

文章编号 1004-924X(2015)03-0700-08

## 在金属基底上制作高深宽比金属微光栅的方法

杜立群<sup>1,2\*</sup>, 鲍其雷<sup>2</sup>, 赵明<sup>2</sup>, 王翱岸<sup>2</sup>

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 辽宁省微纳米及系统重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**根据光学领域对高深宽比金属微器件的需求,利用 UV-LIGA 工艺在金属基底上制作了具有高深宽比的金属微光栅。采用分层曝光、一次显影的方法制作了微电铸用 SU-8 胶厚胶模,解决了高深宽比厚胶模制作困难的问题。由于电铸时间长易导致铸层缺陷,故采取分次电铸等措施得到了电铸光栅结构;同时通过线宽补偿的方法解决了溶胀引起的线宽变小问题。在去胶工序中,采用“超声-浸泡-超声”循环往复的方法。最终,制作了周期为 130  $\mu\text{m}$ 、凸台长宽高为 900  $\mu\text{m} \times 65 \mu\text{m} \times 243 \mu\text{m}$  的金属微光栅,其深宽比达到 5,尺寸相对误差小于 1%,表面粗糙度小于 6.17 nm。本文提出的工艺方法克服了现有方法制作金属微光栅时高度有限、基底易碎等局限性,为在金属基底上制作高深宽比金属微光栅提供了一种可行的工艺参考方案。

**关键词:**金属微光栅;高深宽比;UV-LIGA 工艺;SU-8 厚胶;微电铸

**中图分类号:**O436.1;TH741.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0700

## Fabrication of metal micro-grating with high aspect ratio on metal substrate

DU Li-qun<sup>1,2\*</sup>, BAO Qi-lei<sup>2</sup>, ZHAO Ming<sup>2</sup>, WANG Ao-an<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: duliqun@dlut.edu.cn

**Abstract:** According to the requirements of optical fields for metal micro devices with higher aspect ratios, a metal micro-grating with the high aspect ratio was fabricated on a metal substrate by using the UV-LIGA technology. The “exposure step by step” and “development once” were used to fabricate a SU-8 thick photoresist mold with high aspect ratio to overcome the technologic difficulty in fabrication processing. For the defects of electroforming layer caused by long operation time, the fractional electroforming and other methods were adopted to obtain the electroforming grating structure. At the same time, the line width compensation method was taken to solve the problem that line width of SU-8 photoresist mold was reduced by swelling. In the process of stripping photoresist after electroforming, the ultrasonic method and soaked method were alternately used.

收稿日期:2014-07-03;修订日期:2014-08-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375077, No. 51075057)

Finally, the metal micro-grating with a period of  $130\ \mu\text{m}$ , and a size of  $900\ \mu\text{m} \times 65\ \mu\text{m} \times 243\ \mu\text{m}$  was fabricated. The high aspect ratio of the metal micro-grating reaches 5, and its relative error on overall dimensions is lower than 1%. Moreover, the surface roughness of metal micro-grating is lower than  $6.17\ \text{nm}$ . This research breaks the height limitation and substrate fragile of the exciting fabrication methods for metal micro-gratings with high aspect ratios.

**Key words:** metal micro-grating; high aspect ratio; UV-LIGA technology; SU-8 thick photoresist; micro electroforming

## 1 引言

作为光学仪器核心单元器件之一,金属微光栅不仅可用于光谱测量,还被广泛应用于科研和生产,尤其在计量、无线电天文学、集成光学、光通信、信息处理等诸多领域有着重要应用<sup>[1]</sup>。随着金属微光栅需求量不断增长,其加工制作方法越来越受到科研人员关注。现有的金属微光栅的制作主要是以硅为基底,通过溅射、制作掩蔽层、刻蚀等工艺实现。

卓丽霞等<sup>[2]</sup>通过在硅片上溅射一层铝薄膜后结合光刻工艺制作掩蔽层,最后进行湿法刻蚀铝薄膜,制作了周期为  $8\ \mu\text{m}$ ,高度为  $0.3\ \mu\text{m}$  的铝光栅;但该金属光栅高度有限。郑改革等<sup>[3]</sup>首先将环烯烃聚合物(COP)薄膜旋涂在硅片衬底上;接着在压印出光栅结构后溅射 Au 薄膜,形成 COP 和 Au 的复合结构;然后采用 Ar 和  $\text{CF}_4$  混合气体刻蚀上表面的金,再用氧反应离子刻蚀残留的 COP 层,最后制作了最大高度为  $1\ \mu\text{m}$  的金光栅。该光栅侧壁倾斜、高度有限,工艺复杂且成本较高。另外,二者都采用易碎的硅片为基底,制作过程中易出现因基底碎裂而失败的问题。

