

太赫兹微金属矩形波导凹型微腔电 化学制造技术研究^{*}

毕晓磊^{1,2,3}, 程雪利^{1,3}

(1. 河南工学院 机械工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 新乡市增材制造工程技术研究中心, 河南 新乡 453003;
3. 河南省机电装备数字化设计与制造工程技术研究中心, 河南 新乡 453003)

摘要:随着太赫兹技术的发展,对高工作频段太赫兹金属矩形波导的需求日益迫切,然而,因其腔体端面尺寸和圆角半径较小、表面粗糙度要求严格,精密加工极具挑战性。文章针对太赫兹微金属矩形波导制造用的凹型微腔精密制造问题进行了研究,利用微细电解线切割加工技术、电化学沉积金及电化学沉积铜等电化学制造技术的组合,实现了端面尺寸为 $124.3\mu\text{m}\times 253.2\mu\text{m}$ 、表面粗糙度 $R_a < 0.1\mu\text{m}$ 、圆角半径 $R < 8\mu\text{m}$ 的 1THz 金属矩形波导凹型微腔的制造,为高工作频段的组合式太赫兹金属矩形波导制造奠定了基础。

关键词: 太赫兹金属空芯矩形波导;微细电解线切割加工;电化学沉积金;电化学沉积铜

中图分类号: TG662

文献标识码: A

文章编号: 2096-7772(2023)04-0001-06

0 绪论

基于太赫兹波的太赫兹技术作为前瞻性、前沿性和战略性的研究领域,已成为国内外争相抢占的科技制高点^[1-2]。太赫兹波的发生、传输、接收、探测和成像等需要各种小型化、精密化太赫兹器件的支撑,而金属或具有金属表面的太赫兹微矩形腔体结构因能实现更好的工作性能^[3],被应用于许多太赫兹器件,其精密加工制造也成为太赫兹技术研究和前沿和热点^[4]。

太赫兹微金属矩形波导腔体是典型的太赫兹微金属矩形空芯腔体结构,其外层是金属基体,中间有金、银等金属层^[5],具有传输损耗低、柔性好和安全性高等优点,应用极为广泛。随着太赫兹技术的飞速发展,太赫兹技术的未来应用将向高频段即 1 THz 及以上频段迈进。高频段太赫兹器件的特征尺寸将进一步减小,对尺寸精度、表面粗糙度和加工圆角等技术指标的要求将更为严格。太赫兹微金属矩形波导腔体工作频段较高时,加工指标要求极高,例如频段为 1 THz 时,腔体端面尺寸要求为 $127\mu\text{m}\times 254\mu\text{m}$,腔体尺寸公差为 $\pm 10\mu\text{m}$ 、表面粗糙度

$R_a \leq 0.4\mu\text{m}$ 、圆角半径 $R \leq 30\mu\text{m}$ 、金属层厚度大于 $1\mu\text{m}$ ^[6]。制备如此小端面尺寸的腔体并满足这些技术指标要求,是对各类微加工技术的巨大挑战。

从现阶段的研究来看,各种微加工技术对于太赫兹微金属矩形波导腔体的制造,通常是制备出表面金属化的凹型微腔后与表面金属化的盖板进行组合封装,最终形成太赫兹微矩形腔体结构。研究人员基于该制造理念,先后利用 DRIE 技术与表面溅射技术及表面电镀技术结合^[7]、基于 SU-8 光刻胶的 UV-LIGA 技术与表面溅射技术结合^[8]、微细铣削技术^[9]等,制备了凹型微腔与盖板组合式的太赫兹微金属矩形波导腔体。然而,上述制造方法对于制备高精度、高表面质量、小圆角半径的高频段太赫兹微金属矩形波导腔体尚存在一些问题。因此,迫切需要探究新的微加工技术,解决高频段太赫兹微金属矩形波导腔体的制造难题。

电化学制造技术包括基于阴极表面离子沉积的电化学沉积技术和金属阳极材料溶解的电解加工技术,由于具有不产生机械力作用、无工具损耗、无加

^{*} 收稿日期: 2023-04-05

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(222102220038);河南工学院高层次人才科研启动基金(KQ2104)

