

离心涂胶过程的参数变化分析与模拟

付永启 李奉有

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

摘要 用流体力学理论分析了 IC 制造技术中离心式涂胶过程胶液的受力流动状态, 推导出反映涂胶厚度与离心机转速、胶液粘度等参数变化规律的数学模型, 并通过此数学模型对离心涂胶过程的参数变化进行计算机模拟。经实际涂胶测定, 该模型反映的变化规律与实际是相符的。

关键词 离心式涂胶 流体力学 胶膜厚度 胶液粘度

1 引言

离心式涂胶方法是 IC 制造技术中光学刻划工序最常用的一种涂布光刻胶的方法, 该方法由于稳定性好、涂胶均匀等优点而被广泛采用。这种方法最适用于图布环形盘状零件, 对于小型平面零件放置在离轴心较远的位置上, 可以涂出很好的胶层。但是长期以来, 人们对涂胶工序只是凭经验完成, 并不关心其力学机理, 对其也知之甚少。然而, 作为一门新兴技术, 需要具备从理论到实践的一套完整体系, 但到目前为止, 尚未见有关资料介绍涂胶过程的理论分析, 本文以流体力学为基础, 分析了光刻胶的成膜过程, 建立了描述涂胶厚度、胶液粘度及离心机转速之间的数学模型, 通过计算机模拟得到它们之间的变化关系, 符合实验测定数据拟合的曲线所反映的规律。这为今后的实践提供理论参考和依据。

2 涂胶过程的解析分析

涂胶过程一般可分为两个阶段: 第一阶段, 将稀释好的胶液滴入基底表面中心位置, 启动离心机, 先慢速转动(约200转/分左右), 直至胶液均匀流动覆盖住整个基底上表面; 第二阶段: 将转速提高(3000~ 5000转/分), 使胶液在高速转动的强离心力作用下迅速流动、成膜, 待胶液中的稀释剂迅速挥发后, 一定厚度的胶层即已形成并固化, 关闭离心机涂胶结束。整个过程可由图1表示如下:

分析前先作以下四点假设:

(1) 所研究的光刻胶为牛顿流体; 由于使用的光刻胶粘度都很低, 通常小于 6cp , 认为作用在流体上的切向应力与流动的速度梯度成线性关系。至于非牛顿流体, 则属于流变学研究范畴。

(2) 光刻胶液属于粘性不可压缩流体。

(3) 胶液流动过程中粘度不受温度的影响, 属于定常流动;

(4) 涂胶过程中胶液的粘度不变。光刻胶中加入的AZ稀释剂在工作台高速旋转中不断挥发, 因而胶液的粘度实质上是变化的, 尤其在第二阶段更是如此。因胶层很薄, 在气流影响下很快挥发变干。为了便于简化分析, 先假定粘度是不变的。由雷诺数的定义, 可将其改写为^[1]

$$R_e = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘滞力}} \quad (1)$$

式中

ρ —— 胶液密度, kg/m^3

v —— 流体运动速度, m/s

l —— 胶体流过的路径

μ —— 动力粘度, Nm/s^2

上式为粘性不可压缩流体定常流动中的相似法则, 据此可定性判断流体的流动状态。

在离心涂胶的第一阶段, 惯性力起主导作用, 胶液的粘度不足以约束流体微团的混乱运动, 流动处于紊流状态; 在第二阶段, 粘滞力起主导作用, 流体微团受粘滞力的约束, 处于层流状态。

涂胶的厚度是在第二阶段形成的, 高转速带来的离心力使胶液产生静压力 P , 它克服粘滞力(见受力图2)使胶液不断沿径向流动, 同时流体微团具有的动能也不断消耗。当静压力与层流附面层阻力 F_D 相等时, 胶液便不再流动, 此刻的附面层厚度即为最终的涂胶厚度。

为公式推导方便, 均采用单位面积上的静压力 p 和附面层阻力 τ

下面推导涂胶厚度 δ 、胶液粘度 ν (运动粘度)及转速 ω 之间的关系。

2.1 等角速度旋转时胶液的静压力分布

任取一单位质量胶液, 当离心机迅速加速至稳定转速 ω 时, 作用在质点上的质量力除重力外, 还有离心惯性力(见图2(b)所示)。于是, 作用在单位质量胶体 m 上的质量力分别为:

$$\begin{cases} f_x = \omega^2 Y \sin \alpha = x \omega^2 \\ f_y = \omega^2 Y \cos \alpha = y \omega^2 \\ f_z = -g \end{cases} \quad (2)$$

