

140GHz MEMS 矩形波导滤波器

赵兴海^{1*}, 单光存², 郑英彬¹, 杜亦佳³, 陈颖慧¹, 鲍景富³, 苏伟¹

(1. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 香港城市大学 物理与材料科学系, 中国 香港;

3. 电子科技大学, 四川 成都 613800)

摘要:设计并实现了一种采用微机械制造(MEMS)技术加工的 D 波段矩形波导膜片滤波器. 采用有限元仿真软件 HFSS 分析了滤波器内腔镀膜厚度、粗糙度以及感性膜片厚度对滤波器主要性能的影响. 采用 MEMS 深刻蚀工艺(DRIE)成功加工出了滤波器主体结构. 通过完成结构深刻蚀、金属电镀和键合等关键工艺, 首次制造出了 D 波段 MEMS 波导滤波器. 样品测试结果为插入损耗 0.4~0.7 dB, 中心频率(140±3) GHz, 带外抑制为 ≥18 dB, 样品主要技术指标与设计值符合.

关键词:波导滤波器; 太赫兹; DRIE

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A

MEMS rectangular waveguide filter at 140 GHz

ZHAO Xing-Hai^{1*}, SHAN Guang-Cun², ZHENG Ying-Bin¹, DU Yi-Jia³, CHEN Ying-Hui¹,
BAO Jing-Fu³, SU Wei¹

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Department of Physics and Materials Science, City University of Hong Kong, Hong Kong, China;

3. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 613800, China)

Abstract: The D-band MEMS rectangular waveguide iris filter was designed and fabricated. The effects of thicknesses of both metalized layer and iris, and their roughness on the performances of the filter were investigated. The prototypes were fabricated using DRIE method. Several techniques including deep etching, electroplating and bonding were employed for the fabrication of the filter. The MEMS waveguide iris filter with a central frequency of (140±3) GHz, insert loss 0.4-0.7dB, and isolation larger than 18dB has been accomplished for the first time. The test results were in agreement with the simulations.

Key words: waveguide filter; THz; DRIE

PACS: 84.40. Az

引言

D 频段(0.11~0.17 THz)处于光子学与电子学的空白地带,同时它是电磁波在大气传播的窗口. THz 探测和通信技术是未来无线电发展的方向. 对于通信、雷达系统而言,滤波器更是一种至关重要的射频器件. 滤波器在微波通信、微波导航、遥测遥控、

卫星通信以及军事电子对抗领域的需求量不断增大. 由于受器件工作原理的限制,普通的波导滤波器在频率比较低的微波频段的体积比较大,但在较高频段尺寸减小. 微机械制造(MEMS)技术主要采用光刻、腐蚀、电镀等工艺获得复杂的微细结构,加工精度在 1μm 量级,是超高频器件的有效加工手段^[1-5].

收稿日期:2011-11-13,修回日期:2012-07-17

Received date: 2011-11-13, revised date: 2012-07-17

基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金重点项目(2008A0403016);国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金资助项目(11176006)

Foundation items: Supported by the Key Program of Science and Technology Development Foundation of CAEP (2008A0403016) and NSAF (11176006)

作者简介(Biography):赵兴海(1984-),男,山东潍坊人,助理研究员,主要研究领域为 RF MEMS、THz 技术. Email: xinghaiu@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xinghaiu@126.com

近些年来,研究者开发出了一些 W 波段的微尺度滤波器^[14,6-10]. D 波段微尺度滤波器有非常少的研究报告^[11]. 主要集中在微罩线 (microshield line) 平面滤波器和波导滤波器上. 因其体积、重量、加工、造价以及性能方面的优势使得在太赫兹系统中的应用潜力巨大. 不仅能够工作在太赫兹频率,而且能够极大地减小滤波器的面积以实现小型化. 传统的衬底支撑的微带或共面波导的缺点是介电损耗、辐射损耗大,被限制在亚毫米波频率以下. 一般解决方案是用波导进行设计^[12].

1 设计与仿真

文中选取 0.5 dB 纹波的五阶切比雪夫原型滤波器为例,研究不同工艺参数对这种并联电感耦合波导滤波器衰减特性的影响. 所设计的波导滤波器采用五个谐振器通过电感膜片耦合的结构. 由于在太赫兹通信或遥测系统中,采用标准波导作为传输线结构,因此,这里的 140 GHz 波导滤波器采用标准波导结构 WR-6 (截面尺寸 1.651 mm × 0.8255 mm).

