

雷达用高深宽比金属铜微通道散热器的制作*

李晓军¹, 吕辉², 朱和卿¹, 赵雯¹, 杜立群¹

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024;

2. 中国电子科技集团公司第十四研究所, 南京 210039)

[摘要] 基于电化学沉积技术在金属基底上制作了一种雷达用金属铜微通道散热器。针对使用高黏度 SU-8 胶制作高厚度胶膜时产生的胶厚不均匀问题, 采用研磨抛光工艺处理未曝光的胶膜, 提高了胶厚均匀性, 成功解决了由于空气间隙大带来的尺寸偏差。提出了一种在曝光显影前利用折射率计算胶厚的方法, 并通过最小二乘法确定了 SU-8 胶对钠黄光的折射率。针对高深宽比 SU-8 胶膜因曝光剂量选择不合适导致制作失败的问题, 通过光刻试验分析了曝光剂量对胶膜质量的影响, 确定了最优的曝光剂量为 $640\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。在上述工艺和试验的基础上得到了质量良好的 SU-8 胶膜, 并制作出了一种线宽 $50\mu\text{m}$ 、高度大于 $250\mu\text{m}$ 、深宽比大于 5 的金属铜微通道散热器, 验证了该制作工艺的有效性。

关键词: 金属微通道; 胶厚均匀性; 胶厚测量; 紫外光刻; 雷达

Fabrication of High-Aspect-Ratio Cooper Microchannel Cooling Device for Radar

LI Xiaojun¹, LÜ Hui², ZHU Heqing¹, ZHAO Wen¹, DU Liquan¹

(1. Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210039, China)

[ABSTRACT] A high-aspect-ratio copper microchannel cooling device for radar was fabricated on metallic substrate based on the electrochemical deposition technique. In view of the problem of non-uniform thickness in making thick film with high-viscosity SU-8 photoresist, lapping and polishing techniques were applied to the unexposed SU-8 film to improve the thickness uniformity and the dimension error caused by air gap was also reduced. A novel method to measure the thickness of unexposed SU-8 film using refractive index was proposed and the refractive index of SU-8 photoresist at yellow sodium light was obtained by least square method. In order to overcome the failure in making high-aspect-ratio SU-8 film due to inappropriate exposure dose, the effect of exposure dose on the quality of the film was discussed by lithography experiment and the optimal parameter was $640\text{mJ}/\text{cm}^2$. SU-8 film with good quality was acquired and a copper microchannel cooling device was fabricated based on the above techniques and experiment. The width is $50\mu\text{m}$, the height is over $250\mu\text{m}$ and the aspect ratio is over 5.

Keywords: Metallic microchannel; Thickness uniformity; Thickness measurement; UV lithography; Radar

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.095

雷达自发明至今已广泛应用于军事^[1]、通信^[2]和气象^[3]等领域。发射机是雷达的重要组成部分, 其内部包含大量电路, 具有很高的热流密度。热量若无法及时散出, 将严重影响电路的性能。因此, 高效散热是避免电路故障、保障雷达正常工作的关键。1981年, Tuckerman等^[4]首次提出了利用微通道解决集成电路

散热问题的方法, 他们制作了线宽为 $50\mu\text{m}$ 的硅微通道, 通过微通道内水的强制对流实现热量传递。相比于以空气为介质的对流散热, 利用微通道进行液冷散热具有更高的散热效率, 为电子设备高效散热开辟了新的途径。目前, 微通道的制作主要采用硅^[5]和金属两类材料。由于硅材料易碎、导热性差, 而金属材料具有更优异的机械性能和导热性, 因此金属微通道的制作得到了研究人员越来越多的关注。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51375077, 51475245); 大连理工大学创新团队项目(DUT16TD20)。

