

文章编号 1004-924X(2010)08-1822-11

常温微压印中抗蚀剂流动的研究及工艺优化

魏正英,熊孝东,杜 军,丁玉成

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘要:为提高微压印中抗蚀剂的复型精度,利用 POLYFLOW,基于流固耦合方法对常温压印过程中抗蚀剂的流动进行了有限元模拟,系统地分析了抗蚀剂的初始厚度,留膜厚度,模具的深宽比,占空比,模具下压速度等因素对抗蚀剂流动填充的影响规律。搭建了压印的可视化实验平台,通过该平台对不同工艺条件(包括抗蚀剂的初始厚度,留膜厚度以及模具的下压速度)及软模具结构(深宽比,占空比)下抗蚀剂的流动填充过程及其填充形貌进行了实时观测,并与数值计算结果进行比较。结果表明,在不影响填充效率的情况下,采用低速下压($\leq 1 \mu\text{m/s}$)方式,在占空比 > 0.375 ,深宽比 < 2 时,填充度可达到 90%以上。仿真和实验验证了优化的压印工艺条件和模具结构。另外,本文还引入了增加模板特征高度预留量的概念,可进一步提高复型精度。

关键词:常温微压印;填充饱和度;占空比;可视化实验;优化

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101808.1822

Flow behavior of resist in room-temperature micro-imprinting and its process optimization

WEI Zheng-ying, XIONG Xiao-dong, DU Jun, DING Yu-cheng

(State Key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the replicating precision of resist in micro-imprinting, the POLYFLOW was used to simulate its flow behavior in room-temperature micro-imprinting based on the Fluid-Solid-Interaction(FSI) method. The effects of the initial thickness and residual thickness of the resist, the ratio of height to width and duty ratio of the mold, and the imprinting velocity of the mold on the resist flow behavior in a cavity were analyzed systematically. A platform of visual experiments was established, and the process of micro-imprinting and the profile of resist in different technological conditions were observed. Comparing the experimental results to the simulation results, it is concluded that the filling rate can come up to 90% when the imprinting velocity is slower than $1 \mu\text{m/s}$, the duty ratio is more than 0.375, and the ratio of height to width is less than 2. Obtained results show that the imprinting process condition and the structure of the mold have been optimized and the replicating precision can be improved by the optimized results.

Key words: room-temperature micro-imprinting; filling rate; mold duty ratio; visual experiment; optimization

收稿日期:2009-11-20;修订日期:2009-12-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50975227);全国博士学位论文作者专项资金资助项目(No. 200740);国家自然科学基金重大研究计划资助项目(No. 90923040);长江学者和创新团队发展计划资助项目(No. IRT0646)

1 引言

常温微压印光刻是一种通过刻蚀获得微结构的制作方法,其过程为将预先制备好的带有微结构图型的模具压入低粘度抗蚀剂薄膜,抗蚀剂在压力作用下填入模具图型的凹槽,抗蚀剂减薄并固化,从而实现印模图型的转移^[1-2]。微复型的质量主要取决于压印中聚合物的微流动和填充效果,为提高复型精度,有必要对低粘度抗蚀剂的流动机理进行研究。

吉林大学文伟力^[3]通过热和压力耦合方法对热压印过程进行了仿真分析,并通过测量压印的图型尺寸,分析了压印工艺参数对压模后微通道尺寸的影响,初步建立了压模工艺参数与微通道尺寸的关系。Yoshihiko等^[4]研究了在纳米压印过程中压力和抗蚀剂厚度对填充形貌的影响。Nikolaos等^[5]通过实验和模拟的方法研究了纳米压印中残留厚度对纳米压印最终质量的影响。Harry D Rowland^[6], T G Kang^[7]等对压印光刻工艺中聚合物的黏性流动进行了仿真,认为微图型模板几何特征、压印时间、压印温度和聚合物薄膜厚度对聚合物流动机理的影响明显不同。Rowland还研究了热压印过程中聚合物的变形及填充过程,用原子力显微镜对不同宽度的填充槽进行压印后的结构进行观察,研究沟槽宽度、压印力、压印温度、压印时间与填充模型(单峰和双峰)、填充高度及填充面积的关系。Feng Huang、Anshu Gaur^[8]等对压印图型的保真度的影响因素进行了讨论,同时采用两种模具分别完成了5种不同工艺条件的压印,最终得出温度低、时间长、匀胶速度高会得到高保真度的图型。西安交通大学李寒松^[9]对常温压印光刻过程中硅橡胶软模具的变形进行了数值分析,利用ANSYS对加载过程中模具在不同载荷下的变形进行了细致地对比分析,得到了模具在不同载荷作用下的变形关系,从而确定了抗蚀剂保压固化时的保压载荷。贺永^[10]对热压印过程中模具的结构进行了优化,并提出了优化策略。但是目前研究都集中于热压印过程中高聚合物的填充状态,进行有限元仿真时常忽略惯性力、滑移边界条件及表面张力对抗蚀剂填充的影响,也忽略了抗蚀剂流动对模具变形的影响。对常温压印过程中低黏度抗蚀剂流动

状况的分析国内外研究较少。本文在进行有限元分析时,考虑了惯性力,壁面滑移以及表面张力对抗蚀剂填充的影响,并基于流固耦合理论分析了抗蚀剂流动对软模具变形的影响,系统地分析了影响抗蚀剂复型精度的因素及影响规律,并通过微压印过程中的可视化实验对抗蚀剂流动形貌进行实时观察,最后通过仿真和实验验证了优化的微压印的工艺参数和模板结构。

2 常温微压印过程中抗蚀剂流动的有限元分析

2.1 抗蚀剂流动有限元模型的建立

根据微压印工艺过程,建立适合常温微压印过程的模型如图1,2所示。横截面宽度方向为 x 轴,沟槽深度方向为 y 轴, h_i 为抗蚀剂薄膜初始厚度, h_c 为压印模具表面特征图型深度, h_r 为压印填充完成后残留在基板上的抗蚀剂厚度, S_i 为第 i 个特征图型的宽度, L_i 是第 i 个沟槽的总长度, W_i 为第 i 个沟槽的宽度, S 为压印模具横向宽度。有限元几何模型主要由3部分组成:软模具(硅橡胶材料)、抗蚀剂(低黏度聚合物)及基底(硅片)。硅片作为基底固定不动,软模具相对于硅片垂直向下运动。

