

# 纳米级电子束光刻技术及 ICP 深刻蚀工艺技术的研究

李群庆\*, 张立辉, 陈墨, 范守善

清华大学物理系清华-富士康纳米科技研究中心, 北京 100084

\* E-mail: [qunqli@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:qunqli@mail.tsinghua.edu.cn)

收稿日期: 2008-10-16; 接受日期: 2009-03-02

国家重点基础研究发展计划(“973”计划) (批准号: 2007CB935301) 资助项目

**摘要** 对 100 kV 高压电子束光刻系统的曝光工艺进行了系统研究, 针对正性电子束抗蚀剂 ZEP520A 进行了工艺参数的优化, 在具有合理厚度、可供后续加工的光刻胶上获得了占空比为 1:1, 线宽为 50 nm 的光栅图形. 针对 ICP 刻蚀工艺进行了深入研究, 探讨了刻蚀腔体气压、电极功率、气体流量等工艺参数对刻蚀效果的影响, 最终在硅基底上获得了线宽为 100 nm, 占空比为 1:1, 深度为 900 nm 的光栅图形, 光栅的边壁波纹起伏小于 5 nm. 100 nm 以下深硅刻蚀技术的发展, 有利于工作区域在可见光范围的纳米光学器件的制备.

**关键词**

电子束光刻  
ZEP520 电子抗蚀剂  
反应离子刻蚀  
纳米加工

随着微电子集成度的不断提高, 带动了微纳加工能力的不断进步, 同时也使得多个学科与纳米科技交叉, 进入到纳米时代, 其中以光学领域的变化尤为引人注目. 传统的光学光刻技术和光学成像技术已经突破光学衍射极限, 与光相互作用的结构和器件的特征尺寸已经从波长量级进一步减小到纳米(nm)量级, 使得微光学的发展过渡到纳米光学和亚光波长光学阶段. 而先进的光刻技术<sup>[1]</sup>、刻蚀技术和薄膜技术则占据纳米光学的核心位置, 是实现理论设计思想和器件集成应用的前提. 纳米光学元件主要是周期性结构、半周期性结构, 如光栅(密集线条结构)、波带片(环状结构)、光子晶体(周期性孔状结构). 这些纳米结构通常要求在较大的区域内有相当好的均匀性及误差控制, 同时纳米光学器件还具有高深宽比的特性, 因此对光刻技术和后续工艺都提出了相当高的要求.

亚波长光栅在纳米光学领域有着极为重要的作用, 其结构由超长密集纳米线条组成, 通常需要长度达几个毫米以上, 且线条宽度小于 200 nm, 占空比达到 1:1. 电子束直写曝光系统具有易于控制、精度高、灵活性大的特点, 成为当今纳米结构研究的重要制备工具<sup>[2]</sup>. 目前一般实验室条件下使用的纳米级电子束光刻系统由于受到加工稳定性(电子束漂移)和电子束曝光效率低等因素的影响, 主要用于小范围的图形加工, 比较难应用于大面积、长而直的结构图形的曝光. 国际上加工亚波长光栅等复杂结构的元器件主要通过 X 射线曝光手段实现. 但由于 X 射线目前还难以实现扫描图形曝光, 通常只能用于复制曝光, 而电子束曝光用的掩模(通常是在硅片上制造出薄膜衬底的金属吸收体掩模图形)依然需要电子束曝光系统技术来制备. 因此, 在实验室条件下对电子束直写曝光工艺技术在纳米结构加工领域的应用研究仍然十

分重要。

硅深刻蚀工艺在尺寸为微米量级的MEMS器件的制备中得到广泛的应用。但当沟槽宽度为几百纳米时, 利用反应离子刻蚀工艺制备高深宽比的硅基结构在工艺中存在相当的困难。采用电感耦合等离子体源(ICP)设备及BOSCH工艺可以帮助制备陡直性很好的沟槽结构, 已经有多个研究组报道利用BOSCH工艺制备沟槽宽度在 200 nm到微米量级的结构<sup>[3-7]</sup>。但是这种工艺的缺点则在于刻蚀后容易产生沟槽尺寸大于掩模图形的尺寸, 同时侧壁的平滑度较差。目前报道的用BOSCH工艺实现的侧壁表面波纹起伏在 20 nm左右<sup>[8]</sup>。

