

# 纳米级精细线条图形的微细加工\*

任黎明<sup>1</sup> 王文平<sup>1</sup> 陈宝钦<sup>2</sup> 周毅<sup>1</sup> 黄如<sup>1</sup> 张兴<sup>1</sup>

(1 北京大学信息科学技术学院微电子学系, 北京 100871)

(2 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 对分辨率极高的电子束光刻技术和高选择比、高各向异性度的 ICP 刻蚀技术进行了研究, 形成一套以负性化学放大胶 SAL-601 为电子抗蚀剂的电子束光刻及 ICP 刻蚀的优化工艺参数, 并利用这些优化参数结合电子束邻近效应校正等技术制备出剖面形貌较为清晰的 30nm 精细线条图形。

**关键词:** 微细加工; 电子束光刻; 邻近效应校正; ICP 刻蚀

**EEACC:** 2550G; 2570

**中图分类号:** TN305.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2004)12-1722-04

## 1 引言

随着微电子技术的不断进步, 集成电路日益向超高集成度方向发展, 对图形微细加工精度的要求越来越高, 已经达到深亚微米、百纳米甚至纳米级。纳米级精细图形的微细加工是纳米特征尺寸集成电路和器件研制的基础和关键, 日益受到人们重视, 成为目前国际上的一个研究热点<sup>[1,2]</sup>。美、日等发达国家近年来纷纷投入大量的人力、物力和财力进行研究, Bell 实验室、IBM 等大公司集中力量发展亚 0.1 $\mu\text{m}$  以及更小尺寸的微电子技术, Intel 等四大半导体公司投资 3.5 亿美元联合开发亚 0.1 $\mu\text{m}$  光刻技术。事实证明, 谁掌握了纳米图形的微细加工技术, 谁就掌握了 IC 制造业的核心技术。目前国际上应用于大规模生产的集成电路特征尺寸已经达到 0.13 $\mu\text{m}$  的水准。我国微电子制造业最近几年发展相当快, 然而与世界先进水平相比, 仍然存在较大差距。若不能及时在纳米结构图形加工这一核心技术上赶超世界先进水平, 势必会影响我国微电子产业的发展。

微细加工技术主要包括光刻技术和刻蚀技术。

为了获得纳米级线条图形, 本文对具有极高分辨率的电子束光刻和 ICP 刻蚀技术进行深入研究, 通过大量实验, 形成一套以负性化学放大胶 SAL-601 为电子抗蚀剂的电子束光刻及 ICP 刻蚀的优化工艺参数, 并利用这些优化参数制备出纳米级精细线条图形。

## 2 电子束光刻技术

电子束光刻是近三十年发展起来的一种分辨率极高的微细加工技术, 电子束直接曝光方式(不需要使用掩模版, 通常称为电子束直写)甚至可以实现几个纳米线条的加工, 是深亚微米和纳米加工技术以及新一代量子效应器件研制的重要手段。

在电子束光刻技术中, 电子抗蚀剂的选择非常重要。最为传统的电子抗蚀剂是 PMMA 正性电子抗蚀剂, 其优点是具有较高的分辨率和对比度, 但其抗干法腐蚀性差, 灵敏度较低。为了在刻蚀过程中保持抗蚀剂图形形貌, 应该使用耐干法腐蚀的电子抗蚀剂。本文采用 Shiplev 公司生产的 SAL-601 系列化学放大胶<sup>[3]</sup>。SAL-601 是一种优良的负性电子抗蚀剂, 具有抗干法腐蚀性强、灵敏度高、分辨率高、热

\* 国家重点基础研究专项基金(批准号: G2000036501)和国家自然科学基金(批准号: 90207004)资助项目

任黎明 女, 1972 年出生, 博士, 讲师, 从事微细加工及其模拟技术研究。

王文平 女, 1977 年出生, 硕士研究生, 从事器件特征的模拟及关键工艺研究。

2003-12-03 收到, 2004-01-14 定稿

稳定性好、在显影过程中不溶胀等优点。其缺点是化学稳定性差,受工艺环境因素影响较大,图形质量和重复性受多种参数影响,如衬底类型、胶膜厚度、电子束能量、前后烘条件等,需要严格控制工艺条件。

