UV LIGA 技术在毫米波太赫兹器件中的应用进展

李含雁, 冯进军

(中国电子科技集团公司 第十二研究所 大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室,北京 100015)

要:采用紫外光刻电铸和微成型(UV LIGA)技术制造太赫兹真空器件的高频结构,频率为 摘 94~220 GHz。对于94 GHz高频结构,尺寸误差≤15 μm,采用此高频结构的脉冲行波管输出功率大 于100 W; 180 GHz高频结构,尺寸误差≤5 μm,采用此高频结构的太赫兹行波管二倍频器输出功 率高于100 mW, 带宽为11.4 GHz; 220 GHz高频结构, 尺寸误差≤3 μm, 衰减因子为240 dB/m。UV LIGA技术在太赫兹真空器件中的成功应用,不但为毫米波太赫兹器件研制奠定了基础,同时也为 UV LIGA技术在设计制造毫米波太赫兹器件领域,包括有源和无源器件,开辟了一番新天地。

关键词:紫外光刻电铸和微成型;高频结构;毫米波太赫兹器件 中图分类号:TN129 文献标志码:A doi:10.11805/TKYDA201805.0776

Progress in application and research of UV LIGA techniques in millimeter wave and terahertz devices

LI Hanyan, FENG Jinjun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: A folded waveguide Slow Wave Structure(SWS) with frequency range from 94 to 220 GHz is fabricated with Ultraviolet Lithographie Galvanoformung Abformung(UV LIGA) technology. For 94 GHz folded waveguide SWS, the accuracy is≤15 µm, the output power of 94 GHz pulse Travelling Wave Tube(TWT) with the microfabricated SWS is higher than 100 W. For 180 GHz folded waveguide SWS, the accuracy is≤5 µm, the output power is higher than 100 mW with bandwidth of 11.4 GHz. For 220 GHz folded waveguide SWS, the accuracy is $\leq 3 \mu m$, and the attenuation factor is 240 dB/m.

Keywords: Ultraviolet Lithographie Galvanoformung Abformung; high frequency structure; millimeter wave and terahertz devices

通信系统中对带宽和高分辨力的需求,使得工作在毫米波和太赫兹频段内的器件广受关注。随着频率的提高, 高频结构和能量耦合系统的结构尺寸已经达到几十微米量级[1-2],同时为了减小传输损耗,要求结构表面粗糙度 在几十到几百纳米量级,使用常规金属加工技术加工这些频率的高精密波导器件非常昂贵。微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)技术可以用来加工高尺寸、高性能以及低成本的毫米波太赫兹器件。 MEMS是以微电子、微机械及材料科学为基础,研究、设计、制造具有特定功能的微型器件^[3-4],是多种学科交 叉融合的前沿高技术,是未来的主导产业之一。MEMS器件最显著的特点是体积微小,一般在微米范围内,最小 器件的尺寸在纳米量级。目前微波太赫兹行业已经开始利用MEMS高深宽比(High Aspect Ratio, HAR)加工能力 制作小尺寸的慢波系统、谐振系统和输能系统[5-6]。

在太赫兹真空器件的设计制造中,本实验室从实验和理论上分别比较了紫外、光刻、电铸和微成型(UV LIGA) 与深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Ething, DRIE)加工太赫兹器件结构的优缺点。UV LIGA采用SU8光刻胶, 整个过程包括匀胶、前烘、曝光、后烘、显影、电铸、抛光、去胶等步骤。工艺步骤较多,工艺复杂繁琐,需要 解决较多的关键技术问题,如SU8胶应力、各参数的平衡、电铸溶液的稳定性、电铸参数的选择、去胶^[7-8]等。 但UV LIGA加工形成的高频结构是全铜的,与现有的毫米波太赫兹器件工艺相兼容,与硅基相比,有较好的导热 性。另外,为解决SU8胶的去胶问题,本实验室采用KMPR光刻胶,与SU8光刻相比较,KMPR容易去胶,但工艺 不稳定,重复性较差。深反应离子刻蚀技术则是在硅片上刻蚀图形,然后沉积金属薄膜实现保形覆盖,形成金属 结构的慢波结构或谐振腔^[9-10]。深反应离子刻蚀步骤少,周期短,主要解决表面沉积金属与硅基的结合力问题, 但硅基与金属铜相比散热差,容易影响毫米波太赫兹行波管的工作性能。