第一作者简介: 毕晓磊(1988—),男,河南郑州人,讲师,博士,主要从事先进制造技术研究。

工热影响区、无熔融层微裂纹等优势,特别适合制造尺寸微小、尺寸精度高、表面质量好、圆角半径小的金属微结构。针对微小金属零件制造有代表性的电化学制造技术有微细电化学沉积技术和微细电解线切割加工技术等^[10-11]。已有研究人员利用微细电化学沉积技术实现了频段大于 1 THz 的太赫兹微金属矩形波导凹型微腔的制造,但其方法制备的牺牲芯模精度较低、表面粗糙度较高,限制了该方法制备高质量、高频段的太赫兹微金属矩形波导腔体^[12]。本文在此基础上,开展基于微细电解线切割加工技术制备牺牲芯模并结合电化学沉积技术进行 1 THz 微金属矩形波导凹型微腔的电化学制造研究,为高频段、高质量的太赫兹微金属矩形波导腔体制造提供支撑。

1 太赫兹微金属矩形波导凹型微腔电化学制造技术原理

本文提出的基于微细电解线切割加工牺牲芯模的太赫兹微金属矩形波导凹型微腔电化学制造技术,其总体制造工艺方案如图 1 所示。其中主要包括五个步骤:(1)牺牲芯模微细电解线切割加工,如图 1(a)所示;(2)牺牲芯模表面电化学沉积金层,如图 1(b)所示;(3)牺牲芯模表面电化学沉积金层表面电化学沉积铜层,如图 1(c)所示;(4)有机玻璃包裹辅助抛磨去除工件单面的电沉积金层及铜层,直至裸露出具有良好上表面质量的牺牲芯模,如图 1(d)所示;(5)刻蚀去除电化学沉积铜层、牺牲芯模直至电沉积铜层及牺牲芯模被完全刻蚀干净,获得纯金太赫兹微金属矩形波导凹型微腔,如图 1(e)所示。

上述过程中,牺牲芯模的尺寸精度、表面质量和圆角半径等技术指标由微细电解线切割加工技术的工艺参数来保证;金层的厚度和质量由电化学沉积金层的工艺参数来保证;铜层的厚度由电化学沉积铜层的工艺参数来保证;凹型微腔的腔体高度由精密抛磨来保证。由于金具有稳定的化学性质,不溶于大多数刻蚀剂,因此本文提出的方法中牺牲芯模可选择材料广泛,只要有对应的刻蚀剂即可。

本文提出的方法可以实现高频段的太赫兹微金属矩形波导凹型腔体的制造。由于微细电解线切割加工技术能够实现端面尺寸为数百微米甚至数十微米的牺牲芯模制备,因此本文提出的方法能够实现端面尺寸为数百微米甚至数十微米的太赫兹微金属矩形波导凹型腔体制造,这种尺度的端面尺寸对应

了高频段太赫兹微矩形波导腔体的端面尺寸。

此外,本文提出的方法还可以实现高质量的太赫兹微金属矩形波导凹型腔体的制造。由于微细电解线切割加工技术能够实现高尺寸精度、小表面粗糙度、小圆角半径的牺牲芯模加工,因此在牺牲芯模外表面电沉积金层后,牺牲芯模外表面形貌能被电沉积金层的内表面复制,牺牲芯模刻蚀后,可以获得具有较高尺寸精度、较小腔体表面粗糙度和较小腔体圆角半径纯金凹型微腔。

