

文章编号: 1002-2082(2009)01-0101-04

凹球面涂布光刻胶均匀性研究

赵晶丽¹, 王惠卿², 冯晓国¹, 梁凤超¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春理工大学 研究生院, 吉林 长春 130022)

摘要: 通过对离心法在凹球面上涂布光刻胶过程进行分析, 阐明了离心状态下光刻胶在凹球面基底上的流动机理, 结合试验提出影响凹球面涂布光刻胶膜厚均匀性的主要因素有胶液粘度、旋涂速度、旋涂时间, 列举了以上因素引起的各种现象, 并进行了理论分析。引用凹球面旋涂光刻胶的膜厚公式, 建立了膜厚与速度关系数学模型; 利用流体力学原理解释了有限圆形空间中流体速度对膜层均匀性的影响, 从而解决了大曲率凹球面上制备微细图形结构的关键工艺问题, 对非球面上制备微细图形具有借鉴作用。

关键词: 光刻胶; 涂胶; 凹球面; 旋涂

中图分类号: TN305.7

文献标志码: A

Uniformity of photoresist film coated on concave sphere

ZHAO Jing-li¹, WANG Hui-qing², FENG Xiao-guo¹, LIANG Feng-chao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;

2. Graduate School, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The flow mechanism of the photoresist on the concave sphere under centrifugal state is elaborated by the analysis of the photoresist coating process with centrifugation force. The critical factors that affect the evenness of photosensitive resist and the film forming quality, such as viscosity of photoresist solution, velocity of spin coating and time of spin coating, are investigated with experiments. The various phenomena occurred due to these factors are listed and analyzed theoretically. A mathematic model which describes the relationship between layer thickness and velocity is established by quoting the formula for the spin coating of photoresist film on the concave sphere. The effect of the fluid speed on the uniformity of the layer in the limited circular space is explained according to the principle of fluid mechanics. Accordingly, the key technology for preparing microstructure patterns on the concave spherical surface is achieved.

Key words: photolithography; film coating; concave sphere; spin coating

引言

光刻技术作为微细加工的关键技术已广泛应用于微电子信息产业。目前在平面基底材料上制备微细图形光刻技术已成熟,但在曲面上制作微细三

维浮雕结构的光刻技术以其应用前景更广阔、工艺更复杂、技术难度更大而有待进一步发展。与平面光刻类似,凹球面光刻是对涂覆光刻胶的球面内表面基底按照所要求的图形结构进行曝光,经过显影

收稿日期: 2008-06-24; 修回日期: 2008-10-20

基金项目: 国防预研基金资助项目(10.4.2.ZK1001)

作者简介: 赵晶丽(1962—),女,吉林人,实验师,主要从事精密刻划的研究工作。

论文联系人: 王惠卿 E-mail: hqingw@sina.com

后就得到了球面内表面三维微细结构。在光刻技术中,涂胶是一道关键工序,光刻胶涂布的均匀性无疑会对微细图形精度有重要影响。影响光刻胶涂布均匀性的因素很多,如光刻胶粘度、温度、湿度、涂胶方法等。目前较通用的涂胶方法有喷雾法、提拉法、滚动法、离心法和流动法,其中以提拉法和离心法应用较多。离心涂胶法由于操作简便、易于控制、污染小,现已成为平面及大曲率曲面的主流涂胶方法。本文仅就在凹球面上采用离心法涂布薄层光刻胶影响膜层均匀性问题进行讨论。通常情况下,胶层越薄越有利于形成均匀胶膜,但为了避免针孔现象,胶层不宜太薄,以 $0.4\mu\text{m}\sim 1.0\mu\text{m}$ 为宜。为了保证涂布的均匀性,膜厚不应相差太大,所以要求凹球面光刻胶涂布膜厚在 $0.4\mu\text{m}\sim 0.6\mu\text{m}$ 。

1 凹球面旋涂光刻胶涂布过程

工件的基底状况直接影响涂胶质量,所以,首先必须对基底进行预处理,改善基底附着力,满足涂胶要求。

为了得到所需厚度的均匀膜层,需使光刻胶达到适当粘度,以使胶液形成合理的流动机理,在涂胶之前需对光刻胶进行稀释。

上胶时可以采用滴胶管把胶液滴到凹球面中心,采用开口朝下的旋涂方式进行旋涂。在成膜过程中分为3个阶段:1)在低速旋转阶段重力和离心力起主导作用,胶液在重力和离心力的共同作用下向基底边缘流动。2)高速旋涂阶段,多余的胶液被甩除,形成较均匀膜层覆盖于基底表面。随着基底旋转速度的不断提高,膜层越来越薄,直至剩余的胶液可以和基底以共同速度旋转。基底高速旋转阶段,在胶液变薄过程中胶液的粘滞力起主导作用。此阶段胶液的缓慢流动变薄(产生均匀的胶层),此时可以观察到薄膜的彩色干涉图案逐渐扩散的过程,而且随着胶层的逐渐变薄,彩色干涉图案逐渐扩散的速度越来越慢。3)溶剂的挥发过程。随着胶液的缓慢流动变薄,胶液的粘滞力逐渐起主导作用,溶剂的挥发所起作用越来越明显。实际上,由于溶剂的挥发,胶液逐渐形成一种凝固的胶体,直到最后的胶层。

