

喷涂工艺薄膜厚度模型的构建与应用

李 波, 安建欣, 徐利梅

(电子科技大学空天科学技术研究院 成都 610054)

【摘要】为研究12寸晶圆切割过程中喷涂工艺设备参数对保护性薄膜厚度的影响,提高设备调整效率和工艺质量,采用均匀设计的实验方法,以薄膜在测试量块上的厚度为目标,对影响厚度的主要因素:涂料压力、微调阀和雾化压力进行研究。对实验数据采用SPSS进行非线性逐步回归得到了薄膜厚度的数学模型,揭示了各因素的交互关系,为测机调整提供数据依据,节省大量反复测机时间,在保证工艺质量的同时提高了喷涂设备的生产效率。该模型已成功运用于某芯片封装测试厂的喷涂设备,并取得了显著效果。

关键词 数学模型; 生产率; 保护性喷涂; 回归分析; 均匀设计

中图分类号 TH162

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.03.031

Film Thickness Model and Application of Protective Coating

LI Bo, AN Jian-xin, and XU Li-mei

(Institute of Astronautics & Aeronautics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Parameters of coating machine make a great impact on the thickness of the protective coating in the sawing process of the 12 inch wafer. To improve the productivity and process quality, the uniform design was used to study thickness of the film relating to the factor of scale of micrometer valve, flux pressure, and atomizing pressure. A significant mathematical model was obtained by using SPSS based on the non-linear regression analysis of experimental data, and it reveals the interactive relationship between the factors and provides a basis for machine adjustment. This model has been successfully applied to an chipset assembly/test (A/T) factory and the adjustment time has been significant reduced.

Key words mathematical models; productivity; protective coating; regression analysis; uniform design

由于传统的8寸晶片逐渐被12寸替代,半导体芯片封装测试工艺流程也随之改变。在晶片被切割成芯片的过程中,8寸晶片在经过固定工序后直接被切割;但12寸晶片在尺寸和厚度方面都不同于8寸晶片,直接切割会产生较大的应力,造成芯片的脱层和破裂。因此,在12寸晶圆切割之前需要进行激光打线,其目的就是在芯片的边缘打出一条保护线,避免直接切割产生的脱层和破裂。但激光打线过程中产生的碎屑会对芯片的焊点造成污染,出现焊接问题,因此,在激光打线工艺前还需要保护性喷涂工艺。在半导体工业中,喷涂工艺主要用在晶圆的蚀刻阶段,一般采用旋转式^[1],该喷涂工艺速度快,但只能在比较平整的晶片表面得到很好应用,而且对喷涂材料会造成较多的浪费。电沉积、挤压旋转式和扫描式^[2-4]等喷涂方法解决了上面这些问题。在

12寸晶圆引入的新的保护性喷涂工艺中,正是采用了扫描式喷涂工艺。

保护性喷涂工艺引入后,在晶圆品质保证方面起到了积极作用,但同时也带来了新问题:喷涂工艺对薄膜厚度要求苛刻,不同的产品对厚度的要求存在差异。在生产的产品种类更换后,需要调整喷涂设备的相关参数,需要花大量的时间进行反复调整(测机)才能达到要求,特别是喷涂符合要求的薄膜厚度。目前工程师在调整设备时都依据自己的经验,调整时间的长短完全由工程师的经验决定,非常不可控,不确定度很大。因此,在生产中,对建立准确的、可预测的薄膜厚度数学模型,从而标准化调整时间提出了非常迫切的需求。国外在薄膜厚度方面做了大量的研究,建立了许多关于薄膜厚度的数学模型^[1,4-5]。但这些都是微观的机理性研究,由于

收稿日期: 2009-05-05; 修回日期: 2009-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(70701007); 四川省青年基金(09ZQ026-054)

作者简介: 李 波(1975-),男,博士,副教授,主要从事生产过程控制、复杂系统集成与自动化、装备故障诊断与维修等方面的研究。

生产中影响薄膜的因素都是外在的、需要人为调整的,故目前研究无法直接用于生产实际。本文研究的重点就是要找出影响薄膜厚度的主要外在因素,揭示各因素的交互作用,从而为设备调整提供量化的、直接的数据支持。为了使试验过程最少地占用生产时间,同时保证数据采集的均匀分散性,采用了均匀设计的实验方法,并通过非线性回归分析建立关于薄膜厚度的数学模型,分析各因素对厚度的影响。

