

文章编号: 2095-4980(2013)04-0527-04

采用 UV-LIGA 技术制作 340 GHz 折叠波导慢波结构

李含雁, 白国栋, 李兴辉, 唐 焱, 冯进军

(中国电子科技集团公司 第 12 研究所, 北京 100015)

摘 要: 紫外光刻、电铸和注塑(UV-LIGA)技术是制作太赫兹真空电子器件(包括谐振腔、电子注通道和输出波导等)的重要方法。采用 UV-LIGA 技术制作 340 GHz 折叠波导慢波结构, 研究前烘、曝光量、后烘对 SU8 胶模的影响, 着重讨论了曝光量的影响并分析其原因, 得出最佳工艺。另外, 本文还对去胶进行了初步研究, 获得了全铜的 340 GHz 的折叠波导结构。

关键词: 紫外光刻、电铸和注塑技术; SU8 胶模; 曝光量; 340 GHz 折叠波导

中图分类号: TN752

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0527

Microfabrication of 340 GHz Folded Waveguide Slow Wave Structure using UV-LIGA Technology

LI Han-yan, BAI Guo-dong, LI Xing-hui, TANG Ye, FENG Jin-jun

(The 12th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: Ultraviolet Lithographie, Galvanoformung and Abformung(UV-LIGA) is an attractive technique to fabricate THz vacuum electron devices including resonance cavities, electron beam tunnels and output waveguides. This paper studies the effects of the softbake, the exposure dosage and the postbake on SU8 models, highlighting the effect of the exposure dosage and its mechanics, and then obtains the optimized process parameters. The methods of SU8 removal are studied as well, and a 340 GHz all-copper Folded Waveguide(FWG) Slow Wave Structure(SWS) is fabricated.

Key words: Ultraviolet Lithographie, Galvanoformung and Abformung technique; SU8; exposure dosage; 340 GHz Folded Waveguide

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, 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, 所以必须采用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical-Systems, MEMS)等微加工技术。目前微波管行业已经开始利用 MEMS 和纳机电系统(Nano-Electro-Mechanical-System, NEMS)技术的深宽比(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。对于高频率真空器件而言, 高频结构的深宽比不大, 一般只能到 5 左右, 但是绝对深度的尺寸(如折叠波导慢波结构宽边尺寸的一半)比较大, 如在 W 波段折叠波导慢波结构宽边尺寸的一半为 950 μm , 中心频率为 560 GHz 时, 折叠波导慢波结构宽边尺寸的一半为 150 μm ; 而射频 MEMS 和光学 MEMS 的尺寸很小, 典型值在微米和几十纳米量级, 而且深宽比在 10 以上。表 1 给出了作者所在研究组得到的频率从 35 GHz 到 560 GHz 不同频率下折叠波导慢波结构的典型尺寸。在太赫兹真空辐射源的研究中, 经常使用的微加工技术有 X 射线光刻、电铸和注塑(LIAG), 紫外光刻、电铸和注塑(UV-LIAG)以及深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)等, 其中 X 射线 LIGA 价格昂贵, 而且需要较长时间等待同步

表 1 不同频率返波管中折叠波导慢波结构典型尺寸

Table 1 Dimensions of the folded waveguide SWS of different frequencies

f/GHz	wide side size/mm	narrow side size/mm	beam tunnel radius/mm
35	4.77	0.80	0.25
94	1.90	0.30	0.17/0.22
140	1.35	0.24	0.10
220	0.76	0.16	radius 0.10 mm or 0.20 mm \times 0.48 mm rectangle tunnel
340	0.50	0.10	0.10
560	0.30	0.04	0.02

辐射源来提供 X 射线源, 周期长达一个月或更长; UV LIGA 可在 1~2 个星期内利用 SU8 光刻胶或 KMPR 光刻胶完成整个过程, 包括匀胶、前烘、曝光、后烘、显影、电铸、抛光和去胶等工艺过程。DRIE 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^[1]。

UV LIGA 技术利用常规光刻机上的深紫外光对厚胶(通常为 SU8 胶)进行光刻, 形成电铸模, 结合电铸获得金属微结构。本实验室采用 UV LIGA 技术制作 94 GHz, 220 GHz, 340 GHz 以及一些波导器件, 最高厚度可达到 1 mm, 深宽比约为 3:1。UV-LIGA 与其他微细加工工艺相比, 其主要优势是其完成的器件为全铜结构, 有良好的导热性, 并与现有的真空器件兼容。

1 工艺步骤

所设计的 340 GHz 折叠波导慢波结构的主要几何尺寸为波导宽边 500 μm , 窄边 100 μm 。图 1 为该慢波结构的示意图。基于 SU8 胶的 UV LIGA 工艺技术包括以下步骤: 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) 后烘; d) SU8 显影; e) 铜电铸成型; f) 抛光以及 g) SU8 去除; h) 电火花加工(Electrical Discharge Machining, EDM)线切割样品产生高频结构半腔, 对准焊接半腔。

