

正交试验抑制 UV-LIGA 工艺线宽波动及其机理研究

张卓尔, 戴旭涵*, 韦 岸, 丁桂甫

(上海交通大学 微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 上海 200240)

摘 要: SU-8 厚胶光刻工艺广泛应用于高深宽比结构的制备,但在匀胶过程中,该工艺易造成同一晶圆不同位置及不同晶圆之间的胶厚产生波动,从而导致局部过曝或欠曝,降低图案转移精度。文章采用田口法研究了在不同前烘时间下胶厚、曝光剂量对光刻工艺的影响,发现增加前烘时间能有效抑制图案线宽波动,当前烘时间由 90 min 增加到 110 min 时,线宽稳定性提高了 86.8%。对抑制波动机理进行仿真分析,结果表明:延长前烘时间能有效抑制 SU-8 底部的光酸产生,增大厚度方向光酸浓度差,从而减少后烘时扩散到两侧未曝光区域的光酸,进而抑制胶厚-剂量失配导致的线宽变化。这为解决厚胶波动导致的加工误差提供了解决方法和理论参考。

关键词: SU-8 胶; 光刻模型; 厚胶光刻仿真; 田口法; 接触式光刻

中图分类号: TN405 **文章编号:** 1001-5868(2026)04-0657-11

Orthogonal Experimental Study on Suppressing Line Width Fluctuations in the UV-LIGA Process and Its Mechanism

ZHANG Zhuoer, DAI Xuhan, WEI An, DING Guifu

(National Key Lab. of Advanced Micro and Nano Manufacture Technol.,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: The SU-8 thick photoresist lithography process is widely used in the preparation of high-aspect-ratio structures; however, the photoresist stripping process is prone to thickness fluctuations at different positions on the chip and between different chips, resulting in local over- or underexposure and reduced pattern transfer accuracy. This study employed the Taguchi method to investigate the effects of photoresist thickness and exposure dose on the lithography process under different prebake times. It was found that increasing the prebake time could effectively suppress line-width fluctuations. When the prebake time was increased from 90 to 110 min, the stability of the line width was improved by 86.8%. Simulation analysis was conducted to investigate the mechanism of fluctuation suppression, and the results showed that extending the prebake time could effectively suppress the production of photoacid at the bottom of the SU-8 layer, increasing the concentration difference of the photoacid in the thickness direction, thereby reducing the amount of photoacid diffused to the unexposed areas on both sides during postbake and suppressing the line width changes caused by the mismatch between photoresist thickness and exposure dose. This provides a solution and theoretical reference for addressing the errors caused by fluctuations in the thickness of thick photoresist layers.

Key words: SU-8 photoresist; lithography model; thick-photoresist lithography simulation; Taguchi method; contact lithography

收稿日期: 2024-12-20.

* 通信作者: 戴旭涵

0 引言

高深宽比(High Aspect Ratio, HAR)是指深宽比大于10:1的结构,其在先进制造领域有许多应用。目前,光刻-电铸-微复制的工艺(Lithographie-Galvanoformung-Abformung, LIGA)是获得高深宽比MEMS器件的重要方法之一^[1-3],但LIGA技术需要同步辐射X光,成本较高;此外,深反应离子刻蚀技术只能针对硅材料,应用范围较窄。相比之下,基于紫外光刻技术的UV-LIGA技术使用汞灯的紫外光源代替X射线光源,大幅降低了制造成本^[1-14];并且UV-LIGA允许使用多种材料作为结构材料,例如塑料、金属、合金和陶瓷,或者是这些材料的组合^[15],为传感器、执行器和微系统提供了全新的设计和构造可能性^[14,16-18]。

然而,深宽比越大,实现难度越高。目前,大多数研究侧重于如何基于UV-LIGA工艺参数的调整来获得较大的深宽比结构,例如,根据胶厚来调整曝光剂量、前烘时间、后烘时间等以获得高深宽比结构。但以SU-8为代表的厚胶在匀胶过程中由于粘度较大、对衬底表面质量敏感,以及受边缘水珠^[19-21]等的影响,同一晶圆表面中央和边缘处以及不同批次不同晶圆之间的胶厚往往会产生波动。同一晶圆表面的曝光剂量基本相同,胶厚的波动往往会导致晶圆表面中央和边缘光刻后的线宽和截面轮廓不同,不利于产品的一致性与稳定性,且可能导致部分器件在后续工艺中失效,从而降低良率。虽然机械铣削方法可平整光刻胶表面^[22-24],但一方面需要专用设备,另一方面也增加了工序,且还有可能引入其他杂质。所以如何在胶厚波动较大的情况下通过光刻工艺参数的优化抑制光刻后表面形貌的波动具有重要意义。

为了在胶厚在一定范围内波动的工况下仍能确保线宽的一致性,即增加工艺窗口,必须要分析掌握前烘条件、曝光剂量等不同工艺参数在光刻胶厚变化导致线宽变化的过程中的作用机理和变化趋势。目前,大多数研究主要通过两种途径进行:实验研究和仿真分析。由于影响光刻结果的工艺参数较多,仅采用传统的重复实验法来精确控制微结构的尺寸和优化光刻工艺,不仅复杂且费时。因此,许多试验研究基于正交实验设计来开展。正交实验设计主要用于研究存在多个影响因子、多个水平的情况下,某一因子对实验结果的影响,利用

正交实验可以在不降低试验可行性的情况下,大幅减少实验次数,避免大量的重复实验^[25-27]。Zhang等^[28]曾通过正交实验分析了前烘时间、曝光剂量等工艺参数对分辨率、深宽比的影响效果,据此发现调整前烘时间能获得高深宽比结构。但该研究侧重于获得特定胶厚下对应的最佳工艺参数,难以解释如何在光刻胶厚度波动的情况下保持光刻结果一致性的问题,同时亟待从定量分析的层面上剖析调整工艺参数获得高深宽比结构的内在机理。相比之下,仿真可以有效地量化表征各个工艺参数的影响,从而有助于了解工艺条件对光刻胶形貌的影响^[29-31],进而有利于对增加工艺窗口提出改进措施。但目前许多商业模拟软件仅有针对薄胶光刻的模型,并未考虑到厚胶独有的非线性因素。对此,有许多针对厚胶光刻模拟的研究^[32-38],但大部分研究还处于建立理论分析模型的阶段,仅针对特定参数组合获得经过试验验证的计算结果,亟待将上述模型与试验优化试验参数的优化过程相结合,剖析工艺参数的变化对于光刻结果的影响机制,从而为试验参数的优化提供针对性的指导。

