

文章编号: 1006-3080(2025)05-0589-07

DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.20241218002

基于 Box-Behnken 响应面法优化 SC1 清洗热氧化膜工艺

王玉超¹, 吴彬斌², 贾丽丽², 管冯林², 李虎², 李芳², 张瑜², 李涛¹

(1. 华东理工大学化工学院, 上海 200237; 2. 上海华力集成电路制造有限公司, 上海 201314)

摘要:为控制 SC1 清洗导致的热氧化膜损失以及晶圆内不均匀性增加的问题, 采用 Box-Behnken 设计法设计实验, 并结合响应面法对 SC1 清洗工艺的 3 个关键参数(即药液温度、药液配比($V_{\text{NH}_4\text{OH}} : V_{\text{H}_2\text{O}_2} : V_{\text{H}_2\text{O}}$, 下同)和工艺时间)进行优化。同时, 探讨了各因素及其交互作用对清洗效果的影响。结果表明: 当清洗时间固定为 90 s 且待清洗的热氧化膜厚度为 3 nm 时, 药液温度为 30 ℃、药液配比为 1 : 9.0 : 50 的 SC1 化学液对氧化膜表面的影响最小; 当药液温度为 60 ℃、药液配比为 1 : 3.0 : 50 时, 热氧化膜的最大损失厚度为 0.065 nm, 且晶圆内不均匀性增量控制在 1.00% 以内; 当药液温度为 60 ℃、药液配比为 1 : 6.5 : 50 时, 热氧化膜的最大损失厚度为 0.043 nm, 且晶圆内不均匀性增量控制在 0.50% 以内; 当药液温度为 55 ℃、药液配比为 1 : 8.0 : 50 时, 热氧化膜损失厚度可维持在 0.020 nm, 且表面不均匀性增量控制在 0.24% 以内。本研究为集成电路制造中 SC1 清洗工艺的参数选择提供了参考。

关键词:响应面优化; 单片湿法工艺; SC1; 热氧化膜损失; 表面均匀性

中图分类号: TN405

文献标志码: A

SC1 药液是 NH_4OH 和 H_2O_2 的水溶液, 因其对颗粒污染物的优异去除能力, 自 1970 年被 Kern 等^[1]开发以来被广泛应用于集成电路前段的各大湿法工艺站点。SC1 的清洗机理^[2]是利用 H_2O_2 的氧化作用, 将裸露的硅表面氧化, 生成一层氧化硅薄膜, 而氧化硅薄膜又可以溶解于 NH_4OH 的碱性环境中, 通过反复刻蚀表面达到去除附着或埋藏在硅片表面污染物的目的。所以当使用 SC1 药液清洗表面长有氧化膜的硅片时, 难免会产生微刻蚀^[3], 而随着工艺节点的推进, 以及对表面薄膜质量要求的提高^[4], 如何改善 SC1 清洗工艺造成的氧化膜损失以及表面不均匀性增加的问题逐渐受到关注^[5-7]。

在大多数成熟工艺节点中, SC1 工艺都是在批量槽式清洗机台上进行的^[8], 将 25 片晶圆同时竖直地浸泡在装有 SC1 药液的清洗槽中, 此时晶圆表面的 SC1 药液的性质基本一致^[9]。基于槽式 SC1 清洗

过程, Reinhardt 等^[10]根据一级反应动力学理论并结合 Arrhenius 方程得到了 SC1 刻蚀氧化膜的速率方程, 但是发现实际值与计算值仍有较大差异; Maines 等^[11]通过调整 SC1 清洗温度、药液配比以及清洗时间来控制氧化膜的损失, 但是作者采用的是单变量实验, 只反映单个因素的影响, 难以分析自变量之间的相互作用。Box-Behnken Design (BBD) 响应面分析法^[12-13]是一种通过实验设计、数学建模来预测最优工艺参数的研究方法, 相对于传统的实验方法, 具有计算简便、实验量少等优点, 应用十分广泛。

本文基于单片旋转喷淋机台, 采用 BBD 响应面分析方法, 考察 SC1 清洗热氧化膜过程中药液温度、药液配比以及清洗时间这三个因素对热氧化膜损失厚度以及面内不均匀性产生的影响, 通过拟合, 确定合适的工艺参数, 以期对集成电路制造过程中 SC1 清洗热氧化膜工艺的参数选择提供一定的参考

收稿日期: 2024-12-18

作者简介: 王玉超(2000—), 男, 山东临沂人, 硕士生, 主要研究方向为集成电路湿法清洗技术。E-mail: ycwang_mail@163.com

通信联系人: 李涛, E-mail: tli@ecust.edu.cn

引用本文: 王玉超, 吴彬斌, 贾丽丽, 等. 基于 Box-Behnken 响应面法优化 SC1 清洗热氧化膜工艺 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2025, 51(5): 589-595.