本文重点针对 100 kV 电子束光刻系统的曝光工艺进行深入研究, 特别是针对密集图形这一难度较高的纳米结构在正性电子束抗蚀剂情况下的曝光参数进行了优化, 在刻蚀工艺需要的抗蚀剂厚度上获得了高精度纳米光栅结构, 使得后续加工工艺可以顺利开展。同时针对 ICP 刻蚀工艺进行了深入研究, 获得了周期为 200 nm, 深宽比为 9:1, 侧壁平滑度为 5 nm 的硅基光栅结构。

## 1 实验条件

本文中采用的衬底材料为硅单晶基底材料。首先将正性电子束胶 ZEP520A 旋涂在衬底上, 涂胶速率 2500~7500 r/min, 旋涂时间 60 s, 然后用热板在 180℃前烘 120 s 以去除其中的有机溶剂。电子束曝光使用的设备是日本电子公司的 100 kV-JBX6300FS 系统, 通常采用的曝光束流为 100~500 pA。曝光后用乙酸正戊酯显影 90 s, 异丙醇定影 30 s。

电子束曝光、显影后, 利用氧等离子体去除样品上的底膜, 保证在曝光区域没有残余的光刻胶。然后利用 ICP 刻蚀系统(日本 Anelva 公司的 Helicon 型号刻蚀系统)将曝光图形转移到硅基底上。实验中选择的参数变化范围: 射频功率 250~500 W; 基板自偏置功率 5~11 W; 刻蚀气体 SF<sub>6</sub> 流量 20~100 sccm, 刻蚀周期 2~6 s; 保护气体 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 流量 20~100 sccm, 沉积周期 2~11 s; 气压 0.6~1.0 Pa。最后利用丁酮去胶。

电子束抗蚀剂胶层厚度采用椭偏仪测定。曝光结果及刻蚀结果利用荷兰 FEI 的 Sirion200 扫描电镜进行观测及分析。

## 2 电子束光刻工艺研究

### 2.1 电子束光刻系统

电子束曝光过程中, 通过增加加速电压, 可以有效减小电子束的前散射和背散射电子对抗蚀剂成像的影响, 从而有效抑制由于电子散射造成的临近效应, 有利于高深宽比超微细结构图形的加工。

最高电子加速电压为 100 kV 的 JBX-6300FS 电子束曝光系统是一部典型的矢量扫描圆形电子束曝光系统, 采用高亮度 ZrO/W 肖特基热场发射电子枪, 以及四级电子束聚焦系统。该系统表现为工作效率较高, 具有极高的稳定性, 可以长时间连续工作并保证加工样品的均匀性。它的工作方式有两种: 快速模式(4th 透镜)和纳米光刻模式(5th 透镜)。两种模式下扫描主频均可达 12 MHz, 但扫描场大小不同。如在 100 kV, 4th 透镜的扫描场最大为 500 μm×500 μm, 而 5th 透镜的扫描场只有 62.5 μm×62.5 μm, 相应最小扫描步距则分别为 1 nm 和 0.125 nm。曝光时步距的设定受扫描主频的限制, 为使曝光图形的边缘平滑应在主频允许下选择尽量小的步距。

通常来说, 电子束的束斑大小决定了曝光最细设计线宽, 设计线宽应至少为束斑的3倍以上<sup>[9]</sup>。本系统的最小束斑约为 2 nm, 而在 50 nm厚的ZEP520A电子束抗蚀剂上我们可以获得的最细线宽为 8 nm, 这也是此系统的极限线宽。由于电子束的束斑大小和束流大小、光阑大小等直接的相关, 而束流大小、步距等又决定了曝光时间的长短, 因此, 工作时需要综合考虑决定采用的束流及工作模式。图 1 分别为 100 kV 两种工作模式下电子束束斑随束流变化的情况。可以看出, 在 5th透镜时利用 25 μm的物镜光阑, 电子束束斑最小约为 2 nm, 而在 4th透镜时则需采用 60 μm的物镜光阑, 电子束束斑最小约为 6 nm, 并且这一束斑大小在一定束流范围内都比较稳定。

### 2.2 正性抗蚀剂 ZEP520A 的工艺条件研究

ZEP520A是一种分辨率很高的非化学放大正性电子抗蚀剂<sup>[10]</sup>。与PMMA相比, 它的灵敏度更高<sup>[11]</sup>, 曝光速度快3倍<sup>[12]</sup>。由于ZEP520A具有较强的抗蚀能力, 可以直接将其曝光显影后的抗蚀剂图形作为掩模进行干法刻蚀, 将转移到衬底上, 因此是最为

