

# 计量光栅盘真空镀铬机理与工艺研究

陈赟, 王晓峰, 李艳茹

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 在计量光栅盘的制作过程中, 真空镀铬是影响计量光栅盘精度和成品率的主要工序之一。为了提高计量光栅盘的精度及成品率, 对计量光栅盘真空镀铬原理及膜层形成机理进行了分析, 给出了影响铬层致密性及牢固度的主要因素与铬层均匀性和蒸发距离之间的关系式, 并针对其原因对相关工艺进行了改进, 实验证明改进后的工艺对改善铬膜的致密性和牢固度及均匀性起到了一定的作用, 使计量光栅盘的成品率提高了10%, 同时也为进一步改善后续工艺提供了理论依据。

**关键词:** 真空镀铬; 致密性; 均匀性; 蒸发距离

中图分类号: TP135

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2011)02-0001-04

## Research on Mechanism and Techniques of Vacuum Plating of Cr on Metrology Grating

CHEN Yun, WANG Xiaofeng, LI Yanru

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

**Abstract:** During the producing metrology grating, vacuum plating of Cr is one of main working procedures affecting the precision and finished product rate of metrology grating. In order to improve the precision and increase finished product rate of metrology grating, we analyze the theory of vacuum plating of Cr on metrology grating and the formation mechanism of Cr film, the main factors affecting compactness and fastness of Cr film are given, the relations between Cr film uniformity and vaporization distance are presented, and correlative techniques is improved based on the reason. The results show that improved techniques can improve the compactness, fastness and uniformity of Cr film. The techniques makes the finished product rate of metrology grating increase 10%, which provides theoretical basis to improve the techniques in the next stage.

**Key words:** vacuum plating of Cr; fastness; uniformity; vaporization distance

计量光栅盘作为角度计量用核心元件广泛应用于光电位移精密测量仪器中<sup>[1-5]</sup>, 因此, 计量光栅盘的均匀性直接影响仪器的测量精度。而铬层的致密性和牢固度及其厚度的均匀性是影响计量光栅盘的精度和成品率的一个重要因素, 为了获得较好的铬层, 通常把毛坯放在真空进行蒸镀。此种方法具有工艺简单、省材料、无污染、获得的膜层膜基附着力强等优点<sup>[5]</sup>。但是, 由于镀铬过程中, 由于清洗的方法及膜料的纯净度、蒸气压、蒸发温度、蒸

发速率、基片温度、蒸发距离、沉积角度、被镀件尺寸及被镀件转速等因素都将对薄膜的形成会有不同程度的影响, 进而影响膜层的质量, 造成计量光栅盘的精度降低, 而在上述原因中, 最为主要的因素包括清洗的方法、沉积角度及蒸发距离, 本文在对真空镀膜原理和膜层形成机理分析的基础上, 找出它们之间的内在关系, 并通过改进相应的工艺, 提高铬层的致密性和牢固度及其均匀性。

收稿日期: 2010-12-28

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新项目(Y00332H100)

作者简介: 陈赟(1976-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事码盘、光栅盘的精密刻划、镀膜和检测及光电编码器方面的研究, E-mail: tutorchy@163.com。

## 1 真空镀铬原理及膜层形成的机理

### 1.1 真空镀铬原理

真空镀铬顾名思义就是在真空状态下,用物理的方法,把铬粉加热,使其气化蒸发成原子或分子(真空度为  $10^{-3}$  Pa 时的气化温度在 2400 左右),并通过气相过程,在工件表面沉积一层具有特殊性能的薄膜的过程。主要包括蒸发、迁移和成膜三个过程。

### 1.2 膜层形成机理<sup>[6]</sup>

膜料被蒸发源加热时,发生气化过程,经过蒸发、迁移的原子或分子带着蒸发时所具有的能量撞击基片表面,大部分原子或分子依靠偶极特性的力被吸附到基片表面,形成晶核,晶核继续长大成为岛,岛的合并及再结晶形成网膜,网膜在沉积时,膜层的厚度增加,沟道被填充,最终形成连续的薄膜。