文献[6]没有考虑雾化压力对薄膜厚度的影响,但后续的实验证明雾化压力对薄膜厚度有较大的影响。同时生产中出于对设备稳定性的考虑,将喷头移动速度固定,因此本文的研究不考虑速度对薄膜厚度的影响,本文最后给出了基于模型的实际应用。

1 保护性喷涂工艺

保护性喷涂是应用在12寸晶圆切割工艺过程中的新工艺,其目的是为了保护芯片焊点不被激光打线产生的碎屑所污染,使接下来的工艺中焊点良好焊接,以保证产品的品质。首先在晶圆表面喷涂一种易挥发的胶状物(该物质很容易被水洗掉),切割完成后,碎屑和胶状物一起被洗掉,使芯片的焊点洁净无污染。虽然该工艺对焊点起到了很好的保护作用,但由于对薄膜的厚度要求严格,过薄或过厚都不满足质量要求。过薄不能很好地覆盖突起的焊点,起不到保护作用;而过厚则导致激光打线时无法准确定位。在生产中工人测量薄膜厚度的方法是间接通过测量量块上的薄膜重量来实现的,通过规范化薄膜重量保证薄膜厚度。在一个和晶圆同样大小(略大于晶圆)的金属托盘上均匀分布5个活动的量块,量块可以取下,方便称量,如图1所示。5个量块喷涂前后的重量差值就是薄膜的重量,设薄膜重量为 W ,薄膜厚度为 Y ,则 $Y=KW(K$ 为转化系数)。

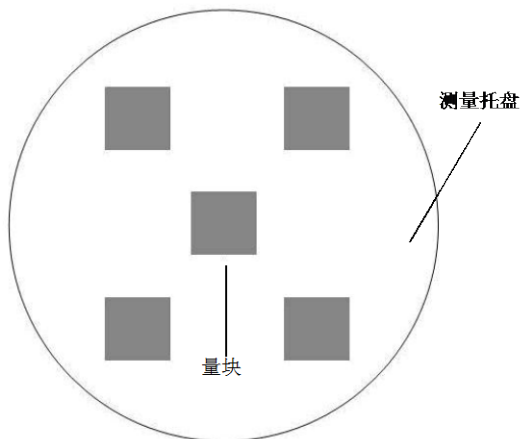


图1 测量用金属托盘及量块示意

喷涂设备主要包含压力系统和一个三维运动工作平台,图2描述了喷头运动的路径。通过逐行扫描的方式均匀地把液态物质喷涂在晶片表面。图3描述了喷头的结构,涂料在压力泵的压力下通过可调节的微调阀门在喷口处被高压气体雾化喷出,为了保证喷出涂料的均匀性,喷涂时液体压力,雾化气体压力,喷头的移动速度都保持恒定的值。

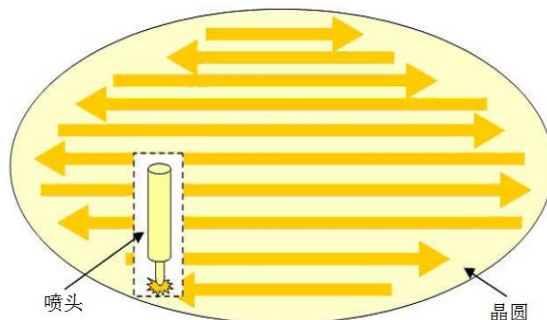


图2 喷头工作时的运动路径

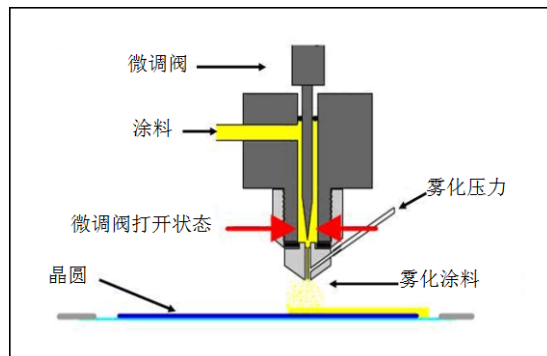


图3 喷头结构

影响薄膜厚度的因素有很多种,如涂料的压力、雾化的压力、微调阀的量程、喷头的运动速度、涂料的粘稠度、喷头高度和喷头纵向移动距离,以及设备保养等都会对薄膜厚度产生影响。其中,喷头的运动速度、涂料的粘稠度、喷头高度和喷头纵向移动距离一般为固定值,不会改变;设备保养的影响可以人为进行控制。通过实验分析和工人经验结合,本文把涂料压力、微调阀、雾化压力作为影响薄膜厚度的主要因素进行研究。

