

毫米波亚毫米波波导类组件制造工艺进展

刘兰波 李源 柴艳红 朱士琦 孙瑞峰

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

文 摘 综述了毫米波亚毫米波波导类组件制造工艺的国内外最新研究进展,将当前最主要采用的制造工艺进行了分类阐述,包括机械加工改进与数控超精密工艺、电化学工艺、微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)工艺、高能束流工艺、3D增材制造工艺。介绍了各分类工艺应用中最新进展的典型成果,讨论了其工艺方法的优势与局限性,并依据波导类产品的应用需求对其工艺研究与发展的趋势开展了分析。结合毫米波亚毫米波波导类产品的应用场景与相关产品未来的发展趋势,进一步提出了各分类工艺在该领域未来可能的发展方向。

关键词 制造工艺,波导组件,毫米波亚毫米波

中图分类号:TN 814

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.Z1.003

Progress in the Manufacturing Process of Millimeter-wave and Submillimeter-wave Waveguide Components

LIU Lanbo LI Yuan CHAI Yanhong ZHU Shiqi SUN Ruifeng

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract This paper reviews the latest domestic and overseas developments in the manufacturing process of millimeter-wave and submillimeter-wave waveguide components, and classifies and elaborates the most adopted processes, including machining improvement and CNC ultra-precision process, electro-chemical process, micro-electro-mechanical system (MEMS) process, high energy beam process, and 3D additive manufacturing process. The typical results of the latest progress in the application of the processes are introduced, and the advantages and limitations of the process methods are discussed. According to the application requirements of waveguide products, the trend of the process research and development is analyzed. Combining the application scenarios and the future development trend of millimeter-wave and submillimeter-wave waveguide products, the possible future development direction of each classified process in this field is proposed.

Key words Manufacturing process, Waveguide components, Millimeter-wave and submillimeter-wave

0 引言

随着探测技术、通信技术的发展与需求提升,传统拥挤密集使用的低频谱资源已经很难再满足探测性能拓展与通讯带宽增长的需求,而丰富的毫米波亚毫米波频谱资源则得到了更多的重视与发展。毫米波亚毫米波通常分别认定为30~300 GHz与0.3~3 THz频段,其工作波长为1~10 mm与0.1~1 mm段。在该频段利用大气窗口(35、94、140和220 GHz)可以实现大容量的卫星-地面通信或者地面中继通信^[1]。毫米波在确定的天线物理尺寸下,较高的基频可以引起较宽的通讯带宽,同时增强通讯的保密性,其更

窄波束,更高角精度,更低旁瓣性能则可以实现低仰角精密跟踪雷达和成像雷达。高分辨率的毫米波亚毫米波辐射计已经广泛应用于气象、深空的探测研究中。毫米波亚毫米波频谱资源的广泛应用也催生着其器件产品的需求不断提升。毫米波亚毫米波因其波长较短,随着波长的减小相关器件尺寸也随之减小,其加工精度要求则不断提高。各类波导类产品,其在产品中起到电磁波传输的作用,根据结构、机构以及应用需求,会做成各种简单或复杂结构,例如旋转关节的内腔波导,各类多次弯折波导,扭波导。同时各类波导衍生器件类型丰富,例如矩/

收稿日期:2021-08-16

基金项目:上海市青年科技英才扬帆计划资助项目(21YF1417300)

第一作者简介:刘兰波,1984年出生,高级工程师,研究方向为航空航天精密制造与装配技术。E-mail:liulanbo2010@163.com

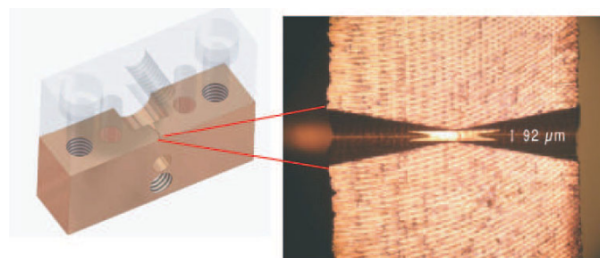
方圆转换波导、缝隙阵波导、双/多工器、滤波器、极化分离器、耦合器、馈源喇叭等,其表面与内腔结构类型复杂,也大大增加了该类产品的制造难度。

