

文章编号: 2095-4980(2022)06-0570-06

## 太赫兹带阻滤波器工艺研究

王 亮<sup>1,2</sup>, 邹睿智<sup>1,2</sup>, 张 娜<sup>\*1,2</sup>

(1.合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009; 2.特种显示技术国家工程实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 以中心工作频率 130 GHz、衰减深度为 -40 dB 的太赫兹带阻滤波器为制备对象, 介绍了其在制备过程中蒸镀、光刻、显影及湿法刻蚀等工艺步骤中的一些技术细节。制备得到的太赫兹滤波器加工误差  $\leq \pm 3 \mu\text{m}$ , 考察了加工误差对滤波器传输性能的影响, 该加工误差在可接受范围。为进一步验证工艺的可靠性, 使用空间测量装置获得了滤波器样品传输性能, 测试结果与设计值吻合度较好。最后, 探讨了本工艺推广至更高频率器件的适用性及需要改进之处。文中介绍的硅基太赫兹器件加工工艺适用于电子器件与光子器件的融合发展。

**关键词:** 太赫兹; 滤波器; 工艺; 传输性能; 加工误差

中图分类号: TN823

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021186

## Investigation on fabrication technology of terahertz bandstop filter

WANG Liang<sup>1,2</sup>, ZOU Ruizhi<sup>1,2</sup>, ZHANG Na<sup>\*1,2</sup>

(1. Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China;

2. National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Hefei Anhui 230009, China)

**Abstract:** The fabrication of a terahertz filter with -40 dB attenuation depth at the resonant frequency of 130 GHz is presented, while some technical details during the procedures of evaporation, lithography, development and wet etching are introduced. The error of the fabricated filter sample is  $\leq \pm 3 \mu\text{m}$ , which is acceptable by the investigation of the effect of machining errors on transmission characteristics. The measured transmission response of the fabricated sample by employing free space measurement setup is in good agreement with the design, which demonstrates the reliability and robustness of the fabrication technology. Finally, the feasibility and improvements of the presented fabrication technology applied to higher frequency devices are discussed. The presented technology based on silicon substrate is helpful in integration development of electronics devices and photonic devices.

**Keywords:** terahertz; filter; fabrication technology; transmission characteristics; process error

由于兼具微波和光的优点, 太赫兹波在通信、成像、探测等方面具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>。最近十多年, 随着应用技术的研究和发展, 太赫兹器件的需求日益增长。太赫兹器件从作用机理上主要可分为真空电子器件<sup>[4]</sup>、固态器件<sup>[5]</sup>和光子器件<sup>[6]</sup>。无论哪种太赫兹器件, 随着波长减小, 器件尺寸也随之减小至微米、纳米尺度, 传统的机械加工方法在加工精确度及表面粗糙度等方面无法满足要求<sup>[7]</sup>, 因此采用微纳加工工艺制作太赫兹器件成为必然<sup>[8-9]</sup>。采用相应的微纳加工技术制作出所设计的太赫兹器件成为影响太赫兹技术发展的重要因素, 因此工艺方面的探索与研究日益受到重视。一般来说, 基底为金属的真空电子器件由于其结构的高深宽比特征, 其微加工工艺选用紫外光刻(Ultraviolet, Lithographie, Galvanoformung and Abformung, UV-LIGA)方法<sup>[10-11]</sup>或深离子反应刻蚀技术<sup>[12]</sup>。而固态器件和光子器件的基底材料一般为非金属硅或玻璃, 二者的加工工艺相较于真空电子器件的工艺有所不同且更为繁琐, 需要根据结构和材料灵活采用不同工艺步骤的组合进行制备。由于微细加工过程中的影响因素较多, 需对各种因素进行较为详细的探究才能制备出较好工艺效果的样品。此外, 电子学范畴的固态器件与光子学范畴的光子器件逐渐有融合发展之势<sup>[13]</sup>, 因此研究适合这两种器件加工的通用共容工艺不仅可以满足目前太赫兹器件制作的需求, 而且对未来电子学与光子学器件的单片集成<sup>[14]</sup>及系统封装<sup>[15]</sup>有探索借鉴的意义。

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-06-10

\*通信作者: 张 娜 email:nazhang@mail.hfut.edu.cn.

