

面向微加工的虚拟光刻系统建模与实现^①

孙广毅^② 赵 新^③ 卢桂章

(南开大学机器人与信息自动化研究所 天津 300071)

摘 要 提出了一种面向微加工的虚拟光刻系统 Litho3D。该系统采用傅立叶光学成像模型、光刻胶曝光及显影模型,实现了投影式光学光刻的三维模拟。它拥有标准的 GDSII、CIF 版图格式接口和支持各种光学参数(包括数值孔径、波长、离焦量、光刻胶厚度、表面折射率等)的模拟设置。模拟结果的显示采用了体绘制与网格相结合的方法,增强了结果的可视性。此外,光刻模拟结果可以直接导入到虚拟工艺系统 ZProcess 中作为刻蚀工艺的掩膜输入,实现了光刻工艺与其他微机电系统(MEMS)工艺模拟的无缝集成。一系列模拟结果验证了该系统的可行性。

关键词 微加工, 光刻, 虚拟工艺, 工艺模拟

0 引 言

微机电系统(micro electromechanical system, MEMS),是指用硅微加工、光刻模造(LIGA)技术及精密机械加工等微加工技术制作的由微传感器、微执行器、微能源等微机械基本部分及高性能电子集成线路组成的微机电器件与装置^[1]。随着 MEMS 器件日渐复杂和特征尺寸进一步变小,其加工工艺的精度要求也不断提高。为了能够更好地预测并优化加工过程,研制功能强大的工艺模拟软件就变得尤为重要。工艺模拟是在给定工艺流程和掩膜版图的前提下,通过计算机仿真得到器件的三维模型。这样在设计阶段就能发现可能存在的问题,从而缩短 MEMS 器件的开发周期,降低开发成本。

目前,大部分国外商业软件都包含了基本的工艺模拟功能,如 CoventorWare^{TM[2]}, IntelliSuite^{TM[3]}等。国内的有北京大学开发的 MEMS CAD 系统 IMEE^[4]。西北工业大学开发的 MEMS GARDEN^[5]。南开大学机器人所开发的虚拟 MEMS 加工工艺原形系统 MEMS 1.0^[6]则利用专家系统技术实现了由原始工艺和掩膜版图到三维模型的自动推理过程。作为 MEMS 1.0 的升级版本,基于体积图形学的 MEMS 工艺模拟系统 ZProcess^[7]已经实现商业化并集成到 IntelliSuite^{TM[3]}中。然而,上述的所有模拟工具普遍存

在一个不足,就是模拟中用到的掩膜均是理想图形,没有考虑光刻时引入的工艺偏差。作为 MEMS 器件加工过程中的一道至关重要的工序——光刻工艺将掩膜上的图形转移到光敏材料上,从而形成特定图形,但在进行图形转移时往往会产生工艺偏移,导致衬底上留下的光刻胶不完全与掩膜上的相应区域完全等同^[8]。产生工艺偏移的一个主要原因是曝光线条的特征尺寸接近曝光系统的理论分辨率而发生衍射导致光刻图形质量下降^[9],这种工艺偏移又称为光学邻近效应(OPE)。

光刻模拟研究已经有 30 多年的历史,一系列物理模型被提出,基于这些模型衍生出的工业用模拟器有 Silvaco 的 Optolith, KLA-Tencor 的 PROLITH^[10]。这些模拟器虽然功能强大,但都是针对传统半导体制造行业,且价格昂贵。此外,在 MEMS 工艺模拟中无缝集成光刻模拟国内外均未见相关报道。本文在深入研究现有光刻模型的基础上,结合 MEMS 器件加工工艺及模拟的自身特点,设计开发了面向微加工的虚拟光刻系统 Litho3D。该系统采用傅立叶光学成像模型、光刻胶曝光及显影模型,实现了投影式光学光刻的三维模拟。Litho3D 拥有标准的 GDSII 和 CIF 版图格式接口,支持各种光学参数(包括数值孔径 NA、波长 λ 、离焦量、光刻胶厚度、不同表面的折射率等)的模拟设置。Litho3D 还首次将三维体绘制技术引入光刻模拟,增强了结果的可视性。此外,

① 国家自然科学基金(60674068)、863 计划(2006AA04Z304)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-07-0464)、天津市应用基础及前沿技术计划重点项目和南开大学科技创新基金(Z06010-B1)资助项目。

