

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.018

紫外纳米压印工艺参数对复制精度的影响

苏梓泰¹, 王子荣², 王静¹

(1. 中山大学化学学院, 广州 510006; 2. 广东中图半导体科技股份有限公司, 广东东莞 523808)

摘要: 紫外纳米压印技术兼具高分辨率与高效率的特性, 是微纳制造领域的研究热点。该技术的复制精度往往受烘烤时间与压印压力等多重工艺参数的耦合影响, 相关机理仍需深入探讨。本研究通过设计全因子试验, 系统探究了不同烘烤时间与压印压力对紫外纳米压印图形质量的影响规律, 结合膜厚测试与扫描电子显微镜表征, 定量分析了微结构阵列在不同工艺条件下的形貌变化过程。实验结果表明, 烘烤时间对膜层厚度具有显著的线性调控作用, 二者呈现高度线性负相关, 表明溶剂挥发是主导膜厚变化的关键因素。傅里叶变换红外光谱分析表明, 固化时间达 10 s 时, C=C 双键转化率已接近 100%, 为保证工艺稳定性, 最终将固化时间设定为 14 s。烘烤时间还显著影响压印胶的流动性, 进而决定图形的填充效果, 40 s 时胶体流动性较强但界面稳定性较差, 70 s 和 80 s 时流动性下降, 易造成图形凹陷与高度损失, 50 s 和 60 s 时有助于兼顾填充完整性与结构保真度。在压印压力方面, 300 kPa 和 400 kPa 有利于提升图形填充率, 但当压力超过一定阈值后, 可能引发模具弹性形变, 影响其使用寿命。综合各项指标, 本研究中紫外纳米压印的最优工艺参数为烘烤时间 50 s、压印压力 300 kPa, 在该条件下微结构高度复制精度达到 99.9%。研究结果为紫外纳米压印技术的工艺优化提供了理论支持与参考。

关键词: 紫外纳米压印; 微结构阵列; 烘烤时间; 压印压力; 复制精度

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0156-08

Effects of process parameters of UV nanoimprint on reproduction accuracy

SU Zitai¹, WANG Zirong², WANG Jing¹

(1. School of Chemistry, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 2. Sinopatt Technology Co., Ltd., Dongguan 523808, China)

Abstract: Ultraviolet nanoimprinting technology, characterized by its high resolution and efficiency, is a research hotspot in micro/nano manufacturing. The replication accuracy of this technique is often influenced by the coupling of multiple process parameters, such as baking time and imprinting pressure, and the underlying mechanisms require further investigation. The influence of different baking times and imprint pressures on the quality of UV-cured imprinted patterns was systematically investigated through a full factorial experimental design. Combined with film thickness measurements and scanning electron microscopy characterization, the morphological evolution of microstructure arrays under various process conditions was quantitatively analyzed. Experimental results indicate that baking time exhibits a significant linear regulatory effect on film thickness, with a highly linear negative correlation, suggesting that solvent evaporation is the key factor governing film thickness variation. Fourier Transform infrared spectroscopy analysis indicates that the conversion rate of C=C double bonds approaches 100% when the curing time reaches 10 s. To ensure process stability, the curing time was ultimately set at 14 s. The baking time significantly affects the fluidity of the imprint paste, thereby determining the filling effect of the pattern. At 40 s, the paste exhibits strong fluidity but poor interfacial stability. At 70 s and 80 s, the fluidity decreases, which can easily cause pattern depressions and height loss. At 50 s and 60 s, it is beneficial to balance the completeness of filling and structural fidelity. In terms of imprint pressure, pressures of 300 kPa and 400 kPa are conducive to improve the pattern filling rate. However, when the pressure exceeds a certain threshold, it may cause elastic deformation of the mold, affecting its service life. Considering various indicators, the optimal process parameters determined in this study are a baking time of 50 s and an imprint pressure of 300 kPa, which can made the height replication accuracy of the microstructure reach

通信作者: 王静, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为固体无机材料、稀土发光材料的基础与应用

收稿日期: 2026-03-16

引用格式: 苏梓泰, 王子荣, 王静. 紫外纳米压印工艺参数对复制精度的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(6): 156-163.

SU Zitai, WANG Zirong, WANG Jing. Effects of process parameters of UV nanoimprint on reproduction accuracy[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 156-163.

99.9%. The results of this study provide theoretical support and reference for the process optimization of UV nanoimprint technology.