早在20世纪70年代,当前波导类组件主要使用的制造工艺多数已经在国外毫米波波导器件制造中得到研究,主要包括:机械加工、电铸、光刻腐蚀、多刀插制、电火花加工、压制阴模等方法^[2]。随着众多国内外研究者展开了大量的研究,这些传统方法技术与工艺得到了长足的改进,其中部分工艺甚至已经应用到了亚毫米波波导的制造中。而一些新的工艺与技术,例如高能束流直写技术、基于光刻的MEMS体硅与表面硅技术、3D增材制造技术等,也被研究者们引入到了毫米波亚毫米波波导类组件的制造应用研究中。本文重点阐述了各类毫米波亚毫米波波导类组件制造工艺的早期工作与最新进展,拟为各频段波导产品的结构设计与工艺设计选择提供指导与借鉴作用。

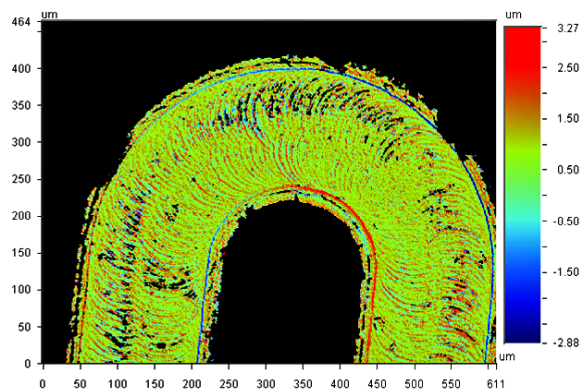
1 机械加工改进与数控超精密加工

机械加工是最常用的波导精密结构与复杂产品制造方法,采用数控技术可以按照精确尺寸进行产品复制与批量加工。然而随着频段提升,组件产品尺寸变小、精度增高、组件趋于集成化,结构趋于复杂,加工难度大幅增大。一种典型的改进为将复杂的结构改为多部分易加工的局部结构,然后通过装配与焊接成型的模式。北京航空航天大学苗俊刚团队通过软件将短毫米波矩圆过渡波导与波纹喇叭分解为系列薄片,通过薄片加工与紧固件装配规避了复杂过渡内腔的直接加工^[3-4],该方法将内腔微结构的加工难度转移至了精密装配角度,已经成为了高频器件精密制造发展的重要方向。针对小口径扭转波导,南京电子技术研究所从填充材料、真空退火工艺、保温时间等参数开展系列研究减小拐弯的口径变换^[5],西南电子技术研究所则引入了仿真物理模型进行工艺参数的优化确保其内腔几何精度尺寸的一致性^[6]。在针对数控微径铣到加工与高精度CNC的应用研究中,国内因受到一系列高端精密加工设备的国际封锁与国内设备与国外的差距,主要的研究方向集中在了对加工中的工艺流程、工装夹具、加工参数、有限元仿真、后处理模式等研究。南京航空航天大学、南京理工大学、上海无线电设备研究所、华东电子工程研究所等团队从机床、刀具、工装夹具、数控仿真与优化、工艺流程优化、热处理工艺等方面深入研究,提升了毫米波缝隙波导天线加工精度、减小了毛刺的影响,提升了生产效率^[7-9]。电子测试技术重点实验室采用了0.1 mm的硬质合金整体螺旋铣刀胶成熟地完成0.559 mm×0.279 mm截