传统的微铣削^[6]和微细电火花^[7]等加工工艺常被用于金属微通道的制作,但以此类微细加工方式得到的金属微通道宽度较大,一般在200 μm 以上,而且表面粗糙度较大,会增大液体的流动阻力。而基于UV-LIGA工艺中紫外光刻和微细电铸的技术优势,电化学沉积可以得到线宽小、侧壁光滑、表面粗糙度小的金属微通道。Joo等^[8]利用AZ4620正性光刻胶在硅片上制作了宽5~8 μm 、高8~10 μm 的镍微通道。Pang等^[9]利用AZ9260正性光刻胶在玻璃基底上制作了宽100 μm 、高70 μm 的镍微通道。正性光刻胶单层涂覆胶厚小于50 μm ,因此难以用来制作高厚度、高深宽比金属微通道结构。SU-8胶作为一种常用的环氧树脂型负性光刻胶,对紫外光有很好的穿透性,吸收系数小,并且其单层涂覆胶厚可达100 μm 。利用SU-8光刻胶光刻可以得到深宽比较大的电铸胶膜型腔,并且侧壁垂直度好。因此,SU-8光刻胶是基于电化学沉积技术制作高深宽比金属微通道的首选^[10-11]。

使用SU-8胶制作微结构时,随着厚度和深宽比的增大,胶膜的制作难度也会增加。一方面高黏度的SU-8胶会产生胶厚不均匀的问题,并且在基底边缘处出现严重的边珠效应^[12],不平整的胶膜在曝光时会使胶膜产生尺寸偏差。已有的研究表明,利用胶膜自平整和调节前烘工艺参数可以适当改善胶厚均匀性^[13],但其改善效果对于制作高深宽比金属微通道仍显不足。为解决这一问题,Zhang等^[14]在硅片下方放置了软垫,通过使硅片弯曲变形的办法减小空气间隙,但这一方法并不适用于厚度为毫米量级的金属基底。另一方面,当厚度和深宽比较大时,SU-8胶膜的光刻也会变得更加困难。过小的曝光剂量会使胶膜出现“根切”现象^[15],过大的曝光剂量会使胶膜内产生较大的内应力。因此选择合适的曝光剂量是成功制作高深宽比胶膜的关键。综上所述,高深宽比SU-8胶膜制作的难点包括两个方面:胶膜厚度不均匀和选择合适的曝光参数。

本文围绕高深宽比SU-8胶膜制作的两个难点问题开展研究工作。针对胶膜厚度不均匀问题,采用研磨抛光的方法来改善胶膜厚度的均匀性。同时为了在研磨抛光过程中准确测量胶厚,提出一种利用折射率测量胶膜厚度的方法。针对曝光参数的选择问题,设计了光刻试验,分析了不同曝光剂量对胶膜质量的影响,得到了最佳光刻工艺参数。基于以上研究得到的结果,获得了质量良好的SU-8胶膜,并通过电沉积技术在铜基底上成功制作了深宽比大于5的金属微通道。

1 SU-8胶膜厚度均匀性研究

本课题组在前期研究中,利用电化学沉积技术制作

了线宽65 μm 、高度大于200 μm 的铜光栅结构^[11]。铜光栅采用了分层制作的工艺方案,即两次SU-8胶光刻和两次电铸。分层制作工艺虽然降低了制作难度,但也带来了侧壁垂直度差的问题。制作得到的铜光栅结构层间出现明显的分界线,侧壁不是光滑的连续平面。若采用相同的工艺制作散热金属微通道,不连续的侧壁形貌将严重影响微通道的散热性能。因此,本文对金属微通道的制作工艺进行了改进,采用两次匀胶、两次前烘、一次曝光显影、一次电铸的方法进行制作。

本文制作的散热金属微通道线宽为50 μm ,高度大于250 μm ,深宽比大于5。采用SU-8 2075光刻胶进行匀胶工艺,其单次匀胶厚度可达130 μm 以上。利用改进后的“两次匀胶、两次前烘”工艺得到的SU-8胶膜厚度达到260 μm 以上。由于SU-8 2075光刻胶的黏度高,为保证胶膜厚度又要采用低转速匀胶,因此基底上的整体胶膜厚度相差较大,且基底边缘处胶膜较厚。当胶膜厚度严重不均匀时,胶膜表面与掩膜版之间产生空气间隙,这会在曝光时导致紫外光发生衍射,使表面胶膜的曝光区域变大,显影后得到倒梯形胶膜结构,这种现象称为“T-top”^[16]。而尺寸发生变化的胶膜又会在微电铸过程中将这种变化转移到铸层上,最终导致金属结构的尺寸偏离设计值。因此,本文提出在曝光工艺前增加研磨抛光工艺来减小SU-8胶膜厚度的不均匀性。