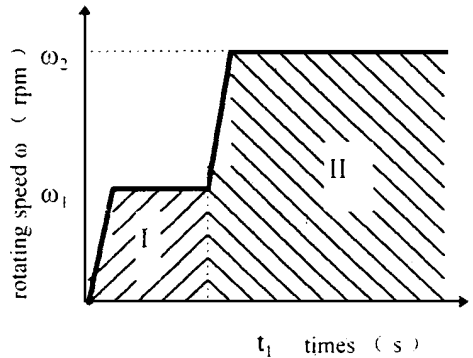


Fig 1 Diagram of coating process

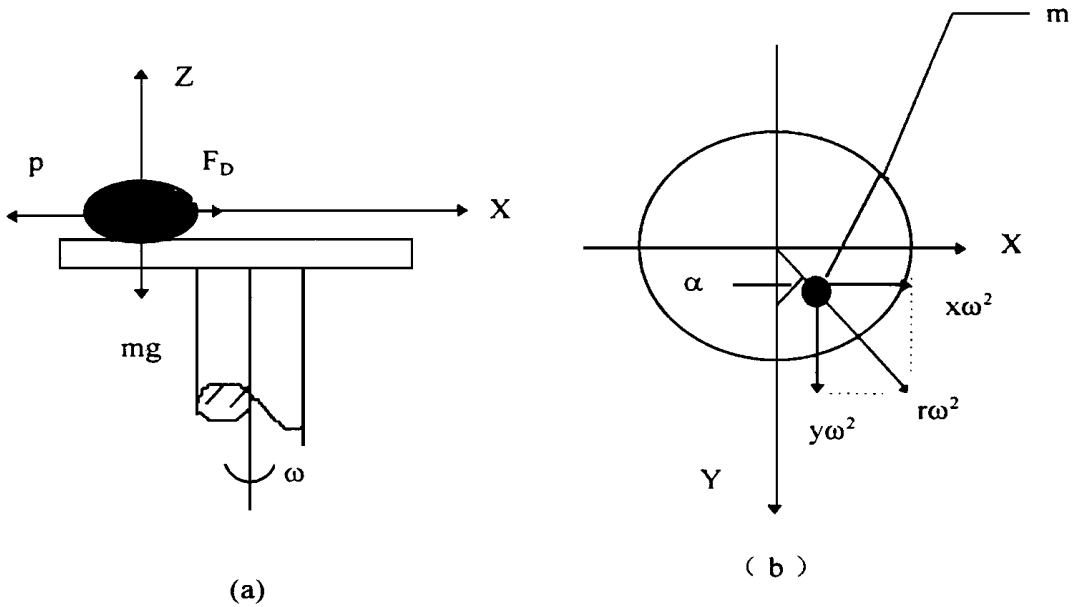


Fig 2 dynamic model of fluid mass

将单位质量力的分力代入下列压力差公式

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \tag{3}$$

得

$$dp = p (\omega^2 x dx + \omega^2 y dy - g dz) \tag{4}$$

积分得

$$p = p \left(\frac{\omega^2 x^2}{2} + \frac{\omega^2 y^2}{2} - gz \right) + C \tag{5}$$

将 $r^2 = x^2 + y^2$ 代入式(5)有

$$p = p \left(\frac{r^2 \omega^2}{2} - gz \right) + C \tag{6}$$

由于胶液是在同一平面上沿径向扩展流动的, 可以认为质心的高度 $z = 0$ 。根据边界条件, 当 $r = 0, z = 0$ 时, $p = p_0, C = p_0$, 于是式(6)变为

$$p = P_0 + \frac{\gamma r^2 \omega^2}{2g} \tag{7}$$

胶液的静压力分布规律即为所求。

2.2 胶液流速 v

胶液在离心力作用下形成静压力 p , 它克服附面层阻力 τ (单位面积上的阻力) 使胶液向前流动。由牛顿第二定律得下式

$$p - \tau = mV \frac{dV}{dx} \tag{8}$$

其中 τ 可由下式确定^[1] 层流附面层

$$\tau = 0.343\rho V^2 R e_x^{-1/2} \quad (9)$$

分别将式(7)、式(9)代入式(8)得

$$p_0 + \frac{\gamma r^2 \omega^2}{2g} - 0.343\rho V^2 R e_x^{-1/2} = mV \frac{dV}{dx} \quad (10)$$