本文介绍了基底为石英玻璃的 130 GHz 带阻滤波器的加工工艺，该工艺面向硅基器件，兼容固态器件，可以满足固态微电子器件与光子器件的集成制造。文中以其加工过程为研究载体，探讨了各工艺步骤中的主要影响因素，并进一步验证了该工艺的可靠性。

### 1 滤波器结构

首先简要介绍一下太赫兹带阻滤波器的设计。作为周期性的阵列结构，频率选择表面是一种空间滤波器。频率选择表面主要可分为金属贴片型和金属缝隙型两种<sup>[16]</sup>，可分别作为带阻型滤波器和带通型滤波器。基于经典的方环贴片金属结构<sup>[17-18]</sup>，设计了本文工作中的太赫兹带阻滤波器，其由两层结构组成，即表面的周期性金属图案层和底部的介质层，如图 1 所示。周期性金属图案层的单元结构为具有 4 个齿牙的齿轮形，如图 1(a)所示，其中，相邻齿轮形单元之间的间距为  $d$ ，齿轮的内径和外径分别为  $r$  和  $R$ ，齿牙的宽度和长度分别为  $W$  和  $L$ 。金属图案层和介质层的材料分别选用铜和损耗较小的石英玻璃。铜的电导率和石英玻璃的介电常数分别为  $5.8 \times 10^7$  S/m 和 3.78。

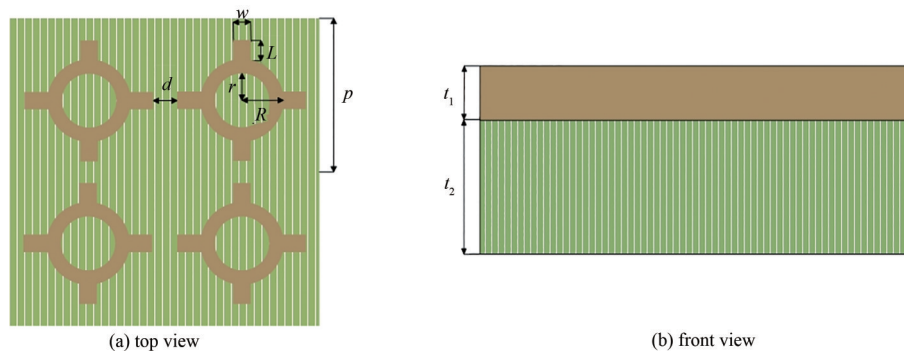


Fig.1 Geometry of the proposed terahertz bandstop filter  
图1 太赫兹带阻滤波器结构示意图

通过优化设计，最终确定该太赫兹滤波器的结构参数为： $p=500 \mu\text{m}$ ， $R=220 \mu\text{m}$ ， $W=30 \mu\text{m}$ ， $L=20 \mu\text{m}$ ， $d=10 \mu\text{m}$ 。频率响应特性为：谐振频率为 131 GHz，该处衰减深度为 -40 dB，相对带宽约为 12%。

### 2 工艺实验及优化研究

根据所设计的太赫兹滤波器的结构及材料组成，确定其加工工艺流程，如图 2 所示。a) 选取抛光且耐高温的 4 cm×4 cm 的石英玻璃片，依次使用丙酮、乙醇和纯水对其进行超声清洗，然后用氮气吹干玻璃片两面，烘干、冷却后得到如图 2(a)所示的洁净基片；b) 把基片放进蒸镀机内，抽真空后开始蒸镀，使其表面沉积 600 nm 厚的金属层，如图 2(b)所示；c) 接着在覆盖有金属层的基片上均匀涂覆一层 10 μm 厚的正性光刻胶 AZ4562，并进行前烘与冷却，如图 2(c)所示；d) 用无掩模光刻机载入图案光刻、显影，如图 2(d)所示；e) 配制金属刻蚀液，刻蚀显露出来的金属，如图 2(e)所示；f) 利用去胶剂去除样品光刻过程中未被刻蚀的光刻胶，得到加工的样品，如图 2(f)所示。下面按照流程顺序介绍一些关键技术细节。