本文基于 UV-LIGA 技术,采用分层曝光、一次显影以及分次电铸的方法,在金属基底上制作了高深宽比金属微光栅,突破了现有方法中在硅基底上制作金属微光栅的高度有限和基底易碎等局限。该方法解决了制作过程中高深宽比胶模制作困难、胶模溶胀、基底与铸层以及铸层之间结合力差、铸层缺陷多、SU-8 胶去胶困难等问题,为金属基底上制作高深宽比金属微光栅提供了参考,对微光学器件的制作研究具有借鉴意义。

## 2 金属微光栅的制作流程

UV-LIGA 工艺制作金属光栅的流程如图 1 所示。在经过预处理的基片上经 2 次匀胶、分层曝光以及 1 次显影的光刻工艺过程得到 SU-8 胶模;然后在此胶模上进行微电铸,电铸后进行人工研磨抛光;再将 SU-8 胶去除得到金属微光栅,并溅射一层铜薄膜。最后对获得的金属光栅进行结构尺寸测量。

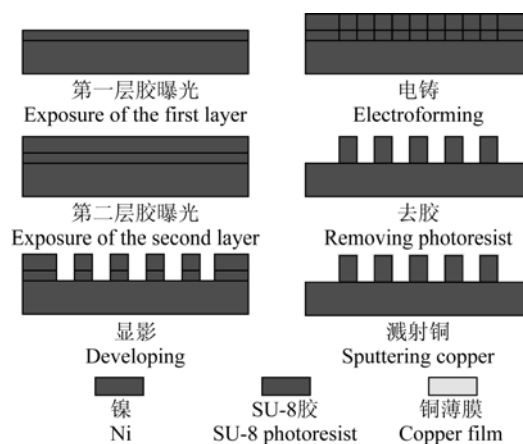


图1 UV-LIGA 工艺制作金属微光栅的流程

Fig. 1 Fabrication details of metal micro-grating based on UV-LIGA

### 2.1 基板预处理

实验制作的金属微光栅如图 2 所示:光栅 1 个周期长度为  $130\ \mu\text{m}$ ,总长为 60.5 个周期,横向宽度为  $900\ \mu\text{m}$ ,槽深为  $243\ \mu\text{m}$ ,槽宽为  $65\ \mu\text{m}$ 。

根据光栅综合尺寸,选用  $63\ \text{mm} \times 40\ \text{mm} \times 3\ \text{mm}$  的镍基板作为基底。为保证后续制作工艺中 SU-8 胶模的质量和曝光时的对准精度,匀胶前先将镍板研磨、抛光;然后用丙酮棉球将基板表

面擦拭干净,接着分别用丙酮和乙醇超声清洗 10 min,再用纯水冲洗干净后吹干;最后在 120℃ 的烘箱中烘焙,去除水汽后冷却至室温。

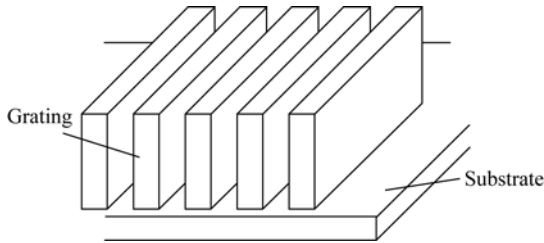


图 2 金属微光栅示意图

Fig. 2 Diagram of metal micro-grating

## 2.2 SU-8 胶模的制作

胶模制作流程如图 3 所示,采用 2 次匀胶、曝

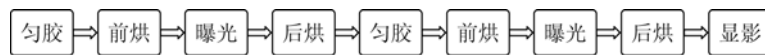


图 3 SU-8 胶模制作的工艺流程

Fig. 3 Fabrication details of SU-8

## 2.3 微电铸

微电铸是 UV-LIGA 工艺的关键步骤,采用在基板上直接电铸生长的无背板生长工艺<sup>[4]</sup>。电铸过程中施以阴极移动和循环过滤,电铸液的配比与文献[5]相同。电铸速率为 8~10  $\mu\text{m}/\text{min}$ ,电铸总时间达 30 h 以上,分 3 次进行,每次电铸层的厚度约为 100  $\mu\text{m}$ 。