## 2 实验工作及结果

### 2.1 计量光栅盘镀铬工艺<sup>[7]</sup>

1.清洗。包括:(1)用丙酮擦洗,主要是去除手印等污渍;(2)碱处理,为了更进一步清洁毛坯表面的油污;(3)硝酸处理;(4)碳酸钙擦洗。(5)水冲洗,时间为 5min 以上,若清洗干净,水平铺在玻璃表面,否则,则没有清洗干净;(6)脱水。

2.轰击。主要是对玻璃表面进行干燥和清洁,轰击时的真空度为  $2 \times 10^{-1} \sim 3 \times 10^{-1}$  Pa,轰击电流为 80 ~ 100mA,轰击电压为 2000V,轰击时间为 15 ~ 20min,若对虫胶则轰击 7 ~ 15min,线条细轰击时间短些。

3.预熔。主要是对铬粉进行干化清洁处理,因此,在预熔时需要在蒸发源和基片之间设置挡板,以便遮挡蒸发源放出的气体污染基片,影响铬层致密性和牢固度。预熔时的真空度为  $1.5 \times 10^{-3}$  Pa 以上。

4.蒸发。时间为 1 ~ 3min,真空度为  $1.5 \sim 0.6 \times 10^{-3}$  Pa。

### 2.2 计量光栅盘镀铬工艺中出现的主要问题

1.铬层不牢固,主要表现为大面积或局部脱



(a)局部脱铬 (b)线条漂浮

图 1 两种典型的铬层不牢固现象

Fig.1 Two typical phenomena of unfast Cr layer

落、使用一段时间后脱落、线条漂浮、连续或不连续断线,如图 1 所示。

根据真空镀铬原理和膜层形成机理及对现有工艺进行分析,出现第一种现象的主要原因一是镀铬工艺中清洗不彻底,虽然经过常规清洗,但盘坯表面仍留有加工过程中遗留的磨料或油脂无法去除;二是脱水后把玻璃毛坯放入真空室的过程中由于操作疏忽或不正确的操作习惯,手可能接触到玻璃毛坯的被镀面;三是真空室中有油膜,造成该种现象是在蒸镀前钼舟安装时手直接接触钼舟造成的,或蒸镀结束后,操作失误和高真空阀密封不严,容易造成微量真空泵油返油;四是真空室长期未清洗,由于真空镀膜机本身的结构,无法做到完全密封,存在返油率,大约为  $1 \times 10^{-4} \text{mg/cm}^2 \cdot \text{s} \sim 1 \times 10^{-6} \text{mg/cm}^2 \cdot \text{s}$ ,长期使用不及时清洗容易造成油污。另外,长期蒸镀,真空室中也附着无用的铬粉,影响真空度。为了解决一、二种原因造成的铬层牢固度较低现象,我们除了严格按照清洗工艺对玻璃毛坯进行较彻底的清洗外,又在毛坯上涂一层光刻胶,等其微干后直接放入卡具,在真空室内用专用工具把胶层去除,这样胶层既可以把玻璃表面的遗留物粘掉,同时又防止了在装件过程中因静电等作用吸附细小灰尘和手的触碰,保护了被镀面。第三种原因可以通过戴耐酸、耐碱乳胶工业手套安装钼舟,蒸镀结束后,反复检查确定无误后方可充气取被镀件。第四种原因可以通过清洗真空室来解决。上述现象是在镀膜机真空度正常、操作正确、未突然停电等突发事件的前提下分析的。

2.铬层不均匀,表现为铬层厚度不均,特别是计量光栅盘直径较大( $\Phi 150\text{mm}$ 以上)时,更为明显,简单的方法是对着日光灯观察其亮度是否变化。