1.1 等效电路

电感膜片横截面结构示意图如图 1(a) 所示. 用膜片作为耦合结构时,膜片的厚度对相邻波导谐振频率的影响很大,当膜片很薄时 (远小于工作波长 λ_0), 矩形波导滤波器电感膜片可以等效为电长度为 ϕ 的一段传输线和并联电感 β , 如图 1(b) 所示. 电感膜片电导可以通过式(1) 计算得到^[13]:

$$Y = \frac{1}{\beta} = \frac{\lambda_{g0}}{a} \cot^2 \left(\frac{\pi d}{2a} \right) \left[1 + \left(\frac{1}{2} \sqrt{2 - \left(\frac{a}{\lambda_{g0}} \right)^2} - \frac{3}{4} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi d}{2a} \right) \right], \quad (1)$$

其中, λ_{g0} 为中心频率 f_0 对应的波导波长, a 为波导宽度, d 为膜片间隙.

1.2 三维仿真

选取切比雪夫低通原型滤波器变换成带通原型,通过 1.1 节中等效电路模型计算出膜片波导滤波器的几何尺寸 (谐振器长度 L 和膜片缝隙宽度 d). 膜片厚度选定为 0.1 mm,然后将计算得到初始结构输入 HFSS 软件建立仿真模型,进行优化设计,获得的 5 腔体滤波器的 S 参数如图 4 所示. 滤波器带宽 11.8%, 中心频率 140.5 GHz, 插入损耗 0.39 dB, 回波损耗大于 18 dB.

2 影响因素分析

在太赫兹频段 (0.1 ~ 1 THz), 射频器件的尺寸

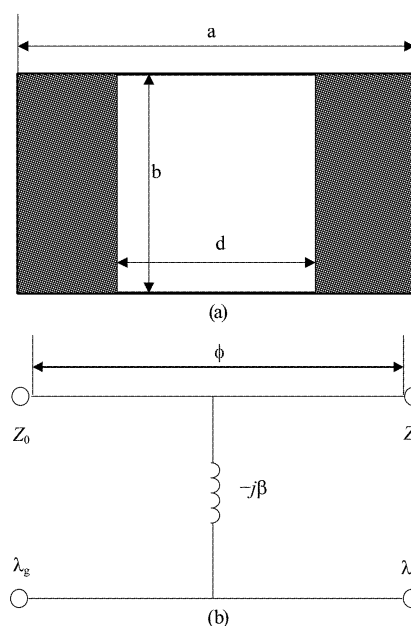


图 1 矩形波导滤波器电感膜片 (a) 截面示意图, (b) 等效电路

Fig. 1 Inductive irises in a rectangular waveguide (a) cross section view of the inductive iris, and (b) an equivalent circuit

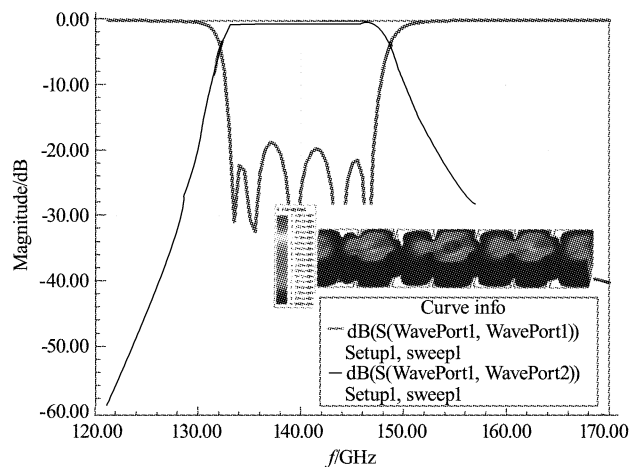


图 2 140 GHz 滤波器 S 参数仿真结果 (镀金厚度 6 μm , 粗糙度 0.5 μm)

Fig. 2 Simulation results of the 140 GHz bandpass filter metalized by a 6 μm -thick gold layer with surface roughness 0.5 μm RMS

缩小到 mm 甚至到 μm 量级,对器件的加工精度提出了更加苛刻的要求. 并且电磁波趋附深度很小 (大约亚 μm 量级), 因此器件表面粗糙度或者金属镀膜质量对射频器件的性能影响将变得更加明显.

