

# 基于周期缺陷地结构的毫米波加脊半模波导滤波器

周奇辉<sup>1,2</sup>, 刘晨曦<sup>2\*</sup>

(1. 军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 100071;  
2. 国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**提出了一种基于周期缺陷地结构的可集成毫米波加脊半模波导滤波器。该滤波器利用了波导的高通特性以及周期缺陷接地结构的宽带抑制特性,从而构建了有效的通带滤波器。测试表明,该滤波器的 3 dB 通带范围为 39.4~45.4 GHz,中心频点为 42.4 GHz,3 dB 相对带宽为 14.1%,带内最低插入损耗为 2.4 dB,位于 44.2 GHz,高频带外抑制在 58 GHz 达 40 dB。该滤波器的横截面相比矩形波导滤波器减小了约 64%,有利于电路小型化、集成化。随着 5G 通信向毫米波频段发展,这种小型化毫米波滤波器在 5G 通信中有着广阔的应用前景。

**关键词:**微波技术;加脊半模波导;周期缺陷地结构;微纳加工;毫米波通信  
**中图分类号:**TN713 **文献标识码:**A

## Research on millimeter-wave ridged half-mode waveguide filter based on periodic defected ground structure

ZHOU Qi-Hui<sup>1,2</sup>, LIU Chen-Xi<sup>2\*</sup>

(1. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China;  
2. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A monolithic ridged half-mode waveguide bandpass filter with a periodic defected ground array has been successfully fabricated. Utilizing the high-pass characteristic of the waveguide and the rejection band generated by the periodic defected ground structure, an effective passband was created. The measured results show a 3 dB passband from 39.4 to 45.4 GHz, centered at 42.4 GHz with a 3-dB fractional bandwidth of 14.1%. The lowest insertion loss of 2.4 dB locates at 44.2 GHz. The suppression in upper rejection band reaches 40 dB at 58 GHz. Compared to conventional rectangular waveguide filters, the width of the proposed filter is reduced by 64%, which benefits to the integration and miniaturization. With the development of the next generation wireless communication (5G) towards millimeter-wave band, the miniaturized millimeter-wave filter has promising potential for 5G communication.

**Key words:** microwave technology, ridged half-mode waveguide, periodic defected ground structure, microfabrication, millimeter-wave communications

**PACS:**84.30.Vn, 84.40.Dc, 84.40.-x, 84.40.Lj

## 引言

毫米波段具有丰富的频谱资源,能够为无线通信提供极大的带宽以及极高的通信速率。由于微波低频频段的频谱过于拥挤,新一代移动技术(5G)正逐步向毫米波频段发展,毫米波通信已成为未来通信技术发展的潮流<sup>[1-2]</sup>。电路器件的集成化

与小型化是关系到毫米波通信系统高性能和低成本的关键问题,然而,传统的传统印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)技术由于体积庞大、高频损耗严重以及与集成电路(Integrated Circuits, IC)的兼容性问题,无法满足毫米波通信器件加工需求。为了应对这一挑战,采用微纳加工的集成电路器件成为了如今研究的热点问题。

收稿日期:2021-10-25,修回日期:2022-05-20

基金项目:国家自然科学基金(62101565)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (62101565)

作者简介(Biography):周奇辉(1991-),男,湖南岳阳人,助理研究员,博士,主要研究领域为超材料吸波体、超材料滤波器

E-mail: zhouqihui10@126.com

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: liuchenxi09@nudt.edu.cn

Received date: 2021-10-25, Revised date: 2022-05-20

波导滤波器具有高选择性、低传输损耗和高功率容量等特点,是通信系统中的关键无源器件之一<sup>[3-4]</sup>。然而,利用薄膜工艺和其它二维平面技术在晶圆上构建三维矩形波导是一项具有挑战性的工作。为了实现这些精细的三维结构,电化学加工、Polystrata 工艺以及光刻技术通过多次利用牺牲层的方式,能够制备空气填充的立体器件<sup>[5-7]</sup>。在文献[8]中,利用深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)实现了一种五柱带通滤波器。文献[9]提出了一种新型微加工工艺,用于实现腔谐振器以及带通滤波器。文献[10]采用鳍状电感实现了工作在 W 波段的耦合波导滤波器。文献[11]利用金属棒实现了一种微纳结构的全金属矩形波导滤波器,波导 E 面中的金属棒构建了一系列并联电感。在文献[12]中,通过将 MEMS 开关与微纳波导结合,实现了可开关的高通滤波器。以上的波导滤波器均采用在波导内部插入不连续性结构的方式,通常需要较为复杂的加工处理步骤,增加工艺难度。此外,尽管上述所有的波导滤波器均呈现出较好的工作性能,但其波导横截面的尺寸相对工作波长仍然较大,在实际应用时有待进一步小型化。