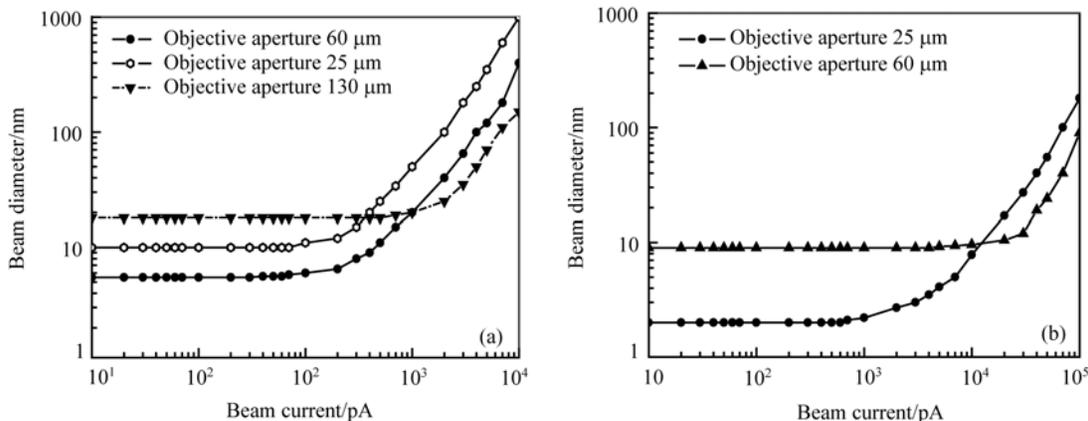


图 1 电子束束斑与束流大小的关系  
(a) 第四级透镜工作时; (b) 第五级透镜工作时

常用的正性电子束抗蚀剂之一, 对它的曝光特性的研究对于精细图形的加工非常必要. 在电子束曝光研究中, 由于电子束临近效应的影响, 设计图形的形貌与实际曝光显影后得到的图形会有一些的偏差. 这一偏差值与图形结构、尺寸以及曝光剂量密切相关, 准确掌握这一偏差对于设计意图的最终实现尤为重要, 这就是电子束曝光邻近效应几何修正或剂量校正技术.

我们对设计图形占空比为 1:1, 长度为 1 cm 的密集线条进行了多次曝光实验, 结果显示, 对于涂胶速率 5500 r/min(胶厚 330 nm)来说, 当设计图形线宽为 100 nm 时, 只有当曝光剂量达到 200  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 图形才可以得到完全曝光, 这一曝光剂量明显比 50 kV 电子束曝光机曝光同一尺寸图形所需曝光剂量大. 这是由于高压电子束的穿透能力强, 因而前散射及背散射相

应变小导致<sup>[13]</sup>. 表 1 中列出了不同设计线宽时所需最小剂量, 以及曝光图形的实际线宽. 可以看出, 当束流较小(100 pA), 使用最小剂量时, 设计图形与实际图形的偏差基本在 20 nm 左右, 这一数值相对 50 kV 电子束曝光机也要小得多<sup>[14]</sup>. 这一偏差随着曝光剂量的增加, 也会有相应的增加.

实验中还发现, 对百纳米以下图形的曝光, 曝光条件较为苛刻, 曝光窗口很窄. 曝光剂量不宜过小, 否则曝光量不足导致欠曝光, 显影时抗蚀剂不能显到底或图形不可分辨. 但曝光剂量稍大则过曝光, 显影后线条变窄容易坍塌. 当目标线宽/间距(L/S)为 70 nm/70 nm 时, 首先可以调整设计图形的 L/S 为 50 nm/90 nm, 同时曝光剂量区间只能选择 280~320  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ . 图 2 清晰的显示了随着曝光剂量的增加, 曝光图形的变化.