② 男,1981 年生,博士生;研究方向: MEMS,虚拟现实;E-mail: michael_sun@mail.nankai.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: zhaoxin@nankai.edu.cn
(收稿日期:2008-05-20)

Litho3D 的模拟结果可以直接导入到虚拟工艺系统 ZProcess 中作为刻蚀工艺的掩膜输入,实现了光刻工艺与 MEMS 其他工艺模拟的无缝集成。

1 光刻模型

一个完整的光刻工艺包括备片、涂胶、前烘、曝光、后烘、显影及坚膜。图 1 给出了光刻的完整流程。

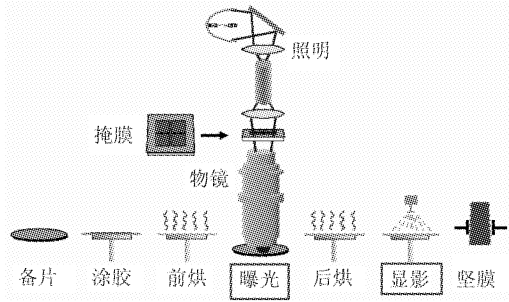


图 1 投影光刻基本流程^[11]

本文的研究目的是将光刻过程产生的掩膜图形畸变即光学邻近效应(OPE)模拟整合到 MEMS 虚拟工艺中,从而使图形转移工艺的模拟更加精确。因此,研究的重点是曝光与显影。对于前烘、后烘的研究涉及到较多的物理和化学反应过程,超出了本文的研究范围。

1.1 光学系统与成像模型

为了能够准确地模拟光刻工艺,首先需要对光刻系统进行描述。图 2 给出了本文所研究的投影光刻系统示意图。

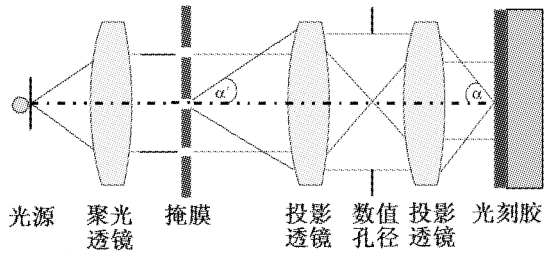


图 2 投影光刻系统

投影式光刻系统主要由光源、聚光透镜、掩膜、投影透镜四部分构成。光源和聚光透镜构成照明系统,其作用是将具有特定强度、均匀性、频谱特征和空间相干的光传递到光刻胶。当光经过掩膜到达投影透镜时,由于要受到光学系统本身的限制,一部分光的高频分量因受限于数值孔径 NA 而无法被重新收集,从而产生了一定的衍射效应。对上述成像过

程的模拟可以通过 Hopkins 透射交叉系数方法计算得到空间光强图像。式

$$I(f, g) = \iint T(f' + f, g' + g; f', g') F(f' + f, g' + g) F^*(f', g') df' dg' \quad (1)$$

是输出光强 $I(x, y)$ 的傅立叶逆变换, (f, g) 表示频域中的一点, (x, y) 表示物平面中的一点。 $F(f, g)$ 是掩膜传递函数 $F(x, y)$ 的傅立叶逆变换。 $T(f', g'; f'', g'')$ 是透射交叉系数(TCC),一个与物体完全无关的函数,是从光源到像平面的包括照明系统和成像系统在内的整个光学系统作用的完整描述,可以表示为

$$T(f', g'; f'', g'') = \iint J(f, g) K(f + f', g + g') K^*(f + f'', g + g'') df dg \quad (2)$$

其中, $J(f, g)$ 和 $K(f, g)$ 分别是光照函数和投影系统传递函数。定义焦点误差为 z ,瞳孔形状为圆形, $K(f, g)$ 可以写为

$$K(f, g) = K_0(f, g) e^{i\pi z(f^2 + g^2)} \quad (3)$$

其中

$$K_0(f, g) = \begin{cases} 1 & f^2 + g^2 < 1 \\ 0 & f^2 + g^2 > 1 \end{cases} \quad (4)$$

对于部分相干系数 s 的常规照明系统, $J(f, g)$ 可以写为

$$J(f, g) = \begin{cases} \frac{1}{\pi s^2} & f^2 + g^2 < s^2 \\ 0 & f^2 + g^2 > s^2 \end{cases} \quad (5)$$