面的0.5 THz波导加工^[10]。国外研究机构则利用其超精密数控机床的优势,对一些高频波导器件采用了直接加工的方案。日本国家天文台(NAOJ)的Alvaro Gonzalez及其团队针对ALMA的望远镜的应用需求,设计并通过高精度数控机床加工工艺制作了1.25~1.57 THz光学接收器用的圆型波纹喇叭,其内腔波纹槽宽度仅为0.034 mm^[11]。亚利桑那州立大学的研究者则以其微铣系统与一系列超细铣刀,完成了一系列太赫兹波导器件,其中空间滤波器最窄槽达到1.92 μm,其波导内腔的表面粗糙度可以达到Ra 75 nm(图1)^[12]。如今国内与国际上的数控超精密加工技术仍然存在不小的差距,这使得国内在针对高频高精度的波导类组件的大批量制备仍较为困难,成本也较高。而波导组件机械加工的发展趋势必然以更高端的多轴加工中心为基础,以数字化产品模型与工艺模型分析与控制实现产品的高效高精度批量生产。



(a) 超细铣刀加工的空间滤波器窄槽结构



(b) 铣削加工波导内腔的表面粗糙度分布

图1 超细铣刀加工的空间滤波器与加工出的波导腔表面粗糙度情况

Fig. 1 The spatial filter processed by the ultra-fine milling cutter and the surface roughness of the processed waveguide cavity

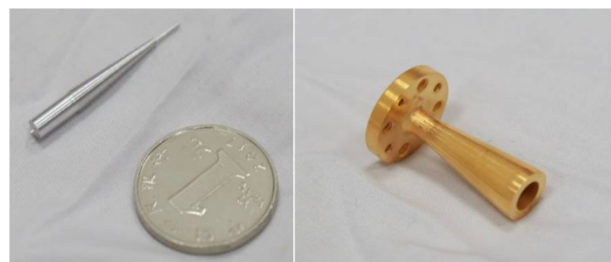
2 电化学方法

线切割、仿形电极电火花加工、电化学腐蚀、精密电铸等工艺是最常用几种高精度波导组件加工的特种工艺电化学方法。国内主要研究单位均从慢走丝的工艺出发提升线切割的精度^[13]。而面向高深宽比的微波

导孔的切割,其主要难题在于线电极的制造与微穿丝孔的制造。西安电子工程研究所研制出 $\Phi 0.3\text{ mm}$ 有效长度4 mm和6 mm的专用铣刀与0.1 mm丝径的线电极加工出 $0.43\text{ mm}\times 0.86\text{ mm}$ 的矩形微型波导腔,尺寸精度在0.01 mm以内^[14]。南京航空航天大学团队则引入了细微电解线切割工艺,其通过电解腐蚀在线制作模式制备出最细 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的线电极,并稳定使用10、20 μm 的钨丝电极进行微结构加工^[15]。仿形电极加工则避免了微通孔加工与穿丝的工艺难点,但其仍需要预加工的微孔,其电极的材料选择与加工精度则是其中的关键。南昌大学团队针对难加工的紫铜材料采用了纯钨棒线扁头作为电极,加工误差不超过10 μm ,表面粗糙度 $Ra 0.4\text{ }\mu\text{m}$ ^[16]。线电极与仿形电极加工方法其本身电极的材料及其在加工中的材料放电与腐蚀损耗限制了其向着更高的精度发展。

精密电铸可以以非常高的复制精度完全复制芯模形状与尺寸,是国内外加工复杂微结构内腔的主要工艺。上海航天电子技术研究所采用电解线切割加工芯模与精密电铸工艺,制造出425 GHz波纹馈源喇叭(图2)^[17]。南京航空航天大学则通过多次微电铸与选择性溶解制造了 $254\text{ }\mu\text{m}\times 127\text{ }\mu\text{m}$ 的矩形波导管,尺寸偏差低于3 μm , $Ra < 0.4\text{ }\mu\text{m}$ ^[18]。国际上精密数控机床加工芯模、精密电铸与芯模牺牲法是最主要的微波波导腔与高频波纹馈源喇叭的制造方法,英国