表 1 不同尺寸的孤立线条及密集线条在不同曝光剂量时的实际线宽, ×号表示在此剂量下图形无法完全曝光

设计线宽/nm	结构	剂量/ $\mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$					
		200	240	280	320	360	400
30	孤立线条	×	×	×	×	×	×
	密集线条	×	×	×	×	×	50
50	孤立线条	×	×	×	×	88	94
	密集线条	×	×	70	73	×	×
70	孤立线条	×	×	95	111	118	123
	密集线条	×	90	94	105	110	118
100	孤立线条	122	128	140	145	145	151
	密集线条	120	118	122	138	149	150
200	孤立线条	220	240	240	262	260	260
	密集线条	208	225	237	241	237	252

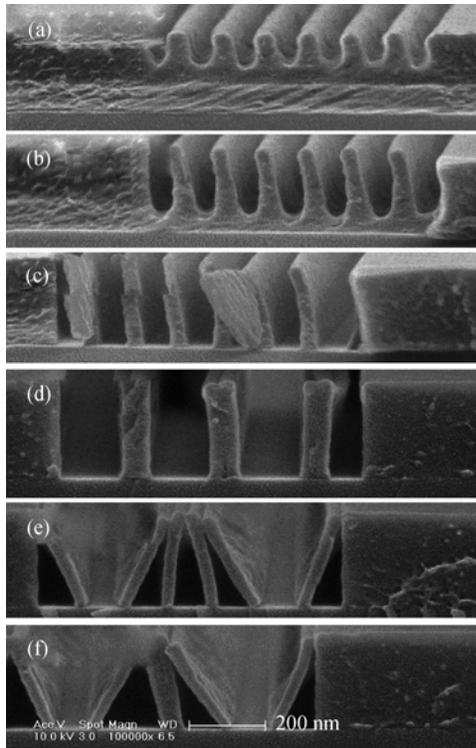


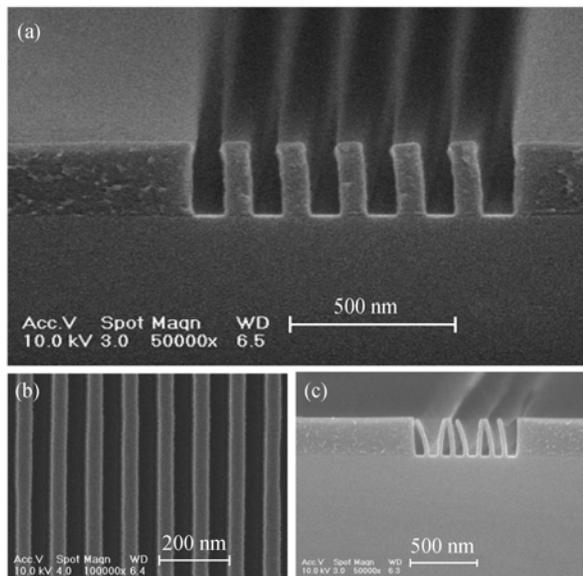
图 2 图形设计为 L/S: 50 nm/90 nm 时, 不同曝光剂量下获得的图形  
 (a) 200  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ; (b) 240  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ; (c) 280  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ;  
 (d) 320  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ; (e) 360  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ; (f) 400  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

后续的实验显示, 当我们改变胶厚时, 不同设计线宽所需最小剂量也有所改变, 如表 2 所示. 在不同的抗蚀剂灵敏度和抗蚀剂厚度的条件下, 对于某固定厚度的抗蚀剂存在着分辨率工艺极限, 所以也不能完全通过调整工艺参数, 准确调节曝光系统等手段来无限制提高曝光分辨率. 例如使用 330 nm 厚的 ZEP520A 胶, 在快速模式下(4th 级透镜)只能实现 70 nm 密集线条的曝光, 更换至纳米模式下(5th 级透镜), 减小电子束斑, 也只能实现 50 nm 密集线条的曝光. 要想进一步提高工艺分辨能力, 需要减小抗蚀剂的厚度.

根据以上曝光实验的结果, 我们为了得到目标图形, 在设计图形时就应当调整图形的尺寸. 根据曝光图形与设计图形的偏差, 在设计时, 调整光栅尺寸的 L/S 为 70 nm/110 nm, 曝光剂量采用 240  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 成功获得了线宽为 90 nm, 周期为 180 nm 的 ZEP520 胶的密集线条图形. 如图 3(a)可以看出曝光及显影充分, 线条的陡直度很好; 如图 3(b)可以看出为达到线宽/间距(L/S)为 50 nm/50 nm, 1:1 占空的光栅图形, 则 L/S 应设计为 30 nm/70 nm, 并且曝光剂量只能选择在 400  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ .

表 2 不同尺寸的孤立线条及密集线条在不同胶厚, 所需的最小曝光剂量以及在此剂量获得的实际线宽, ×号表示在此厚度下胶图形无法完全曝光

剂量/线宽	胶厚			
	7500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}/285 \text{ nm}$	6500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}/308 \text{ nm}$	5500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}/330 \text{ nm}$	2500 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}/486 \text{ nm}$
设计 30 nm 孤立线条	×	×	×	×
设计 30 nm 密集线条 (L/S 30 nm/70 nm)	340 $\mu\text{C}/52 \text{ nm}$ (n-mode)	400 $\mu\text{C}/50 \text{ nm}$ (n-mode)	400 $\mu\text{C}/50 \text{ nm}$ (n-mode)	×
设计 50 nm 孤立线条	280 $\mu\text{C}/70 \text{ nm}$	280 $\mu\text{C}/75 \text{ nm}$	360 $\mu\text{C}/80 \text{ nm}$	280 $\mu\text{C}/75 \text{ nm}$
设计 50 nm 密集线条 (L/S 50 nm/90 nm)	240 $\mu\text{C}/60 \text{ nm}$	280 $\mu\text{C}/67 \text{ nm}$	280 $\mu\text{C}/70 \text{ nm}$	280 $\mu\text{C}/70 \text{ nm}$
设计 70 nm 孤立线条	240 $\mu\text{C}/90 \text{ nm}$			
设计 70 nm 密集线条 (L/S 70 nm/110 nm)	240 $\mu\text{C}/90 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/88 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/90 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/90 \text{ nm}$
设计 100 nm 孤立线条	200 $\mu\text{C}/120 \text{ nm}$	200 $\mu\text{C}/120 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/123 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/120 \text{ nm}$
设计 100 nm 密集线条 (L/S 100 nm/140 nm)	200 $\mu\text{C}/107 \text{ nm}$	200 $\mu\text{C}/110 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/120 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/120 \text{ nm}$
设计 200 nm 孤立线条	200 $\mu\text{C}/220 \text{ nm}$	200 $\mu\text{C}/220 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/230 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/220 \text{ nm}$
设计 200 nm 密集线条 (L/S 200 nm/240 nm)	200 $\mu\text{C}/220 \text{ nm}$	200 $\mu\text{C}/220 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/225 \text{ nm}$	240 $\mu\text{C}/220 \text{ nm}$



**图 3 利用优化条件制备的 ZEP520A 电子束曝光结构**  
 (a) L/S 为 70 nm/70 nm 的侧面 SEM 图像; (b) L/S 为 50 nm/50 nm 的正面 SEM 图像; (c) 曝光剂量太大或图形尺寸修正太多, 造成深宽比太大, 图形容易发生坍塌现象

### 3 ICP 深硅纳米刻蚀的工艺条件研究

为将以上获得纳米图形顺利转移到硅基底上, 并且获得高深宽比结构, 我们选择了 ICP 反应离子深硅刻蚀技术. 利用反应离子刻蚀获得高深宽比结构的第一个要求是高刻蚀速率和高选择比. 而 ICP 刻蚀技术既可以产生很高的等离子密度, 又可以维持较低的离子轰击能量, 反应离子刻蚀技术既能够满足具有高的刻蚀速率又可以控制比较高的选择比的要求. 反应离子深刻蚀的第二个要求是需要极好的各向异性及刻蚀的边缘垂直度, 否则刻蚀越深, 刻蚀图形与设计图形的偏差越大. 反应离子刻蚀从本质上讲是也具有一定的各向同性, 为了减弱侧向刻蚀, 只能在刻蚀的侧向边壁利用保护气体沉积一层抗刻的保护层. BOSCH 工艺就是通过交替转换刻蚀气体和保护气体来实现这一要求的<sup>[15]</sup>. 这种工艺具有非常好的各向异性, 刻蚀剖面的边壁垂直度一般在 90°左

右. 但由于刻蚀与钝化交替转换, 因此造成刻蚀边壁靠近表面处具体比较明显的波纹效应, 影响边壁的平滑性.

ICP 刻蚀技术中, 相关的工艺参数有: 气体流量、交替反应周期、反应室的气压、样品基板自偏置功率及射频功率、样品台的温度. 本文中使用的刻蚀设备利用液氮冷却样品台, 温度保持在 0℃. 分别对以上其他几个参数对刻蚀质量的影响进行了研究.

