

# SU-8 胶曝光衍射效应的模拟及丙三醇补偿方法<sup>\*</sup>

朱 真<sup>†</sup> 黄庆安 李伟华 周再发 冯 明

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:** 基于 SU-8 胶的 UV-LIGA 技术是 MEMS 中制备高深宽比结构的一种重要方法, 但由于衍射效应会使结构的侧壁不再垂直. 根据菲涅耳衍射模型, 考虑了丙三醇/SU-8 界面的反射和折射现象, 模拟了丙三醇填充在掩模版和光刻胶之间的刻蚀图形. 计算结果与已有的实验进行了比较, 模型基本可以描述这种光刻过程, 可在设计时作为参考.

**关键词:** SU-8 胶; 菲涅耳衍射; 丙三醇

EEACC: 2550G; 2575

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)12-2011-07

## 1 引言

具有高深宽比的厚胶对于多种 MEMS 应用都很重要, 例如: 静电感应器、微流体控制器和微机器人等. 这种应用要求器件结构有垂直的侧壁. 目前有两种发展成熟的工艺用于制造高深宽比的微结构. 一种是 LIGA 工艺, 该工艺使用同步加速 X 射线光刻技术来曝光厚度在 10mm 以上的 PMMA 光刻胶膜, 产生一个用于电镀的图形. 由于 X 射线波长短和在光刻胶中穿透深度高, X 射线光刻技术是一种用于制造垂直的侧壁和高深宽比微结构的良好技术. 但是, X 射线源同步加速器非常昂贵且不容易轻易得到. 另一种是类 LIGA 工艺, 称为 UV-LIGA. 使用 UV 光光刻技术已经得到发展并且证明是一种制造高深宽比结构经济而有效的方法. 当使用 UV 光光刻技术来制造厚度大于 1mm 的微结构时, 它的衍射误差会严重影响微结构侧壁轮廓的质量<sup>[1]</sup>.

SU-8 胶是一种负性、环氧树脂型的紫外线光刻胶. 采用 SU-8 胶的 UV-LIGA 技术是制造 MEMS 的重要微细加工技术. SU-8 胶在近紫外光 (365~400nm) 范围内光吸收度很低, 且整个光刻胶层所获得的曝光量均匀一致, 可得到具有垂直侧壁和高深宽比的厚膜图形. 同时也克服了能够制作高深宽比的 LIGA 技术中 X 射线光源极为昂贵的问题, 十分适合于制备超厚、高深宽比 MEMS 微结构, 因此直接采用 SU-8 光刻胶来制造具有高深宽比的微结构与微零件是微加工领域的一种热门技术.

影响 UV 光刻技术中图形尺寸和侧壁轮廓的

关键因素是菲涅耳衍射: 一方面, 菲涅耳衍射使图形边缘得到了更多的能量, 造成图形在边缘上的扩张; 另一方面, 光刻胶在显影剂中的膨胀同样促使了光刻胶图形的扩张. 本文建立了完整的模型来模拟 UV 曝光的侧壁轮廓. Chuang 等人<sup>[1]</sup> 最近报道用丙三醇补偿可消除空气间隙产生的衍射效应. 本文根据这种结构, 考虑了丙三醇/SU-8 界面的反射和折射现象, 建立了模拟模型, 结果与实验结果基本一致. 本文模型为选择其他介质或优化 SU-8 光刻工艺有一定参考意义.

## 2 SU-8 胶光强分布模型

对于 SU-8 胶, 一般采用紫外线曝光. 紫外光的波长比较长, 其衍射效应十分明显, 所以对于光刻精度影响很大. 掩模版的边界在接触式曝光中常会引起衍射效应, 当光刻胶的厚度和掩模版光刻胶间间隙增大时, 衍射误差将会变大. 结果导致了非垂直的光刻胶侧壁, 限制了高深宽比微结构的应用. 所以, 理解菲涅耳衍射图案及其对靠近掩模版边界处光刻胶的影响变得十分重要. 对于光刻胶中光强分布的模拟, 有很多方法: 求解麦克斯韦方程组<sup>[2~4]</sup>; 采用菲涅耳衍射公式<sup>[5,6]</sup>等. 将几种方法进行对比, 对精度和运算速度等因素综合考虑后, 决定选取菲涅耳-霍尔基夫衍射积分公式<sup>[7]</sup>计算 SU-8 胶中的光强分布.