Keywords: ultraviolet nanoimprint ; microstructure array ; baking time ; imprinting pressure ; replication accuracy

紫外纳米压印技术(UV-NIL)作为一种高分辨率和高效率的微纳结构复制方法,在集成电路、微光学元件以及生物芯片等领域展现出广阔的应用前景^[1-3]。这种技术通过紫外光使填充于模板与基片之间的光刻胶固化,实现微纳结构的图案转移,其复制精度直接决定了最终器件的性能与可靠性。传统光刻技术因受衍射限制难以突破,而UV-NIL通过机械变形实现图案转移,能够突破10 nm以下的特征尺寸,这一技术在半导体器件、光子晶体、波导光栅及偏振片等光学元件的制备中显示出巨大潜力^[4-6]。随着增强现实/虚拟现实(AR/VR)显示、数据中心和光电集成等领域的快速发展,对高性能、大面积、低成本的纳米结构制造需求日益增长^[7-8]。然而,UV-NIL在实际应用中仍面临脱模力控制、缺陷率抑制、抗刻蚀性能调控等因素的挑战,这些因素直接影响图形保真度和模具寿命,是当前研究的重点^[9-12]。

针对上述挑战,国内外学者围绕脱模力调控、缺陷抑制及材料性能优化等方面开展了大量研究,以提升紫外压印的图形保真度与工艺稳定性。周福强等^[13]利用阳极氧化铝模板结合抗黏连处理,制备出高精度聚二甲基硅氧烷(PDMS)软印章,为图形化蓝宝石衬底的压印奠定了基础;贺建芸等^[14]系统研究了紫外光固化微压印中压应力与辐射强度对微结构阵列形貌的影响;孙文婧等^[15]通过ABAQUS仿真与实验验证,发现揭开式脱模相比整体式脱模可降低应力约60%,有效减少微结构损伤;Jiang等^[16]提出两步固化脱模法,通过控制首次固化时间使抗蚀剂处于半固化状态以降低脱模力,二次固化则保证结构强度,实验证明该方法可避免模板污染并提高图形保真度。在材料性能研究方面,Shirai等^[17]发现固化树脂的弹性模量对脱模力具有显著影响,对于光滑模板,脱模力随模量增大而减小,而对于具有线-空间图案的模板则呈现相反趋势;Li等^[18]通过纳米压痕技术研究了紫外固化抗蚀剂的力学行为,发现降低固化程度可使体积收缩率降低,同时提高材料塑性并降低脱模力;Zheng等^[19]研究了紫外纳米压印过程中压印压力对柔性复合模板损伤和图案质量的影响,通过实验与有限元模拟发

现,压力过大会导致模板结构层发生塑性变形甚至开裂,而压力过小则会造成图案缺陷范围扩大。尽管现有研究在脱模机制优化与材料改性方面取得了显著进展,但多数工作集中于单一工艺参数的调控或特定缺陷的抑制。实际上紫外压印过程中的图形保真度受多重因素共同制约,其中烘烤时间与压印压力作为关键工艺参数,直接影响抗蚀剂的流动性和固化特性,共同决定微结构轮廓的完整性。但是当前关于二者交互作用对复制精度影响规律的研究有待深入,相关物理机制的探讨也较为有限。

为此,本文采用酚醛环氧丙烯酸酯树脂制备压印胶。首先考察了烘烤时间对压印胶膜厚变化的影响,以及紫外固化时间对压印胶中反应性双键转化的作用规律,在此基础上确定后续压印实验的基础工艺参数。然后通过设计全因子试验,结合膜厚测试仪和扫描电子显微镜(SEM)等表征手段,定量分析不同工艺条件下微结构的轮廓保真度以及缺陷形成情况,探究烘烤时间与压印压力对紫外压印复制精度的作用规律,并进一步探讨其内在的物理机制。本研究为紫外压印工艺参数的优化提供理论依据与实验指导,有利于该技术在高效高精度微纳制造中的应用。

1 实验部分

1.1 主要原材料

紫外光固化改性酚醛环氧丙烯酸酯树脂:1262E,湖南赢创未来新材料科技有限公司;

三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA):纯度95%,上海麦克林生化科技有限公司;

3-(甲基丙烯酰氧)丙基三甲氧基硅烷(KH-570):纯度98%,上海毕得医药科技股份有限公司;

1-羟基环己基苯基甲酮(光引发剂184):纯度99.27%,上海毕得医药科技股份有限公司;

2-羟基-2-甲基苯丙酮(光引发剂1173)、丙二醇甲醚醋酸酯(PGMEA):纯度99%,上海麦克林生化科技有限公司;

2,4-二乙基硫杂蒽酮(光引发剂DETX):纯度99.84%,上海毕得医药科技股份有限公司;

对二甲氨基苯甲酸乙酯(光引发剂EDB):纯度99.86%,上海毕得医药科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

匀胶机:KS-S100,沈阳芯源微电子设备股份有限公司;

膜厚仪:FR-pRo VIS/NIR (370~1 020 nm),岱美仪器技术服务(上海)有限公司;

紫外压印机:GD-TX-012-1,苏州光舵微纳科技股份有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet iS50,美国赛默飞世尔科技公司;

SEM:Apreo2C/xflash detector 630 m,美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 试样制备