Citation: WANG Yuchao, WU Binbin, JIA Lili, *et al.* SC1 Cleaning Thermal Oxide Film Process Optimization Based on Box-Behnken Response Surface Method[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2025, 51(5): 589-595.

价值。

1 实验部分

1.1 材料与方法

本实验使用 300 mm<100>晶向无图案实验硅片。实验硅片先进行预清洗,再在 700~1 000 ℃ 常压炉管中热氧化生长出 3 nm 二氧化硅薄膜(Thermal oxide wafer, TOX wafer),然后将二氧化硅薄膜实验硅片置于单片旋转喷淋湿法清洗机台中,使用不同条件下的 SC1 药液进行湿法清洗。药液中 NH_4OH ($w=29\%$) 与 H_2O_2 ($w=31\%$) 的纯度等级均为 ULSI 行业标准。图 1 为单片旋转喷淋清洗机台工作示意图。

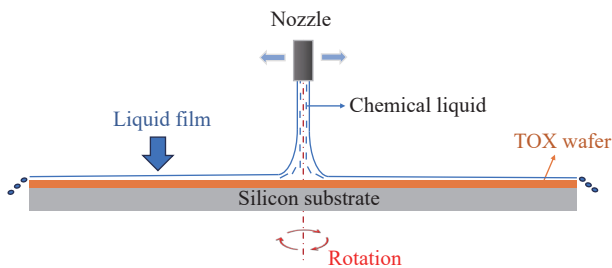


图 1 单片旋转喷淋清洗机台工作示意图
Fig. 1 Sketch map of single spray clean tool

为获取氧化膜损失量(Y_1)和由刻蚀导致的面内不均匀性增量(Y_2),在湿法工艺前后使用膜厚度测机台对晶圆表面均匀分布的 49 个点进行量测。面内不均匀性增量通过式(1)^[14]计算:

$$Y_2 = \frac{3\sigma}{30 - \sigma_{\text{ave}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中, σ 与 σ_{ave} 分别表示表面 49 个点刻蚀厚度的标准差和平均值。

1.2 响应面实验设计

根据工厂生产实验数据,选取长有 3 nm 热氧化膜的晶圆作为测试对象,对关键参数(即 SC1 药液温度(X_1)、SC1 药液体积比($V_{\text{NH}_4\text{OH}}:V_{\text{H}_2\text{O}_2}:V_{\text{H}_2\text{O}}$,本文中为 1: X_2 :50)、清洗时间(X_3))进行 3 因素 3 水平响应面实验,设计 3 组中心参数进行验证,并通过控制变量严格保证 15 组测试工艺过程一致,得到相同实验条件下清洗后晶圆表面氧化膜损失厚度及刻蚀不均匀性增量。值得注意的是,根据 Reinhardt 等^[10]推导出的理论刻蚀速率(v_{EtchRate})方程(式 2),响应面可能不存在极值点,但是我们的目标是在实验区间内寻找可行的工艺窗口,所以响应面实验结果依然具有参考价值。

$$v_{\text{EtchRate}} = K_0 \times \sqrt{\frac{C_{\text{NH}_4\text{OH}}}{C_{\text{H}_2\text{O}_2}}} \times e^{-E_0/RT} \quad (2)$$

式中, K_0 、 E_0 、 R 为常数, $C_{\text{NH}_4\text{OH}}$ 、 $C_{\text{H}_2\text{O}_2}$ 分别为 SC1 药液中氨水和双氧水的浓度, T 为药液温度。

选择 BBD 实验方法设计优化实验,实验因素及水平编码如表 1 所示,最后得到 15 组实验方案和结果,如表 2 所示。将实验拟合所得的氧化膜损失响应面模型与刻蚀不均匀性响应面模型分别简称为 OFL 模型与 ENU 模型。

使用 Design-expert 12.0 软件^[13]进行拟合、方差分析及最优条件的预测。二次多项式的表达式如式(3)所示:

$$Y = A_0 + A_i X_i + \sum A_{ii} X_i^2 + \sum A_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (3)$$

式中, Y 表示响应的预测值, A_0 表示常数, A_i 为线性项系数, A_{ii} 为二次项系数, A_{ij} 为交互项系数, ϵ 表示残

表 1 三因素三水平响应面实验参数

Table 1 Parameters of the three factor-level response surface experiment

Level	Factor		
	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2	X_3/s
-1	30	1.0	60
0	45	5.0	120
1	60	9.0	180