TK公司与德国RPG公司均采用该方法可以批量制备出500 GHz以上的波导组件。

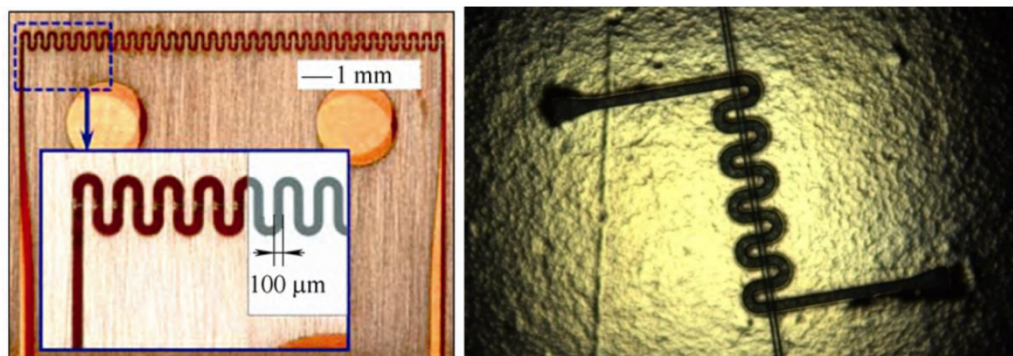


(a) 太赫兹波纹喇叭芯模 (b) 太赫兹波纹喇叭产品

图2 电解线切割制备的太赫兹波纹喇叭芯模与精密电铸制备的波纹喇叭产品

Fig. 2 The mandrel of THz corrugated horn produced by electrolytic wire cutting and the corrugated horn fabricated by precision electroforming

UV-LIGA工艺则是将光刻工艺与微电铸相结合,大量的国内外研究者将该工艺应用于太赫兹折叠波导的制造研究中。美国海军研究实验室利用UV-LIGA在铜表面加工得到了 $905\text{ }\mu\text{m}$ 的蛇形折叠波导,并进一步实现了0.22 THz的折叠波导制备^[19-20](图3)。美国加州大学戴维斯分享的研究者利用UV-LIGA加工出了0.22 THz的交错双栅波导慢波结构^[21]。中科院电子系研究所与北京工业大学完成了220 GHz折叠波导的制备^[22-23],上海交通大学进一步实现了1 THz的折叠波导的突破^[24](图3)。



(a) 0.22 THz 折叠波导

(b) 1 THz 折叠波导

图3 UV-LIGA方法制备的0.22 THz与1 THz折叠波导

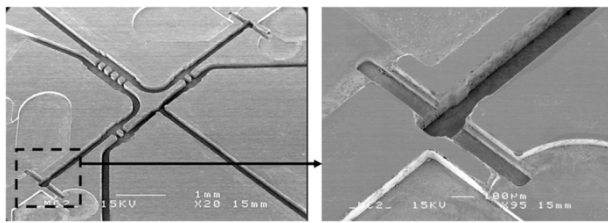
Fig. 3 0.22 THz and 1 THz folded waveguides produced by UV-LIGA method

3 MEMS 工艺

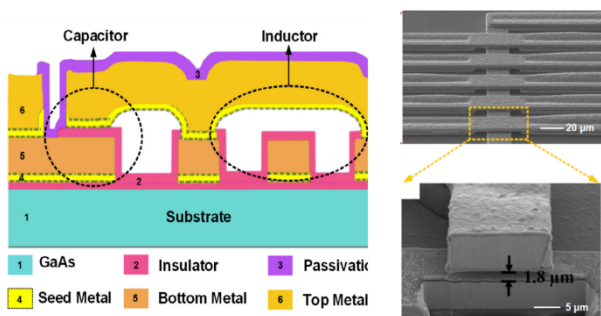
光刻技术通过对正负光刻胶的曝光与显影获得在材料表面一系列光刻胶构成的微结构膜。光刻技术是大量MEMS工艺的基础。早期以光刻显影后形成的结构作为掩膜进行了超薄箔材上的耦合孔与形槽的加工。当前MEMS中的体硅工艺技术与表面硅技术可以通过多次光刻形成多层掩膜,以湿法腐蚀、系列材料沉积工艺、等离子刻蚀工艺及其衍生出的深反应离子刻蚀(DRIE)工艺加工出亚毫米级以及微米级的复杂多层三