1.3.1 紫外固化压印胶的制备

紫外固化压印胶主要由树脂、活性稀释剂、光引发剂及溶剂四类组分构成。树脂选用酚醛环氧丙烯酸酯,其结构中引入大量环状单元,有助于提高材料的耐刻蚀性能;同时,丙烯酸酯基团在紫外光照射下可由光引发剂引发自由基聚合,形成交联网络结构,进一步增强固化后材料的力学强度。活性稀释剂选用KH-570与TMPTA。KH-570中含有较多C—Si键,其键能高于C—C键,有利于提升耐刻蚀性能,同时硅基团的引入可降低压印胶的表面能,从而减少压印过程中的缺陷^[20-21];TMPTA含有三个官能团C=C双键,有助于在紫外固化过程中形成高度交联的网络结构,提升材料的整体强度^[22]。光引发剂采用184、1173、DETX与EDB,在紫外光激发下能够高效引发体系发生自由基聚合,实现快速完全固化。溶剂选用PGMEA,用于使各组分在体系中均匀分散,并可调节体系黏度,以满足旋涂工艺的要求。

紫外固化压印胶按表1所示配方进行制备。首

先按配方比例准确称取光引发剂和活性稀释剂,加入90%的配比溶剂后于室温下搅拌30 min,使其充分溶解;随后按比例加入树脂组分,待体系初步混合均匀后转移至三颈烧瓶中,并用剩余10%的配比溶剂对容器内壁进行冲洗,将附着物一并转入烧瓶,以减少物料损失并保证配方比例准确。之后在室温条件下持续搅拌48 h,使各组分充分混合均匀;最后将所得混合液经0.2 μm孔径过滤器过滤,得到最终的聚酯丙烯酸酯(PEA)紫外固化压印胶,下文统一简称为PEA。

表1 紫外固化压印胶的配方

Tab. 1 Formula of UV-cured impression adhesive

Component	Code	Mass fraction/%
Epoxy resin	1262E	31
Reactive diluent	TMPTA	4
	KH-570	6
Photoinitiator	184	0.5
	1173	0.5
	DETX	0.5
	EDB	0.5
Solvent	PGMEA	57

1.3.2 紫外纳米压印流程

将PEA滴在蓝宝石衬底表面,先在匀胶机上以2 800 r/min转速匀胶30 s,随后于120 °C条件下按设定烘烤时间进行烘烤处理。烘烤后的样品置于紫外纳米压印机中,在设定压印压力下压印,并曝光固化,最后脱模,得到表面带有微结构阵列的样品。

1.4 全因子试验设计

采用二因素全因子试验设计,研究烘烤时间(40、50、60、70、80 s)与压印压力(200、300、400 kPa)两个因素对纳米压印图形形貌及其复制精度的影响,具体实验设计见表2。

表2 全因子试验设计

Tab. 2 Design of full factorial experiment

Items	Experiment number														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Baking time/s	40	40	40	50	50	50	60	60	60	70	70	70	80	80	80
Imprinting pressure/kPa	200	300	400	200	300	400	200	300	400	200	300	400	200	300	400

1.5 测试方法

1.5.1 膜厚测试

将PEA滴在蓝宝石衬底表面,在2 800 r/min条件下匀胶30 s,随后在120 °C下分别烘烤不同时间。采用膜厚仪对烘烤后的胶膜样品进行厚度测试。每个实验条件下取3个平行样品,分别测量各样品

中心位置的膜厚,取3次测量结果的平均值作为该条件下的膜厚测试结果。

1.5.2 FTIR 测试

将1 mL PEA滴在四寸蓝宝石衬底表面,经120 °C烘烤100 s后进行不同固化时间的紫外固化,得到薄膜样品。将上述薄膜样品放入FTIR 仪中进

行测试,扫描范围为4 000~500 cm^{-1} ,扫描次数为64,分辨率为2 cm^{-1} 。

1.5.3 SEM测试

采用SEM对表面带有微结构阵列的样品进行观测分析,并利用SEM自带的测量系统对所得微结构阵列的相关特征参数进行测量,测试前对样品喷金处理。通过SEM对样品的上底宽度、下底宽度以及高度进行测量,为减小测试误差,每组实验条件下均进行3次平行测量,并取各尺寸参数的平均值作为该组样品的表征结果,后续复制精度的计算基于该平均值进行。目标图形的SEM照片如图1所示,结构参数见表3。基于样品参数和目标参数,计算得到复制精度,复制精度的计算公式见式(1)。

$$R_A = \frac{H_s}{H_T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_A 为复制精度,单位%; H_s 为样品高度,单位 μm ; H_T 为目标图形高度,单位 μm 。