## 2.4 后处理

(1)人工研磨抛光。由于电铸过程中电场的边缘效应,电铸层表面不平整,铸层外边缘较中间厚,因此采用人工研磨的方法对电铸层表面进行研磨抛光,以获得平整的电铸层表面。采用 2000# 砂纸研磨和粒度为 2.5~3.0  $\mu\text{m}$  的抛光膏进行抛光,总去除量为 5~20  $\mu\text{m}$ 。

(2)去除 SU-8 胶。交替使用 SU-8 去胶液浸泡法和超声振荡法去除 SU-8 胶,以获得干净的

金属微光栅结构。首先,使用转速置为 1 000~1 100 r/min 的台式匀胶机在基底正面旋涂第一层 SU-8 光刻胶,胶厚为 150~170  $\mu\text{m}$ ,在水平桌面上静置 30~35 min;接着在 85~95℃ 下进行前烘,时间为 1~2 h,并随炉冷却;曝光是在曝光机上使用 SU-8 胶敏感的 365 nm 波长的紫外光接触式完成的,光强为 10~13  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ,曝光时间为 2~5 min;紧接着进行后烘,在 85℃ 热板上加热 3~5 min;冷却后进行 SU-8 胶的第二次旋涂,转速为 1 200~1 300 r/min,胶厚为 110~130  $\mu\text{m}$ ;随后的第二次静置、前烘、曝光及后烘步骤同上;最后,用 SU-8 显影液显影 10~20 min,得到干净的 SU-8 胶模。

金属微光栅结构。

(3)真空退火。为了减小电铸层的残余应力、减小变形和裂纹倾向,以增加金属光栅与基底的结合力,去胶后进行了真空退火。退火时间为 1~1.5 h,温度为 300~400℃。

(4)溅射铜工艺。将退火后的光栅微结构溅射一层铜薄膜以降低表面电导率。射频溅射工艺参数为:真空压强  $3 \times 10^{-3}$  Pa,溅射时间 6~10 min,速率 50~65  $\text{nm}/\text{min}$ 。

## 2.5 结构尺寸的测量

为了对制作的微金属光栅的结构尺寸进行评价,使用美国 Zygo 公司的 NewView 5022 型白光干涉表面轮廓仪对光栅微结构的综合尺寸和表面粗糙度进行无损测量。测量结果为:微金属光栅的尺寸相对误差  $\leq 1\%$ ,表面粗糙度  $\leq 6.17$  nm。

表 2 光栅综合尺寸及表面粗糙度测量结果

Tab. 2 Measuring results of overall dimensions and surface roughnesses for grating

名称	测量值						均值	目标值
光栅宽度/ $\mu\text{m}$	65.9	65.1	65.0	64.7	65.7	66.6	65.5	65
光栅周期/ $\mu\text{m}$	132.0	129.8	130.0	130.5	129.0	131.2	130.4	130
光栅高度/ $\mu\text{m}$	245.5	244.1	246.3	246.1	245.3	246.4	245.6	243
粗糙度 $R_a/\text{nm}$	4.13	3.18	5.39	4.16	4.76	6.17	4.6	<10

### 3 工艺问题及讨论

#### 3.1 高深宽比 SU-8 胶模制作

微电铸工艺本身存在一定的缺陷,即电场线分布不均匀会导致电铸层厚度不均匀。本文形成的光栅结构厚度要求为 270 μm,由于厚胶边珠效应的影响,即使经过长时间自平整,边缘胶模厚度仍在 350 μm 以上,光刻时深宽比超过 5,因此胶模制作困难。针对以上问题采取如下解决方法。

(1)减小边珠效应。胶模越厚,甩胶后边珠效应越明显,在接触式曝光过程中,由于光的衍射效应会造成结构尺寸误差。因此,要尽量减少边珠效应的影响。文中分 2 次匀胶,匀胶时采用由低转速到高转速的方法,使得边珠效应明显减小,提高了胶模的尺寸精度。