1 工艺步骤

毫米波太赫兹行波管所用的高频结构大部分采用折叠波导形式^[11-13],各波段的结构尺寸如表1所示。图1为 该慢波结构示意图。基于SU8胶的UV LIGA工艺技术包括以下几个步骤^[14]: a) 商用SU8可从MicroChem(Newton, MA)公司购得,将SU8胶涂敷至铜基底上,并在水平热板上进行软烘烤; b) 使用MA6/BA6型双面曝光机和光学 掩模进行UV光刻,得出高频结构的图形。剩余的工艺步骤包括: c) SU8显影; d) 铜电铸成型; e) 抛光; f) SU8 去除; g) EDM线切割样品产生高频结构半腔,对准焊接半腔。

表1 不同频率中加查放守度放车内尺寸 Table1 Dimensions of the folded waveguide SWS of different frequencies				
f/GHz	wide side size/mm	narrow side size/mm	beam tunnel radius/mm	
94	2.00	0.30	0.24	
180	1.10	0.18	0.24	
220	0.86	0.16	0.24	

采用 UV LIGA 加工高频结构时,先加工半腔,根据表 1,94 GHz 半腔深度为 1 mm(半腔深度即为表 1 中宽边尺寸的一半),180 GHz 半腔深度为 0.55 mm,220 GHz 半腔深度为 0.43 mm。传统的 UV LIGA



Fig.1 Diagram of folded waveguide SWS 图1 折叠波导慢波结构的示意图

技术所加工的器件尺寸很小,典型值在微米和几十纳米量级,而本实验所加工的高频结构最深的深度为1mm,可以说是UVLIGA的极限尺寸。在工艺过程,胶膜厚度变厚时,相应的时间势必延长,这将会引入更大的SU8 胶膜应力。另外,SU8 胶对基底的清洁度要求较高,基底不清洁,胶膜图形容易从基底上脱落下来,也容易影响后续的电铸层质量,所以要采用严格的程序清洗基底。可先用溶剂去油,以稀释的酸漂洗,接着用去离子水冲洗,压缩氮气吹干。对于需要电镀和后续去除 SU8 的应用,在处理前使用 MicroChen 的 OmniCoat。

2 实验结果与分析

SU8胶对工艺参数的改变非常敏感,光刻胶图形的质量受到各因素的综合影响,是软烘、曝光、后烘、显影等工艺参数平衡的结果。软烘伴随体积的收缩和应力的产生,应力积累随着胶厚和特征尺寸的增大而增大,如果 胶膜和基底的结合较弱,胶膜可能从基底上脱落。最近研究表明,在工艺过程中软烘时间是产生应力的一个主要 原因(约为总应力的50%),曝光、后烘时间和显影时间分别为30%,15%和5%^[15]。曝光是SU8胶光刻工艺中关键的 一步,也是对结构影响最大的一步。曝光过程,紫外光在光刻胶中传播时,由于SU8胶对紫外光的吸收,曝光强 度逐渐削弱,胶膜顶部的曝光量最强,底部的曝光量最弱。当曝光不足时,特别对于厚光刻胶,即使后烘充分, 曝光区域的光刻胶在后烘阶段也不能充分交联。在显影阶段,曝光不足部分在显影液中容易膨胀变软,图形从基 底上脱落下来,显影时间越长,脱落的图形越多,即使没有脱落,图形的底部也由于溶胀而变软。图2显示了94 GHz 光刻胶模的图片,曝光量从D1逐渐增大至D4时的图形底部溶胀状况,曝光量越小,底部溶胀越严重。图2(d)显 示增大曝光量时,图形与基底结合较好的情况。



Fig.2 As exposure dose increases(D1<D2<D3<D4), the bottom of SU8 molds becomes hard. As exposure dose is D4,SU8 molds adhere to the wafer well 图2 当曝光量增大(D1<D2<D3<D4)时,胶膜图形根部变硬,当曝光量增大到D4时,胶膜图形与基底紧密结合

图3为经工艺优化后的SU8光刻胶模,基底与 胶模结合良好。图3(a)为94 GHz高频结构胶模, 胶层厚度为1.1 mm;图3(b)为220 GHz高频结构胶 模,胶层厚度为0.7 mm。由于SU8是一种对工艺 条件相当敏感的光刻胶,对于不同的工艺环境, 即使其他工艺参数(比如前后烘时间和温度、显影 等)一样,也可能出现不同的优化曝光剂量,因此 最优的曝光剂量应该结合自己的工艺条件进行



(b) 220 GHz folded waveguide SWS (a) 94 GHz folded waveguide SWS with 1.1 mm of the thickness with 0.7 mm of the thickness Fig.3 SU8 molds with optimized process parameters adhere to the wafer well 图3 优化工艺参数后的SU8胶模,基底与胶模良好结合