2 实验设计及实验结果

2.1 实验方法的选取

实验选用的水平数为10,应用正交的试验方法最少要做 10^2 次试验,且正交设计的试验点并没有能做到充分“均匀分散”。为了使试验不过多占用设备的生产时间,工厂要求尽量减少试验次数,但为保证样本的均匀散布,选用了均匀设计的试验方法。

2.2 均匀设计(UD)

均匀设计是基于试验点在整个试验范围内均匀散布, 从均匀性角度出发的一种试验设计方法, 是数论方法中的“伪蒙特卡罗方法”的一个应用^[7-8]。

均匀设计能从全面试验点中挑选出部分代表性的试验点, 这些试验点在试验范围内充分均衡分散, 但仍能反映体系的主要特征。均匀设计的试验点会比正交设计的试验点分布得更均匀, 因而具有更好的代表性。由于不再考虑“整齐可比性”, 在正交设计中为整齐可比而设置的实验点可不再考虑, 因而大大减少了试验次数。均匀设计已经成功地应用在化工、医药、机械设计等很多行业^[9-11]。

2.3 设计及实验结果

工厂实际操作中, 由于薄膜厚度是微米级, 直接测量很费时费力, 在生产中为了测量的简单易行, 通过定制薄膜重量标准保证薄膜的厚度。设薄膜的厚度为 Y (单位为 μm), 薄膜的重量为 W (单位为 mg)。实验以薄膜厚度 Y 为试验目标, 研究薄膜厚度与微调阀(用变量 X_1 表示, 单位为 10^{-5} m), 涂料的压力(用变量 X_2 表示, 单位为 psi), 雾化压力(用变量 X_3 表示, 单位为 psi)之间的交互关系。均匀设计表的代号用 $U_n(q^s)$ 表示, 其中“ U ”表示均匀设计, “ n ”表示要做 n 次试验, “ q ”表示每个因素有 q 个水平, s 表示该表有 s 列, 如表1所示。

表1 试验因素水平数

水平数	$X_1/10^{-5} \text{ m}$	X_2 / psi	X_3/psi
1	33	17	15
2	34	18	16
3	35	19	17
4	36	20	18
5	37	21	19
6	38	22	20
7	39	23	21
8	40	24	22
9	41	25	23
10	42	26	24

根据均匀设计表 $U_{10}^*(10^8)$ 、主要效应因子以及试验因素水平数确定均匀设计试验表, 如表2所示。其中 $\bar{W} (Y/K)$ 为薄膜重量均值, 可由表3得到。而薄膜厚度 Y 值可根据 $\bar{Y} = K\bar{W}$ 得到。

表2 均匀设计试验

试验次数.	$X_1/10^{-5} \text{ m}$	X_2 / psi	X_3/psi	\bar{w}
1	1(33)	5(21)	7(21)	106.39
2	2(34)	10(26)	3(17)	150.68
3	3(35)	4(20)	10(24)	93.49
4	4(36)	9(25)	6(20)	136.96
5	5(37)	3(19)	2(16)	112.15
6	6(38)	8(24)	9(23)	123.64
7	7(39)	2(18)	5(19)	97.54
8	8(40)	7(23)	1(15)	143.83
9	9(41)	1(17)	8(22)	83.52
10	10(42)	6(22)	4(18)	128.41

为减少试验的随机误差对结果的影响, 提高试验的精度, 在同一试验条件下重复3次, 3次的实验结果分别为 (W_1, W_2, W_3) , 3次实验结果的均值为 \bar{W} , 如表3所示。

表3 薄膜重量

W_1	W_2	W_3	\bar{w}
112.84	101.11	105.23	106.39
144.87	151.55	155.62	150.68
94.15	91.00	95.33	93.49
143.82	131.60	135.46	136.96
109.67	111.19	115.58	112.15
124.37	121.39	125.17	123.64
105.98	91.34	95.29	97.54
154.10	131.90	145.48	143.83
73.48	81.87	95.20	83.52
138.79	121.32	125.13	128.41

3 数据的回归分析及厚度模型的建立

根据实验设计方案以及试验结果, 利用数据分析软件SPSS 17.0进行回归分析。

3.1 线性关系分析

根据实验数据以及生产的实际经验, 微调阀、涂料压力、雾化压力3因素间存在交互作用, 故薄膜厚度 Y 与3因素的关系不能选用线性回归模型, 应采用二次型回归模型, 并用逐步回归来筛选变量。

3.2 非线性逐步回归

以薄膜厚度为目标的非线性回归方程模型为:

$$\bar{Y} = K\bar{W} = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} X_i X_j$$