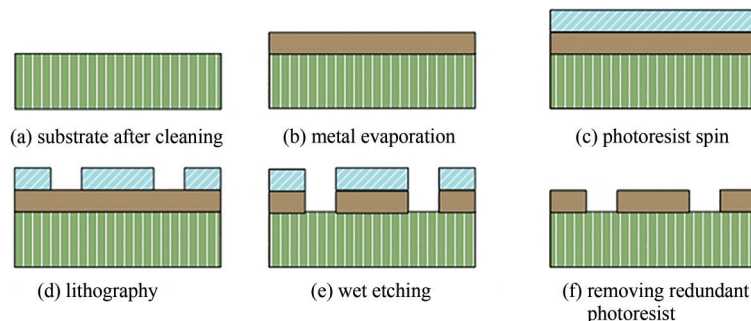


Fig.2 Schematic diagram of microfabrication steps of the terahertz filter  
图2 太赫兹滤波器加工工艺流程

工艺实验中，根据基片大小和金属层的厚度计算出所需铜金属的质量。称取质量约为 1 g 的铜置于蒸镀室的钨舟中心，蒸镀完成后可得到 600 nm 厚的铜层。需指出的是，必须保证钨舟中心的铜全部蒸发完成，使基片上

的铜金属层厚度达到预期的厚度。此外，还需保证选用铜的纯度和蒸镀室的真空度，以确保获得均匀的、质量较好的铜沉积层。图 3 为蒸镀后光滑铜表面的工艺效果与有凸出铜颗粒的效果对比。

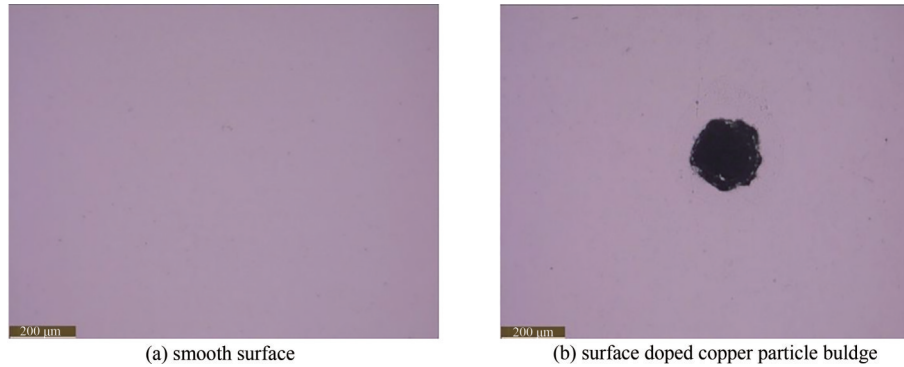


Fig.3 Different surface conditions after evaporation

图 3 蒸镀后不同的表面效果

涂覆光刻胶的目的是为了获得厚度均匀、无缺陷的胶膜。这与旋涂速度、加速度以及旋涂时间有关，也与旋涂的光刻胶的粘稠度有关。本工艺使用正性光刻胶，以 3 500 rpm 的速度旋涂 60 s 后，可得到 10 μm 厚的均匀胶膜。此外，在旋涂前，最好把适量的待旋涂光刻胶置于基片中心位置，这样有利于获得更均匀的胶膜。图 4 为均匀胶膜和不均匀胶膜的微观形貌对比。