### 2.1 菲涅耳衍射模型<sup>[8,9]</sup>

首先我们考虑如图 1 所示的二维模型, 菲涅耳-霍尔基夫衍射积分公式为:

<sup>\*</sup> 国家杰出青年科学基金资助项目 (批准号: 50325519)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: fermi0628@163.com

2007-05-25 收到, 2007-07-14 定稿

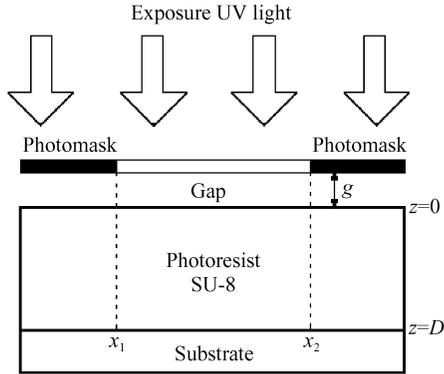


图 1 SU-8 胶光强模拟模型

Fig.1 Illustration of simulation model of light intensity on SU-8 photoresist

$$U_p = -\frac{ikU_0}{2\pi z} e^{ik|PS|} \{ [c(u_2) - c(u_1)] + i[s(u_2) - s(u_1)] \} (1+i) \quad (1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光的波长;  $|PS|$  为源点到观测点的距离;  $z'$ ,  $z$  分别为源点到掩模版、观测点到掩模版的距离;  $c(u)$  和  $s(u)$  是菲涅耳积分,  $c(u) = \int_0^u \cos\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx$ ,  $s(u) = \int_0^u \sin\left(\frac{\pi x^2}{2}\right) dx$ ,  $u_i^2 = \frac{k(x_i - x)^2}{\pi z} = \frac{2}{\lambda z} (x_i - x)^2$ ,  $i = 1, 2$ ;  $x_1, x_2$  对应于掩膜孔的左边界和右边界的坐标。

由此可以得到菲涅耳衍射的光强分布公式:

$$I_i = |U_p|^2 = \frac{I_0}{2} \{ [c(u_2) - c(u_1)]^2 + [s(u_2) - s(u_1)]^2 \} \quad (2)$$

其中  $I_0$  为入射 UV 光光强。

## 2.2 考虑丙三醇/光刻胶界面的折射与能量损失

在掩模版与光刻胶之间通常会有一定的空气间隙. 间隙形成的原因有很多种: 在光刻胶甩胶的过程中, 离心力会造成同一圆片上光刻胶厚度不均匀; 同时经过前烘后, 光刻胶的厚度与原来相比也有所改变, 造成整个圆片上光刻胶厚度不相同; 曝光过程中, 在掩模版与光刻胶中需要留一定的空隙, 避免掩模版与光刻胶接触造成图案的缺陷. 由于这层空气间隙, 在空气/光刻胶界面会有折射及反射现象。

目前在 SU-8 胶光刻的研究中, 很少有人将此因素考虑到模拟之中, 而且仅有少数研究者只考虑了反射, 而没有考虑折射. 实际上, 在接近式光刻中, 空气间隙会达到几十微米~一百多微米, 此时折射造成的影响是绝对不能忽略的. 所以本文对 SU-8 胶影像成型的求解中, 将第一次正式引入折射的考虑。

在本研究中, 由于将丙三醇填充于空气间隙中, 所以需要考虑丙三醇/光刻胶界面的折射。

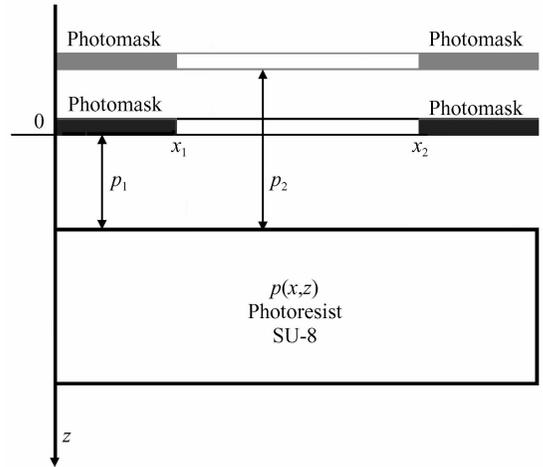


图 2 考虑折射后对空气间隙的处理

Fig.2 Disposition of air gap by refraction

设掩模版和光刻胶之间的丙三醇间隙的高度为  $p_1$  (如图 2 所示). 在对折射建模时, 我们假设将掩模版与光刻胶之间的丙三醇间隙内填满光刻胶<sup>[5]</sup>. 为了在系统中得到与原丙三醇/光刻胶界面所在位置相同的波前分布, 以确保进入实际光刻胶的波的传播完全一样, 需要将掩模版向上推移; 此时掩模版与实际光刻胶所在位置之间的距离变为  $p_2$ . 这样, 在新的系统中, 可以很方便地对光进入光刻胶后的传播进行考虑, 不需要将光的传播分解成两部分分别求解。

