

电子束直写邻近效应校正技术*

陈宝钦¹ 任黎明² 刘 明¹ 王云翔¹ 龙世兵¹ 陆 晶¹ 李 泠¹

(1 中国科学院微电子中心, 北京 100029)

(2 北京大学微电子学系, 北京 100871)

摘要: 通过蒙特卡罗模拟方法研究电子散射过程, 探讨邻近效应产生机理并寻求有效的邻近效应校正途径. 实验结果表明: 邻近效应现象是一种综合效应, 可以通过优化工艺条件有效地抑制邻近效应的影响, 使邻近效应校正达到预期的效果.

关键词: 纳米结构图形; 电子束直写; 蒙特卡罗模拟; 邻近效应校正

EEACC: 2550G; 2570

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2003)S0-0221-05

1 引言

随着我国纳米技术和纳米电子学的蓬勃发展, 纳米加工技术的研究越来越重要, 而电子束曝光技术将是纳米结构图形加工中非常重要的手段. 然而, 电子束曝光技术中电子束邻近效应是影响电子束成像分辨率最关键的因素, 由于电子在抗蚀剂和衬底中的前散射和背散射现象的存在, 电子散射轨迹向邻近区域扩展, 其波及范围少则百纳米多则数微米. 虽然电子束曝光系统从硬件上已经可以实现几个纳米的电子束束斑, 但由于电子束曝光邻近效应现象的存在, 使得采用电子束曝光系统进行纳米尺度的结构图形加工仍然是十分困难的. 国外在邻近效应现象和邻近效应校正技术方面已有大量的研究成果和邻近效应校正商业软件, 由于邻近效应本身是一种非常复杂的综合效应, 与设备、材料、工艺等条件都有很大的关系, 目前还没有一种商业软件能够理想地解决这方面的问题, 尤其是电子束纳米加工技术方面如何有效地抑制邻近效应的影响仍然是当前科学家们的研究热点. 为此, 要达到利用电子束曝光系统进行纳米结构图形加工, 有必要进一步对电子

束曝光邻近效应的产生机理进行深入研究. 本文主要介绍采用电子束曝光蒙特卡罗 (Monte Carlo) 模拟技术模拟电子束曝光过程, 研究不同曝光条件对抗蚀剂吸收能量密度的影响, 获得抗蚀剂吸收能量密度的分布规律, 预测实际显影过程中各个阶段抗蚀剂图形形状和剖面轮廓的变化过程, 并通过大量的电子束曝光实验进行拟合、验证、归纳总结优化工艺条件, 进而寻求有效的邻近效应校正途径.

2 电子束曝光邻近效应产生的机理

众所周知, 光学曝光中限制光学成像分辨能力的主要因素是光的衍射现象, 表现为光学邻近效应现象; 而电子束曝光中限制电子束直写分辨能力的主要因素是电子在固体中的散射现象, 表现为电子束邻近效应. 两种邻近效应所表现的现象非常相似, 然而, 其产生的机理却截然不同. 要想弄清楚电子散射如何会产生如此严重的邻近效应, 最精确有效的方法就是借助于蒙特卡罗计算方法进行电子束曝光模拟, 该计算方法又名计算机随机模拟方法或统计试验方法, 是人们对随机事件的一种数学模拟方法. 其主要思想是在计算机上利用随机数对物理及数学

* 国家重点基础研究发展规划 (No. G2000036504) 和国家自然科学基金 (批准号: 69906006) 资助项目

陈宝钦 男, 1942 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要从事光掩模、电子束光刻和微光刻技术研究.

任黎明 女, 1972 年出生, 讲师, 博士, 从事电子束曝光及其模拟技术研究.