维空间结构。但是该系列工艺最大的问题在于其材料选择的局限性,这也成为了许多研究者的重点方向。查默理工大学的学者在光刻显影的微结构上进行金属化处理并开展微电铸,随后将光刻胶作为牺牲层去除,从而获得了原光刻胶结构的微波波导^[25]。更多的学者则选择了在半导体加工出的微结构表面进行高于其频段趋肤深度厚度的金属化处理保障其电性能直接应用于器件中,加州理工的团队则采用DRIE工艺在硅材料上加工出垂直侧壁的波导孔,以溅射方式在波导腔表

面镀上 $2\ \mu\text{m}$ 金层以保障其性能^[26];查默理工大学的团队则是在其加工出的硅基缝隙波导上镀金实现其性能需求^[27];哈尔滨工业大学则是在 GaAs 基底上进行多次等离子辅助沉积、光刻、溅射金属化、反应离子刻蚀等工艺制成了包含多金属层的多材料薄膜层叠的高性能的双工器器件^[28];电子科技大学团队以体硅工艺制备硅微结构薄片,并以硅硅键合形成波导缝隙阵天线,最终在材料表面镀金以实现其性能^[29]。MEMS 工艺的不断发 展推动着波导类组件的集成化以及向高频、超高频方向发展,但其大多成果仍然处于实验室研究阶段,其距离形成量产具有高可靠性的产品仍然需要时间。



(a) 微电铸光刻胶牺牲制备的微波导腔



(b) 多层材料双工器

图4 MEMS工艺制备的微型波导组件

Fig. 4 Micro-waveguide components produced by MEMS process

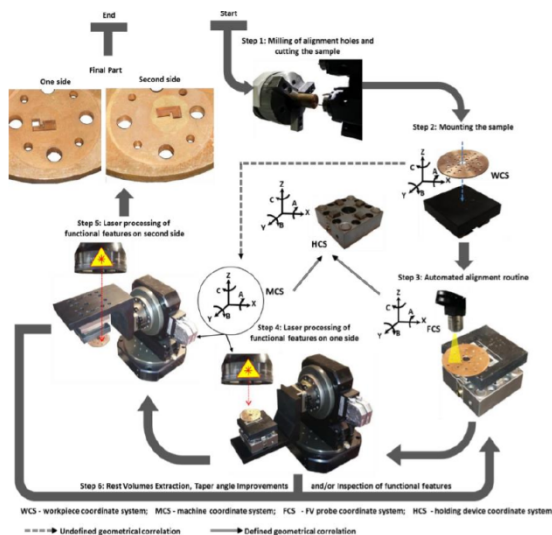


图5 CNC与飞秒激光加工制备THz波导器件流程

Fig. 5 The process flow of CNC and femtosecond laser processing for THz waveguide components

4 高能束流工艺

高能束流工艺依据其束流的种类主要分为激光工艺、粒子束流加工。其主要优势在于以高能束流模拟铣刀在材料表面可以无需掩膜地直写加工微结构,同时其劣势也在于其只能延束流方向在束流的焦点处实现最精确的加工。英国伯明翰大学的研究人员采用传统CNC将THz波导器件中的非功能性部分,如螺丝孔、定位孔等,在采用高精度的飞秒脉冲激光加工出精密的功能性部分,如谐振腔、波导膜片等^[30]。电子束往往在UV-LIGA以及各类光刻工艺中代替X光或者可见光进行更细微的曝光控制,形成更细更精确的掩膜结构,其具有无需制作掩模板的优势,其劣势则是在于曝光效率较低,其焦点与曝光计量的控制较为困难^[23]。