为解决上述问题,本文提出了一种可用于毫米波通信的加脊半模波导(Ridged Half Mode Waveguide, RHMW)带通滤波器。滤波器整体结构采用了一段加脊半模波导,在波导底部的金属层上刻蚀有一个小型化的周期缺陷接地结构(Defected Ground Structure, DGS)阵列。底面中的周期 DGS 为二维平面缝隙阵列,没有向波导内部空间插入不连续性结构,避免提升加工难度。RHMW 属于高通型传输线结构,具有较好的低频抑制特性,而周期 DGS 具有极宽的带阻特性,通过结合两者的低频抑制与高频带阻特性,能够形成一个平坦的通带。RHMW 结构相较于传统矩形波导,横截面积减小了约 64%,此外,为了减小 DGS 所占空间,本文采用了一种内陷型裂缝环作为 DGS 阵列的基本单元。由于结构的可扩展性和制造技术在各频段的通用性,该滤波器的设计加工方法可以推广至微波低频及太赫兹波段。

## 1 基本原理

矩形波导是一种具有矩形横截面的空心金属管,它将电磁波限制在播到内部传播,损耗小且功率容量大。为了减小体积,将矩形波导在横截面中心位置沿传播方向平分,从而得到半模波导(Half

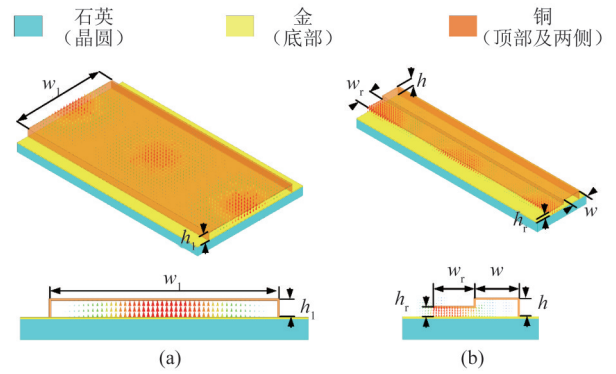


图1 在 30 GHz 下(a)矩形波导,(b)RHMW 主模的电场分布(参数: $w_1 = 5\ 500$ ,  $h_1 = 400$ ,  $w = 1\ 000$ ,  $w_r = 1\ 000$ ,  $h = 400$ ,  $h_r = 200$ , 单位:  $\mu\text{m}$ )

Fig. 1 The fundamental mode electric field distributions (at 30 GHz) of (a) rectangle waveguide. and (b) ridged half-mode waveguide. (Parameters:  $w_1 = 5\ 500$ ,  $h_1 = 400$ ,  $w = 1\ 000$ ,  $w_r = 1\ 000$ ,  $h = 400$ ,  $h_r = 200$ , unit:  $\mu\text{m}$ )

Mode Waveguide, HMW)<sup>[13-15]</sup>。HMW 中传播的主模约为矩形波导主模的一半,因此被称为准  $\text{TE}_{0.5,0}$  模或半模。HMW 的宽度与高度之比通常较大,开放侧的波导壁可等效为理想磁壁,电磁场仍被限制在波导内部,因此 HMW 在不降低性能的情况下使波导尺寸减小约 50%。在此基础上,RHMW 通过部分降低 HMW 开放侧高度引入了波导脊结构,在波导横截面中加载了阶梯式电容,使主模的截止频率降低,进一步减小了波导横截面的尺寸。例如,图 1 分别展示了具有相同截止频率的矩形波导和 RHMW 的主模电场分布。矩形波导的主模为  $\text{TE}_{1,0}$ ,电场集中在横截面中央位置;RHMW 的主模为准  $\text{TE}_{0.5,0}$  模,电场集中在脊结构附近。在不改变主模传播特性的情况下,RHMW 的宽度较矩形波导大大减小。