为了在丙三醇/光刻胶界面处得到与原来相同的波前分布,  $p_2$  与  $p_1$  之间必须满足  $p_2 = p_1 \cdot n_2/n_1$ ,  $p_1$  是原来掩模版所在位置与光刻胶之间的距离,  $n_1$  为丙三醇折射率,  $n_2$  为光刻胶折射率, 入射相位差  $\delta = \frac{2\pi p_1}{\lambda_1} (1 - (n_2/n_1)^2)$ . 则有:

$$U_p = B \{ [c(u'_2) - c(u'_1)] + i[s(u'_2) - s(u'_1)] \} (1+i) \quad (3)$$

其中  $u'_i = \frac{2(x_i - x)^2}{\lambda_2 z_2} = \frac{2n_2}{\lambda_1 n_1 (z - p_1 + p_2)} (x_i - x)^2$ ,  $i = 1, 2$ .

光强公式为:

$$I_i = \frac{I_0}{2} \{ [c(u'_2) - c(u'_1)]^2 + [s(u'_2) - s(u'_1)]^2 \} \quad (4)$$

除了折射之外, 在丙三醇/光刻胶界面上还会产生能量的损失, 这是由光线的反射造成的, 此时光源的能量并没有能够完全耦合进光刻胶中. 能够耦合进光刻胶的能量为<sup>[10]</sup>:

$$I_0 = (1 - R_1) I_{\text{lamp}} \quad (5)$$

式中 反射率  $R_1 = ((n_2 - n_1)/(n_2 + n_1))^2$ ;  $I_{\text{lamp}}$  为光源的强度。

在光刻胶/衬底界面也会发生反射. 在光刻胶中的  $p_1$  点处的反射光强  $I_{rp_1}$  等于以光刻胶/衬底界面为对称轴时的对称点  $p_2$  点处的光强值  $I_{ip_2}$  与光刻胶/衬底界面反射率的乘积<sup>[5]</sup>：

$$I_{rp_1} = R_2 I_{ip_2} \quad (6)$$

其中  $R_2$  表示光刻胶/衬底界面的反射率. 对于厚胶来讲, 反射造成的驻波效应可以忽略, 则总光强为：

$$I = I_i + I_r \quad (7)$$

由此得到最终光强公式为：

$$I = \frac{(1 - R_1) I_{lamp}}{2} \{ [c(u'_2) - c(u'_1)]^2 + [s(u'_2) - s(u'_1)]^2 \} + R_2 \{ [c(u'_4) - c(u'_3)]^2 + [s(u'_4) - s(u'_3)]^2 \} \quad (8)$$

其中  $u'_i = \frac{2(x_i - x)}{\lambda_2 z_2} = \frac{2n_2}{\lambda_1 n_1 (z - p_1 + p_2)} (x_i - x)^2, i = 1, 2; u'_i = \frac{2(x_i - x)}{\lambda_2 z'_2} = \frac{2n_2}{\lambda_1 n_1 (z' - p_1 + p_2)} (x_i - x)^2, i = 3, 4.$

### 3 利用丙三醇补偿法消除衍射效应

厚胶频繁涂覆会造成光刻胶表面厚度的不均匀, 这源于硅片边界上光刻胶的上冒气泡、光刻胶涂覆厚度的阶梯性变化和在软烘工艺中不均衡的表面张力作用下光刻胶流动引起的光刻胶表面厚度的不均匀性. 昂贵的光刻胶喷射机, 如 Karl Suss RC-8 厚光刻胶涂胶机, 普遍用于解决上冒气泡问题, 然而, 它不能避免另两个问题. 当厚度为 0.1~1mm 的光刻胶接触到掩模版时, 由标准光刻胶喷射机和热阳极软烘机引起的厚度不均匀性能够轻易地造成 30~100 $\mu$ m 的空气间隙. 通过上述的空气间隙光刻掩模版图形会引起最终影像成形图形的畸变. 影响 UV 光刻技术中图形尺寸和侧壁轮廓的关键因素是非涅耳衍射. 非涅耳衍射使图形边缘获得了更多的能量, 造成图形在边缘上的扩张. 因此, 有学者提出了利用丙三醇补偿消除空气间隙中的衍射效应的方法, 本文对该方法进行了模拟分析.