1.1 基于折射率的胶膜厚度测量方法

在对胶膜进行研磨抛光处理的过程中需要及时测量胶厚,以确定是否达到要求。以往胶厚测量通常在曝光显影后完成,不适用于微通道器件对研磨抛光工艺的要求。因此,本文提出了一种在曝光显影前利用折射率测量胶厚的方法。

图1为基于折射率测量胶厚的原理示意图,阴影区

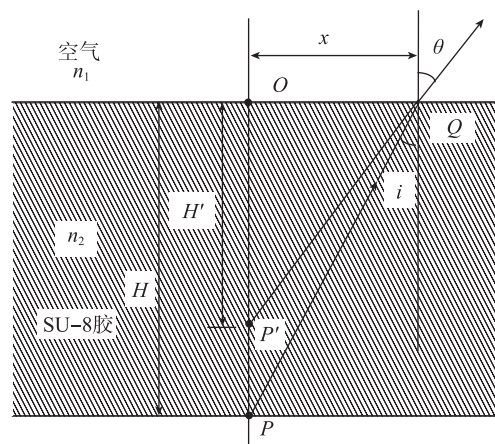


图1 胶膜测量原理

Fig.1 Measuring principle of thickness of SU-8 film

域为SU-8胶,折射率为 n_2 ,阴影上方区域为空气,折射率为 n_1 。 P 为基底上一点,即SU-8胶膜的最低点, P' 为人眼看到的该点虚像。 x 为该点与法线的水平距离, H' 为该点虚像到胶膜上表面的竖直距离,即胶膜的视觉厚度, H 为该点到胶膜上表面的竖直距离,即胶膜的实际厚度。 θ 为光线的入射角, i 为光线的折射角。

由光的折射定律可知:

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin i \quad (1)$$

由三角函数几何关系:

$$\tan \theta = \frac{x}{H'}, \tan i = \frac{x}{H} \quad (2)$$

结合式(1)和(2)可以得到:

$$\frac{H}{H'} = \frac{\tan \theta}{\tan i} = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \times \frac{\cos i}{\sin i} = \frac{n_2 \cos i}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2 \sin^2 i}} \quad (3)$$

已知空气的折射率 n_1 近似为1,观察点在被测点正上方时 $i=0$ 。由此得到:

$$H = n_2 H' \quad (4)$$

即SU-8胶的实际厚度为视觉厚度与其折射率的乘积。视觉厚度 H' 的确定方法如下:调节显微镜细准焦螺旋,使其焦点分别聚焦到胶膜顶面和底面,二者的高度差即为胶膜的视觉厚度。实际测量中所用显微镜产生的光为钠黄光,以远离SU-8胶的敏感波长区域。SU-8胶对钠黄光的折射率还未见相关文献提及。因此,为确定SU-8胶对钠黄光的折射率,本文测量了不同厚度胶膜的视觉厚度 H' 和实际厚度 H 。以 H' 为横坐标、 H 为纵坐标将数据点描绘在直角坐标系中,并通过最小二乘法拟合得到线性方程: $y=1.6542x$,如图2所示, H' 和 H 满足线性关系。本文将1.654作为测量胶膜厚度时SU-8胶的折射率数值。此方法不仅适用于SU-8胶的厚度测量,对其他光刻胶的厚度测量也有参考意义。