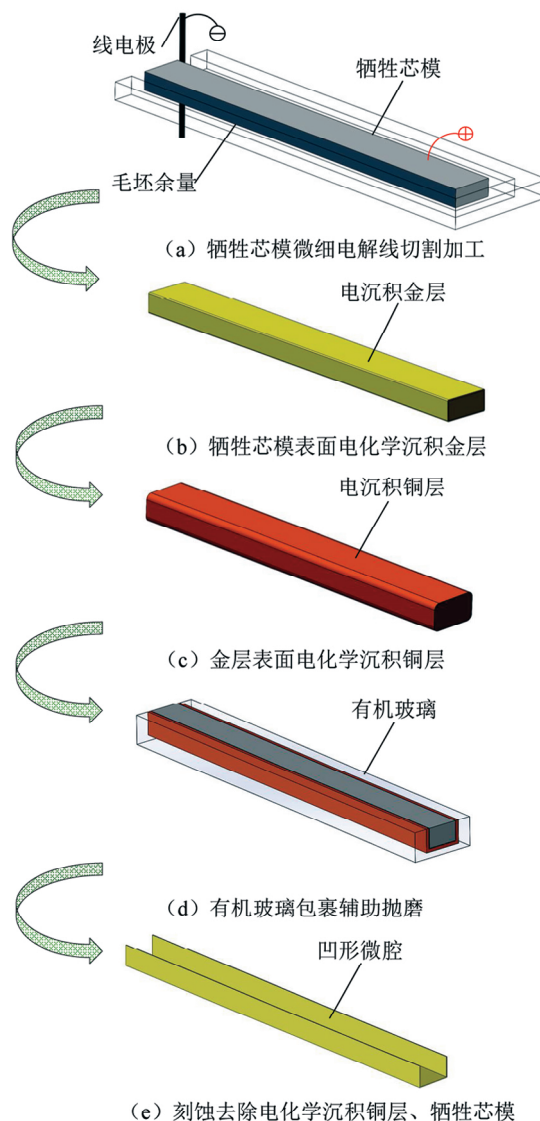


图 1 太赫兹微金属矩形波导凹型微腔电化学制造工艺方案

2 结果及讨论

2.1 牺牲芯模微细电解线切割加工

由于镍材料化学性质稳定,本文选择镍作为牺牲芯模材料。镍牺牲芯模微细电解线切割加工参照

文献[13]中的实验系统及参数进行,实验使用的线电极为直径 $20\ \mu\text{m}$ 的钨丝,工件为厚度 $130\ \mu\text{m}$ 的纯镍板。加工开始前,镍板上下表面使用 10,000 目的砂纸进行抛磨,抛磨后厚度约为 $125\ \mu\text{m}$ 并用去离子水和酒精进行超声清洗。实验采用工件振动和线电极运丝的方式进行传质,结合本文中的纯镍板厚度及实验需求,参考文献[13]并在前期预先实验的基础上,本文中所选取的实验参数如表 1 所示。

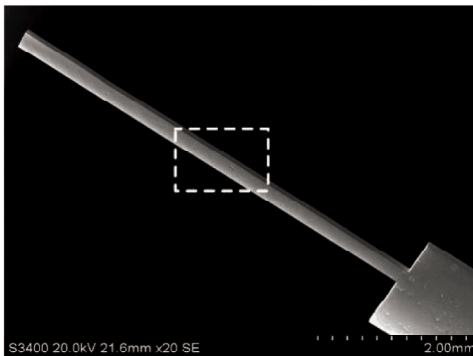
表 1 实验采用的加工参数

参数	数值
线电极运丝振幅/频率	$150\ \mu\text{m}/2\ \text{Hz}$
工件振动振幅/频率	$5\ \mu\text{m}/100\ \text{Hz}$
脉冲电压	$5\ \text{V}$
脉冲周期	$5\ \mu\text{s}$
脉冲宽度	$55\ \text{ns}$
进给速度	$0.25\ \mu\text{m}/\text{s}$
电解液浓度	$0.1\ \text{mol/L HCl}$

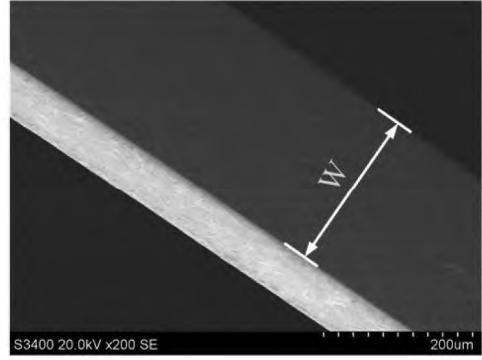
图 2(a)为利用表 1 的加工参数进行微细电解线切割加工后,获得的长度约为 6mm 、对应于 $1\ \text{THz}$ 金属矩形波导腔体端面尺寸 $127\ \mu\text{m} \times 254\ \mu\text{m}$ 的纯镍牺牲芯模加工结果。图 2(b)、2(c)、2(d)分别为在牺牲芯模长度方向上随机选择测量位置进行矩形芯模加工宽度、加工表面粗糙度及加工圆角半径的测量示例。表 2 为各个加工指标对应的测量结果。