本文通过一系列的工艺优化,形成一套以负性化学放大胶 SAL-601 为电子抗蚀剂的电子束光刻工艺参数,下面是本研究中使用的电子束光刻优化工艺条件:

涂胶:为了获得较细线条,应尽可能采用薄胶层。本文胶厚约  $0.5\mu\text{m}$ 。

曝光前烘:采用热板烘烤工艺,烘烤温度约  $105^\circ\text{C}$ ,烘烤时间约 2min。

电子束曝光:对于 JBX-5000LS 电子束曝光系统,电子束直写  $0.5\mu\text{m}$  胶厚的 SAL-601 的优化工艺条件为:电子束加速电压为 50kV,束流密度约为 50pA,扫描栅格间距为 1.25nm,最大扫描场/子场面积为  $800\mu\text{m}\times 800\mu\text{m}/50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$ ,曝光剂量约  $5\sim 8\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。

曝光后烘:对于化学放大胶,为形成比较好的剖面形态,通常需要在曝光后对抗蚀剂施以曝光后烘工艺。对 SAL-601 而言,要求曝光后尽快将样品取出来,不得在空气中停留太长时间,立即用热板烘烤,烘烤温度约  $105^\circ\text{C}$ ,烘烤时间约 2min。

显影:采用四甲基铵氢氧化物(TMAH)为主要成分的弱碱性显影剂,显影时间为 6~8min。

坚膜:SAL-601 具有很好的热稳定性,坚膜温度高达  $200^\circ\text{C}$ ,时间约为 30min。

电子束光刻技术中,电子在固体中的散射引起的电子束邻近效应是影响电子束曝光分辨率最关键的因素,而对形成准确的抗蚀剂图形影响最大的就是邻近效应问题。如果不进行邻近效应校正,将很难制备出纳米级的小尺寸图形。邻近效应现象是一个综合效应,邻近效应起因于电子在抗蚀剂及衬底中的前散射和背散射现象,但是显影后所得到的抗蚀剂图形的形态却受诸多因素影响,邻近效应除了决定于抗蚀剂及衬底等因素外,还受制于版图设计中的图形形状、图形密度、图形特征尺寸及其相对位置等图形结构因素的影响,例如线条越密集,邻近效应越明显。

本文在优化版图设计的基础上,使用所获得的电子束光刻优化工艺条件,并结合邻近效应校正技术研究结果<sup>[4]</sup>,利用 SAL-601 负性电子抗蚀剂成功地制备出几十纳米的抗蚀剂图形。

### 3 ICP 刻蚀技术

常用的刻蚀方法主要分为湿法刻蚀与干法刻蚀两大类。与湿法刻蚀相比,干法刻蚀由于各向异性较好,可以高保真地转移光刻图形等优点,特别适合用来刻蚀小尺寸图形。干法刻蚀种类很多,其中感应耦合等离子体(inductively-coupled-plasma, ICP)刻蚀技术由于具有较高的选择比和各向异性度、精确的条宽尺寸控制、良好的剖面形貌控制、较小的等离子体损伤和腐蚀残余物容易彻底去除等优点,广泛应用于小尺寸器件的制备中。

ICP 刻蚀技术中,可以调整的相关参数有:气体的定义(包括气体的组分和流量)、反应室的气压、平板电压功率及线圈功率。本文在刻蚀时,选取反应室的气压为 2Pa,调整其他三个参数。首先分析这三个参数对刻蚀质量的影响。

#### 3.1 气体流量的影响

控制好气体的流量是非常重要的。刻蚀中同时通入  $\text{SF}_6$  和  $\text{C}_4\text{F}_8$  气体,其中  $\text{SF}_6$  为刻蚀气体,对硅进行刻蚀,它的流量越大,刻蚀的速率越快; $\text{C}_4\text{F}_8$  为钝化气体,其作用是生成聚合物,粘附在硅表面形成钝化层,保护裸露的硅。刻蚀和钝化同时进行,就可以保证刻蚀的各向异性,使刻蚀出的线条具有较好的垂直度。