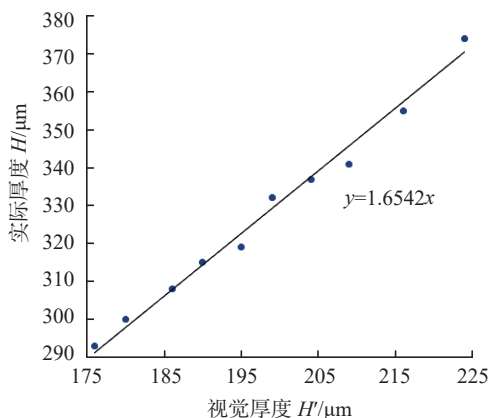


图2 最小二乘法计算SU-8胶的折射率

Fig.2 Refractive index of SU-8 photoresist measured by least square method

1.2 研磨抛光试验

1.2.1 试验流程

试验共有A、B两组样片,使用SU-8 2075在预处理后的铜基底上分别进行两次匀胶并前烘。前烘后样片A不做处理,对样片B进行研磨抛光。处理过程中利用折射率对胶厚进行测量,直至胶厚趋于一致。待样片B处理完成后对A、B两片同时曝光,显影后利用Olympus STM6工具显微镜测量胶膜厚度和胶膜线宽,以对比研磨抛光工艺对胶厚均匀性和胶膜尺寸精度的改善效果。

1.2.2 试验结果及讨论

胶厚测量点选在结构周围,胶厚均匀性采用最大厚度差和均匀度评价。不均匀度的定义为:

$$U = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\text{ave}}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, H_{\max} 为胶厚最大值; H_{\min} 为胶厚最小值; H_{ave} 为所有测量点胶厚的平均值。为测量显影后的胶膜线宽,每一阵列随机选取两条胶膜作为测量对象,每条胶膜再纵向选取两个测量位置,结果取平均值。

图3为两个样片的胶厚分布,均匀性分析结果见表1。从表1中可以看出,样片A未经研磨抛光处理,两次匀胶后胶厚不均匀现象十分明显,最大厚度差为56 μm ,不均匀度为19.1%。而样片B经过研磨抛光处理后,胶厚不均匀性得到明显改善,最大厚度差减小到11 μm ,不

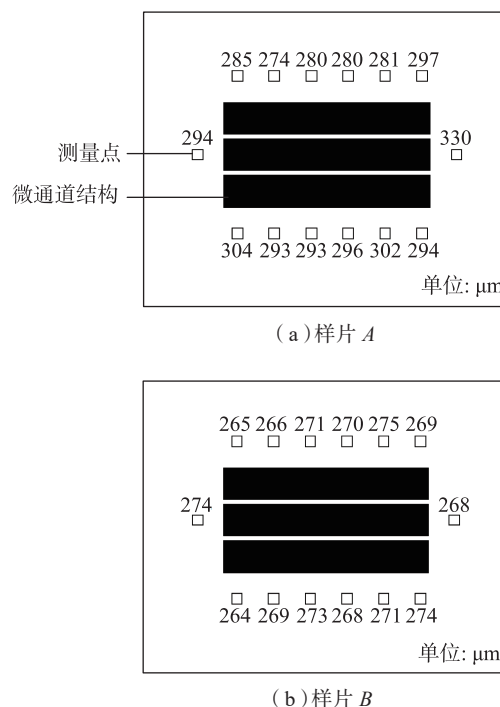


图3 SU-8胶膜厚度分布

Fig.3 Thickness distribution of SU-8 film

均匀度则减小为 4.1%。

表 2 为胶膜线宽测量结果,可以看出,当胶膜不进行研磨抛光处理时,胶膜线宽平均值为 50.1 μm ,误差达到 5.1 μm ; 而进行研磨抛光处理后,胶膜线宽平均值为 45.5 μm ,误差减小到 0.5 μm 。这表明,研磨抛光工艺可以有效提高 SU-8 胶膜厚度的均匀性,减小空气间隙导致的尺寸偏差,提高制作精度。