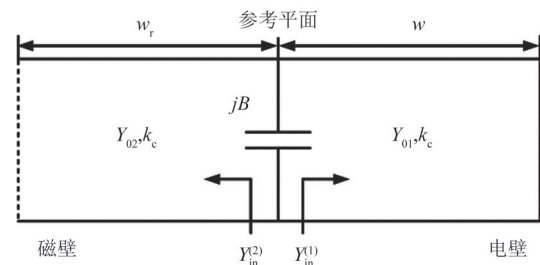


图2 RHMW 的横向等效电路

Fig. 2 Equivalent transverse circuit of the RHMW

利用图 2 所示的 RHMW 的横向等效电路,其工作的截止波长满足下式<sup>[16]</sup>:

$$-\cot\left(\frac{2\pi}{\lambda_c} w\right) + \frac{B}{Y_{01}} + \frac{Y_{02}}{Y_{01}} \tan\left(\frac{2\pi}{\lambda_c} w_r\right) = 0, \quad (1)$$

其中  $\lambda_c$  是主模下的截止波长,  $k_c$  为对应的截止波数,  $w$  和  $Y_{01}$  分别表示波导未降低高度部分的顶部通道的宽度和特征导纳,  $w_r$  和  $Y_{02}$  分别表示波导脊部的宽度和特征导纳,  $B$  是由波导顶部不连续性引起的阶梯电容。  $h$  是波导的总高度,  $h_r$  是脊部高度。式(1)中的  $\frac{Y_{02}}{Y_{01}}$  与  $\frac{B}{Y_{01}}$  可以由下式计算<sup>[17]</sup>:

$$\frac{Y_{02}}{Y_{01}} = \frac{h}{h_r}, \quad (2)$$

$$\frac{B}{Y_{01}} = \frac{2h}{\lambda_g} \left[ \ln \left( \frac{1-a^2}{4a} \right) \left( \frac{1+a}{1-a} \right)^{\frac{1}{2}(a+\frac{1}{a})} + 2 \frac{A+A'+2C}{AA'-C^2} + \left( \frac{h}{4\lambda_g} \right)^2 \left( \frac{1-a}{1+a} \right)^{4a} \left( \frac{5a^2-1}{1-a^2} + \frac{4a^2C}{3A} \right)^2 \right], \quad (3)$$

其中

$$a = \frac{h_r}{h}, \quad (4)$$

$$\lambda_g = \lambda \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2}, \quad (5)$$

$$A = \left( \frac{1+a}{1-a} \right)^{2a} \frac{1 + \sqrt{1 - \left( \frac{h}{\lambda_g} \right)^2}}{1 - \sqrt{1 - \left( \frac{h}{\lambda_g} \right)^2}} - \frac{1+3a^2}{1-a^2}, \quad (6)$$

$$A' = \left( \frac{1+a}{1-a} \right)^{\frac{2}{a}} \frac{1 + \sqrt{1 - \left( \frac{h_r}{\lambda_g} \right)^2}}{1 - \sqrt{1 - \left( \frac{h_r}{\lambda_g} \right)^2}} + \frac{3+a^2}{1-a^2}, \quad (7)$$

$$C = \left( \frac{4a}{1-a^2} \right)^2, \quad (8)$$

根据以上计算过程,即可得到对应物理参数下的波导截止波长与截止频率。

## 2 设计仿真

如图3所示,RHMW滤波器由石英晶圆上方的一段RHMW、底部刻蚀的周期DGS阵列、两个共面波导(Coplanar Waveguide, CPW)到RHMW过渡段以及波导顶部通道和脊部的一些方形孔径组成。底部的周期DGS阵列用以截断底面上的传导电流,从而形成宽阻带。如图3(c)中所示,DGS阵列采用内陷型裂缝环作为基本单元,每个单元可近似为半

波长谐振器,内陷式的折叠几何结构延长了谐振路径,降低了谐振频率,从而减小了所占面积。此外,周期单元底下的石英晶圆具有较高的介电常数,能够进一步降低DGS的谐振频率<sup>[18]</sup>。周期DGS阵列叠加了各单元的谐振,从而展宽了阻带带宽,提高了阻带中的回波损耗,并使滤波器通带的高频截止边缘更为陡峭,但同时也会增加滤波器沿传播方向的长度。综合考虑尺寸与性能,本文采用了5个DGS单元组成一维阵列。CPW到RHMW过渡段不仅实现了滤波器与标准传输线的阻抗匹配,还使得滤波器能与其他IC器件直接相连,并支持用探针在晶圆上进行测量。CPW周围沉积并刻蚀有超薄氮化物层,用于在加工过程中保护CPW的缝隙。此外,顶部通道和脊部留有方形孔(其边长分别为120  $\mu\text{m}$ 和50  $\mu\text{m}$ ),用于移除制造过程中留在RHMW内部的牺牲层。由于方形孔径与滤波器的工作波长相比极小,因此其造成的影响可以忽略不计。