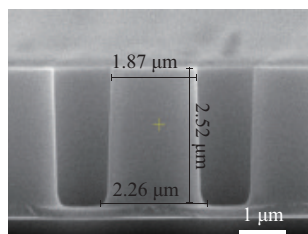


图1 目标图形的SEM图

Fig. 1 SEM image of the target structure

表3 目标图形的参数

Tab. 3 Target graphic parameters

Height/ μm	Top width/ μm	Bottom width/ μm
2.52	1.87	2.26

2 结果与讨论

2.1 膜厚与烘烤时间的关系

为探究烘烤时间对膜厚的影响规律,对烘烤时间分别为40、50、60、70、80 s的胶膜样品进行厚度测试。膜厚测试结果如图2所示,膜厚随烘烤时间的延长呈线性下降趋势,膜厚平均值随烘烤时间增加由1.267 μm 逐渐降低至1.207 μm 。回归分析决定系数(R^2)=0.998 41,表明拟合程度高,二者之间存在高度显著的线性相关关系。膜厚的大小及其极差直接影响后续压印工艺中材料的填充行为以及成形结构的均匀性。以上结果表明,烘烤时间是影响薄膜厚度的重要工艺参数。在本实验条件下,随着烘烤时间由40 s延长至80 s,薄膜厚度呈明显线性下降趋势。这主要是因为烘烤过程中压印胶中的

溶剂持续挥发,体系固含量逐渐升高,最终保留在基底表面的胶层厚度随之减小。膜厚的变化将进一步影响后续压印过程中压印胶对模板型腔的填充行为,膜厚过低时,型腔可能无法被充分填满,导致结构高度不足;而膜厚过高则易形成较厚残余层,不利于后续图形质量控制。因此,对烘烤时间与膜厚关系的明确,有助于为后续压印实验中烘烤时间的优化提供依据,从而在保证型腔充分填充的同时兼顾残余层控制,提高图形复制精度与工艺稳定性。

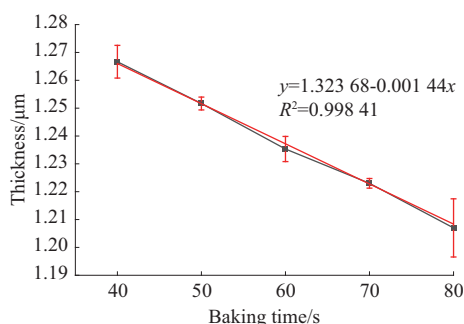


图2 膜厚与烘烤时间的线性拟合关系

Fig. 2 Linear fitting relationship between film thickness and baking time

2.2 紫外固化时间的探究

为考察不同固化时间对体系中丙烯酸酯双键转化的影响,对不同固化时间下所得薄膜样品进行FTIR分析,具体固化工序参数见表4,图3为不同固化时间样品的FTIR谱图。FTIR谱图中位于1 635、1 406、811 cm^{-1} 处的特征峰分别归属于C=C双键的伸缩振动、C=C—H的面内弯曲振动与C=C—H的面外弯曲振动,是体系中不饱和双键的特征标识。在365 nm紫外光照射、曝光功率为631 mW/cm^2 的条件下,经过5 s固化后,上述三个特征峰的强度发生显著衰减;当固化时间达到10 s后,以及延长至14 s和50 s时,1 635、1 406 cm^{-1} 和811 cm^{-1} 处特征峰峰强基本不再发生明显变化,表明体系中的双键转化已进入稳定阶段,光固化反应基本完成,因此

表4 紫外纳米压印的主要工艺参数

Tab. 4 Main process parameters of UV nanoimprint

No.	Wavelength/ nm	Exposure power/($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Exposure time/s	Heating temper- ature/ $^{\circ}\text{C}$
1	365	631	0	76
2	365	631	5	76
3	365	631	10	76
4	365	631	14	76
5	365	631	50	76

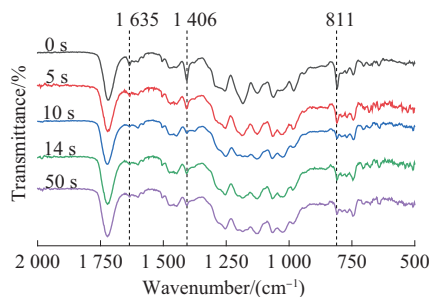


图3 不同固化时间下样品的FTIR谱图

Fig. 3 FTIR spectra of samples at different curing times

继续延长曝光时间对体系固化程度的影响较小。虽然固化时间达到10 s时体系中双键转化已基本进入稳定阶段,但鉴于不同样品之间可能存在膜厚波动及局部曝光差异,为进一步保证样品固化的充分性、一致性及工艺重复性,最终将紫外固化时间确定为14 s。

2.3 烘烤时间对复制精度的影响

为探究烘烤时间对图形保真度的影响,不同压印压力条件下,分别设定热盘烘烤时间为40、50、60、70和80 s,绘制上底、下底及高度随烘烤时间的变化曲线,如图4所示。由图4a和图4b可知,烘烤时间的变化对上底直径与下底直径影响不显著。当烘烤时间从40 s增加至80 s时,上底直径与下底直径的变化幅度均不超过0.1 μm ,最大变化率为3.79%。相比之下,由图4c可知,图形高度受烘烤时间影响较为明显,其变化范围接近1 μm ,最大变化率可达55.08%。综上所述,后续研究主要聚焦于烘烤时间与压印压力对图形高度的影响。