2 SU-8 胶膜光刻工艺研究

SU-8 胶对曝光剂量十分敏感,尤其是在制作高深宽比胶膜的过程中,不合适的参数会导致胶膜质量差甚

至制作失败等问题。当曝光剂量过小时,由于紫外光在 SU-8 胶中的衰减,到达胶膜底部的紫外光不足以产生足够的光酸,这使得底部胶膜在后烘时交联不充分,易在显影液中部分溶解,这些被部分溶解的胶膜变得不透亮,在显微镜下呈黑色。这种现象被称为“根切”。“根切”现象会导致底部胶膜线宽变小,一方面影响尺寸精度,另一方面减小胶膜与基底的接触面积,影响二者的结合强度,严重时胶膜甚至会与基底分离。而当曝光剂量过大时,过多的光酸会导致 SU-8 胶交联过度,胶膜会产生较大的内应力,这会引起胶膜断裂甚至完全从基底脱落。

表1 SU-8胶膜厚度均匀性

Table 1 Thickness uniformity of SU-8 film

样片	胶厚最大值/ μm	胶厚最小值/ μm	最大厚度差/ μm	不均匀度/%
A	330	274	56	19.1
B	275	264	11	4.1

表2 胶膜线宽测量结果

Table 2 Measurement results of film linewidth μm

样片	胶膜线宽	掩膜线宽	误差
A	50.1	45	5.1
B	45.5	45	0.5

本次制作的微通道结构线宽为 50 μm ,考虑 SU-8 胶的溶胀效应^[17]将掩膜版尺寸缩放到 45 μm ,而单行结构的长度为 6mm。因此,单个 SU-8 胶条的长宽比大于 130 μm 、深宽比接近 6,这样尺寸特征的胶条刚度极差,光刻参数必须选择适当。为了确定合适的曝光剂量,本文进行了光刻试验,对 4 片高度约为 280 μm 的 SU-8 胶膜施加不同的曝光剂量,显影后观察胶膜质量。曝光光强为 8.0mW/cm²,将曝光时间定为 60s、70s、80s、90s,由此得到相应的曝光剂量。

如图 4(a) 所示,当曝光剂量为 480mJ/cm² 时, SU-8 胶膜不透亮,在显微镜下完全呈黑色,出现“根切”现象,这表明曝光剂量过小。当曝光剂量增大至 560mJ/cm² 时,如图 4(b) 所示,中间区域出现了少量透亮的胶膜,但整体胶膜的发黑现象依然严重,表明“根切”现