本研究结合正交实验法与仿真建模,研究了前烘时间、曝光剂量等不同工艺条件下胶厚波动对于SU-8胶光刻线宽的影响,在结合实验结果对仿真模型进行回归修正的基础上,依据仿真结果对实验结果做出了更深入的剖析,基于实验与仿真的结果提出了降低胶厚波动对线宽影响的方法,并分析了其内在机理。

1 正交实验研究线宽波动抑制条件

1.1 正交实验设计

根据Zhang等^[28]的研究,前烘时间与曝光剂量是影响SU-8图形线宽最显著的两个因素,尤其是前烘时间。本研究将加入胶厚作为新的影响因子,通过正交实验法分析不同胶厚及工艺条件对光刻胶深宽比的影响。为了便于研究,选用宽度为20 μm 的沟槽结构作为研究对象,其掩模版图案如图1所示。研究了不同前烘条件的样品A和B,前烘过程最高温下的保温时间(记为前烘时间)分别为90和110 min,并同步改变胶厚、曝光剂量。因此,本研究选择胶厚、曝光剂量、前烘时间三个影响因子,其水平划分如表1所示。所得到的胶厚波动范围较大,故采取了如表1所示的区间划分以便于研究。

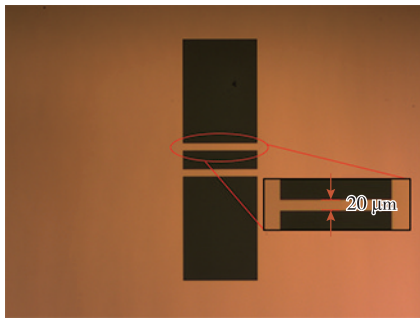


图 1 掩模版图案

表 1 掩模线宽 20 μm 的光刻工艺参数正交表

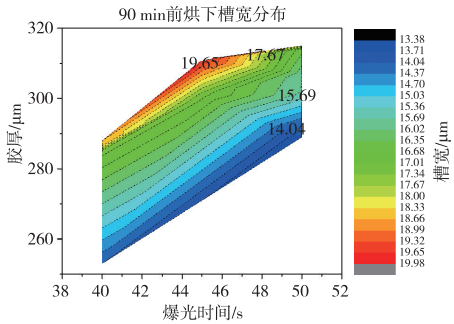
水平	胶厚区间/μm	前烘时间/min	水平	曝光时间/s
1	(230,270]	90	1	40
			2	45
2	(270,310]	110	3	50
			4	55

1.2 正交实验结果与讨论

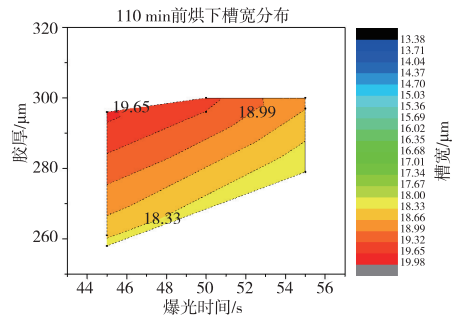
实验结果如图 2 所示。图 2(a)、(b)分别为不同前烘时间的样品 A、B 的槽宽与厚度、曝光剂量的关系分布图。由图可知,不同前烘条件下的分布关系表现出了类似的规律:同一厚度下,随着曝光剂量增加,槽宽有减小的趋势;同一曝光剂量下,随着厚度增加,槽宽有增大的趋势。符合 SU-8 本身的特性:同一厚度下,曝光剂量越长,越容易过曝,导致图形之间的缝隙宽度(槽宽)减小;而同一曝光剂量下,厚度越大,越容易欠曝,从而导致槽宽增大。

为了排除胶厚、曝光剂量不同对槽宽分布的影响,仅选用曝光剂量为 45 s 与 50 s、胶厚分布在 270~300 μm 下的槽宽结果进行研究,以保证结果都在相同的曝光剂量与胶厚范围内。结果如图 3 所示,90 min 前烘下的槽宽分布为 13.39~19.98 μm,变化上下限差值为 6.59 μm,而 110 min 前烘下的槽宽分布为 18.89~19.76 μm,变化上下限差值为 0.87 μm,比 90 min 前烘下的线宽波动减小了 86.8%,线宽稳定性得到了显著提升。

针对上述现象,可用如下原理解释:SU-8 的组成包括溶剂以及名为光酸产生剂(Photoacid Generator, PAG)的物质;在曝光过程中,光酸产生剂会因紫外光照作用发生分解,产生光酸;而光酸可以催化环氧基团开环,发生交联反应,交联后的 SU-8 将聚合成长链分子,从而不易溶于显影液中,得以保留下来^[39-42]。但曝光过程中,催化交联反应进行的程度较低,需通过后烘为该反应提供足够的



(a) 90 min



(b) 110 min

图 2 不同前烘时间下槽宽与厚度、曝光剂量的分布关系

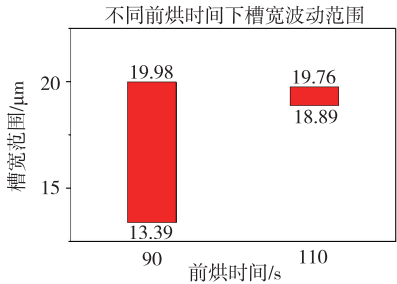


图 3 45~50 s 曝光、270~300 μm 胶厚范围内,不同前烘时间下槽宽分布

温度。后烘过程包含反应动力学过程,即化学反应与扩散反应同时发生。影响扩散的主要因素之一为溶剂浓度,溶剂浓度越高,扩散系数越大。而前烘的作用为蒸发溶剂,前烘时间越短,溶剂浓度越高,进而 SU-8 基质中物质的迁移率也越高,交联反应也更加充分;此外,更高的溶剂浓度也会增强 PAG 的分解过程^[43],所以前烘时间越短, SU-8 越容易曝透,即灵敏度越高。在本次研究中,样品 A 的前烘时间较短,灵敏度较高,在 55 s 曝光剂量下出现了如图 4(a) 所示的情形,即过曝导致顶部无法显净;而样品 B 的前烘时间更长,灵敏度降低,40 s 的曝光剂量显然不够充分,所以出现了如图 4(b) 所示的情况:由于一定程度的欠曝,只有一部分 SU-8 完成了交联,这部分 SU-8 会无法溶于显影液;但与之

相邻的区域由于光的衍射,欠曝程度可能较高,未得到充分交联,进而溶于显影液,致使一部分交联的区域从图形上脱离并无法溶于显影液,成为沉淀物留在沟槽中。而如图4(c)、(d)所示的情形则是较好的显影结果。