方程展开为:

$$\bar{Y} = K\bar{W} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1 X_1 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{22} X_2 X_2 + b_{23} X_2 X_3 + b_{33} X_3 X_3$$

把 $X_1 X_1 = X_{11}$, $X_1 X_2 = X_{12}$, $X_1 X_3 = X_{13}$, $X_2 X_2 = X_{22}$, $X_2 X_3 = X_{23}$, $X_3 X_3 = X_{33}$, $b_{11} = b_4$, $b_{12} = b_5$, $b_{13} = b_6$, $b_{22} = b_7$, $b_{23} = b_8$, $b_{33} = b_9$ 代入, 经过代换, 方程变为:

$$\bar{Y} = K\bar{W} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_{11} + b_5 X_{12} + b_6 X_{13} + b_7 X_{22} + b_8 X_{23} + b_9 X_{33}$$

方程经过代换后变为9个自变量的线性回归方程, 如表4所示。

用SPSS进行逐步回归分析, 因变量为 \bar{W} , 自变量为 $X_1, X_2, X_3, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{22}, X_{23}, X_{33}$, 得到的结果如表5所示。

表4 回归变量表

X_1	X_2	X_3	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{22}	X_{23}	X_{33}	\bar{W}
33.00	21.00	21.00	1 089.00	693.00	693.00	441.00	441.00	441.00	106.39
34.00	26.00	17.00	1 156.00	884.00	578.00	676.00	442.00	289.00	150.68
35.00	20.00	24.00	1 225.00	700.00	840.00	400.00	480.00	576.00	93.49
36.00	25.00	20.00	1 296.00	900.00	720.00	625.00	500.00	400.00	136.96
37.00	19.00	16.00	1 369.00	703.00	592.00	361.00	304.00	256.00	112.15
38.00	24.00	23.00	1 444.00	912.00	874.00	576.00	552.00	529.00	123.64
39.00	18.00	19.00	1 521.00	702.00	741.00	324.00	342.00	361.00	97.54
40.00	23.00	15.00	1 600.00	920.00	600.00	529.00	345.00	225.00	143.83
41.00	17.00	22.00	1 681.00	697.00	902.00	289.00	374.00	484.00	83.52
42.00	22.00	18.00	1 764.00	924.00	756.00	484.00	396.00	324.00	128.41

表5中模型4的 R^2 以及修正 R^2 的值为1, 说明得到的回归方程的拟合度非常高。

表5 回归模型的常用统计量

模型	R	R^2	调整 R^2	标准估计的误差
1	0.901 ^a	0.811	0.787	10.434 67
2	0.996 ^b	0.991	0.989	2.421 36
3	1.000 ^c	1.000	0.999	0.557 41
4	1.000 ^d	1.000	1.000	0.173 92

a. 预测变量: (常量), X_2 ; b. 预测变量: (常量), X_2, X_3 ; c. 预测变量: (常量), X_2, X_3, X_{12} ; d. 预测变量: (常量), X_2, X_3, X_{12}, X_{33} 。

通过表6 对回归系数的分析, 得到薄膜重量的回归方程为:

$$W=60.950+5.071X_2-5.254X_3+0.035X_1X_2+0.057X_3^2$$

代入式 $\bar{Y} = K\bar{W}$, 得到:

$$Y=KW= K(60.950+5.071X_2-5.254X_3+0.035X_1X_2+0.057X_3^2)$$

表6 回归系数分析

模型	非标准化系数		标准系数	t检验	显著性	
	B	标准 误差				
1	(常量)	-27.098	24.919	-1.087	0.309	
	X_2	6.733	1.149	0.901	0.000	
2	(常量)	49.949	8.682	5.753	0.001	
	X_2	6.086	0.272	0.814	22.367	0.000
	X_3	-3.237	0.272	-0.433	-11.898	0.000
3	(常量)	39.614	2.200	18.004	0.000	
	X_2	5.059	0.111	0.677	45.667	0.000
	X_3	-3.027	0.065	-0.405	-46.302	0.000
	X_{12}	0.035	0.003	0.172	11.229	0.000
	(常量)	60.950	2.917	20.894	0.000	
4	X_2	5.071	0.035	0.678	146.553	0.000
	X_3	-5.254	0.297	-0.703	-17.712	0.000
	X_{12}	0.035	0.001	0.170	35.531	0.000
	X_{33}	0.057	0.008	0.298	7.525	0.001