表 2 镍牺牲芯模长度方向上加工指标随机测量结果

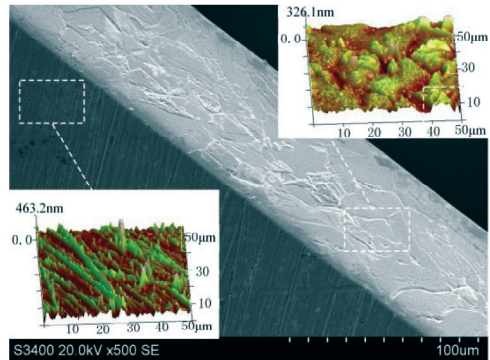
加工指标	测量结果
芯模宽度	$252.6\ \mu\text{m}$
芯模高度	$123.7\ \mu\text{m}$
抛磨表面粗糙度	$0.0822\ \mu\text{m}$
电解线切割表面粗糙度	$0.0913\ \mu\text{m}$
芯模圆角半径	$6.326\ \mu\text{m}$



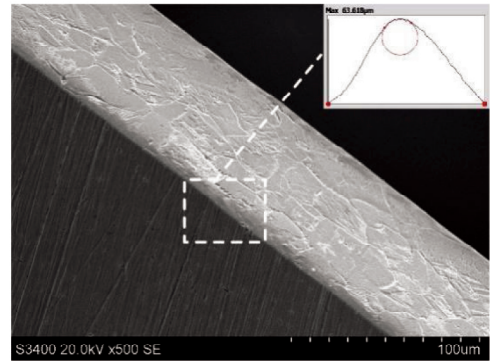
(a)加工结果 SEM 整体观测示例



(b)宽度的 SEM 测量示例



(c)抛磨表面及电解线切割表面 AFM 测量示例



(d)加工圆角半径 Leica 测量示例

图 2 镍牺牲芯模加工结果及测量示例

2.2 牺牲芯模表面电化学沉积金层

电沉积金层实验所使用实验平台、溶液配方以及电沉积金层实验参数参照文献[12]开展。根据本文提出的太赫兹微金属矩形波导凹型微腔电化学制造工艺方案,步骤 5 将会对牺牲芯模进行化学刻蚀去除。当电沉积金厚度较小时,后续的镍牺牲芯模刻蚀过程中容易造成金层断裂,当金层厚度较大时,实验成本较高。因此,实验研究了金层厚度和电沉积金层的关系,通过对电沉积金层后工件端面抛磨出的轮廓进行测量,得出了具体结果,如图 3 所示。可以看出,随着电沉积时间的增加,金层的厚度呈线

性增加。当电沉积金进行 4 h 后,观测发现金层厚度大于 $20\ \mu\text{m}$,当电沉积金时间为 5 h 时,金层厚度接近 $30\ \mu\text{m}$ 。为了保证金层有足够的厚度以避免刻蚀时损坏金层,本文中提出的方法电沉积金层时间一般大于 4 h。