5 3D增材制造方法

3D增材制造方法是区别于减材加工的方法,对复杂内腔微结构的适用性更强,与MEMS工艺类似,也面临材料选择的问题。当前最主要的波导器件3D打印模式分两种,即直接金属材料3D打印与非金属打印后表面金属化处理。都灵理工学院提出了基于激光选区熔融成型的方法在金属粉末上进行逐层高能激光熔合实现了五阶六阶的Ka/Ku低通滤波器复杂内腔的直接成型^[31]。瑞典的查尔姆斯理工大学的团队通过3D金属打印完成了60~90 GHz, 110~170 GHz以及220~325 GHz频段的喇叭产品加工。该团队将60~90 GHz频段的馈源喇叭与其双工器一体打印,避免了后续装配的精度等问题^[32](图6)。

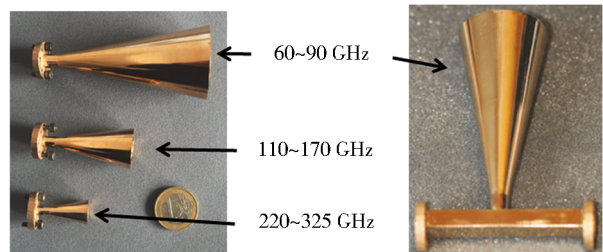


图6 3D金属打印完成的馈源喇叭与喇叭双工器一体加工产品

Fig. 6 3D metal printed feed horn and horn duplexer integrated products

此法的制造精度受到激光束斑尺寸与金属粉末粒径的限制很难达到微米级精度。而精度更高的3D打印采用的是光固化成型或者数字光处理的方法,但其选用的材料常为光敏树脂,无法直接成为器件。北卡罗来纳州立大学针对数字光处理打印波导腔结构的工艺展开了研究,并依此方法实现了四通道混合波导组件的一次成型,产品经过润湿处理、银沉积打底、电镀铜以及银钝化,实现了材料表面约 $5\ \mu\text{m}$ 的金属化镀层,其电导率达到 $1.5 \times 10^7\ \text{S/m}$ 。电子科技大学采用光固化方法以光明树脂材料整体成型制备出Ka与W频段的滤波器,其表面采用镀银工艺保障其性能^[33](图7)。



图7 数字光处理打印制备的四通道混合波导组件

Fig. 7 Four-channel hybrid waveguide printed by digital light processing

6 结语

随着对波导类产品的需求与要求的不断提升,毫米波亚毫米波波导类产品制造工艺的主要发展趋势包括以下几点。

(1)产品的产业化、批量化与经济性。随着商业卫星批量化生产,其中重要部组件的波导产品必然要求其生产的产业化、批量化与经济性。因此更高精度的机械加工与可以低成本批量制造的3D增材制造方法将成为该类产品的主流工艺。而商业卫星的成本较低其寿命需求相对于探测卫星较低,因此在轨寿命较低的3D增材制造中的聚合物材料成型金属化的工艺也会变得更易接受。

(2)产品向更高频段、高精度与高性能发展。随着探测需求的提升,无论是对地的气象探测与深空的探测其需要的探测频段的宽度与高度均要求着波导类器件的精度与性能的提升。在此背景下电化学工艺以及高能束流工艺其高成本、相对长周期的制备变得可以接受。而这些工艺的发展能够较为稳定的制备出较为稳定的金属基材波导类产品,其寿命周期较长。

(3)集成化发展。随着探测特别是通讯类需求的提升,其产品小型化便携化也变为了主要需求之一,而星载产品更是对其质量与体积提出更严的要求。MEMS工艺与3D增材一体成型工艺则是在集成化角度最主要的工艺。

综上所述,随着毫米波亚毫米波波导类组件的制造工艺的需求向着产业化、高精度、集成化制造方向发展,机械加工工艺会向着数控超精密设备研制方向突破封锁,电化学方法则会向着新材料与工艺技术融合的角度发展,MEMS工艺会有更多的产品走向成熟与应用验证,高能束流工艺则是向着He离子束工艺等纳米级直写加工发展,3D增材制造则会进一步普及与成本降低并引入更多的新型材料。

参考文献

[1] IEEE. IEEE standard letter designations for radar-frequency bands [S]. IEEE Std 521-2002(Revision of IEEE Std 521-1984), 2003.