#### 3.2 平板电压源功率的影响

在被刻蚀圆片的上、下方平板电极之间加上电压,则等离子体将会在电场作用下垂直地向下走,从而使等离子体刻蚀的定向性增强,保证刻蚀的各向异性和垂直度。平板电压源功率的大小要综合考虑,如果平板电压源功率太大,则圆片中心处的等离子体动量很大,在轰击硅表面时,等离子体会大量涌入四周,导致四周的刻蚀速率大于中心的刻蚀速率。平板电压源功率太小,则刻蚀速率会减慢,导致刻蚀时间增加。

#### 3.3 线圈功率的影响

线圈功率主要影响反应室中刻蚀气体的浓度。线圈功率越大,气体的浓度越大,反应越快。但是由于线圈电磁辐射的自然分布,线圈附近的电场较远离线圈的区域强,导致边缘等离子体的密度比中心

区域高. 这种等离子体分布上的不均匀性会导致不同位置的刻蚀速率相差较大. 所以, 线圈功率也要综合考虑.

对于小尺寸图形刻蚀, 由于图形间距相对较小, 气体不易进入图形间隙, 图形拐角处等离子体的浓度相对较低, 造成刻蚀不充分, 出现“U”字形剖面. 应该加大线圈功率, 提高等离子体的浓度. 但是线圈功率也不能太大, 否则很容易破坏胶掩模, 对于尺寸很小的图形, 如几十纳米的线条, 很难保持完整形貌. 表 1 是通过一系列实验获得的 ICP 刻蚀硅的优化条件. 实验结果表明: 该条件不仅可以获得陡直的剖面图形, 还可以达到细化线条的目的.

表 1 ICP 刻蚀硅的优化条件

Table 1 Optimal conditions of ICP etching of silicon

SF <sub>6</sub> 流速/sccm	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> 流速/sccm	平板功率/W	线圈功率/W
40±4	90±9	50	800

## 4 结果与分析

利用上述电子束光刻与 ICP 刻蚀优化工艺参数, 对胶厚为 0.5 μm 的 SAL-601 进行电子束光刻, 获得抗蚀剂图形, 然后通过 ICP 刻蚀技术, 将其转移到硅衬底上. 图 1 是经过电子束光刻和 ICP 刻蚀后得到的 700nm 线条的剖面形态 SEM 照片. 可以看出在线宽和间距都比较大时, 图形轮廓非常清晰, 刻蚀出的线条的垂直度基本上接近 90°.

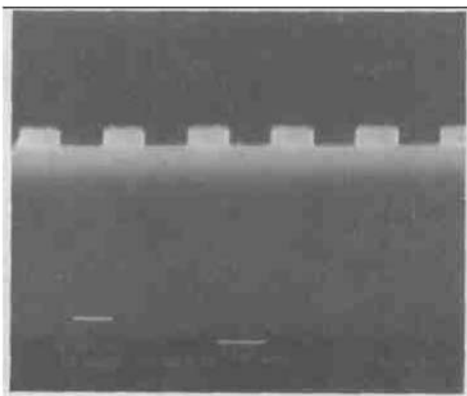


图 1 700nm 线条的 SEM 照片

Fig. 1 SEM photograph of 700nm lines

图 2~ 4 给出了 80, 50 和 30nm 线条图形的剖面 SEM 照片. 可以看出线条的垂直度保持得较好, 且侧壁较光滑. 但是随着线宽缩小到 50nm 以下时, 台阶表面的边缘出现了圆弧形, 这是由于作为掩模

胶的厚度较薄, 等离子体轰击过程中, 边缘的胶先被刻蚀掉的缘故. 线条越细, 这种现象就越明显.

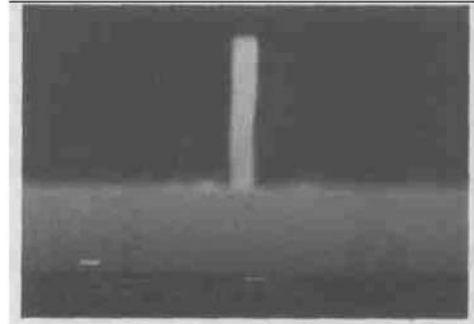


图 2 80nm 线条的 SEM 照片

Fig. 2 SEM photograph of 80nm lines

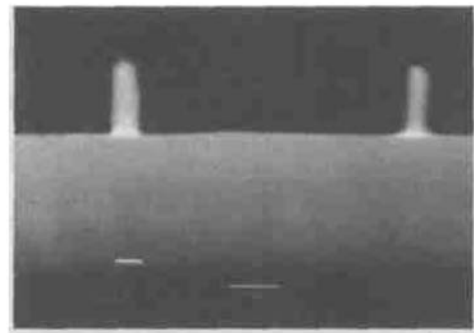


图 3 50nm 线条的 SEM 照片

Fig. 3 SEM photograph of 50nm lines

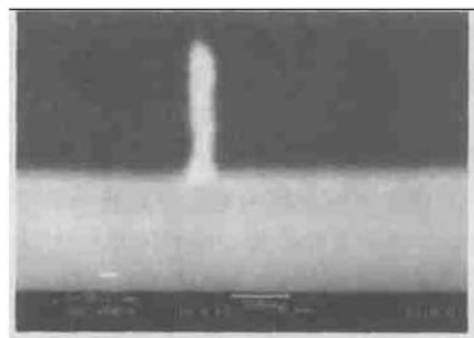


图 4 30nm 线条的 SEM 照片

Fig. 4 SEM photograph of 30nm lines

## 5 结论

本文对电子束光刻和 ICP 刻蚀技术进行了深入研究, 形成一套以负性化学放大胶 SAL-601 为电子抗蚀剂的电子束光刻及 ICP 刻蚀的优化工艺参数, 结合邻近效应校正等技术制备出剖面形貌较为清晰的 30nm 线条图形, 线条垂直度保持得较好, 但由于薄胶掩模在刻蚀中容易被破坏, 台阶表面形貌

不是很好. 如果能够保证在刻蚀中掩模质量不发生太大变化, 将会得到台阶表面形貌更为完整清晰的细线条. 目前我们开展了将抗蚀剂图形转移到二氧化硅上, 然后以二氧化硅作硬掩模来刻蚀多晶硅栅线条的研究, 相关结果将另文发表.

### 参考文献

- [ 1 ] Hiroshi I. CMOS downscaling. Technical Report of Tokyo Institute of Technology. Beijing, 2002
- [ 2 ] Frank D J, Taur Y. Design consideration for CMOS near the limits of scaling. *Solid-State Electron*, 2002, 46: 315
- [ 3 ] Dobisz E A, Marrian C R K. Control in sub-100nm lithography in SAL-601. *J Vac Sci Technol B*, 1997, 15(6): 2327
- [ 4 ] Chen Baoqin, Ren Liming, Liu Ming, et al. Proximity effect correction technique in electron-beam direct writing. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(suppl): 221 (in Chinese)  
[ 陈宝钦, 任黎明, 刘明, 等. 电子束直写邻近效应校正技术. *半导体学报*, 2003, 24(增刊): 221]
- [ 5 ] Bhardwai J K, Ashraf H. Advanced silicon etching using high density plasmas. *SPIE Proceedings*, 1995, 2639: 224

## Microfabrication of Nano-Scale Feature Lines\*

Ren Liming<sup>1</sup>, Wang Wenping<sup>1</sup>, Chen Baoqin<sup>2</sup>, Zhou Yi<sup>1</sup>, Huang Ru<sup>1</sup> and Zhang Xing<sup>1</sup>

(1 Department of Microelectronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 Institute of Microelectronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Electron-beam lithography with high resolution and ICP etching with high selectivity-ratio and high anisotropy are investigated. Using chemically amplified resist SAL-601 as the electron resist, optimal process parameters of electron-beam lithography and ICP etching are achieved. These parameters are combined with electron-beam proximity correction to form 30nm lines with clear-cut cross-sectional profiles.

**Key words:** microfabrication; electron-beam lithography; proximity effect correction; ICP etching

**EEACC:** 2550G; 2570

**Article ID:** 0253-4177(2004)12-1722-04

\* Project supported by the Special Funds of National Key Basic Research Plan of China(No. G2000036501) and National Natural Science Foundation of China(No. 90207004)

Ren Liming female, was born in 1972, PhD, lecturer. She is engaged in microfabrication technology and modeling.

Wang Wenping female, was born in 1977, MS candidate. She is engaged in research on key processes, device performance simulation and key processes.

Received 3 December 2003, revised manuscript received 14 January 2004

©2004 The Chinese Institute of Electronics