SU8 胶对于基底的清洁度要求较高, 必须采用严格的程序清洗基体。对于简单清洗, 可先用溶剂清洗, 或用稀释的酸清洗, 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 MicroChem 的 OmniCoat。

利用德国 Karl Suss 公司的 Delta80RC 甩胶台, 单次甩胶厚度可达到 500 μm 。热处理(前、后烘)是在甩胶台自带的热板上进行。曝光采用德国 Karl Suss 公司的 MA6/BA6 型双面曝光机, 曝光功率为 5 mJ/s。SU8 胶显影采用美国 Micro Chem Corp 生产的配套显影液, 主要成分为乙酸丙二醇单甲基醚酯, 室温清洗台内操作。

2 实验结果与分析

曝光是 SU8 胶光刻工艺中的关键一步。在曝光过程中, SU8 胶中的光引发剂六氟锑酸-三甲基硫盐吸收紫外光的光子后, 会立刻发生光化学反应, 反应的产物是 H^+SbF_6^- , H^+SbF_6^- 是一种强酸, 具有很强的提供质子的能力, 在后烘工艺中, 可以为树脂的交联反应提供质子, 起催化剂的作用, 其光化学反应见图 2。

曝光区域内的光刻胶含有光酸, 而未曝光区域的光刻胶则不含光酸, 因而未曝光区域也就不会发生 SU8 胶的交联反应。后烘完成了整个交联反应, 交联的程度既和曝光剂量有关, 也和烘烤条件有关, 所以在调整工艺参数时应两者进行综合考虑。

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, 胶膜底部的曝光量最弱。曝光后光引发剂所产生的光酸浓度与光强成正比。因此, 在曝光和非曝光区域产生光酸的浓度梯度, 光酸可以从曝光区域扩散到非曝光区域, 其中 SU8 胶表面的光酸扩散量最大。这样在横跨两相邻的曝光区域产生“不溶硬壳”, 如果“不溶硬壳”交联程度不是很高, 该区域在超声显影中可以被溶解掉, 如果交联度较高, 采用超声显影时, 不溶解于显影液。图 3 显示了光刻工艺后出现的“不溶硬壳”区域, 图 4 显示了“不溶硬壳”形成的机理。