表 2 响应面优化实验方案及结果

Table 2 Experimental scheme and results of response surface optimization

No.	Design factor			Objective function	
	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2	X_3/s	Y_1/nm	$Y_2/\%$
1	30	1.0	120	0.010 7	0.37
2	60	1.0	120	0.098 0	1.69
3	30	9.0	120	0.005 2	0.10
4	60	9.0	120	0.044 1	0.46
5	30	5.0	60	0.003 3	0.08
6	60	5.0	60	0.032 0	0.42
7	30	5.0	180	0.010 1	0.22
8	60	5.0	180	0.096 1	1.38
9	45	1.0	60	0.015 8	0.38
10	45	9.0	60	0.004 0	0.12
11	45	1.0	180	0.047 0	1.27
12	45	9.0	180	0.193 0	0.30
13	45	5.0	120	0.024 0	0.32
14	45	5.0	120	0.018 8	0.37
15	45	5.0	120	0.017 4	0.40

差, X_i 和 X_j 为各因素水平的编码值($i=1\sim3, j=1\sim3$)。

1.3 SC1 清洗工艺

以中心参数为例, SC1 清洗工艺流程如下: 硅片到达清洗腔后以 600 r/min 的转速旋转, 喷嘴固定于硅片中心位置(此状态下晶圆表面液膜分布最为均匀, 对颗粒的去除效果最好, 后文如无特殊说明均固定于中心位置), 先使用 2 L/min 去离子水(DIW)对硅

片预喷淋 15 s, 使待清洗表面充分润湿, 再以 2 L/min 流量垂直喷淋 45 ℃ 的 SC1 药液, 硅片转速调整为 500 r/min, $X_2=5$, 清洗时长为 120 s, 清洗结束后使用去离子水喷淋 30 s, 洗净表面化学成分, 最后调整硅片转速为 1 700 r/min, 使用流量为 5 L/min 的 N_2 吹扫表面 15 s 进行干燥, 完成湿法清洗工艺。图 2 为 SC1 清洗工艺示意图。

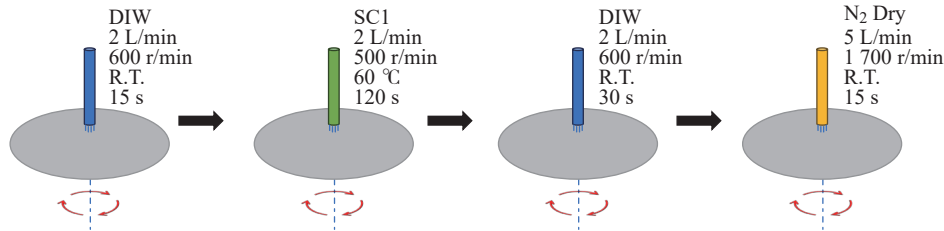


图 2 SC1 清洗工艺示意图

Fig. 2 SC1 cleaning process diagram

2 结果与讨论

2.1 BBD 响应面实验结果及回归分析

如表 2 所示, 经不同工艺条件的 SC1 清洗之后, 氧化膜表面平均损失厚度范围为 0.0040~0.0980 nm, 面内不均匀性增量的范围为 0.08%~1.69%, 其中当清洗液温度为 30 ℃, 药液配比为 1 : 9.0 : 50, 清洗时间为 120 s 时, SC1 清洗液对氧化膜的刻蚀厚度以及面内不均匀性增量最小, 分别为 0.0052 nm 和 0.08%; 当清洗液温度为 60 ℃, 药液配比为 1 : 1.0 : 50, 清洗时间为 120 s 时, SC1 清洗液对氧化膜的刻蚀厚度以及面内不均匀性增量最大, 分别为 0.0980 nm 和 1.69%。

采用二次多项式方程对数据进行拟合, 并根据方差分析结果对模型进行手动优化调整, 使模型达到最优, 得到 OFL 和 ENU 模型的编码回归方程, 分别如式(4)和式(5)所示。

$$Y_1 = 0.2007 + 0.3011X_1 - 0.1236X_2 + 0.1468X_3 - 0.1210X_1X_2 + 0.1432X_1X_3 - 0.0397X_2X_3 + 0.1664X_1^2 + 0.0279X_2^2 - 0.0133X_3^2 \quad (4)$$

$$Y_2 = 0.3637 + 0.3975X_1 - 0.3416X_2 + 0.2709X_3 - 0.2400X_1X_2 + 0.2050X_1X_3 - 0.1768X_2X_3 + 0.1490X_1^2 + 0.1423X_2^2 - 0.0123X_3^2 \quad (5)$$