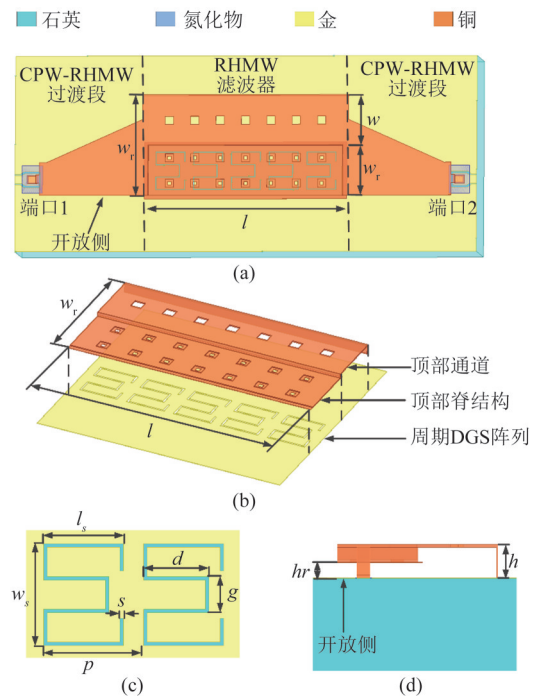


图3 RHMW滤波器的结构(a)俯视图,(b)移除晶圆及过渡段后的滤波器三维视图,(c)DGS单元的几何结构,(d)侧视图(参数: $l = 3\ 000$ ,  $w_r = 1\ 450$ ,  $w = 725$ ,  $w_r = 725$ ,  $p = 550$ ,  $l_s = 440$ ,  $w_s = 560$ ,  $d = 360$ ,  $g = 200$ ,  $s = 20$ ,  $h_r = 50$ ,  $h = 100$ ,单位: $\mu\text{m}$ )

Fig. 3 The structure of the RHMW filter (a) top view (b) 3D view without wafer or transitions (c) geometry of the DGS unit (d) side view (Parameters:  $l = 3\ 000$ ,  $w_r = 1\ 450$ ,  $w = 725$ ,  $w_r = 725$ ,  $p = 550$ ,  $l_s = 440$ ,  $w_s = 560$ ,  $d = 360$ ,  $g = 200$ ,  $s = 20$ ,  $h_r = 50$ ,  $h = 100$ , unit:  $\mu\text{m}$ )

该带通滤波的通带是通过在低频以及高频构建极宽的阻带而形成的,低频阻带利用了RHMW的低频截止特性实现,高频阻带利用了周期DGS阵列的截止特性实现。采用矩量法对设计的毫米波滤波器进行建模与全波仿真,得到了带通滤波器在不同尺寸下的S参数,结果如图4所示。当 $w_T=1450$ 时,在40.7 GHz时,最小插入损耗为1.43 dB,3 dB传输频带范围为34.85 GHz至46.35 GHz。根据横截面谐振方程(1),当 $w/w_T$ 保持不变时,滤波器的下截止频率与RHMW的总宽度成反比<sup>[16]</sup>。如图4(a)所示,随着 $w_T$ 的增加,下截止频率逐渐向低频移动。高频阻带由周期性DGS的谐振形成,随着 $l_s$ 增大,DGS单元的有效谐振路径更长,因此上截止频率也向低频移动,这与图4(b)所示的仿真结果一致。由于滤波器的下上截止频率分别取决于RHMW的截止频率和DGS的谐振,因此可以根据实际应用的频段要求,通过调整RHMW的宽度和DGS单元的长度来调整工作频带。相较于传统的滤波器设计方法,本文提出的设计方法能够简洁直观地调整任一截止频率位置,而且较为容易实现宽带滤波器,满足毫米波通信宽频带的要求。

