

文章编号 1004-924X(2010)08-1793-08

# 采用过电铸工艺制造金属微细阵列网板

胡洋洋, 朱 菝, 李寒松

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对制作尺度  $< 10 \mu\text{m}$  的超小微细阵列网板非常困难的问题, 提出了采用过电铸工艺制造超小尺寸微细阵列网板的方法。建立了过电铸工艺过程的电场模型, 利用有限元分析技术对过电铸工艺过程进行模拟仿真。选取优化的工艺参数(烘胶  $120 \text{ }^\circ\text{C}/60 \text{ min}$ , 曝光  $3\ 000 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ , 显影  $2 \text{ min}$  等)利用光刻制作了高度为  $50 \mu\text{m}$ 、直径为  $50 \mu\text{m}$  的 AZ EXP 125nXT-10A 光刻胶群柱结构, 以此胶膜结构作为模具进行了过电铸工艺实验, 并与仿真结果进行对比, 结果证明了有限元仿真的正确性。最后, 通过过电铸缩孔  $2 \text{ h}$  获得了厚度达  $70 \mu\text{m}$ 、孔径为  $4 \mu\text{m}$  的微细阵列网板结构。实验表明, 过电铸工艺是一种低廉、安全、可批量生产的制作超小阵列网板的方法。

**关键词:** 光刻; AZ 胶; 金属微细阵列网板; 过电铸

**中图分类号:** TN305.7; TG662 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1793

## Fabrication of metal micro hole array by using over-plating technology

HU Yang-yang, ZHU Di, LI Han-song

(*Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China*)

**Abstract:** The over-plating technology was introduced to fabricate micro hole arrays, for it is difficult to fabricate a micro hole array with the size less than  $10 \mu\text{m}$  by traditional methods. A mathematical model was presented to simulate the over-plating process by Finite Element Method (FEM). Using the optimized parameters (bake  $120 \text{ }^\circ\text{C}/60 \text{ min}$ , exposure  $3\ 000 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ , and development  $2 \text{ min}$ ), the AZ EXP 125nXT-10A resist structure in a diameter of  $50 \mu\text{m}$  and a height of  $50 \mu\text{m}$  was prepared, and then the over-plating technology was employed to shrink the micro hole. The experimental result shows that the simulation result is correct. Finally, a micro hole array in a diameter of  $4 \mu\text{m}$  and a height of  $70 \mu\text{m}$  was fabricated after over-plating  $2 \text{ h}$ . The result indicates that over-plating is a simple and low cost method to fabricate micro hole array, and it is suitable for batch production.

**Key words:** lithography; AZ resist; metal micro hole array; over-plating

收稿日期: 2009-10-09; 修订日期: 2009-11-26.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA044205); 国家自然科学基金重点资助项目 (No. 50635040); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK2008043)

## 1 引言

金属微细阵列网板是许多高技术产品的核心零件之一,如航空发动机涡轮叶片的冷却孔,打印机喷板,纺织用喷丝板以及液压、化工、食品医药、粉体等行业的高效过滤网等等<sup>[1-4]</sup>。随着科技的发展,对微细阵列网板的尺度要求也越来越苛刻,例如为了获得完美的图像解析度,分辨率高达 4 800 dpi 打印机的喷头出口尺寸仅为  $1\ \mu\text{m}$ ,而喷板厚度却高达  $100\ \mu\text{m}$ ;又如为了达到较好的雾化和吸收效果,药物喷雾器喷头出口尺寸要求在  $10\ \mu\text{m}$  以下,而网板厚度要求在  $60\ \mu\text{m}$  以上。类似的超小微细阵列网板的制造具有相当的难度,是国内外学术界和产业界持续关注的重要研究课题之一。目前,微细阵列网板的代表性制造工艺技术主要有 3 种<sup>[5]</sup>:化学(或电化学)刻蚀技术、激光加工技术和光刻-电铸技术。以化学或电化学溶解为工艺主体的刻蚀法存在侧向腐蚀问题,很难制造大深径比、高分辨率的金属微结构<sup>[6]</sup>。激光加工虽是一种柔性化的高效加工方法,理论上可以加工任何金属材料 and 任意形状,但其逐孔加工方式、较强的热效应及锥孔效应使其无法获得理想的加工效果且孔形精度低、孔壁粗糙<sup>[7]</sup>。光刻-电铸工艺在制造微细阵列网板方面具有加工精度高、孔形不受限制、材料适用范围广且性能可控、易实现光滑孔壁等技术优势,但受光刻胶深宽比的限制,光刻-电铸法不能直接获得高深宽比、小尺寸的微细阵列网板结构。