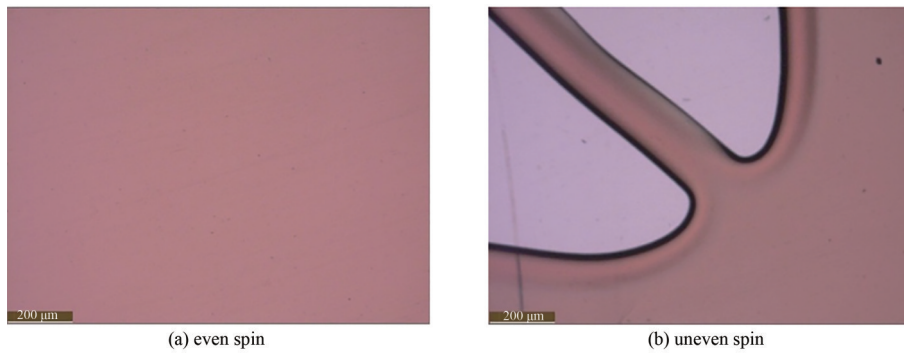


Fig.4 Different results of photoresist spin

图 4 光刻胶旋涂效果

在光刻过程中需注意曝光剂量的选用。本文使用海德堡无掩模光刻机 MLA100，采用 300~1 200 mJ/cm<sup>2</sup> 的不同曝光强度，分别对多份基片曝光，根据曝光效果确定最佳曝光强度为 700 mJ/cm<sup>2</sup>。在显影过程中需控制显影液浓度及显影时间，由于所使用显影液为 AZ400K，其化学成分为硼酸钾，浓度为 15%，该浓度太大，显影液需稀释，否则其会腐蚀掉未曝光的胶膜。经过实验摸索，确定浓度为 2.14% 的硼酸钾水溶液效果较佳，即在 100 ml 的 AZ400K 显影液中加 600 ml 水；确定较佳的显影时间为 9 min 20 s。图 5 为完全显影与未完全显影的对比，其中未完全显影的显影时间为 8 min 40 s。将图 5 中的两幅图片对比后，可以清楚地看到，图 5(b) 中显示有一层光刻胶膜在其表面没有完全去除。

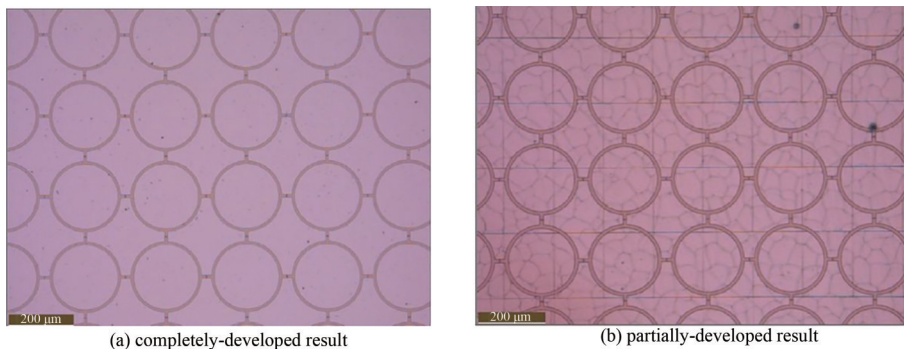


Fig.5 Different developing results

图 5 显影效果对比

在湿法刻蚀工艺步骤中，使用刻蚀溶液将未被光刻胶覆盖的铜金属层溶解掉以形成所需要的金属图案。因此，刻蚀液不能与光刻胶发生反应。经过实验探索，将基片放入浓度为8%的过硫酸铵溶液中，铜金属层与胶膜均被刻蚀，如图6所示。经工艺研究，确定最终的刻蚀液配比为：1 g 草酸铵、1.66 g 甘氨酸、0.005 g 十二烷基苯磺、1 ml 30% 浓度的双氧水加 100 ml 水溶液；使用该刻蚀液最佳的刻蚀时间为 10 min。刻蚀完成后，用丙酮去除多余光刻胶。

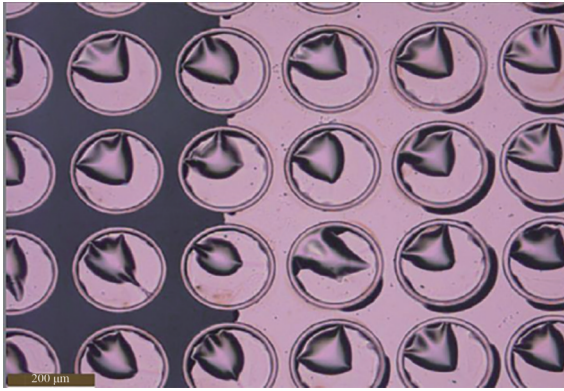


Fig.6 Etching result of substrate in ammonium persulfate etching solution  
图6 过硫酸铵刻蚀液中基片刻蚀效果