2.1 金属镀膜的影响

随着频率的增加电磁波会集中在导体表面一定厚度内进行传输,因此金属镀膜的厚度和粗糙度都会影响到电磁波的传输特性. 在金属表面,电磁波的

趋肤深度可根据式(2)计算得出

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_r\mu_0 f}}, \quad (2)$$

其中, ρ 为导体电导率; μ_0 为自由空间磁导率 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m); μ_r 对于非铁磁材料为 1; f 为工作频率.

在 140 GHz, 金薄膜的趋肤深度大约为 200 nm. 理想情况下, 为了获得 98% 以上信号能量的传输, 金属薄膜的厚度至少为 3δ . 同时, 由于镀膜粗糙度等因素的影响, 可能导致金属表面电阻率提高, 导致能量传输损耗增大. 采用 HFSS 仿真分析膜层厚度和粗糙度对波导滤波器主要性能影响结果如图 3 所示. 当表面粗糙度一定时, 随着金属层厚度增加, 插入损耗降低; 当金属层厚度达到一定值后, 插入损耗不再降低. 粗糙度越小, 插入损耗越小; 但是, 当粗糙度小于趋肤深度 (200 nm) 后, 插入损耗迅速降低. 因此, 我们在腔体内镀金属膜时, 将膜层粗糙度控制在趋肤深度值以下是较为理想的.

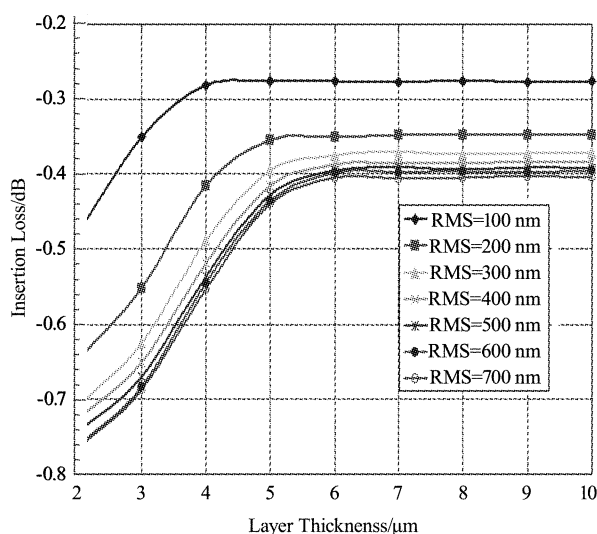


图 3 镀膜厚度和粗糙度对滤波器传输损耗的影响
Fig. 3 Effects of the electroplated layer thickness and roughness on the filter insertion loss

由图 4 仿真结果得出: 滤波器的 Q 值随着金属膜层的厚度增加而增加, 当厚度达到一定值, Q 值趋于恒定 (饱和值).

2.2 膜片厚度的影响

当其他几何尺寸不变时, 膜片厚度的改变将显著影响滤波器的带宽. HFSS 仿真结果如图 5 所示, 当膜片厚度由 0.1 mm 增加大 0.2 mm 时, 滤波器的带宽由 16.6 GHz 减小到 11.2 GHz, 中心频率不变. 同时还可以看出, 隔离度 (S_{11}) 随着膜片厚度增加而减小, 由 -19.2 dB 变为 -14.5 dB. 通带内的插入损

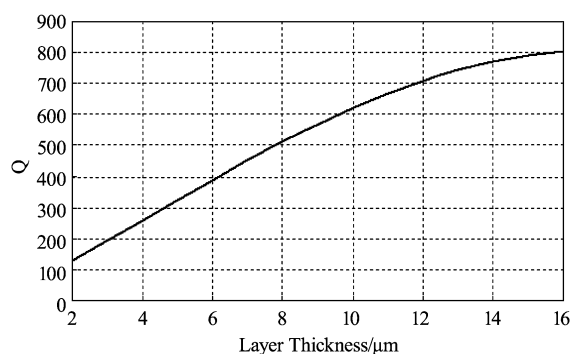


图 4 金属膜厚对滤波器 Q 值的影响
Fig. 4 Effects of the electroplated layer thickness on the filter Q factor

耗 (S_{21}) 也由 -0.4 dB 增加为 -0.6 dB.