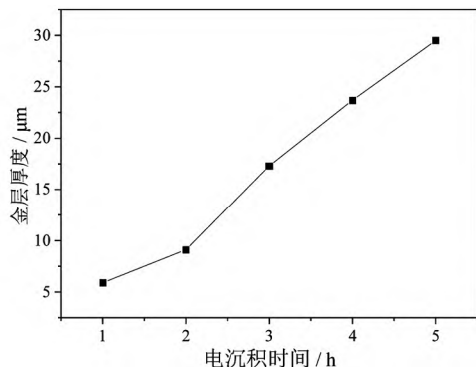
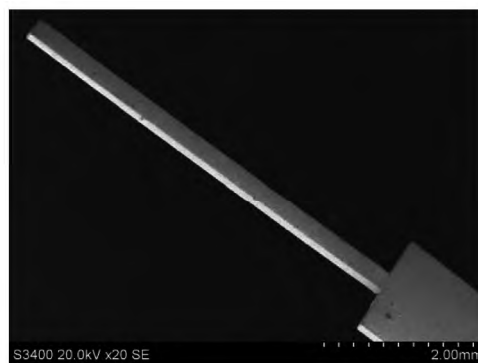
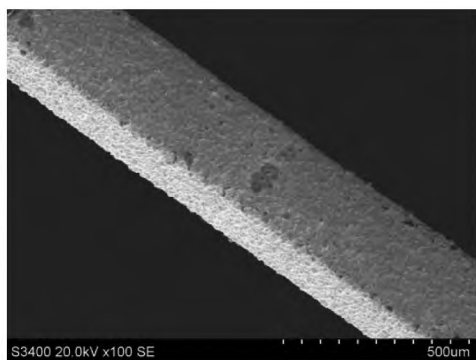


图 3 金层厚度随电沉积时间的变化

电沉积金层完成后,将工件从电沉积溶液中取出,通过肉眼即可观察到镍牺牲芯模表面电沉积金层呈现发亮的金黄色。使用去离子水和无水乙醇将其清洗干净,而后对镍牺牲芯模的电沉积金层结果进行整体形貌和局部形貌的观察,发现镍牺牲芯模表面的电沉积金层致密,金层表面无气孔、结瘤等缺陷,如图 4 所示。



(a)整体形貌

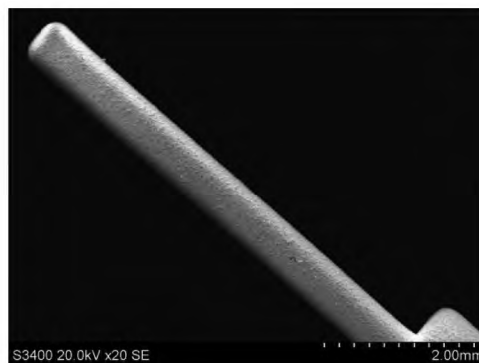


(b)局部形貌

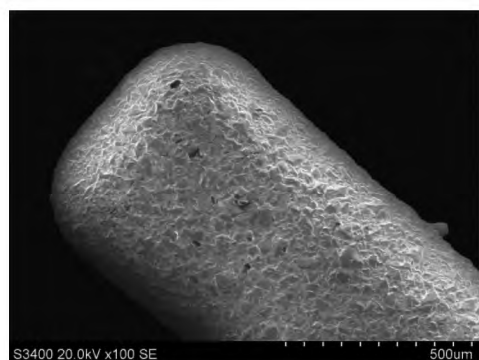
图 4 镍牺牲芯模表面电沉积金层后的 SEM 观测示例

2.3 牺牲芯模表面电化学沉积金层表面电化学沉积铜层

电沉积铜开始前,需要将工件依次用去离子水和无水乙醇进行清洗。电沉积铜仍采用低主盐高硫酸电沉积铜体系,电沉积铜层所使用实验平台、溶液配方以及电沉积铜层实验参数参照文献[12]开展,铜层厚度可以根据电沉积所用时间进行调整,电沉积时间一般约为 36 h 左右。图 5 为镍牺牲芯模表面电化学沉积金层表面电化学沉积铜层的结果。