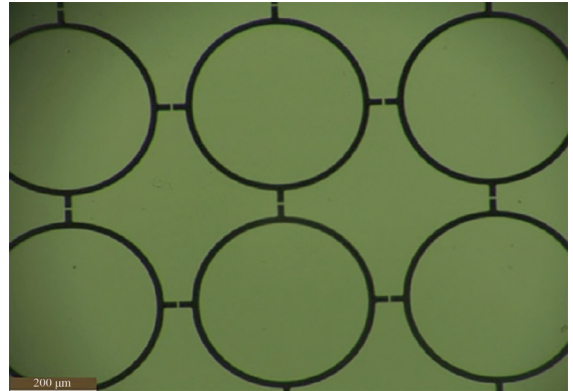


Fig.7 Micromorphology of the fabricated filter sample  
图7 滤波器样品的微观形貌

### 3 工艺评价

使用上述优化后的工艺参数，可以获得效果较好的滤波器样品。使用金相显微镜可观察其表面形貌，如图7所示。从图7中可以看到，样品表面洁净，无光刻胶或多余杂质残留。使用金相显微镜和激光共聚焦显微镜测量了多个效果较好的滤波器加工样品的结构尺寸参数，加工误差 $\leq \pm 3 \mu\text{m}$ 。

为进一步验证该工艺的可靠性，研究工艺误差对滤波器频率响应特性的影响，以最大加工误差 $\leq \pm 5 \mu\text{m}$ (实际测量加工误差为 $\leq \pm 3 \mu\text{m}$ )分别考察了各结构参数对传输性能的影响。图8为最大间距 $d$ 、齿轮外径 $R$ 和齿牙宽度 $W$ 对传输性能的影响。从图8中可以看到，间隙 $d$ 、外半径 $R$ 以及齿牙宽度 $W$ 等结构参数相对于每个参数的最佳值增大或减小 $5 \mu\text{m}$ 时，该带阻滤波器的谐振频率、谐振深度及带宽等性能的变化不大。本工艺的误差比所考察的误差还要小，因此本工艺的加工精确度在可接受范围。

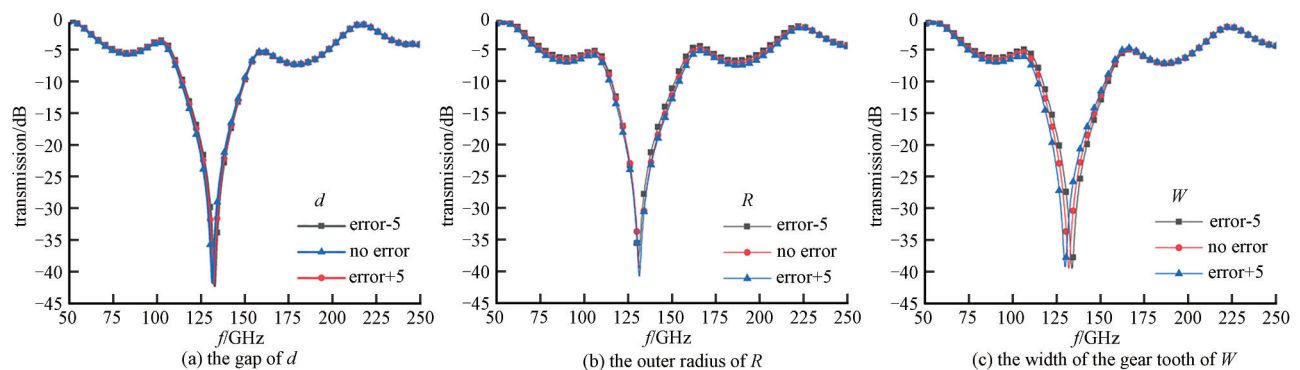


Fig.8 Numerical study of the errors of the geometry parameters  
图8 各项结构参数的加工误差对滤波器性能的影响

