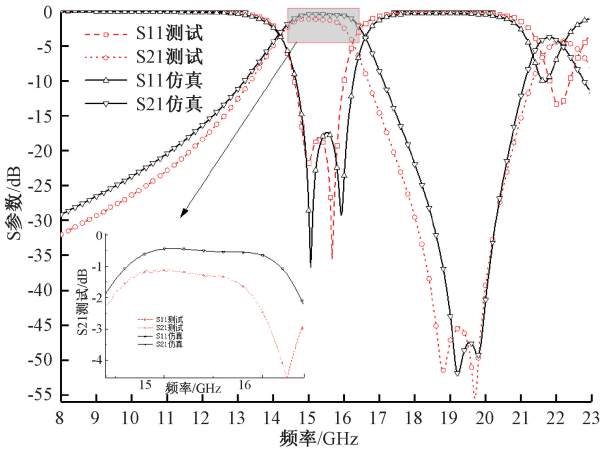
经过测试可以发现:实测结果与仿真结果基本吻合,插入损耗略有恶化。分析原因,得出结论加工精度存在误差,



(a) 测试图
(a) Diagram of test



(b) 实物加工图
(b) Physical picture



(c) 加载CSRR结构的三角形QMSIW滤波器仿真与实测结果对比
(c) Comparison of simulated results and measured results of triangular QMSIW filter loaded with CSRRs

图 16 实物测试与仿真模拟对比

Fig. 16 The simulated results and measured results of triangular QMSIW filter loaded with CSRRs

使滤波器尺寸存在些许误差,导致插入损耗由 -0.6 dB 变为 -1 dB ,略有恶化。

综上所述,所设计的两款不同结构形式的 QMSIW 滤波器均能够在工作频带范围内实现较低的插损,较高的回波损耗,较高的带外抑制水平以及较小的尺寸。如表 1 所示为本文设计与其他滤波器的比较。可以发现,与其他的 SIW 滤波器相比,此次设计的两种 QMSIW 滤波器在插入损耗与尺寸方面具有一定的优势,小型化程度更好。

表 1 各 SIW 滤波器性能比较

Table 1 Comparison of the BPF with some published SIW filters

文献	中心频率/GHz	结构类型	插耗/dB	相对带宽/%	带外抑制/dBc	尺寸/ λ_g^2
[1]	4.45	SIW	1.85	4.45	$>20@19\sim20\text{ GHz}$	0.062
[2]	20	SIW	2.78	2.75	$>10@19\sim20\text{ GHz}$	1.62×1.46
[12]	7.89	QMSIW	1.5	3.42	$>40@7\sim8\text{ GHz}$	0.87
[13]	4	QMSIW	0.8	13	$>30@30\sim33\text{ GHz}$	0.41
[23]	2.48	QMSIW	1.08	10.8	$>45@2\sim3\text{ GHz}$	0.79
[24]	22.95	SIW	1.96	11.76	$>40@27\sim29\text{ GHz}$	0.756×0.57
设计 1	15.5	QMSIW	0.6	6.97	$>35@19\sim20\text{ GHz}$	0.2×0.314
设计 2	15.5	QMSIW	0.6	7.87	$>40@19\sim20\text{ GHz}$	0.27×0.27

5 结 论

本文设计了两款不同的加载 CSRR 结构的 QMSIW 带通滤波器,一种为矩形 QMSIW 带通滤波器,另一种为三角形 QMSIW 带通滤波器。根据 QMSIW 滤波器结构的不同,设计不同形状的 CSRR 结构。其中,加载矩形 CSRR 结构的矩形 QMSIW 滤波器通带范围为 14.94~16.02 GHz,相对带宽为 6.97%,插入损耗优于 0.6 dB,回波损耗优于 15 dB,带外抑制 >35 dBc@19~20 GHz,尺寸 $0.2 \times 0.314\lambda_g^2$;而加载三角形 CSRR 结构的三角形 QMSIW 滤波器通带范围为 14.89~16.11 GHz,相对带宽为 7.87%,插入损耗优于 0.6 dB,回波损耗优于 17.2 dB,带外抑制为 >40 dBc@19~20 GHz,滤波器的尺寸为 $0.27 \times 0.27\lambda_g^2$ 。

本文所设计的两款滤波器均能在工作频带范围内实现良好的性能。通带内插入损耗优于 0.6 dB,回波损耗优于 15 dB,在 19~20 GHz 的范围内带外抑制优于 35 dBc,实现了低插损和高带外抑制的功能指标,满足大部分工程需求。两款滤波器均实现了小型化,易集成于射频系统中,可广泛应用于小型化高抑制的微波电路中。