研究结果表明高射频功率有利于高等离子体密度的产生, 在微米级图形深刻蚀中得到广泛的应用, 但在纳米级图形刻蚀时, 由于电子束抗蚀剂胶的抗轰击能力限制, 在高功率下, 抗蚀剂很容易炭化. 然而功率过低, 等离子密度的降低又会导致刻蚀很难进行. 因此, 我们将射频功率优化在 300 W.

而基板自偏置功率对刻蚀效果的影响也较为明显. 过高或过低的偏置功率都会导致很差的沟槽形貌, 降低边壁的垂直度. 这是由于当加大基板偏置功率时, 离子轰击能力不仅对硅基底而且对抗蚀剂也得到增强, 因此导致刻蚀结构与曝光显影后的抗蚀剂图形偏差较大. 而当基板偏置功率过小时, 离子在垂直方向的动能减弱, 各向同性刻蚀的本质就会显现出来, 从而使沟槽形貌变差. 对实验结果进行分析, 我们将基板自偏置功率优化在 7~8 W.

反应室气压对刻蚀效果的影响也较为明显. 随着气压的加大, 高的等离子密度使得刻蚀速率随之增加, 但相对偏大的离子轰击能力使沟槽形貌变差, 边壁的垂直度降低, 同时侧向刻蚀明显. 但偏低的气压会使得选择性变差, 垂直方向刻蚀速率减小, 同样会导致同时侧向刻蚀明显, 使得 100 nm 以下的沟槽难以获得. 因此, 我们将气压优化在 0.8 Pa.

将以上三个参数优化之后, 我们又发现, BOSCH 工艺中刻蚀与保护气体的流量与循环周期设定对边壁的垂直度和平滑性影响最大. 我们对这几个参数进行了一系列的研究, 表 3 给出了三个典型的工艺配方:

**表 3 纳米尺度沟槽结构刻蚀参数**

配方	SF6 流量/sccm	刻蚀周期/s	C4F8 流量/sccm	保护周期/s
1	100	5	100	11
2	20	2	20	4
3	20	5	50	6

配方 1 中的气体流量和循环周期与微米级沟槽深刻蚀的最佳工艺配方一致. 图 4 给出了利用配方 1 的刻蚀效果. 可以看出沟槽垂直性很好, 陡直度为  $90^\circ$ . 刻蚀速率为  $400 \text{ nm/min}$ , 对 ZEP520 抗蚀剂胶的选择比为  $6:1$ . 但此配方的问题之一是掩模尺寸不能保持, 侧向刻蚀速率为  $22 \text{ nm/min}$ , 这使得沟槽尺寸明显加大. 例如为获得  $2 \mu\text{m}$  深的沟槽, 刻蚀时间应选择为  $5 \text{ min}$ , 此时侧向扩展即为  $110 \text{ nm}$ . 因此, 此配方只适合制备沟槽宽度在  $200 \text{ nm}$  以上的结构. 图 4 中的结构是在考虑了曝光及刻蚀两步工艺带来的图形展宽, 将设计尺寸调整为  $L/S:100 \text{ nm}/300 \text{ nm}$ , 刻蚀时间定为  $4 \text{ min}$  的之后, 获得的周期为  $400 \text{ nm}$ ,  $1:1$  占空的光栅图形结果. 此配方的第二个问题是边壁表面的波纹效应, 侧壁表面波纹起伏在  $28 \text{ nm}$ , 这对于有些光学元件来说是无法接受的.

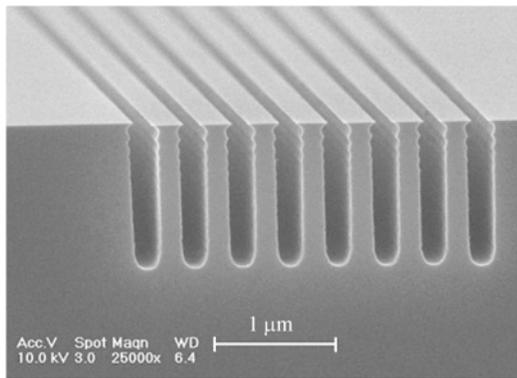


图 4 利用配方 1 所获得的刻蚀结构(射频功率  $300 \text{ W}$ , 基板自偏置功率  $8 \text{ W}$ , 气压  $0.8 \text{ Pa}$ )

