

## 掩膜板凸出环隔离压缩式纳米压印施压气体的研究\*

李天昊 郑国恒 刘超然 夏委委 李冬雪 段智勇†

(郑州大学物理工程学院, 郑州 450001)

(2012年8月29日收到; 2012年10月25日收到修改稿)

在半导体微纳加工技术中, 纳米压印由于具备低成本、高产出、超高分辨率等诸多优势而备受研究者和半导体厂商的青睐, 有望成为下一代光刻技术的重要备选支撑技术之一. 然而在其施压流程中, 由于气体诱捕或陷入所造成的气泡缺陷问题直接关系到图案复制的成功率和完整性, 因此避免气泡缺陷, 阻止气泡进入模穴是亟待解决的关键问题. 提出一种适用于在气体环境中进行气压压缩式纳米压印工艺并避免气体进入掩膜板基板间隙的方法. 采用带有刻蚀一定宽度凸出环的掩膜板, 凸出环与基板形成环板毛细缝隙, 图形转移介质流体在其中形成毛细液桥, 使掩膜板-介质-基板形成独立的封闭腔, 转移介质黏附力所产生的静摩擦力及介质流体表面张力所诱导的毛细力抵抗施压气体, 有效地阻止气体进入空穴形成气泡缺陷. 通过理论解析推导出针对具有不同表面特性转移介质流体的凸出环有效宽度, 为掩膜板制备提供理论依据.

关键词: 纳米压印, 凸出环, 毛细液桥, 静摩擦力

PACS: 81.16.Nd, 81.16.Rf, 85.85.+j

DOI: 10.7498/aps.62.068103

## 1 引言

纳米压印技术自从 1995 年提出以后, 备受推崇. 这种微加工技术具备操作简单、效率高、成本低、图形复制保真度高<sup>[1]</sup>等多方面优势, 可以应用于多种领域并取得了一定成果, 而且一些研究者对其进行了各方面的发展, 包括掩膜板设计<sup>[2]</sup>、抗蚀剂的优化以及施压系统的改进等. 然而在其发展过程中, 这种技术存在的各种缺陷也逐渐被研究者发现, 其中由气体陷入或诱捕所造成的图案气泡缺陷问题<sup>[3]</sup>尤为突出. 已提出的避免气泡缺陷的措施包括采用薄膜密封<sup>[4]</sup>、利用可溶解于介质抗蚀剂的特殊气体<sup>[5]</sup>、在真空环境中进行压印<sup>[6]</sup>等. 这些方式限制了纳米压印的应用领域, 增加了设备的复杂度, 成本费用增高. 在微米/纳米尺寸范围内, 由于比表面积增大, 一些微观力及纳观力将对系统的行为及性能起到主导作用<sup>[7-9]</sup>, 比如表面张力、摩擦力、范德华力、静电力、卡西米尔力等. 在微机电系统 (MEMS) 中, 由于空气具有一定的湿度, 大多数微纳器件的表面微接触中存在一定量的液桥,

由液桥引起的毛细力将会增加接触表面之间的黏附力和静摩擦力从而使器件不能正常发挥作用而失效<sup>[10,11]</sup>, 因此在 MEMS 中大多采取保护措施, 尽量减小这种黏着和摩擦现象, 比如进行表面修饰、改变制造生产工艺<sup>[8]</sup>等. 相反, 本文则根据其毛细效应原理对这种液桥和器件表面所具有的黏着和摩擦特性加以利用, 从而利用图形转移介质流体在硅-硅表面微接触的毛细缝隙中所形成的液膜来阻隔纳米压印施压腔室的气体进入. 考虑到纳米级凸出环-基板毛细缝隙的特殊性, 主要分析表面张力所引起的毛细力和介质流体与硅表面的静摩擦力作用.

## 2 掩膜板凸出环结构隔离施压气体原理

## 2.1 系统结构及工作原理

图 1 为气体压缩式施压纳米压印系统结构.

施压对象为已完成对准后的掩膜板/金属纳米粒子流体/基板结构, 通过样品通道被放置到承片

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51175479) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: duanzhiyong@zzu.edu.cn

台上. 伺服马达驱动滚珠丝杠推动活塞下降, 位移量可以较高精度地控制, 腔室体积减小, 压强增大, 作用到加工对象表面的压力均匀增强达到要求值, 施压压力动态可调, 控制方便. 施压结束后, 控制系统驱动活塞上升, 腔室体积增大, 压强减小, 样品表面压力恢复到初始状态. 为防止施压过程中气体进入到掩膜板与基板之间造成气泡缺陷, 掩膜板圆周设置连续凸出环, 其与金属纳米粒子流体层紧密接触, 使其内部形成相对独立的密闭空间. 这种设计不再采用其他密封措施, 简化了系统复杂度. 图 2 为带凸出环的掩膜板具有图案的一面, 每个裸片上都具有一定结构的微纳米图案, 掩膜板周围的环形区域为设计的凸出环.

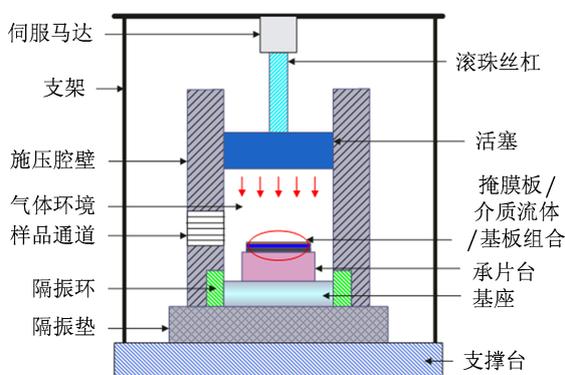


图 1 气体压缩式施压纳米压印系统结构

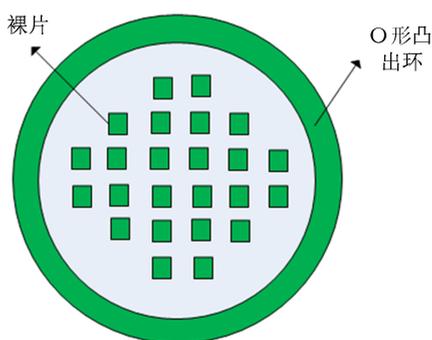


图 2 带凸出环设计的掩膜板正面俯视图

## 2.2 气体环境中气压施压纳米压印工艺流程

图 3 为在气体环境中进行气压施压纳米压印的整个工艺流程. 首先对硅基板进行超声清洗处理, 清洗结束将基片烘干并在真空环境中进行掩膜板和基板的对准, 并预接触形成掩膜板/金属纳米粒子

