

## 假塑性流体纳米压印中影响填充度的因素\*

夏委委 郑国恒 李天昊 刘超然 李冬雪 段智勇†

(郑州大学物理工程学院, 郑州 450001)

(2013年4月17日收到; 2013年6月4日收到修改稿)

作为新一代的半导体加工工艺, 直接金属纳米压印以其步骤简单、成本低等显著优点得到迅速的发展. 然而目前纳米压印中所采用的转移介质在流动状态下为牛顿流体, 牛顿流体的黏度是一个常量, 而假塑性流体具有黏度随着剪切速率的增大而逐渐减小的趋势, 更适用于纳米压印. 综合假塑性流体的剪切稀化特性以及直接金属图形转移的优点, 将不同大小的金属纳米粒子分散在基液中制成假塑性金属纳米流体并将其作为转移介质用于纳米压印中. 基于假塑性流体的 Carreau 流变模型利用 COMSOL 软件仿真分析金属纳米粒子假塑性流体参数集对图形压印转移的影响, 完成假塑性流体与牛顿流体分别作为转移介质实现图形转移的对比分析. 同时还得到了压印过程中影响填充度的各个因素, 如流体黏度、施加压强、掩模板移动速度等. 研究工作为金属纳米粒子假塑性流体制备以及纳米压印流程的设计提供了理论基础.

关键词: 纳米压印, 假塑性流体, 填充度

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

DOI: 10.7498/aps.62.188105

## 1 引言

在半导体加工工艺中, 随着半导体器件特征尺寸的减小, 传统的光刻技术已经很难满足小尺寸器件制备的需要, 因此新一代的半导体加工技术的出现是必然的. 1995 年, Chou 等<sup>[1]</sup>提出了纳米压印 (NIL) 的思想, 纳米压印指的是通过掩模板利用转移介质将图像转移到基板上, 主要包含以下几个步骤: 压印、脱模、刻蚀、淀积、容脱等. 相比于传统的光刻技术, 纳米压印因其生产效率高、原理简单、图形转移精度高等显著优势得到了迅速发展. 自纳米压印提出以来, 国内外的学者已经开展了各个方向的研究, 例如掩模板的制造<sup>[2]</sup>、光刻胶的选取<sup>[3]</sup>以及压印方式的优化等等. 目前实现纳米压印的方式有很多: 热塑压印<sup>[4]</sup>、紫外压印<sup>[5]</sup>、超声波纳米压印<sup>[6]</sup>、直接金属图形纳米压印<sup>[7]</sup>等等. 从 2003 年到 2011 年每一版世界半导体蓝图都将纳米压印作为图形转移的支撑技术之一. 然而传统的纳米压印在脱模结束后还有刻蚀、淀积、容

脱等步骤, 这在一定程度上影响到了图形转移精度以及批量生产的效率.

## 1.1 直接金属图形转移

金属图形直接转移是纳米压印技术的新方法, 工艺步骤少, 产量高. 目前已报道三种技术方案, Chou 等<sup>[8]</sup>在基片上淀积一层金属薄膜, 利用高功率激光快速熔融金属层, 将掩模板压入后分离实现金属图形直接转移. 这种方法需要大功率的激光器而且难以实现大面积晶圆加工. Chen 等<sup>[9]</sup>利用线条极为锐利的掩模板在淀积有金属薄膜的基片上直接压出图形, 为缓冲压力对掩模板和基板的损毁, 需要在金属层下先旋涂一层弹性膜. 这种方法对掩模板物理特性要求极高, 掩模板制备难度大、使用寿命短, 而且金属层下面的弹性膜很难去除. Yao 等<sup>[10]</sup>对金属薄膜压印直接成形相关参数如温度、金属膜厚、模板几何特征、压印工艺影响都做了较详细的研究. Seung 等<sup>[11]</sup>利用分子自组装膜包裹金属纳米粒子作为转移介质, 压印完成再升温到 130 °C—140 °C 自组装膜蒸发, 实现金属颗粒

\* 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

向体金属连线的转变. 相比较而言, Seung 等的压印技术优于前两种方法.

## 1.2 假塑性流体和 Carreau 模型

目前纳米压印中所采用的介质流为牛顿流体<sup>[12]</sup>, 牛顿流体符合牛顿内摩擦定律, 它的黏度是一个常量不随剪切速率的变化而发生改变, 黏度太大不利于微细间隙的填充, 黏度太小不利于压印结束后转移图形的固化, 因此确定一个较为合适的黏度范围既能保证压印过程中图形的填充度又能保证压印结束后图形不出现坍塌是比较困难的. 如果有一种流体, 静止或者流动较弱时黏度较大, 而随着流动性的增强黏度逐渐变小, 将这种流体作为转移介质用于纳米压印中就可以很好地解决这一技术难题. 假塑性流体恰好可以满足以上的条件. 纳米压印过程中掩模板向转移介质施压, 导致流体介质剪切速率发生改变, 而假塑性流体在剪切速率发生变化时会产生流变效应, 利用这种流变效应可以改善纳米压印技术中图形转移的精度.

假塑性流体是非牛顿流体的一种, 它的黏度与剪切速率有着密切的关系, 图 1 为假塑性流体的流动曲线图, 揭示了流体黏度随剪切速率变化的规律: 在  $\gamma$  很低的情况下, 剪切速率与切应力近似成正比, 即黏度不随  $\gamma$  变化, 这个黏度称为零剪切黏度, 用  $\eta_0$  表示, 这一范围称为第一牛顿区. 零剪切黏度  $\eta_0$  是一个重要材料常数, 它与材料的很多因素有关, 如材料的平均分子量、黏流活化能等等, 反映了材料的最大弛豫时间. 随着  $\gamma$  的增大, 黏度随着剪切速率的增大而减小, 这一区域称为剪切稀化区或者假塑区. 在更高的  $\gamma$  范围内, 假塑性流体的黏度保持恒定不再随  $\gamma$  的增大而减小, 这一黏度称为无穷剪切黏度, 即  $\eta_\infty$ , 本文取  $\eta_\infty$  为零. 这一区域称为第二牛顿区, 在实际中这一区域范围通常很难达到.

目前描述非牛顿流体流变行为的主要有两种模型: 幂律模型<sup>[13]</sup> 和 Carreau 流变模型<sup>[14]</sup>. 本文选用 Carreau 流变模型来表征假塑性金属纳米流体的流动性. Carreau 流变模型是 Carreau-Yasuda 模型的一种特殊形式, 该模型可以描述流体从牛顿区到非牛顿区的变化, 适用范围宽, 它的本构方程如下:

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty)[1 + (\lambda\gamma)^2]^{(n-1)/2}, \quad (1)$$

在上式中  $\eta_0$  为零剪切黏度,  $\eta_\infty$  为无穷剪切黏度,  $\lambda$  是单位为秒的材料体系的特征常数, 称为材料特征

时间,  $\gamma$  为流体的剪切速率,  $n$  为无量纲的流变指数, 当  $n$  等于 1 时为牛顿流体,  $n$  小于 1 为假塑性流体.  $n$  偏离 1 的程度越大表示流体的假塑性越强.

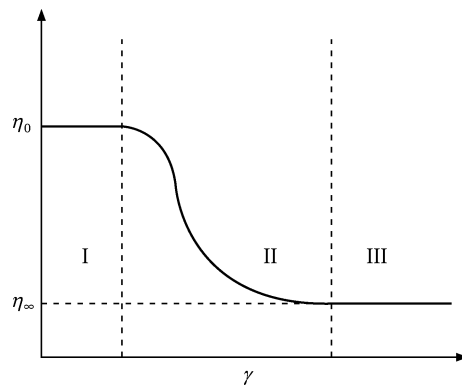


图 1 假塑性流体流动曲线图

综合假塑性流体的剪切稀化特性以及直接金属图形转移的优点提出了一个新的想法. 将不同大小的金属纳米粒子分散在基液中制成假塑性金属纳米流体并将其作为转移介质用于纳米压印中. 为了证明压印过程中假塑性流体的填充度优于牛顿流体, 本文采用 COMSOL 有限元仿真软件进行计算, 并得到了压印过程中影响填充度的因素.

## 2 建模

基于有限元方法, 本文利于 COMSOL 软件来观察不同性质的转移介质对于填充度的影响. 移动边界可以用来模拟掩模板向下移动的过程, 水平集方法则可以追踪聚物流的变形界面. 这些条件使得 COMSOL 具有很大的技术优势来完成纳米压印过程的仿真. 图 2 是纳米压印工艺中的压印过程基本流程图, 2(a) 是压印开始的时刻, 2(b) 是经一段时间后的压印效果图. 从图中可以看出, 该模型具有良好的对称性, 为了简便计算, 模型采用轴对称方法, 如图 3 所示. 这种简化在保证边界形状精确度的同时减少了计算时间.

图 3 显示的为简化后的模型, 其中区域 I 填充的是转移介质流, 区域 II 表示掩模板上的腔穴. 由于在压印开始时刻掩模板与基板的对准是在真空环境下进行的, 掩模板上的腔穴、凸出环与转移介质流之间形成密闭空间<sup>[15]</sup>, 即区域 II 在初始状态下是真空. 掩模板向下移动的过程中对介质流有一个挤压的作用, 介质流由区域 II 流向区域 I 将其填充. 图 3(a) 表示未开始压印时的情况, 图 3(b) 是在

条件为  $\eta_0$  取 166 Pa·s,  $\lambda$  取  $10^{-3}$  s,  $n$  取 0.6 的情况下经过 4 s 之后的压印效果图, 红色部分代表已经被填充的区域, 蓝色部分未被填充, 可以用红色部分在区域 II 中所占的百分比来表示转移介质在腔穴中的填充度, 百分比越大说明填充效果越好、图

形转移的精度越高. 在以往的研究中都是将转移介质作为粘性牛顿流体<sup>[16]</sup> 或者非线性弹性固体材料<sup>[17,18]</sup> 来对待的, 而在本文中转移介质分别为假塑性流体和牛顿流体.

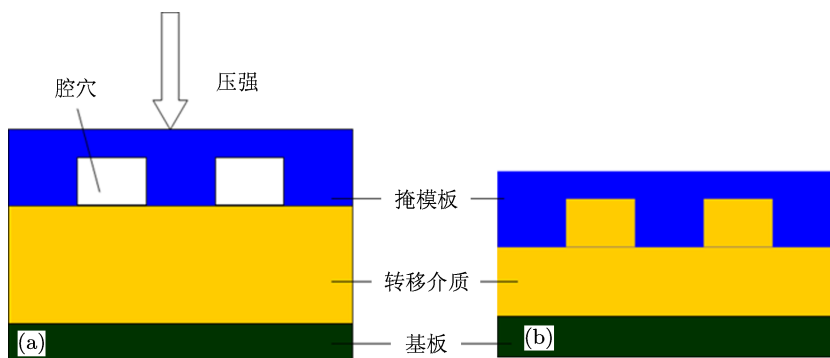


图 2 压印基本流程图

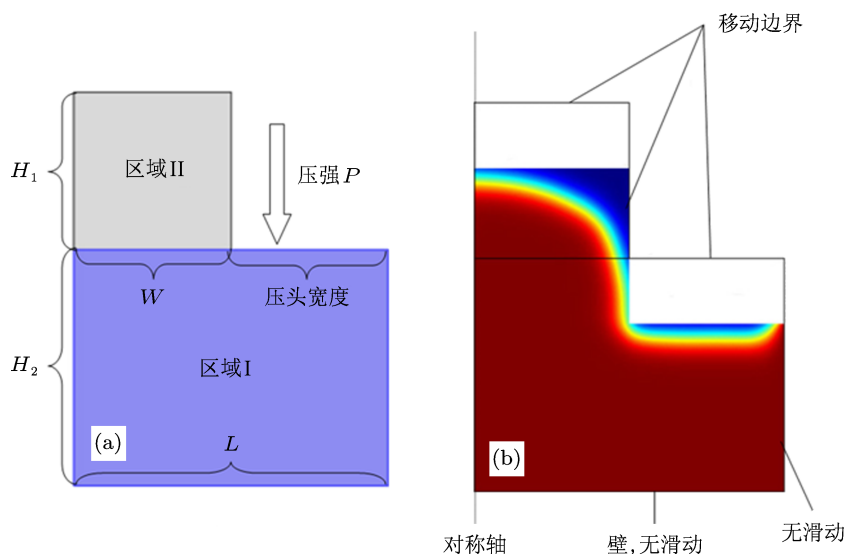


图 3 仿真模型图

仿真系统有四个参数组成: 转移介质黏度  $\eta$ , 掩模板上施加的压强  $P_0$ , 腔穴高度  $H_1$ , 掩模板下移速度  $V$ . 分别改变这些参数来观察腔穴内的填充度可以得到影响填充效果的因素以及这些因素是如何影响填充度的, 从而优化参数集为实验奠定基础.

### 3 仿真结果与讨论

压强、黏度、腔穴的高度以及掩模板移动速度等参数不仅会影响到填充速度而且直接影响了图形转移精度, 因此研究这些参数如何影响填充度

是非常必要的.

#### 3.1 转移介质的黏度

与牛顿流体不同, 假塑性流体的黏度是随着剪切速率的变化而发生改变的, 即黏度是剪切速率的函数. 由方程 1 知, 有 4 个参量会影响到介质流的黏度, 其中无穷剪切速率黏度在本文中取 0 将不予考虑. 考虑黏度对填充度的影响可以转化成考虑其他三个参数对填充效果的影响.

图 4 反映的是初始剪切速率黏度对填充度的影响, 对牛顿流体而言, 初始剪切速率黏度即为流

体的黏度. 保持  $\lambda$  为  $10^{-3}$  s,  $n$  为 0.6 不变. 从图 4(b) 可以看出黏度较小的流体在压印的时候更具有优势. 在图 4(a) 中较低初始黏度的流体填充效果要明显优于高黏度的流体, 对于初始黏度较低的流体, 在压印过程的任一时刻流体的黏度都会小于初始黏度较高的流体, 当  $\eta_0 = 50$  Pa·s 时, 假塑性流体在不到 3 s 的时刻就已经达到 92% 的填充度, 而牛顿流体的填充度却只有 80% 左右. 如果利用牛顿流体作为转移介质, 不仅降低了生产效率, 而且还影响了转移图形精度, 当选取假塑性流体作为转移介质时, 应严格控制压印时间避免时间浪费.

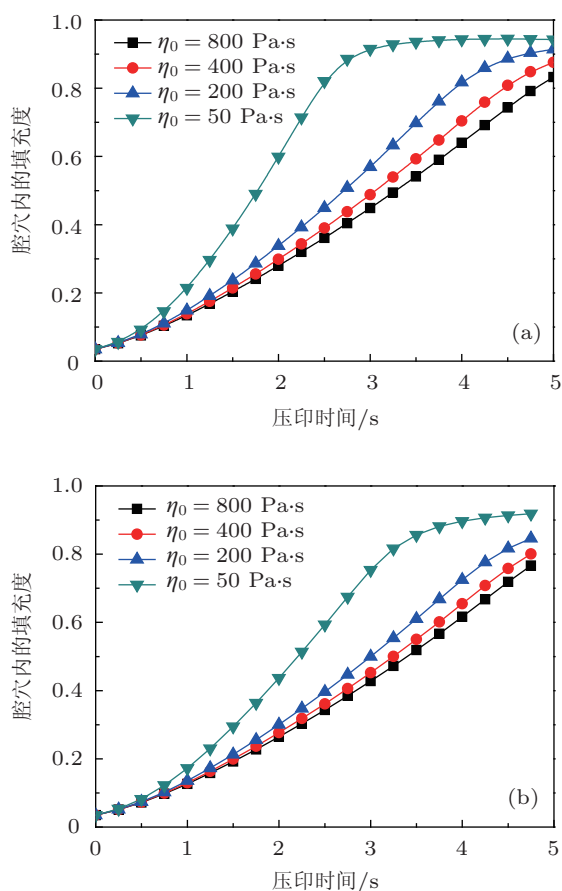


图 4 填充度随初始黏度变化曲线 (a) 假塑性流体; (b) 牛顿流体

图 5 反映的是不同时间下材料特征参数对填充度的影响, 流变指数  $n$  为 0.6, 初始黏度为 166 Pa·s. 曲线的斜率可以反映填充速度, 从 5(a) 可以看出填充速度随着材料特征参数的增大而逐渐增加, 材料特征参数高的介质流填充的较快. 这是因为  $1/\lambda$  对应的是流体从第一牛顿区进入剪切稀化区的临界剪切速率,  $\lambda$  越大临界剪切速率越小, 即介质流在剪切速率较小的情况下就进入了剪切稀化区, 黏度随之减小, 较低的黏度对填充效果有

积极的影响. 当  $\lambda = 10$  s 时, 填充度达到 90% 仅用了 0.5 s 的时间, 但是随着压印时间的增加, 填充速度逐渐减小甚至填充度开始出现下降的趋势. 从 4(b) 可以看出, 材料特征参数的改变对于填充效果无任何影响, 因为牛顿流体的流变指数  $n = 1$ , 在此条件下方程 (1) 可以化简为:  $\eta = \eta_0$ , 黏度不变, 不同材料特征参数下填充度不发生变化, 这说明对假塑性流体而言, 材料特征参数是通过影响黏度来影响填充度的. 在同样经过 5 s 之后, 牛顿流体的填充度达到 87%, 而假塑性流体可以达到 92% 甚至更高, 牛顿流体的黏度一直保持为初始剪切速率的黏度, 而假塑性流体的黏度则比初始黏度要小, 这也是造成假塑性流体填充度优于牛顿流体的最根本的原因.

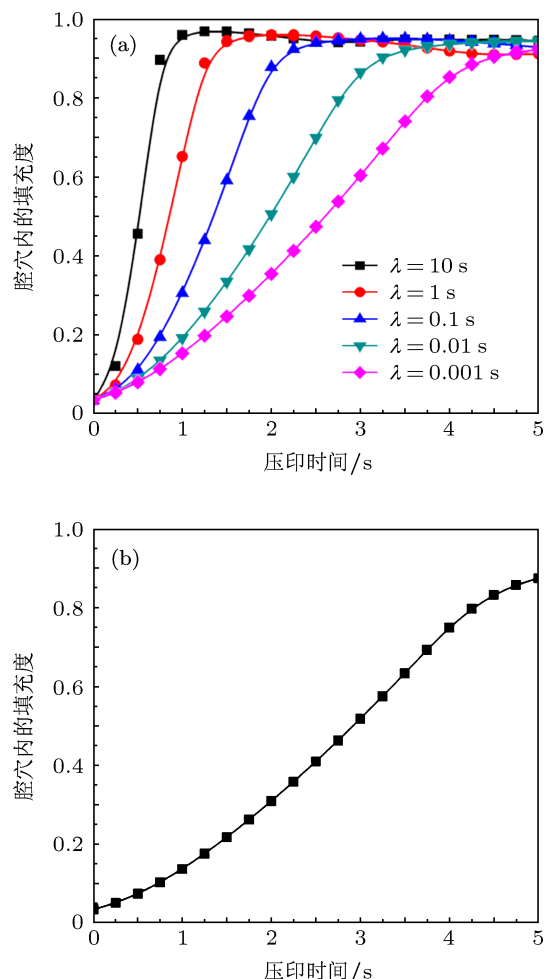


图 5 填充度随材料特征时间变化曲线 (a) 假塑性流体; (b) 牛顿流体

图 6 反映的是不同流变指数对填充度的影响. 保持初始黏度 166 Pa·s, 材料特征参数为  $10^{-3}$  s 不变, 分别计算了  $n$  为 0.1, 0.4, 0.7, 1.0 的情况下填充度的差异. 仿真结果表明, 流变指数越小, 填充速度

和填充效果越好,流变指数小的流体黏度随着剪切速率的变化减小得快,则在任意时刻流体黏度都比流变指数大的流体黏度小.当  $n = 0.1$  时,它的填充速度是牛顿流体的 1.4 倍,当选取假塑性流体作为转移介质时,它可以在很短的时间内就达到较好的填充效果,即在提高了转移精度的同时也提高了生产效率,但这并不意味着  $n$  越小越好,流变指数小的流体在制备起来困难度很大,而且压印后期填充度达到峰值之后还会出现下降的趋势.这是因为在流变指数很小的情况下黏度在很短的时间内就减小到了一个较低的值,流体黏度太小,它所受到的其他力不足以抵抗重力对其的作用,出现坍塌现象,图 4(a) 中在  $\lambda = 10$  s 时填充度降低也是这个原因.因此在选用假塑性流体作为转移介质的时候应该严格控制压印时间,以防止时间的浪费和图形转移精度的降低.

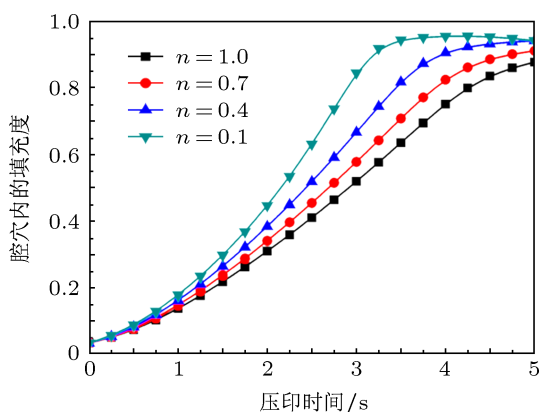


图 6 填充度随流变指数变化曲线

上述提到的三个参数都是通过影响黏度来影响填充度的,表明介质流的黏度对纳米压印中转移图形的保真度有很大的影响,选取合适的转移介质很大程度上提高了图形转移精度.黏度越小越利于微细结构的填充,这是假塑性流体比牛顿流体填充效果好的根本原因.通过优化参数集为制备合适的假塑性金属纳米流体提供了理论依据.除了上述参数以外,黏度还受其他因素的影响,如环境的温度和湿度,金属纳米粒子的形状尺寸等等.这些因素在设计纳米压印工艺流程时都应该考虑进去.

### 3.2 掩模板上施加的压强

为了提高掩模板上施加压力的均匀性,李天昊等<sup>[15]</sup>提出了一种新的施压方式:压缩式气体施压.通过活塞的向下移动,腔穴内的气体被压缩体积减

小,根据理想气体状态方程  $PV = nRT$  可知,在保证恒温压缩的情况下随着腔穴内气体体积的减小压强逐渐增大,即施加到掩模板上的压强也随之增大,这种施压方式可以很好地提高掩模板上压强的均匀性.压印过程中当气体体积压缩减小时,分子的热运动会使腔穴内温度的升高,但由于研究的对象是纳米量级尺寸而且压印的时间极短,温度的升高对压强的影响相对于体积减小对压强的影响可以忽略不计.即可以近似认为在压印过程中随着活塞的向下移动掩模板上施加的压强随着时间线性增加,即在数值上  $P_0 = a \times t$ ,  $a$  是一个与伺服马达的功率成正比的常量.

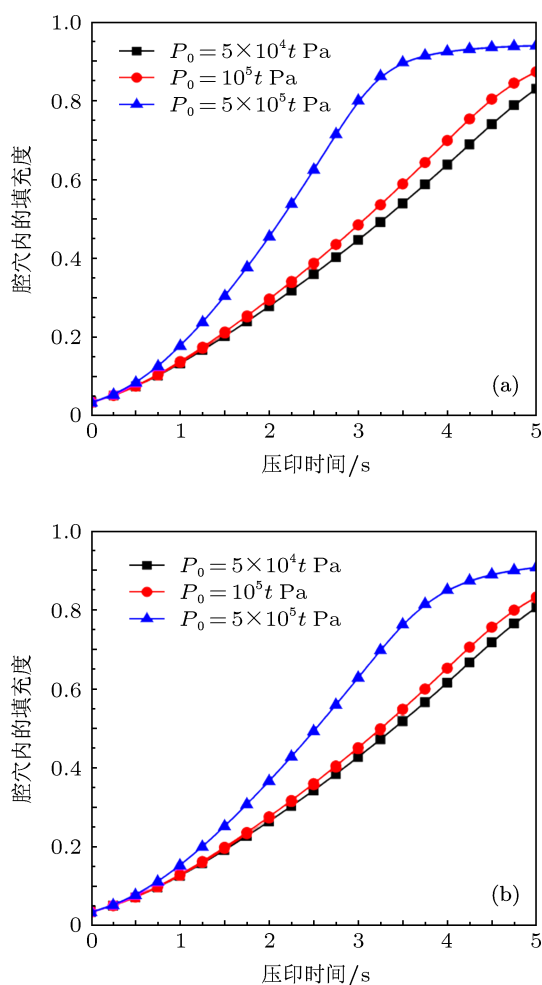


图 7 填充度随压强变化曲线 (a) 假塑性流体; (b) 牛顿流体

图 7 显示了压强对填充度的影响,当压强值较大时,转移介质的流动性增强,流速快,因而填充效果好,流动速度快即剪切速率大,假塑性流体的黏度随之减小,相同压强值的条件下它的填充度要比牛顿流体好.但是目前利用气体施压方式获得较大的压强值并不容易实现.假塑性流体在  $a = 10^5$  的



情况下, 填充效果就可以达到牛顿流体在  $a = 10^5$  情况下的填充效果. 因此可以选取假塑性流体 - 低压强的模式. 当  $a = 5 \times 10^5$  时, 假塑性流体的填充度在 4 s 左右就达到了平衡状态, 为了提高生产效率, 假塑性流体 - 高压强短时间模式也是一个不错的选择. 未填充的区域出现压头处和掩模板的内壁, 除了有周角的限制外, 假塑性流体也是一个原因, 当掩模板向下移动时, 掩模板与转移介质接触的部分剪切速率很大, 黏度变小, 当黏度很小时反而不利于填充.

### 3.3 腔穴高度 $H_1$

保持初始聚合物厚度  $H_2 = 450$  nm 不变, 图 8 显示的是在  $H_1$  分别取 200, 150, 100 nm 时填充度的变化曲线. 结果表明, 在相同的时间内填充度随着腔穴高度  $H_1$  的减小而逐渐增加, 也就是说, 浅的腔穴比深的腔穴更容易填充. 在压印速度相同的时间下, 浅的腔穴完成压印过程需要的时间比深的腔穴所需要的时间要长. 对于最终的压印效果, 深的

腔穴填充度较好, 但这是以牺牲时间为代价的情况下得到的. 不管转移介质为假塑性流体还是牛顿流体, 这个结论均成立. 同时, 在  $H_1$  恒定时, 假塑性流体比牛顿流体拥有更快的填充速度和更好的填充度.

### 3.4 掩模板移动速度 $V$

图 9 显示了在其他条件不变的情况下, 掩模板的移动速度即压印速度对腔穴内填充度的影响. 在相同的时间内掩模板移动速度越快, 填充速率越高, 填充度也就越好. 对于腔穴高度相同的掩模板, 在掩模板移动速度大的情况下, 经过很短的时间就可以完成对腔穴的填充. 而当速度较低时, 完成压印工艺所需要的时间就会很长. 就最终结果而言, 低压印速度长时间模式比高压印速度短时间模式的填充效果好, 但应用于工业生产上时压印时间在很大程度上决定了生产效率, 因此在设计工艺流程时应综合考虑选取最优值. 对比图 9(a) 和 9(b) 可以看出, 假塑性流体的填充效果要优于牛顿流体.

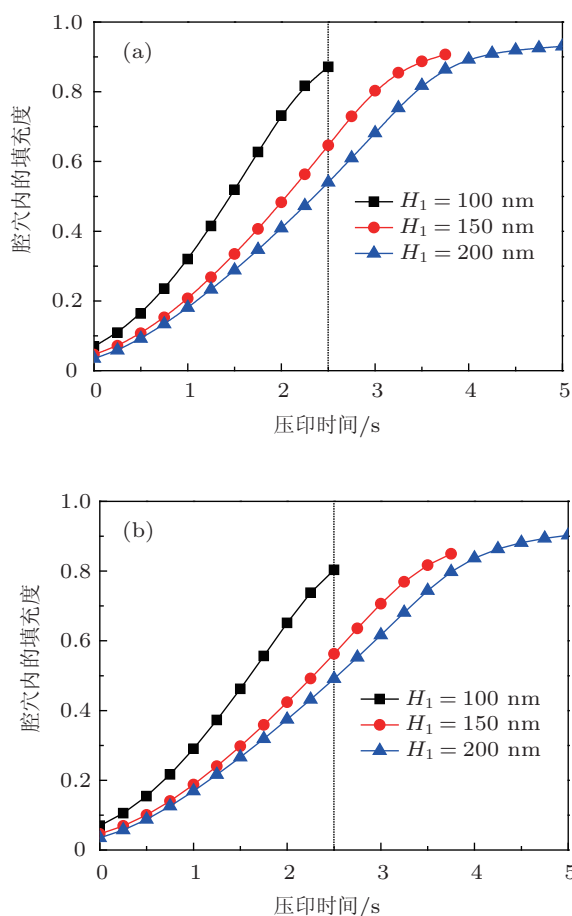


图 8 填充度随腔穴高度变化曲线 (a) 假塑性流体; (b) 牛顿流体

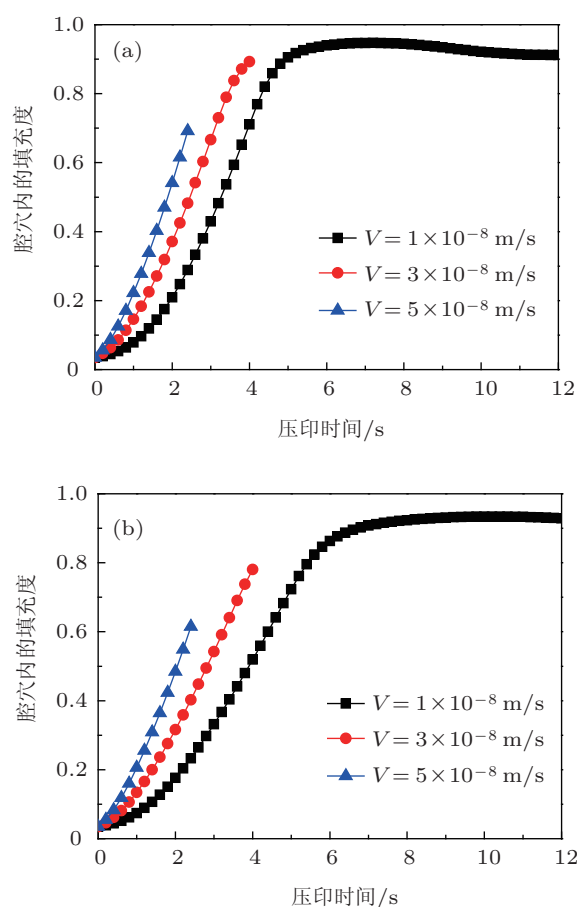


图 9 填充度随压印速度变化曲线 (a) 假塑性流体; (b) 牛顿流体

但是在压印时间很长的情况下,假塑性流体的填充度达到最高值之后会出现一个下降的趋势,因为此时流体黏度过小不利于保持形状,而牛顿流体则可以保持一个稳定的状态.因此,在选取假塑性流体作为转移介质时,压印时间的长短不仅会影响到生产效率,还在很大程度上影响填充度.

以上分析了在纳米压印工艺中压印过程中影响填充度的因素:黏度、压强、初始聚合物的厚度以及掩模板移动速度等.并且验证了假塑性流体比牛顿流体更适合作为转移介质用于纳米压印,为后期纳米压印工艺流程的设计提供了较好的理论支持.

## 4 结论

目前对纳米压印的研究,大多数都是将转移介质看成是牛顿流体和固体弹性材料.由于牛顿流体黏度的限制,提出将不同大小颗粒的金属纳米粒子制成假塑性流体作为转移介质用于纳米压印,不仅有利于微细结构的填充,还能够保证压印结束后图

形形貌的保持,同时又具有金属图形直接转移步骤简单的优点.

在压印过程中,影响到填充度的因素有很多,本文分析了黏度、压强、初始聚合物的厚度,掩模板移动速度等重要参数对填充速度和填充度的影响.结果表明:在黏度较小、压强较大、掩模板高度较小、移动速度较大时填充的效果好,有利于提高转移图形的精度.同时验证了假塑性流体的填充速度和填充度都要远远高于牛顿流体,从而说明假塑性流体比牛顿流体更适合作为转移介质用于纳米压印中.

值得注意的是,在使用牛顿流体作为转移介质的时候,可以通过延长压印时间来提高图形转移精度.而当假塑性流体作为转移介质时,填充度并非随着时间的增加而一直增大,当假塑性流体的黏度随着剪切速率的增大减小到一定值的时候,介质流所受到的其他力的合力不足以抵挡重力对其的作用,从而出现塌陷现象,影响填充度.因此在选用假塑性流体时,应该严格控制压印时间,避免影响工作效率,甚至影响转移图形的保真度.

- 
- [1] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom 1995 *Science* **272** 85
- [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, 郭熙, 唐为华 2006 物理学报 **55** 6511]
- [3] Li Z J, Lin H, Jiang X S, Wang Q K, Yin J 2010 *Micronanoelectron. Tech.* **47** 179 (in Chinese) [李中杰, 林宏, 姜学松, 王庆康, 印杰 2010 微纳电子技术 **47** 179]
- [4] Hyunsik Y, Hye S C, KahpY, Kookheon C 2010 *Nanotechnology* **21** 105302
- [5] Tang M J, Xie H M, Li Y J 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 098101
- [6] Harutaka M, Masaharu T 2009 *J. Micromech. Microeng.* **19** 125026
- [7] Seung H K, Inkyu P, Heng P, Costas P G, Albert P P, Christine K L, Jean M J 2007 *Nano. Lett.* **7** 1869
- [8] Chou S Y, Keimel C, Gu J 2002 *Nature* **417** 835
- [9] Chen H L, Chuang S Y, Cheng H C 2006 *Microelectron. Eng.* **83** 893
- [10] Yao C H, Hsiung H Y, Sung C K 2009 *Microelectron. Eng.* **86** 655
- [11] Seung H K, Inkyu P, Heng P, Costas G P, Albert P P, Christine L K, Jean F M J 2007 *Nano Lett.* **7** 1869
- [12] Harry R L D, Amy S C, Randy S P 2005 *J. Micromech. Microeng.* **15** 2414
- [13] Xu S F, Wang J G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 124701 (in Chinese) [许少峰, 汪久根 2013 物理学报 **62** 124701]
- [14] Liu J P, Zhang X Y, Jia Q X, Yu C Z 2011 *China Mech. Eng.* **22** 2415 (in Chinese) [刘剑平, 张新义, 贾庆轩, 于春站 2011 中国机械工程 **22** 2415]
- [15] Li T H, Zheng G H, Liu C R, Xia W W, Li D X, Duan Z Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 068103 (in Chinese) [李天昊, 郑国恒, 刘超然, 夏委委, 李冬雪, 段智勇 2013 物理学报 **62** 068103]
- [16] Jeong J H, Choi Y S, Shin Y J 2002 *Fiber. Polym.* **3** 113
- [17] Hirai Y, Fugiwara M, Okuno T 2011 *J. Vac. Sci. Technol. B* **19** 2811
- [18] Yoshihiko H, Takaaki K, Takashi Y 2004 *J. Vac. Sci. Technol. B* **22** 3288

# Factors influencing filling degree in nanoimprint lithography with pseudoplastic fluid\*

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

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

(Received 17 April 2013; revised manuscript received 4 June 2013)

## Abstract

As a novel development of semiconductor process, direct metallic patterning has the advantages of simple steps, low cost, etc. However, almost all transfer media are Newtonian fluids in traditional nanoimprint lithography. Newtonian fluid viscosity is constant. Too high a viscosity is adverse to filling the small space, and if viscosity is too low, it is harmful to solidify graphics. So an appropriate viscosity range that can both realize a high filling degree and benefit solidification is difficult to determine. Pseudoplastic fluid viscosity decreases with the increase of shear rate. The problem would be solved well when pseudoplastic fluid is used as a transfer medium. Synthesizing the advantages of direct metallic patterning and pseudoplastic fluid feature, a novel idea is put forward. The pseudoplastic metal nanofluids, which would be fabricated with metal nanoprticals, can take the place of transfer medium in nanoimprint lithography. Based on the finite element method, COMSOL software is used to compute the filling degree of pseudoplastic fluid, and the results are compared with those of Newtonian fluid under the same conditions. Factors, such as viscosity, imprinting speed, pressure, etc., which would affect filling degree, can be obtained from simulation results. These parameters provide a theoretical basis for designing technological process and fabricating pseudoplastic fluids in future work.

**Keywords:** nanoimprint, pseudoplastic fluid, filling degree

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

**DOI:** 10.7498/aps.62.188105

---

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

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