问题的概率模型进行模拟,然后加以统计处理,进而得到问题的解答,其基本特点是以概率与统计中的理论方法为基础.在电子束曝光过程中,电子在固体中并不是沿直线运动,而是按某种规律随机运动.由于蒙特卡罗方法使用不同随机数反映随机过程的涨落现象,利用这种方法可以产生一个与电子行为相似的散射事件,从而真实地模拟电子在固体中的散射过程.电子在固体中的散射是一个非常复杂的物理过程,但总的来说,可归结为两类散射事件:一类是入射电子与原子核之间发生碰撞,这种碰撞引起的电子散射称为弹性散射,电子发生大角度偏转(一般为 $5^{\circ}\sim 180^{\circ}$),由于原子核的质量比电子的大得多,可认为碰撞后入射电子能量变化非常小.另一类是入射电子与原子核外电子发生碰撞,电子发生小角度偏转(一般 $\leq 2^{\circ}$),原子被激发或电离,入射电子能量损失,同时伴随 X 射线或其它电子(如二次电子、俄歇电子等)的激发,这种碰撞引起的电子散射称为非弹性散射.为了简化计算,电子散射的蒙特卡罗模拟计算中,通常认为弹性散射只改变电子运动方向,电子能量不发生变化,非弹性散射仅使电子能量减少,不改变电子运动方向.为了准确地描述电子在固体中的散射行为,首先需要在前人开展的弹性散射和非弹性散射模型研究结果进行分析和比较,

并结合我们的实际电子束曝光系统建立一个适用于蒙特卡罗模拟计算的电子散射物理模型,研究电子在抗蚀剂和衬底中的散射过程,建立适合于描述高斯束电子束直写系统曝光过程的蒙特卡罗模拟计算方法^[1~8],准确模拟电子在固体中的散射轨迹,在此基础上,对抗蚀剂吸收能量密度进行蒙特卡罗模拟计算,计算出散射电子的空间位置及能量分布.通过大量计算,研究电子的入射束能、抗蚀剂的厚度、各种衬底材料、大小束斑、曝光步距等不同曝光条件对抗蚀剂吸收能量密度分布的影响,获得抗蚀剂吸收能量密度的分布规律,并分别计算出前散射电子和背散射电子对能量沉积密度的贡献及其所波及的范围^[2].图 1 为不同电子束加速电压条件下抗蚀剂膜中和 Si 衬底中电子散射轨迹.从电子散射轨迹图中可以清楚地看出电子束入射能量低时,尤其 1kV 的电子束基本上停留在抗蚀剂表面方圆几十纳米范围内,因此可以利用这个特点使用低能、薄胶(几十纳米厚)技术实现高分辨率曝光.随着入射能量提高(1~5kV),电子在抗蚀剂中射程迅速扩大,电子能量基本上都损失在抗蚀剂中,曝光分辨率也迅速下降.当入射能量超过 10kV 时,大部分电子穿越抗蚀剂层进入衬底,在衬底中背散射电子射程扩大到微米级.当入射能量达到 50kV 或 100kV 时,