正是由于瞳函数 K 造成了空间图像的光学劣化,原本光刻版上清晰定义的物,成像后边缘变“模糊”,锐角变圆。

1.2 曝光模型

成像模型解决了原始掩膜图形到像平面图形的计算,但是由于光刻胶本身具有一定厚度,光在通过胶层不同介质时便会发生反射,这样入射光与反射光叠加形成了驻波^[12]。根据麦克斯韦方程,在这样的系统中驻波可以描述为

$$\varepsilon_2(x, y, z) = \varepsilon_1(x, y) \frac{\tau_{12} \left(e^{-\frac{2\pi j n_2 z}{\lambda}} + \rho_{23} \tau_{23}^2 e^{\frac{2\pi j n_2 z}{\lambda}} \right)}{1 + \rho_{12} \rho_{23} \tau_D^2} \quad (6)$$

其中 $\varepsilon_1(x, y)$ 是入射平面电场强度, $\varepsilon_2(x, y, z)$ 是胶中的平面波电场, n_j 是第 j 层的复折射率(假设折射率不随时间变化), λ 是入射光波长, ρ_{ij} 为 ij 层界面处的反射系数, τ_{ij} 为 ij 层界面处的透射系数, τ_D 为光刻胶膜的透射率。 ρ_{ij} 、 τ_{ij} 和 τ_D 的表达式分别为

$$\rho_{ij} = (n_i - n_j)/(n_i + n_j), \tau_{ij} = 2n_i/(n_i + n_j), \tau_D = \exp(-jk_2 D)。$$

1.3 显影模型

本文实现了两种显影模拟。一种显影模拟是基于固定刻蚀速率分布函数,另一种是基于驻波曝光模拟得到的刻蚀速率分布函数。前者不进行曝光模拟,只进行空间成像模拟得到胶平面光强分布,然后采用通用的光刻胶内部刻蚀速率分布函数进行显影模拟。由于不必进行驻波计算,该方法速度较快且稳定性好,适合大尺度三维模拟。常用的刻蚀速率分布函数有两种,即高斯模型的函数和驻波近似模型的函数。高斯模型的速率分布函数可以表示为

$$R_{x,y,z} = \exp(-4I^*(x,y)^2) \quad (7)$$

其中 $I^*(x,y)$ 表示光刻胶表面一点 (x,y) 处正规化后的光强度, z 表示光刻胶中一点到表面的垂直距离,如图 3 所示。

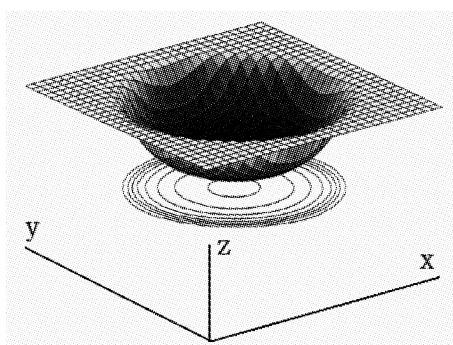


图 3 高斯模型的刻蚀速率分布函数

图 4 给出了采用该模型进行显影模拟得到的二维剖面演进结果。其中上面为掩模版开口,下面为光刻胶。图 4(a)和图 4(b)分别代表不同时刻光刻胶剖面的演进位置。

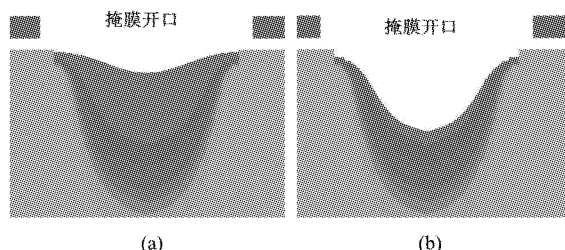


图 4 采用高斯刻蚀速率分布函数得到的显影剖面演进

对式(7)稍加修改便可得到驻波近似模型:

$$R_{x,y,z} = \exp(-4I^*(x,y)^2)(1.05 - \cos(12\pi z)) \quad (8)$$

利用式(8)可以得到图 5 所示的显影剖面演进结果。同样,图 5(a)和图 5(b)分别代表不同时刻光刻胶剖面的演进位置。

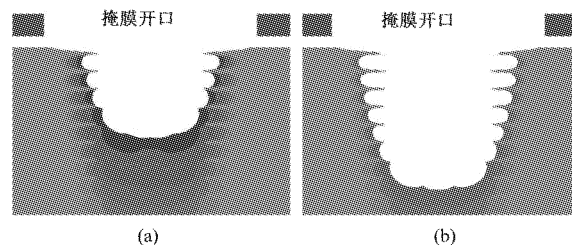


图 5 采用驻波近似刻蚀速率分布函数得到的显影剖面演进

值得注意的一点是,驻波近似模型不是真正的驻波模拟,基于驻波计算光刻胶内部刻蚀速率分布的模拟将在模拟结果部分给出。

1.4 相移掩膜(PSM)技术

PSM 的基本原理是在掩膜图形的相邻透光区引入 180° (或其奇数倍)的位相差,以改变相邻图形衍射光束之间的干涉状态;通过相邻透光区光场的相消干涉,减小光场分布中暗区的光强、增大亮区的光场,以提高对比度和改善分辨率。图 6 显示了 PSM 是如何改善相邻图形干涉的。

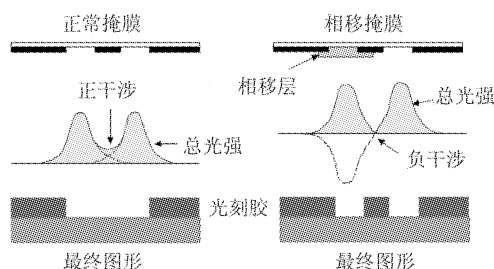


图 6 相移掩膜技术

2 虚拟光刻系统建模与实现

2.1 光刻模型编程实现及算法分析

2.1.1 成像计算

由式(1)和(2)可知,投影光刻模型可以看作是对原始掩膜图形在频域进行一次高频滤波,因此为了便于对其编程,可以将成像过程用式

$$\begin{aligned} \varepsilon(x,y) &= F^{-1}\{\varepsilon(f_x,f_y)\} \\ &= F^{-1}\{F\{t(x_1,y_1)\}P(f_x,f_y)\} \end{aligned} \quad (9)$$

表示。 $\varepsilon(x,y)$ 为光强电场强度, F 表示傅立叶变换, F^{-1} 表示傅立叶逆变换。最终,光刻胶表面的光强分布 $I_i(x,y)$ 可表示为

$$I_i(x, y) = |\varepsilon(x, y)|^2 \quad (10)$$

可以说傅立叶变换及其逆变换的效率直接关系到整个系统的运行速度。因此从工艺实际可行性出发,本文舍弃了掩膜尺寸 N 为任意值的情况,而采用适当增大或减小采样率的快速傅立叶算法(FFT)。即当 $N = 2^m$ 时,通过递归 m 次,最终只需对一个长度为 1 的序列求其离散傅立叶变换(DFT),从而避免了 DFT 烦杂的计算,使效率大大提高。

2.1.2 驻波计算

在模拟驻波时会涉及到刻蚀剖面的演进问题,目前,常用的演进方法有 string 算法和 cell 算法两种。String 算法用相连的多边形表示拓扑结构^[13],模拟精度较高,但是数值稳定性较差,例如会产生自相交表面等。Cell 算法则根据局部刻蚀速率逐点去除相应单元,鲁棒性强,但精度会随 cell 的划分变化。本文采用的是 cell 模型,将计算得到的局部点的刻蚀速率转换成形态学腐蚀运算操作单元的半径,从而达到改变拓扑结构的作用,具体实现可参考文献^[7]。

2.2 三维可视化

以往的光刻模拟软件大多只能显示光刻胶中某一层的光强分布,或某一阈值的光强等值面。而本文则采用了体绘制技术^[14]与多边形显示相结合的方法对模拟结果进行可视化,真正实现了实时的三维可视化,并可与 MEMS 虚拟工艺系统进行无缝集成。同时,在体绘制过程中用户还可以对体数据进行平移、旋转、剖切等交互操作来更好地观察和理解光刻胶内部结构。

2.3 系统实现

该虚拟光刻系统采用 MS Visual C++ 6.0 和 Coin3D^[15]开发。其中 Coin3D 的 SimVoleon^[16]模块用于三维体绘制。由于采用了面向对象的模块化编程,本系统具有良好的移植性和二次开发功能。

图 7 给出了整个虚拟光刻系统的模块划分。系统包括输入、数值计算、数据显示、输出以及人机交互 5 部分。输入模块负责工艺参数和掩膜图像的输入,并将其转化成系统可识别的内部数据结构。计算模块根据输入的参数选取合适的光刻模型计算得到光刻胶表面和内部的光强分布。显示模块将得到的光强分布转化为三维空间体数据的形式,并按照预先定义的映射函数进行数据分类,以不同颜色表示不同光强。输出模块是连接虚拟光刻系统与 MEMS 虚拟工艺系统的桥梁,负责将光刻模拟结果