微图型模板的占比 α 是抗蚀剂填充形貌及复型精度的重要参数,其定义参见式(1);模具深厚比 β 为沟槽深度与抗蚀剂初始厚度的比值;宽厚比 γ 为沟槽宽度与抗蚀剂初始厚度的比值;深宽比 δ 为沟槽深度与沟槽宽度的比值。即:

$$\alpha = W_i / (0.5S_i + W_i + 0.5S_{i+1}) = W_i / L_i, \quad (1)$$

$$\beta = h_c / h_0, \quad (2)$$

$$\gamma = W_i / h_0, \quad (3)$$

$$\delta = h_c / W_i. \quad (4)$$

为了研究抗蚀剂的填充效果,本文采用填充度评价抗蚀剂微复型精度。填充度 ϵ 为抗蚀剂填充面积与沟槽面积的比值,即

$$\epsilon = A_t / A_w. \quad (5)$$

式中: A_t 是抗蚀剂填充面积,单位为 m^2 ; A_w 是沟槽填充面积,单位为 m^2 。

抗蚀剂为不可压缩的牛顿流体,即剪应力正比于剪应变;微尺度下抗蚀剂的表面张力和毛细引力是影响它流动的主要因素,不能忽略;软模具

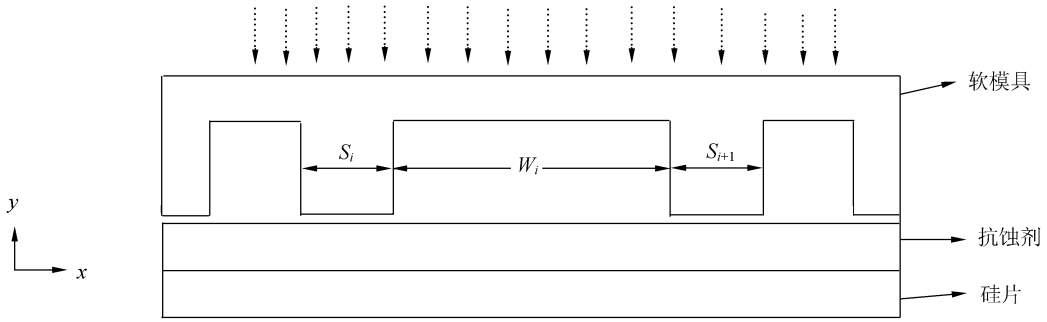


图 1 常温微压印过程的有限元模型

Fig. 1 Finite element model for the process of micro-imprint in room-temperature

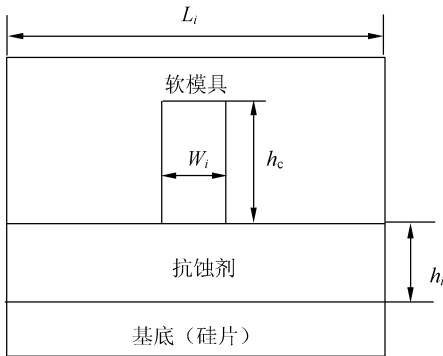


图 2 单一特征的模型结构

Fig. 2 Model structure of a single character

在外力作用下可产生变形,去除外力后又能恢复原状。软模具的变形直接影响着流体流动状态,抗蚀剂填充沟槽也直接影响着软模具的变形,因此采用流固耦合方法来进行有限元分析。

2.2 抗蚀剂相关物性参数以及边界条件的设定

在压印过程中,所选用的抗蚀剂具有很低的物理度,有利于在涂铺时得到较薄的抗蚀剂薄膜(误差为 0.13%);具有很小的固化收缩率,保证压印特征的完整性和成型精度;不含挥发性物质,固化方式为常温固化,并具有良好的固化速度(固化时间 min);当特征尺寸很小时,表面力起主导作用。在进行压印时,软模具的微观形貌对抗蚀剂的成型质量和填充效率有着较大的影响。实验发现,通过硅片翻制所得的软模具,和自行设计模具的特征尺寸吻合率达到 95% 以上,因此,本文忽略了模具微观形貌对抗蚀剂流动的影响。

抗蚀剂相对于硅橡胶软模具表面的湿润性会严重影响微流体的流动特性,而一般采用接触角衡量液体对于固体表面的湿润性,因此在压印中,

所采用的软模具属于低表面能固体。

抗蚀剂性能参数如表 1 所示:

由于抗蚀剂为广义牛顿流体,表现为对黏度剪切速率的依赖性,且黏度较小,因此在压印过程中,采用适合于低黏度聚物流动的 Cross 黏度模型:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^m}, \quad (6)$$

其中, η_0 为零剪切黏度, λ 为松弛时间, m 为非牛顿指数, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。

表 1 抗蚀剂的物理性能参数

Tab. 1 Physical performance parameters of the resist

项目名称	抗蚀剂
密度/(kg/m ³)	1 220
粘度/(Pa·s)	0.023 5
表面张力系数/(N/m)	0.040 5
接触角/(°)	52.5

微压印过程中聚合物流动模型的边界条件设定如图 3 所示:

微尺度下,抗蚀剂与硅片基底之间界面 B_1 实际具有滑移现象,故将该边界设定为滑移边界。在压印过程中,抗蚀剂填充沟槽处于开放状态,将抗蚀剂薄膜两侧边界 B_2 设为对称边界,抗蚀剂填充沟槽的过程是开放而非封闭的模型。自由界面 B_3 是抗蚀剂薄膜上表面,即抗蚀剂与空气接触界面。随着模具下压运动,抗蚀剂与软模具内壁面 B_4 接触,抗蚀剂与软模具表面有润湿作用,具有一定的接触角。同时考虑到表面张力和惯性力对流动的影响;抗蚀剂与模具结构之间为壁面滑移,对自由表面利用 Lagrange 和 adaptive