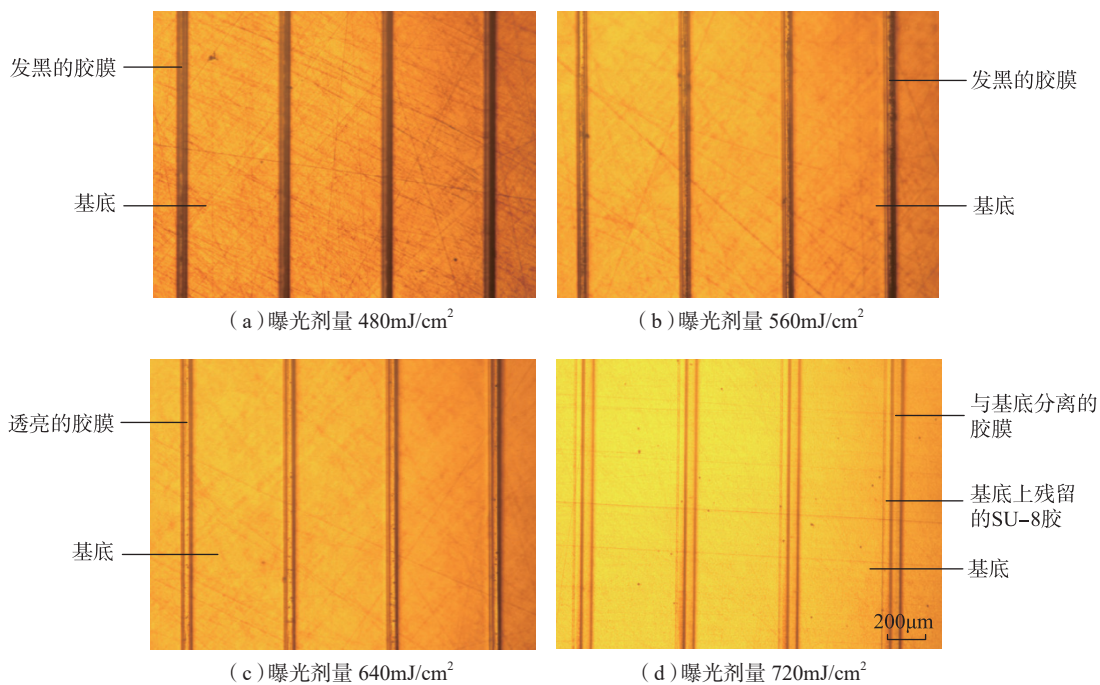


图4 不同曝光剂量下的显影结果

Fig.4 Developing results of different exposure dose

象有所改善,但曝光剂量仍旧偏小。继续增大曝光剂量至 $640\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,如图 4 (c) 所示,整个胶膜完全透亮,“根切”现象消失,表明曝光剂量适当。当曝光剂量达到 $720\text{mJ}/\text{cm}^2$ 时,如图 4 (d) 所示,显影后得到的胶膜完全与基底分离,基底上可见残留的 SU-8 胶,这表明曝光过量,胶膜内产生了较大的内应力,显影后应力释放。而胶膜刚性差,难以抵抗变形,最终在内应力作用下与基底分离。

以上光刻试验的结果表明,利用 $640\text{mJ}/\text{cm}^2$ 的曝光剂量得到的 SU-8 胶膜质量最好,同时避免了“根切”现象和内应力过大的问题,是制作金属微通道结构的最佳光刻工艺参数。

3 金属铜微通道制作

金属微通道的制作流程如图 5 所示。其工艺步骤共分 7 步,具体描述如下:

(1) 基底预处理。

使用精密研磨抛光机对铜基底进行研磨抛光处理。然后将预处理好的基底依次浸入丙酮、乙醇中进行超声清洗;之后用去离子水将基底冲洗干净,并用氮气将其吹干;最后将基底置于烘箱中烘干待用。

(2) 第 1 层 SU-8 胶。

使用台式匀胶机在铜基底上旋涂 SU-8 2075 光刻胶,转速为 $850\text{r}/\text{min}$ 。前烘在烘箱中完成,温度从 65°C 到 85°C 阶梯升高,共进行 3h。

(3) 第 2 层 SU-8 胶。

使用台式匀胶机在前烘过后的第 1 层 SU-8 胶膜上旋涂 SU-8 2075 光刻胶,转速同第 1 层。本次匀胶后可得到总高度大于 $260\mu\text{m}$ 的胶膜。前烘参数同第 1 层。

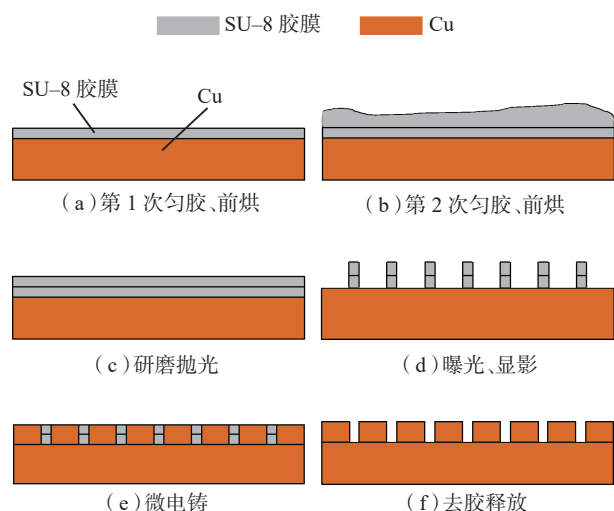


图5 金属微通道制作流程

Fig.5 Fabrication process of metallic microchannel

(4) 研磨抛光。

采用粒度为 3000# 的砂纸对前烘后的胶膜进行研磨,处理过程中采用折射率的方法对胶厚进行测量,直至胶厚一致。之后采用粒度为 $3.5\mu\text{m}$ 的金刚石水溶性抛光膏对研磨后的胶膜进行抛光,抛光完成后用蘸有去离子水的棉球去除胶膜表面残留的抛光膏。