设流动过程中雷诺数 $R e_x = \text{常数}$, 则有

$$\int_0^V mV dV - 0.343\rho V^2 R e_x^{-1/2} = \int_0^r dx \quad (11)$$

经积分变换, 整理得

$$V = \left[\frac{1}{A} \left(\frac{\gamma r^2 \omega^2}{2g} - p_0 \right) \right]^{1/2} \quad (12)$$

其中:

$$A = 0.343\rho R e_x^{-1/2} \quad (13)$$

式(12)描述的是涂胶件半径为 R 、转速为 ω 时, 光刻胶在毛坯件表面形成的层流附面层外边界上流速分布规律。当胶液粘度一定时, A 即为定值, V 就只与转速 ω 有关。

2.3 涂胶厚度 δ

取毛坯件中心流速为零的点为坐标原点, 建立如图所示坐标系。

在附面层外边界上 $u(x) = V$, 根据伯努里方程

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{const} \quad (14)$$

可知, 在附面层外边界上的压力也保持常数。所以, 在整个附面层内每一点的压力都是相同的, 即 $p = \text{const}$, $dp/dx = 0$ 。据流体力学可知, 满足层流附面层的流体厚度可由下式决定^[1]

$$\delta = 5.84 \sqrt{\frac{Vx}{n}} = 5.84x R e_x^{-1/2} \quad (15a)$$

将式(12)代入式(13)可得

$$\delta = 5.84(\gamma)^{1/2} \left[\frac{R}{A} \left(\rho \frac{R^2 \omega^2}{2} - P_0 \right) \right]^{1/4} \quad (15b)$$

从式(15a)中可看出, 当胶液粘度 γ 确定后, 其雷

诺数即已成定值, 此时, 离心涂胶的转速 ω 与涂胶厚度 δ 是成反比关系变化的, 这与实际的涂胶情况是相符的。

3 涂胶参数的计算机模拟

根据上述的理论模型, 对涂胶厚度随粘度的变化 $\delta(\nu)$ 及涂胶厚度随离心机速度的变化关系 $\delta(\omega)$ 分别作了计算机模拟计算, 得结果如下图4、5所示。