使用自由空间测试装置，如图9所示，获得了滤波器样品的传输响应特性。该装置主要包括安捷伦N5224A型矢量网络分析仪、VDI射频收发模块、发射和接收天线、伸缩支架以及光学透镜等。矢量网络分析仪两端口连接VDI射频收发模块，模块的收发接口连接天线，将收发模块置于可调高度伸缩支架上，以便于调整光路使之保持在同一水平线上，两对透镜构成的光路可起到聚焦波束、减少边缘效应引起的测量误差的作用。测试结果如图10所示。图中测试结果与设计仿真结果呈现较好的一致性，较好地验证了加工工艺的可靠性。

本文中太赫兹滤波器的尺寸在百微米量级，加工误差 $\leq \pm 3 \mu\text{m}$ ，对器件性能影响不大。下面讨论将相关设计方案和工艺拓展至更高频率0.22 THz, 0.35 THz, 1.0 THz应用所面临的适用性问题。将本工艺用于0.22 THz或0.35 THz的器件时，由于器件的总体尺寸与加工误差相比还是很大的，因此仍适用；但当本工艺用于1 THz的器

件时, 由于加工误差与器件总体尺寸已经在一个数量级, 因此本工艺已不适用于 1 THz 的器件。本工艺中对加工误差起较大作用的是光刻工艺, 因此需要提高光刻工艺的精确度, 可使用具有更高加工精确度的 LIGA 光刻工艺取代本工艺所使用的紫外光刻工艺。

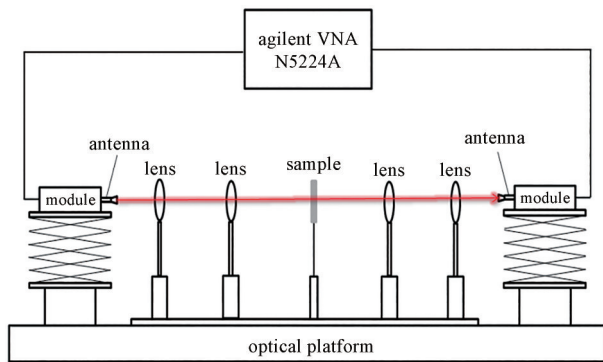


Fig.9 Schematic of free space measurement setup  
图9 自由空间测试装置示意图

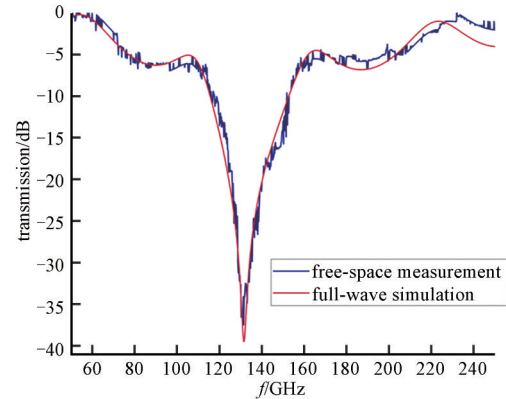


Fig.10 Measured and simulated transmission response of the fabricated sample  
图10 制备的样品的实测和仿真传输响应

#### 4 结论

本文介绍了制备中心频率 130 GHz、谐振深度 -40 dB 的太赫兹带阻滤波器的加工工艺, 较为详细地探讨了蒸镀、光刻、显影及湿法刻蚀工艺步骤中的一些值得注意的技术细节。确定了得到较佳工艺效果的实验参数: 以 3 500 rpm 的速度旋涂 60 s 可获得 10  $\mu\text{m}$  厚的均匀胶膜; 最佳曝光强度为 700  $\text{mJ}/\text{cm}^2$ , 使用浓度 2.14% 的硼酸钾水溶液显影 9 min 20 s 效果最佳; 最佳的刻蚀时间为 10 min。制备的滤波器样品的最大加工误差为  $\leq \pm 3 \mu\text{m}$ , 该误差对滤波器性能的影响基本可以忽略。使用空间测量装置, 得到了该滤波器样品的实测结果与仿真结果一致性较好, 验证了本工艺的可靠性。在本工作基础上, 下一步将展开在同一基片上太赫兹滤波器与光子器件的集成制作。