对于微电铸来说, 镀层质量是电铸实验结果

所考虑的首要因素。对于电真空器件而言,电铸层质量主要包括镀层的致密度、镀层内应力以及镀层的含氧量等。 电铸层的致密度主要取决于金属沉积过程中结晶的晶粒尺寸大小和排列的紧密程度。显然,结晶晶粒尺寸越小, 晶粒之间的间隙也就越小,即排列较为紧密,镀层的致密度也就越好。铸层致密度好,则铸层的力学性能较好, 强度和硬度都会有所增加。金属结晶晶粒的大小和形核速率均与阴极的过电位有直接关系,实验中必须将电铸层 质量和电流密度结合起来分析。

电铸工艺中采用由CuSO4·5H2O和H2SO4以及添加剂所组成的电解液。电镀阳极为铜小球, 阴极为所电铸的基 片。为比较电铸波形对电铸铜的影响,分别采用直流和交流电源进行电铸,电铸结果如图4所示。对于直流电铸, 铜层的晶粒较大,在晶粒之间存在空洞。当采用交流电铸时,铜层晶粒小并且致密,晶粒大小约为194 nm^[7]。



Fig.4 Image of raw surface of samples after electroforming copper 图4 电铸层表面形貌

采用电火花切割高频结构外形和电子注通道,切割完成后的样品先用丙酮超声5 min,去除样品表面的残留 有机物或油,然后用洗铜液清除结构表面的毛刺和氧化层,接着用去离子水冲洗,压缩氮气吹干。94~220 GHz 高频结构如图5、图6(a)、图7(a)所示,与设计值尺寸的比较如表2所示。

f/GHz

94

180



Fig.5 OM image of 94 GHz folded waveguide high frequency structure 图594 GHz高频结构的光学显微镜照片



(a) OM image





(b) SEM image



measured narrow side size/mm

0.300+0.015

0 180+0 005

0.160+0.003

表2 不同频率中折叠波导慢波结构半腔窄边的测量尺寸 Table2 Dimensions of the folded waveguide SWS of different frequencies

designed narrow side size/mm

0.30

0.24

0.16

(c) measured frequency response with the 2nd harmonic power, output power is higher than 100 mW

Fig.6 180 GHz folded waveguide high frequency structure 图6 180 GHz高频结构

实践研究后取得。



(a) OM image

Fig.7 220 GHz folded waveguide high frequency structure 图7 220 GHz高频结构

3 结论

采用UV LIGA技术加工毫米波太赫兹行波管的高频结构,分析了采用UV LIGA工艺的优势,并讨论和分析几 个关键参数的影响和选取,经优化后加工出符合技术要求的各频段高频结构,并用于各频段行波管中^[16-17]。对 于94 GHz高频结构,尺寸误差≤15 μm,采用此高频结构的脉冲行波管输出功率大于100 W; 180 GHz高频结构, 尺寸误差≤5 µm,采用此高频结构的太赫兹行波管二倍频器输出功率高于100 mW,带宽为11.4 GHz; 220 GHz 高频结构,尺寸误差≤3µm,高频结构的衰减因子为240 dB/m。这一结果验证了UV LIGA技术在真空太赫兹器件 中的应用,为UV LIGA技术在微波太赫兹领域的发展奠定了基础,也为更灵活设计更多类型微波太赫兹器件提 供了条件^[18]。

参考文献:

- [1] 冯进军,唐烨,李含雁,等. 短毫米波和太赫兹线性注真空器件研究[J]. 真空电子技术, 2013(1):1-9. (FENG Jinjun, TANG Ye,LI Hanyan, et al. Research of terahertz linear beam vacuum devices[J]. Vacuum Electronics, 2013(1):1-9.)
- [2] 冯进军. 集成真空电子学[J]. 真空电子技术, 2010(2):1-7. (FENG Jinjun. Integrated vacuum electronics[J]. Vacuum Electronics, 2010(2):1-7.)
- [3] DENTINGER P M,CLIFT W M,GOODS S H. Removal of SU8 photoresist for thick film applications[J]. Microelectronic Engineering, 2002,61(7):993-1000.
- [4] IVES R L. Microfabrication of high-frequency vacuum electron devices[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(3):1277-1291.
- [5] BHATTACHARJEE S, BOOSKE J H, LORY C L, et al. Folded Waveguide Traveling-Wave Tube sources for terahertz radiation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004,32(3):1002-1014.
- [6] JIN P,JIANG K,SUN N J. Microfabrication of ultra-thick SU-8 photoresist for microengines[J]. Proceedings of SPIE, 2003 (4979):105-110.
- [7] STEWART K J,HATZAKIS M,SHAW M S,et al. Simple negative resist for deep ultra-violet, electron beam, and X-ray lithography[J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1989,7(6):1734-1739.
- [8] LI Hanyan,LI Xinghui,BAI Guodong,et al. Copper electroforming for UV LIGA technology[C]// IEEE Internaional Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2014:245-246.
- [9] LI Xinghui, BAI Guodong, LI Hanyan, et al. Investigation of lift-off layer in spindt cathode fabrication[C]// 2012 International Vacuum Electronics Conference. Monterey, USA: IEEE, 2013:305-306.
- [10] DING Mingqing, CHEN Changqing, BAI Guodong, et al. A study of non-gated carbon nanotube field emission arrays with minimized screening effect[C]// 2010 8th International Vacuum Electron Sources Conference and Nanocarbon. Nanjing, China:IEEE, 2010:154-155.
- SHERWIN M S, SCHMUTTENMAER C A, BUCKSBAUM P H. Opportunities in THz Science[R]. Arlington, VA: DOE-NSF-NIH [11] Workshop, 2004-02-12.
- Committee on Assessment of Security Technology for Transportation, National Materiala Advisory Board, Division on Engineering [12] and Physical Sciences, et al. Assessment of millimeter-wave and terahertz technology for detection and identification of concealed explosive and weapons[J]. Ciência & Saúde Coletiva, 2007,19(1):17-25.

[13]	SCHEITRUM G, CARYOTAKIS G, HAASE A, et al. Design and fabrication of a 94 GHz klystron[J]. AIP Conference Proceeding,
	2001,569(1):712-724.
[14]	BAIG A, GAMZINA D, JOHNSON M, et al. Experimental characterization of LIGA fabricated 0.22 THz TWT circuits[C]//
	2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Bangalore, Karnataka, India: IEEE, 2011:275–276.
[15]	JOYE C D, CALAME J P, NGUYEN K T, et al. Microfabrication of wideband distributed beam amplifiers at 220 GHz[C]//
	2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Bangalore, Karnataka, India: IEEE, 2011:343–344.
[16]	NGUYEN K,LUDEKING L,PASOR J,et al. Design of a high-gain wideband high-power 220 GHz multiple-beam serpentine
	TWT[C]// 2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey,CA,USA:IEEE, 2010:23–24.
[17]	TUCEK J,GALLAGHER D,KREISCHER K,et al. A compact,high power,0.65 THz source[C]// 2008 IEEE International
	Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2008:16-17.
[18]	KREISCHER K, TUCEK J C, BASTEN M A, et al. 220 GHz power amplifier testing at Northrop Grumman[C]// 2013 IEEE

International Vacuum Electronics Conference. Paris, France: IEEE, 2013:1-2.

作者简介:

李含雁(1976-), 女,浙江省嵊州市人,高级工程师,主 要研究方向为采用 MEMS 工艺制作太赫兹器件.email:liyany_ 2005@163.com. **冯进军**(1966-),男,山西省运城市人,研究员,博士生导师,研究方向为毫米波/太赫兹真空 功率器件、真空微电子学、微波管 CAD 和高功率 回旋器件等.

(上接第 771 页)

 [8] 李志良,冯进军,刘本田,等. W波段二次谐波回旋行波管的研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):365-368.
(LI Zhiliang,FENG Jinjun,LIU Bentian, et al. Study on W-band second-harmonic wave gyrotron traveling wave amplifier[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):365-368.)

[9] 王秋实,罗积润,彭澍源. 大轨道回旋行波放大器非线性理论及电子注偏心的影响[J]. 红外与毫米波学报, 2016,35(2):
243-249. (WANG Qiushi,LUO Jirun,PENG Shuyuan. Nonlinear theory of large-orbit gyrotron traveling wave amplifiers and the effect of misaligned electron beam[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016,35(2):243-249.)

作者简介:



李志良(1979-),男,安徽省宿州市人,高级工程师,主要研究方向为高功率微波、毫米波与太赫兹回旋器件.email:lizhiliang100@163.com.

张 杨(1989-),男,山西省大同市人,工程师,主要 从事微波毫米波回旋器件的工艺和实验研究. **冯进军**(1966-),男,山西省运城市人,研究员,博士生导师,研究方向为毫米波/太赫兹真空 功率器件、真空微电子学、微波管 CAD 和高功率 回旋器件等.

刘本田(1971-),男,河南省安阳市人,研究员,主要从事微波毫米波回旋器件的理论和实验研究.