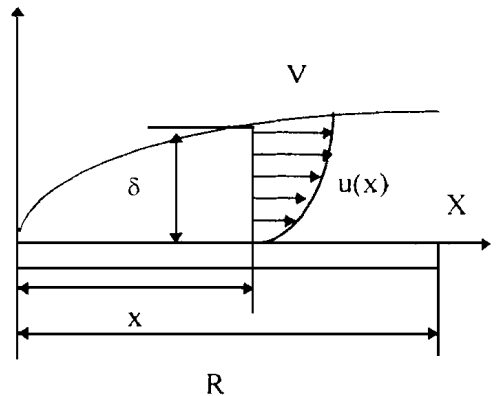


Fig 3 Fig 3 Resist thickness virus rotating speed under different viscosity

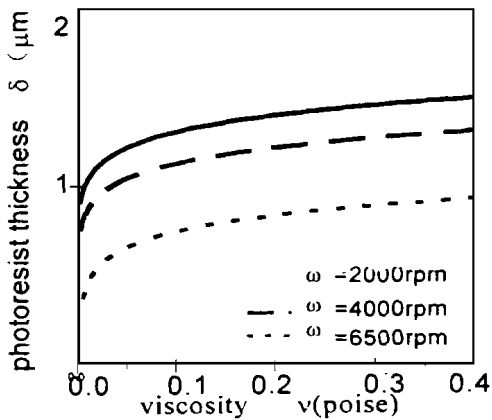


Fig 4 Relationship between coating thickness and viscosity

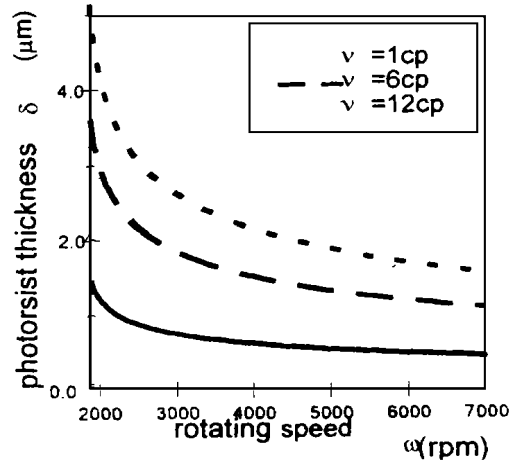


Fig 5 resist thickness versus rotating speed under different viscosity

从图中可看出如下变化规律:

- 1 对于确定的转速, 涂胶厚度随胶液粘度的增大而增加; 当粘度大于0.1泊时, 涂胶厚度随胶液粘度增大的速率基本上是一致的, 只是起始厚度不同而已; 当粘度小于0.1泊时, 转速越高, 涂胶厚度随胶液粘度变化的速度梯度就越大。
- 2 对于确定的胶液粘度, 涂胶厚度随离心机转速的增大而减小;
- 3 当胶液粘度逐步增大时, 涂胶厚度随转速增大而减小的速度就越快, 即涂胶厚度的变化速率提高。

4 实验测试及总结

为了验证理论分析的正确性, 分别用 AZ1350H - SF, AZ1350H 二种光刻胶进行离心涂胶实验。

图6是根据实际测试得到的涂胶厚度(用 Telystep 接触式膜厚测试仪), 经数据拟合处理后得到的涂胶厚度与速度关系曲线 $\delta(\omega)$, 从图中可看出, 胶液粘度确定后, 涂胶厚度随

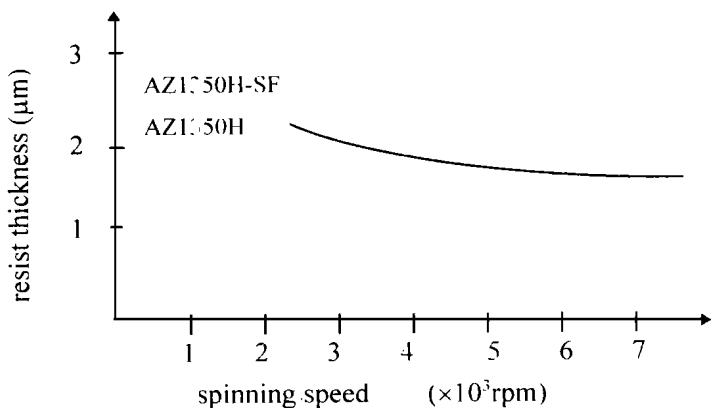


Fig 6 Resist thickness versus spinning coating

离心机转速增加的变化规律与模拟计算结果所反映的变化规律是一致的; 即粘度一定的情况下, 涂胶厚度随离心机转速的提高而降低。说明上述的理论分析是正确的, 模拟结果与实际变化规律是相符的。

参 考 文 献

- 1 山东工学院, 东北电力学院合编 工程流体力学 北京: 水利电力出版社, 1987: 150~ 210
- 2 王焕德主编 流体力学和流体机械 北京: 中国农业机械出版社 1981, 80~ 120

Dynamic Analysis of Spin Coating

FU Yong-Qi, LI Feng-You

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

Flowing form of resist forced by centrifugal during process of spin coating used in IC manufacture is analyzed in this paper. Relationship among parameters of rotating speed, viscosity & coated resist thickness have been deduced in the view of liquid dynamics. Measured by practical spin coating and experiment, the changing rule reflected by the theoretical results is coincide well with the measuring data.

Key words: Spin coating, Liquid dynamics, Resist thickness, Viscosity

付永启 男, 1967年5月生, 1988年毕业于吉林工业大学农业机械专业获工学学士学位, 1994年2月于长春光学精密机械学院精密机械系获工学硕士学位; 1996年5月于中国科学院长春光学精密机械研究所获工学博士学位。感兴趣的研究方向为精密测试、光学刻划。目前在长春光机所物理学博士后流动站从事衍射光学元件的制作研究, 已发表论文16篇。