(2)分层曝光和一次显影。波长一定的紫外光在 SU-8 胶中传播时,由于光刻胶中的光引发剂吸收光子而发生光化学反应,光强不断被削弱。假定 SU-8 胶为均匀介质,根据 Lambert 经验定律,可得到光强在 SU-8 胶中的传播公式<sup>[6]</sup>:

$$I(z) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z), \quad (1)$$

式中:α 表示 SU-8 胶对紫外光的吸收系数, z 表示 SU-8 胶的厚度(方向与光传播方向相同), I<sub>0</sub> 表示 SU-8 胶上表面的光强大小, I(z) 表示 SU-8 胶厚度为 z 时的光强大小。曝光剂量为:

$$J(z) = I(z) \cdot t, \quad (2)$$

式中: J(z) 表示 SU-8 胶厚度为 z 时的实际曝光剂量大小, t 表示曝光时间。

由式(1)和(2)可得,在相同曝光时间下,随着胶厚的增加, SU-8 胶实际曝光剂量呈指数递减,底部 SU-8 胶的曝光剂量设为 m<sub>1</sub>,顶部设为 m<sub>2</sub>, SU-8 胶任意厚度的实际曝光剂量 J(z) ∈ [m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>]。SU-8 胶曝光时,曝光剂量存在一个有效范围,设为 [n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>]。若 J(z) < n<sub>1</sub>,则实际曝光剂量不足,从而引发的光化学反应中产生强酸的量不足。此时,即使在适当的后烘条件下, SU-8 胶的交联也不充分,从而将影响胶模的图形质量和胶模与基底的结合力,严重时显影过程中胶模会从基底脱落;若 J(z) > n<sub>2</sub>,则实际曝光剂量太大,光的衍射对光刻图形的影响加剧,图形线宽将大于掩模版图形线宽,且随曝光剂量的增加此偏差逐渐拉大。当两图形之间间隔较小时,图形线宽的

增加量将占据沟道的位置而使沟道变窄,严重时会出现显影后沟道发黑且沟道弯曲现象,如图 4 所示,白色部分是显影露出的金属基底。

因此,只有当 [m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>] ⊆ [n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>] 时,才算曝光成功。曝光参数选择的难易程度取决于比例系数  $k = \frac{m_2 - m_1}{n_2 - n_1}$ , k 越小曝光参数越容易选择,反之越困难。



图 4 一次性曝光的显影结果(×50)

Fig. 4 Developing results after exposure for one time(×50)

然而,经分层涂胶和前烘后, SU-8 胶模若采用一次性曝光,则下层 SU-8 胶的前烘时间是上层的 2 倍。随着前烘时间增加,下层 SU-8 胶对紫外光的吸收系数变大<sup>[7]</sup>,由式(1)可知, SU-8 胶的光强随着胶厚的增加迅速衰减,而吸收系数越大,光强衰减越快,如图 5 所示。此时, (m<sub>2</sub> - m<sub>1</sub>) 变大, k 增大。严重时 k 可能大于 1, 此时无论如何选择曝光参数,都无法显影成功。

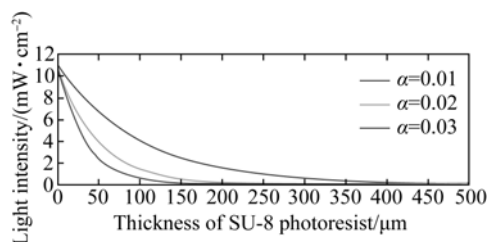
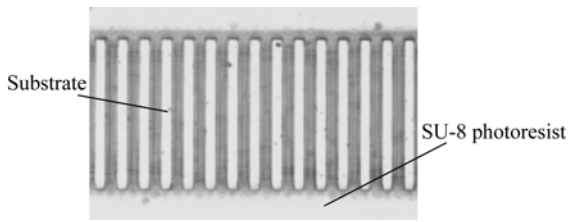


图 5 光强在不同吸收系数下随胶厚衰减示意图

Fig. 5 Schematic diagram of light intensity attenuation along with thicknesses of photoresist at different absorption coefficients

鉴于以上原因,实验采用 2 次匀胶后分层曝光、一次显影的方法,使得每次曝光的胶模厚度和深宽比相对于一次曝光减小一半,紫外光在 SU-8 胶模中的衰减随之减小,曝光剂量均匀,显影容易成功。采用此方法制作的 SU-8 胶模如图 6 所示,白色亮条为显影后露出的金属基底。

图 6 分层曝光显影结果( $\times 50$ )Fig. 6 Developing results after exposure layer by layer( $\times 50$ )