丙三醇俗名甘油, 是无色、无味、有甜味的粘滞性液体; 密度 1.2613(24/4 $^{\circ}$ C); 沸点 290 $^{\circ}$ C (分解); 熔点 17.9 $^{\circ}$ C; 折射率  $n_1$  为 1.6<sup>[11]</sup>; 可与水以任何比例混溶. 本研究利用丙三醇与 SU-8 胶的折射率 ( $n_2 = 1.67$ ) 相近的特点, 将其填充在掩模版与光刻胶中间的空气间隙中, 以减小空气间隙造成的衍射效应.

在模拟中, 曝光使用波长为 365nm 的 UV 光; 光刻胶的厚度为 300 $\mu$ m; 掩膜孔宽为 60 $\mu$ m. 图 3 显示了掩模版和光刻胶间的空气间隙厚度不同时非涅耳衍射的强度分布. 图 3(a) 中空气间隙分别为

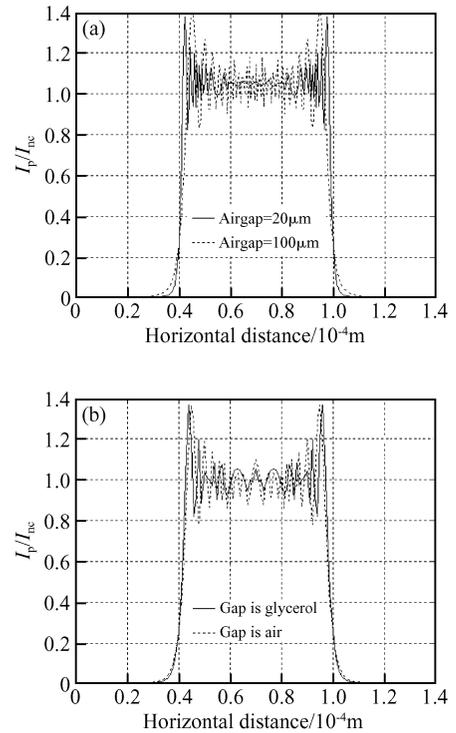


图 3 光刻胶表面 1 $\mu$ m 处的非涅耳衍射强度分布 (a)空气间隙分别为 20 $\mu$ m,100 $\mu$ m;(b)间隙为 100 $\mu$ m,分别为空气和丙三醇

Fig.3 Light intensity distribution of Fresnel diffraction at 1 $\mu$ m top surface of photoresist (a)Thickness of air gap is 20 $\mu$ m and 100 $\mu$ m;(b) Gap is air and glycerol with 80 $\mu$ m thickness

20 $\mu$ m 和 100 $\mu$ m, 可以发现当空气间隙的厚度下降时, 非涅耳衍射的强度分布更接近于理想状态下的强度分布. 图 3(b) 中将厚度为 100 $\mu$ m 的空气间隙填充丙三醇, 从图中可以明显看出当在光刻胶和掩模版之间填充丙三醇时, 强度分布同样更接近于理想状态. 这个工艺步骤能够在曝光时产生更垂直的光刻胶侧壁.

图 4 显示了在掩模版和光刻胶之间补偿丙三醇之后, 光刻胶不同厚度处的非涅耳衍射强度分布. 该图中模拟曝光使用波长为 365nm 的 UV 光, 光刻胶厚度为 300 $\mu$ m, 掩膜孔宽为 60 $\mu$ m, 间隙厚度为 100 $\mu$ m. 并且考虑了 SU-8 胶对 UV 光的衰减率  $B(r)$  和光刻胶/衬底的反射率  $R_2$ <sup>[5]</sup>, 衰减函数为  $B(r) = 1 - C \times r^D$ , 其中常数  $C$  和  $D$  分别为 0.0655376833 和 0.4033291104<sup>[1]</sup>; 反射率  $R_2 = ((n_{si} - n_R)/(n_{si} + n_R))^2$ , 对 SU-8 胶和硅衬底,  $n_{si} = 6.8, n_R = 1.67, R_2 \approx 0.37$ .

从图 4 中, 可以看到在光刻胶厚度为 10, 150 和 300 $\mu$ m 处的非涅耳衍射强度. 随着光刻胶厚度的增加, 掩膜孔边缘坐标处的震荡频率降低, 并且光强分

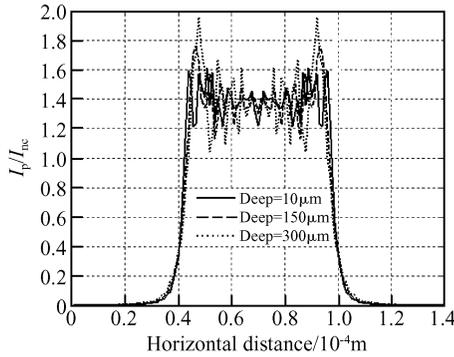


图 4 光刻胶厚度为 10、150 和 300 $\mu\text{m}$  处的菲涅耳衍射强度分布

Fig.4 Light intensity distribution of Fresnel diffraction at 10 $\mu\text{m}$ , 150 $\mu\text{m}$ , 300 $\mu\text{m}$  depth in photoresist

布逐渐偏离掩膜孔边缘坐标,菲涅耳衍射逐渐退化为夫琅和费衍射(一种在宏观世界中出现较多的衍射效应).另外由于存在衬底的反射( $R_2 = 0.37$ ),在靠近衬底的地方反射光对光刻胶内光强分布的影响显著,其光强数值比较大.