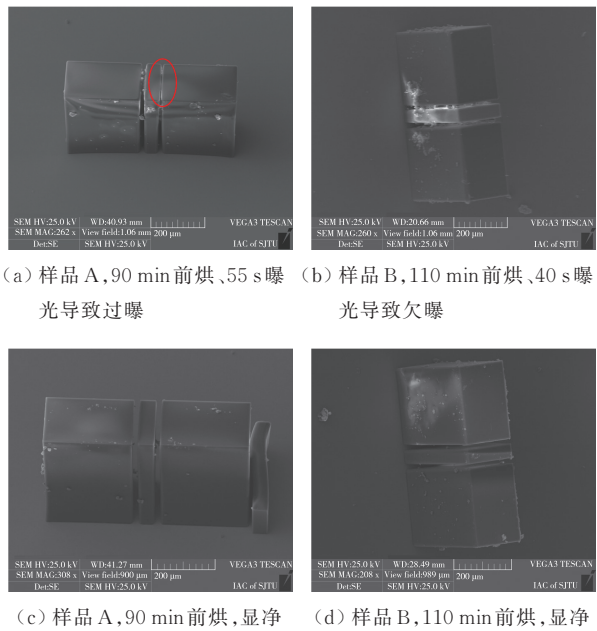


图4 样品A、B在不同前烘时间、曝光剂量下显影结果的SEM图像

随后采用田口法对实验结果进行了进一步分析。将槽宽做归一化处理,使用实际槽宽与理论槽宽的比值作为最终测量结果。根据田口法^[28,44]采用信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)作为描述结果好坏的指标,并以归一化槽宽作为优化目标。由于期望归一化槽宽尽可能接近1,符合望目特性,参考张铭显^[44]的相关研究,SNR计算公式为:

SNR = -10lg { 1/n [sum_{i=1}^n (y_i - 1)^2] } (1)

式中, n 为实验次数, y_i 为每次实验的归一化槽宽; SNR 值越大,则相应的工艺条件越好。整理得到的正交实验结果如表2所示。进而可以得到控制因素各水平对信噪比的影响,如表3和4所示。图5为对表3和4进行整理的结果,可以看出,前烘时间对槽宽的影响最大,且随着前烘时间增加,槽宽有增大的趋势。因为前烘时间增加,光刻胶更容易欠曝,微槽结构壁厚有变小的趋势,所以槽宽会增加。其次影响较大的是曝光剂量,当由40 s增加到45 s时对槽宽有较大影响,但由45 s增加到

50 s时,对槽宽的影响减弱。由表3可知,当曝光剂量变动时,SNR变化的平均值为9.60,低于胶厚变动时的SNR值变化;而胶厚变化对槽宽信噪比的影响仅比前烘时间信噪比低2.925,故其对槽宽的影响同样不容忽视。由于前烘时间对槽宽的影响程度大于胶厚与曝光剂量,所以通过改变前烘时间,使前烘时间成为影响槽宽的主要因素,可以在一定程度上抑制胶厚不均匀以及曝光剂量变化对槽宽的影响。

表2 线宽20 μm的正交实验结果

序号	因子水平			归一化线宽	SNR
	胶厚/μm	前烘时间/min	曝光剂量/s		
1	1	1	1	0.70	10.46
2	1	2	2	0.91	20.91
3	2	1	1	0.91	20.91
4	2	2	2	0.99	40.00
5	2	1	2	0.94	24.44
6	2	1	3	0.79	13.56
7	2	2	3	0.97	30.46

表3 各参数水平的平均SNR值

水平	SNR/dB			水平
	胶厚	前烘时间	曝光剂量	
1	15.69	17.34	15.69	1
2	25.87	30.46	28.45	2
			22.01	3

表4 各参数水平的SNR值分析

指标	胶厚	前烘时间	曝光剂量
SNR平均差值/dB	10.19	13.11	9.60
影响程度排行	2	1	3
最优水平	2	2	2

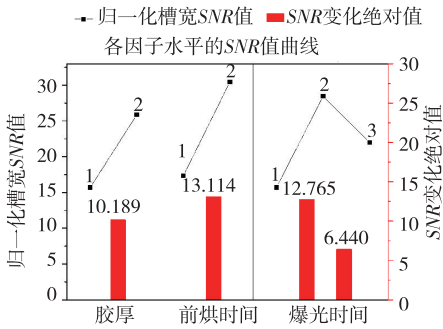


图5 不同工艺条件对实际线宽的影响程度

上述分析初步揭示了延长前烘时间对于抑制胶厚波动所导致的线宽变化的有益效果,为了进一步阐明上述趋势的内在机理,本文基于仿真分析定量研究了延长前烘时间来抑制胶厚波动所导致线宽变化的作用机制。

2 仿真建模研究线宽波动抑制机理

2.1 考虑前烘影响的SU-8厚胶光刻模拟模型

2.1.1 SU-8厚胶光刻模拟的基本过程

目前对于SU-8厚胶光刻模拟的模型,主要基于图6所示的步骤。

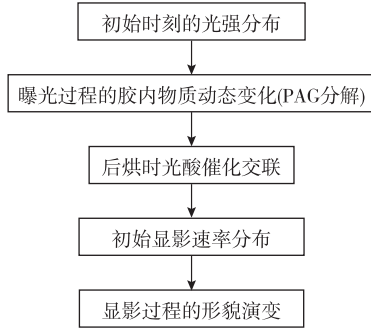


图6 SU-8胶光刻模拟步骤框架图^[27,31,37-50]

2.1.2 前烘参数对光酸形成的影响

根据实验结果,前烘时间对光刻后的线宽有显著影响。然而,目前大多数有关光刻仿真的计算并未将前烘的作用纳入考虑范围。因此,有必要将前烘的效应纳入建模考量。

由Anhoj等^[43]的研究可知,前烘时间不同产生的效应之一为:短前烘时间将导致高的溶剂浓度,高溶剂浓度可以增强PAG的分解过程,进而提升灵敏度,即当前烘温度更低、时间更短时,PAG将产生更多的光酸。