#### 参考文献:

- [1] 刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(5): 481-486. (LIU Shenggang, ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and its applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(5): 481-486.)
- [2] 廖复疆. 真空电子器件在 100 GHz 以上频段的应用[J]. 真空电子技术, 2011(5): 50-53. (LIAO Fujiang. Vacuum electron device application at frequency above 100 GHz[J]. Journal of Vacuum Electronics, 2011(5): 50-53.)
- [3] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [4] DAVID J F, DURAND A J, MINEO M, et al. Design of a terahertz cascade backward wave amplifier[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(6): 1715-1720.
- [5] GRZYB J, HEINEMANN, PFEIFFER U R. Solid-state terahertz superresolution imaging device in 130 nm SiGe BiCMOS technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2017, 65(11): 4357-4372.
- [6] BURFORD N M, EVANS M J, EI-SHENAWEE M O. Plasmonic nanodisk thin-film terahertz photoconductive antenna[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(2): 237-247.
- [7] IVES R L. Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(3): 1277-1291.
- [8] OBERHAMMER J. THz MEMS-micromachining enabling new solutions at millimeter and submillimeter-wave frequencies[C]// 2016 Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) & ESA Workshop on Millimetre-Wave Technology and Applications. Espoo, Finland: IEEE, 2017: 81-84.
- [9] ZHUANG J, HAO Z, HONG W. Silicon micromachined terahertz bandpass filter with elliptic cavities[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(6): 1040-1047.
- [10] JOYE C D, COOK A M, CALAME J P, et al. Demonstration of a high power, wideband 220-GHz traveling wave amplifier fabricated by UV-LIGA[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(6): 1672-1678.

(下转第 589 页)

- hopping frequency synthesizer[D]. Hangzhou,China: University of Electronic Science and Technology of Hangzhou, 2016.)
- [7] 胥鑫. 微波毫米波雷达频率源关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015. (XU Xin. Study on microwave and millimeterwave radar frequency synthesizer[D]. Chengdu,China: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.)
- [8] 刘飞,张竺君. 高阶 Chebyshev 低通滤波器的快速设计[J]. 黑龙江科技信息, 2012(18):15-16. (LIU Fei,ZHANG Zhujun. A quick design method provided for the high order Chebyshev low pass filter[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(18):15-16.)

#### 作者简介:

王玉江(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事雷达系统射频电路设计 .email:1522916824@qq.com.

(上接第 574 页)

- [11] JOYE C D,CALAME J P,GARYEN M,et al. UV-LIGA microfabrication of 220 GHz sheet beam amplifier gratings with SU-8 photoresists[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010(20):1-13.
- [12] SHIN Y M,BARNETT L R,GAMZINA D,et al. Terahertz vacuum electronics circuits fabricated by UV lithographic molding and deep reactive ion etching[J]. Applied Physics Letters, 2009,95(18):181505.
- [13] MASHANOVICH G Z. Electronics and photonics united[J]. Nature, 2018(556):316-318.
- [14] ATABAKI A H,MOAZENI S,PAVANELLO F,et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip[J]. Nature, 2018(556):349-354.
- [15] SONG H. Packages for terahertz electronics[J]. Proceedings of the IEEE, 2017,105(6):1121-1138.
- [16] MUNK B A. Frequency selective surfaces-theory and design[M]. New York,NY,USA:Wiley, 2000.
- [17] BARRERA M A R,CARPES W P. Bandwidth for the equivalent circuit model in square-loop frequency selective surfaces[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017,65(11):5932-5939.
- [18] FERREIRA D,RAFAEL F S,CUINAS I,et al. Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(9):3947-3955.

#### 作者简介:

王亮(1994-), 男, 安徽省亳州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波及太赫兹器件 .email:wangliang111@mail.hfut.edu.cn.

张娜(1995-), 女, 安徽省安庆市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波及太赫兹器件.

邹睿智(1996-), 男, 江西省九江市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波及太赫兹器件.