图5显示了光刻胶中的光强分布.图形上方是

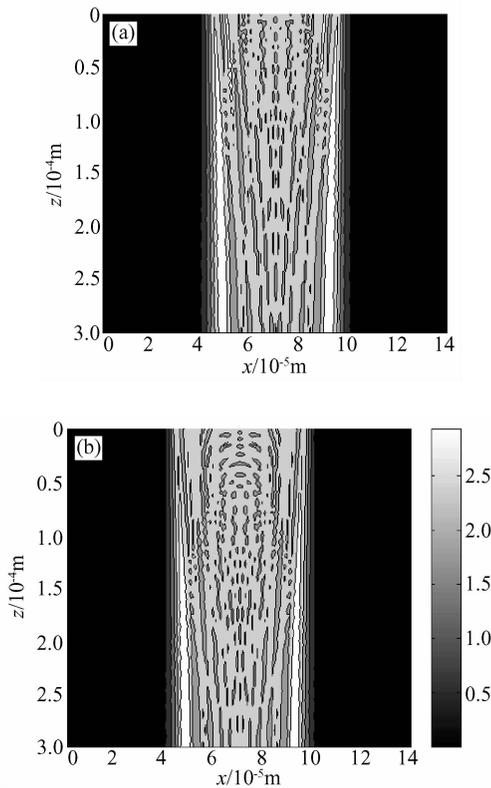


图 5 光刻胶中的光强分布 (a)空气间隙;(b)丙三醇补偿 间隙厚度为 100 $\mu\text{m}$ .

Fig.5 Light intensity distribution in photoresist, gap thickness is 100 $\mu\text{m}$  for air (a) and glycerol (b) compensation

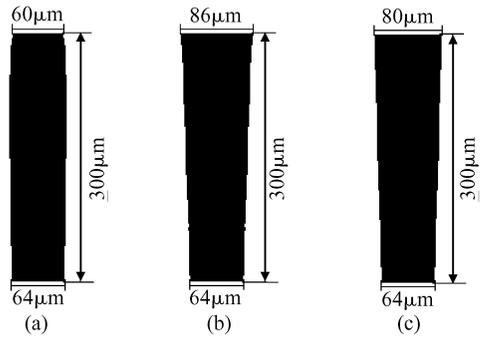


图 6 完整系统模拟结果 (a)无间隙曝光;(b)有空气间隙;(c)丙三醇补偿

Fig.6 Simulation results by integrated system (a) No gap; (b) With air gap; (c) Glycerol compensation

间隙层,在该图中没有画出 UV 光从上方照射下来;图形的下底是光刻胶厚度为 300 $\mu\text{m}$  的位置.该图模拟曝光使用光源强度为 1.8mW/cm<sup>2</sup>、波长为 365nm 的 UV 光,光刻胶厚度为 300 $\mu\text{m}$ ,掩膜孔宽为 60 $\mu\text{m}$ ,间隙厚度为 100 $\mu\text{m}$ .同样考虑了 SU-8 胶对 UV 光的衰减率和光刻胶/衬底的反射率( $R_2 = 0.37$ ).由于光刻胶中的光波存在干涉,光强不是均匀分布的,某些位置数值较大,某些位置数值较小.图 5(b)与图 5(a)相比,光强分布更加均匀,在靠近光刻胶下底的地方,光强衰减没有图 5(a)严重,光强分布的侧壁轮廓线比较垂直;而图 5(a)中的光强分布在下底处相比上底处明显要窄,呈现倒梯形形状,这样显影出来的结构也会是一个明显的倒梯形形状.

### 4 模拟结果及分析

在利用光刻胶光强分布对最后显影结果作预测时,采用的是阈值模型,此时光强等高线图可以作为最后显影结果的一个参考预测.这并不十分精确,因为其没有考虑前烘、曝光时光刻胶中的化学反应、后烘以及显影速率等因素.在本研究中,将厚胶结构的工艺过程做成了一个完整的模拟系统.