2 影响膜厚均匀性的主要因素

膜厚均匀性定义为有用面积上最小胶膜厚度与同一面积上最大胶膜厚度之比^[1],即:

$$u = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: u 为胶膜均匀性; L_{\min} 为最小膜厚; L_{\max} 为最大膜厚。一般来讲,当膜厚均匀性高于50%时不会对下一道工序产生明显线条质量问题,在凹球面涂胶试验中要求胶膜厚度(膜厚 $0.4\mu\text{m}\sim 0.6\mu\text{m}$)均匀性大于67%。

影响光刻胶薄胶涂布均匀性的因素很多:环境温度湿度、基底表面光洁度、光刻胶质量及配比参数、涂胶工艺参数等。对凹球面离心法涂胶影响胶膜均匀性的主要因素是胶液粘度、旋涂速度及时间。

2.1 速度对膜厚均匀性的影响

球面光刻胶旋涂机理研究涉及到离心力、科氏力、重力、风剪切力、粘性力、表面张力、溶剂挥发等多种力和作用的影响。从离心旋涂过程可以看出,高速旋涂阶段是成膜的关键阶段,此阶段离心力和胶液的粘滞力起主要作用。旋涂的流体流动分析属于旋转圆盘系统范畴,采取合理简化,通过平面旋涂运动方程结合球面旋涂面形特征得到球面旋涂运动方程,经过推算得到大曲率凹球面旋涂光刻胶的膜厚公式^[2]:

$$h_t = C_0 \left[\frac{3\mu R \cdot C \sqrt{\omega}}{(1-C_0)(2\rho\omega^2 \sqrt{R^2-r^2} - \frac{\rho\omega^2 r^2}{\sqrt{R^2-r^2}} - 2g)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中: μ 为流体运动粘度; R 为基底的球面半径; r 为径向位置; ρ 为流体密度; ω 为旋涂角速度; g 为重力; C_0 为光刻胶中挥发物质浓度; C 为与设备条件和实验室环境有关的参数。

根据以上公式可以求得凹球面上任意径向位置的胶膜厚度,但(2)式成立的条件是凹球面工件的口径不大于 $1.632R$ 。在此公式中转速为关键参数,它不但影响膜厚,而且由于凹球面基底高速旋转将引起周围空气流场变化,进而影响胶液的流动。因此速度对成膜质量影响至关重要。对(2)式求导,得到:

$$\frac{d h_t}{d \omega} = \omega^{-5/2} \frac{9\mu R \sqrt{R^2-r^2} + \frac{9}{2} \frac{\mu R r^2}{\sqrt{R^2-r^2}}}{\rho(1-C_0)(4R^2-8r^2 + \frac{r^4}{R^2-r^2})} \quad (3)$$

由(3)式得到的趋势曲线如图1所示。

从图1曲线可以看出膜厚将随着速度提高而减小,所以高速旋转有利于形成薄而均匀的胶层。但如果速度过大,会引起周围空气流场发生变化。

当基底放置于半封闭的涂胶机圆形涂胶仓内时,电机带动与基底工件固定在一起的转轴做高速旋转,

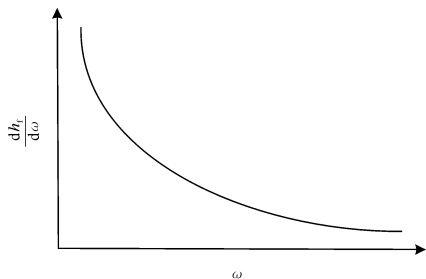


图1 膜厚与速度变化关系图

Fig. 1 Film thickness versus rotary velocity for spin coating

由于空气的粘性作用,周围空气将围绕转轴做圆周运动。把涂胶仓内的空气流场看作有限圆形空间流场,则根据有限圆形空间涡流流场气流流速公式^[3],有关系式:

$$v_{\theta} = \frac{\omega a^2}{a^2 - b^2} \left(r - \frac{b^2}{r} \right) \quad (4)$$

式中: a 为转轴半径; b 为涂胶仓内径; r 为径向位置; ω 为电机旋转角速度。在转轴半径 a 、涂胶仓内径 b 、径向位置 r 确定的前提下,流场流速 v_{θ} 与电机角速度 ω 成线性关系,速度增大,气流流速也将成比例增大。空气流速增大一方面会使胶液中的水分挥发加快,影响胶液流动性及粘度;另一方面气流流速加快,直接影响流场中飞行物体的速度。基底工件离心旋转甩出的胶液在高速旋转的空气流场中飞行,如果其速度大于流场速度表现为逆风阻力,阻力达到与液滴质量相当就将影响胶液飞行轨迹,出现打溅在舱壁上回弹基底工件表面现象,严重影响表面质量。因此,过高速不利于形成外观质量较高、膜层均匀的胶层。