描述PAG分解产生光酸过程的理论主要基于Dill的基本方法和模型^[45-48],并考虑厚胶曝光的非线性因素,有如下形式^[35,47,49]:

$$\frac{\partial C_{\text{PAG}}(x, z, t)}{\partial t} = -I(x, z, t) C_{\text{PAG}}(x, z, t) C(z) \quad (2)$$

$$\alpha_i(x, z, t) = A(z) C_{\text{PAG}}(x, z, t) + B(z) \quad (3)$$

$$I(x, z, t) = I_0(x, z) \exp \left[- \int_0^t \alpha_i(x, z, t) dz \right] \quad (4)$$

$$C_A(x, z, t) = 1 - C_{\text{PAG}}(x, z, t) \quad (5)$$

式中, C_{PAG} 是PAG的归一化浓度, C_A 是光酸的归一化浓度; $I_0(x, z)$ 是坐标 (x, z) 处的初始光强分布, x 为横向坐标, z 为纵向坐标; $I(x, z, t)$ 是随时间变化的光强分布; α_i 是第 i 层光刻胶的吸收系数; l 是紫外光在SU-8中传播过的距离; $A(z)$, $B(z)$, $C(z)$ 为Dill模型中的经验参数, 计算表达式分别为^[32,39]:

$$A(z) = i_1 + i_2 z + i_3 z^2 \quad (6)$$

$$B(z) = j_1 + j_2 z + j_3 z^2 \quad (7)$$

$$C(z) = l_1 + l_2 z + l_3 z^2 \quad (8)$$

反映PAG分解的最直观表达式为公式(2), 由公式(2)可知, PAG消耗的速率与光强、当前PAG的浓度以及Dill参数 C 呈正相关(负号表示PAG的浓度在减少)。其中, C 为经验参数, 可根据实际情形对其进行回归调整: 当前烘温度与时间增大时, 溶剂含量减小, 所以PAG的分解将会被抑制, 分解速率将减缓, 反映到公式(2)中, 应表现为 C 的减小; 反之 C 将增大。

3.1.3 前烘参数影响的定量分析

引入与前烘温度、时间负相关的参数 k_0 , 作为 C 的系数来调控其大小, 并根据实验结果进行回归拟合, 直到仿真计算的结果与实验结果大致符合。具体过程为: 参考刘韧^[50]对后烘过程的建模, 使用形如Arrhenius公式的待定系数方程对 C 进行调控, 即:

$$k_0 = M \cdot \exp \left(- \frac{N}{R \cdot T \cdot t} \right) \quad (9)$$

式中, T 为前烘温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; t 为前烘时间, 单位为 s ; R 为理想气体常数。随后, 先对 C 添加一固定的常数系数 1.5, 在此条件下, 改变前烘时间、曝光剂量进行多次模拟计算, 并与实验结果进行对照; 之后将 C 的前置系数改为 0.5, 再以相同的曝光剂量进行模拟计算, 并与实验结果进行对照; 结果表明, 当系数大于 1 时, 光刻胶灵敏度异常增大, 即使在 110 min 前烘时间下, 计算结果也显示了严重过曝情形; 而当系数为 0.5 时, 则不会导致 110 min 前烘的计算结果出现过曝, 也不会导致 90 min 前烘的计算结果出现欠曝, 故将系数范围缩小在 $(0, 1)$ 范围内; 最后, 以 0.5 为节点, 分别在 $(0, 0.5)$ 和 $(0.5, 1)$ 的区间内选取各区间中点作为系数来进行模拟计算, 并与实验结果对照以调控系数。最终, 确定在 90 和 110 min 前烘时, 与实验结果较为符合的系数分别为 0.495 和 0.290。根据该值对 k_0 进行插值计算, 最终确定了系数 $M=0.02615$, $N=-4.861 \times 10^4$ 。将 k_0 加入公式(2)进行修正, 可得到引入前烘影响的修正Dill模型:

$$\frac{\partial C_{\text{PAG}}(x, z, t)}{\partial t} = -0.02615 \exp \left(\frac{4.861 \times 10^4}{R \cdot T \cdot t} \right) \times I(x, z, t) C_{\text{PAG}}(x, z, t) C(z) \quad (10)$$

2.2 模拟计算结果与讨论

2.2.1 模型的验证

在完成模型的修正后, 使用Matlab依据图6所示框图编写了仿真模拟程序。首先, 计算了同一厚

度下不同曝光剂量时的情形,结果如图7和8所示,分别为前烘90 min和110 min下40~55 s曝光的模拟形貌图,该模拟精度(正方形网格边长)为 $1\text{ }\mu\text{m}$,右侧的数值表示每格被显影掉的“长度”百分比。1代表完全显净;0代表未被显影。厚度皆选用 $270\text{ }\mu\text{m}$,模拟的沟槽宽度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