由图4c可知,在不同压印压力条件下,图形高度均随烘烤时间的延长呈现持续衰减趋势,且压力对高度衰减的调控作用随烘烤时间延长逐步凸显。当烘烤时间为40 s时,各压力条件下图形高度均达到初始最大值,且三者间高度差异可忽略;延长至50 s时,图形高度仅出现极小幅衰减,不同压力间的差距仍不明显。这一现象可归因于短时间烘烤仅使压印胶内溶剂适度挥发,压印胶仍维持较低黏度与良好流动性,即便在较低压力下,也可实现与高压条件下相近的模板型腔填充效果,因此图形高度无明显分化。当烘烤时间进一步延长至60 s时,图形高度开始出现明显衰减,且不同压力条件下的高度差异逐步扩大。此时压印胶内溶剂持续挥发导致黏度显著升高,低压力已无法提供足够的填充驱动力,高压在模板填充过程中的优势开始凸

显,进而使不同压力下的图形高度出现分化。而当烘烤时间延长至70 s和80 s时,图形高度的衰减速率进一步加快,不同压力间的高度差距持续拉大,压力对填充效果的影响愈发显著。究其原因,长时间烘烤导致压印胶内溶剂过度挥发,溶剂含量的大幅降低显著增强了聚合物链间的相互作用与链缠结程度,进而使压印胶的弹性模量与硬度大幅提升,流动性几乎完全丧失;在此状态下,即使施加较高压力,也难以使模板微结构的充分填充,最终导致图形高度显著降低。

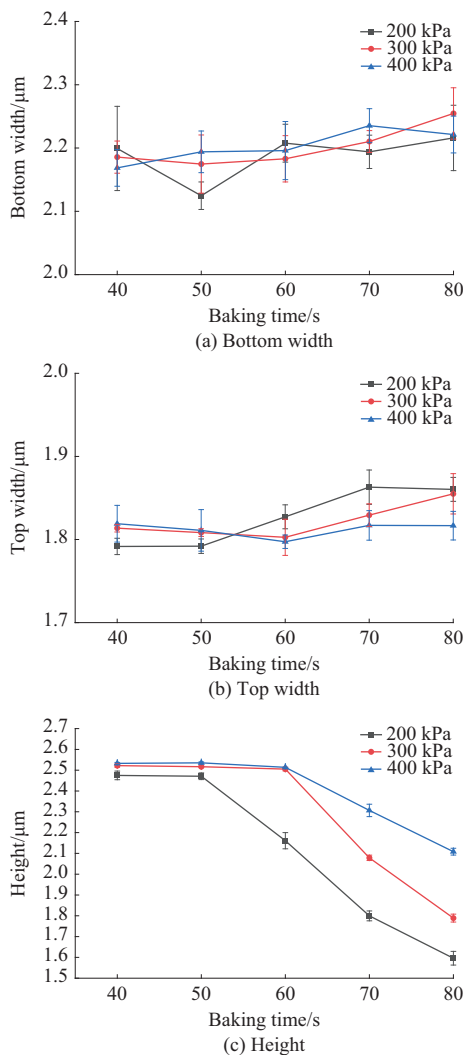


图4 不同压力下图形尺寸随烘烤时间的变化

Fig. 4 Change in graphic size with baking time under different pressures

图5为200 kPa的压印压力下,不同烘烤时间的样品表面SEM图。由图5可知,在200 kPa的压印压力下,所制备图形出现明显变形。随烘烤时间由80 s逐步缩短至40 s,图形顶部的凹陷结构呈现持续减弱的变化趋势:80 s烘烤条件下可观察到明显