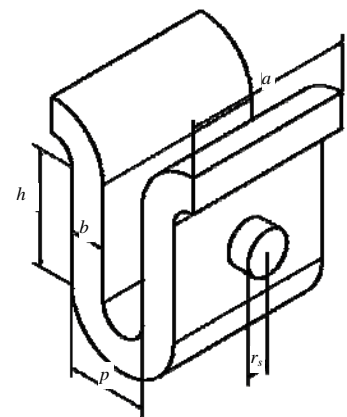


Fig.1 Diagram of 340 GHz folded waveguide SWS
图 1 340 GHz 折叠波导慢波结构的示意图

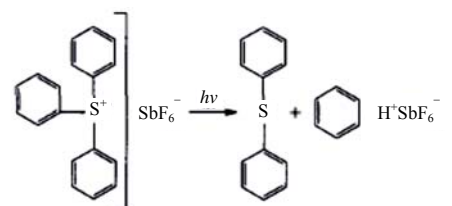


Fig.2 Chemical formula of acid catalyst generation
图 2 光酸形成的化学反应式

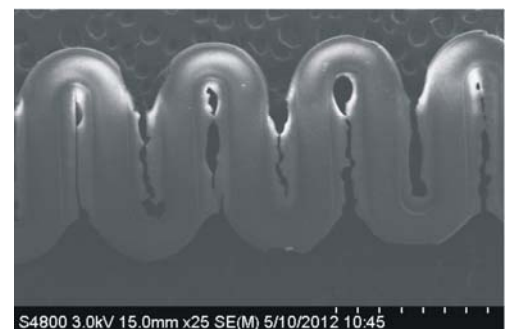


Fig.3 SEM picture of the “insoluble region”
图 3 “不溶硬壳”区域的扫描电镜图片

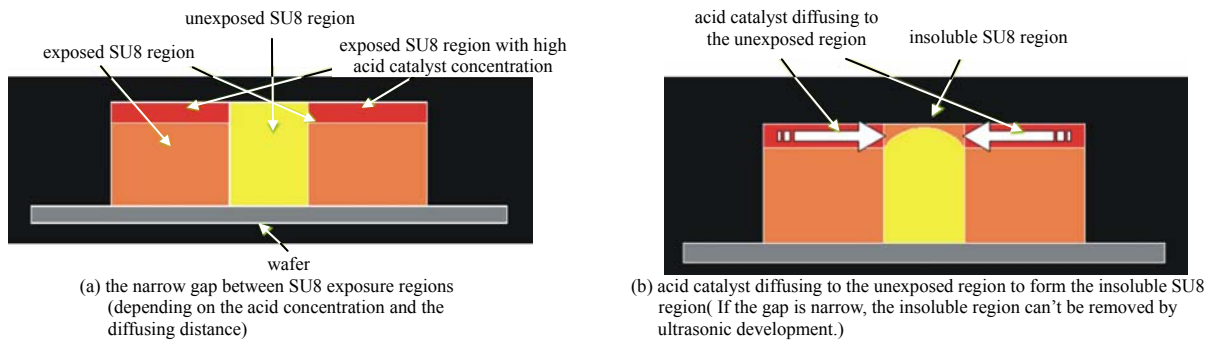
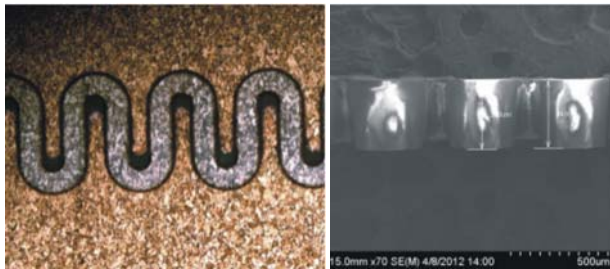
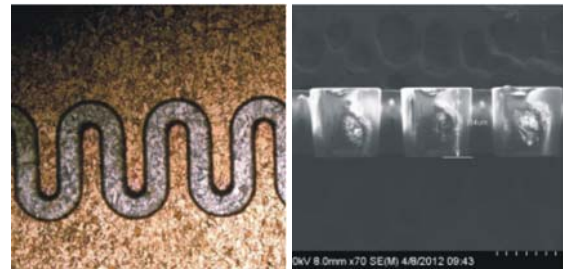


Fig.4 Diagram of "insoluble region" generation
图 4 “不溶硬壳”形成示意图

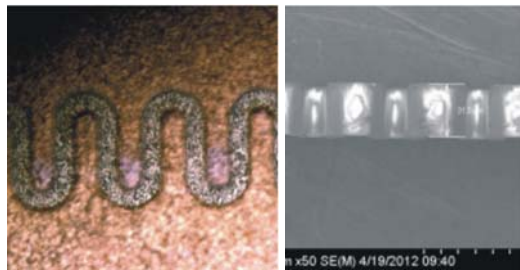
当曝光不足时，特别是对于厚光刻胶，曝光区域的光刻胶在后烘阶段不能充分交联，即使后烘充分，光刻胶也不能充分交联。在显影阶段，曝光不足部分在显影液中容易膨胀变软，图形从基底上脱落下来，未脱落的图形容易折断。



(a) optical microscope picture (b) SEM picture
Fig.5 SU8 models exposed by 320 s
图 5 曝光量为 320 s 时的胶膜图形



(a) optical microscope picture (b) SEM picture
Fig.6 SU8 models exposed by 280 s
图 6 曝光量为 280 s 时的胶膜图形



(a) optical microscope picture (b) SEM picture
Fig.7 SU8 models exposed by 240 s
图 7 曝光量为 240 s 时的胶膜图形



(a) optical microscope picture (b) SEM picture
Fig.8 SU8 models exposed by 200 s
图 8 曝光量为 200 s 时的胶膜图形

采用 320 s,280 s,240 s,200 s 曝光时间分别对 340 GHz 的胶膜进行曝光，经后烘显影后，胶模图形见图 5、图 6、图 7 和图 8。图 5 和图 6 为过曝光，图形表面有小面积的“不溶硬壳”，形成机理如上述，过曝光所产生的光酸在后烘阶段可使图形边界外的有机分子进行交联，从而使得图形线宽增大。图 7 为正常曝光，侧壁垂直度为 90°，图 8 为欠曝光，当曝光不足时，没有足够的光酸来交联图形内部的有机分子，在显影的过程中未交联的有机分子就溶解掉了，从而线宽就会变小。采用 240 s 曝光时间，结合优化的前烘、后烘及显影参数，得到与基底结合紧密的 SU8 胶模，胶模侧壁垂直度为 90°，线宽 $100\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ ，见图 9。

光刻完成后的基片经清洗、吹干后进行电铸。电铸完成后基片见图 10，电铸层光亮致密，无空洞，适合真空环境使用。电铸后进行去胶，有很多工艺可用于去除这种难对付的聚合物。物理方法包括水冲法、珠光处理，以及现有的激光消融、液氮冷冻/解冻等。此外，有些溶剂可以有效地使聚合物产生膨胀/爆裂/裂纹，但这些物理方法或溶剂只是去除某些简单几何图形的潜在途径，没有通用性。另一种去除和清洗有机物材料的极端方法，是实施完全的氧化过程。遗憾的是，这些强氧化性物质对大多数金属也存在无差别氧化的倾向^[2-3]。目前本实验室正在进行这方面的工作。