影响铬层厚度的原因比较多,主要和沉积角度和蒸发距离有关<sup>[6]</sup>。

沉积角度: 在大入射角情况下, 会使后续入射分子受到晶核或晶粒的阻挡, 不能直接沉积到晶粒的后面, 以致晶核或晶粒的成长向膜料蒸发源方向倾斜, 形成极不平滑的膜面 (阴影效应), 如图 2 所示。这样的薄膜具有各向异性, 它的机械性能、光学性能不稳定, 容易造成铬层脱落或线条漂浮。

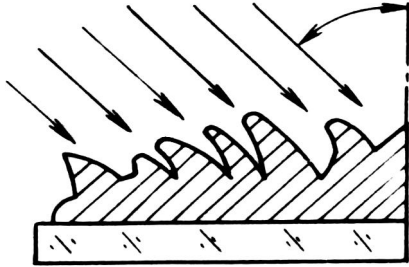


图 2 大入射角的膜面

Fig.2 Film surface under a large angle of incidence

为了解决因沉积角度导致的问题, 我们采用了旋转蒸发法。

蒸发距离: 真空装置中, 对静态蒸镀, 如果蒸发源近似点状, 被镀基片是一平面, 蒸发源中心与基片的垂直距离为  $h$  处的薄膜厚度为  $t_0$ , 薄膜厚度分布按下式计算<sup>[8]</sup>:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{[1+(x/h)^2]^{3/2}} \quad (1)$$

式中:  $x$ —基片中心到其边缘的距离。

而实际所用的蒸发源为钨舟, 因此, 点蒸发源膜厚分布如若按 (1) 式计算, 得出的薄膜厚度将会有偏差。需要按照小平面蒸发源薄膜厚度分布规律进行计算。

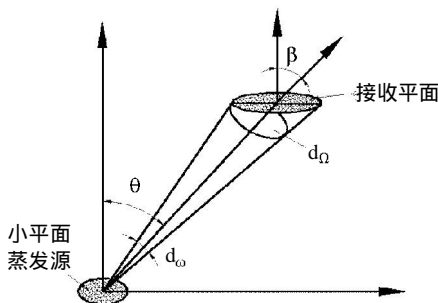


图 3 小平面蒸发源蒸发示意图

Fig.3 Sketch map of facet vaporization source

小平面蒸发源的发射特性具有方向性, 具有余弦角分布规律, 即在  $\theta$  角方向蒸发的材料质量和  $\cos\theta$  成正比, 是平面蒸发源法线与接收平面  $dS_2$  中心和平面源中心连线之间的夹角, 如图 3 所示。若蒸发材料和  $dS_2$  已知, 则沉积在该小平面薄膜的蒸发速率即可求得:

$$dm = \frac{m \cos\theta \cos\beta ds_2}{\pi r^2} \quad (2)$$

又因:  $dm = \rho \cdot t \cdot ds_2$ , 代入 (2) 式可得:

$$t = \frac{m}{\pi\rho} \cdot \frac{\cos\theta \cos\beta}{r^2} = \frac{mh^2}{\pi\rho(h^2+x^2)^2} \quad (3)$$

式中:  $\rho$ —蒸发材料密度;  $t$ —基片上任意一点的膜厚;

当  $dS_2$  在小平面源正上方时, 即  $\theta=0, \beta=0$ , 此时, 该点为基片平面内的最大蒸发膜厚, 用  $t_0$  表示该点的膜厚为:

$$t_0 = m/\pi\rho h^2 \quad (4)$$

基片平面内其他各处的膜厚用  $t$  表示, 其分布可表示为:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{[1+(x/h)^2]^2} \quad (5)$$

根据 (1)、(5) 式, 可以看出两种源在基片上所沉积的膜层厚度虽然很近似, 但由于蒸发源不同, 在给定蒸发料、蒸发源和基片距离的情况下, 平面蒸发源的最大厚度可为点蒸发源的四倍左右, 二者膜厚的分布曲线如图 4 所示。

