

文章编号 1004-924X(2010)08-1788-05

# PC 光学树脂计量圆光栅的制作

陈 贇,王力锋,李艳茹

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

**摘要:**为了解决目前计量圆光栅的玻璃基片无法适应振动强度大、冲击力强等恶劣环境的问题,提出了采取新型材料聚碳酸酯(PC)来替代玻璃作为计量圆光栅制作基片的方法。分析了 PC 光学树脂的透光特性、耐热性和耐化学性能,给出了清洗 PC 的具体配方;结合现有光刻复制工艺,研制出先胶后铬的新型复制工艺;最后,以 PC 作为计量圆光栅基片,在蒸镀真空度为  $1.2 \times 10^{-3}$  Pa,蒸发距离为 150 mm 的条件下,采用蒸发源质量控制膜厚的镀铬工艺参数,制作出了 PC 光学树脂基片的计量圆光栅。在  $45 \times$  显微镜下观察光栅线条,结果显示,线条陡直,无龟裂,表明该新型工艺可行,工艺参数正确,为进一步研制以 PC 光学树脂计量圆光栅为核心元件的精密测角仪器等提供了试验基础。

**关键词:**聚碳酸酯;基片;计量圆光栅;光栅复制

**中图分类号:** TP212.12; TN305 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1788

## Manufacturing technology of PC optical resin metrological grating

Chen Yun, Wang Li-feng, Li Yan-ru

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

**Abstract:** To solve the problems that the glass base slices of metrological gratings can not suffer the bad environments such as strong vibration and big impact, a new type material, Polycarbonate(PC), was chosen to replace the glass to manufacture metrological gratings. The optical characteristics, light transmittance, heat tolerance and the chemical resistance of the PC were analyzed and a cleanout method for the PC was given. On the basis of traditional manufacturing of gratings, a new manufacturing technology, namely, coating first and vacuum plating Cr afterwards, was developed. Finally, by taking the PC as a base slice, a PC optical resin metrological grating was produced in the vacuum degree of  $1.2 \times 10^{-3}$  Pa and evaporation distance of 150 mm, in which the film thickness was controlled by the quality of Cr. The PC metrological grating was observed in a  $45 \times$  microscope. Results show that the edges of lines are vertical and no slips. The results indicate that the technology is feasible and technology parameters are correct. It can provide an examination basis to develop precision measuring angle instruments.

**Key words:** polycarbonate; base slice; metrological grating; grating replication

收稿日期:2009-08-20;修订日期:2009-09-18.

基金项目:中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金”资助项目(No. 076131G070)

## 1 引 言

计量圆光栅作为精密计量元件已广泛应用于光电编码器、精密加工设备、精确跟踪定位设备等光学位移精密测量仪器和光栅计量测试设备中<sup>[1-5]</sup>。目前,国内计量圆光栅主要使用K9玻璃、浮法玻璃等作基片,它们具有透光率高,光学均匀性好等优点;但玻璃的抗冲击性差,在受到较大冲击时,极易破碎,使仪器、设备不能工作,无法适应工作在恶劣环境如野外、机载、舰载等仪器或设备中。若增加其抗冲击能力,必然要增加厚度,但重量随之增大,从而对仪器、设备的结构设计提出更高的要求,不利于仪器、设备的结构优化。

除玻璃基片以外,金属(通常指不锈钢、碳钢)、菲林胶片<sup>[6]</sup>等也可用作计量光栅的基片。但金属由于存在腐蚀因子,无法制作线条较密且厚度较厚的计量圆光栅;而菲林胶片受到自身材料的限制,也无法解决厚度和透过率之间的矛盾。因此,以上述两种材料为基片制作的计量圆光栅的线条较宽,分辨率较低,不能用于高精度测角仪器和精确跟踪定位设备中。