[2] WATSON B K, RICKMAN E J. Production techniques for millimetric waveguide components [J]. *Electronic Engineering*, 1977, 49(594): 41-43.

[3] 苗俊刚, 崔延军, 白冰. 一种短毫米波段波纹喇叭天线: 中国, 200710122346. 9 [P], 2008-08-20.

MIAO Jungang, CUI Yanjun, BAI Bing, Short millimeter band corrugated horn antenna: China, 200710122346. 9 [P], 2008-08-20.

[4] 苗俊刚, 崔延军, 蒋黎丽, 等. 一种新型短毫米波段阶梯矩圆过渡: 中国, 200810118102. 8 [P]. 2009-04-22.

MIAO Jungang, CUI Yanjun, JIANG Lili, et al. Novel short millimeter waveband step moment round transition: China, 200810118102. 8 [P]. 2009-04-22.

[5] 黄峰, 顾琪. 小口径矩形波导管折弯技术[J]. *电子机械工程*, 2011, 27(4): 43-45.

HUANG Feng, GU Qi. Techniques of twisting small-caliber rectangular waveguide tubes [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2011, 27(4): 43-45.

[6] 周宇戈. 毫米波矩形波导空心扭转工艺技术[J]. *电讯技术*, 2006(2): 97-101.

ZHOU Yuge. Hollow twist technology for millimeter wave rectangular wave-guide [J]. *Telecommunication Engineering*, 2006(2): 97-101.

[7] 黄信, 赵立, 陈路, 等. 毫米波天线缝隙阵列板数控加工技术研究[J]. *制导与引信*, 2011, 32(1): 50-54.

HUANG Xin, ZHAO Li, CHEN Lu, et al. Numeric control machining technology research of millimeter wave slot antenna array [J]. *Guidance & Fuze*, 2011, 32(1): 50-54.

[8] 江海东. 波导裂缝天线单元的制造技术研究[J]. *电子工艺技术*, 2008(6): 361-364.

JIANG Haidong. A research on manufacturing technology of the slotted waveguide antenna unit [J]. *Electronic Process Technology*, 2008(6): 361-364.

[9] 倪华昌. 星载某雷达双极化波导缝隙天线结构设计及工艺实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

NI Huachang. Structure design and process realization of dual polarization waveguide slot antenna for a radar on spaceborne [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

[10] 陈学斌, 高石磊, 孙传国, 等. 微径铣刀在太赫兹波导加工中的应用[J]. *微波学报*, 2015(3): 108-111.

CHEN Xuebin, GAO Shilei, SUN Chuanguo, et al. Application of micro-diameter end mill in THz waveguide processing [J]. *Journal of Microwave*, 2015(3): 108-111.

CHEN Xuebing, GAO Shilei, SUN Chuanguo, et al. Application of micro-mill in the processing of terahertz waveguide[J]. *Journal of Microwave*, 2015(3):108-111.

[11] GONZALEZ A, KANEKO K, ASAYAMA S. 1.25-1.57 THz dual-polarization receiver optics based on corrugated horns [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(3): 321-328.

[12] GROPPI C E, LOVE B, UNDERHILL M, et al. Automated CNC Micromachining for Integrated THz Waveguide Circuits [C]// 21st International Symposium on Space Terahertz Technology. 2010:338-341.

[13] 王建华,王明军,范永庆,等,. 天线波导裂缝慢走丝线切割技术研究[J]. *航天制造技术*, 2019(6):51-53.

WANG Jianhua, WANG Mingjun, FAN Yongqing, et al. Study on wire cutting technology for antenna wave-guide seam [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2019(6):51-53.

[14] 徐向阳,汪云虎,薛晓锋,等. 某太赫兹频段波导器件加工工艺[J]. *火控雷达技术*, 2020, 49(1): 70-72+83.