流体/基板的“三明治”组合样品, 此时在凸出环和基板之间形成纳米级的毛细缝隙, 流体填充在其中. 第四步为样品转移到气体环境施压腔室进行气体施压, 压印结束后进行脱模操作, 掩膜板图形复制到金属纳米粒子流体层, 最后可以进行刻蚀等后续处理.

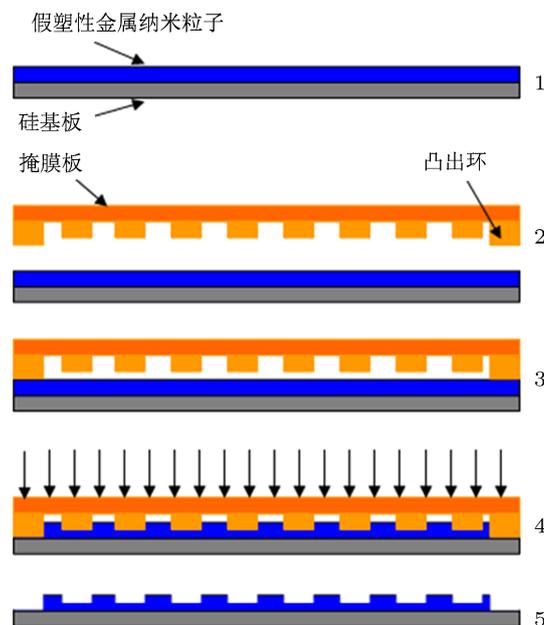


图 3 气体环境中进行气压施压纳米压印工艺流程 1, 清洗基片并旋涂假塑性金属纳米粒子流体; 2, 清洗掩膜板并在真空环境中与基板对准; 3, 真空环境掩膜板凸出环与流体接触形成密闭空间; 4, 样品转移到气体施压腔室进行施压; 5, 掩膜板分离图形转移到介质层

## 2.3 气体隔离原理分析

图 4 为增加了凸出环设计的掩膜板和基板组合的剖面图. 通过电子束或聚焦离子束刻蚀技术在掩膜板周围刻蚀出具有一定宽度的凸出环, 凸出环与基板之间形成了环板毛细缝隙, 介质流体在毛细缝隙中利用毛细效应、黏性阻力、表面静摩擦力的作用来抵抗施压腔室的气体压力, 使掩膜板和基板中形成密闭腔室来阻隔气体的进入, 从而可以有效地避免纳米压印图案复制过程中造成的气泡缺陷问题.

图 5 为二维环板毛细缝隙中的介质流体的受力分析. 假设施压腔室内的气体在所采用的介质流体中的溶解度极低, 腔室气体不能通过压力融入介质流体引起气泡缺陷, 而只能通过气体压力推动介质流动或移动从而进入模板腔内引起气泡缺陷.

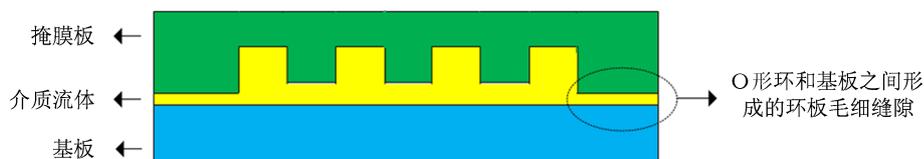


图4 掩膜板上凸出环和基板之间形成的纳米级环板毛细缝隙

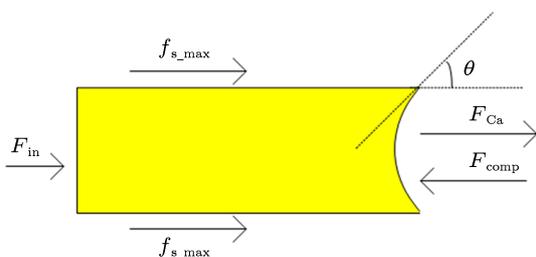


图5 二维环板毛细缝隙中的介质流体的受力分析

利用最大静摩擦力、内外压强差、毛细驱动力与各个参数之间的关系来解析分析凸出环抵抗外界气体压强的极限宽度. 假设用最小静摩擦力来计算极限宽度值, 当在此宽度值基础上进一步减小时, 有可能存在一个更小的宽度, 在此宽度下其最大静摩擦力等于上一步的最小静摩擦力, 同样可以抵抗住介质抗蚀剂两端的压强差, 可以证明这个更小的凸出环宽度是需要的极限宽度. 设定向右为正方向, 其中  $f_{s,max}$  为介质和掩膜板凸出环及硅基板之间的最大静摩擦力,  $F_{in}$  为凸出环内部介质所受到的压力,  $F_{comp}$  是纳米压印施压腔室内的气体压强在弯月面产生的指向介质内的压力:

$$F_{comp} = P_{comp} \cdot S_{meniscus}, \quad (1)$$

其中  $P_{comp}$  为施压腔室压强,  $S_{meniscus}$  为弯月面面积, 可以近似表示为

$$S_{meniscus} \approx 2\pi Rh, \quad (2)$$

其中  $h$  为环板毛细缝隙的高度, 也即介质流体薄膜的厚度, 由于弯月面是曲面, 因此实际弯月面面积要略大于如前所示的值, 在纳米级范围, 可以近似

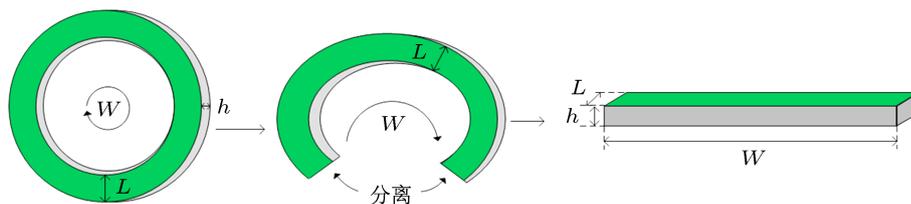


图7 环-板毛细缝隙结构几何形状的推演

忽略.  $F_{Ca}$  为介质流体表面张力所引起的毛细力, 其方向根据平衡接触角  $\theta$  的取值不同而不同, 当介质流体可以浸润硅表面 (包括全浸润和部分浸润) 时, 即  $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$  时, 毛细力具有驱动介质流体向外流动的趋势, 方向指向凸出环外部; 当介质流体不浸润硅表面时, 即  $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$  时, 毛细力具有驱动介质流体向内流动的趋势, 方向指向凸出环内部.

### 3 掩膜板凸出环宽度的解析分析

图6为包含介质液体的一段平板毛细缝隙的纵向剖面图, 设气相压强为  $P_{vap}$ , 在气液弯月界面的毛细管压强降为  $P_{cap}$ , 则液相中的压强为

$$P_{poly} = P_{vap} - P_{cap}. \quad (3)$$

将环-板型毛细缝隙考虑成宽度为  $w$ , 高度为  $h$ , 长度为  $L$  的矩形毛细管的两个侧壁环形衔接形成, 如图7所示. 那么对于环板型毛细管的毛细驱动现象, 我们可以根据矩形剖面毛细管的模型进行类比计算, 宽度即是凸出环的内径所对应的周长, 高度不变, 长度为  $L$  即凸出环的环宽度.

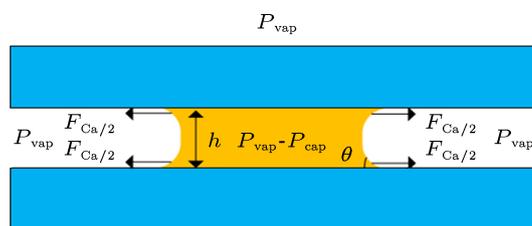


图6 平板毛细缝隙中各相流体的压强关系

根据常规 Young-Laplace 方程, 对于矩形剖面毛细管, 在流体静力学平衡条件下, 由表面张力诱导产生的毛细管压强为

$$P_{\text{cap}} = P_{\text{vap}} - P_{\text{poly}} = 2\sigma \cos \theta \left( \frac{1}{w} + \frac{1}{h} \right), \quad (4)$$

其中  $\theta$  为流体 - 气体界面与壁面的平衡接触角,  $w, h$  分别为毛细管剖面矩形的宽度和高度,  $\sigma$  为液 - 气表面张力系数. 环 - 板毛细缝隙高度  $h$  在纳米级尺寸范围,  $w$  在厘米级范围, 满足  $h \ll w$ , 因此:

$$P_{\text{cap}} = P_{\text{vap}} - P_{\text{poly}} = \frac{2\sigma \cos \theta}{h}. \quad (5)$$

由 Amonton 定律可知, 一个物体在另一个物体表面滑动所产生的摩擦力与宏观接触面积无关, 与接触面上法向加载成正比. 公式表达为

$$f = \mu F_N, \quad (6)$$

其中摩擦力和法向压力的比值  $\mu$  代表摩擦系数, 静摩擦系数表示为  $\mu_s$ , 大小因材料表面特性不同而不同. 假设物体表面实际接触面积为  $A_{\text{real}}$ , 从微观上来说, 由于接触表面存在不同程度的微粗糙体,  $A_{\text{real}}$  小于宏观接触面积. 考虑到介质流体的流动特性, 认为流体与硅表面充分接触, 实际接触面积即为表观接触面积. 在实际接触面积内, 静摩擦力和  $A_{\text{real}}$  的比值可以定义为平均屈服应力:

$$\tau_s = f_s / A_{\text{real}}. \quad (7)$$

Bowden 和 Tabor<sup>[12]</sup> 提出了一种简单的现象学形式, 如果屈服应力随着局域压强  $P = F_N / A_{\text{real}}$  成线性关系, 则  $\tau_s$  可以表示为

$$\tau_s = \tau_0 + \alpha P, \quad (8)$$

从而可得静摩擦力

$$f_s = \tau_0 A_{\text{real}} + \alpha P A_{\text{real}} = \tau_0 A_{\text{real}} + \alpha F_N, \quad (9)$$

静摩擦力系数

$$\mu_s = \alpha + \tau_0 / P. \quad (10)$$

由静摩擦力系数表达式可以看出, 当  $P$  是稳定压强或者远大于  $\tau_0$  的时候,  $\mu_s$  与法向加载、宏观接触面积无关, 其中  $\tau_0$  代表两个接触表面之间的黏附效应. 环 - 板毛细缝隙中流体与硅表面的法向加载主要由较大的毛细负压产生,  $\tau_0 / P$  数值较小, 对于特定材料表面将静摩擦系数设为恒值.

设介质流体可以润湿硅表面, 即平衡接触角为锐角, 在毛细缝隙中介质流体界面形成凹型弯月面, 并且流体与上下硅壁面的接触角相等. 凸出环的有

效宽度需要满足抵抗介质流体向内流动, 设内压力  $F_{\text{in}}$  最小, 即标准大气压强所对应的压力, 数值上为 0, 而腔室气体压强达到最大, 此时介质流体静止于凸出环与基板形成的环形毛细缝隙中, 存在三种力的平衡关系. 而介质流体与凸出环和基板间的表面最大静摩擦力的方向决定于内压力、毛细力和腔室气体压强之间的关系.

第一种情况: 毛细力和介质内部所受压力之和大于外界最大气体压强对弯月界面产生的压力. 流体在毛细力和内压力驱动下有向凸出环外流出的趋势, 若要保证流体刚好静止, 则待计算的最大静摩擦力方向同外界压强方向一致指向抗蚀剂流体内部:

$$F_{\text{Ca}} + F_{\text{in.min}} = F_{\text{comp.max}} + f_{s.max}, \quad (11)$$

其中  $F_{\text{in.min}} = 0$ , 故有:

$$F_{\text{Ca}} = F_{\text{comp.max}} + f_{s.max}. \quad (12)$$

第二种情况: 毛细力和内压力小于外界最大气体压强对界面产生的压力. 此时静摩擦力方向指向凸出环外侧

$$F_{\text{comp.max}} = f_{s.max} + F_{\text{Ca}} + F_{\text{in.max}}, \quad (13)$$

也即

$$F_{\text{comp.max}} = f_{s.max} + F_{\text{Ca}}. \quad (14)$$

第三种情况: 毛细力、内压力和外界最大气体压强对界面产生的压力刚好相等. 此时流体静止而且与壁面之间不存在水平方向的摩擦力

$$F_{\text{comp.max}} = F_{\text{Ca}}. \quad (15)$$

在实际环境中, 很难保证绝对没有摩擦力的极限情况, 因而忽略第三种情况.  $A$  表示介质流体与凸出环面的接触面积, 假设凸出环宽度为  $L$ , 掩模板的半径为  $R$ , 则

$$A = 2\pi RL - \pi L^2, \quad (16)$$

$\eta$  是介质流体的动力黏度,  $\theta$  为介质流体和环 - 板平衡接触角,  $F_{\text{Ca}}$  为毛细力大小,  $F_{\text{comp.max}}$  是外界最大压强对弯月面产生的压力,  $F_{\text{in}}$  表示凸出环内部的压强所产生的压力,  $f_{s.max}$  表示流体与凸出环和基板表面产生的最大静摩擦力. 其中毛细力为

$$F_{\text{Ca}} = 2\sigma \cdot l_{\text{per}} \cdot \cos \theta. \quad (17)$$

$l_{\text{per}}$  表示流体弯月界面与壁面的接触线长

$$l_{\text{per}} = 2\pi R. \quad (18)$$

由之前数值仿真结果知道对于  $F_{in}$  来说, 随着掩膜板匀速下压,  $F_{in}$  近似线性增大, 为了简化, 可以假设:

$$F_{in} = bt, \quad (19)$$

$b$  是常数, 表示内部压力增大趋势

$$F_{in.min} = 0. \quad (20)$$

由于介质流体在凸出环和基板之间形成纳米级高度液桥, 当其和壁面接触角小于  $90^\circ$  时, 介质流体对硅壁面表现出亲水性<sup>[13,14]</sup>, 将产生负的 Laplace 压强, 从而产生垂直于接触面的黏附力, 使环 - 板趋向于黏附在一起, 此黏附力作为表面静摩擦力的法向载荷的一部分, 在水平方向毛细力、内压力和外界气体压强驱动下产生表面静摩擦力. 可以将静摩擦力表示成更一般的形式, 设定介质流体和环 - 板间表面的静摩擦系数为  $\mu_s$ , 法向压力表示为  $F_N$ , 用  $f_1$  表示介质流体与环板毛细缝隙的凸出环硅表面的最大静摩擦力, 则有

$$f_1 = \mu_s \cdot F_N, \quad (21)$$

其中法向加载为掩膜板重力、由 Laplace 压强引起的法向黏附力之和, 即

$$\begin{aligned} F_N &= G_m + (P_{comp.max} - P_{poly}) \cdot A \\ &= G_m + P_{cap} \cdot A, \end{aligned} \quad (22)$$

掩膜板重力  $G_m = \rho_{si}g\pi R^2 h_{si}$ ,  $\rho_{si}$  和  $h_{si}$  分别是掩膜板的密度和厚度. 由于介质流体与环板毛细缝隙的上表面即凸出环、下表面即基板均接触, 介质流体与基板接触表面的法向载荷要比与凸出环接触表面的法向载荷多出介质流体薄膜的重力, 由于薄膜厚度极小 ( $h < 500$  nm), 其重力与硅模板重力及黏附力相比可以忽略, 总的静摩擦力:

$$f_{s.max} = 2f_1. \quad (23)$$

假定外界气压增大趋势表示为

$$P_{comp} = at, \quad (24)$$

单位为 Pa,  $a$  为压强增大系数表示气压增大速率, 为正的常数. 因此:

$$P_{comp.max} = at_{max}. \quad (25)$$

将以上各式分别代入前两种情况的力平衡关系式中, 分别考虑其成立条件可以得到:

$$\sigma \cdot 4\pi R \cos \theta$$

$$\begin{aligned} &= at_{max} \cdot 2\pi Rh + 2\mu_s \cdot [G_m + P_{cap} \cdot (2\pi RL - \pi L^2)] \\ &\quad (F_{Ca} > F_{comp.max}), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} &at_{max} \cdot 2\pi Rh \\ &= \sigma \cdot 4\pi R \cos \theta + 2\mu_s \cdot [G_m + P_{cap} \cdot (2\pi RL - \pi L^2)] \\ &\quad (F_{Ca} < F_{comp.max}). \end{aligned} \quad (27)$$

对 (26) 式进一步化简得到:

$$AL^2 + BL + C = 0, \quad (28)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \pi, \quad B = -2\pi R, \\ C &= \frac{4\sigma\pi R \cos \theta - 2at_{max}\pi Rh}{2\mu_s P_{cap}} - \frac{G_m}{P_{cap}}. \end{aligned}$$

对 (27) 式进一步化简得到:

$$A'L^2 + B'L + C' = 0, \quad (29)$$

其中

$$\begin{aligned} A' &= \pi, \quad B' = -2\pi R, \\ C' &= \frac{2at_{max}\pi Rh - 4\sigma\pi R \cos \theta}{2\mu_s P_{cap}} - \frac{G_m}{P_{cap}}. \end{aligned}$$

由 (28) 式得到:

$$\begin{aligned} L_{1,2} &= \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (30) \\ &\left( B^2 - 4AC \geq 0, \text{ 即 } \mu_s \geq \frac{2\sigma h \cos \theta - at_{max}h^2}{2\sigma R \cos \theta + \rho_{si}gRh_{si}h}, \right. \\ &\quad \left. \text{且 } \frac{2\sigma \cos \theta}{h} > at_{max} \right). \end{aligned}$$

由 (29) 式得到:

$$\begin{aligned} L_{3,4} &= \frac{-B' \pm \sqrt{B'^2 - 4A'C'}}{2A'}, \quad (31) \\ &\left( B'^2 - 4A'C' \geq 0, \text{ 即 } \mu_s \geq \frac{at_{max}h^2 - 2\sigma h \cos \theta}{2\sigma R \cos \theta + \rho_{si}gRh_{si}h}, \right. \\ &\quad \left. \text{且 } \frac{2\sigma \cos \theta}{h} < at_{max} \right) \end{aligned}$$

因此可以得到:

$$L_{1,2} = R \pm \sqrt{\frac{R(R\mu_s - h)}{\mu_s} + \frac{Rh(\rho_{si}gRh_{si}\mu_s + at_{max}h)}{2\mu_s\sigma \cos \theta}}, \quad (32)$$

$$L_{3,4} = R \pm \sqrt{\frac{R(R\mu_s + h)}{\mu_s} + \frac{Rh(\rho_{si}gRh_{si}\mu_s - at_{max}h)}{2\mu_s\sigma \cos \theta}}. \quad (33)$$

显然满足  $0 < L < R$ , 故有效长度  $L$  为

$$L_1 = R - \sqrt{\frac{R(R\mu_s - h)}{\mu_s} + \frac{Rh(\rho_{si}gRh_{si}\mu_s + at_{max}h)}{2\mu_s\sigma \cos \theta}},$$

$$\left( \mu_s \geq \frac{2\sigma h \cos \theta - at_{\max} h^2}{2\sigma R \cos \theta + \rho_{\text{si}} g R h_{\text{si}} h} \text{ 且 } \frac{2\sigma \cos \theta}{h} > at_{\max} \right), \quad (34)$$

$$L_3 = R - \sqrt{\frac{R(R\mu_s + h)}{\mu_s} + \frac{Rh(\rho_{\text{si}} g R h_{\text{si}} \mu_s - at_{\max} h)}{2\mu_s \sigma \cos \theta}}$$

$$\left( \mu_s \geq \frac{at_{\max} h^2 - 2\sigma h \cos \theta}{2\sigma R \cos \theta + \rho_{\text{si}} g R h_{\text{si}} h} \text{ 且 } \frac{2\sigma \cos \theta}{h} < at_{\max} \right). \quad (35)$$

#### 4 掩膜板凸出环临界宽度影响参数分析

对于前述两种情况, 分析平衡条件下, 掩膜板凸出环临界宽度  $L$  随表面张力  $\sigma$ , 湿润角 (小于  $90^\circ$ )  $\theta$  和毛细缝隙高度即介质流体薄膜厚度  $h$  变化的趋势. 图 8 为  $L_1$  随表面张力  $\sigma$  的变化曲线.

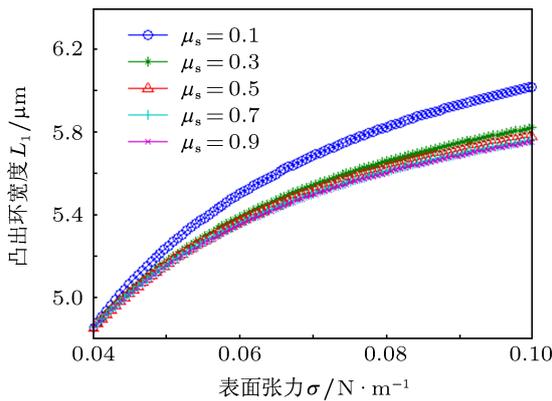


图 8  $L_1$  随表面张力  $\sigma$  的变化曲线

结果为假定掩膜板半径  $R = 5.08 \times 10^{-2}$  m, 湿润角  $\theta$  为  $60^\circ$ , 介质流体薄膜厚度  $h = 10^{-7}$  m,  $a = 2 \times 10^5$ ,  $t_{\max} = 2$  s, 由条件  $2\sigma \cos \theta / h > at_{\max}$  可得  $\sigma > 0.04$  N/m, 由  $\mu_s \geq (2\sigma h \cos \theta - at_{\max} h^2) / (2\sigma R \cos \theta + \rho_{\text{si}} g R h_{\text{si}} h)$  得  $\mu_s > 0$ . 取单晶硅密度  $\rho_{\text{si}} = 2.33 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,  $g = 9.8$  N/kg,  $h_{\text{si}} = 1$  mm. 可以看出, 在满足毛细力主导驱动条件下, 掩膜板凸出环宽度随着气液界面表面张力的增大而增大, 而随着静摩擦系数的增大而减小, 在静摩擦系数为 0.3—0.9 时宽度大小及变化趋势近似, 而静摩擦系数为 0.1 时, 其宽度需求明显较大.

对于  $L_3$  与表面张力的关系, 由条件  $L_3 > 0$ , 其余参数同上, 可以得到  $\mu_s < (0.04 - \sigma) / 1.16$ , 同时结合  $\mu_s \geq (at_{\max} h^2 - 2\sigma h \cos \theta) / (2\sigma R \cos \theta + \rho_{\text{si}} g R h_{\text{si}} h)$

可以得到  $\mu_s$  和  $\sigma$  的关系:

$$\frac{4 \times 10^{-9} \sigma - 10^{-7} \sigma}{5.08 \times 10^{-2} \sigma + 1.16 \times 10^{-7}} \leq \mu_s < \frac{0.04 - \sigma}{1.16}. \quad (36)$$

又由条件  $2\sigma \cos \theta / h < at_{\max}$  知  $0 < \sigma < 0.04$  N/m, 而在此  $\sigma$  取值范围内,  $(4 \times 10^{-9} \sigma - 10^{-7} \sigma) / (5.08 \times 10^{-2} \sigma + 1.16 \times 10^{-7}) < (0.04 - \sigma) / 1.16$  恒满足, 因此, 静摩擦系数  $\mu_s$  的取值取决于  $\sigma$ ,  $\sigma$  不同, 静摩擦系数的取值也存在一定的限制, 否则出现  $L_3 < 0$  情况. 图 9 中的阴影部分即为对于  $L_3$  选定以上参数时, 静摩擦系数受限于表面张力的取值范围, 从图中可以看出, 静摩擦系数的下限在表面张力取值范围内接近于 0.

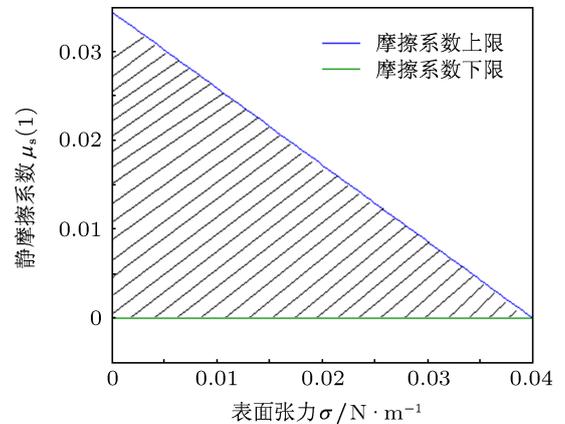


图 9  $\mu_s$  在满足  $L_3$  的表面张力取值时的取值范围

图 10 为  $L_1$  随接触角  $\theta$  (单位为弧度) 变化而变化的曲线图.  $\sigma = 0.06$  N/m,  $h = 10^{-7}$  m, 在保持其余参数不变的情况下, 由  $2\sigma \cos \theta / h > at_{\max}$  得到  $\cos \theta > 1/3$  即  $\theta < \arccos(1/3)$ .

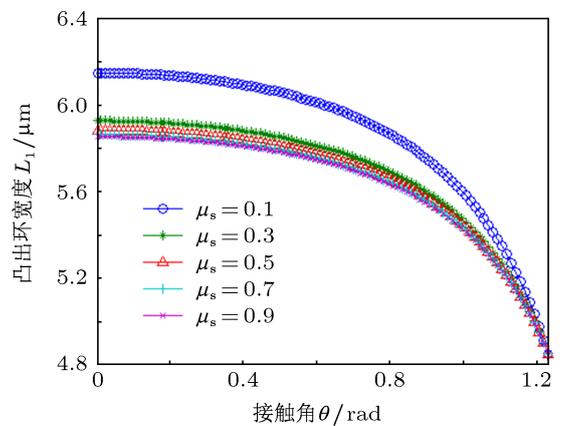


图 10  $L_1$  随接触角  $\theta$  (单位为弧度) 变化而变化的曲线图

可以看出, 随着接触角的增大, 对于不同摩擦系数值, 凸出环宽度  $L_1$  逐渐减小, 并且接触角越大,

设计宽度减小速度越快. 随着静摩擦系数的增大, 宽度也有所减小.

对于  $L_3$  与接触角之间的关系, 由条件  $L_3 > 0$ , 其余参数同上, 可以得到  $\mu_s < (0.2032 - 0.6096 \cos \theta) / 5.89$  结合  $\mu_s \geq (at_{\max} h^2 - 2\sigma h \cos \theta) / (2\sigma R \cos \theta + \rho_{\text{sig}} R h_{\text{si}} h)$ , 可以得到:

$$\begin{aligned} & \frac{4 - 12 \cos \theta}{6.096 \times 10^6 \cos \theta + 116} \\ & \leq \mu_s < \frac{0.2032 - 0.6096 \cos \theta}{5.89}. \end{aligned} \quad (37)$$

由条件  $2\sigma \cos \theta / h < at_{\max}$  知  $0 < \cos \theta < 1/3$ , 即  $\arccos(1/3) < \theta < \pi/2$ , 而  $\theta$  在此取值范围内,  $(4 - 12 \cos \theta) / (6.096 \times 10^6 \cos \theta + 116) < (0.2032 - 0.6096 \cos \theta) / 5.89$  恒满足, 因此, 静摩擦系数  $\mu_s$  的取值取决于  $\theta$ ,  $\theta$  不同, 静摩擦系数的取值也有一定的限制, 否则会出现  $L_3 < 0$  的情况. 图 11 中的阴影部分即为对于  $L_3$  选定以上参数时, 静摩擦系数受限于接触角余弦的取值范围. 从图中可以看出, 静摩擦系数的下限在接触角余弦取值范围内接近于 0.

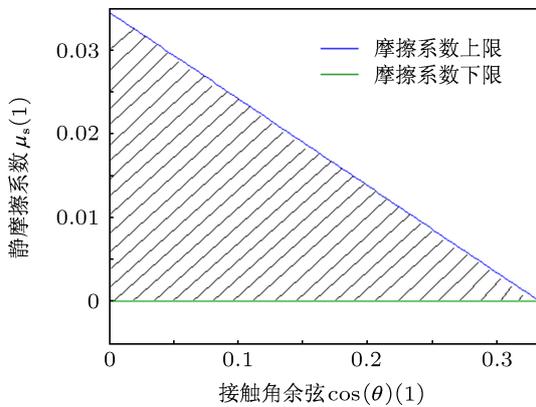


图 11  $\mu_s$  在满足  $L_3$  的接触角余弦取值时的取值范围

对于  $L_1$  与环板毛细缝隙高度即介质流体薄膜厚度的关系, 取  $\sigma = 0.06 \text{ N/m}$ ,  $\theta = 60^\circ$ , 则由  $2\sigma \cos \theta / h > at_{\max}$  可得  $h < 150 \text{ nm}$ , 由  $\mu_s \geq (2\sigma h \cos \theta - at_{\max} h^2) / (2\sigma R \cos \theta + \rho_{\text{sig}} R h_{\text{si}} h)$  并结合  $L_1 > 0$  的条件可以求得:

$$\begin{aligned} & \frac{0.06h - 4 \times 10^5 h^2}{0.3048 \times 10^{-2} + 1.16h} \\ & \leq \mu_s < \frac{0.3048 \times 10^{-2} - 20.32 \times 10^3 h}{5.8928 \times 10^{-2}} \end{aligned} \quad (38)$$

而在  $0 < h < 150 \text{ nm}$  范围内,  $(0.06h - 4 \times 10^5 h^2) / (0.3048 \times 10^{-2} + 1.16h) < (0.3048 \times 10^{-2} - 20.32 \times 10^3 h) / 5.8928 \times 10^{-2}$  恒成立, 因此

静摩擦系数  $\mu_s$  的取值取决于  $h$ ,  $h$  不同, 静摩擦系数的取值也有一定的限制, 否则会出现  $L_3 < 0$  情况. 图 12 的阴影部分即为对于  $L_1$  选定以上参数时, 静摩擦系数受限于环板毛细缝隙高度的取值范围. 从图中可以看出, 静摩擦系数的下限在高度取值范围内接近于 0. 同理, 图 13 的阴影部分表示  $L_3$  在满足要求的条件下, 静摩擦系数受限于毛细缝隙高度的取值域. 图 14 显示了在环 - 板之间毛细高度满足  $300 \text{ nm} < h < 500 \text{ nm}$ , 静摩擦系数分别取 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 时,  $L_3$  随  $h$  变化的曲线图. 其中所取静摩擦系数  $\mu_s$  均满足:

$$\begin{aligned} & \frac{4 \times 10^5 h^2 - 0.06h}{0.3048 \times 10^{-2} + 1.16h} \\ & \leq \mu_s < \frac{20.32 \times 10^3 h - 0.3048 \times 10^{-2}}{5.8928 \times 10^{-2}}. \end{aligned} \quad (39)$$

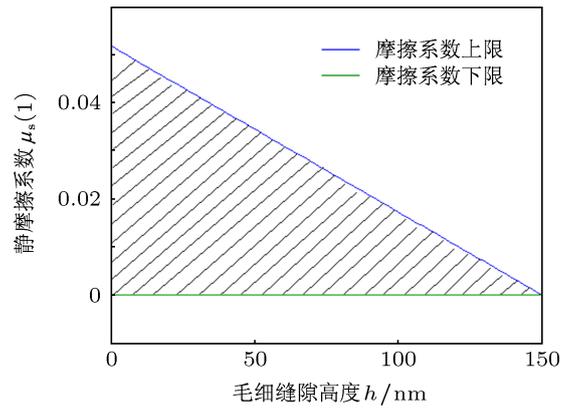


图 12  $\mu_s$  在满足  $L_1$  的环板毛细缝隙高度取值时的取值范围

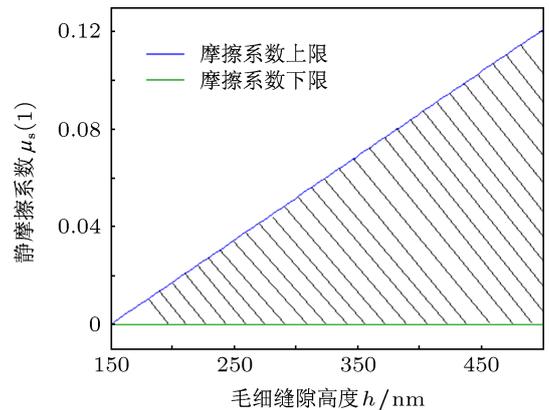


图 13  $\mu_s$  在满足  $L_3$  的环板毛细缝隙高度取值时的取值范围

从图 14 可以看出, 在各个参数均满足要求的情况下, 随着毛细高度的增加, 掩模板凸出环宽度  $L_3$  也随之增加, 并且静摩擦系数越大, 所需宽度越小. 这说明了当毛细高度增加的时候, 毛细力减弱,

此时如果需要达到平衡, 必须增加静摩擦力以抵抗外界腔室高压气体对于介质流体向内的挤压, 因此凸出环设计宽度需要增大.

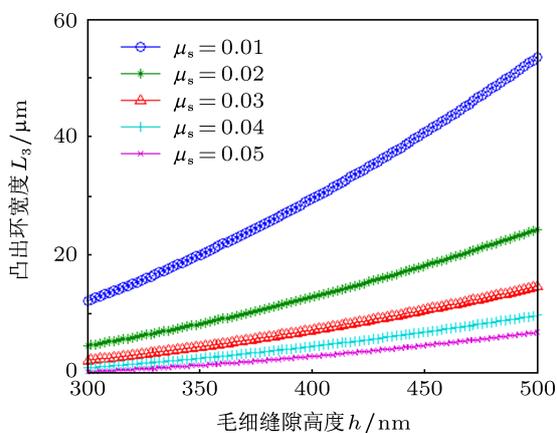


图 14  $L_3$  随环板毛细缝高度变化而变化的曲线图

以上分析对于静摩擦系数的选择均满足方程具实根的条件. 当环 - 板毛细缝的高度及介质流体的表面特性满足第一种情况的条件时, 此时毛细驱动力有驱使流体向外流出的趋势, 摩擦力和腔室气体压强均有抵抗毛细驱动力的作用, 如果要达到阻隔气体的效果, 摩擦力只要满足小于或者等于凸出环宽度为  $L_1$  时所对应的摩擦力即可, 因此掩膜

板凸出环有效宽度  $L_{1,eff} \leq L_1$ . 当环 - 板毛细缝高度及介质流体表面特性满足第二种情况时, 毛细驱动力小于外界腔室最大气压所产生的压力, 流体有被压入掩膜板腔内的趋势, 摩擦力和毛细驱动力同时抵抗这种趋势. 要实现气体隔离效果, 需要的摩擦力只要满足大于或者等于掩膜板凸出环宽度  $L_3$  所对应的摩擦力即可, 此时有效宽度  $L_{3,eff} \geq L_3$ .

## 5 结论

针对压缩式气压纳米压印工艺中可能会由于气体压缩过程推动施压气体进入掩膜板基板间隙而造成图形转移的气泡干扰问题, 提出在掩膜板周边制备高出掩膜板转移图形高度的凸出环结构, 其与转移介质流体黏合形成掩膜板 - 介质 - 基板闭合结构, 实现与施压气体隔离的方法. 通过理论解析分析, 得到在满足两种参数集条件下的掩膜板凸出环临界宽度表达  $L_1$  和  $L_3$ , 并对凸出环临界宽度  $L_1$ ,  $L_3$  与介质流体表面特性和毛细缝尺寸等参数的依赖关系做了详细的分析, 为压缩式气压纳米压印带凸出环掩膜板的制备提供了重要的理论基础, 对压缩式纳米压印试验系统的研究具有积极的实验指导.

[1] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 3114  
 [2] Chen L M, Guo Y F, Guo X, Tang W H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6511 (in Chinese) [陈雷明, 郭艳峰, 郭熹, 唐为华 2006 物理学报 **55** 6511]  
 [3] Wang Q, Hiroshima H 2010 *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** 06GL04  
 [4] Chang J H, Yang S Y 2003 *Microsys. Technol.* **10** 76  
 [5] Hiroshima H, Atobe H, Wang Q, Youn S W 2010 *Jpn. J. Appl. Phys.* **49** 06GL01-1  
 [6] Fuchs A, Bender M, Plachetka U, Hermanns U, Kurz H 2005 *J. Vac. Sci. Technol. B* **23** 2925  
 [7] Komvopoulos K 1996 *Wear* **200** 305  
 [8] Komvopoulos K 2003 *J. Adhes. Sci. Technol.* **17** 477  
 [9] Xiong Y, Zhang X J, Zhang X H, Wen S Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58**

1826 (in Chinese) [熊毅, 张向军, 张晓昊, 温诗铸 2009 物理学报 **58** 1826]  
 [10] Fan H, Gao Y X 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 5904  
 [11] Zhang W M, Meng G 2005 *J. Mech. Strength* **27** 855 (in Chinese) [张文明, 孟光 2005 机械强度 **27** 855]  
 [12] He G, Muser M H, Robbins M O 1999 *Science* **284** 1650  
 [13] Cao X P, Jiang Y M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2202 (in Chinese) [曹晓平, 蒋亦民 2005 物理学报 **54** 2202]  
 [14] Qian L M, Luo J B, Wen S Z, Xiao X D 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2247 (in Chinese) [钱林茂, 雒建斌, 温诗铸, 萧旭东 2000 物理学报 **49** 2247]

# Analysis of gas isolation by prominent O-ring on the mold in compressional gas cushion press nanoimprint lithography\*

Li Tian-Hao Zheng Guo-Heng Liu Chao-Ran Xia Wei-Wei  
Li Dong-Xue Duan Zhi-Yong<sup>†</sup>

(Physical Engineering College of Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(Received 29 August 2012; revised manuscript received 25 October 2012)

## Abstract

Nanoimprint lithography has the advantages of low-cost, high-throughput, ultrahigh resolution, which could make it one of the next generation lithography technologies. However, the bubble-defect is always a problem which may damage the duplicate patterns, so it is an urgent issue to propose effective solutions. A novel methods, which is suitable for compressional gas cushion press nanoimprint lithography in gas atmosphere and could prevent gas from entering the gap between mold and substrate, is presented here. The annular plate capillary gap formed between the smooth substrate and the prominent O-ring processed by etching the original mold would be filled with the fluid medium. The capillary liquid bridge between the O-ring and substrate produces a closed cavity. The stiction induced by adhesion force and the capillary force induced by air-liquid surface tension could resist the compressed gas and avoid the bubble defect. The effective widths of the prominent O-ring, which are different for various fluids with different surface properties, are deduced by theory analysis. The analysis results provide theoretical basis for the preparation of the mold.

**Keywords:** nanoimprint lithography, prominent O-ring, capillary liquid bridge, stiction

**PACS:** 81.16.Nd, 81.16.Rf, 85.85.+j

**DOI:** 10.7498/aps.62.068103

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51175479).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: duanzhiyong@zzu.edu.cn