OFL 和 ENU 模型回归方程的方差分析(ANOVA)结果分别见表 3、表 4。根据回归模型的方差分析, 对于氧化膜损失厚度(Y_1), X_1 、 X_2 、 X_3 三个因素的影响都极显著($P<0.05$), 其中对 X_1 的响应最为敏感; 对于因素的交互作用, X_1 与 X_2 的交互作用、 X_1 与 X_3 的交互作用极显著($P<0.05$), X_2 与 X_3 的交互

作用影响不显著($P>0.05$)。对于刻蚀不均匀性(Y_2), X_1 、 X_2 、 X_3 三个因素以及因素之间的交互作用的影响都极显著($P<0.05$), 模型拟合度好, 能够有效地反映各个因素与综合评分之间的规律关系。两个模型失拟项的 P 值均大于 0.05, 失拟不显著, 说明研究中未知因素对结果的影响较小。同时由 Design Expert 软件得出两个模型的矫正决定系数(Adj R^2)分别为 0.9642 和 0.9868, 预测决定系数(Pred R^2)分别为

表 3 OFL 模型方差分析结果

Table 3 ANOVA results of OFL model

Source	Sum of square	DF ¹⁾	Mean square	F	P
Model	1.2700	9	0.1414	42.95	0.0003
X_1	0.7254	1	0.7254	220.30	<0.0001
X_2	0.1223	1	0.1223	37.13	0.0017
X_3	0.1723	1	0.1723	52.32	0.0008
X_1X_2	0.0586	1	0.0586	17.79	0.0083
X_1X_3	0.0821	1	0.0821	24.93	0.0041
X_2X_3	0.0063	1	0.0063	1.92	0.2245
X_1^2	0.1023	1	0.1023	31.05	0.0026
X_2^2	0.0029	1	0.0029	0.87	0.3928
X_3^2	0.0007	1	0.0007	0.20	0.6739
Residual	0.0165	5	0.0033		
Lack of fit	0.0140	3	0.0047	3.87	0.2121
Pure error	0.0024	2	0.0012		
Cor total	1.2900	14			

1) DF—Freedom degree

表 4 ENU 模型方差分析结果
Table 4 ANOVA results of ENU model

Source	Sum of square	DF ¹⁾	Mean square	F	P
Model	3.4500	9	0.383 8	117.16	<0.000 1
X_1	1.2600	1	1.2600	385.90	<0.000 1
X_2	0.9337	1	0.9337	285.04	<0.000 1
X_3	0.5870	1	0.5870	179.20	<0.000 1
X_1X_2	0.2304	1	0.2304	70.34	0.000 4
X_1X_3	0.1681	1	0.1681	51.32	0.000 8
X_2X_3	0.1250	1	0.1250	38.15	0.001 6
X_1^2	0.0820	1	0.0820	25.04	0.004 1
X_2^2	0.0748	1	0.0748	22.82	0.005 0
X_3^2	0.0006	1	0.0006	0.17	0.696 9
Residual	0.0164	5	0.003 3		
Lack of fit	0.0131	3	0.0044	2.66	0.284 9
Pure error	0.0033	2	0.001 6		
Cor total	3.4700	14			

1) DF—Freedom degree

0.8215 和 0.9375, 差值均在 0.2 之内, 表明两个模型预测值与实测值拟合较好, 可用于氧化膜刻蚀厚度

和刻蚀均匀性的预测和分析。

残差与方程预测值的关系可用于判断拟合模型所给出的预测值的理想程度, OFL 模型与 ENU 模型的这一关系分别如图 3(a) 与图 3(b) 所示, 两个模型的预测值的残差均在 ± 4.00 的范围内变化, 没有超出控制线, 说明所得回归方程的预测值较为理想。图 3(c) 与图 3(d) 所示分别为氧化膜损失厚度的实验值与预测值以及刻蚀不均匀性的实验值与预测值关系, 其中图中各点为实验值, 拟合直线为预测值, 可见本实验中的 15 个点均分布于直线附近, 且偏离程度不大, 说明两个模型均能够较好地反映出药液温度、药液配比以及清洗时间与氧化膜损失厚度与刻蚀不均匀性增量的关系。