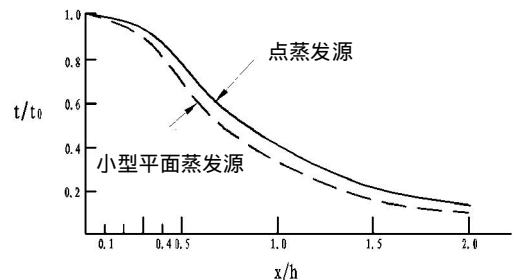


图 4 膜厚和蒸发源的关系曲线

Fig.4 Curve of film thickness versus vaporization source

由图 4 可知, 在一定时间内沉积薄膜的厚度随蒸发距离的增大而减少, 为了证实上述结论, 我们进行了实验: 不考虑沉积角度的影响, 在蒸镀材料(铬

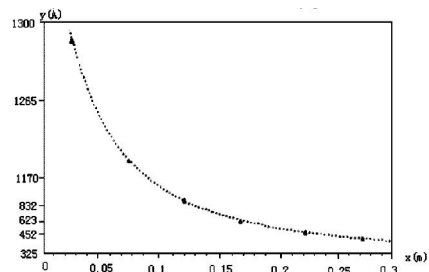


图 5 蒸发距离和膜厚的关系曲线

Fig.5 Curve of vaporization distance versus film thickness

粉)相同质量的情况下,把一个尺寸为 200mm×20mm 长条形件放入真空室中,蒸镀完成后在原子力显微镜下对其膜厚进行了测量,最后采用拟和法对测的数据进行拟合<sup>[9]</sup>,拟合曲线如图 5 所示。从拟合曲线可以看出,膜厚随蒸发距离的增加而减小,近似与其平方成反比的关系,证实了上述结论。因此,为了得到较均匀的铬层,需严格控制蒸发距离,但实际真空镀膜中,每次蒸镀的盘坯不止一件,且形状不同、尺寸大小不一,无法确保所放置的位置在蒸发源的中心,因此,为了减小因蒸发距离不一致对膜厚的影响,采用旋转蒸镀;对较大尺寸的被镀件采取多次蒸镀,每次蒸镀时还要中心对调。

另外蒸发距离还与分子的平均自由程有关,实验表明,只有当分子的平均自由程大于 10 倍蒸发距离时,才能得到附着力强的膜层。

通过上述所说的旋转蒸镀和多次对调蒸镀,有效地解决了铬层均匀性不一致现象。

### 3 结论

针对计量光栅盘镀铬工艺中出现的问题,在真空镀膜原理和膜层形成机理的基础上进行了分析,找出了他们之间的内在关系并给出了相应的解决措施,实验证明要得到质量较好的铬膜,必须做到:

- 1.严格按照清洗工序清洁毛坯。
- 2.严格控制蒸发时的真空度 ( $1.5\times 10^{-3}$  以上) 和相关的参数指标。
- 3.娴熟的蒸发技巧。
- 4.在铬粉质量相同的情况下,严控制蒸发距离和旋转速度。

### 参考文献

- [1] 陈赞. 曝光量对对计量光栅均匀性的影响[J]. 长春理工大学学报 2008 28(3):117-119.
- [2] 罗华 高山 李翔龙. 粗光栅信号全数字化处理法实现高倍数细分[J]. 光学精密工程 2007 15(2):283-288.
- [3] 陈赞 王力峰 李艳茹. PC 光学树脂计量圆光栅的制作[J]. 光学精密工程 2010 18(8):1788-1792.
- [4] 高贯斌 王文 林铿,等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程 2010 18(8):1766-1772.
- [5] 杨邦朝 王文生. 薄膜物理与技术[M]. 成都 电子科技大学出版社,1994.
- [6] 戴永年 杨斌. 有色金属材料的真空冶金[M]. 北京 冶金工业出版社 2000.
- [7] 马宏. 精密刻划工艺[M]. 北京 兵器工业出版社,1993.
- [8] 王承遇 陶英. 玻璃表面处理技术[M]. 北京 化学工业出版社 2004.
- [9] 高红 李庆绵. 真空蒸发镀膜膜厚影响因素的实验研究[J]. 鞍山师范学院学报 2003 5(2):40-42.