为解决以上两个问题, 我们首先降低了刻蚀气体的流量与刻蚀周期, 相应的也降低了保护气体的流量与保护周期. 图 5(a) 是利用配方 2 所获得的结构. 从图中看出, 若减少刻蚀气体流量的同时也减少保护气体的流量, 即使将保护气体的周期增加, 也无法实现对侧向刻蚀的抑制, 导致沟槽宽度明显加大 ( $5 \text{ min}$  内从  $80 \text{ nm}$  增加到  $180 \text{ nm}$ ); 同时, 侧壁的平滑性也很差. 因此, 对刻蚀进一步优化, 加大保护气体的流量, 但同时调整刻蚀及保护周期, 如配方 3, 我们得到图 5(b) 所示的结果. 可以看出, 沟槽宽度  $5 \text{ min}$  内从  $80 \text{ nm}$  增加到  $100 \text{ nm}$ , 侧壁的平滑性明显改善, 侧壁表面波纹起伏小于  $5 \text{ nm}$ . 相对于配方 1, 此时刻

蚀速率有所降低, 为  $180 \text{ nm/min}$ , 对 ZEP520 抗蚀剂胶的选择比为  $4:1$ , 但侧向刻蚀  $5 \text{ min}$  只有  $20 \text{ nm}$ . 此配方优势还在于转移过程中与掩模图形偏差较小. 这样我们调整设计尺寸, 设计图形  $L/S$  为  $60 \text{ nm}/140 \text{ nm}$ , 曝光后光刻胶图形  $L/S$  为  $80 \text{ nm}/120 \text{ nm}$ , 最终经刻蚀后可获得的周期为  $200 \text{ nm}$ ,  $1:1$  占空, 深度  $900 \text{ nm}$  的光栅图形. 相对于配方 1, 配方 3 减小了图形关键尺寸, 有利于工作区域在可见光范围的纳米光学器件的制备.

可以看到使用电子束光刻胶做掩模时, 高密度等离子体对光刻胶的轰击作用不可忽视. 尽管经过优化的 ICP 工艺条件已将侧向刻蚀显著降低, 但无法将侧向刻蚀降为零. 为获得高深宽比结构, 刻蚀时间通常需要在  $5 \text{ min}$  左右, 由此产生的侧向刻蚀相对于几十纳米的线宽来讲, 依然造成明显的线条展宽, 这使得我们无法将  $L/S$  为  $50 \text{ nm}/50 \text{ nm}$ ,  $1:1$  占空的光刻胶光栅图形完全保真的转移到硅基底上. 为获得周期为  $100 \text{ nm}$  左右的硅基光栅图形, 需要将光刻胶图形首先转移到其他材料上(如金属、二氧化硅等), 然

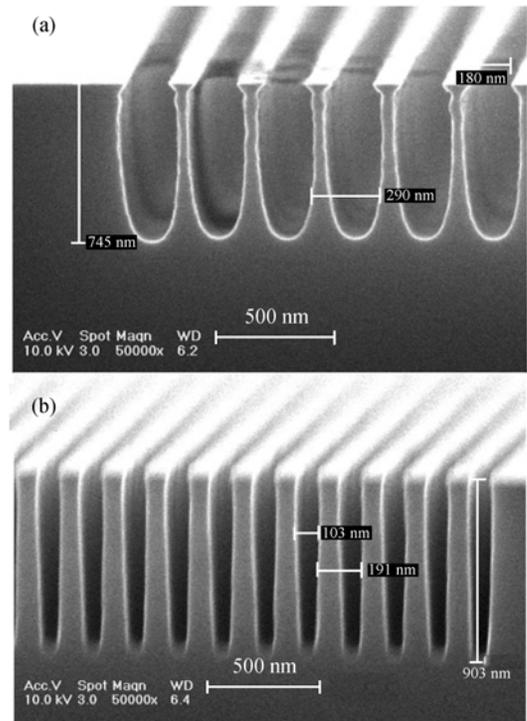


图 5 改变刻蚀配方后的实验结果(实验条件为射频功率  $300 \text{ W}$ , 基板自偏置功率  $8 \text{ W}$ , 气压  $0.8 \text{ Pa}$ )