典型的光刻-电铸技术包括 LIGA 技术和以 SU-8 胶为主要光敏材料的 UV-LIGA 技术<sup>[8-9]</sup>。但是 LIGA 技术需要使用昂贵的同步辐射光源,成本过高;UV-LIGA 技术使用的交联 SU-8 胶很难去除<sup>[10]</sup>,如果通过灰化等方法去胶,去胶过程中产生的巨大内应力会使去胶后的微孔尺寸增大很多甚至翻倍。

AZ Exp 125nXT-10A 型光刻胶是一种新型负性光刻胶,由丙烯酸单体聚合而成,曝光后交联密度较低,很容易去除。以 AZ Exp 125nXT-10 光刻胶作为光敏材料,可以制作厚度达  $120\ \mu\text{m}$  的胶膜,但深宽比仅能达到  $6:1$ <sup>[11]</sup>,很难直接利用 AZ 胶制作高度达  $60\ \mu\text{m}$  以上,直径  $10\ \mu\text{m}$  以下的微细阵列网板结构。

本文利用 AZ 胶光刻制作胶膜,通过过电铸工艺制作了尺度  $<10\ \mu\text{m}$  的微细阵列网板结构,既解决了 SU-8 去胶的问题,又突破了 AZ 胶深宽比的限制。

## 2 过电铸工艺原理及沉积过程仿真

### 2.1 过电铸工艺原理

常规的光刻-电铸技术为了满足微结构的形状精度,电沉积金属层厚度不会超过光刻胶厚度。若电沉积厚度达到光刻胶厚度后继续电沉积过程,在电场作用下微孔将进行缩孔过程,此即过电铸工艺。本文提出利用过电铸工艺制造金属微细阵列网板结构,控制过电铸参数直至微孔缩小至所需尺寸,去胶后可得到金属微细阵列网板结构。图 1 所示为过电铸工艺过程示意图,图中  $\Gamma$  表示边界, $D$  为微孔初始直径, $d$  为缩孔后小孔直径,通过合理控制电沉积参数可以获得任意尺寸的微孔。

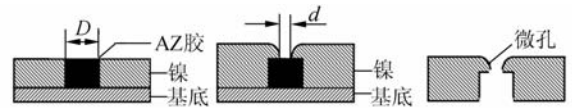


图 1 过电铸工艺过程示意图

Fig. 1 Schematic process of over-plating technology

### 2.2 过电铸工艺极间电场的数学模型

为研究问题方便,本文取电铸金属高度与光刻胶高度齐平的时刻作为仿真初始状态,以相邻的 3 个孔特征为研究对象,如图 2 所示。图中  $w$  为 AZ 胶圆柱直径  $50\ \mu\text{m}$ , $h$  为胶膜高度  $50\ \mu\text{m}$ , $l$  为相邻圆柱中心距  $150\ \mu\text{m}$ , $g$  为阴极与阳极表面的距离  $500\ \mu\text{m}$ 。

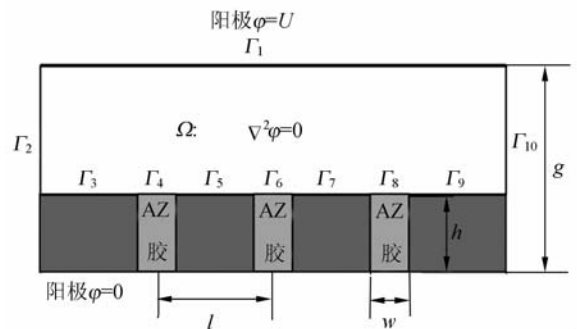


图 2 极间封闭区域内电场模型

Fig. 2 Electric potential distribution of over-plating technology

电沉积过程中,如果取足够小的时间间隔  $\Delta t$ ,可以近似地认为此沉积时间内阴极沉积面处于平衡状态,电场为静态。不考虑电化学极化和浓差极化,假设加工间隙内电解液电导率为常数,忽略边界效应,将极间电场近似地看作稳恒电场,同时假设电解液各向同性。在极间间隙内,电场服从 Laplace 方程:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

电沉积时,阴极接电源的负极、阳极接电源正极,因此在阴、阳表面形成两个不同电位的等位面,也就是在两个边界上各加上第一类边界条件:

$$\varphi|_{r_1} = U \quad (\text{阳极}) \quad (2)$$

$$\varphi|_{r_3} = \varphi|_{r_5} = \varphi|_{r_7} = \varphi|_{r_9} = 0 \quad (\text{阴极}), \quad (3)$$