为更直观地体现两两因素对氧化膜损失厚度以及刻蚀不均匀性增量之间的交互关系, 利用 Design-expert 12.0 软件绘制相应的响应面 3D 图。图 4(a) 与图 4(d) 示出了当清洗时间(X_3)维持高水平时, 氧化膜损失厚度与刻蚀不均匀性增量随 SC1 药液温度(X_1)和药液中 H_2O_2 所占体积比(X_2)变化的趋势。可见药液温度的升高与 H_2O_2 所占体积比的减少都会导致更厚的氧化膜损失, 同时导致更严重的面内不均匀性, 但是当其中一个设计因子处于低水平时, 都能够使目标函数处于较低值。另外从图中还可以看

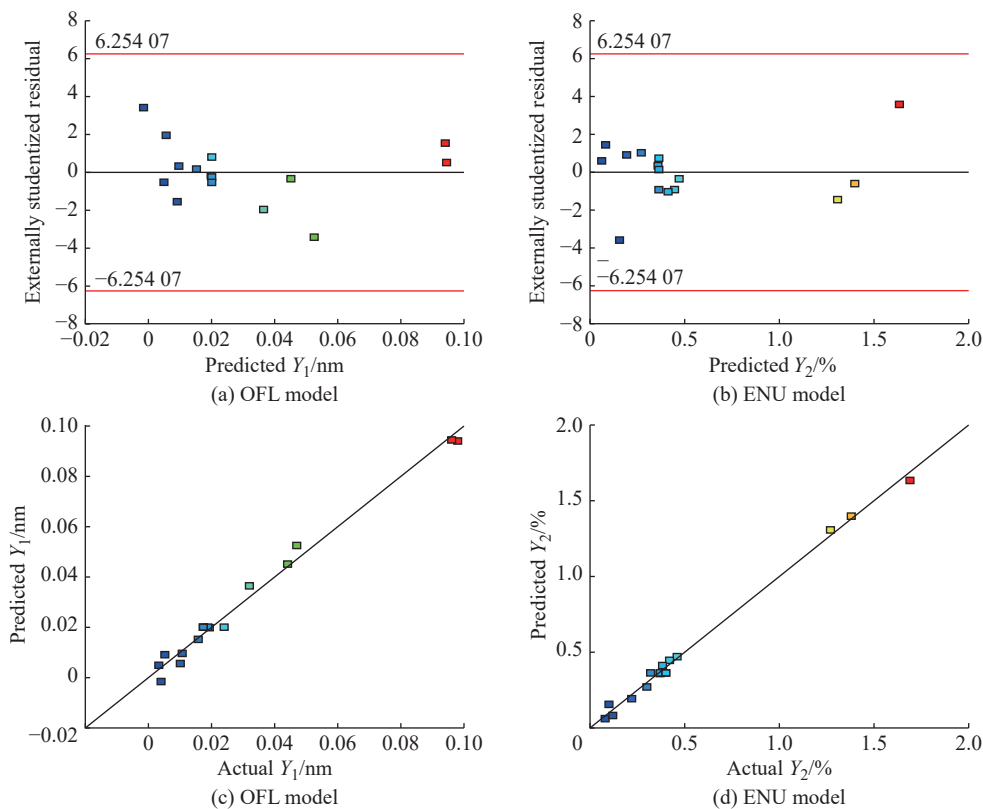


图 3 OFL 模型与 ENU 模型的残差与预测值(a~b)以及实验值与预测值的对比(c~d)

Fig. 3 Internally studentized residuals versus predicted responses (a~b) and actual versus predicted responses (c~d) of OFL and ENU model

出,两个目标函数对设计因子的变化敏感度不同,利用这一关系可以获得既能够使氧化膜损失厚度处于较高水平又能够将表面不均匀性控制在较低水平的参数条件。

图4(b)与图4(e)示出了当SC1药液温度(X_1)维持高水平时,氧化膜损失厚度与刻蚀不均匀性增量随药液中 H_2O_2 所占体积比(X_2)与清洗时间(X_3)变化的趋势。可见此时氧化膜损失厚度与两个设计因子均呈线性关系,而对于刻蚀不均匀性增量,随着清洗时间的增加,其对药液中 H_2O_2 所占体积比愈发敏感,说明低占比 H_2O_2 配方的SC1药液在进行较长时间清洗后,在刻蚀速率稳步增加的基础上,氧化膜表面的不均匀性会显著提升,所以当工艺时间较长时,应适当提高SC1配方中 H_2O_2 的体积比,以获得质量较好的表面。