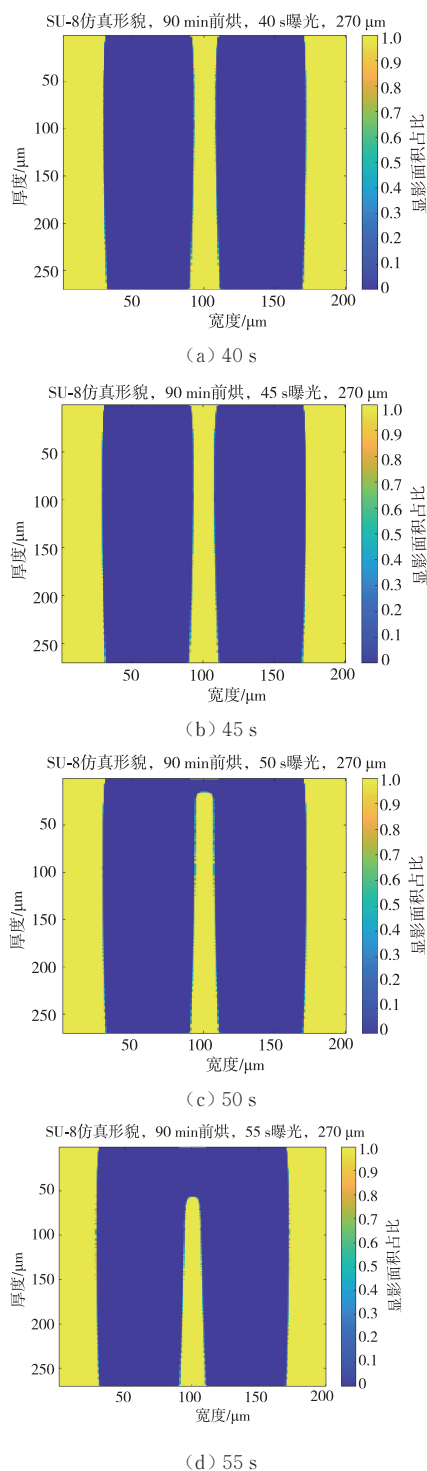


图7 90 min前烘,不同曝光剂量下的模拟计算轮廓

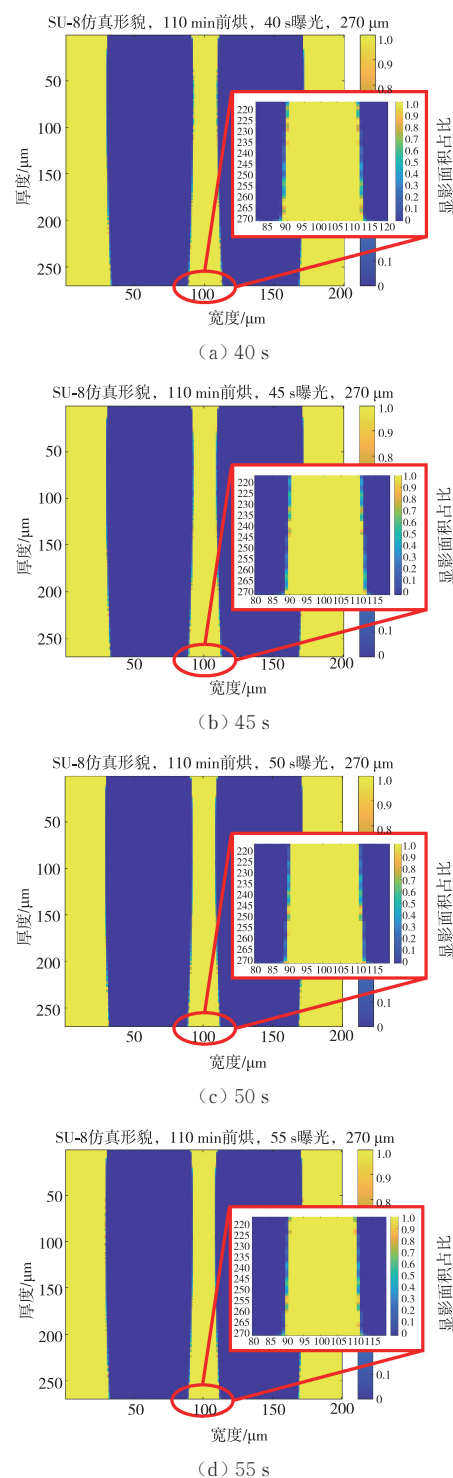


图8 110 min前烘,不同曝光剂量下模拟计算轮廓

由图7可知,对于90 min的模拟情况,40 s与45 s曝光下,均可得到显影干净的沟槽图案,55 s曝光下顶部无法显影干净,与前文的结论一致;而50 s曝光的情形也出现了顶部未干净的情况,但残留的部分比55 s曝光时更少,对比图2所示的试验结果,发现在90 min前烘、50 s曝光条件下,可以完全显净

的胶厚约为 $285\text{ }\mu\text{m}$, 即胶厚 $270\text{ }\mu\text{m}$ 的结构刚好出现了过曝的情况, 与上述仿真程序的结果一致。由图8可知, 在 110 min 前烘下, 所有曝光剂量下的模拟图形底部都可以完全显净, 但中间的沟槽已呈现出更明显的正梯形结构, 这代表有一定程度的欠曝; 此外, 由截取的底部放大图可以看到, 随着曝光剂量增加, 底部槽宽有逐渐减小的趋势, 与图2(b)中实验结果对应的变化规律一致。对比图7和8可观察到, 相比 90 min 前烘的情形, 在 110 min 前烘时, 随着曝光剂量增加, 槽宽的变化不明显, 并未出现粘连等严重过曝情况, 这与前烘时间增加导致灵敏度降低的结论一致。这说明应用公式(10)所示的经验系数 k_0 对模型调控后的计算结果与实验结果反映的规律基本一致, 可以正确反映胶厚、前烘条件及曝光剂量等工艺条件对光刻后形貌的影响规律。

2.2.2 相同胶厚, 不同前烘条件下曝光剂量波动对线宽影响的仿真分析

为了进一步分析前烘条件对于光刻图形转移过程的影响机理, 本文分两步开展分析: 首先, 分析相同胶厚、不同前烘条件下曝光剂量波动对应的光酸浓度分布情况, 其目的是通过对比光酸的浓度分布情况, 剖析前烘条件改变影响线宽的机理, 以对实验结果做出进一步解释; 在此基础上, 再考虑在不同胶厚、相同剂量下, 前烘条件对线宽的影响。

如图9和10所示, 分别为 90 min 与 110 min 前烘时间下不同曝光剂量下的曝光后归一化光酸浓度分布。由图可知, 曝光后光刻胶底部的光酸浓度比顶部明显更低; 尤其是 110 min 前烘下, 底部大部分区域的光酸都较少, 靠近底部的大部分区域归一化光酸浓度低于 0.6 。而光酸浓度分布决定了后烘交联浓度分布, 进而决定了显影后不被溶解的图形位置分布。由此, 可对 110 min 前烘的样品有着更小槽宽变化范围的现象进行解释: 当前烘时间短时, 曝光产生的光酸浓度整体更高, 且底部也有相对较高的光酸浓度, 即沿厚度方向光酸浓度梯度较小, 最大浓度差仅为 45 s 曝光下的 0.43 ; 在后烘过程中, 将有相对较多的光酸扩散到两侧未曝光的沟槽区域, 由于光酸的产生与曝光剂量正相关, 光酸浓度也决定了后续的结果, 进而决定了显影后留下槽宽度, 两侧光酸浓度越高, 侧壁位置交联越充分, 则槽宽相应变窄, 波动更加明显。因此, 随着曝光剂量增加, 扩散到两侧未曝光区域的光酸也随之增加, 即随着曝光剂量增加, 将有更为明显的槽宽变化; 而 110 min 前烘下, 总体产生的光酸浓