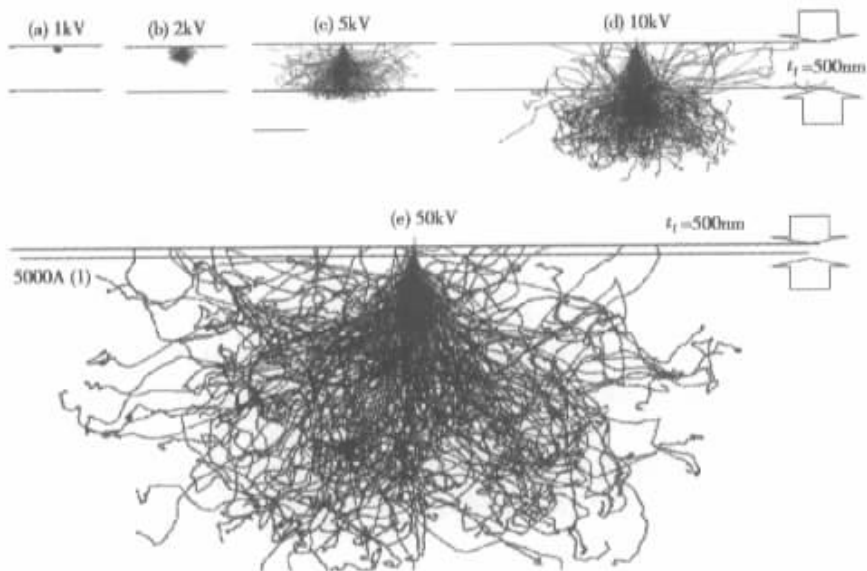


图 1 不同电子束加速电压条件下抗蚀剂膜中和 Si 衬底中电子散射轨迹

Fig. 1 Electron scattering trajectories in resist film and Si substrate at different electron-beam accelerating voltages

高入射能量的电子在电子束入射点附近抗蚀剂层中可以实现几十纳米的高分辨率曝光。然而,大部分进入衬底的电子将进一步向纵深发展,虽然在衬底中背散射电子返回抗蚀剂层的强度相对减弱,但是背散射电子横向射程将进一步扩大到数微米远,将对大面积图形和密集图形邻近效应产生重大影响。

电子束曝光技术中,最令人关心的是显影所获得的抗蚀剂图形的几何形状,尤其是剖面轮廓。影响显影图形立体结构形状和尺寸的主要因素有抗蚀剂类型、曝光剂量、显影时间等。蒙特卡罗方法模拟电子束曝光的有效性最终可以通过显影线条的剖面轮廓来检验。另外,显影剖面的模拟对优化工艺,改进图形设计可以起到理论指导的作用,有必要对其进行深入研究。显影图形的剖面轮廓主要由曝光和显影两个过程决定,在对电子散射过程进行模拟,获得电子束曝光图形吸收能量分布矩阵的基础上,建立一个可以用来预测实际显影过程中各个阶段抗蚀剂图形形状和剖面轮廓变化的显影模型,选择一种准确的显影速率计算方法,计算出抗蚀剂显影剖面模拟结果,也可以利用 Sigma-C SELID 软件对抗蚀剂显影随时间变化的全过程进行模拟。

3 电子束曝光邻近效应的校正技术

电子束曝光技术中,电子前散射和背散射产生的邻近效应是影响电子束成像分辨率最关键的因素,对形成准确的抗蚀剂图形影响最大的就是邻近效应问题。如上所述,由于电子的前散射和背散射现象,电子在抗蚀剂和衬底中散射轨迹向邻近区域扩展,其波及范围至少百纳米多则数微米。尽管电子束

的束斑可以小到几个纳米,也不可能实现纳米尺度图形的曝光,所以必须进行邻近效应校正^[9~11]。

邻近效应与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有关,可分为“内部邻近效应”和“相互邻近效应”。邻近效应是电子束曝光中必然存在的,不能制止它的产生,但可以减小或作适当的修正。

邻近效应校正措施主要有两种:一种是通过优化曝光-显影工艺条件和有效的工艺措施抑制邻近效应的产生或降低其影响程度,如使用高入射束能、薄胶层、薄衬底和采用高原子序数材料作夹层或采用多层胶工艺等。另一种是采取各种修正措施,主要通过波前工程实施几何图形尺寸调整或实施曝光剂量调制或将二者相结合来修正邻近效应。对于孤立的线条或简单的器件,我们可以采用补偿邻近效应影响的措施,如线曝光技术和对邻近效应敏感部位进行补偿曝光或改变几何图形形状的方法进行修正。然而对于稍复杂的图形进行曝光时,通常要采用以 Sigma-C CAPROX 为代表的邻近效应校正软件实施曝光剂量调制的方法进行修正,软件修正主要是通过蒙特卡罗方法模拟结果和大量的实验,实测邻近图形变形的数据并进行拟合,利用 CAPROX-PD 测算双高斯邻近函数表征参数(α 、 β 、 η 等),摸索参数设置规律,实施剂量调制。

4 结论

实验结果表明:通过电子束曝光、显影后得到的抗蚀剂图形中所反映出来的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