此外,电铸中除去阴、阳极边界外,由胶膜形成的绝缘边界和其他边界应该封闭,或近似封闭,这些边界满足第二类边界条件:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad (\Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_6, \Gamma_8, \Gamma_{10} \text{ 边界}), \quad (4)$$

结合式(1)、(2)、(3)、(4),得到描述过电铸工艺加工电场分布的数学模型:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi | \Omega = 0 \\ \varphi|_{r_1} = U \\ \varphi|_{r_3} = \varphi|_{r_5} = \varphi|_{r_7} = \varphi|_{r_9} = 0, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} |_{\Gamma_{2,4,5,8,10}} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 过电铸工艺成型过程模拟加工

如图 3 所示,取阴极沉积面上的一点  $P_i(x_i, y_i)$ ,电沉积过程中,该点沿法向的沉积速率  $v_n$  ( $v_n = v_x i + v_y j$ ) 可用法拉第定律表示:

$$v_n = \frac{A\eta}{z\rho F} i_n, \quad (6)$$

式中,  $v_n$  为法向沉积速率 cm/s,  $i_n$  为法向电流密度 A/cm<sup>2</sup>,  $A$  为沉积金属的原子量  $g$ ,  $\eta$  为电流效率,  $z$  为沉积金属的离子价数,  $\rho$  为沉积金属的密度 g/cm<sup>3</sup>,  $F$  为法拉第常数。

根据欧姆定律,阴极面上法向电流密度为电导率  $\kappa$  与法向电场强度的乘积:

$$i_n = \kappa E_n, \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得:

$$v_n = \frac{A\kappa\eta}{z\rho F} E_n, \quad (8)$$

经过  $\Delta t$  时间后,阴极沉积面上的点  $P_i(x_i, y_i)$  移动到  $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 。由于金属离子在阴

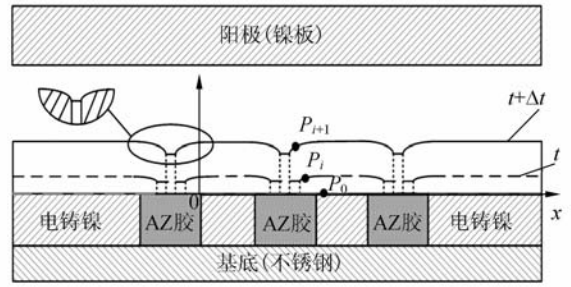


图 3 过电铸工艺沉积过程示意图

Fig. 3 Schematic process of over-plating technology

极表面的还原速度有限,所以如果取足够小的时间间隔  $\Delta t$ ,  $P_i$  点的瞬时速度  $v_n$  可看作不变,即在  $\Delta t$  内点  $P_i$  以不变的速度  $v_n$  运动到  $P_{i+1}$  点,金属在阴极  $P_i$  点的沉积厚度为  $v_n \cdot \Delta t$ 。沉积面上每一点都如此处理,这样在  $\Delta t$  之后得到新的阴极沉积面形状。根据式(8),阴极沉积面上新的点  $P_{i+1}$  的坐标  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  为:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + v_x \cdot \Delta t = x_i + \frac{A\kappa\eta}{z\rho F} E_x \cdot \Delta t \\ y_{i+1} = y_i + v_y \cdot \Delta t = y_i + \frac{A\kappa\eta}{z\rho F} E_y \cdot \Delta t \end{cases}, \quad (9)$$

因此,根据迭加原理,只要知道了初始的电极布局情况,就可以利用式(9)计算  $t$  时刻阴极沉积面上各个采样点经过  $\Delta t$  后的新坐标,得到  $t + \Delta t$  时刻阴极沉积面的型面。随着加工时间的推进,求解不断变化的阴极型面直到加工结束。本文采用有限元数值解法求解间隙内的电场分布,  $E_x$ ,  $E_y$  的数值可以从有限元分析模块方便地直接提取。

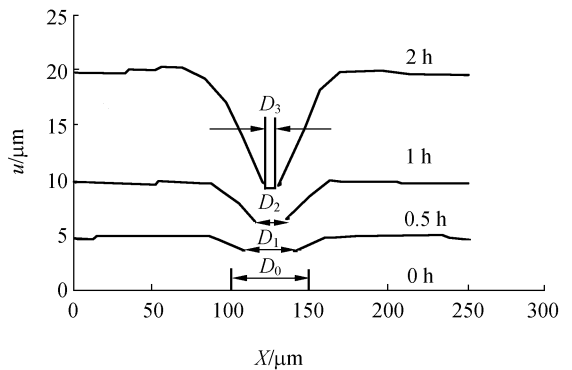


图 4 过电铸工艺仿真曲线图

Fig. 4 Simulation curves of over-plating process

图 4 是以图 2 所示的电场模型利用 ANSYS APDL 语言编程计算后,中间微孔的过电铸工艺

过程仿真曲线图,其中  $D_0, D_1, D_2, D_3$  分别表示过电铸工艺过程开始时和过电铸工艺过程开始 0.5 h, 1 h 和 2 h 后的微孔直径,其数值分别为  $50 \mu\text{m}, 27.8 \mu\text{m}, 16.1 \mu\text{m}$  及  $5.1 \mu\text{m}$ ;  $u_1, u_2, u_3$  分别为过电铸开始 0.5 h, 1 h 和 2 h 后电沉积的厚度,其数值分别为  $5 \mu\text{m}, 9.8 \mu\text{m}$  及  $20.1 \mu\text{m}$ ; 过电铸开始 0.5 h, 1 h 和 2 h 后微孔下陷的深度分别为  $1.3 \mu\text{m}, 3.7 \mu\text{m}$  及  $10.8 \mu\text{m}$ 。如图 4 可见,随着过电铸时间的延长,小孔的直径逐步缩小,且微孔呈碗状下陷的趋势也越来越明显。

图 5 和图 6 分别是过电铸工艺过程开始 0.5 h, 1 h, 2 h 后单个微孔周围电流密度的  $X$  分量和  $Y$  分量绝对值曲线图,其中  $D_1, D_2, D_3$  所示分别为过电铸开始 0.5 h, 1 h, 2 h 后的微孔直径。由图 5 可见,过电铸开始后,微孔边缘的电流密度  $X$  分量值较大,其它地方的电流密度  $X$  分量值近似为 0,且随着时间的增加,微孔边缘的电流密度  $X$  分量值逐渐减小,从而导致随着过电铸的进行,微孔的孔径将逐渐缩小且缩小的速度逐渐放缓。由

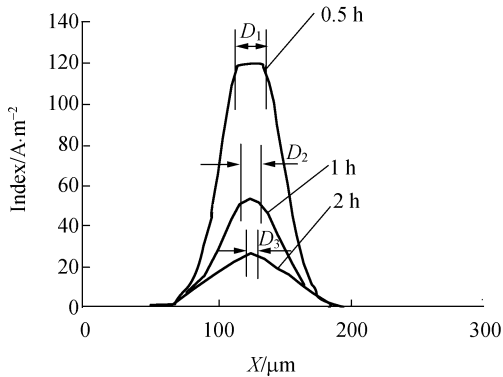


图 5 电流密度  $X$  分量曲线图

Fig. 5 Current density distribution along  $X$  orientation

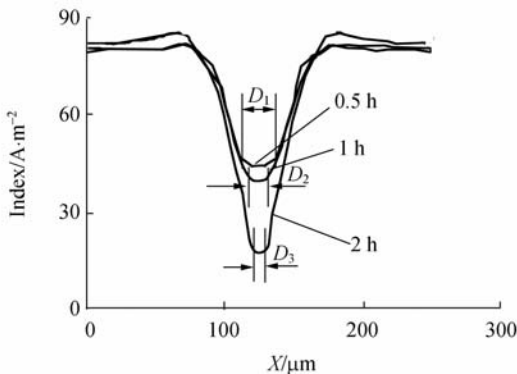


图 6 电流密度  $Y$  分量曲线图

Fig. 6 Current density distribution along  $Y$  orientation

图 6 可见,微孔边缘的电流密度  $Y$  分量值显著下降,其它地方电流密度基本一致,且随着时间增加,微孔边缘的电流密度  $Y$  分量值越来越小,这就导致微孔边缘处呈现下陷形貌且随着过电铸的进行,这种趋势越来越明显。图 5 及图 6 解释了为什么随着过电铸的进行会导致图 4 所示的形貌结构。

### 3 试验材料、设备及试验过程

#### 3.1 试验材料

本文使用的光刻胶为美国 AZ 电子材料公司生产的 AZ Exp 125nXT-10A 型光刻胶,显影液和去胶液分别为苏州瑞红公司生产的 RZX-3038 型显影液和 AZ 电子材料公司生产的 AZ 400T 型去胶液。为了方便电铸后脱模,试验采用不锈钢圆片(直径 50 mm,厚度 1 mm)作为基底。

#### 3.2 试验设备

烘胶台为北京创威纳科技有限公司生产的 BP-2B 型烘胶台;曝光机为信息产业部电子第四十五研究所生产的 BG-401 型光刻机,最大光强为  $30 \times 1000 \text{ W/cm}^2$ ;超声波发生器为宁波科生超声有限公司生产的 KS-300T 型超声清洗机,频率为 33 kHz,功率 0~300 W 可调;电铸电源是艾德克斯电子有限公司生产的 IT6921 型直流电源。另外,采用德国 EPK 公司生产的 MINIT-EST 600 覆层测厚仪测量胶膜厚度,美国 ADE 公司的 MicroXAM 型三维轮廓仪和日本电子公司的 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜检测形貌结构。

#### 3.3 试验过程

试验过程如图 7 所示,具体方法及参数如下:

(1) 如基底清洗图 7(a):基底先经磨平、抛光处理,抛光后粗糙度为  $R_a = 0.05 \mu\text{m}$ ,然后依次经过 10% 稀盐酸、10% NaOH 溶液、无水乙醇、去离子水清洗,保证表面没有酸、碱和油污残留。最后放入真空烘箱在  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  下烘烤 30 min,保证表面没水分残留。

(2) 如涂胶和烘胶图 7(b):为了获得厚度为  $50 \mu\text{m}$  的胶膜,采用两步涂胶方法,先以  $800 \text{ r/min}$  保持 10 s,再以  $3.3 \pi \text{ rad/s}^2$  的加速度升至  $1000 \text{ r/min}$  保持 25 s。涂胶后进入烘烤过程,直接在  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  下保持 60 min。然后,关闭电源,使

基底温度自然冷却至室温。

图 8 所示为 AZ Exp 125nXT-10A 负性光刻胶匀胶厚度与转速曲线图。

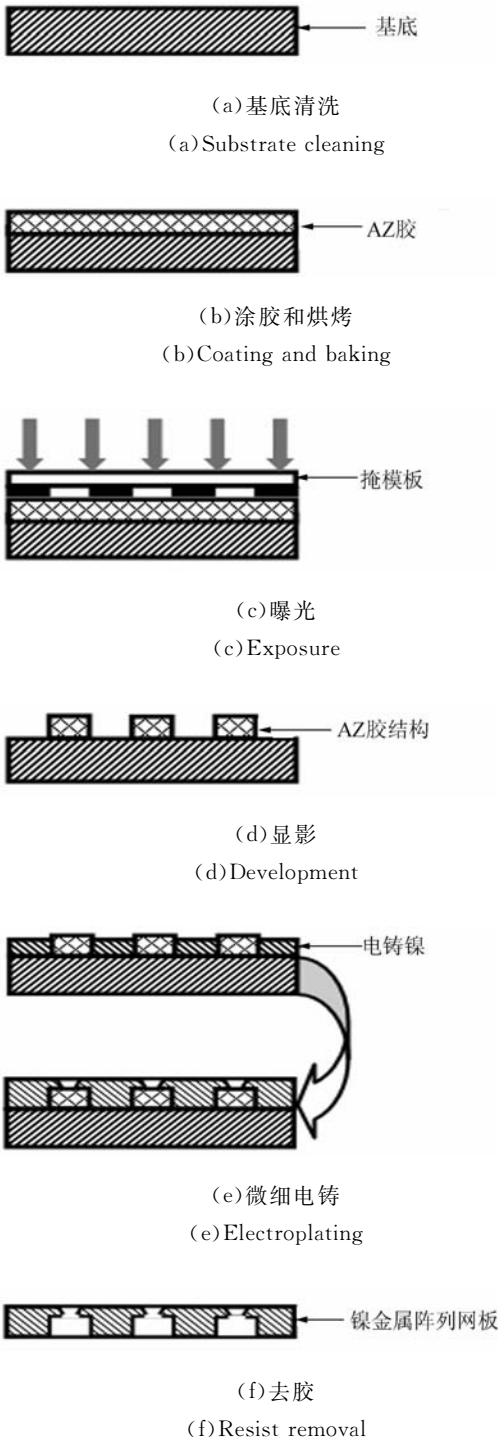


图 7 微细阵列网板金属网板制造示意图

Fig. 7 Fabrication process of micro hole array

(3) 如曝光图 7(c): 在 BG-401 光刻机上曝光, 曝光时间为 250 s, 曝光量为  $3\ 000\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

(4) 如显影图 7(d): 曝光后的基底浸入

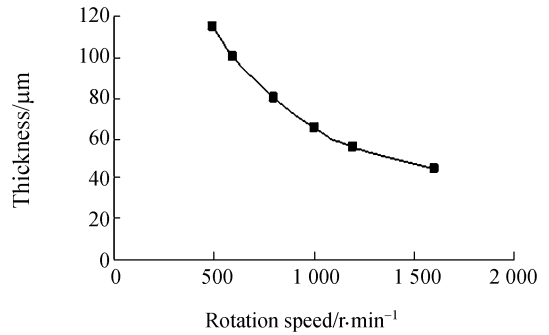


图 8 AZ 125 匀胶转速胶厚关系图

Fig. 8 Spin speed curve of AZ 125

TMAH 显影液中, 轻微振动 2 min, 用去离子水清洗后, 在  $150\ ^\circ\text{C}$  下烘 15 min 进行坚膜。

(5) 如电铸图 7(e): 采用氨基磺酸镍电铸液进行电铸, 电铸液组成与工艺条件见表 1。

(6) 如去胶图 7(f): 将电铸好的金属结构连同 AZ 胶膜一起放入  $80\ ^\circ\text{C}$  的去胶液中浸泡 2 h 使电铸金属与基底脱离, 最后用去离子水清洗金属网板后烘干。

表 1 电铸基础液组分与工艺条件

Tab. 1 Composing of electrolyte solution and operating conditions

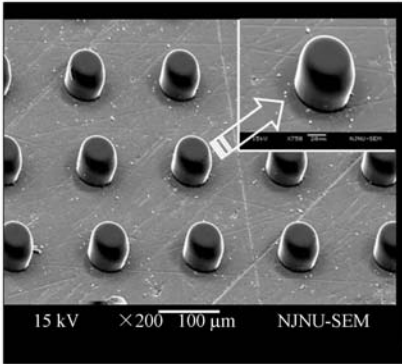
类别	参量或条件
氨基磺酸镍(浓缩液)	420 ml/l
氯化镍	6 g/l
硼酸	37.5 g/l
润湿剂	适量
电流密度	$100\ \text{A}/\text{m}^2$
温度	$25\sim 60\ ^\circ\text{C}$
搅拌	冲液搅拌

## 4 试验结果

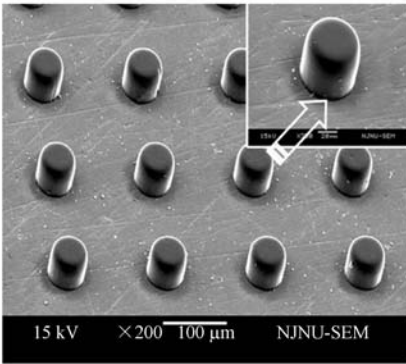
### 4.1 光刻过程

烘胶时要合理控制烘胶时间, 如果烘胶时间不足, 曝光过程中光刻胶极易粘附在掩模板上污染掩模板或导致图 9(a)所示的形貌。图 9(a)是按厂家推荐的烘烤时间烘烤 12 min 后得到的胶膜图形, 图中图形右侧的坍塌形貌是由于烘烤时间过短, 胶膜受掩模挤压导致胶流动形成的, 延长烘胶时间可以有效改善此类情况发生。图 9(b)是将烘胶时间

延长至 60 min 后的胶结构,侧壁陡直。图 9(b)所示是制作出的 AZ 胶模结构的 SEM 图,圆柱直径为  $50\ \mu\text{m}$ ,圆柱中心间距为  $150\ \mu\text{m}$ 。



(a) 烘烤 12 min  
(a) baking 12 min



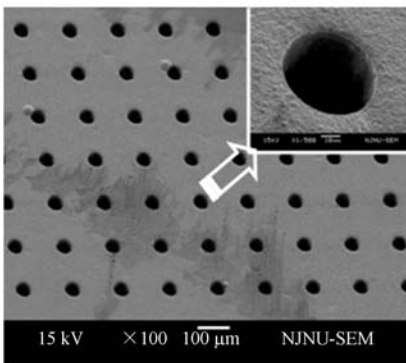
(b) 烘烤 60 min  
(b) bake 60 min

图 9 不同烘胶时间对比图

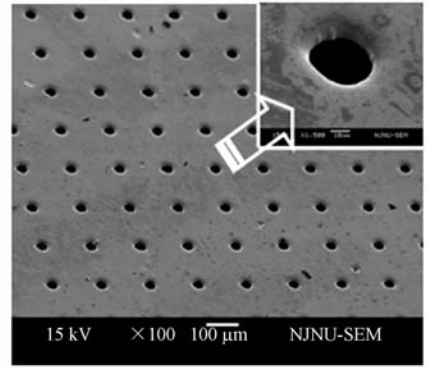
Fig. 9 SEM pictures of different baking time