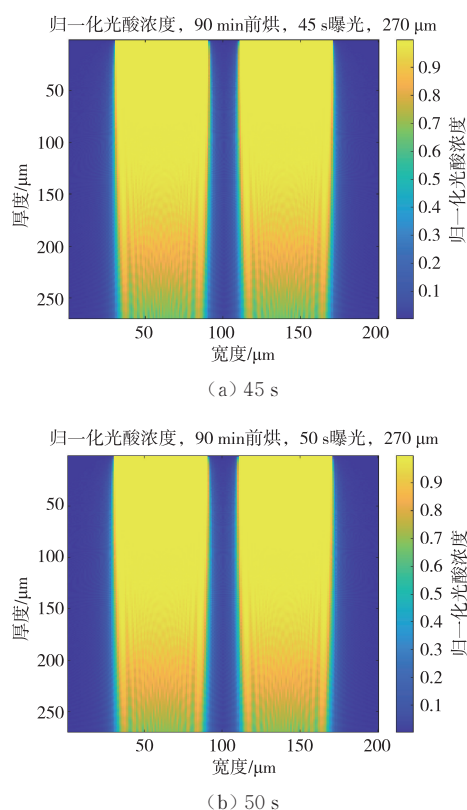


图9 90 min 前烘, 不同曝光剂量下归一化光酸浓度分布

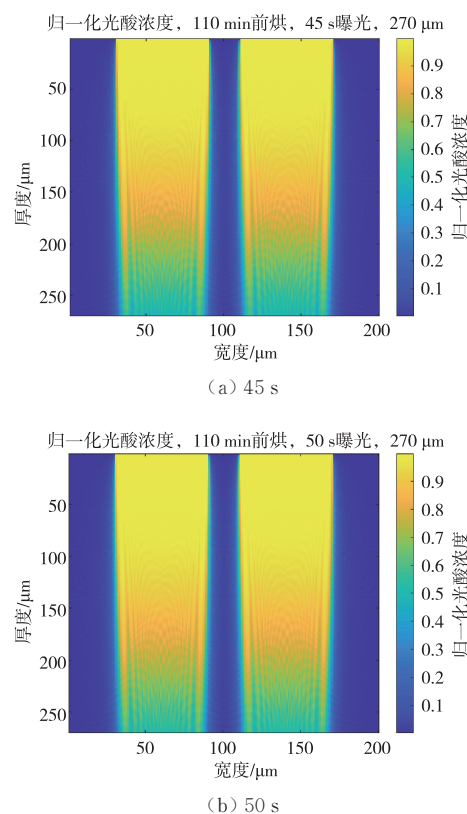


图10 110 min 前烘, 不同曝光剂量下归一化光酸浓度分布

度较低,且底部的光酸浓度明显低于顶部,顶部与底部的最大浓度差为0.59;即在厚度方向上有着更大的浓度梯度,所以后烘时,光酸沿厚度方向的扩散将会比90 min前烘时更强^[51-52],抑制了光酸向两侧未曝光区域的扩散;由于灵敏度降低,当曝光剂量增加时,光酸浓度增加量较少,导致对于实验中选用的各曝光剂量,扩散到两侧未曝光区域的光酸浓度差别较小,表现为110 min前烘下,曝光剂量对槽宽的影响相对较小。

上述研究表明,对于给定的胶厚,厚度方向光酸浓度梯度的存在能够抑制光酸向两侧的扩散,通过适当增加前烘时间,光酸浓度梯度越大,两侧的扩散越少,槽宽越不容易发生波动。

2.2.3 相同曝光剂量,不同前烘条件与胶厚对应线宽波动的仿真分析

由第1节的实验结果可知,胶厚波动对槽宽有较大影响,故使用模拟程序对同一曝光剂量下不同胶厚、前烘时间的情形进行模拟计算,以分析110 min前烘下线宽随厚度波动较小的原因。此处选择了230,270和310 μm 三个胶厚,固定45 s曝光进行模拟计算,其光刻后光酸浓度分布如图11和12所示,可以验证2.2.2节中的结论:在90 min前烘的情况下,由图11可知,230 μm 胶厚底部的光酸浓度几乎与上部一致,厚度方向最大浓度差仅为0.25,所以后烘时两侧未曝光区域扩散的光酸浓度较大,导致这些区域交联浓度增大,壁厚增加,槽宽减小;当胶厚增加到270 μm 时,厚度方向最大浓度差增大到0.43,所以在后烘阶段,沿厚度方向扩散的光酸会比230 μm 的情形有所增加,进而向两侧未曝光区域扩散的光酸会有所减少,导致最终的槽宽有相对明显的增大;而当胶厚增加到310 μm 时,厚度方向光酸最大浓度差增大到0.61,进而会加剧沿厚度方向的扩散,而削弱沿两侧的扩散,导致槽宽再次出现相对明显的变化。即当前烘时间短时,随着胶厚增大,厚度方向上的局部光酸浓度差产生相对明显变化,导致向两侧未曝光区域扩散的光酸浓度变化明显,进而使槽宽变化明显。而由图12可知,110 min前烘时,由于前烘时间加长导致的灵敏度降低,三个厚度计算的下厚度方向最大光酸浓度差分别约为0.46,0.59,0.69,整体比90 min前烘时更高,且变化幅度更小。所以即使胶厚出现了较大波动,厚度方向上靠近底部的局部光酸浓度梯度变化也不明显,导致向两侧扩散的光酸浓度随胶厚的变化不明显,进而使槽宽波动减小;这就是90 min前烘

下,线宽波动随胶厚波动比110 min前烘更显著的主要原因。

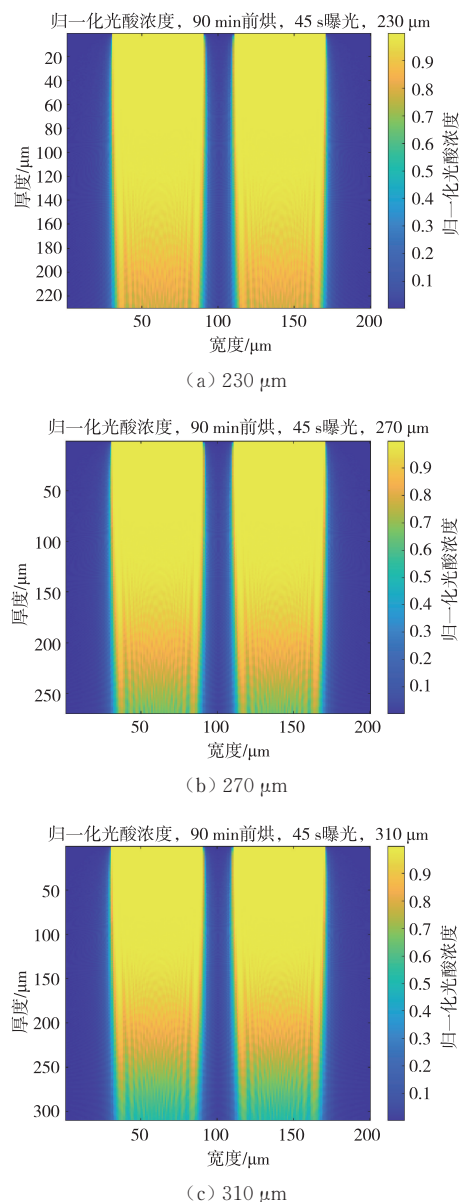
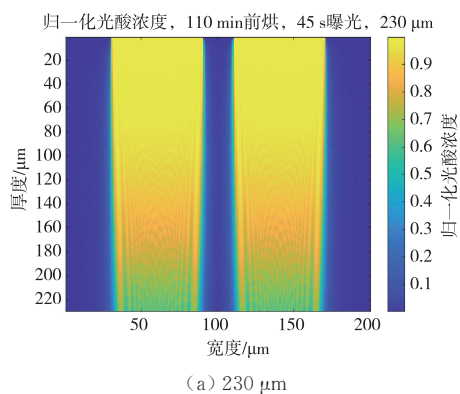