图4(c)与图4(f)示出了当药液中 H_2O_2 所占体积比(X_2)维持低水平时,氧化膜损失厚度与刻蚀不均匀性增量随SC1药液温度(X_1)和清洗时间(X_3)变化的趋势。可以看出当药液温度较高时,即使清洗时间处于最低水平,仍能在造成较低氧化膜损失的基础上产生较高的刻蚀不均匀性增量,说明在单片湿法清洗中,受喷嘴喷淋进液的影响,喷淋点附近的局部区域刻蚀速率会过快,从而导致面内不均匀性增加。为减轻这一现象,应避免使用高温和低占比 H_2O_2 的SC1药液。

2.2 SC1清洗后常见氧化膜表面要求与模型预测解

在实际集成电路制造过程中,不希望看到由SC1清洗导致的面内不均匀增加的问题,所以该指标应该越低越好;而氧化膜厚度损失应视具体情况而定,主要分为表5所示的3种情况:一是在清洗如栅氧化层、离子注入屏蔽层等本身对厚度十分敏感的氧化膜层时,其氧化膜本身质量很好,SC1药液清洗主要是去除附着在氧化膜表面的污染物,此时要求氧化膜的损失越低越好(Condition 1);二是被清洗的氧化膜较厚,并且颗粒等污染物可能埋藏于氧化膜表面,此时可以根据工艺窗口的要求在面内均匀性允许的基础上提高刻蚀厚度,以提高清洗效果,使用模型预测时以面内不均匀性增量控制在1.00%(Condition 2-1)和0.50%(Condition 2-2)为例;三是使用药液对氧化膜表面进行精确的微刻蚀,此时要求SC1药液能够较快地刻蚀掉一定厚度的氧化层,并且尽量不造成面内不均匀性增加,使用模型预测时以单次清洗过程刻蚀0.02 nm的氧化膜(Condition 3)为例。根据上述3类情况,以生产中常见的清洗工艺时间90 s为例,结合OFL模型与ENU模型给出预测可行的工艺参数条件,得到工艺需求与SC1药液的工艺参数对应关系,结果见表5。可知采用30℃、 X_2 为9.0的SC1药液,能在控制面内不均匀性增量为0.21%时获得0.0108 nm的最大氧化膜损失厚度;采用60℃、 X_2 为3.0的SC1药液,能在控制面内不均匀性增量