### 4.2 过电铸工艺过程

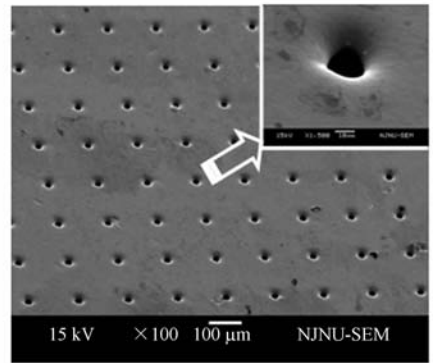
图 10 所示是过电铸开始后不同时间得到的



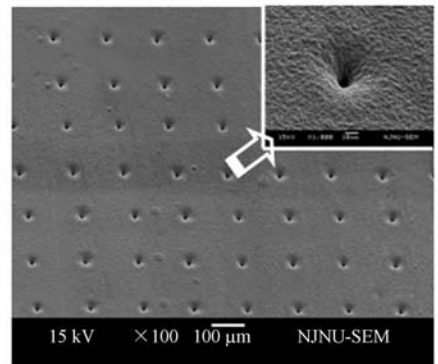
(a) 过电铸开始  
(a) Over-plating beginning



(b) 过电铸开始 0.5 h  
(b) After over-plating 0.5 h



(c) 过电铸开始 1 h  
(c) After over-plating 1 h



(d) 过电铸开始 2 h  
(d) After overplating 2 h

图 10 过电铸缩孔过程图

Fig. 10 SEM pictures of over-plating process

微孔 SEM 图,图 10(a)所示是过电铸工艺过程刚开始时微孔的 SEM 图,经检测,孔径仍为  $50\ \mu\text{m}$ ,网板厚度为  $50\ \mu\text{m}$ ,缩孔还未开始。图 10(b)是过电铸工艺过程开始 0.5 h 后微孔的 SEM 图,经

检测,此时微孔直径为  $28\ \mu\text{m}$ ,阵列网板厚度为  $55.3\ \mu\text{m}$ ,缩孔过程已开始,且微孔开始呈现碗状的下陷形貌。图 10(c)和图 10(d)分别是过电铸工艺过程开始后 1 h 和 2 h 后的微孔 SEM 图,经检测,微孔尺寸进一步缩小为  $15\ \mu\text{m}$  及  $4\ \mu\text{m}$ ,网板厚度增长为  $60.2\ \mu\text{m}$  及  $70.8\ \mu\text{m}$ ,微孔凹陷深

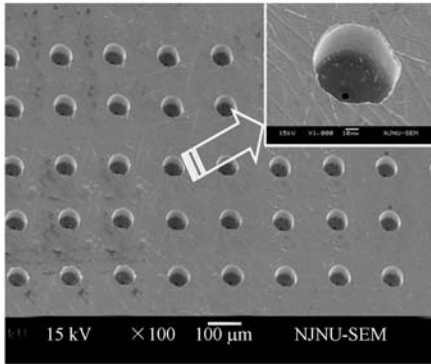


图 11 过电铸 2 h 后孔背面 SEM 图

Fig. 11 SEM of back of micro hole array after overplating 2 h

度也愈来愈大。图 10 的形貌及尺寸与图 4 的过电铸仿真结果基本一致。图 11 所示为过电铸工艺过程开始 2 h 后微孔的背面 SEM 图,其中大孔为胶膜尺寸  $50\ \mu\text{m}$ ,小孔为缩孔后的微孔尺寸  $4\ \mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

本文提出了采用过电铸工艺制作超小尺寸微细阵列网板的方法。建立了过电铸工艺的电场模型,利用有限元技术对过电铸工艺过程进行了仿真,并通过实验验证了仿真的正确性。通过优化的光刻参数(烘胶  $120\ ^\circ\text{C}/60\ \text{min}$ ,曝光  $3\ 000\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ ,显影  $2\ \text{min}$  等)制作了高度为  $50\ \mu\text{m}$ ,直径为  $50\ \mu\text{m}$  的 AZ 胶群柱结构,通过过电铸工艺获得了厚度为  $70\ \mu\text{m}$ ,孔径仅为  $4\ \mu\text{m}$  的微细阵列网板结构,如果合理控制电铸时间,可以获得孔径更小的阵列网板结构。试验表明,过电铸工艺是一种简单、低廉、可批量生产的制作超小微细阵列网板的方法。