图11 90 min前烘、45 s曝光,不同胶厚下光酸浓度分布



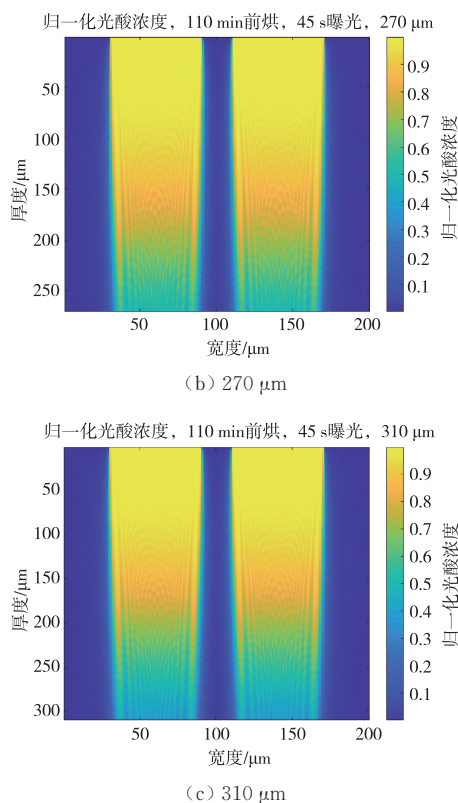


图12 110 min前烘、45 s曝光,不同胶厚下光酸浓度分布

简而言之,在前烘时间增加后,一方面,胶内的总光酸浓度降低,另一方面,光酸向两侧的扩散也受到抑制,因此即使胶厚发生波动,对应的槽宽变化也不再明显。

3 结论

本文通过正交实验设计与建模仿真结合,研究了减小光刻胶光刻后线宽随胶厚波动及工艺条件变化而变化的方法与内在机理,通过设计正交实验,得到了不同工艺条件与胶厚对线宽的影响程度以及分布关系,即110 min的前烘可以有效抑制线宽随胶厚、曝光剂量的波动,波动范围减小了86.8%。根据实验结果对仿真模型进行了回归修正,得到的模型可以正确反映SU-8光刻的基本规律,并可以显示出中间过程的物质变化分布情况。基于此,对提高前烘时间抑制线宽波动的机理进行了说明,即更长前烘时间导致不同条件溶剂含量都有所减少,使光酸产生受到抑制,光刻胶底部光酸浓度较低,增大了高度方向光酸浓度梯度,进而导致在后烘过程中扩散到底部的光酸浓度增大,扩散到外部未曝光区域的光酸浓度减小,致使

不同条件下最终的线宽差距较小。本研究给出了增大前烘时间抑制线宽波动的方法,并解释了内在机理,为开展相关研究提供了可行的技术路线。

参考文献:

- [1] Li H, Yun H, Du X, et al. Design, fabrication and mass-spectrometric studies of a micro ion source for high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry [J]. *Micromachines*, 2019, 10(5): 286.
- [2] Ma Y, Liu W, Liu C. Research on the process of fabricating a multi-layer metal micro-structure based on UV-LIGA overlay technology [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2019, 2(2): 83-88.
- [3] Volkov P, Lukyanov A, Goryunov A, et al. Wideband MOEMS for the calibration of optical readout systems [J]. *Sensors*, 2021, 21(21): 7343.
- [4] Yang R, Wang W. A numerical and experimental study on gap compensation and wavelength selection in UV-lithography of ultra-high aspect ratio SU-8 microstructures [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 110(2): 279-288.
- [5] Zhou Z, Huang Q A, Li W, et al. Contact UV lithography simulation for thick SU-8 photoresist [C]//IEEE Conference on Sensors, 2007: 900-903.
- [6] Dill F H. Optical lithography [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, 22(7): 440-444.
- [7] Ferguson R A, Hutchinson J M, Spence C A, et al. Modeling and simulation of a deep-ultraviolet acid hardening resist [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena*, 1990, 8(6): 1423-1427.
- [8] Capodici L, Krasnoperova A, Cerrina F, et al. Novel postexposure bake simulator: first results [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1995, 13(6): 2963-2967.
- [9] Zuniga M, Wallraff G, Tomacruz E, et al. Simulation of locally enhanced three-dimensional diffusion in chemically amplified resists [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1993, 11(6): 2862-2866.
- [10] Vrentas J S, Duda J L. Molecular diffusion in polymer solutions [J]. *AIChE Journal*, 1979, 25(1): 1-24.
- [11] Robertson S A, Pavelchek E K, Hoppe W, et al. Improved Notch model for resist dissolution in lithography simulation [J]. *Advances in Resist Technology and Processing XVIII*, 2001, 4345: 912.
- [12] 卢伟. SU-8胶接触式UV光刻模拟[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [13] Zhou Z F, Huang Q A, Li W H, et al. A novel 2D dynamic