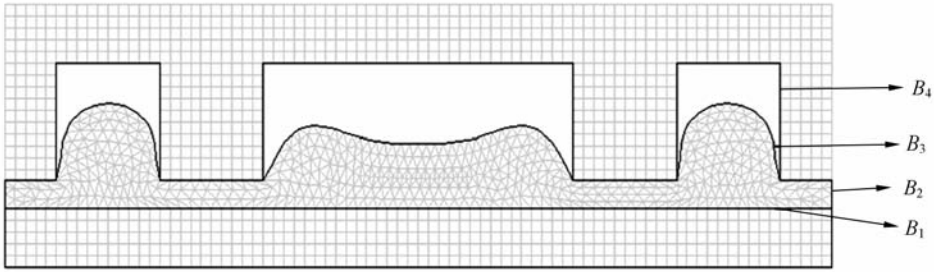


图 3 边界条件的设定

Fig. 3 Setting of the boundary condition

remeshing 方法进行网格重构。由于自由表面与模具接触,需要通过接触检查运算法进行检验。其中相关的参数设定为:惩罚因子与滑移系数为 10^{-9} ,渗透因子为 0.2,网格偏差为 0.3,时间步长为 0.01,收敛精度为 0.001,选用隐格欧拉方法进行迭代。

2.3 抗蚀剂填充效果分析

常温微压印过程中,影响聚合物流动填充成型的因素有很多,如抗蚀剂材料、压印速度及模板结构等。这些因素直接影响着微压印的复型精度,因此,研究这些因素是如何影响聚合物流动至关重要。

2.3.1 占空比不同,模具下压速度对抗蚀剂填充形貌的影响

常温微压印过程中,占空比、模具下压速度是直接影响抗蚀剂填充时间及填充精度的重要参数。选用占空比分别为 0.875,0.812,0.5,0.375 的矩形槽结构模具,模板下压速度分别为 0.5,1,2,5 $\mu\text{m/s}$;初始胶厚,深宽比一定,经过相同的压印时间后,比较占空比,模具速度对抗蚀剂填充度的影响,结果如表 2 所示。

表 2 不同模具速度,相同填充时间时抗蚀剂填充度比较 (%)

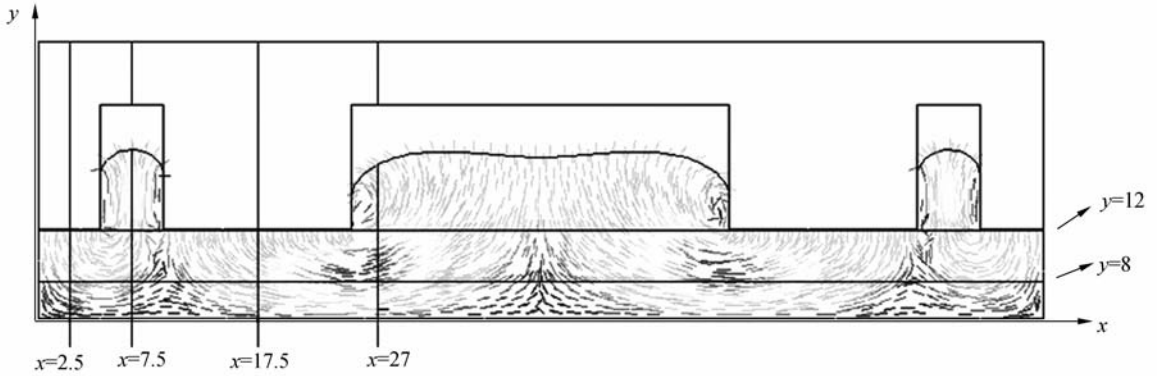
Tab. 2 Contrast of filling rate in the conditions of different velocities and the same filling time

占空比	速度/ $(\mu\text{m/s})$			
	0.5	1	2	5
0.875	99.198	89.073	87.021	75.48
0.812	99	86.677	66.677	65.3
0.5	95.75	83.215	61.01	60.33
0.375	94.21	81.34	59.278	57.421

由表 2 可知,随着模具速度降低,抗蚀剂填充度增高。占空比较大时,复型精度较好。若占空比较小,模板下压速度大,抗蚀剂的填充度较小,如没有足够的保压时间,矩形槽结构边缘就无法填满。这是因为速度较低时,沟槽约束空间内的空气有足够的时间逃逸出去,抗蚀剂能够较好地填充沟槽棱角。在实际工艺中,要求在不影响填充效率的情况下,填充度应尽量地大,因此,研究选择的填充度均在 0.9 以上。同时还可以看出,在相同速度下,小占空比对应着低的填充率,因此,可以根据不同的模具特征选择不同的下压速度,从而使得填充度达到最优。

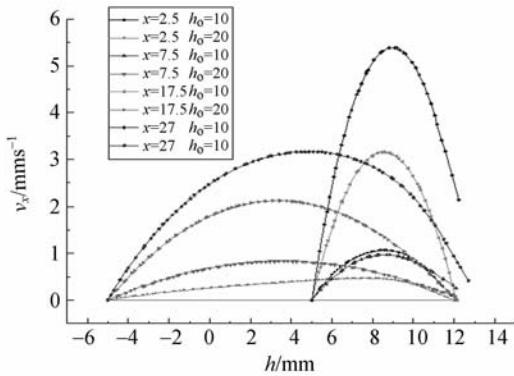
2.3.2 抗蚀剂流动速度及压力分布对复型精度的影响

随着模具下压运动,抗蚀剂有水平方向和垂直方向的速度。以硅片、抗蚀剂及壁面公共接触点为原点;沿着模具左壁面为 y 轴,即槽深方向;硅片和抗蚀剂接触线方向为 x 轴,如图 4(a) 所示。选择模具特征占空比为 0.375 和 0.625 的微图型,其中,模具两边的特征占空比为 0.375,中间特征的占空比为 0.625,其他工艺条件相同。分析抗蚀剂沿着与 y 轴平行即 $x=2.5, x=7.5, x=17.5, x=27$ 这四直线上的水平方向速度分布,抗蚀剂沿着与 x 轴即 $y=8, y=12$ 两直线的垂直方向的速度分布。当抗蚀剂初始厚度分别为 10 μm 和 20 μm ,模具运动时间为 2 s 时,不同截面上抗蚀剂水平和垂直方向的速度分布曲线如图 4 (b), (c) 所示:



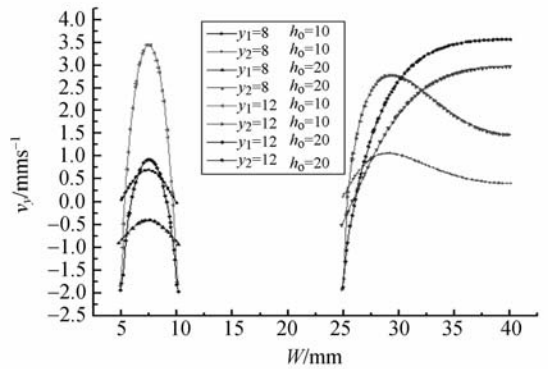
(a) 占空比为 0.375 和 0.625 时的速度矢量图

(a) Velocity vector with duty ratios of 0.375 and 0.625



(b) 水平方向速度分布

(b) Distribution of velocities in horizontal direction



(c) 垂直方向速度分布

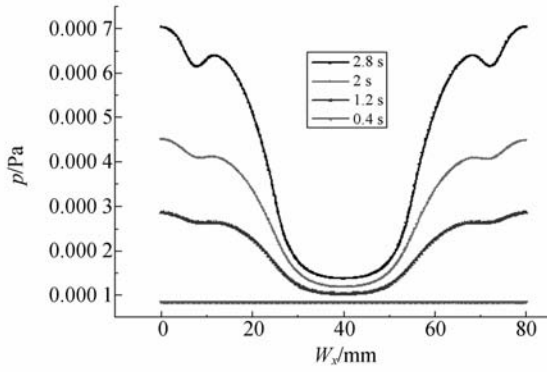
(c) Distribution of velocities in vertical direction

图 4 抗蚀剂流动速度曲线

Fig. 4 Velocity curves of resistance flow

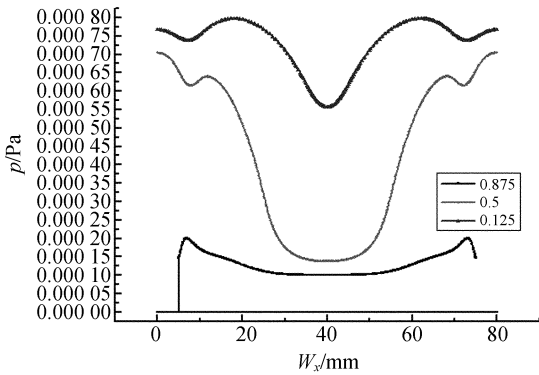
由图 4 分析可知,上述六直线的水平和垂直方向速度分布成抛物线状,越靠近沟槽顶部,抗蚀剂垂直方向速度越大。抗蚀剂厚度越薄,抗蚀剂水平速度相对越高;抗蚀剂初始厚度越薄,较窄沟槽中垂直方向上速度越大,这是由于在相同的下压速度情况下,抗蚀剂厚度越薄,抗蚀剂和下模板之间的剪切速率越大,从而速度越高。而对于较宽沟槽中,抗蚀剂初始厚度越厚,垂直方向上速度较大,这是因为在下压速度一定,抗蚀剂初始厚度大时,剪切速率差异较大。抗蚀剂垂直方向速度曲线如图 4(c)所示,垂直方向速度最高的峰值区域即为抗蚀剂形貌中的单双峰流型,这从理论上解释了单双峰出现的原因。随着抗蚀剂初始厚度增加,抗蚀剂垂直方向速度由不对称抛物线形式向对称抛物线形式转变。抗蚀剂初始厚度较大时,抗蚀剂填充形貌呈单峰。

占空比一定时,抗蚀剂受到模具的挤压力作用,其随着时间的变化也存在较大差异。图 5(a)所示为不同时刻抗蚀剂内部的压力曲线比较。图 5(b)为模板占空比不同,抗蚀剂达到沟槽顶端时,其内部的压力曲线比较。由压力曲线可知,在某一截面抗蚀剂压力曲线呈抛物线形式,与理论公式分析结果相吻合。压力分布为模板中心部分压力大,靠近模板边缘处压力小;模板面积越大,保证压力均匀就越困难。随着占空比的升高,抗蚀剂压力越大。随着抗蚀剂填充高度的增加,沟槽顶部受力越大,为应力集中区域;模具沟槽特征非常小时,由于空间约束的作用,排除狭小空间内空气压强增大,需要加大模具下压力,增加压印时间,使抗蚀剂完全填充沟槽。



(a) 占空比为 0.5 时的压力曲线

(a) Pressure curves with duty ratio of 0.5



(b) 占空比不同的压力曲线

(b) Pressure curves for different kinds of duty ratio

图 5 抗蚀剂填充沟槽时的压力曲线

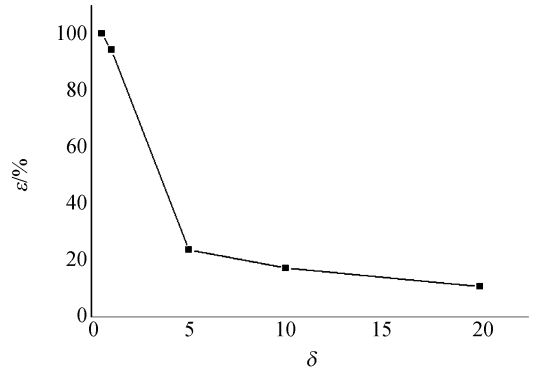
Fig. 5 Pressure curves of the resist's filling process