## 参考文献:

- [1] 刘福顺,徐惠彬,宫声凯,等. EB-PVD 热障涂层对激光打孔孔径及热循环后孔径变化影响的研究[J]. 航空学报,2003,24(2):178-182.  
LIU F S, XU H B, GONG SH K, *et al.*. Investigation on effect of EB-PVD thermal barrier coatings on diameters of gaseous envelope cool and thermal circles[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2003,24(2):178-182. (in Chinese)
- [2] CHUNG C K, LIN C J, CHEN C C, *et al.*. Combination of thick resist and electroforming technologies for monolithic inkjet application[J]. *Microsystem Technologies*, 2004,10(6-7):462-466.
- [3] 郭磊,杨崇倡,戴惠良,等. 喷丝板大长径比微小导孔加工工艺[J]. 工具技术,2008,42(1):97-99.  
GUO L, YANG CH CH, DAI H L, *et al.*. Machining technology of large length-diameter ratio pilot micro-hole of spinneret [J]. *Tool Technology*, 2008,42(1):97-99. (in Chinese)
- [4] WANG W, ZHU D, ALLEN D M, *et al.*. Non-traditional machining techniques for fabricating metal

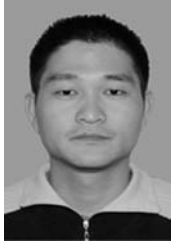
- aerospace filters[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008,21(5):441-447.
- [5] GOUKLER B R. Metal stencil overview [J]. *SMT Surface Mount Technology Magazine*, 2001, 15(4):84-87.
- [6] DATTA M. Fabrication of an array of precision nozzles by through-mask electro chemical micromachining[J]. *Journal of Electrochemical Society*, 1995,142(11):655-669.
- [7] 巴瑞璋,张晓兵. 激光加工密集群孔技术[J]. 航空制造技术,2003,(7):68-71.  
BA ZH R, ZHANG X B. Large machining closely spaced holes [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2003,(7):68-71. (in Chinese)
- [8] TAKAHATA K, GIANCHANDANI Y B. Batch mode micro-electro-discharge machining[J]. *Microelectromech. Syst*, 2002,11(2):102-110.
- [9] MING P M, ZHU D, ZHOU F, *et al.*. Fabrication of metal micro-precision sieves with high open areas using UV-LIGA process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009,17(6):1267-1273.
- [10] 崔峰,靖向萌,赵小林,等. SU-8 胶模去除技术

[J]. 微细加工技术, 2007(1):1-6.

CUI F, JING X M, ZHAO X L, *et al.*. Techniques for remove of SU-8 photoresist mold [J]. *Microfabrication Technology*, 2007(1):1-6. (in Chinese)

[11] CHEN CH W, PLASS B, EDWARD N, *et al.*. Development of thick negative photoresists for electroplating applications [J]. *Advances in Resist Materials and Processing Technology XXV*, 2008, 6923:69233E-1-69233E-8.

#### 作者简介:



胡洋洋(1982—),男,江苏徐州人,博士研究生,1999年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事微机电系统和精密、微细加工方面的研究。E-mail: hyy502@nuaa.edu.cn



李寒松(1975—),男,河南洛阳人,博士,副教授,2006年于西安交通大学获得博士学位,主要从事纳米压印、特种加工、微细加工等方面的研究。E-mail: hsl75@nuaa.edu.cn

#### 导师简介:



朱 荻(1954—),男,辽宁沈阳人,博士,博士生导师,长江学者特聘教授,1985年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京航空航天大学校长,主要从事特种加工和微细加工的研究。E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn

#### ● 下期预告

## 用动态光散射现代谱估计法测量纳米颗粒

杨 晖<sup>1</sup>, 郑 刚<sup>1</sup>, 王雅静<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 淄博 山东 255049)

为了解决目前动态光散射软件信号分析法采用的自相关和功率谱估计法存在的分辨率和方差较低,以及能谱泄漏问题,提出了基于现代功率谱估计的动态光散射信号分析法,对该系统所采用的现代功率谱估计算法和测量系统进行了研究。首先,介绍了动态光散射测量法的光子相关光谱理论和散射光谱估计理论。接着,详细说明了动态散射光谱的现代功率谱估计算法,特别是其中阶数  $p$  的计算方法。然后,介绍了测量系统包括硬件系统和软件系统,硬件部分可分为光学系统和信号采集处理系统,软件部分介绍了系统的开发流程。最后,分别采用粒径为 30, 50, 100 nm, 溶液透光率为 96% 的乳胶球标准颗粒溶液进行了实验。实验结果表明:现代谱估计分析法的测量均值误差和重复性误差的平均值分别为 1.88% 和 1.62%, 满足国标要求的均值误差和重复性误差小于 2%。