3 结论

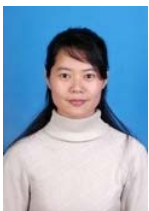
太赫兹器件的加工充分利用各种微细加工技术来实现,主要是体加工工艺。本文采用 UV LIGA 技术加工了全铜的 340 GHz 折叠波导,是制作太赫兹器件较为理想的加工工艺。本论文着重讨论了 UV LIGA 工艺中曝光量对光刻胶图形的影响,得出最佳工艺参数,所制作的胶模侧壁垂直度为 90° ,宽度的尺寸精确度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。目前,大功率微波电真空器件技术国防科技重点实验室正在对 340 GHz 折叠波导 UV LIGA 工艺做进一步的实验研究。

微机械技术与真空电子技术的结合,已成为微型真空电子器件和 RF MEMS 技术的全新研究方向。可加工的器件类型有折叠波导慢波结构、谐振腔、光子晶体结构等多种类型^[4-6],而且很可能有更新的结构出现。

参考文献:

- [1] 冯进军,唐焯,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] Martyn G Adamson, G Bryan Balazs, John F Cooper, et al. Integrated system for the destruction of organics by hydrolysis and oxidation with peroxydisulfate:US,6096283[P]. 2000.
- [3] Paul M Dentinger, W Miles Clift, Steven H Goods. Removal of SU-8 photoresist for thick film applications[J]. Microelectronic Engineering, 2002,61-62:993-1000.
- [4] Lawrence R Ives. Microfabrication of High-Frequency Vacuum Electron Devices[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004,32(3):1277-1291.
- [5] Bhattacharjee Sudeep, Booske John H, Kory Carol 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 Peng, Jiang Kyle, Sun Nianjun. Microfabrication of ultra-thick SU-8 photoresist for microengines[C]// Proceedings of SPIE, Proc. SPIE 4979, Micromachining and Microfabrication Process Technology VIII. San Jose, CA: [s.n.], 2003:105-110.

作者简介:



李含雁(1976-),女,浙江省嵊州市人,硕士,高级工程师,主要从事微细加工工作,利用 MEMS 技术制作太赫兹真空器件高频结构.email:liyany_2005@163.com.

唐焯(1983-),女,长春市人,硕士,工程师,主要从事短毫米波行波管以及太赫兹返波振荡器的研制。

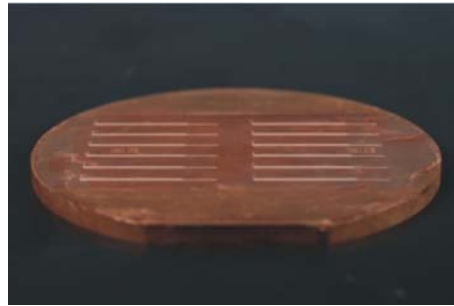


Fig.9 SU8 models with optimized process parameters (adhering to the wafer well with thickness of $300 \mu\text{m}$, and sidewall profile of 90°)

图9 优化工艺参数后的 SU8 胶模,胶膜图形与基底紧密结合,厚度约为 $300 \mu\text{m}$,侧壁垂直度为 90°

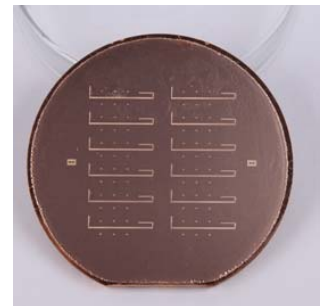


Fig.10 Photograph of the electroforming copper layer (very fine-grain, no porosity and protuberance)

图10 电铸层形貌:铸层颗粒细小,无空洞,无突起

白国栋(1976-),男,北京市人,硕士,高级工程师,从事微细加工工作,主要方向采用光刻沉积工艺制作冷阴极,并从事表面形貌的分析。

李兴辉(1971-),男,河南省平顶山市人,研究员,从事微细加工工作,主要从事冷阴极行波管的研制。

冯进军(1966-),男,山西省运城市人,研究员,博士生导师,现为 IEEE EDS 真空电子学技术委员会委员, IEEE Beijing Section 副主席,中电 12 所副总工程师,国防科技重点实验室副主任,主要从事真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS 技术、太赫兹真空电子学、高频集成真空电子学等领域的研究工作,研究的器件包括毫米波空间行波管、W 波段行波管、高功率回旋器件、太赫兹真空器件、铯束管等。