2.3.3 深宽比对复型精度的影响

在研究深宽比的影响时,选用占空比为 0.5 的模具,当沟槽宽度及布置方式不同,沟槽宽度 W_i 分别为 20,10,5,2,1,0.5 mm 时,模具下压速度为 $2 \mu\text{m/s}$ 。这里从深宽比与抗蚀剂填充度的关系方面分析抗蚀剂的流动特性。

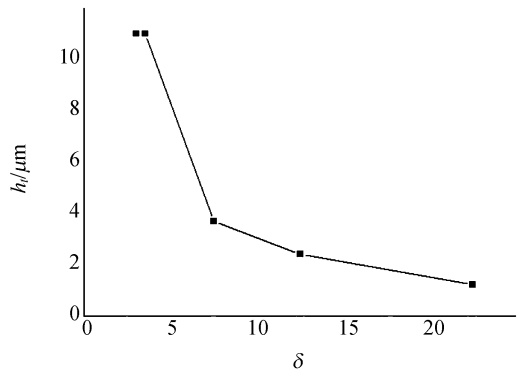
深宽比 δ 对抗蚀剂填充度 ϵ 和填充高度 h 的影响规律曲线如图 6 所示。由计算结果得知:

当深宽比 $\delta < 2$ 时,抗蚀剂的填充度达到 80% 以上, δ 越小,填充度越大;而深宽比 $\delta > 2$ 时,填充度随着 δ 的增大而快速降低到 20% 左右。对应图(b),当深宽比 $\delta < 2$ 时,填充高度达到特征深度的 90% 以上,能够达到复型的要求。但



(a) 深宽比对填充度的影响

(a) Influence of ratio of height to width on filling rate



(b) 深宽比对填充高度的影响

(b) Influence of ratio of height to width on filling height

图 6 深宽比对填充度的影响

Fig. 6 Influence of ratio of height to width on filling rates

深宽比太大时,会由于尺寸差异导致区域压力相差很大,为了能够使得填充高度和填充度得到提高,需要适当地延长压印时间。

因此,在进行模具的设计时,应该尽量使深宽比 $\delta < 2$,这样,在效率相同的情况下,能够提高压印的复型精度。

2.3.4 壁面滑移对抗蚀剂流动的影响

软模具和抗蚀剂间的摩擦对微复型质量和填充效率有较大的影响,由于摩擦的存在,当剪切速率达到临界值的时候,将表现出壁面滑移。若其他工艺条件相同,当模具下压 $0.6 \mu\text{m}$ 时,完全滑移与无滑移边界条件下的抗蚀剂对模具壁面的压力如图 7 所示。

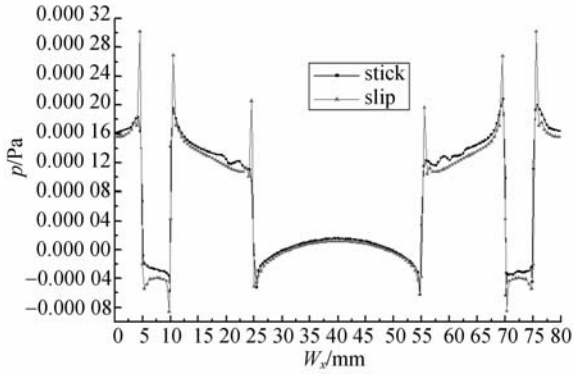


图 7 完全滑移与无滑移边界条件下抗蚀剂对模具壁面压力的比较

Fig. 7 Contrast of pressure to the mold's wall in the condition of slipping and no-slipping

由该图可知,无滑移边界条件的压力梯度小于存在滑移边界条件时的压力梯度。在其他条件相同的情况下,比较不同滑移条件下的不同特征尺寸的压力梯度变化表明, W_x 为 5~10 μm 时,对应的特征值为 5 μm , W_x 在 25~55 μm 时,对应的特征值为 30 μm 。 $W_x=5$ 和 $W_x=10$ 对应的壁面压力梯度比 $W_x=25$ 和 $W_x=55$ 对应的壁面压力梯度要大,可见,特征尺寸越小,壁面的压力梯度越大,表现出的滑移现象也会越明显。由此可知,壁面滑移是微纳米压印数值计算中所必须要考虑的问题。为减小壁面滑移对微复型质量的影响,可以通过降低下压速度即剪切速率,使抗蚀剂在与 y 轴平行的截面上的速度差异较小。

2.3.5 深厚比对填充效率的影响

抗蚀剂初始厚度是影响复型保真度的重要因素之一,抗蚀剂初始厚度对填充时间及填充度影响较大。选择深厚比分别为 0.2, 0.3, 0.5, 0.66, 0.8, 1 时,抗蚀剂深厚比对沟槽填充效率的影响规律曲线如图 8 所示。

由上图可知,占空比较小,抗蚀剂厚度对填充时间影响不大,随着占空比增大,抗蚀剂厚度对填充时间影响较大。因此,可以通过减小沟槽宽度,增大特征图型宽度,提高抗蚀剂厚度来减小填充时间。另外,随着模具压入深度的增加,模板

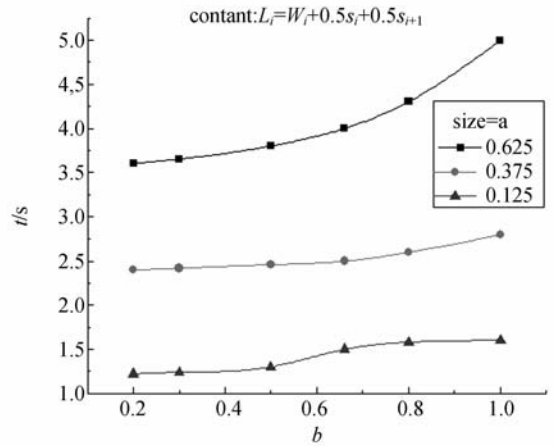


图 8 深厚比与抗蚀剂填充效率之间关系曲线

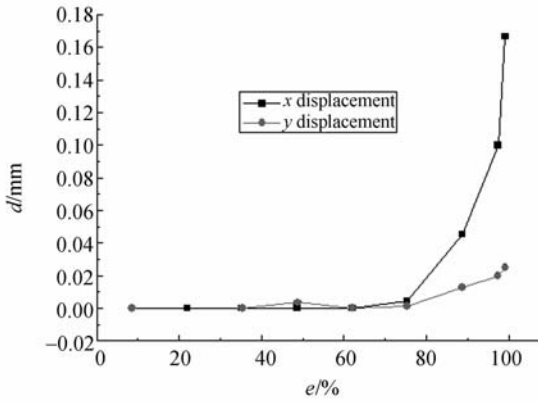
Fig. 8 Influence of ratio of height to initial thickness on filling efficiency