### 3.2 SU-8 胶溶胀现象

在显影和电铸过程中, SU-8 胶高分子与显影液、电铸液中的溶剂小分子之间存在化学势梯度, 由此产生的渗透压会使电铸液中的小分子渗入到高聚物内部, 使高聚物体积变大<sup>[8]</sup>, 即 SU-8 胶在显影和电铸过程中产生溶胀现象, 从而影响微结构的尺寸精度, 而且随着胶厚的增长, 溶胀作用更为明显。因此, 为了保证微金属光栅最终尺寸精度, 根据本项目组关于 SU-8 胶溶胀性的研究成果<sup>[8-10]</sup>, 对 SU-8 胶施加超声以减小溶胀的影响。同时对光刻掩模板进行了尺寸补偿。掩模板各个尺寸补偿后槽宽为  $(65-8) \mu\text{m}$ , 凸台宽为  $(65+8) \mu\text{m}$ , 周期长度和横向宽度不变。

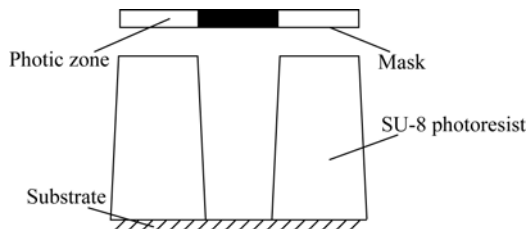


图 7 紫外光在 SU-8 胶中衍射示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ultraviolet light diffraction in SU-8 photoresist

若无溶胀的影响, 由于紫外光在曝光过程中的衍射效应会使 SU-8 胶胶模的微沟道上宽下窄。在掩模版图形线宽为  $65 \mu\text{m}$ , 胶厚  $243 \mu\text{m}$  时, 仅考虑衍射效应时, SU-8 胶沟道底部理论宽度的减少量小于  $1 \mu\text{m}$ , 侧壁近似垂直, 如图 7 所示。掩模版白色区域透光, 黑色区域遮光, 未曝光的 SU-8 胶显影时被去除。但是在溶胀现象的影响下, SU-8 胶侧壁的陡直度大大降低。图 8 所示为 SU-8 胶溶胀后的示意图, 图中两侧为显影后

留下的 SU-8 胶, 中间为微电铸过程中金属的生长空间。由下至上随着胶厚增加, SU-8 胶溶胀量增加, 当胶厚达到一定值时溶胀趋于饱和, 在此情况下进行微电铸, 所得金属铸层结构如图 9 所示。随着胶厚增加, 金属结构侧壁的倾角逐渐减小直至为 0, 即侧壁随着结构高度的增加, 越来越陡直, 直至垂直。

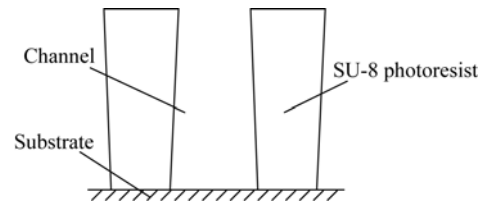


图 8 SU-8 胶溶胀示意图

Fig. 8 Schematic diagram of SU-8 photoresist swelling

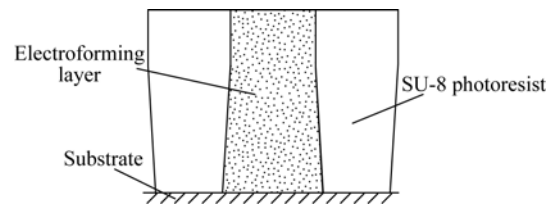


图 9 微电铸金属铸层结构示意图

Fig. 9 Diagram of metal electroforming layer structure after micro electroforming

分层曝光会使光刻过程中上下两层胶模的后烘时间不同, 下层胶模的后烘时间远远大于上层胶模; 而后烘时间过长, 会导致 SU-8 胶在发生交联反应时分子链网络中形成的缺陷增多。随着分子链缺陷的增加, SU-8 胶内自由体积增大, 溶剂容易在胶体内扩散, 从而表现为胶模溶胀增加。同时后烘时间过长, 会使 SU-8 胶内应力增大。由于胶层中内应力提高了水分子在环氧树脂中的传输速率<sup>[6,11]</sup>, 所以 SU-8 胶的溶胀行为与其胶层中的内应力密切相关。因此导致了由于后烘时间的延长, 下层胶模溶胀远大于上层胶模的现象, 出现了如图 10 所示的“台阶”。同时从图 10 中可以看出, 下层金属结构线宽随着高度增加不断减小, 上层金属结构线宽趋于稳定, 这与前面提到的“随着胶厚增加, SU-8 胶溶胀量随之增加; 且当胶厚达到一定值时溶胀趋于饱和”的规律一致。