(a)整体形貌



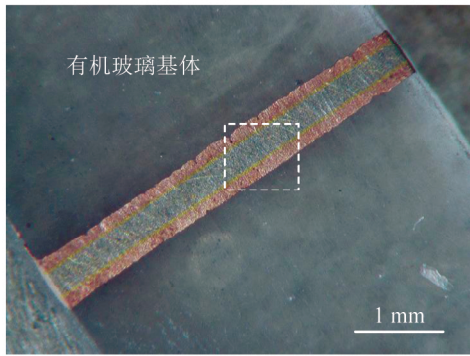
(b)局部形貌

图 5 镍牺牲芯模表面电化学沉积金层表面电化学沉积铜层后的 SEM 观测示例

2.4 有机玻璃包裹辅助抛磨去除牺牲芯模上表面金层及铜层

由于上述电铸铜后的工件尺寸仍然非常微小,因此直接抛磨时,抛磨效果较差,无法均匀地去除矩形芯模上表面的电镀金层及电铸铜层。本步骤中利用有机玻璃将其包裹后形成基体,借助于基体进行抛磨,将矩形芯模上表面的电沉积金层及电沉积铜层均匀地抛磨掉,并通过实时观测控制抛磨时牺牲芯模的厚度。

将有机玻璃即亚克力树脂粉及亚克力固化剂按照比例调配成粘稠状后迅速将 2.3 中的工件放入其中,固化 2h 后进行抛磨,抛磨结果如图 6 所示。



(a)整体形貌



(b)局部形貌

图 6 有机玻璃固化后的抛磨结果 Leica 观测示例

2.5 牺牲芯模及电铸铜层的去除

本步骤主要通过刻蚀剂蚀除牺牲芯模,同时将电沉积金层和有机玻璃基底之间的电铸铜层蚀除,从而使得纯金太赫兹金属矩形波导凹型微腔从有机玻璃基底上脱离。

由于牺牲芯模的材料为纯镍,本步骤中的刻蚀剂选用 TFG 镍蚀刻剂。将 2.4 中抛磨后的工件放入 TFG 镍蚀刻剂中,采用水浴加热的方法使刻蚀温度保持在 65°C ,以 6 h 为一个刻蚀周期,每刻蚀 6 h 后,超声波震荡 120 s,更换刻蚀剂再次刻蚀,连续刻蚀 36 h 后,即可发现纯镍牺牲芯模基本上被蚀除。然而纯金太赫兹金属矩形波导凹型微腔并未从有机玻璃基底上脱离,当继续刻蚀 36 h 后发现二者分离,电铸铜层被蚀除。这可能因为纯镍牺牲芯模被逐渐蚀除后,TFG 镍蚀刻剂与纯铜发生了作用,从而导致了电铸铜层的蚀除。

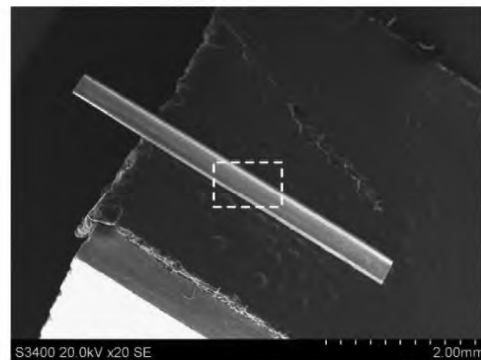
图 7(a)为最终获得的长度约为 5mm 的纯金太赫兹金属矩形波导凹型微腔。图 7(b)为随机选取测量位置进行太赫兹金属矩形波导凹型微腔宽度和高度的测量示例。图 7(c)为太赫兹金属矩形波导凹型微腔腔体内部随机选取测量位置进行表面粗糙度的测量示例。图 7(d)为腔体内部随机选取测量

位置进行凹型微腔体内部加工圆角半径的测量示例。表 3 为各个测量指标对应的测量结果。

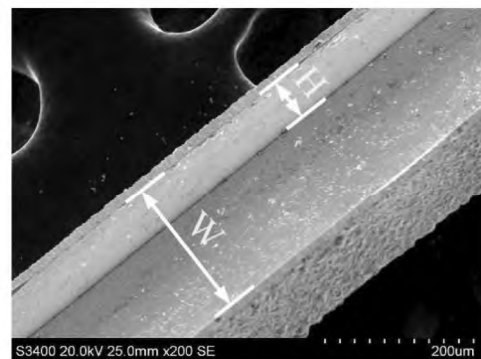
表 3 凹型微腔长度方向上加工指标随机测量结果

加工指标	测量结果
微腔宽度	$253.2\ \mu\text{m}$
微腔高度	$124.3\ \mu\text{m}$
微腔底面粗糙度	$0.0861\ \mu\text{m}$
微腔侧面粗糙度	$0.0956\ \mu\text{m}$
微腔圆角半径	$7.593\ \mu\text{m}$