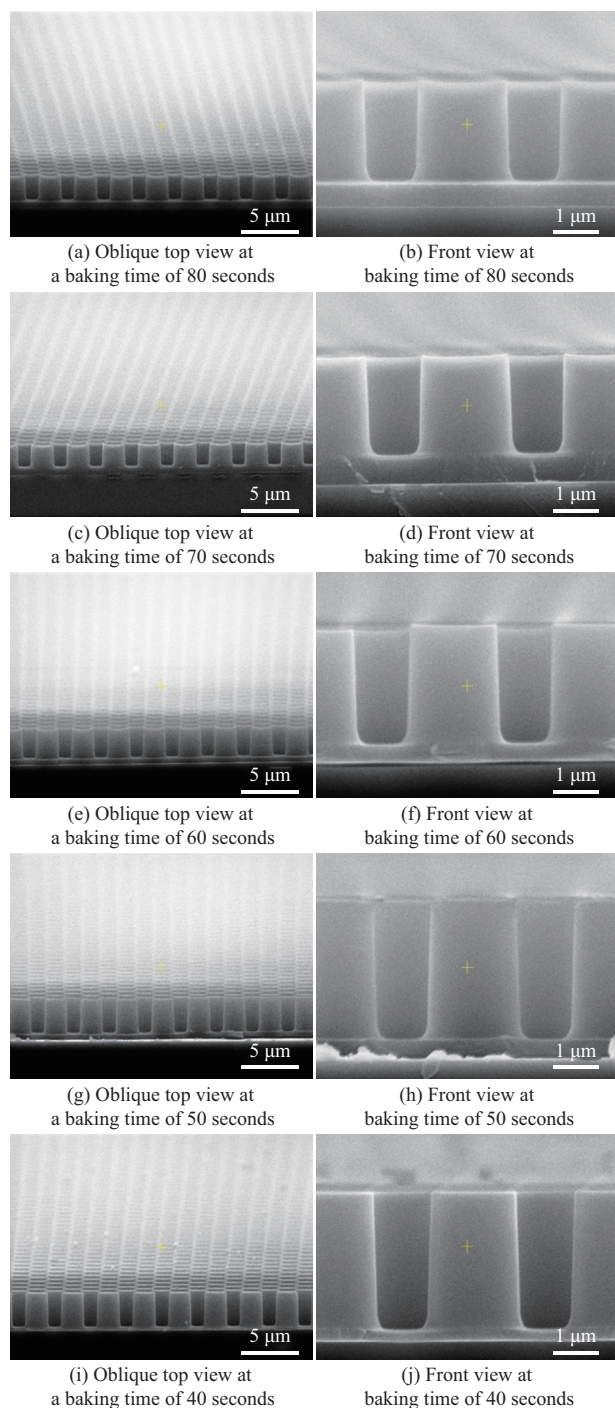


图5 恒定压力(200 kPa)下不同烘烤时间的样品表面SEM图

Fig. 5 SEM images of sample surfaces with different baking times under constant pressure (200 kPa)

的顶部凹陷形貌;烘烤时间缩短至70 s和60 s时,凹陷程度有所缓解;当烘烤时间进一步缩短至50 s和40 s时,图形顶部无此类凹陷结构出现。图6为样品脱模过程示意图,结合图6分析上述凹陷形貌的形成。首先,过长的烘烤时间导致压印胶中溶剂显著挥发,进而使其玻璃化转变温度升高,在室温下

呈现玻璃态力学行为。此时,聚合物分子链缠结程度加剧,材料模量显著提升,弹性回复能力与分子链流动性大幅衰减。而后,在脱模过程中,PDMS模具与压印胶间的界面黏附力超过压印胶的局部内聚强度,诱发胶层发生内聚破坏;同时,由于分子链流动性丧失,脱模产生的变形无法通过弹性回复得以修复,最终形成图形顶部的弧形凹陷形貌。

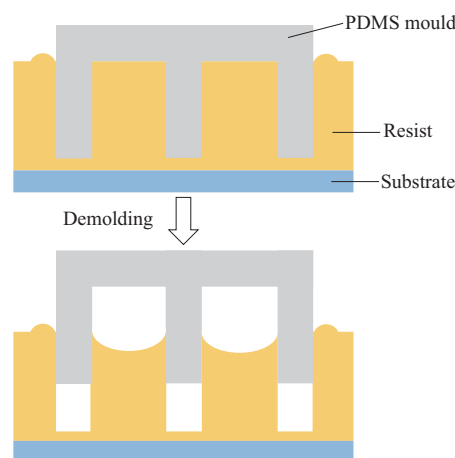


图6 脱模过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of demolding process

然而,烘烤时间并非越短越有利于缺陷的控制。当烘烤时间为40 s时,基底左端多次出现脱胶现象,如图7所示。这一现象是因为短时间烘烤后压印胶中残留溶剂含量较高,使其处于低模量黏弹态,且胶层与基底之间的界面结合以物理吸附为主,结合强度较弱。

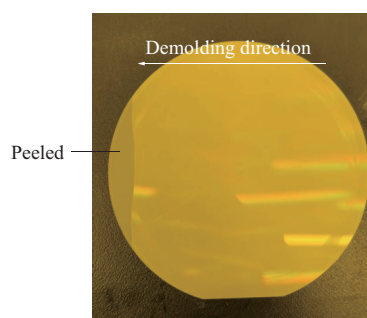


图7 脱模缺陷照片

Fig. 7 Photo of demolding defects

此外,该纳米压印工艺采用如图8所示的揭开式脱模方式,当脱模过程推进至左侧末端区域时,PDMS模具与胶层的接触面积逐渐减小,剥离角增大,导致脱模力由初始的垂直拉伸主导转变为剪切-剥离复合应力主导,从而加剧局部应力集中。当该复合应力超过胶-基底界面的黏附强度时,胶层即发生剥离。

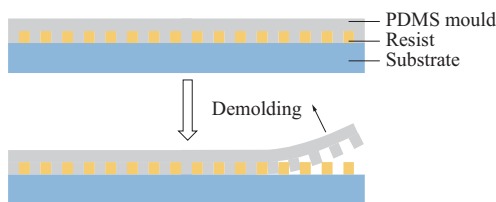


图8 揭开式脱模示意图

Fig. 8 Schematic diagram of peel-off demolding

综合不同烘烤时间下的图形高度变化、形貌缺陷演变及工艺效率分析,最终确定50 s为本实验条件下的最优工艺参数,该条件下图形无顶部凹陷、脱模脱胶等结构缺陷,同时兼顾了高效的制备效率,为微纳结构的高质量、高效率复制提供了可靠的工艺保障。