提供给其它 MEMS 工艺模拟模块。人机交互模块提供了旋转、平移、缩放、剖切等功能,便于用户更好地观察体数据内部结构。

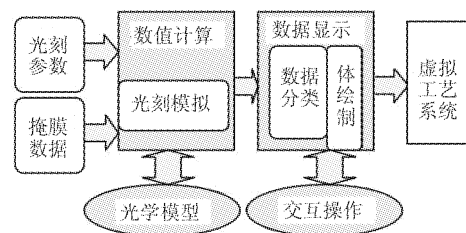


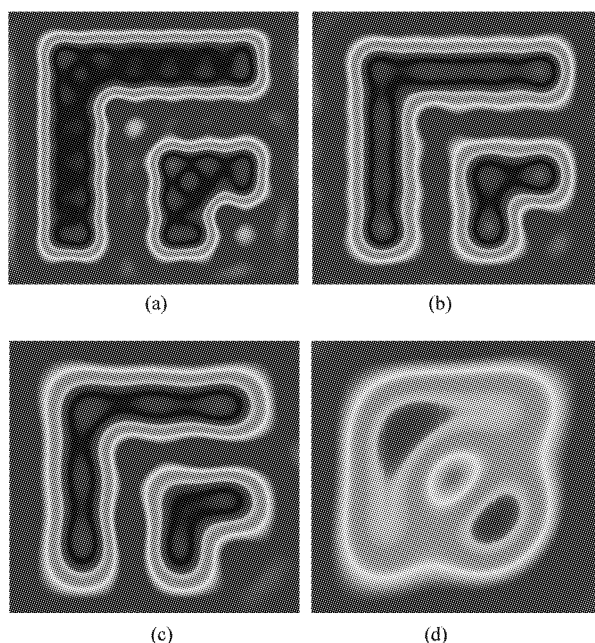
图 7 虚拟光刻系统模块划分

除了前面介绍的数值计算和显示部分外,本系统的另外一个特点是同时支持 GDSII、CIF 标准掩膜格式和二值化标量位图,并且能够相互转换,具有较好的通用性。

3 模拟结果

3.1 线宽影响

图 8 是在相同的光刻条件下分别对线宽为 $1\mu\text{m}$, $0.75\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $0.25\mu\text{m}$ 的“肘子型”图形进行模拟的结果。(波长 $\lambda = 436\text{nm}$ (G-line), 数值孔径 $NA = 0.4$)。图中显示的是光刻胶表面的光强分布情况。



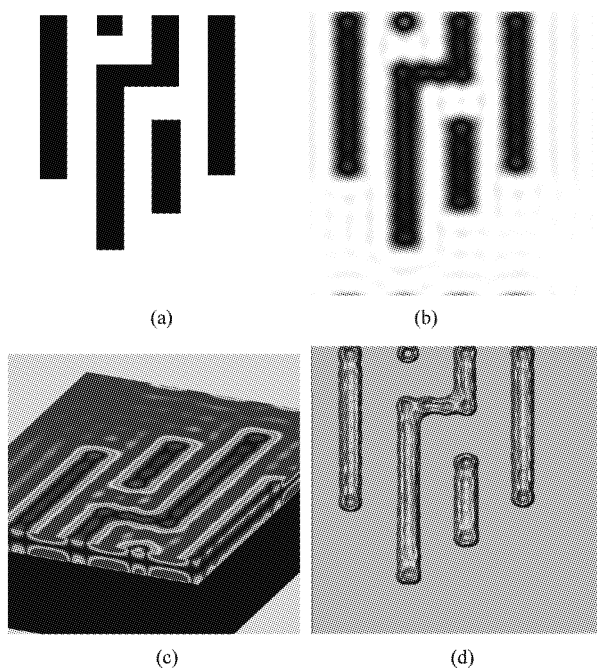
(a) 线宽为 $1\mu\text{m}$; (b) 线宽为 $0.75\mu\text{m}$; (c) 线宽为 $0.5\mu\text{m}$; (d) 线宽为 $0.25\mu\text{m}$

图 8 不同线宽模拟结果 (波长 $\lambda = 436\text{nm}$, 数值孔径 $NA = 0.4$)