(5) 曝光显影。

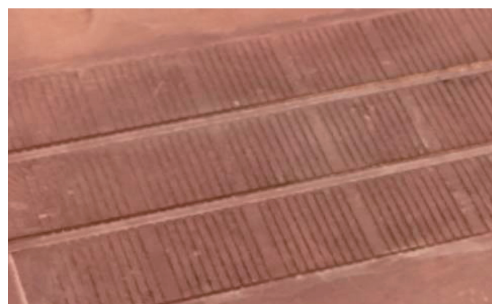
使用 SUSS MA6 曝光机对研磨抛光后的 SU-8 胶膜进行曝光,曝光剂量为 $640\text{mJ}/\text{cm}^2$;曝光后,将带有 SU-8 胶膜的基底置于 85°C 的热板上后烘 7min,冷却并静置 24h;随后,在 SU-8 显影液中显影 10min,得到电铸所用的光刻胶模具。

(6) 微电铸。

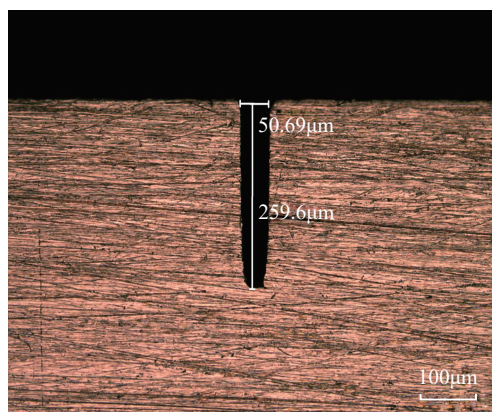
铜电铸液的主要成分包括: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ($220\text{g}/\text{L}$)、 NaCl ($60\text{mg}/\text{L}$)、浓 H_2SO_4 ($50\text{g}/\text{L}$)。电铸温度为 $20\sim 30^\circ\text{C}$,电铸液 pH 值为 $0.8\sim 1.0$,电流密度为 $100\text{A}/\text{m}^2$,电铸时间为 40h。

(7) 去胶释放。

电铸后将整个带有结构的基底浸入 SU-8 胶去胶液中并水浴加热,去除交联的 SU-8 胶后即得到铜微通道结构,如图 6 所示。



(a) 整体图



(b) 横截面图

图6 制作完成的金属铜微通道

Fig.6 Images of copper microchannel

4 结论

本文基于电化学沉积技术在金属基底上制作了雷达用金属微通道散热器,主要研究成果如下:

(1)在曝光前采用研磨抛光的工艺方法对SU-8胶膜进行处理,提高了胶厚均匀性,成功解决了由于空气间隙大带来的尺寸偏差。

(2)提出了一种在曝光显影前利用折射率计算胶膜厚度的方法,并通过最小二乘法确定了SU-8胶对钠黄光的折射率为1.654。

(3)通过光刻试验分析了曝光剂量对胶膜质量的影响,确定了制作高深宽比胶膜的合适曝光剂量为 $640\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

(4)基于研磨抛光工艺和光刻试验的结果成功制作出线宽为 $50\mu\text{m}$ 、高度大于 $250\mu\text{m}$ 的金属铜微通道散热器。

在以上研究成果的基础上获得了质量良好的SU-8胶膜,并完成了微通道的制作,但以下两点还需要做进一步的研究:

(1)通过衍射理论分析计算不同空气间隙产生的尺寸偏差,使研究内容更加充实。

(2)电沉积过程中存在严重的电铸不均匀问题,不同区域的铸层厚度相差很大,这不仅会降低制作效率,还会增加后处理的难度。因此,后续会对电铸均匀性进行研究,提出有效的改善方法。

参考文献

- [1] 徐润君,陈心中.激光雷达在军事中的应用[J].物理与工程,2002,12(6):36-39.
- XU Runjun, CHEN Xinzong. Application of lidar in military[J]. Physics and Engineering, 2002, 12(6): 36-39.
- [2] 李朝伟,周希元,刘福来.雷达/通信信号侦察一体化技术[J].舰船电子对抗,2008,31(2):5-11.
- LI Zhaowei, ZHOU Xiyuan, LIU Fulai. Integrative reconnaissance technology for radar and communication signals[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2008, 31(2): 5-11.
- [3] 徐群玉,宁焕生,陈唯实,等.气象雷达在民航安全中的应用研究[J].电子学报,2010,38(9):2147-2151.
- XU Qunyu, NING Huansheng, CHEN Weishi, et al. Applications of meteorological radar for the civil aviation safety[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(9): 2147-2151.
- [4] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. High-performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126-129.
- [5] YU J R, CHENG P, MA Z Q, et al. Fabrication of miniature silicon wafer fuel cells with improved performance[J]. Journal of Power Sources, 2003, 124(1): 40-46.
- [6] VÁZQUEZ E, RODRIGUEZ C A, ELIAS-ZÚÑIGA A, et al. An experimental analysis of process parameters to manufacture metallic

micro-channels by micro-milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 51(9-12): 945-955.

[7] HUNG J C, CHANG D H, YIN C. The fabrication of high-aspect-ratio micro-flow channels on metallic bipolar plates using die-sinking micro-electrical discharge machining[J]. Journal of Power Sources, 2012, 198(1): 158-163.

[8] JOO Y, DIEU K, KIM C J. Fabrication of monolithic microchannels for IC chip cooling[C]// Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems. New York: IEEE, 1995.

[9] PANG A J, DESMULLIEZ M P Y, LEONARD M, et al. Design, manufacture and testing of a low-cost micro-channel cooling device[C]// Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference. New York: IEEE, 2004.

[10] LEE S J, CHEN Y P, HUANG C H. Electroforming of metallic bipolar plates with micro-featured flow field[J]. Journal of Power Sources, 2005, 145(2): 369-375.

[11] 杜立群,鲍其雷,赵明,等.在金属基底上制作高深宽比金属微光栅的方法[J].光学精密工程,2015,23(3):700-707.

DU Liqun, BAO Qilei, ZHAO Ming, et al. Fabrication of metal micro-grating with high aspect ratio on metal substrate[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(3): 700-707.

[12] LEE H, LEE K, AHN B, et al. A new fabrication process for uniform SU-8 thick photoresist structures by simultaneously removing edge bead and air bubbles[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2011, 21(12): 125006-125013.

[13] CAMPO A D, GREINER C. SU-8: a photoresist for high-aspect-ratio and 3D submicron lithography[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(6): 81-95.

[14] ZHANG J, CHAN P B, MIAO J, et al. Reduction of diffraction effect for fabrication of very high aspect ratio microchannels in SU-8 over large area by soft cushion technology[J]. Microsystem Technologies, 2005, 11(7): 519-525.

[15] DAUNTON R, GALLANT A J, WOOD D. Manipulation of exposure dose parameters to improve production of high aspect ratio structures using SU-8[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(22): 75016-75023.

[16] 张金娅,陈迪,朱军,等.超厚SU-8负胶高深宽比结构及工艺研究[J].功能材料与器件学报,2005,11(2):251-254.

ZHANG Jinya, CHEN Di, ZHU Jun, et al. Process of high-aspect-ratio ultrathick SU-8 microstructure[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2005, 11(2): 251-254.

[17] 刘亚萍.超声改变SU-8胶溶胀性的机理及试验研究[D].大连:大连理工大学,2012.

LIU Yaping. Mechanism and experimental study on changing SU-8 photoresist swelling by ultrasonic treatment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

通讯作者:杜立群,教授、博士生导师,研究方向为MEMS加工工艺等,E-mail:duliquan@dlut.edu.cn.

(责编 逸飞)