2.4 压印压力对复制精度的影响

为探究压印压力对复制精度的影响,本研究在不同烘烤时间条件下,分别设定压印压力为200、300、400 kPa,并采用SEM对制备的圆柱形微结构阵列的上底直径、下底直径及高度进行测量,每组测量三次,取高度平均值做表,并计算复制精度,见表5。图9为烘烤时间60 s时不同压印压力下的样品表面SEM图。压印压力是驱动压印胶填充模板微结构的核心外力。当压力偏小时,其不足以克服胶层黏滞阻力,导致胶液在保压时间内无法充

分填充微结构,仅实现部分填充,最终表现为图形高度偏低,如图9a所示。该现象在长烘烤时间条件下更为显著,因胶层固化后流动性劣化,进一步放大了低压驱动的填充不足效应。压印胶无法充分填充模板空腔,从而导致成形高度偏低,复制精度下降。当压印压力为300 kPa和400 kPa时,如图9b和图9c所示,图形高度与目标尺寸已十分接近,图形形貌已基本满足要求。然而,表5中部分试验组(如第3组和第6组)的复制精度超过100%,表明所复制图形的高度已超出模具原始深度。这一现象主要可能与两方面因素有关。其一,PDMS模具的拉伸弹性模量仅0.5~3 MPa,断裂伸长率可达100%~800%,在压印压力作用下易发生可逆的弹性大变形:在低压力下PDMS的弹性形变可随压力卸除完全回复;当压印压力超过其临界弹性变形压力,模具微结构会发生瞬时的面外弹性挤压变形,造成复制结构尺寸偏差,长期使用还可能引起模具疲劳损伤,缩短其使用寿命^[23]。其二,在脱模过程中,光刻胶与模具之间的界面黏附力可能对已固化结构施加拉伸作用,若界面黏附力较大,易使纳米结构发生塑性拉伸变形,从而导致最终图形高度大于模具深度。综上所述,所以本实验中最优的压印压力为300 kPa。

表5 各组样品的高度平均值与复制精度

Tab. 5 The average height and replication accuracy of each group of samples

Item	Test serial number														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Average height/ μm	2.48	2.52	2.53	2.47	2.52	2.54	2.16	2.51	2.51	1.80	2.08	2.31	1.60	1.79	2.11
Replication accuracy/%	98.2	100.1	100.5	98.1	99.9	100.6	85.8	99.4	99.7	71.4	82.5	91.5	63.3	71.0	83.7

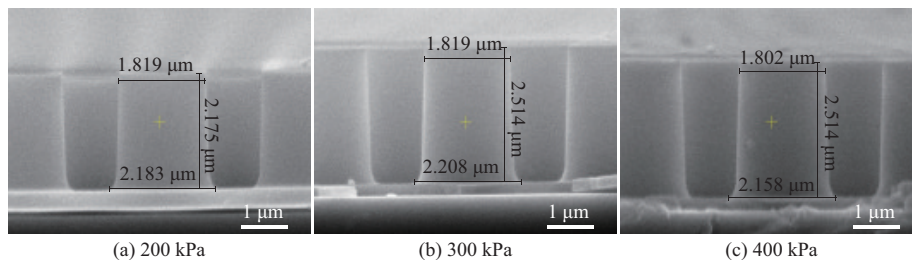


图9 烘烤时间60 s时不同压印压力下的样品表面SEM图

Fig. 9 SEM images of sample surfaces under different imprinting pressures with a baking time of 60 seconds

2.5 全因子试验分析及最优工艺参数

以烘烤时间为例,各因素各水平的复制精度均值以及极差的计算见式(2)至式(7)。

$$\overline{A_{B1}} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} \times 100\% \quad (2)$$

$$\overline{A_{B2}} = \frac{A_4 + A_5 + A_6}{3} \times 100\% \quad (3)$$

$$\overline{A_{B3}} = \frac{A_7 + A_8 + A_9}{3} \times 100\% \quad (4)$$

$$\overline{A_{B4}} = \frac{A_{10} + A_{11} + A_{12}}{3} \times 100\% \quad (5)$$

$$\overline{A_{B5}} = \frac{A_{13} + A_{14} + A_{15}}{3} \times 100\% \quad (6)$$

$$R = \max \{ \overline{A_{B1}}, \overline{A_{B2}}, \overline{A_{B3}}, \overline{A_{B4}}, \overline{A_{B5}} \} - \min \{ \overline{A_{B1}}, \overline{A_{B2}}, \overline{A_{B3}}, \overline{A_{B4}}, \overline{A_{B5}} \} \quad (7)$$