2.2 粘度对膜厚均匀性的影响

光刻胶粘度影响胶膜流动机理,粘度越大,胶液流动越缓慢,膜层越厚,均匀性越难以控制,尤其会出现中间厚、边缘薄的情况。粘度低的胶液虽然流动性好,但粘度过低,胶液粘滞力小,在涂胶高速旋转阶段,高速旋转引起周围空气流场的流速也加快,根据空气压力与速度平方成正比可知空气压力随着速度增大而快速增大,当它大于胶液粘滞力时,无数的气泡将在胶液表面形成,在离心力作用下,胶膜表面张力小于离心力,引起气泡破裂形成

针孔现象。以正性光刻胶BP212为例,通过不同配比得到不同粘度光刻胶,利用粘度计测量得到其粘度数据,把以上配置好的光刻胶以相同的工艺参数涂布在凹球面基底试片上,利用原子力显微镜对膜层厚度进行测量,得到的实验曲线如图2所示。

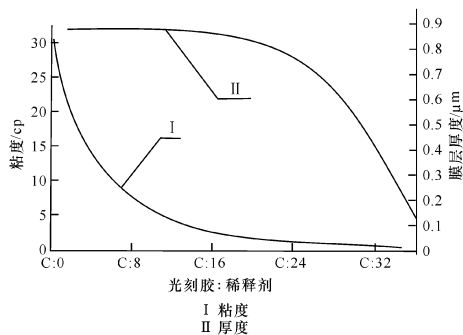


图2 光刻胶膜厚与粘度关系曲线

Fig. 2 Film thickness versus viscosity of photoresist

由图2可知,若想得到 $0.4 \mu\text{m} \sim 0.6 \mu\text{m}$ 的胶膜厚度,光刻胶与稀释剂配比为 $3:1$ 左右。

2.3 旋涂时间对膜厚均匀性的影响

由于成膜分为3个阶段,所以旋涂时间的控制对形成均匀膜层非常重要。旋涂时间过短,胶液没有经过充分扩散过程,就容易产生中间厚四周较薄的分布。旋涂时间过长也不利于形成质量较高的膜层,旋涂时间越长形成的薄膜就越薄,但越薄的膜层在表面张力作用下就越容易破裂。

3 实验结果

根据凹球面光刻胶旋涂成膜机理知,速度、粘度、时间对均匀性的影响是相互制约的,所以涂胶过程中工艺参数的选择要综合考虑。以经过 $3:1$ 配比稀释的正性光刻胶BP212为例,如果选用 $R=150 \text{ mm}$,口径 100 mm (上述公式的边界条件是凹球面工件的口径不大于 $1.632R$)的凹球面基底为样件,经过反复旋涂试验得到能够满足均匀性要求的工艺参数结果,如表1所示。

表1 涂胶工艺参数

Table 1 Technical parameters for coating of photoresist

成膜阶段	旋涂速度/ $r \cdot \text{m}^{-1}$	旋涂时间/s
低速匀胶	300~500	10
高速旋涂	2 000~3 000	20
降速甩干	1 000	20

采用表1所示的参数进行涂胶,得到如图3所

示的曲线。

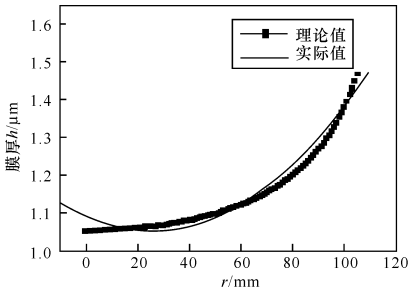


图3 径向位置 r 处膜层厚度

Fig. 3 Thickness of film at radial location r

4 结论

影响凹球面光刻胶涂布均匀性的因素很多,而且经常是多种因素影响的综合结果,尽管以上对于速度和粘度、旋涂时间因素影响进行了重点分析,但是在必要的假定条件下,而不是在孤立因素作用下的结果。通过大量的实验证明前述分析是符合实际的,对于在球面内表面旋涂光刻胶具有重要的指

导意义,并对非球面内表面涂布光刻胶具有借鉴作用。

参考文献:

- [1] De FOREST W S. Photoresist: materials and process [M]. New York: McGRAW-HILL Book Company, 1974.
- [2] FENG Xiao-guo, SUN Lian-chun. Mathematical model of spin-coated photoresist on a spherical substrate[J]. Optics Express, 2005, 18(13): 7070-7075.
- [3] 张勇顺,丁凡. 空气涡流场中飞行物体轨迹参数计算方法的探讨[J]. 中国机械工程, 2001, 12(4): 3-5.
ZHANG Yong-shun, DING Fan. The research for the method in calculating the parameter of the flying track[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(4): 3-5. (in Chinese)
- [4] CHRISEY D B, PIQE A, FITZ-GERALD J, et al. New approach to laser direct writing active and passive mesoscopic circuit elements [J]. Applied Surface Sciences, 2000(154/155): 593-600.