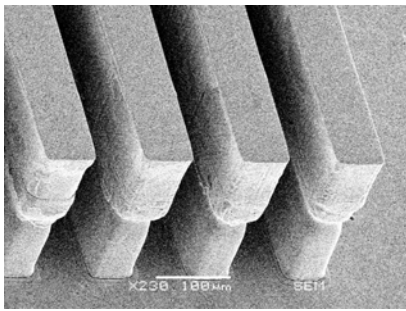


图10 分层曝光制作的金属微光栅

Fig. 10 Metal micro-grating based on process of exposure layer by layer

### 3.3 SU-8 胶的去除问题

作为电铸胶模的 SU-8 胶在结构制作完成后的去除是金属光栅制作后处理中的关键步骤。为了将 SU-8 胶去除干净,首先将具有光栅结构的基板浸泡在 80~90℃ 的 SU-8 去胶液中,浸泡 5~10 h 后施加超声 1~2 h,随后撤除超声继续用去胶液浸泡,如此“浸泡-超声-浸泡-超声”循环往复去胶,最终得到干净的光栅结构,如图 11 所示。

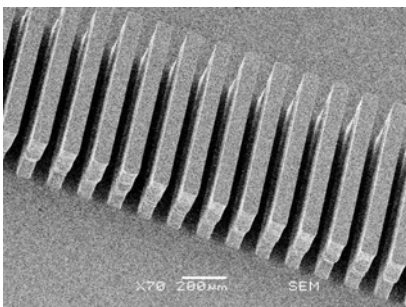


图11 SU-8 胶去除后的金属微光栅

Fig. 11 Metal micro-grating after removing SU-8 photoresist

超声振荡一方面可以使得去胶液浸入光栅槽中,减小残留的 SU-8 胶与基底和侧壁的结合力。另一方面超声振荡也削弱了金属微光栅与基底的结合力。超声时间过长,金属微光栅会从基底脱落。如图 12 所示,在 SU-8 胶还未去除干净时,在超声波作用下,2 条金属光栅结构已经从基底上脱落了。因此,为了保证光栅结构不脱落,采用了“超声-浸泡-超声”循环往复的方法去胶。

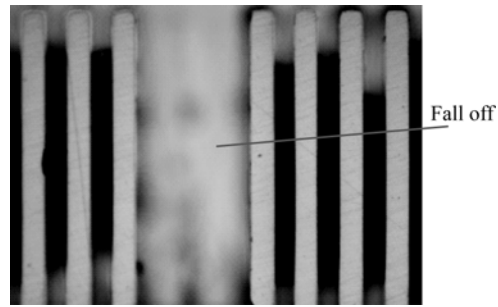


图12 金属微光栅从基底脱落(×50)

Fig. 12 Metal micro-grating falls off from the substrate(×50)

### 3.4 铸层与金属基底的结合力

本文提出的方法具有工艺步骤少、制作周期短、成本低等优点,但存在铸层与基底或者两铸层之间结合力小的问题。极易造成金属微光栅在制作过程中铸层从基底上脱落或者分层,导致金属微光栅制作失败。图 12 所示为由于金属光栅结构与基底结合力差,导致结构脱落的现象。因此为增强基底与铸层以及电铸层之间的结合力,采取了以下工艺措施:

(1) 等离子体去残胶。由于光栅的 SU-8 胶模的沟道深且狭长,因此在显影后、电铸前,会有残胶残留在沟道内。为了增大基底与电铸结构的接触面积,使用等离子体去胶机去除沟道内残胶,时间为 15~20 min。该过程不宜时间太长,否则产生的热量会对胶模产生损坏。

(2) 小电流活化<sup>[12-13]</sup>。采用小电流活化的预电铸方法:即在微电铸的开始阶段,先以小电流活化预铸,然后再以常规电流密度施铸。

(3) 真空退火。电铸结束后,铸层由于渗氢等原因不可避免地会有残余应力。残余应力分为张应力和压应力。当电铸层张应力过大时,铸层收缩力大于结合力,铸层易脱皮;压应力过大时,铸层膨胀力大于结合力,铸层易起泡。采用真空高温退火,可以减小电铸层的残余应力、减小变形和裂纹倾向,从而提高铸层与基底的结合强度。