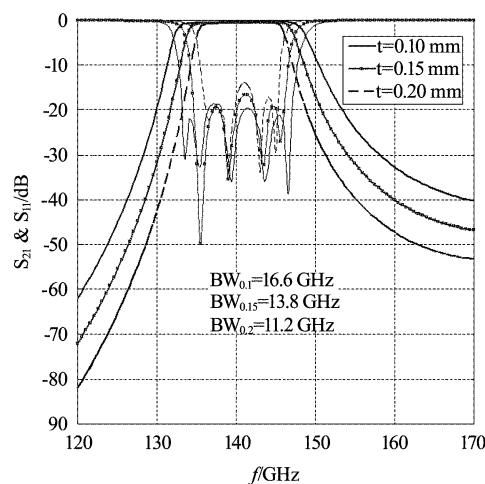


图 5 电感膜片厚度对滤波器 S 参数的影响 (假设谐振腔长度不受影响)
Fig. 5 Effects of iris thickness on the S parameters (Supposing the lengths of resonate cavities are unaltered in HFSS simulations)

3 制造

首先, 在厚度为 0.825 mm 的硅基片上, 采用 ICP 刻蚀机刻蚀出图形结构, 再通过溅射一层 0.4 μm 厚度的 Cr/Au 作为种子层, 然后电镀一层 5 ~ 8 μm 后的 Au, 电镀金属层的厚度是电磁波对金属表面趋肤深度的 20 ~ 40 倍. 最后采用 Au-Si 共晶键合技术键合一镀有 Au 层的玻璃盖板, 形成内部完全金属化的波导结构, 基本加工流程如图 6 所示.

太赫兹滤波器要求的刻蚀深度大, 四面封闭, 内部金属化等特点, 与一般的体微加工工艺比较, 有一定特殊性和难度, 关键工艺技术有硅深槽刻蚀、腔体内部金属化和三层键合工艺.

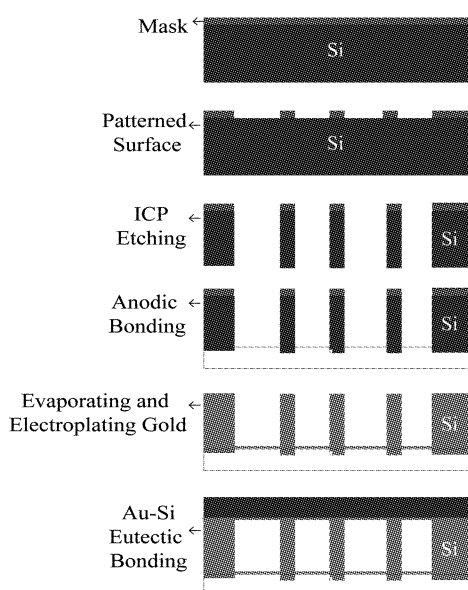


图6 滤波器微制造工艺流程

Fig. 6 MEMS fabrication processes of the waveguide filter

ICP 深刻过程是加工这种 D 波段波导滤波器的关键环节. 由于受微波器件尺度效应的影响, 波导的刻蚀深度为 0.825 mm, 而膜片的厚度只有 0.1 ~ 0.3 mm, 对 MEMS 加工提出很大的挑战. ICP 深刻技术可以获得较大的深宽比 ($>20:1$)、较大的绝对刻蚀深度 (~ 1 mm) 和较好的陡直度 ($>89^\circ$), 但是加工粗糙度较大. 通过工艺优化, 合理的设定工艺参数可以获得比较理想的效果, 如图 7 所示. 为了获得较大的刻蚀深度和陡直度, 需要迫切解决掩模的选择和横向腐蚀的控制两个关键问题. 试验表明, 大于 $3 \mu\text{m}$ 的热氧化硅或 $0.5 \mu\text{m}$ 厚度金属铝膜可以满足刻蚀硅通孔的要求. 同时, 深槽刻蚀需要提高刻蚀速率以满足刻蚀大于 0.825 mm 深度的要求.