由光刻分辨率公式 $R = K\lambda/NA$ (K 为光学系统常数,一般取 0.6)可知,在 $\lambda = 436\text{nm}$, $NA = 0.4$ 时,极限分辨率约为 545nm 。因此,在图 8(d)中线宽为 $0.25\mu\text{m}$ 时,原图形已经无法分辨,而大于 500nm 时,随着线宽增加,图形的相对质量越好,这和实际情况相吻合。

3.2 三维模拟

图 9 给出了一个完整的光刻三维模拟。图 9(a)为原始掩膜图形,图形线宽为 750nm ,模拟采样精度为 15nm ,采用 I-line ($\lambda = 365\text{nm}$, $NA = 0.6$) 进行曝光模拟,光刻胶厚度为 $0.4\mu\text{m}$ 。图 9(b)为模拟得到的曝光后光刻胶表面的光强分布。图 9(c)为采用驻波模型计算得到的光刻胶内部刻蚀速率分布的剖面显示。图 9(d)为显影模拟后光刻胶的三维形状的顶视图。

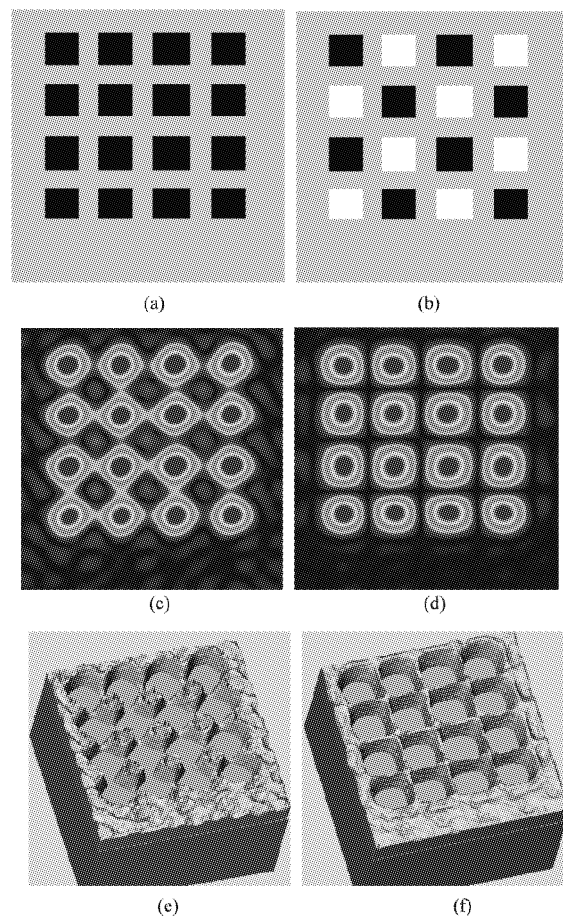


(a) 原始掩膜; (b) 光刻胶表面光强分布; (c) 曝光模拟后光刻胶内部刻蚀速率分布; (d) 显影模拟后光刻胶三维形状顶视图

图 9 采用 G-line 曝光的三维光刻模拟

3.3 相移掩膜

图 10 模拟了采用相移掩膜技术改善光刻胶图形质量的情况,图形线宽为 375nm ,并采用 G-line ($\lambda = 436\text{nm}$, $NA = 0.6$) 进行曝光。图 10(a)、(c)、(e)分别为原始掩膜及曝光模拟结果与显影结果。图 10(b)、(d)、(f)分别为加入相移层的掩膜及曝光模拟结果与显影结果,其中相邻方孔相位相差 180° ,可以看到相邻图形之间干扰减小,说明模拟结果与实际相吻合。

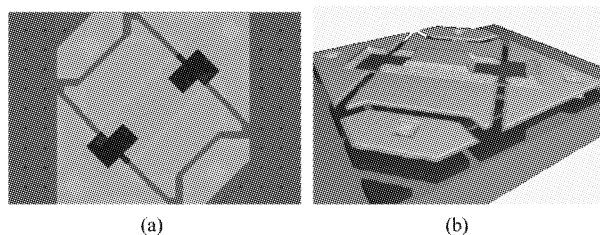


(a) 常规掩膜; (b) 加入相移层掩膜,相邻方孔相位差 180° ; (c) 常规掩膜曝光模拟结果; (d) PSM 掩膜曝光模拟光结果; (e) (f) 显影后结果