通过采用上述工艺措施,微电铸层与基底的结合力以及微电铸层之间的结合力得到了明显的改善,金属微光栅的成品率显著提高。

### 3.5 电铸层缺陷

本文胶模边缘厚度达到 300 μm 以上,电铸时间超过 30 h。长时间电铸会造成电铸液 pH 值偏离最佳范围、铸液各个成分降低等电铸液老化问题,此时铸层会产生大量瘤状物、麻点、针孔等

缺陷,如图 13 所示。为了改善上述问题,采取了分次电铸的方法,并且每次电铸都采用新的铸液,以稳定各个成分的含量。但是,分次电铸易造成电铸结构分层,因此在保证铸层质量的前提下,应尽量减少电铸次数。当电铸时间在 9~13 h 时,析氢反应还是容易发生,而氢气析出容易造成铸层出现针孔、麻点、氢脆等问题。针孔是由于氢气在铸层表面长时间停留产生的,会在电铸后的金属光栅表面上留下大而深的圆孔,如图 14 所示,严重影响光栅的使用性能。因此,为了消除针孔缺陷、提高光栅的表面质量和使用性能,电铸过程中采取了以下措施:

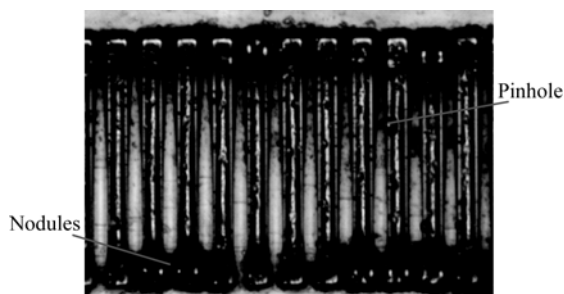


图 13 铸层缺陷( $\times 50$ )

Fig. 13 Defects of electroforming layer( $\times 50$ )

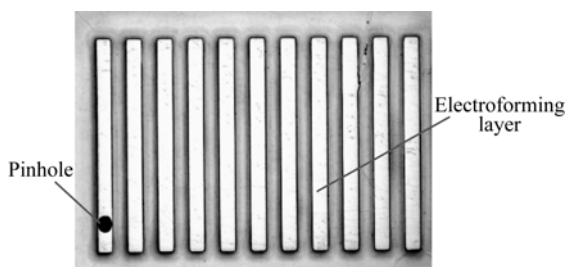


图 14 针孔现象( $\times 50$ )

Fig. 14 Phenomenon of pinhole( $\times 50$ )

#### 参考文献:

- [1] 王子强. 单级衍射光栅的设计与制作 [D]. 长春: 长春理工大学, 2013.  
WANG Z Q. *The Design and Fabrication of Single-order Diffraction Grating* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. (In Chinese)
- [2] 卓丽霞, 唐武, 戴瑶, 等. 膜厚对亚波长铝光栅红外反射率的影响 [C]. 第七届中国功能材料及其应

(1)控制 pH 值,减小氢气析出速率。由电沉积原理可知,在 pH 值高和镍离子浓度大的电铸液中,镍的沉积电位比氢的沉积电位高,可以先沉积出来,减少氢气的析出量<sup>[14]</sup>。但过高的 pH 值会使镍离子参与反应形成氢氧化镍沉淀,造成电沉积反应速率的降低甚至停止。因此,综合以上因素,选择 pH 值为 3.8~4.5,同时添加缓冲剂稳定 pH 值,以减小长时间电铸时 pH 值的变化量。

(2)提高氢气的逸出速率。由液相传质原理可知,电铸过程中施加搅拌和循环过滤能够加快液相传质,从而降低浓差极化,提高极限电流密度。同时还可防止氢气在阴极析出后黏附在镍的表面,有利于氢气的逸出。而添加表面活性剂十二烷基硫酸钠则可以降低电铸液和基板界面之间的张力,有利于使生成的氢气逸出。

## 4 结 论

本文根据光学领域对高深宽比金属微器件的需求,提出了利用 UV-LIGA 工艺在金属基底上制作金属微光栅的新方法。研究了制作工艺流程,解决了制作过程中遇到的工艺难题,如:电铸过程中 SU-8 胶的溶胀问题、微电铸层与基底的结合力问题、SU-8 胶的去胶问题等。制作了高度为 243  $\mu\text{m}$ 、深宽比达到 5 的金属微光栅,其尺寸相对误差 $\leq 1\%$ ,表面粗糙度 $\leq 6.17 \text{ nm}$ 。本文提出的工艺方法克服了现有方法制作金属微光栅时高度有限的局限性,为制作高深宽比金属微光栅提供了一种可行的工艺参考方案。

学术会议论文集(第 2 分册), 2010, 296-298.