4 测试

由于测试条件限制, 采用了一种相对简单的射频功率法, 滤波器装配于如图 8 所示的标准夹具中. 滤波器输入端为倍频后信号源 (FES-06), 在 8 dBm 本振频率下 RF 输出功率为 -3 dBm, 频率范围 120 ~ 170 GHz; 滤波器输出端与功率计 (Erickson PM-4) 连接, 从而获得滤波器的衰减性能. 测试加工的滤波器样品如图 9 所示. 测试结果为带内衰减约 0.4 ~ 0.7 dB, 中心频率为 (140 ± 3) GHz, 带宽误差小于 10%, 矩形系数小于 2, 其中一个样品的功率传输特性曲线见图 10. 测试结果显示, 加工的滤波器样品能够满足实际应用的要求.

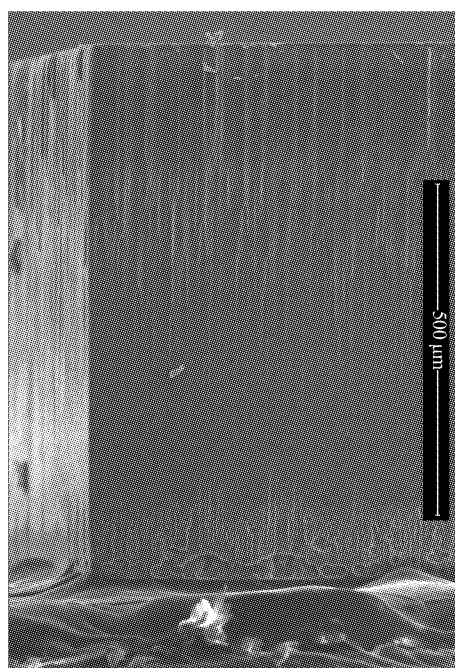


图7 ICP 刻蚀硅的侧壁 SEM 照片

Fig. 7 SEM of ICP etched silicon sidewall

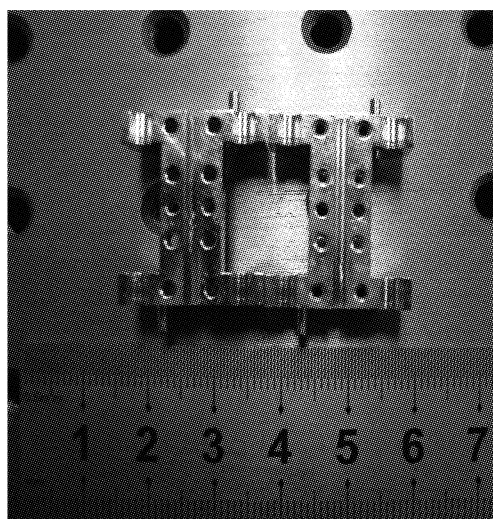


图8 滤波器夹具 (标准法兰接口 WR-06)

Fig. 8 A photograph of the test fixture for the filter

5 结论

矩形波导电感膜片滤波器主要性能与金属镀膜的厚度、粗糙度以及感性膜片厚度都有影响. 金属镀膜厚度越大, 损耗越小, 增大到一定厚度后, 损耗不变. 粗糙度越大, 插入损耗越大; 但当粗糙度小于趋附深度 (210 nm) 时, 插入损耗显著减小. 膜片的厚度越大, 带宽越小, 且插入损耗会有所增加. 采用 MEMS 深刻蚀技术 (DRIE) 首次加工出了 140 GHz 矩形波导滤波器. 测试结果显示, 滤波器的插入损耗

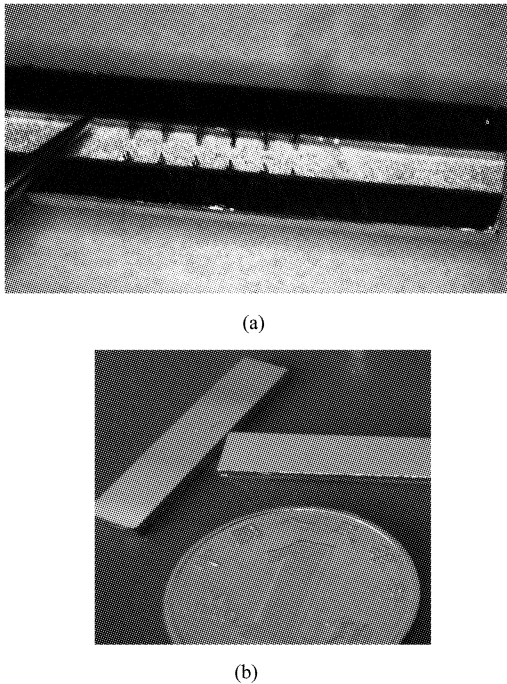


图9 滤波器样品 (a)内部结构, (b)成品
Fig. 9 Photographs of the filter prototypes (a) inner structure, (b) packaged filters