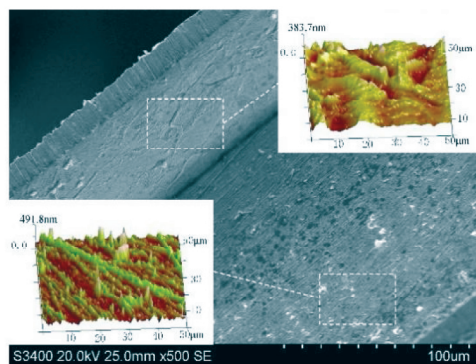
根据图 1 中提出的工艺方案,结合图 2 及图 7,凹型微腔的宽度对应了牺牲芯模的宽度,凹型微腔的高度对应了牺牲芯模的厚度,凹型微腔的底面对应了牺牲芯模的抛磨表面,凹型微腔的侧面对应了牺牲芯模的切割表面,凹型微腔的内部圆角对应了牺牲芯模的外部圆角。对比表 2 和表 3 中的测量结果,可以证明牺牲芯模的具体尺寸、表面形貌、圆角等被纯金太赫兹金属矩形波导凹型微腔精确复制。数据对比结果表明,最终获得的纯金太赫兹金属矩形波导凹型微腔加工指标满足 1 THz 金属矩形波导的技术指标要求。



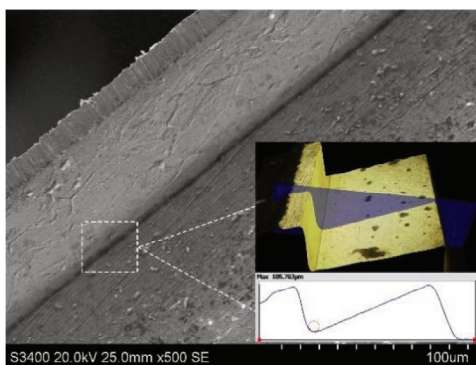
(a)加工结果 SEM 整体 HT 观测示例



(b)宽度及高度的 SEM 测量示例



(c)底面及侧面粗糙度 AFM 测量示例



(d)内部圆角半径 Leica 测量示例

图 7 凹型微腔加工结果及测量示例

3 结论

(1)利用电化学组合制造技术实现了端面尺寸为 $124.3\mu\text{m} \times 253.2\mu\text{m}$ 、表面粗糙度为 $R_a < 0.1\mu\text{m}$ 、圆角半径为 $R < 8\mu\text{m}$ 、频段对应于 1 THz 的太赫兹金属矩形波导凹型微腔的制造。

(2)对比牺牲芯模加工后的测量结果和凹型微腔的测量结果,可以得出牺牲芯模的尺寸、表面形貌、圆角等被凹型微腔精密地复制。凹型微腔的测量结果表明本文提出的电化学制造技术能够实现高质量、高频段的太赫兹金属矩形波导凹型微腔制备。

(责任编辑 吕春红)

参考文献:

[1] TONOUCHI M. Prospect for research and development of terahertz technology in future[J]. Review of the National Institute of Information & Communications Technology, 2008, 54(1): 149-151.

[2] WANG K, SUN D W, PU H. Emerging non-destructive terahertz spectroscopic imaging technique: Principle and applications in the agri-food industry[J]. Trends in Food Science and Technology, 2017, 67: 93-105.

[3] 钟任斌. 太赫兹传输线研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

[4] 吴春亚, 郭闯强, 裴旭东, 等. 太赫兹段慢波结构的微细加工技术研究新进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 187-198.

[5] GERHARD M, BEIGANG R, RAHM M. Comparative Terahertz Study of Rectangular Metal Waveguides With and Without a Ridge[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015, 36(4): 327-334.