图 6 是在完整的模拟系统下光刻胶的最后显影结果.该图模拟曝光使用光源强度为 2.6mW/cm<sup>2</sup>、波长为 365nm 的 UV 光,曝光时间为 500s, SU-8 胶厚度为 300 $\mu\text{m}$ ,掩膜孔宽为 60 $\mu\text{m}$ ,间隙厚度为 100 $\mu\text{m}$ .图 6(a)是无间隙情况下显影后的形貌.可以看出,当掩膜版和光刻胶之间没有间隙(理想的硬接触)时,显影后的结构具有垂直的侧壁,接近于理想状况.图 6(b)是间隙为空气时的显影结果.从图中可以看出,显影后的结构呈现明显的倒梯形,达不到垂直侧壁的要求.而图 6(c)中,由于在掩膜版和光刻胶间隙间填充了丙三醇,光刻胶显影后的侧壁

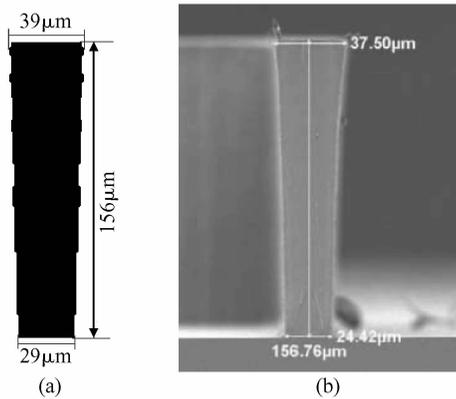


图 7 完整系统模拟结果(a)与文献[1]中的实验结果(b)对比  
空气间隙厚度为  $100\mu\text{m}$ , SU-8 胶厚为  $156\mu\text{m}$ , 掩膜孔宽为  $25\mu\text{m}$ .

Fig. 7 Simulation result (a) compared with experiment result (b) in Ref. [1] for  $100\mu\text{m}$  air gap thickness,  $156\mu\text{m}$  SU-8 thickness and  $25\mu\text{m}$  linewidth

比较垂直, 削弱了倒梯形结构的形成. 从而进一步说明在掩膜版和光刻胶间隙中填充丙三醇有利于制作高深宽比的垂直侧壁结构. 不论是图 6(b) 还是图 6(c), 光刻胶下底宽度明显比上底宽度小得多, 这是因为 SU-8 胶对 UV 光的吸收系数随着光波在光刻胶中的传播深度增加而衰减, 下底的光强比上底要小, 造成显影时的不充分.

从图 6 中, 还看到显影后的结构比理论的结构要宽, 这是由于在模拟程序中考虑了溶胀等因素.

图 7 显示了完整的系统模拟结果以及文献[1]中的实验结果. 文献[1]中, 图 7(b) 曝光使用能量密度为  $1800\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、波长为  $365\text{nm}$  的 UV 光, SU-8 胶厚度为  $156\mu\text{m}$ , 掩膜孔宽为  $25\mu\text{m}$ , 空气间隙厚度为  $100\mu\text{m}$ , 曝光时间未提供. 从文献[1]的实验结果可以看出, 当掩膜版和光刻胶之间存在空气间隙时, 衍射效应非常明显, 造成光刻胶显影后的结构呈现倒梯形形状. 这对于制作具有垂直侧壁结构的高深宽比结构是非常不利的. 图 7(a) 是根据文献中提供的图 7(b) 的参数, 在本系统中模拟后的结果. 可以看出, 虽然模拟结果的倒梯形形状没有实验结果明显, 但是模拟结果和实验结果大体的趋势是一致的.

图 8 同样显示了完整的系统模拟结果以及文献[1]中的实验结果. 但是与图 7 相比, 两者参数有所不同, 而且图 8 中间隙层填充丙三醇用以消除衍射效应. 文献[1]中, 图 8(b) 曝光使用能量密度为  $1800\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、波长为  $365\text{nm}$  的 UV 光, SU-8 胶厚度为  $116\mu\text{m}$ , 掩膜孔宽为  $25\mu\text{m}$ , 间隙厚度为  $100\mu\text{m}$ , 并填充丙三醇, 曝光时间未提供. 从文献[1]的实验结果可以看出, 当掩膜版和光刻胶之间的间隙层填充丙三醇时, 显影后的光刻胶结构侧壁垂直. 这是因为间隙层的衍射效应得到了削弱. 图 8(a) 是

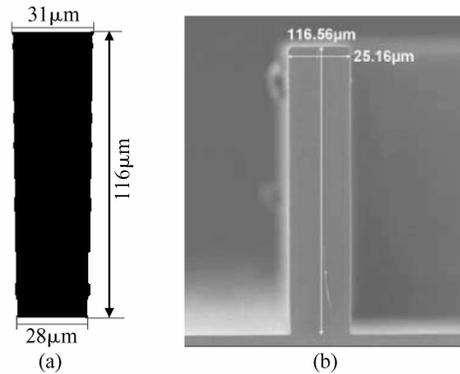


图 8 完整系统模拟结果(a)与文献[1]中的实验结果(b)对比  
空气间隙厚度为  $100\mu\text{m}$ , SU-8 胶厚为  $116\mu\text{m}$ , 掩膜孔宽为  $25\mu\text{m}$ .