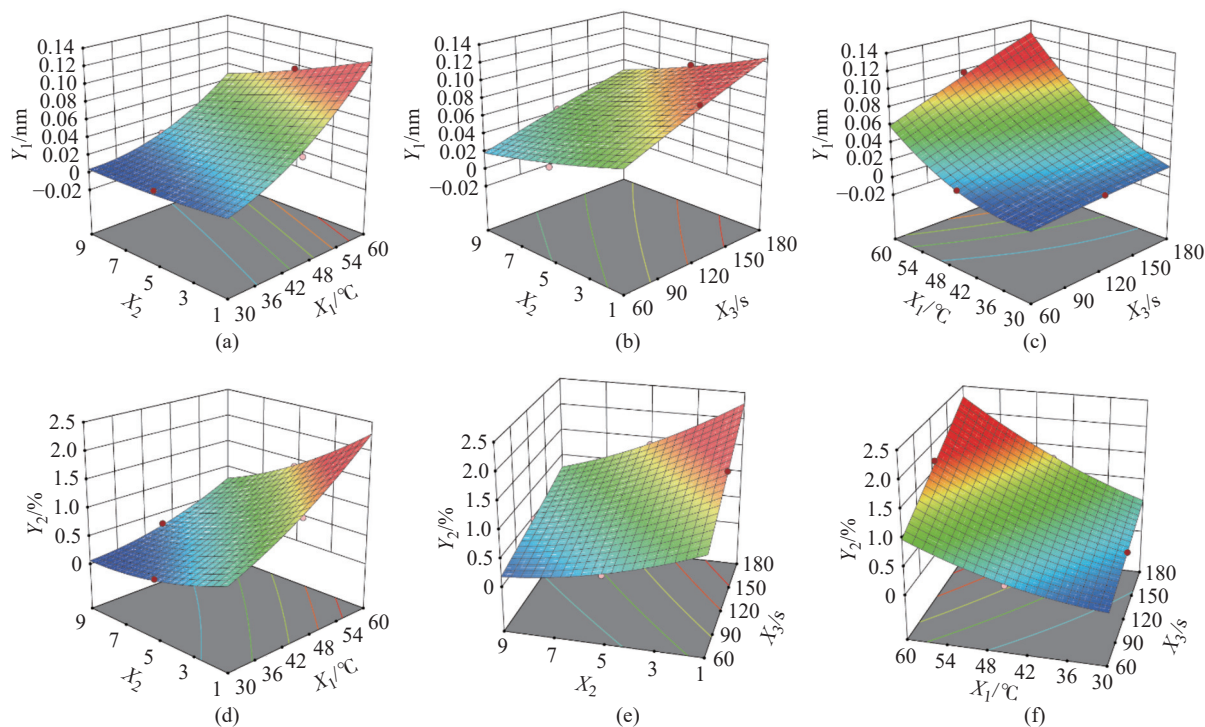


图4 目标函数与设计因子的响应面轮廓

Fig. 4 Response surface contour of objective functions and design factors

为 1.00% 时获得 0.065 0 nm 的最大氧化膜损失厚度;采用 60 ℃、 X_2 为 6.5 的 SC1 药液,能在控制面内不均匀性增量为 0.50% 时获得 0.043 0 nm 的最大氧化膜损失厚度;采用 55 ℃、 X_2 为 8.0 的 SC1 药液,能够在保持 0.020 0 nm 的氧化膜损失厚度的基础上,对表面不均匀性增量控制在 0.24%。

2.3 模型预测工艺条件的验证

按照模型预测工艺参数开展实验验证,对每个实验条件分别进行 3 次重复实验,所得结果见表 6。从表中可以看到,在 3 组验证实验的结果中,氧化膜损失厚度与表面不均匀性增量的平均值和预测值的相对标准偏差(RSD)都控制在≤10%,这对于基数如此小的数据是非常不错的预测效果,说明所拟合的

表 5 常见 SC1 工艺需求与模型预测的可行工艺条件
Table 5 Common SC1 process requirements and feasible process conditions predicted by response surface model

Condition	Predicted parameter			Predicted consequence	
	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2	X_3/s	Y_1/nm	$Y_2/\%$
Condition 1	30	9.0	90	0.010 8	0.21
Condition 2-1	60	3.0	90	0.065 0	1.00
Condition 2-2	60	6.5	90	0.043 0	0.50
Condition 3	55	8.0	90	0.020 0	0.24

两组方程在预测 SC1 药液清洗热氧化膜时氧化膜损失厚度和面内不均匀性增量方面具有很强的实际应用性。

表 6 模型预测工艺条件检验结果
Table 6 Test results of process conditions predicted by response surface model

Condition	Y_1/nm				RSD ₁ /%	$Y_2/\%$				RSD ₂ /%
	1	2	3	Average		1	2	3	Average	
Condition 1	0.007	0.012	0.011	0.010	7.41	0.21	0.28	0.17	0.22	6.79
Condition 2-1	0.061	0.055	0.067	0.061	6.15	1.06	0.87	0.91	0.95	5.00
Condition 2-2	0.044	0.051	0.046	0.047	6.97	0.48	0.55	0.41	0.48	4.00
Condition 3	0.022	0.019	0.023	0.021	6.67	0.19	0.22	0.26	0.22	6.94

3 结 论

(1)在大量单因素实验数据的基础上展开响应面分析,在实验设计确定的范围内(SC1 药液温度 30~60 ℃、SC1 药液配比 1 : 1.0 : 50~1 : 9.0 : 50,清洗时间 60~180 s),通过回归分析获得了研究因素与 SC1 药液刻蚀氧化膜厚度、清洗后刻蚀不均匀性增量的拟合关系式,并通过分析响应面曲线,讨论了各因素以及各因素之间的交互作用对清洗效果的影响。

(2)针对 3 种常见的氧化膜清洗要求,使用响应面模型对 SC1 工艺参数进行预测,并通过实验验证了预测值的有效性。结果表明,当固定清洗时间为 90 s、氧化膜厚度为 3.0 nm 时,采用药液温度为 30 ℃、药液配比为 1 : 9.0 : 50 的 SC1 药液对氧化膜表面影响最小,可用于栅氧化层、离子注入屏蔽层等本身对厚度十分敏感的热氧化膜层的清洗;此外,根据被清洗的热氧化膜对表面均匀性要求的不同,可以采用不同的清洗程式,以获得最佳清洗效果。

参考文献:

[1] KERN W, PUOTINEN D. Cleaning solutions based on

hydrogen for use in silicon semiconductor technology[J]. RCA Review, 1970, 31(2): 187-206.
[2] 彭利. 湿法工艺中缺陷问题的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
[3] 李利民, 韩沛东, 贾远红, 等. 硅片湿法清洗工艺缺陷控制研究 [J]. 半导体光电, 2015, 36(6): 933-935.
[4] 刘红艳, 万关良, 闫志瑞. 硅片清洗及最新发展 [J]. 中国稀土学报, 2003, 21(21): 144-148.
[5] 谷康康, 陶晓杰. 晶圆湿法蚀刻清洗工艺及流量控制发展 [J]. 清洗世界, 2022, 38(10): 1-3,7.
[6] WANG J, GUAN F, HANG M, JIA L, *et al.* Study on the effect of water spraying mode on the *n* content of wafer surface after SC1 cleaning in light doping process[C]// 2023 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC). Shanghai, China: IEEE, 2023: 1-3.
[7] WAI W T, MANAOGARAN V, CHEAT L W, *et al.* Studies on correlation between diluted NH₄OH concentration of Pre-GOX clean SC1 and GOX breakdown induced by silicon surface oxides[C]//2020 4th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM). Penang, Malaysia: IEEE, 2020: 1-3.
[8] 宋文超, 李家明, 贾祥晨, 等. 集成电路湿法工艺与湿法设备制造技术研究 [J]. 电子工业专用设备, 2022, 51(2): 30-35,65.

- [9] 贺敏辉, 许亦鹏, 刘宗芳, 等. 半导体制造中的湿法清洗技术 [J]. 智能物联技术, 2023, 55(1): 1-4, 34.
- [10] REINHARDT K A, REIDY R F. Handbook of Cleaning for Semiconductor Manufacturing [M]. NY, USA: William Andrew Inc., 2010: 46-50.
- [11] MAINES H, RATHMELL M, VELDHUIS L. Reduce scrap: Control oxide loss in SC1[C]//13th Annual IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference. Advancing the Science and Technology of Semiconductor Manufacturing. Boston, MA, USA: [s.n.], 2002: 184-186.
- [12] 黄克骄, 贺理珀, 宋兴福, 等. 响应曲面法优化 2-(4-羟基苯氧基) 丙酸甲酯结晶工艺 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2019, 45(3): 374-381.
- [13] 蒋佳丽, 刘婷, 李宇浩, 等. 基于 AHP-EWM 结合 Box-Behnken 响应面法优化黄芩多指标成分的微波提取工艺 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2024, 50(5): 678-686.
- [14] 张凌越, 王雷. 二氧化硅湿法刻蚀的片内及片间均匀性的改善 [J]. 集成电路应用, 2018, 35(7): 42-44.

SC1 Cleaning Thermal Oxide Film Process Optimization Based on Box-Behnken Response Surface Method

WANG Yuchao¹, WU Binbin², JIA Lili², GUAN Fenglin², LI Hu², LI Fang², ZHANG Yu², LI Tao¹

(1. School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Shanghai Huali Integrated Circuit Corporation, Shanghai 201314, China)

Abstract: With the continuous progress of integrated circuit manufacturing processes, higher and higher requirements are placed on the surface quality of wafers after wet cleaning to ensure product yield. To mitigate the thermal oxide film loss and the exacerbated within-wafer non-uniformity induced by SC1 cleaning, experiments were designed using the Box-Behnken design (BBD) method, and the response surface methodology (RSM) was integrated to optimize three key parameters of the SC1 cleaning process: Chemical solution temperature, solution ratio ($V_{\text{NH}_4\text{OH}} : V_{\text{H}_2\text{O}_2} : V_{\text{H}_2\text{O}}$), and process duration. Additionally, the effects of individual factors and their interactive effects on the cleaning performance were systematically investigated. The results indicate the following: When the cleaning time is fixed at 90 s and the thickness of the thermal oxide film to be cleaned is 3 nm, the SC1 solution exhibits the minimal impact on the oxide film surface under the conditions of 30 °C and a solution ratio of 1 : 9.0 : 50; at a temperature of 60 °C and a ratio of 1 : 3.0 : 50, the maximum loss thickness of the thermal oxide film is 0.065 nm, with the increment of within-wafer non-uniformity controlled within 1.00%; when the solution temperature is 60 °C and the solution ratio is 1 : 6.5 : 50, the maximum loss thickness of the thermal oxide film is reduced to 0.043 nm, and the increment of within-wafer non-uniformity is constrained within 0.50%; under the conditions of 55 °C and a solution ratio of 1 : 8.0 : 50, the loss thickness of the thermal oxide film can be maintained at 0.020 nm, while the increment of surface non-uniformity is limited to 0.24%. This study provides a valuable reference for the parameter selection of the SC1 cleaning process in integrated circuit manufacturing.

Key words: response surface optimization; single wafer wet process; SC1; thermal oxide film loss; surface uniformity

(责任编辑: 张欣)