沟槽和聚合物之间的接触面积增大,摩擦力增加导致聚合物微流动速度缓慢减小。如果保压时间不充分,压印时流动产生的局部波峰及波谷没有被填平,使得压印后聚合物表面粗糙度较大,轮廓复型精度差,会直接影响压印质量。

2.4 抗蚀剂流动对软模具变形的影响

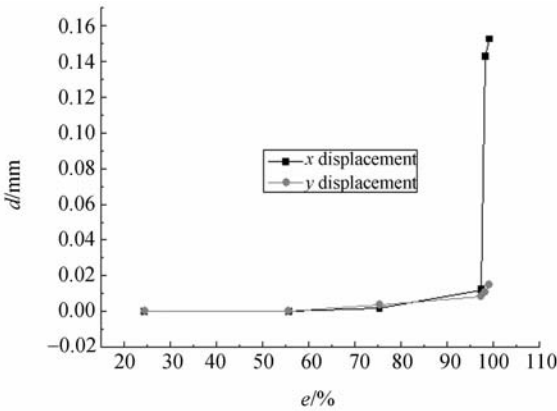
实际压印过程中,由于软模具材料为硅橡胶,抗蚀剂填充沟槽过程中对软模具也有影响。实验选择占空比为 0.5 和 0.75 的模具,其他工艺条件相同,采用流固耦合的方法分析软模具的变形与抗蚀剂填充度的关系,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,随着抗蚀剂填充度及填充高度的增加,软模具变形增大。模具变形量在 x 方向明显比 y 方向大,约达到 y 方向变形量的 3 倍。当抗蚀剂填充度达到 90% 时,模具变形率开始增加,成直线上升。当抗蚀剂填充度达到 100% 时,软模具变形率为 0.2%。因此,抗蚀剂填充沟槽过程中,软模具受力较小,其变形也小,可以忽略填充过程中抗蚀剂与软模具的相互作用力;但当抗蚀剂填充沟槽状态为过填充时,模具受到抗蚀剂作用力较大,所受应力也大。本文采用石英玻璃衬底和增加抗蚀剂初始厚度来减小软模具的变形,减小其对抗蚀剂复型精度的影响。



(a) 占空比为 0.5 的模具变形

(a) Displacement of mold with duty ratio 0.5



(b) 占空比为 0.75 的模具变形

(b) Displacement of mold with duty ratio 0.75

图 9 抗蚀剂填充度与模具变形位移量关系曲线

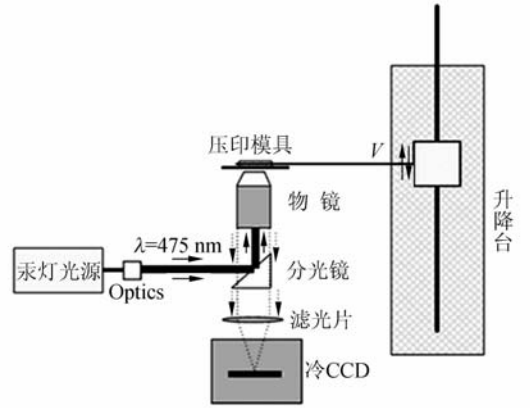
Fig. 9 Relationship between filling rate and mold displacement

3 压印的可视化实验平台及抗蚀剂的流动形貌分析

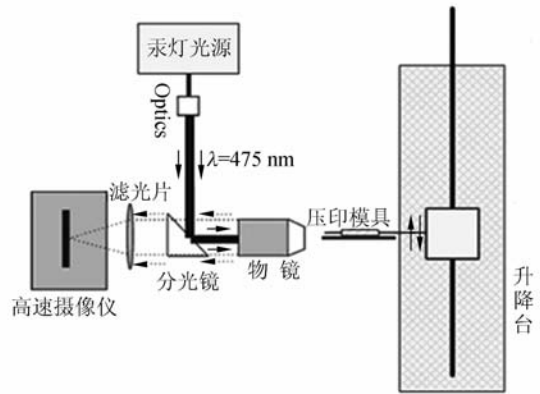
由于微压印模具图型尺度微小,为了真实地反映压印过程的流动状况,需要进行微压印过程流动状态实时可视化实验。本文利用流场流动测量技术,结合微压印工艺的特点,搭建了抗蚀剂流动的可视化实验台,观测了抗蚀剂填充沟槽的实时状态。初步搭建的可视化实验平台,其原理如图 10 所示。微复型过程中流场可视化实验平台(见图 11)是对接触角测量仪进行适当的改装而成的,可以对微压印过程中抗蚀剂的流动进行实

时观测。

可视化实验平台原理图如下:



拍摄 XY 面图像



拍摄 YZ 面图像

图 10 可视化实验原理图

Fig. 10 Principle of visual experiment

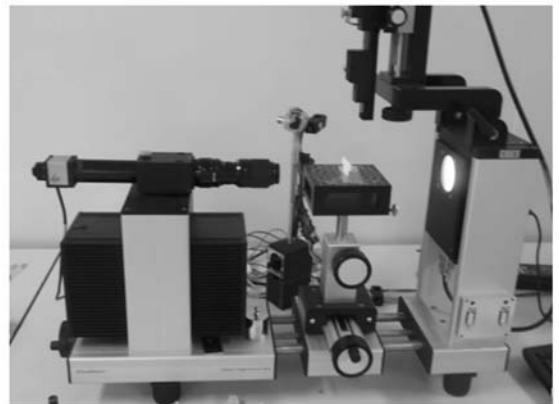


图 11 微压印可视化实验装置

Fig. 11 Visual experiment equipment for micro-imprinting

采用有限元方法分析抗蚀剂填充沟槽的流动特性,可得到抗蚀剂在不同下压时刻的流动形

貌变化。从侧面拍摄了抗蚀剂填充沟槽的实时状态,对占空比为 0.812 的模具进行了填充过程抗蚀剂流动形貌的实时观察。在其他条件相同的情

况下,采用下压速度分别为 $2\ \mu\text{m/s}$ 和 $1\ \mu\text{m/s}$ 进行对比,不同时刻的抗蚀剂填充形貌如图 12 所示,其实验的结果如下:

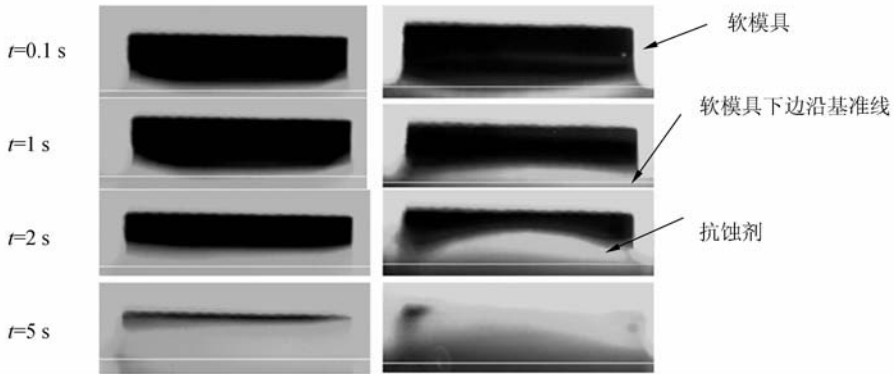


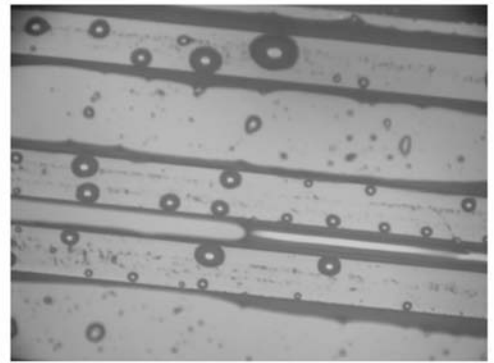
图 12 不同时刻的抗蚀剂填充形貌

Fig. 12 Resist filling profile at different time

由图 12 可知,图中的白线为软模具的下边沿基准线,通过上述实验对比可知:在软模具和抗蚀剂刚接触时,即 $t=0.1\ \text{s}$ 时,由于软模具和抗蚀剂表现为吸附性,将出现壁面向上吸附的现象,故初始填充形貌表现为“半月”形;在低速下压的情况下,抗蚀剂所受的外力变化梯度较小,所表现出的变化不是很明显。在整个填充的过程中,填充的形貌一直表现为“半月”形,直到抗蚀剂沿壁面爬升到凹槽的拐角处之后表现为抗蚀剂的横向运动,在低速压印的整个过程中,壁面和抗蚀剂之间的吸附作用是主要因素。而在较高速度下压时,由于抗蚀剂所受的外部挤压作用表现明显,此时,壁面的吸附作用影响相对较小,故在填充过程中表现为单峰凸起的形式,并且一直到峰点达到凹槽顶部;另外,由于在软模具的拐角处,抗蚀剂的流动较慢,故需要一定时间的保压,以使抗蚀剂将凹槽填充完全。

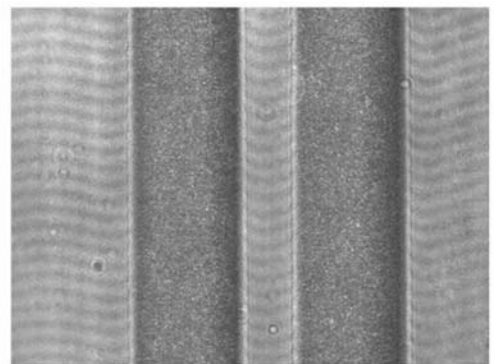
上述压印过程的分析表明,较高的下压速度并不利于抗蚀剂的填充,复型的最终结果可证明上述讨论过程。

抗蚀剂厚度、模具速度、匀胶厚度、曝光时间等工艺条件相同,模具压力不同时,分别比较了抗蚀剂复型精度。结果表明,随着模具压力的升高,抗蚀剂复型精度提高。模具压力达到 $20\ \text{N}$ 时,微复型精度最好。但当压力过大时,曝光固化后的图型精度很差。压印力高达 $50\ \text{N}$ 时,抗蚀剂微复型精度最差,这是因为模具压力过高时,软模具变



(a) 高模具下压速度

(a) Imprint result with high velocity



(b) 低模具下压速度

(b) Imprint result with low velocity

图 13 不同下压速度的抗蚀剂填充效果

Fig. 13 Resistance filling results with different imprint velocities

形,软模具沟槽深度顶部和沟槽两侧受抗蚀剂作用较大,抗蚀剂形貌也随着软模具的变形而变化。模具速度不同,抗蚀剂填充效果也不同。模具速度高,抗蚀剂固化后出现气泡,可采用减小压印速度和延长保压时间来保证复型精度(见图13)。通过减小模具速度,使模具沟槽内的空气随着时间的增加逃逸出约束空间,可避免压印结果中气泡的产生。

4 微压印复型保真度分析

根据实验与仿真结果可知,不同压印条件下,抗蚀剂填充沟槽过程中填充现象不同会导致模板沟槽棱角填充不满,抗蚀剂填充高度与模具高度之间仍然有偏差,抗蚀剂填充度差,这会给后续刻蚀带来负面影响。刻蚀是将抗蚀剂复型出的图型精确地转移到抗蚀剂下面的基片上的过程。根据后续刻蚀工艺的要求,为提高抗蚀剂的保真度,本文提出利用抗蚀剂填充过程中所出现的单双峰现象,引入了高度预留量的概念。