图 10 相移掩膜模拟

3.4 与 MEMS 虚拟工艺集成

由于本系统可以用体数据表示光刻胶三维形状,这就为与 MEMS 虚拟工艺系统整合提供了方便,可以直接将模拟结果输入到虚拟工艺系统中作为其中刻蚀工艺的掩膜输入。图 11 给出了一个典型 MEMS 器件的模拟。图 11(a)为加工该器件用到的一系列掩膜图形的合成图。将这些掩膜输入到虚拟光刻系统进行曝光模拟后再输入到虚拟工艺系统中进行其它工艺模拟最终得到图 11(b)所示的器件三维分层结构。



(a) 原始掩膜; (b) 虚拟工艺仿真结果

图 11 集成虚拟光刻的 MEMS 虚拟工艺仿真

4 结 论

本文提出并实现了面向微加工的虚拟光刻系统。该系统由用户输入光学系统参数(波长 λ ,数值孔径 NA),光刻胶厚度,以及初始掩膜图形,然后根据光刻模型计算出曝光和显影后光刻胶表面及内部的光强分布,同时支持相移掩膜模拟。最后利用体绘制技术实现结果的三维可视化。通过与 MEMS 虚拟工艺系统整合,进一步增强了工艺仿真的精度。一系列模拟初步验证了系统的可行性。

参考文献

- [1] Fatikow S, Rembold U. *Microsystem Technology and Micro-robotics*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1997. 1-108
- [2] CoventorWare. <http://www.coventor.com>
- [3] IntelliSuite. <http://www.intellisensesoftware.com>
- [4] 张海霞,郭辉,肖志勇等. MEMS CAD 系统 IMEE 的研究和开发. *微纳电子技术*, 2003, 40(7): 92-95
- [5] 常洪龙. 基于“Top-Down”的 MEMS 集成设计方法及关键技术研究: [硕士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2002
- [6] Zhao X, Li Y W, Zhou Y Y, et al. Virtual process: concept, problems and implementation framework. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Control and Automation (ICCA'03)*, Montreal, Canada, 2003. 659-663
- [7] Sun G Y, Zhao X, Li G Z. Voxel-based modeling and rendering for virtual MEMS fabrication process. In: *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Beijing, China, 2006. 306-311
- [8] Stephen D. Senturia 著, 刘译文, 王晓红, 黄庆安等译. *微系统设计*. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [9] Maluf N. *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. London: Artech House Press, 2000. 15-82
- [10] Mack C A. Prolith: A comprehensive optical lithography model, optical microlithography IV. *Proc SPIE*, 1985, 538: 207-220
- [11] Mack C A. Lithographic simulation: a review. In: *the Proceedings of Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component Fabrication SPIE*, San Diego, USA, 2001, 4440. 59-72
- [12] Plummer J D, Deal M D, Griffin P B 著, 严利人, 王玉东, 熊小义等译. *硅超大规模集成电路工艺技术——理论、实践与模型*. 北京: 电子工业出版社
- [13] Scheckler E W, Neureuther A R. Models and algorithms for three-dimensional topography simulation with SAMPLE-3D. *IEEE Trans Computer-Aided Design*, 1994, 13: 219-230
- [14] Kaufman A E. Introduction to volume graphics. <http://pixel.ecn.purdue.edu:8080/~qiaow/papers/KaufmanVolumeGraphics.pdf>
- [15] Coin3D. <http://www.coin3d.org>
- [16] SimVoleon. <http://www.sim.no>

Modeling and implementation of a virtual lithography system for micromachines

Sun Guangyi, Zhao Xin, Lu Guizhang

(Institute of Robotics and Automatic Information System, Tianjin 300071)

Abstract

This paper proposes the Litho3D, a virtual lithography system for micromachines. The system utilizes a Fourier optics imaging model, a photoresist exposing model, and a development model to simulate the projective optical lithography. Also, the system supports the input of GDSII and CIF format layout, and permits the interactive configuration of simulation parameters, including numerical aperture, wavelength, defocus, photoresist thickness, and surface reflection. The visualization of simulated results is based on the method of combining volume rendering with mesh rendering, which enhances the visibility. Additionally, the simulated results can be directly used as the masks of the etching process in the virtual process system, which implements the integrated simulation between lithography and other MEMS fabrication processes. A series of simulation results demonstrate the feasibility of the system.

Key words: micromachining, lithography, virtual process, process simulation