- cellular automata model for photoresist etching process simulation[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15(3): 652.
- [14] Qu Wenmin, Wenzel C, Jahn A, et al. UV-LIGA: a promising and low-cost variant for microsystem technology [C]//1998 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, 1998: 380-383.
- [15] Jeong S J, Wang W. Design and UV-LIGA microfabrication of an electro-statically actuated power relay[J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 13(3): 279-286.
- [16] Kalaiselvi S, Sujatha L, Sundar R. Fabrication of a nickel MEMS accelerometer based on SU-8 LIGA process [C]//2022 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), 2022: 1-4.
- [17] Agrawal V, Mitra B. Residual stress tuning in UV-LIGA fabricated microstructures using deposition temperature and reverse pulse plating [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2023, 33(3): 034003.
- [18] Cook A M, Joye C D, Wood F N, et al. Additive fabrication for upper-millimeter-wave traveling wave tube amplifiers [C]//2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2023: 1-2.
- [19] Yan Y, Liu Q, Li J, et al. Influence of rectangular substrate chamfer on edge bead effect of a spin-coated thin film [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(5): 054101.
- [20] Park H W, Kim H J, Roh J H, et al. Simple and cost-effective method for edge bead removal by using a taping method [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2018, 73(10): 1473-1478.
- [21] Hyun S H, Cho D H, Park W S, et al. Vision based EBR metrology for edge bead removal optimization [C]//2020 IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), 2020: 1-5.
- [22] Park S, Seokyeon I, Hyunseop L. Effect of pressure on edge delamination in chemical mechanical polishing of SU-8 film on silicon wafer [J]. *Tribology and Lubricants*, 2017, 33(6): 282-287.
- [23] Itoh A, Masahiko I, Yoshihiro A. Photoresist chemical mechanical polishing for shallow trench isolation [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1998, 37(4R): 1697.
- [24] Kourouklis C, Kohlmeier T, Gatzert H-H. The application of chemical-mechanical polishing for planarizing a SU-8/permalloy combination used in MEMS devices [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 106(1/3): 263-266.
- [25] 刘 晴. 缝式端壁对半开叶轮离心泵内部流动影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- Liu Qing. Study on the influence of slotted end wall on the internal flow of semi-open impeller centrifugal pump [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [26] Gao J, Zhang L, Jiao D, et al. A fiber spool's vibration sensitivity optimization based on orthogonal experimental design [J]. *Current Optics and Photonics*, 2024, 8(1): 45-55.
- [27] Jing G, Jiao D, Zhang L, et al. Vibration sensitivity minimization of an ultra-stable optical reference cavity based on orthogonal experimental design [J]. *Open Physics*, 2023, 21(1): 441-444.
- [28] Zhang J, Tan K L, Hong G D, et al. Polymerization optimization of SU-8 photoresist and its applications [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2001, 11(1): 20.
- [29] Zhou Z F, Huang Q A. Comprehensive simulations for ultraviolet lithography process of thick SU-8 photoresist [J]. *Micromachines*, 2018, 9(7): 341.
- [30] Zhu Z, Swecker A L, Strojwas A J. METRO-3D: an efficient three-dimensional wafer inspection simulator for next-generation lithography [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2004, 17(4): 619-628.
- [31] Erdmann A, Fühner T, Evanschitzky P, et al. Optical and EUV projection lithography: a computational view [J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 132: 21-34.
- [32] Zhou Z, Huang Q, Li W, et al. Improvement of the 2D dynamic CA method for photoresist etching simulation and its application to deep UV lithography simulations of SU-8 photoresists [J]. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2007, 17(12): 2538-2547.
- [33] Zhou Z F, Shi L L, Zhang H, et al. Large scale three-dimensional simulations for thick SU-8 lithography process based on a full hash fast marching method [J]. *Microelectronic Engineering*, 2014, 123: 171-174.
- [34] Tang X, Yang X, Gao F, et al. Simulation and analysis for microstructure profile of optical lithography based on SU-8 thick resist [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(5/8): 1100-1103.
- [35] Zhou Z, Huang Q A, Li W, et al. The swelling effects during the development processes of deep UV lithography of SU-8 photoresists: theoretical study, simulation and verification [C]//IEEE Conference on Sensors, 2007: 325-328.
- [36] Zhou Z, Huang Q, Zhu Z, et al. An efficient simulation system for inclined UV lithography processes of thick SU-8 photoresists [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2011, 24(2): 294-303.
- [37] Tian X, Liu G, Tian Y, et al. Simulation of deep UV lithography with SU-8 resist by using 365 nm light source [J]. *Microsystem Technologies*, 2005, 11(4): 265-270.
- [38] Yang W C, Huang Y S, Shew B Y, et al. Study on diffraction effect and microstructure profile fabricated by one-step backside lithography [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(3): 035004.
- [39] Shi L L, Zhou Z F, Li W H, et al. A modified 3D fast

- marching simulation for thick photoresists lithography [C]//10th IEEE Conference on Sensors, 2011: 1550-1553.
- [40] Chan-Park M B, Zhang J, Yan Y, et al. Fabrication of large SU-8 mold with high aspect ratio microchannels by UV exposure dose reduction [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2004, 101(1-2): 175-182.
- [41] Sensu Y, Sekiguchi A, Mori S, et al. Profile simulation of SU-8 thick film resist [J]. *Advances in Resist Technology and Processing XXII*, 2005, 5753: 1170.
- [42] Bump M M B. The effect of chemistry and network structure on morphological and mechanical properties of diepoxide precursors and poly (hydroxyethers) [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [43] Anhoj T A, Jorgensen A M, Zauner D A, et al. The effect of soft bake temperature on the polymerization of SU-8 photoresist [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(9): 1819.
- [44] 张铭显. 316L(N)奥氏体不锈钢晶间腐蚀与晶界特征分布优化的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- Zhang Mingxian. Study on the intergranular corrosion and the optimization of grain boundary character distribution of 316L(N) austenitic stainless steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017.
- [45] Dill F H, Hornberger W P, Hauge P S, et al. Characterization of positive photoresist [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, 22(7): 445-452.
- [46] Konnerth K L, Dill F H. *In-situ* measurement of dielectric thickness during etching or developing processes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, 22(7): 452-456.
- [47] Zhou Z F, Huang Q A, Li W H, et al. Simulations, analysis and characterization of the development profiles for the thick SU-8 UV lithography process [C]//2010 IEEE Sensors Conference, 2010: 2525-2529.
- [48] Dill F H, Neureuther A R, Tuttle J A, et al. Modeling projection printing of positive photoresists [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, 22(7): 456-464.
- [49] Miao Z. Modeling and simulation of surface profile forming process of microlenses and their application in optical interconnection devices [D]. Baton Rouge: Louisiana State University Libraries, 2013.
- [50] 刘 韧. 基于UV-LIGA光刻技术的曝光及后烘过程仿真研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- Liu Ren. Simulation research of exposure and post exposure bake processes based on UV-LIGA photolithography technology [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [51] Koay C G, Özarslan E. Conceptual foundations of diffusion in magnetic resonance [J]. *Concepts in Magnetic Resonance Part A*, 2013, 42(4): 116-129.
- [52] Ortiz de Zárate J M, Sengers J V. Frame-invariant Fick diffusion matrices of multicomponent fluid mixtures [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020, 22(31): 17597-17604.

作者简介:

张卓尔(2000—),男,硕士,主要从事微电磁驱动器及相关应用的研究;

戴旭涵(1974—),男,博士,副教授,从事电磁MEMS器件设计与制造方面的研究。