随着科学技术的发展,舰载光电侦察平台、机载光电侦察平台、火炮瞄准系统等对测量仪器和测试设备的精度、灵敏度、总体质量、环境适应性等综合性能要求越来越高,所以,寻求新的材料来替代当前的基片,特别是玻璃基片十分必要,而光学树脂由于自身的特点在这方面具有玻璃无法比拟的优势。本课题首先通过分析聚碳酸酯(PC)光学树脂的光学特性确定其清洗方法;然后结合现有的光刻复制工艺确定制作PC树脂计量圆光栅技术;依据和国外树脂计量圆光栅线条质量的比较确定工艺参数的正确性;最后提出把树脂计量圆光栅应用于工程的改进措施。

## 2 PC光学树脂的特性

PC是常用于光学领域的3种热缩性树脂之一<sup>[7]</sup>,它是一种线性的碳酸聚酯,分子中碳酸基团与另一些基团交替排列,故具有良好的韧性、透明性、耐热性、尺寸稳定性和光学性能以及较强的抗冲击能力。若将其放置空气中长时间加热,其性能变化很小;但是若将其长期处于阳光、氧、水汽

作用下,尤其是加上高温和本身含有一定杂质的情况下,会引起降解;通过改变PC的纯度及其双酚A链可改变其性能。PC的弯曲模量可达2400MPa,能耐130℃~140℃的高温,相对密度为1.18~1.20,较玻璃低近一倍,光的透过率可达90%<sup>[8-9]</sup>,折射率为1.538,略高于玻璃的折射率1.52。由于它具有良好的韧性,在承受相同冲击力的情况下,可以比玻璃基片做得更薄。此外,PC还具有一定的耐化学腐蚀性,耐油性优良。由于PC具有极为优良的韧性、透明度和高的热变形温度等综合性能,已在航空、航天、电子计算机、光盘等领域得到广泛作用,预计2007~2010年国内PC产量会以10%~15%的速度增长<sup>[10]</sup>。

## 3 PC计量圆光栅制作技术

目前,以K9玻璃、浮法玻璃为基片的计量圆光栅的光刻胶制作工艺为:真空镀膜—涂胶—前烘—曝光—显影—后烘—腐蚀—去胶—检验<sup>[11]</sup>,而PC基片由于在其制作过程中受工艺等因素的影响容易产生内应力,在真空镀膜过程中,这种内应力会转移到膜层上,从而大大降低膜层的稳定性,甚至使膜层开裂起皱,即龟裂现象,所以,必须采取措施尽量减小内应力。另外,由于PC表面具有高阻抗特性,摩擦后容易产生静电,吸附灰尘等杂质,这些杂质极不易去除,造成镀膜时膜层出现麻点、针孔或开裂,无法进行后续工艺,从而导致计量圆光栅的制作失败。此外,PC还具有较强的吸水性,给真空镀膜和提高膜层的附着力带来很大的困难。

由于PC的非结晶性,分子间堆砌不够致密,芳香烃、氯代烃类、酮类等有机溶液能使其溶胀或溶解,易起化学反应,影响其光学和机械性能,而计量圆光栅的光刻胶制作工艺中一直离不开酮类物质。因此,要研制PC计量圆光栅,必须采用新型的制作工艺,尽量避免采用酮类物质清洗或去胶,具体过程如下:

### 3.1 PC基片的清洗

PC基片清洗等干净与否决定着PC计量圆光栅的制作能否成功。本试验采用碳酸钠、氢氧化钠和磷酸钠按照比例配置成专用的清洗剂进行清洗,具体操作如下:

碳酸钠6g,氢氧化钠2g,磷酸钠3g,加入

100 ml 蒸馏水中,通过搅拌器搅匀后把 PC 基片放入配制好的溶液内浸泡 20~30 min,用离子水反复冲洗,再用无油压缩机吹干,放入烤箱烘烤至 80 ℃ 并保持 30 min 后取出,自然冷却至室温,由此去除内应力和清洗过程中吸附的水分。

### 3.2 PC 计量圆光栅的制作工艺

考虑到 PC 对酮类物质的敏感性,采用先胶后镀膜的新型制作工艺,避免了在研制过程中与酮类物质的接触,具体工艺如下:

涂胶—前烘—曝光—显影—后烘—真空镀铬—去胶。制作工艺如图 1 所示。在本工艺中,真空镀铬是至关重要的一道工序,这里重点介绍影响铬层均匀性和牢固度的相关因素。

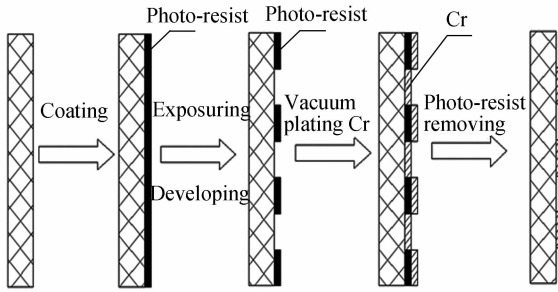


图 1 PC 计量圆光栅制作工艺图

Fig. 1 Manufacturing technology of PC metrological grating

### 3.3 真空镀铬

把显影后烘好的 PC 基片放入 DM450 真空镀膜机中抽真空,影响铬层均匀性和牢固度的因素较多,主要为蒸发速度、蒸气压、蒸发温度、蒸发源到基片的距离等<sup>[12]</sup>。为了得到质量较好的铬层,对上述因素进行了具体分析。

蒸发温度与蒸发速率和凝聚系数之间的关系式为:

$$\lg \omega = \frac{1}{2} \lg 7.8\alpha M + \frac{A}{T} + (B - \frac{1}{2}) \lg T + CT + D, \quad (1)$$

上式和温度有关的项为:

$$A/T + (B - 1/2) \lg T + CT + D, \quad (2)$$

式中: $\omega$  为膜料蒸发速率( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ); $\alpha$  为凝聚系数,对一般金属, $\alpha \approx 1$ ;  $M$  为蒸气分子摩尔质量(mol);  $T$  为蒸发源的温度(K);  $A, B, C, D$  为与金属种类有关的系数。

由手册中可查得纯铬的  $A, B, C, D$  的值分别

为 -20 680, -1.31, 0.16, 685, 当  $T=1\ 000\ \text{K}$  和  $1\ 100\ \text{K}$  时,由式(2)可得与温度有关的项的值分别为 -9.425, -7.620, 由式(1)可得所引起的蒸发速率的变化量为一个数量级,所以温度对蒸发速率的影响是比较显著的。因此,在镀铬时,为了得到均匀的膜层,必须严格控制蒸发温度。

若蒸发未达到平衡状态,蒸发速率和压强的关系式则为:

$$\log \omega = \log \omega_{\max} - \frac{x p_{\text{system}}}{2.303k} = \log \omega_{\max} - \frac{x(p_r + p_i)}{2.303k}, \quad (3)$$

式中: $k$  为 Boltzmann 常数; $x$  为分子运动距离; $p_r$  为真空室中残余气体压强(Pa); $p_i$  为蒸发物质的气体压强(Pa)。

由上式可知,在开始抽真空时, $p_r > p_i$ ;随着压强减小,残余气体分子数减少,气体分子的平均自由程变大,蒸发原子在迁移过程中与残余气体碰撞的几率减小, $\omega$  增大。所以,开始镀铬时,为了尽快形成膜层,必须进行长时间的抽真空准备。当真空度达到一定程度, $\omega$  主要取决于  $p_i$ ,而  $p_i$  只与温度有关,因此当温度一定时,不能用强化抽气条件使之改变,在此情况下, $\omega, \omega_{\max}$  都为常数,临界气压  $p_{\text{critical}} = p_r + p_i$ ,所以,在进行真空蒸镀时,为了得到致密的膜层,必须严格控制真空室的气压与温度。