参考文献

- [1] PALIWAL R, BUDHIRAJA R, SRIVASTAVA S, et al. Design of compact double pass band siw filter using coupled slot for ku band application[C]. 2021 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation(InCAP). IEEE, 2021: 855-858.
- [2] ZHONG B J, WU S M. Design SIW iris bandpass filter at 18 GHz[C]. 2020 International Workshop on Electro-magnetics: Applications and Student Innovation Competition(iWEM), 2020.
- [3] GUAN X Y, ZHANG X J, YIN S H, et al. Compact LTCC bandpass siw filter with high selectivity for 5g exploiting mixed coupling[J]. Electromagnetics, 2021, 41(5): 344-350.
- [4] 李松韬. 基于 LTCC 的带空腔基片集成波导滤波器设计制备及性能研究[D]. 上海:中国科学院大学(中国科学院上海硅酸盐研究所), 2020.
LI S T. Design fabrication and properties of AFSIW filter based on LTCC technology [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, (Master of Engineering in Material Engineering), 2020.
- [5] 曾昭怡. 28 GHz LTCC 带通滤波器的设计和制作[D]. 成都:电子科技大学, 2021.
ZENG ZH Y. Design and fabrication of 28 GHz LTCC band-pass filter [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [6] ZHANG G J, LI Y, CHEN T, et al. A compact quarter-mode siw bandpass filter for 5g power IoT [C]. 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2021.
- [7] 陆潇涵. 八分之一模基片集成波导滤波器的研究与应用[D]. 南京:东南大学, 2021.
LU X H. Research and application of substrate integrated waveguide filter with EMSIW [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [8] RHBANOU A, BRI S, SABBANE M. Analysis of substrate integrated waveguide (SIW) resonator and design of miniaturized SIW bandpass filter [J]. International Journal of Electronics and Telecommunications, 2017, 63: 255-260.
- [9] WANG N, JIN C, XU X, et al. Quarter-mode substrate integrated waveguide[C]. 2014 Asia-Pacific Microwave Conference, 2014: 286-288.
- [10] 王翔. 小型化基片集成波导滤波器研究及其 5G 通信系统应用[D]. 南京:东南大学, 2020.
WANG X. Research on miniaturized substrate integrated waveguide filter and its application in 5G communication system [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [11] STANDER T, SINHA S. Ultra-compact capacitively loaded evanescent half-mode SIW filters for LTE applications[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2014, 6(5): 487-490.
- [12] PELLURI S, FASIL M, KARTIKEYAN M. Compact bandpass filter using QMSIW cavity with slot resonator [C]. 2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), 2019.
- [13] DELMONTE N, BOZZI M, PERREGRINI L, et al. Miniaturized SIW filters based on shielded quarter-mode cavities [C]. 2019 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), 2019.
- [14] 袁丹丹. 基于慢波基片波导的小型化滤波器设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2021.
YUAN D D. Design of miniaturized filter based on slow wave substrate waveguide[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [15] LIN G, DONG Y, LUO X. Miniaturized quarter-mode siw filters loaded by dual-mode microstrip resonator with high selectivity and flexible response [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(6): 660-663.
- [16] ZHANG Q L, WANG B Z, ZHAO D S, et al. A

- compact half-mode substrate integrated waveguide bandpass filter with wide out-of-band rejection [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2016, 26(7): 501-503.
- [17] 韩威, 贾世旺, 魏浩, 等. 一种小型化 SIR 交指带通滤波器设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(15): 26-31.
HAN W, JIA SH W, WEI H, et al. Design of a miniaturized SIR interdigital bandpass filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(15): 26-31.
- [18] 韩昌霖, 吴建飞, 郑亦菲, 等. 基于多段 SIR 的微带交指滤波器小型化设计[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(7): 105-111.
HAN CH L, WU J F, ZHENG Y F, et al. Miniaturized design of microstrip cross-finger filters based on multiband SIR [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(7): 105-111.
- [19] 孙龙, 卢保军, 陈会永, 等. 一种高选择性宽带外抑制带通滤波器[J]. 无线电工程, 2021, 51(6): 514-518.
SUN L, LU B J, CHEN H Y, et al. A high selective wideband out-of-band rejection bandpass filter [J]. Radio Engineering, 2021, 51(6): 514-518.
- [20] 唐陆瑶. C 波段小型化宽带带通滤波器研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2022.
TANG L Y. Research on C-band miniaturized broadband bandpass filter [D]. Beijing: Research Institute of Electronic Science of China Electronic Technology Group Corporation, 2022.
- [21] 郭晖. 基于基片集成波导与 CSRR 技术的三角形带通滤波器设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
GUO H. The design of triangle bandpass filters based on substrate integrated waveguide and complementary split resonators[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [22] 邹喆, 孟令琴. 四分之一模基片集成波导双频滤波器的设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(16): 12-16.
ZOU ZH, MENG L Q. Design of dual-band filter based on quarter-mode substrate integrated waveguide [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(16): 12-16.
- [23] EOM S, MEMON M U, LIM S. Frequency-switchable microfluidic CSRR-loaded QMSIW bandpass filter using a liquid metal alloy [J]. Sensors, 2017, 17(4): 699.
- [24] HUANG X L. Design of miniaturized SIW filter loaded with improved CSRR structures [J]. Electronics, 2023, 12(18): 3789.

作者简介

滕骏(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为微波电路及滤波器小型化技术研究。

E-mail: tj13646360038@163.com

赵飞, 博士, 研究员, 主要研究方向为射频微波器件及电路。

E-mail: fly.zf@163.com

魏浩, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为射频微波及小型化技术。

E-mail: haowei@bupt.edu.com

魏恒, 博士, 研究员, 主要研究方向为射频微波器件及电路。

E-mail: 18533173907@163.com

唐陆瑶, 博士研究生, 助理工程师, 主要研究方向为相控阵微系统以及滤波器小型化技术研究。

E-mail: tangluyao613@163.com