XU Xiangyang, WANG Yunhu, XUE Xiaofeng, et al. Processing technology of a terahertz waveguide device [J]. *Fire Control Radar Technology*, 2020, 49(1): 70-72+83.

[15] 王少华. 微细电解线切割加工技术的试验研究与应用[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.

WANG Shaohua. Research on micro wire electrochemical cutting and its application [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010

[16] 王官明,朱政强,杨亚楠,等. 紫铜波导孔道放电加工[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2019, 41(2): 168-172.

WANG Guanming, ZHU Zhengqiang, YANG Yanan, et al. Electro-discharge machining of pure copper waveguide channels [J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2019, 41(2): 168-172.

[17] 刘兰波,李勇,苏永胜,等. 425GHz高频馈源喇叭精密制造技术研究[C]//航天先进制造技术国际研讨会,2018: 817-825.

LIU Lanbo, LI Yong, SU Yongsheng, et al. Research on Precision manufacture technology of the 425 GHz high frequency corrugated horn [C]//International Symposium on the Advanced Manufacturing Technology for Aerospace Industry, 2018: 817-825.

[18] 戴兴达. 太赫兹矩形波导微腔体电化学加工技术[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.

DAI Xingda. Electrochemical processing technology of terahertz rectangular waveguide micro-cavity [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019

[19] JOYE C D, CALAME J P, NGUYEN K, et al. microfabrication of wideband distributed beamamplifiers at 220 GHz [C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference, Bangalore, 2011: 343-344.

[20] COLIN D J, ALAN M C, JEFFREY P C, 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.

[21] BAIG A, SHIN Y M, BARNETT L R, et al. Design,

fabrication and RF testing of near-THz sheet beam TWTA [J]. *Terahertz Science and Technology*, 2011, 4(4): 181-207.

[22] MA T, Sun J, HAO Bet. al. Microfabrication of folded waveguide using UV-LIGA for 220 GHz traveling wave tube [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 25(2): 024101.

[23] 于森. 0.22THz折叠波导加工工艺的探究[D]. 北京:北京工业大学, 2019.

YU Seng. Research on the processing technic of 0.22THz folded waveguide [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.

[24] 沈亦欢. 太赫兹频率选择表面及折叠波导技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2019.

SHEN Yihuan. A technology research on frequency selective surface and folded waveguide in terahertz band [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[25] DESMARIS V, MELEDIN D, PAVOLOTSKY A, et al. All-metal micromachining for the fabrication of sub-millimetre and THz waveguide components and circuits [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(9): 095004.

[26] JUNG C, LEE C P, THOMAS B, et al. Silicon micromachining technology for THz applications [C]// International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010: 1-3.

[27] RAHIMINEJAD S, ZAMAN A U, PUCCI E, et al. Micromachined ridge gap waveguide and resonator for millimeter-wave applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 186: 264-269.

[28] YU H, WANG C, QIANG T, et al. High performance miniaturized compact diplexer based on optimized integrated passive device fabrication technology [J]. *Solid-State Electronics*, 2019, 160: 107628.

[29] 柏航. 基于微波导的毫米波缝隙阵列天线[D]. 成都:电子科技大学, 2020.

BAI Hang. Millimeter wave slot array antenna based on micro-waveguide [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

[30] PENCHEV P, SHANG X, DIMOV S, et al. Novel manufacturing route for scale up production of terahertz technology devices [J]. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 2016, 4(2): 021002.

[31] CALIGNANO F, PEVERINI O A, ADDAMO G, et al. High-performance microwave waveguide devices produced by laser powder bed fusion process [J]. *Procedia CIRP*, 2019, 79: 85-88.

[32] ZHANG B, CHEN W, WU Y, et al. Review of 3D printed millimeter-wave and terahertz passive devices [J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 2017: 1297931.

[33] 郭诚. 基于3D打印技术和微加工的微波和THz波导器件研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016.

GUO Cheng. Study on novel microwave and terahertz waveguide components based on 3-D printing and micromachining [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016