Fig. 8 Simulation result (a) compared with experiment result (b) in Ref. [1] for  $100\mu\text{m}$  air gap thickness,  $116\mu\text{m}$  SU-8 thickness and  $25\mu\text{m}$  linewidth

根据文献中提供的图 8(b) 的参数, 在本系统中模拟后的结果. 可以看出, 模拟的光刻胶结构具有垂直的侧壁, 虽然跟实验结果有一定的误差, 但总体的趋势是一致的. 由此, 可以得出结论: 在掩膜版和光刻胶之间的间隙层中补偿丙三醇能够消除衍射效应, 得到具有垂直侧壁的高深宽比结构.

图 9(b) 也是文献[1]中的实验结果. 该结果同样是在间隙层中填充丙三醇之后得到的, 只是将 SU-8 胶厚度变为  $130\mu\text{m}$ , 掩膜孔宽变为  $30\mu\text{m}$ , 空气间隙厚度不变, 仍为  $100\mu\text{m}$ . 图 9(a) 是根据图 9(b) 的结构参数, 在本系统中模拟后的结果. 模拟得到的光刻胶结构宽度与实验相比有一定误差, 上底误差大约为  $5\mu\text{m}$ , 下底误差较小, 大约为  $2\mu\text{m}$ . 模拟得到的结果与实验结果大体上是相近的, 也验证了利用丙三醇补偿空气间隙可以消除衍射效应, 得到垂直的侧壁结构.

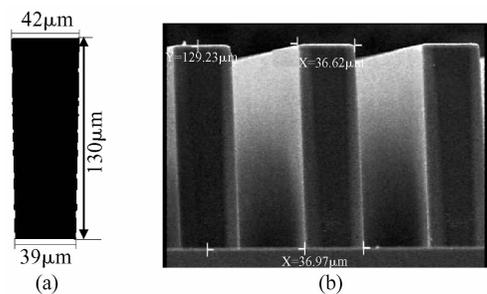


图 9 完整系统模拟结果(a)与文献[1]中的实验结果(b)对比  
空气间隙厚度为  $100\mu\text{m}$ , SU-8 胶厚为  $130\mu\text{m}$ , 掩膜孔宽为  $30\mu\text{m}$ .

Fig. 9 Simulation result (a) compared with experiment result (b) in Ref. [1] for  $100\mu\text{m}$  air gap thickness,  $130\mu\text{m}$  SU-8 thickness and  $30\mu\text{m}$  linewidth

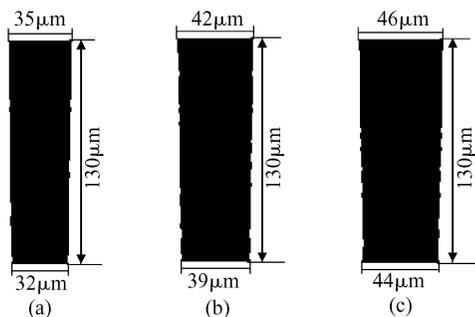


图 10 曝光时间对模拟结果的影响 (a) 50s; (b) 150s; (c) 250s

Fig. 10 Simulation results at different exposure times (a) 50s; (b) 150s; (c) 250s

在微结构的制造过程中,光刻是最为重要的环节,而曝光时间的长短往往决定了显影后光刻胶结果的形貌.在文献[1]中,曝光时间对实验结果的影响并未提及,所以本文结合文献[1]和[12]中的参数,改变曝光时间,观察其对模拟结果的影响.图 10 中,模拟曝光使用光源强度为  $2.6\text{mW}/\text{cm}^2$ 、波长为  $365\text{nm}$  的 UV 光, SU-8 胶厚度为  $130\mu\text{m}$ , 掩膜孔宽为  $30\mu\text{m}$ , 间隙厚度为  $100\mu\text{m}$ , 曝光时间分别为 50, 150 和 250s. 根据文献[12]提供的工艺参数,估算出当 SU-8 胶厚度为  $130\mu\text{m}$  时,比较合适的曝光时间大约为 150s. 曝光时间为 50s 时明显是欠曝光状态,曝光时间为 250s 时是过曝光状态.从图 10 中可以看出:欠曝光时,光刻胶显影后的结构横向宽度比较小,与实验室结果相差比较多;过曝光时,光刻胶显影后的结构比较“胖”,这说明曝光时间越长,光刻胶中吸收的光强越多,显影后的光刻胶横向宽度越大.