铬是从较小的板状蒸发到平行的基片上的,蒸发源中心与基片的垂直距离为  $h$ ,则基片上任意一点的膜厚  $t$  为:

$$t = \frac{m h^2}{\pi \rho (h^2 + x^2)^2}, \quad (4)$$

式中: $m$  为铬的蒸发质量; $\rho$  为铬的密度; $x$  为基片中心到其边缘的距离。

由式(4)可知,当基片处于蒸发源正上方时,即  $x=0$  时,其中心薄膜厚度  $t_0$  最大,表示为:

$$t_0 = \frac{m}{\pi \rho h^2}, \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得基片平面内其他各处的膜厚分布,即  $t$  与  $t_0$  之比为:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{1}{[1 + (x/h)^2]^2}. \quad (6)$$

由上式可知,膜层厚度随蒸发距离的增大而减小,实验表明,只有当分子的平均自由程  $> 10$

倍蒸发距离时,才能得到附着力强的膜层。

在蒸镀时,把被镀件放在蒸发源的上方,即  $x/t$  接近 0,  $m=1\text{ g}$ ,  $\rho=7.18$ ,  $h=150\text{ mm}$ ,按照式(5)可得  $197\text{ nm}$ ,通过原子力显微镜测得膜厚为  $190\sim 200\text{ nm}$ ,和理论值相符。

按照上述公式,确定了具体的镀铬参数:

轰击真空度为  $2.5\times 10^{-1}\text{ Pa}$  时,轰击电流为  $100\text{ mA}$ ,轰击电压为  $2\ 000\text{ V}$ ,轰击时间为  $10\text{ min}$ ;蒸发真空度为  $1.2\times 10^{-3}\text{ Pa}$ ,蒸发距离为  $150\text{ mm}$ ,蒸发温度为  $50\text{ }^\circ\text{C}$ ,每次蒸发铬的质量为  $0.75\text{ g}$ ,为了使铬层均匀,在蒸发过程中采用旋转蒸镀。

## 4 实 验

为了验证上述新型工艺及其参数是否正确,对其中一种计量圆光栅进行了试验。该种计量圆光栅刻划中径为  $\Phi 22\text{ mm}$ ,刻线长  $4\text{ mm}$ ,刻线对数为  $2\ 048$ ,单线宽  $< 20\ \mu\text{m}$ ,按照上述制作技术制作出了 PC 基片计量圆光栅,并在  $45\times$  显微镜下检查了线条质量。结果显示,线条没有龟裂,线条边缘陡直,如图 2 所示。与从美国安捷伦光电编码器上取下的树脂计量圆光栅(最外圈线条宽度在阿贝测量仪测得为  $19\ \mu\text{m}$ ,如图 3 所示)进行比较,可以看出,研制的 PC 计量圆光栅线条质量与国外的质量相当,说明该制作技术及工艺参数是正确的。

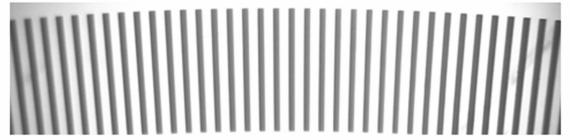


图 2 PC 计量圆光栅线条局部放大图

Fig. 2 Magnifying picture of part lines in PC metrological grating

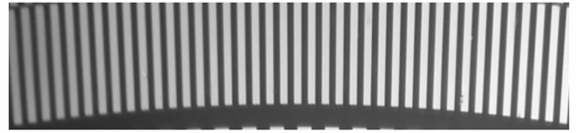


图 3 国外树脂计量圆光栅线条局部放大图

Fig. 3 Magnifying picture of part lines in resin metrological grating made in overseas

## 5 结 论

本文根据 PC 特性,研制出清洗方法和以它为基片制作计量圆光栅的新型工艺,并给出了具体的工艺参数。通过复制某一型号的计量圆光栅,说明该制作技术可行,为解决目前玻璃计量圆光栅抗振性与抗冲击性差,难以适应特殊环境要求的现状提供了光学树脂材料的实验数据。由于国内光学树脂材料的透过率较国外低,因此要尽快用于精密测角仪器中仍需开展大量实验工作,如改进材料性能,提高树脂计量圆光栅透过率,改进电路处理以增加信号幅值等。