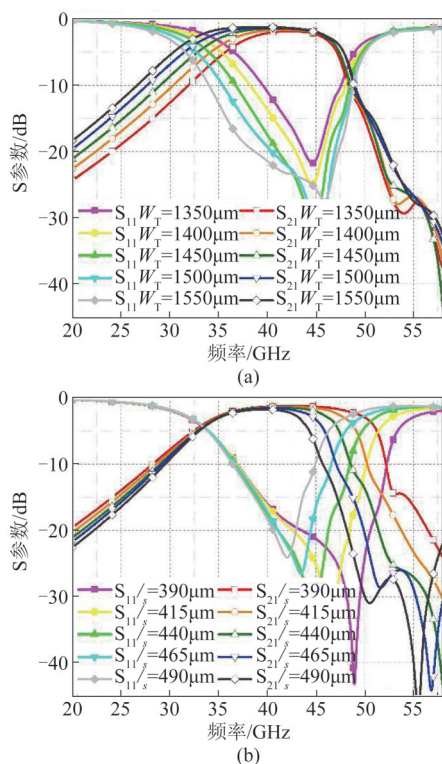


图4 RHMW滤波器全波仿真的S参数(a)不同波导宽度 $w_T$  ( $w_T/w_T=0.5$ ), (b)不同DGS单元长度 $l_s$   
Fig. 4 The full-wave simulated S-parameters of the filter (a) with different  $w_T$  ( $w_T/w_T=0.5$ ), (b) with different  $l_s$

### 3 加工流程

RHMW滤波器的制造工艺流程如图5所示。(a)首先,从在石英晶圆顶部溅射40/500 nm的Cr/Au层,其中,铬层能够显著提升金属导电层与晶圆之间的附着力;随后采用刻蚀的方法对Cr/Au层进行图形化,加工出RHMW底部的周期DGS阵列以及CPW结构;(b)为了避免在后续工艺中破坏CPW的缝隙结构,在CPW所在位置沉积500 nm的氮化物层来抑制直流,并刻蚀图形以预留出RHMW与CPW过渡段和CPW的触点位置;(c)接下来,使用旋涂法制备50  $\mu\text{m}$ 厚的AZ 40XT-11D光刻胶,作为第一层牺牲层;(d)然后,溅射40/500 nm的Cr/Cu种子层以,用以搭建波导的金属脊状结构;(e)该金属脊状结构被电镀至1.5  $\mu\text{m}$ 的厚度以加强结构的刚性,然后刻蚀成图形,预留出方形释放孔径;(f)接下来,沉积并图形化50  $\mu\text{m}$ 厚度的AZ 40XT-11D第二层牺牲层,使得脊结构位置的高度达到50  $\mu\text{m}$ ,顶部通道中的位置达到100  $\mu\text{m}$ 的总高度;(g)然后溅射40/500 nm Cr/Cu的种子层,沉积AZ 40XT-11D电镀模具并图形化;(h)在种子层上镀上10  $\mu\text{m}$ 厚的铜层以增加刚性;(i)最后,剥离模具,蚀刻铜种子层,并通过湿法化学工艺去除牺牲层,从而得到了可集成的毫米波RHMW滤波器。