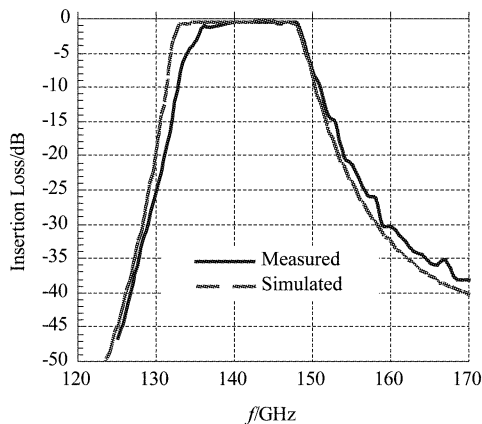


图10 140 GHz 滤波器样品功率衰减特性测试结果
Fig. 10 The characteristic curves of power attenuation of the 140GHz filter prototypes

小于 1 dB,带宽误差小于 10%,能够满足实际应用需求。DRIE 技术可以获得较深的刻蚀深度 (≥ 0.8 mm),刻蚀壁陡直度很好 ($> 89^\circ$)。因此,可以证明 DRIE 技术是解决亚毫米波段射频器件制造的有效方法。由于 DRIE 技术的工艺特点,刻蚀壁表面粗

糙度较大,因此通过优化工艺参数和后期处理降低滤波器内部表面粗糙度将是重点问题之一。

REFERENCES

- [1] Sammoura F, Cai Y, Chi CY, *et al.* A micromachined W-band iris filter[C]. In *Transducers 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Technical Papers Digest*, 2005, Seoul Korea: [s. n.], 2005:1067 - 1070.
- [2] Sammoura F, Fuh Y K, Lin LW. Micromachined plastic W-band bandpass filters [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2008, **147**(1): 47 - 51.
- [3] Sammoura F, Lin LW. A plastic W-band MEMS tunable filter[C]. In *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2006, San Francisco, CA: IEEE, 2006:136 - 139.
- [4] Ismail A, Raja Abdullah R S A. Micromachined W-band integrated rectangular waveguide filter utilising SU-8 [J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2007, **4**(2):1 - 4.
- [5] LIU Guo-Guo, WEI Ke, HUANG Jun, *et al.* AlGaIn/GaN HEMT with 200 GHz f_{max} on sapphire substrate with InGaIn back-barrier [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘果果, 魏珂, 黄俊, 等. 最大振荡频率为 200 GHz 的蓝宝石衬底 Al-GaN/GaN HEMT. *红外与毫米波学*), 2011, **30**(4):289 - 292.
- [6] Sangsub S, Seo K S. A W-band air-cavity filter integrated on a thin-film substrate[J]. *Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, **19**(4):200 - 202.
- [7] Yoo C, Maeng J, Cheon N, *et al.* W-band compact bandpass filters on thin-film substrate[J]. *Microwave and Optical Technol. Lett.*, 2010, **52**(3): 750 - 753.
- [8] Maeng J, Jeon N, Song S, *et al.* W-band cross-coupled filters and a duplexer on a thin-film substrate for low-cost front-end integration[C]. In *59th IEEE Electron. Compon. Technol. Conf. (ECTC2009)*, 2009, San Francisco, CA: [s. n.], 2009:1594 - 1598.
- [9] Robertson S V, Katehi L P B, Rebeiz G M. W-band microshield low-pass filters [C]. In *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1994: San Diego, CA:IEEE, 2: 625 - 628.
- [10] Robertson S V, Katehi L P B, Rebeiz G M. Micromachined W-band filters [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, **44**(4): 598 - 606.
- [11] Bui L Q, Ball D, Itoh T. Broad-band millimeter-wave e-plane bandpass filter [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1984, **32**(12):1655 - 1658.
- [12] TANG Hong-Jun, HONG Wei. Novel millimeter wave substrate integrated waveguide filter with compact configuration [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (汤红军, 洪伟. 一种紧缩结构的新型毫米波基片集成波导滤波器. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(2):139 - 142.
- [13] Collin R E. *Foundations of microwave engineering* [M], the second edition, McGraw Hill, 1992.