(a) 利用配方 2 所获得的刻蚀结构; (b) 利用配方 3 所获得的刻蚀结构

后利用这些材料做掩模实现深硅刻蚀,这方面的工艺技术研究正在进行中。

#### 4 结论

本文重点介绍我们采用 100 kV-JBX-6300FS 纳米电子束光刻系统的曝光技术和 ICP 深硅刻蚀技术相结合的纳米结构加工技术的研究,特别是针对纳米级密集线条的电子束曝光和深硅刻蚀工艺进行了深入研究,主要针对正性电子束抗蚀剂 ZEP520A 形

成了一整套成熟电子束曝光工艺和深硅刻蚀工艺。同时摸索出一套纳米级密集线条电子束邻近效应几何图形修正技术和反应离子侧向刻蚀几何图形补偿技术。在优化的工艺条件下,获得了 L/S 为 50 nm/50 nm 的密集线条抗蚀剂图形,及周期为 200 nm,深宽比 9:1,占空比 1:1 的硅基光栅图形。这些技术有利于工作区域在可见光范围的纳米光学器件的制备,为完成相应的国家重大科学研究计划资助项目创造了有利条件。

#### 参考文献

- Hohenau A, Ditlbacher H, Lamprecht B, et al. Electron beam lithography, a helpful tool for nanooptics. *Microelectron Eng*, 2006, 83(4-9): 1464—1467 [\[DOI\]](#)
- 刘明, 陈宝钦, 王云翔, 等. 纳米级电子束直写曝光的基础工艺. *半导体学报*, 2003, 24(增刊): 226—228
- Ayon A A, Zhang X, Khanna R. Anisotropic silicon trenches 300—500  $\mu\text{m}$  deep employing time multiplexed deep etching (TMDE). *Sens Actuators A*, 2001, 91(3): 381—385 [\[DOI\]](#)
- Ayazi F, Najafi K. High aspect-ratio combined poly and single-crystal silicon (HARPSS) MEMS technology. *J Microelectromech Syst*, 2000, 9(3): 288—294 [\[DOI\]](#)
- McAuley S A, Ashraf H, Atabo L, et al. Silicon micromachining using a high-density plasma source: The future of technological plasmas. *J Phys D*, 2001, 34(18): 2769—2774 [\[DOI\]](#)
- Wang X D, Zeng W X, Lu G P, et al. High aspect ratio BOSCH etching of sub-0.2  $\mu\text{m}$  trenches for hyperintegration applications. *J Vac Sci Technol*, 2007, B25(4): 1376—1381
- Woldering L A, Tjerkstra R W, Jansen H V, et al. Periodic arrays of deep nanopores made in silicon with reactive ion etching and deep UV lithography. *Nanotechnology*, 2008, 19(14): 145304(1—11) [\[DOI\]](#)
- Alcater. AMS200 I-Speeder: The Advanced Deep Plasma Etching System. Technical Report, Alcatel Vacuum Technology, 2003
- Liu M, Chen B Q, Wang Y X, et al. Nano-level electron beam lithography. *Chin J Semicond*, 2003, 24(1): 24—28
- Kurihara K, Iwadate K, Namatsu H, et al. An electron beam nanolithography system and its application to Si nanofabrication. *Jpn J Appl Phys*, 1995, 34(12B): 6940—6946 [\[DOI\]](#)
- Nishida T, Notomi M, Iga R, et al. Quantum wire fabrication by E-beam lithography using high-resolution and high-sensitivity E-beam resist ZEP520. *Jpn J Appl Phys*, 1992, 31(12B): 4508—4514 [\[DOI\]](#)
- Tanenbaum D M, Lo C W, Isaacson M, et al. High resolution electron beam lithography using ZEP520 and KRS resists at low voltage. *J Vac Sci Technol*, 1996, B14(6): 3829—3833
- Tennanta D M, Fullowan R, Takemura H, et al. Evaluation of a 100 kV thermal field emission electron-beam nanolithography system. *J Vac Sci Technol*, 2000, B18(6): 3089—3094
- 龙世兵, 李志刚, 陈宝钦, 等. ZEP520 正性电子抗蚀剂的工艺研究. *微细加工技术*, 2005, (1): 6—16
- Bosch R B. Trench etch process for a single-wafer RIE dry etch reactor. US Patent, No. 4855017, 1994