通过模型可以看到微调阀和涂料压力存在正的交互作用,雾化压力和涂料压力对厚度的影响显著,涂料压力取值越大,薄膜厚度越大;而薄膜厚度随着雾化压力的增大而变薄。

4 模型实际应用

本文研究的目的是通过建立厚度模型为测机调整提供数据支持,以减少调整时间。生产中,不同类型的产品对应了不同的程式(recipe,即在设备上的参数配置),不同的程式对应不同的参数设定。工程师通过调节微调阀来满足生产要求的薄膜厚度,以往工厂的做法都是凭工程师经验调节微调阀,需要反复调整,而现在根据模型使设备在经过1~2次调整后就能达到要求。

如某产品需要喷涂的厚度为 KW ,规范要求重量 $W=100$ mg,程式需要涂料压力和雾化压力分别为20 psi、21 psi,根据模型 $Y=KW=K(60.950+5.071X_2-5.254X_3+0.035X_1X_2+0.057X_3^2)$,代入 $W=100$, $X_2=20$, $X_3=21$,计算得到微调阀 X_1 开度为 33×10^{-5} m,工程师按照 X_1 的值直接对设备进行调整。该模型已经在某芯片封装测试厂得到使用,非常有效地节省了测机时间。

5 结束语

本文采用均匀设计的试验和回归分析方法,构建了薄膜厚度数学模型,描述了微调阀、雾化压力和涂料压力对薄膜厚度的影响以及三者之间的交互关系。该模型已在某芯片封装测试厂成功应用,实际证明其已经能够对薄膜厚度做出准确预测,使设备调整不再凭借工程师的经验,而是得到直接的数据支持,有效地节省了反复调整的测机时间,保证了喷涂工艺的质量要求。

由于喷涂过程中影响薄膜厚度的因素还有很多,有些因素暂时还不能量化,比如保养前后造成的设备差异等,所以在确保更高的精度和准确性上还有很多工作要做。

参 考 文 献

[1] PHAM N P, BURGHARTZ J N, SARRO P M. A model for film thickness using direct spray coating[C]//Proceedings of 5th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2003). Singapore: IEEE Press, 2003: 773-776.
[2] TOTH L, BITER W J. Electrodeposition of magnetic

coatings for a magnetoelastic strain sensor[C]//Sensors for Industry Conference. Houston, Texas, USA: IEEE Press, 2002: 125-126.

- [3] HAN Sang-jun, DERKSEN J, CHUN Jung-hoon. Extrusion-spin coating: an efficient and deterministic photoresist coating method in microlithography[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2004, 17(1): 12-21.
[4] KITANO T. Novel coating apparatus using nozzle-scan technique[C]//The Ninth International Symposium on Semiconductor Manufacturing. Tokyo, Japan: IEEE Press, 2000: 395-398.
[5] TU Yih-O. Mathematical modeling and computer simulation spin coating of ferrofluid[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(6): 3129-3131.
[6] CHEN Jian, XU Li-mei. Experimental analysis of a protective wafer coating process for the die preparation[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu, Japan: IEEE Press, 2008: 447-451.
[7] 方开泰. 均匀设计-数论方法在试验设计的应用[J]. 应用数学学报, 1980, 3(4): 367-372.
FANG Kai-tai. The uniform design: application of number-theoretic methods in experimental design[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1980, 3(4): 367-372.
[8] 王元, 方开泰. 关于均匀分布与试验设计(数论方法)[J]. 科学通报, 1981, 26(2): 485-489.
WANG Yuan, FANG Kai-tai. A note on uniform distribution and experimental design[J]. Chinese Science Bulletin, 1981, 26(2): 485-489.
[9] 韩汉鹏, 林海婵, 何勇, 等. 均匀设计在橡胶纳米复合材料制备工艺中的应用[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(1): 178-182.
HAN Han-peng, LIN Hai-chan, HE Yong, et al. Application of uniform design to the rubber nanocomposite production technology[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(1): 178-182.
[10] 黄杰, 谢川, 王倩. 均匀设计在烷基水杨酸钙合成中的应用[J]. 四川大学学报, 2003, 35(2): 73-76.
HUANG Jie, XIE Chuan, WANG Qian. Application of uniform distribution and experimental design in the preparation of calcium alkylsalicylate[J]. Journal of Sichuan University 2003, 35(2): 73-76.
[11] 魏效玲, 于治福, 王宏伟. 基于均匀试验和响应面法的矿用风动水泵稳健设计[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 257-261.
WEI Xiao-ling, YU Zhi-fu, WANG Hong-wei. The robust design of mine pneumatic pump based on response surface methodology and uniform design[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 257-261.

编辑 漆蓉