## 参考文献:

- [1] 万秋华,孙莹,王树洁,等. 双读数系统的航天级绝对式光电编码器设计[J]. 光学精密工程,2009,17(1):52-57.  
WAN Q H, SUN Y, WANG SH J, et al.. Design for spaceborne absolute photoelectric encoder of dual numerical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(1):52-57. (in Chinese)
- [2] 陈赟,赵兴国. 单圈绝对式光电轴角编码器的研究[J]. 光子学报,2008,37(2):230-233.  
CHEN Y, ZHAO X G. Research on the encoding method of single ring absolute code disc[J]. *Acta*

- Photonic Sinica*, 2008,37(2):230-233. (in Chinese)
- [3] 董莉莉,熊经武,万秋华. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学精密工程,2000,8(2):198-202.  
DONG L L, XIONG J W, WAN Q H. Development of photoelectric rotary encoders[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(2):198-202. (in Chinese)
- [4] 苏海冰,刘恩海. 单圈绝对式编码器的研制[J]. 光学精密工程,2002,10(1):74-78.  
SU H B, LIU E H. Research on single-ring absolute encoder and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(1):74-78. (in Chinese)
- [5] 熊文卓,孔智勇,张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1745-1748.

- XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1745-1748. (in Chinese)
- [6] 赵立新, 胡松, 王肇志, 等. 激光聚焦扫描扇区掩模制作光电码盘新方法[J]. *微细加工技术*, 2007, (6):8-11.  
ZHAO L X, HU S, WANG SH ZH, *et al.*. A novel fabrication of photoelectrical encoder by laser focus scanning fan-mask[J]. *Microfabrication Technology*, 2007, (6):8-11. (in Chinese)
- [7] 潘永强, 卢进军, 万菁昱. 光学塑料真空镀膜附着机理与工艺研究[J]. *应用光学*, 2003, 24(3):32-34.  
PAN Y Q, LU J J, WAN J Y. Adhesion mechanism and preparation technology of film on optical plastics [J]. *Application Optics*, 2003, 24(3):32-34. (in Chinese)
- [8] 李四红. 国内外聚碳酸酯的生产现状分析[J]. *安徽化工*, 2009, 35(1):11-13.  
LI S H. Analysis of produce status of polycarbonate at home and abroad[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2009, 35(1):11-13. (in Chinese)
- [9] 周伟斌, 钱家盛, 杨海洋. 聚碳酸酯多孔增透膜的制备及性能研究[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(6):82-85.  
ZHOU W B, QIAN J SH, YANG H Y. Preparation and investigation of the porous PC antireflection film[J]. *Journal of Anhui University Natural Science Edition*, 2008, 32(6):82-85. (in Chinese)
- [10] 孙彦洁. 国内外聚碳酸酯的生产状况比较分析[J]. *当代化工*, 2008, 37(1):96-99.  
SUN Y J. Analysis of polycarbonate production statement in world [J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2008, 37(1):96-99. (in Chinese)
- [11] 付永启, 赵晶丽. 离心式涂胶膜厚均匀性的影响因素分析[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(2):94-97.  
FU Y Q, ZHAO J L. Analysis of effect on uniformity of photoresist layer in spin coating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(2):94-97. (in Chinese)
- [12] 陈赞, 张学忱. 码盘、圆光栅真空镀铬工艺的研究[J]. *长春理工大学学报*, 2005, 28(1):103-105.  
CHEN Y, ZHANG X C. Vacuum plating Cr techniques on code disc and radial grating[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2005, 28(1):103-105. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈 赞(1976—),男,山东郓城人,副研究员,博士,1999年于长春光学精密机械学院获学士学位,2002年、2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,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



李艳茹(1963—),女,吉林长春人,实验师,主要从事计量圆光栅的复制工作。E-Mail: tutorye@163.com

#### 通讯作者:



王力锋(1968—),男,吉林通化人,研究员,1991年于长春光学精密机械学院获学士学位,主要从事光学仪器的设计与研究。E-Mail: lifengwang2004@yahoo.com.cn