ZHUO L X, TANG W, DAI Y, *et al.*. Influence of sub-wavelength aluminum grating's film thickness on infrared reflectivity [C]. *Proceedings of the 7th China functional materials and applications of academic (volume 2)*, 2010, 296-298. (in Chinese)

- [3] 郑改革, 陈云云, 徐林华, 等. 高深宽比金属光栅制作及中红外波段传感特性 [J]. 红外与毫米波学报, 2013, 02: 154-159.

ZHENG G G, CHEN Y Y, XU L H, *et al.*. Fabrication and application of high aspect ratio metallic

- gratings for sensing in the mid-infrared region [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(2):154-159. (in Chinese)
- [4] 李成斌. 电铸铜、镍金属微器件的工艺研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- LI CH B. *Process Study of Metal Micro Devices Fabricated by Copper or Nickel Electroforming* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 杜立群, 李成斌, 李永辉, 等. 超声时效技术在微注塑模具制作中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6):1250-1256.
- DU L Q, LI CH B, LI Y H, *et al.*. Application of ultrasonic stress relief technology to microinjection mold fabrication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1250-1256. (in Chinese)
- [6] WOURTERS K, PUERS R. Diffusing and swelling in SU-8; insight in material properties and processing [J]. *J. Micromech. Microeng*, 2010, 20(9):1-10.
- [7] JIN P, JIANG K, SUN N J. Micro fabrication of ultra-thick SU-8 photoresist for micro engines [C]. *Micromachining and Microfabrication. International Society for Optics and Photonics*, 2003, 105-110.
- [8] 杜立群, 朱神渺, 刘冲. UV-LIGA 工艺中 SU-8 光刻胶的热溶胀性研究 [J]. *压电与声光*, 2008, 30(5):621-623.
- DU L Q, ZHU SH M, LIU CH. Study on the thermal swelling of SU-8 photoresist in UV-LIGA technique [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2008, 30(5): 621-623. (in Chinese)
- [9] 杜立群, 刘亚萍, 李永辉, 等. 超声处理对 UV-LIGA 工艺中 SU-8 胶溶胀的影响 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 2006-2013.
- DU L Q, LIU Y P, LI Y H, *et al.*. Effect of ultrasonic treatment on SU-8 swelling in UV-LIGA technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2006-2013. (in Chinese)
- [10] 杜立群, 朱神渺, 喻立川. 后烘温度对 SU-8 光刻胶热溶胀性及内应力的影响 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3):500-504.
- DU L Q, ZHU SH M, YU L CH. Effect of post exposure bake temperature on thermal swelling of SU-8 photoresist [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):500-504. (in Chinese)
- [11] LEE M C, PEPPAS N A. Models of moisture transport and moisture-induced stresses in epoxy composites [J]. *Journal of Composite Materials*, 1993, 27(12): 1146-1171.
- [12] Du L Q, Li Y H, Liu J F. Influence of current density on the interfacial bond strength of electroformed layers [J]. *Micro and Nano Letters*, 2012, 7(5): 402-406.
- [13] SHAO L G, DU L Q, WANG L D. Electrochemical activation of substrate surfaces in micro-electroforming [J]. *Micro and Nano Letters*, 2013, 8(12): 872-876.
- [14] 肖日松, 杜立群, 刘海军, 等. 微电铸的析氢现象研究 [J]. *中国机械工程*, 2005(z1):446-448.
- XIAO R S, DU L Q, LIU H J, *et al.*. Research on phenomenon of hydrogen evolution in micro-electroforming [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005 (z1): 446-448. (in Chinese)

#### 作者简介:



杜立群(1996—),女,黑龙江望奎人,教授,博士生导师。1988年、1991年、1999年于东北大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为微机电系统。E-mail:duliquan@dlut.edu.cn



鲍其雷(1987—),男,安徽亳州人,硕士研究生,2012年于山东理工大学获得学士学位,主要从事微加工工艺方面的研究。