式中: $\overline{A_{B_i}}$ 表示第*i*个烘烤时间水平的平均复制精度; A_x 表示上述表5第*x*组中的复制精度; R 为极差。

将所有数据计算汇总,见表6。

表6 复制精度均值与极差

Items	Average replication accuracy					Range
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	
Baking time	99.6	99.5	95.0	81.8	72.7	26.9
Imprinting pressure	83.4	90.6	95.2			11.9

通过极差分析可知,烘烤时间的极差为26.9%,压印压力的极差为11.9%,表明在实验考察范围内,烘烤时间对复制精度的影响更为显著,是影响复制精度的主要因素,而压印压力的影响相对较小,为次要因素。从各水平的平均复制精度来看,烘烤时间水平1至水平5的复制精度依次为99.6%、99.5%、95.0%、81.8%和72.7%,呈现持续下降趋势,其中水平1的复制精度最高,为最佳水平;压印压力水平1至水平3的复制精度依次为83.4%、90.6%和95.2%,随着压力增大复制精度逐步提高,水平3为最佳水平。综合以上分析,理论最佳工艺组合为烘烤时间水平1与压印压力水平3,进一步结合实际工艺约束及压印缺陷的控制需求,确定最优工艺参数为烘烤时间50 s、压印压力300 kPa,此时,样品复制精度可达99.9%。

3 结论

(1)烘烤时间与膜厚呈高度线性负相关($R^2=0.998\ 41$),说明溶剂挥发是控制膜厚的关键机制。

(2)经120℃烘烤100 s后,在365 nm紫外光照射、曝光功率为631 mW/cm²的条件下,随着固化时间延长,压印胶中C=C双键相关特征峰逐渐减弱;当固化时间达到10 s后,特征峰峰强基本趋于稳定。综合考虑样品膜厚差异及工艺重复性,最终确定紫外固化时间为14 s。

(3)在匀胶转速2 800 r/min、时间30 s、烘烤温度120℃及紫外固化时间14 s的实验条件下,本文确定的最优紫外纳米压印工艺参数为烘烤时间50 s、压印压力300 kPa。该条件下制得的圆柱形微结构阵列形貌较完整,未见明显缺陷,复制精度可达99.9%。

参考文献

- [1] WANG P H, WANG C M. Review of nanoimprinted photonics[J]. *Nanotechnology*, 2025, 36(44). DOI:10.1088/1361-6528/ae150a.
- [2] ZHANG J W, JIRIGALANTU, YU S, et al. Research on manufacturing technology of nanoimprinted grating[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, 131:891–909.
- [3] TRAUB M C, LONGSINE W, TRUSKETT V N. Advances in nanoimprint lithography[J]. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 2016, 7:583–604.
- [4] 魏玉平,丁玉成,李长河.纳米压印光刻技术综述[J]. *制造技术与机床*, 2012(8):87–94.
WEI Yuping, DING Yucheng, LI Changhe. Overview of nano-imprinting technology[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2012(8):87–94.
- [5] 洗程曦,张剑桥,王子荣,等.倒装LED芯片的纳米级图形化Al₂O₃-SiO₂复合材料衬底设计[J]. *光学学报*, 2025, 45(9):279–287.
XIAN Chengxi, ZHANG Jianqiao, WANG Zirong, et al. Design of nanoscale patterned Al₂O₃-SiO₂ substrate for flip-chip LEDs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(9):279–287.
- [6] BARCELO S, LI Z Y. Nanoimprint lithography for nanodevice fabrication[J]. *Nano Convergence*, 2016, 3(1). DOI: 10.1186/s40580-016-0081-y.
- [7] 李延强,兰红波.大面积纳米压印揭开式脱模机理和规律[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(4):470–477.
LI Yanqiang, LAN Hongbo. Mechanism and laws of peel-off demolding for large-area nanoimprint lithography[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(4):470–477.
- [8] 高晓蕾,陈艺勤,郑梦洁,等.大面积纳米压印技术及其器件应用[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(5):555–573.
GAO Xiaolei, CHEN Yiqin, ZHENG Mengjie, et al. Large-area nanoimprint lithography: Processes and device applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(5):555–573.
- [9] 杨志伟.纳米压印光刻技术在中国半导体领域的应用与挑战[J]. *中国科技产业*, 2024(6):50–53.
YANG Zhiwei. Application and challenge of nano-imprint lithography technology in China semiconductor field[J]. *Science & Technology Industry of China*, 2024(6):50–53.
- [10] 殷敏琪,孙洪文,王海滨.紫外纳米压印技术的研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2017, 54(5):347–354.
YIN Minqi, SUN Hongwen, WANG Haibin. Research progress in UV nanoimprint lithography technology[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2017, 54(5):347–354.
- [11] CHEN L, LIANG H K, LIU P, et al. Sustainable lithography paradigm enabled by mechanically peelable resists[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(3). DOI:10.1002/adma.202410978.
- [12] COX L M, MARTINEZ A M, BLEVINS A K, et al. Nanoimprint lithography: Emergent materials and methods of actuation[J]. *Nano Today*, 2020, 31. DOI:10.1016/j.nantod.2019.100838.