[6] 程浩. 基于 UV-LIGA 的太赫兹矩形波导加工技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.

[7] LEONG K M K H, HENNIG K, ZHANG C, et al. WR1.5 silicon micromachined waveguide components and active circuit integration methodology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2012, 60(4): 998-1005.

[8] SHANG X, KE M, WANG Y, et al. WR-3 band waveguides and filters fabricated using SU8 photoresist micromachining technology[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, IEEE, 2012, 2(6): 629-637.

[9] LEAL-SEVILLANO C A, MONTEJO-GARAI, JOSE R, et al. Low-Loss Elliptical Response Filter at 100 GHz[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2012, 22(9): 459-461.

[10] ZHANG H, ZHANG N, MD GILCHRIST, et al. Advances in precision micro/nano-electroforming: a state-of-the-art review [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2020, 30, 103002.

[11] SHARMA V, PATEL D S, JAIN V K, et al. Wire electrochemical micromachining: An overview[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2020, 155: 103579.

[12] BI X, MENG L. Combined fabrication of terahertz hollow-core metal rectangular waveguide cavity using electrochemical deposition and selective chemical dissolution, AIP Advances, 2022, 12 (2).

[13] BI X, ZENG Y, QU N. Wire electrochemical micromachining of high-quality pure-nickel microstructures focusing on different machining indicators [J]. Precision Engineering, 2020, 61:14-22.

(下转第 26 页)

- 机理研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 105-113.
- [8] 李 静, 杨光, 曹云东, 等. 低压断路器触头电弧非平衡态燃弧过程分析[J]. 电器与能效管理技术, 2016, (15): 7-12.
- [9] 刘春园. 磁场对真空电弧等离子体特性的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [10] 李静, 杜志鹏, 曹云东, 等. 纵向磁场对真空电弧微观特性影响的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 63-69.

Simulation and Analysis of Dielectric Characteristics after Arc in Vacuum Interrupter

SHANG Wenxiang, LI Jipeng, ZHAO Xiaohe

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Vacuum circuit breakers are widely used in DC circuits, however, the combustion characteristics of the arc after the fault current forcing over zero are more complicated. A fluid-chemical hybrid model of the vacuum arc plasma is established by considering the interaction among electrons, ions, and copper vapor molecules in the vacuum arc plasma. The simulation results show that under the same overvoltage, with the increase of the longitudinal magnetic field, electrons gradually diffuse towards both sides of the electrode when the plasma develops to a locally stable state, and the electron density in the center line of the electrode decreases successively, which reduces the possibility of secondary breakdown after arc to some extent.

Key words: vacuum switch; current forced zero crossing; arc simulation; back-arc heavy breakdown

(上接第 6 页)

Research on Electrochemical Manufacturing Technology of Terahertz Metal Rectangular Waveguide Concave Microcavity

BI Xiaolei^{1,2,3}, CHENG Xueli^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Xinxiang Additive Manufacturing Engineering Technology Research Center, Xinxiang 453003, China;

3. Henan Province Mechanical and Electrical Equipment Digital Design and Manufacturing
Engineering Technology Research Center, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The requirements of terahertz metal rectangular waveguides with a high-working-frequency have become increasingly urgent with the rapid development of terahertz technology. However, the precision fabrication of high-working-frequency terahertz metal hollow-core rectangular waveguides is difficult due to its cavity characteristics of small end face size and edge radius, strict surface roughness. In this paper, the precision fabrication of terahertz metal rectangular waveguide concave microcavity was studied, wire electrochemical micromachining, gold electrochemical deposition, and copper electrochemical deposition were combined. A terahertz metal hollow-core rectangular waveguide concave microcavity with end face size of $124.3 \mu\text{m} \times 253.2 \mu\text{m}$, edge radius less than $8 \mu\text{m}$ and internal surface roughness less than $0.1 \mu\text{m}$ were obtained, which provides the basis for the combined fabrication of terahertz metal hollow-core rectangular waveguide.

Key word: terahertz metal hollow-core rectangular waveguide; wire electrochemical micromachining; gold electrochemical deposition; copper electrochemical deposition