此外,在模拟中发现,当间隙层填充介质的折射率比较大时(达到 2 以上),显影后的光刻胶侧壁相当垂直,这对今后探索新的材料作为填充介质有很大帮助.

## 5 结论

根据菲涅耳衍射模型,利用完整的工艺模拟系统,对有关学者提出的通过丙三醇补偿消除空气间隙衍射效应的方法进行了模拟.从模拟结果可以看

出,这种方法可以有效消除掩膜版和光刻胶之间的衍射效应,从而得到具有垂直侧壁的高深宽比光刻胶结构.从本研究中,还发现可以尝试其他折射率大于 SU-8 胶折射率的材料来消除衍射效应,从而为下一步的研究提供了方向.

## 参考文献

- [1] Chuang Y J, Tseng F G, Lin W K. Reduction of diffraction effect of UV exposure on SU-8 negative thick photoresist by air gap elimination. *Microsystem Technologies*, 2002, 8: 308
- [2] Cole D C, Barouch E, Conrad E W, et al. Using advanced simulation to aid microlithography development. *Proceedings of the IEEE*, 2001, 89(8): 1194
- [3] Pyka W, Kirchauer H, Selberherr S. Three-dimensional resist development simulation-benchmarks and integration with lithography. *Microelectronic Engineering*, 2000, 53: 449
- [4] Andreas E, Christian K. Rigorous simulation of lithographic exposure of photoresist over a nonplanar wafer. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4829: 775
- [5] Henke W, Weiss M, Schwalm R, et al. Simulation of proximity printing. *Microelectronic Engineering*, 1990, 10: 127
- [6] Kang W J, Rabe E, Kopetz S, et al. Novel exposure methods based on reflection and refraction effects in the field of SU-8 lithography. *J Micromech Microeng*, 2006, 16: 821
- [7] Born M, Wolf E. *Principles of optics*. Beijing: Electronics Industry Press, 2005 (in Chinese) [马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理. 北京: 电子工业出版社, 2005]
- [8] Feng Ming, Huang Qing'an, Li Weihua, et al. The simulation of SU-8 photoresist profile in deep UV lithography. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(9): 1465 (in Chinese) [冯明, 黄庆安, 李伟华, 等. SU-8 胶深紫外光刻模拟. 半导体学报, 2007, 28(9): 1465]
- [9] Feng Ming, Huang Qing'an, Li Weihua, et al. Simulation of the distribution of the deep UV light intensity in SU-8 PR. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1470 (in Chinese) [冯明, 黄庆安, 李伟华, 等. SU-8 胶在深紫外光源下的光强分布模拟. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1470]
- [10] Gaudet M, Camart J C, Buchaillet L, et al. Variation of absorption coefficient and determination of critical dose of SU-8 at 365nm. *App Phys Lett*, 2006, 88: 024107
- [11] Hung K Y, Tseng F G, Chou H P. Application of 3D gray mask for the fabrication of curved SU-8 structures. *Microsystem Technologies*, 2005, 11: 365
- [12] Zhang Ye, Chen Di, Zhang Jinya, et al. Process optimization of optical lithography of SU-8 photoresist. *Micro Fabrication Technology*, 2005, 9(3): 36 (in Chinese) [张晔, 陈迪, 张金娅, 等. SU-8 胶光刻工艺参数优化研究. 微细加工技术, 2005, 9(3): 36]

## Simulation of the Diffraction Effect in Exposure on a SU-8 Photoresist and the Glycerol Compensated Method\*

Zhu Zhen<sup>†</sup>, Huang Qing'an, Li Weihua, Zhou Zaifa, and Feng Ming

(Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** According to a Fresnel diffraction model, and considering the reflection and refraction at the glycerol/SU-8 interface, this paper simulates the aerial image when glycerol is applied between the photomask and resist. Compared to the experimental results, the model can describe the lithography process competently and be applied in design.

**Key words:** SU-8 photoresist; Fresnel diffraction; glycerol

**EEACC:** 2550G; 2575

**Article ID:** 0253-4177(2007)12-2011-07

---

\* Project supported by the National Outstanding Young Scientist Foundation of China (No. 50325519)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: fermi0628@163.com

Received 25 May 2007, revised manuscript received 14 July 2007