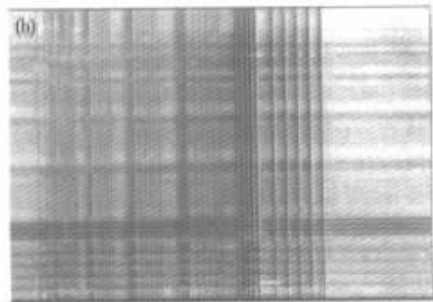
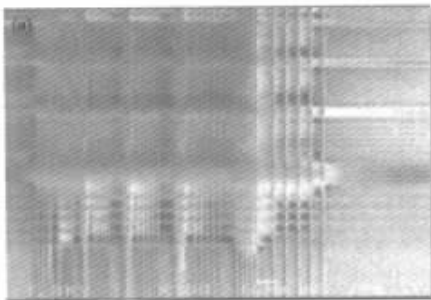


图2 不同工艺条件具有不同邻近效应结果的典型电镜照片(700倍) (a) 图形密集处邻近效应十分严重;(b) 邻近效应有效地得到抑制

Fig. 2 Typical SEM pictures which show different proximity effect results under different process conditions ($\times 700$) (a) Proximity effects obvious at dense features; (b) Proximity effects effectively reduced

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,并且受到曝光-显影工艺条件的严重影响,包括抗蚀剂的前后烘条件、抗蚀剂灵敏度的选择(会造成过曝光或曝光剂量不足)、显影时间和温度(会造成过显或显影不足)、电子束曝光系统状态(例如 LaB₆ 灯丝老化的程度直接影响束斑大

小)等.只有在优化曝光-显影工艺条件的基础上,邻近效应校正才能达到预期效果.图 2 可以清楚地看到从几百纳米到 1 μm 的图形结构中,图形密集处邻近效应已十分严重,如果曝光剂量和显影工艺条件选择得当,邻近效应的影响可以有效地抑制.图 3 的电镜照片展示电子束邻近效应校正前后电子束曝光特征图形形态,通过工艺条件优化和采用曝光剂量调制的方法进行邻近效应校正的效果十分明显.

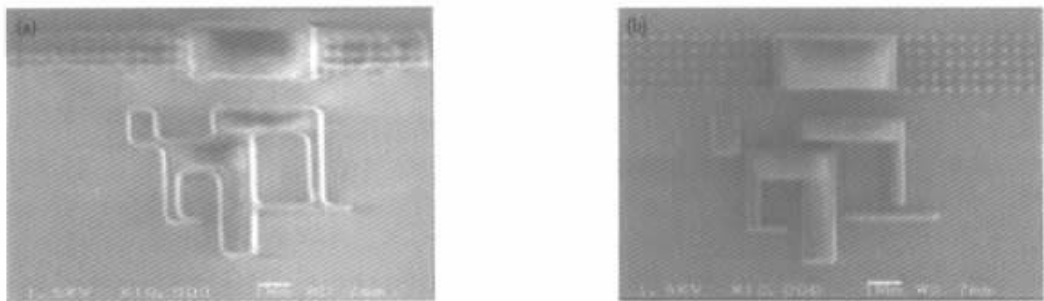


图 3 电子束邻近效应校正前后百纳米特征尺寸抗蚀剂图形电镜照片比较图(10000 倍) (a) 没有经过邻近效应校正的图; (b) 通过工艺条件优化和邻近效应校正后的图形

Fig. 3 The comparison of the SEM pictures of the resist profiles of hundred-nanometer feature size before and after electron proximity effect correction ($\times 1000$) (a) No proximity effect correction; (b) Features obtained after optimizing processes and proximity effect correction