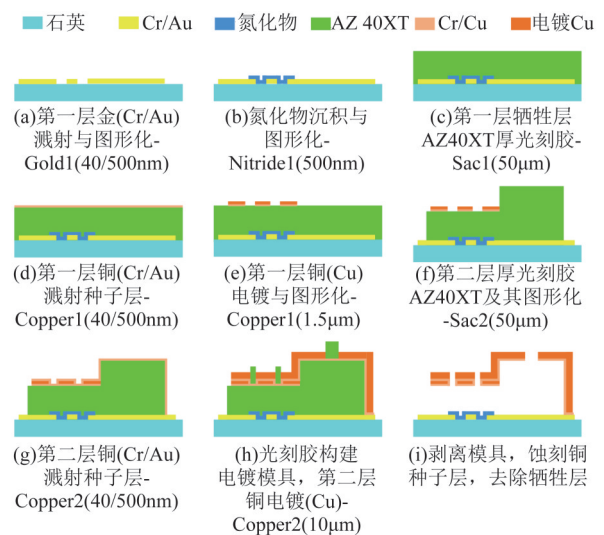


图5 RHMW滤波器的微纳加工工艺流程

Fig. 5 Microfabrication process flow of the RHMW filter

### 4 测试与讨论

图6(a)给出了的RHMW滤波器在显微镜下的图片,在波导封闭的侧壁处有一处由明转暗,在图

片中用蓝色方框标注出来。通过 Olympus OLS3000 激光共聚焦显微镜获得该侧边处的三维图像, 示于图 6(b) 中。可以看出, 波导的封闭侧壁并非与底面完全垂直, 其剖面呈现出倾斜渐变的特征。这种倾斜是由于在烘烤模具时, 牺牲层的光刻胶回流造成的。由于侧壁存在的一定坡度, 直接导致波导顶层的有效宽度变窄, 将使得 RHMW 滤波器的低频截止频率略有升高。根据采集到的三维图像, 对滤波器的侧壁斜率进行拟合, 拟合曲线如图 6(c) 所示。根据拟合曲线对滤波器的全波仿真模型进行了修改, 使其与制造的样件相一致, 得到了修正模型仿真结果。将其与原始模型仿真结果在图 7 中进行对比, 可以看到, 修正模型仿真得到的 3 dB 通带范围为 37 GHz 到 46.46 GHz, 在 41 GHz 时最小插入损耗为 1.6 dB。由于侧壁的倾斜, 修正模型的下限截止频率比原始模型高 2.15 GHz。

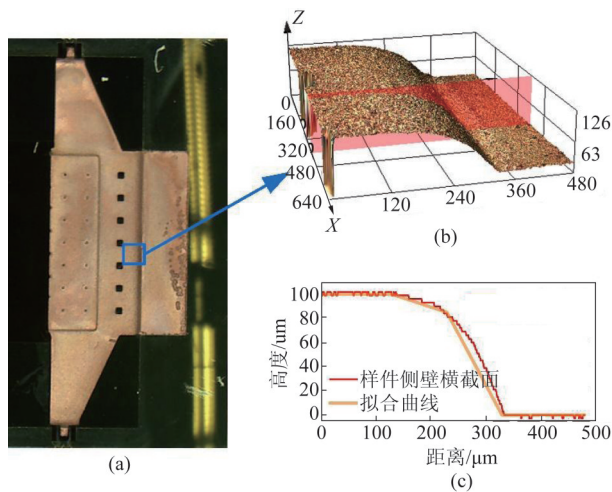


图 6 (a) RHMW 样件在显微镜下的图像, (b) 波导侧壁的激光共聚焦显微镜三维图像, (c) 样件侧壁拟合

Fig. 6 (a) The microscope image of the fabricated filter, (b) the laser confocal microscope 3-D images of the sidewall, (c) curve fitting of the sidewall

样件的 S 参数使用安捷伦 E8361C PNA 进行测量, 该 PNA 与 N5260A 毫米波控制器和 N5260-60003 测试模块连接, 末端通过在 Cascade Microtech Summit 11000 探头台上装配的探针与测试样件相连。如图 7 所示, 图中两条纵向的绿色直线标注了测试获得的 3 dB 通带范围, 为 39.4~45.4 GHz, 中心频点为 42.4 GHz, 3 dB 相对带宽为 14.1%。通带内插入损耗最低点由图中红色五角星标注, 位于 44.2 GHz, 为 2.4 dB。滤波器 10 dB 带外抑制频点分别为 32.1 GHz 与 48.8 GHz。高频带外抑制特性是由波

导底部刻蚀的缺陷地结构引起, 性能随着周期单元数增加而变陡峭, 采用了 5 个单元后, 在 58 GHz 处的带外抑制达到 40 dB。低频带外抑制特性是由波导本身的低频截止特性决定, 相较于由周期缺陷地结构谐振造成的高频抑制更为平缓。修正后模型的频率响应与实测响应吻合良好, 通带中较高的插入损耗和较低的回波损耗很可能是由于加工测试过程的误差造成的。

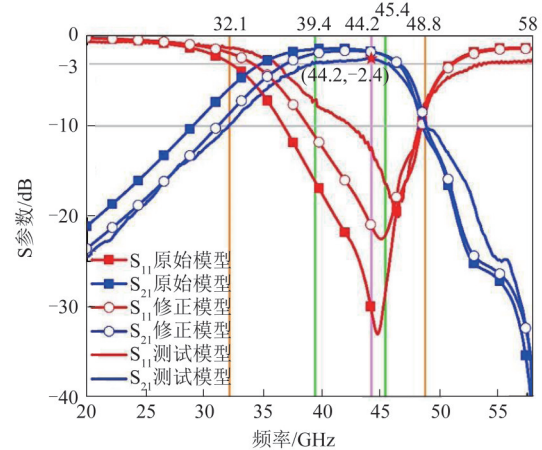


图 7 原始模型, 修正后的模型, 以及测试样件的 S 参数对比  
Fig. 7 The comparison of the S-parameters between the original model, modified model and the prototype

## 5 总结

本文设计并加工了一种小型化单片集成的晶圆级波导带通滤波器, 它将周期缺陷接地结构集成到加脊半模波导的底部中。这种设计既继承了传统波导的优点, 又大大减小了波导滤波器尺寸。对微纳加工获得的样品进行测试, 在 44.2 GHz 下实现了 2.4 dB 的插入损耗, 3 dB 通带范围为 39.4~45.4 GHz。该滤波器采用的微纳加工技术属于 CMOS 工艺中通用技术范畴, 且加工精度要求远小于常用 CMOS 技术特征尺寸, 因此该滤波器可与多种类型 IC 器件直接集成, 在毫米波通信电路中有较大应用前景。此外, 由于缺陷地结构和加脊半模波导的可缩比特性, 该设计可推广至微波低频或太赫兹区域。

## References

- [1] PENG Zhang-You, LI Wen. AUKF-based beam tracking algorithm in Millimeter-Wave mobile communication [J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, (彭章友, 李文. 毫米波移动通信中基于 AUKF 的波束跟踪算法. *红外与毫米波学报*) 2021, 40(3): 334-340.
- [2] Agiwal M, Roy A, Saxena N. Next generation 5G wireless

- networks: a comprehensive survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, **18**(3):1617–1655.
- [3] Pozar D M. *Microwave Engineering* [M]. New York: Wiley, 2012
- [4] Williams A E. A four-cavity elliptic waveguide filter [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 1970, **18**(12): 1109–1114.
- [5] Ehsan N, Vanhille K, Rondineau S, *et al.* Broadband micro-coaxial wilkinson dividers [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2009, **57**(11): 2783–2789.
- [6] Grishina D A, Harteveld C, Woldering L A, *et al.* Method to make a single-step etch mask for 3D monolithic nanostructures[J]. *Nanotechnology*, 2015, **26**(50):505302.
- [7] Jones T R, Daneshmand M. The microfabrication of monolithic miniaturized ridged half-mode waveguides for 5G millimeter-wave communication systems[C]. *IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS*, 2018.
- [8] Zhao X H, Bao J F, Shan G C, *et al.* D-band micromachined silicon rectangular waveguide filter[J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2012, **22**(5): 230–232.
- [9] David F, Dalmay C, Chatras M, *et al.* Micro-additive fabrication of 38 GHz resonators and filters[C]. In Proc. 47th Eur. Microw. Conf., Nuremberg, Germany, 2017.
- [10] Jones T R, Vahabisani N, Der E T, *et al.* Monolithic millimeter-wave air-filled waveguide resonator for filter applications[J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2019, **29**(6):379–381.
- [11] Vahidpour M, Sarabandi K. Micromachined J-band rectangular waveguide filter[C]. *General Assembly and Scientific Symposium IEEE*, 2011.
- [12] Vahabisani N, Daneshmand M. Monolithic millimeter-wave MEMS waveguide switch[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2015, **63**(2):340–351.
- [13] Lai Q H, Fumeaux C, Wei H, *et al.* Characterization of the propagation properties of the half-mode substrate integrated waveguide [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques*, 2009, **57**(8):1996–2004.
- [14] Zhou Q H, Jones T R, Moghadas H, *et al.* Microfabrication of monolithic wafer-level miniaturized millimeter-wave air-filled half-mode waveguide filter based on the inward curving split ring resonator array [J]. *Nanotechnology*, 2020, **31**(19):195202.
- [15] Wang Y, Wei H, Dong Y, *et al.* Half mode substrate integrated waveguide (HMSIW) bandpass filter[J]. *IEEE Microwave & Wireless Components Letters*, 2007, **17**: 265–267.
- [16] Jones T R, Daneshmand M. The characterization of a ridged half-mode substrate-integrated waveguide and its application in coupler design [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, **64**(11): 3580–3591.
- [17] Marcuvitz N. *Waveguide Handbook* [M]. McGraw-Hill, 1951.
- [18] Park D J, Park S J, Park I, *et al.* Dielectric substrate effect on the metamaterial resonances in terahertz frequency range [J]. *Current Applied Physics*, 2014, **14**(4): 570–574.