等效深度 h_e 定义为抗蚀剂填充面积与沟槽宽度的比值。在沟槽特征高度的基础上引入高度预留量 h_x ,软模具要求的特征深度为 h_c ,制作模具时,特意将图型特征深度增加一定的预留量 h_x ,即制作模具的特征深度为 $h_c + h_x$,如图11所示。由图可知,沟槽深度为 h_c 时,出现峰值,沟槽边缘处未能填充,抗蚀剂填充面积为 A_1 ,其填充等效深度为 h_{e1} 。当特征深度增加一个预留量时,抗蚀剂填充面积为 A_2 ,其填充等效深度为 h_{e2} 。当等效深度 h_{e2} 略大于沟槽深度 h_c 时,可满足后续刻蚀工艺要求。

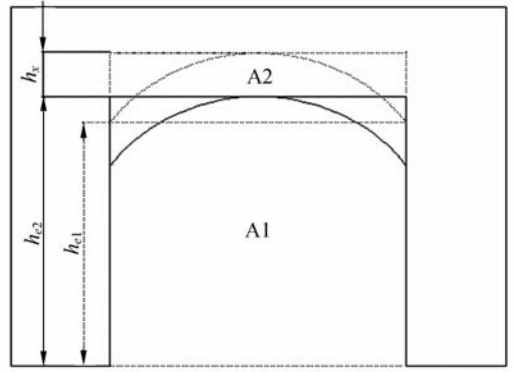


图14 等效高度示意图

Fig. 14 Graphic of equivalent height

5 结论

本文基于流固耦合理论,对常温压印过程中的抗蚀剂流动进行了有限元分析,在对压印工艺条件和模板结构进行优化后,得出如下结论。在不影响填充效率的情况下,留膜厚度较大,下压速度在 $1 \mu\text{m/s}$,且抗蚀剂在流动过程中,软模具的变形量小,可以忽略;而下压速度在 $1 \mu\text{m/s}$ 以下,占空比 >0.375 ,深宽比 <2 时,其填充度可达90%以上。相关的实验验证了优化的工艺条件和模型结构可以提高微复型精度。结合仿真和可视化实验,利用抗蚀剂的最终填充形貌,引入模板特征高度增加预留量的概念,可进一步完善压印工艺,使得复型的精度更高。通过可视化实验,得出除软模具的结构参数和压印的工艺参数以外,模具的壁面特性对抗蚀剂在凹槽中的流动也有很大的影响,因此,有必要对壁面特性做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 丁玉成,刘红忠,卢秉恒,等.下一代光刻技术-压印工程[J].机械工程学报,2007,43(3):1-6.
DING Y C, LIU H Z, LU B H, et al.. Next Generation Lithography—Imprint Lithography [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3):1-6. (in Chinese)
- [2] 秦旭光,李涤尘,李寒松,等.微压印光刻的模具制作工艺研究[J].电子工艺技术,2003,24(5):207-

209.

- QING X G, LI D C, LI H S, et al.. Study on the Mold Fabrication Process for Imprint Lithography [J]. Electronic Process Technology, 2003, 24(5): 207-209. (in Chinese)
- [3] 文伟力,左春桢,于建群,等.聚合物微流控芯片微通道模压成型分析[J].吉林大学学报(工学版),2006,36(5):696-700.
WEN W L, ZUO C C, YU J Q, et al.. Hot embossing process analysis of microchannels for polymer microfluidic chips [J]. Journal of Jilin Uni-

versity (Engineering and technology Edition) , 2006,36(5):696-700. (in Chinese)

- [4] HIRAI Y, ONISHI Y, TANABE T, *et al.*. Pressure and resist thickness dependency of resist time evolutions profiles in nanoimprint lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2008,85:842-845.
- [5] NIKLAOS KEHAGIAS, VINCENT REBOUD, *et al.*. Residual layer thickness in nanoimprint; Experiments and coarse-grain simulation[J]. *Microelectronic Engineering*, 2008,85:846-849.
- [6] ROWLAND H D, SUN A C, SCHUNK P R, *et al.*. Impact of resist film thickness and cavity size on resist flow during embossing: toward process design rules for nanoimprint lithography[J]. *USA: Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2005, 15:2414-2425.
- [7] KANG T G, KWON T H. Numerical investigation of Hot Embossing Filling Characteristics[J]. *Resist*

Processing, 2007:266-275.

- [8] FENG H, ANSHU G, SUN Y G, *et al.*. Processing Dependent Behavior of Soft Imprint Lithography on the 1-10 nm Scale[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2006,3(5):301-307.
- [9] 李寒松. 微压印中抗蚀剂、模具及图型转移工艺研究[D]. 西安:西安交通大学, 2005.
- LI H S. *The research on the resist, mold and pattern transfer in micro-imprint* [D], Xi'an: Xi'an Jiaotong University. 2005. (in chinese)
- [10] 贺永, 傅建中, 陈子辰. 微热压印过程中聚合物流动形貌的研究[J]. *光学精密工程*. 2008. 16(2): 270-277.
- HE Y, FU J Z, CHEN Z C. Study on polymer flow profile in micro hot embossing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 270-277. (in Chinese)

作者简介:



魏正英(1967—),女,陕西人,教授,博士生导师,主要研究方向为微纳结构的快速设计,制造及其可视化实验研究。E-mail:zywei@mail.xjtu.edu.cn



熊孝东(1987—),男,四川大英人,硕士研究生,主要研究方向为微纳制造及可视化实验研究。E-mail:skdxxd@yahoo.com.cn



杜军(1979—),男,宁夏贺兰人,博士研究生,主要研究方向为微纳制造及可视化实验研究。E-mail:99079477@163.com



丁玉成(1961—),男,江西南昌人,教授,博士生导师,主要研究方向为微纳制造。E-mail:yoding@mail.xjtu.edu.cn