参考文献

- [1] Ren Liming, Chen Baoqin, Tan Zhenyu. The 6th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings, 2001, 2: 928
- [2] Ren Liming, Chen Baoqin, Tan Zhenyu. Studies of energy dissipation distribution in low-energy electron beam lithography by Monte Carlo method. Acta Physica Sinica, 2002, 51(3): 512 (in Chinese) [任黎明, 陈宝钦, 谭震宇. Monte Carlo 方法研究低能电子束曝光沉积能分布规律. 物理学报, 2002, 51(3): 512]
- [3] Ren Liming, Chen Baoqin. Monte Carlo simulation of electron scattering trajectories in low-energy electron beam lithography. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(12): 1519 (in Chinese) [任黎明, 陈宝钦. Monte Carlo 方法模拟低能电子束曝光电子散射轨迹. 半导体学报, 2001, 22(12): 1519]
- [4] Ren Liming, Chen Baoqin. Microfabrication Technology, 2001, 3: 60 (in Chinese) [任黎明, 陈宝钦. 微细加工技术, 2001, 3: 60]
- [5] Ren Liming, Chen Baoqin. Microfabrication Technology, 2002, 1: 1 (in Chinese) [任黎明, 陈宝钦. 微细加工技术, 2002, 1: 1]
- [6] Ren Liming, Chen Baoqin, Gu Wenqi. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(3): 24 (in Chinese) [任黎明, 陈宝钦, 顾文琪. 光电工程, 2002, 29(3): 24]
- [7] Ren Liming, Chen Baoqin, Liu Ming, et al. Proceedings of the 12th National Conference on Semiconductor Integrated Circuits and Silicon Materials, 2001: 431 (in Chinese) [任黎明, 陈宝钦, 刘明, 等. 第十二届全国半导体集成电路与硅材料学术会论文集, 2001: 431]
- [8] Ren Liming, Chen Baoqin, Liu Ming, et al. Proceedings of the 11th National Conference on Electron Beam, Ion Beam and Photon Beam, 2001: 34 (in Chinese) [任黎明, 陈宝钦, 刘明, 等. 第十一届电子束、离子束、光子束学术年会论文集, 2001: 34]
- [9] Chen Baoqin, Liu Ming, Ren Liming. Proceedings of the First National Conference on Nanometer Technology and Application, 2000: 262 (in Chinese) [陈宝钦, 刘明, 任黎明. 第一届全国纳米技术与应用学术会议论文集, 2000: 262]
- [10] Chen Baoqin, Liu Ming, Ren Liming, et al. Proceedings of the 10th National Conference on Electron Beam, Ion Beam and

Photon Beam,1999;48(in Chinese)[陈宝钦,刘明,任黎明,等.第十届电子束、离子束、光子束学术年会论文集,1999;48]

Photon Beam,2001;161(in Chinese)[陈宝钦,刘明,任黎明,等.第十一届电子束、离子束、光子束学术年会论文集,2001;

[11] Chen Baoqin,Liu Ming,Ren Liming,et al.Proceedings of the 11th National Conference on Electron Beam,Ion Beam and

161]

Proximity Effect Correction Technique in Electron-Beam Direct Writing^{*}

Chen Baoqin¹, Ren Liming², Liu Ming¹, Wang Yunxiang¹, Long Shibing¹, Lu Jing¹ and Li Ling¹

(1 *Microelectronics R&D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

(2 *Department of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The electron scattering processes are simulated by Monte Carlo method. The production mechanism of proximity effect and effective approaches of proximity effect correction are investigated. The experimental results show that proximity effect is a comprehensive phenomenon. It can be reduced and expectant purpose of proximity effect correction can be achieved through optimizing processes.

Key words: nanometer features; electron-beam direct writing; Monte Carlo simulation; proximity effect correction

EEACC: 2550G; 2570

Article ID: 0253-4177(2003)S0-0221-05

* Project supported by National Key Basic Research Projects (Grant No. G2000036504) and National Natural Science Foundation of China (No. 69906006)

Chen Baoqin male, was born in 1942, professor, advisor for PhD candidates. He is mainly engaged in photomask, electron beam lithography and micro- lithography technology.

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

Received 16 September 2002, revised manuscript received 22 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics