



基于扫描电镜改造的电子束光刻系统在高校 教学科研中的培训与维护

韩玉洁, 朱文昌

(苏州大学 功能纳米与软物质研究院, 苏州 215123)

摘要: 电子束光刻系统是高校半导体物理与器件方向教学和科研中不可或缺的仪器。该文在高校原有扫描电镜的基础上搭建电子束光刻系统, 具有更低的成本和更多的操作空间。通过构建完备的培训体系, 包括理论知识培训、分类实操培训、难点补充培训等, 提高了仪器的使用效率和效果。仪器使用人员和管理人员协同做好仪器维护和保养工作, 延长仪器的使用寿命。

关键词: 高校; 电子束光刻系统; 培训与维护

中图分类号: TN16; G642.423

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20240191](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20240191)

Training and Maintenance of the Scanning Electron Microscope-Based Electron Beam Lithography System in University Teaching and Research

HAN Yujie, ZHU Wenchang

(Institute of Functional Nano & Soft Materials, Soochow University, Suzhou 215123, China)

Abstract: The electron beam lithography system plays an indispensable role in teaching and research of semiconductor physics and devices in universities. Building an electron beam lithography system based on the existing scanning electron microscope of the university has lower cost and multiple applications. By building a complete training system, including theoretical knowledge training, classification practical training, and supplementary training on difficult points, the efficiency and effectiveness of the use of instrument have been improved. Instrument users and managers work together to maintain and conserve the instrument, extending its service life.

Key words: universities; e-beam lithography system; training and maintenance

电子束光刻技术是集成电路微纳器件和半导体精密掩模制造的关键技术, 在微电子、微机械、微纳米光学研究中有着重要的作用^[1]。以电子束光刻技术为核心的电子束光刻系统是一种无掩膜光刻系统, 其利用波长极短的聚焦电子束直接作用于对电子敏感的抗蚀剂表面, 绘制形成与设计图形相符的微纳结构^[2-3]。电子束光刻系统具有超高分辨率、作图灵活等优点, 可实现纳米级的精度, 满足半导体器件上超紧凑和超精细的纳米结构设计^[4]。目前, 电子束光刻系统一般分为基于扫描电镜改造的电子束光刻系统、高斯束光刻系统、成型电子束光刻系统和投影电子束光刻系统^[5]。其中, 基于扫描电子显微镜(scanning electron

microscope, SEM)改造的电子束光刻系统(以下简称 SEM-电子束光刻系统), 无需购买昂贵的专用电子束光刻设备, 通过在扫描电镜物镜光阑下方安装束闸, 并配置相关电子束光刻升级组件, 即可以利用扫描电子显微镜进行电子束光刻, 具有成本较低、易用性强、容易维护和多功能性的优点^[6]。

在高校教学和科研中, 对电子束光刻的需求一般是小批量实验, SEM-电子束光刻系统可以满足使用要求。且大部分研究生已经拥有了扫描电镜的理论和操作经验, 可以在相对较短的培训期内, 掌握 SEM-电子束光刻系统使用技能。本文将介绍苏州大学功能纳米与软物质研究院(以下简称

收稿日期: 2024-04-11

基金项目: 江苏省基础研究计划自然科学基金面上项目(BK20221238)。

作者简介: 韩玉洁, 硕士, 助理实验师, 主要从事柔性电极及光电子器件的研究。E-mail: yjhan@suda.edu.cn

FUNSOM)公共测试平台改造扫描电镜为电子束光刻系统的过程, 讨论电子束光刻系统的仪器培训体系, 并对该仪器的维护提出建议和思考。

1 设备改造和系统搭建

FUNSOM 现有 3 台场发射扫描电镜, 分别为蔡司 Gemini500、日立 SU8230 和 FEI Quanta 200 FEG。相比于另外两台扫描电镜, 原 2009 年采购的 FEI Quanta 200 FEG 的环境场发射扫描电镜, 由于本身分辨率较低, 同时部分元器件老化, 已难以达到学院研究生和老师们的使用需求, 因此设备使用率较低。此外, 由于学院在纳米光电子器件、二维材料、表面等离激元光子学等研究领域对微纳结构制备和尺寸的要求不断提高^[7-9], 超过了原有的紫外光刻机、激光直写系统的设备极限^[10], 学院急需更高精度的电子束光刻设备来实现紧凑、精细的纳米结构。鉴于此, 通过调研和讨论, 选取了德国 Raith 公司的电子束光刻升级组件对 FEI Quanta 200 FEG 的环境场发射扫描电镜

进行设备改造, 如图 1 所示。组件硬件方面, 包含图形发生器和电子束开关控制电路, 图形发生器扫描频率为 6 MHz, 最小停留时间 167 ns, 配备 6 块乘法数模和 16 位高速数据收集和控制系统, 可精确修正写场的平移、倾斜和旋转的畸变。软件方面, 基于 Windows 系统, 使用 Microsoft Scripting 语言形式, 方便用户设定参数, 实现全自动运行。其无缝集成 GDSII 编辑器, 可对曝光图形进行分层设计, 具有处理复杂图形的能力。扫描电镜设备改造方面, 在物镜光阑下方安装束闸并对扫描电镜的电脑和软件版本进行了升级。通过数字接口, 连接扫描电镜主机端、电脑端和束开关控制器后, 电子束光刻组件不仅可控制束闸的开关, 还可外部控制扫描电镜样品台的移动、电子束的偏转位置和放大倍数等参数, 从而实现版图的曝光任务。目前该 SEM-电子束光刻系统已有效运行 3 年, 实现 20 kV 加速电压下光刻分辨率 100 nm, 100 μm 写场下套刻精度 90 nm, 写场拼接精度 100 nm。



图1 改造后的 SEM-电子束光刻系统

2 培训体系建设

在教学和科研实验中, 发现学生使用 SEM-电子束光刻系统存在曝光结果不佳、重复性差等问题, 这可能由电子束未调节到最佳状态、样品处理不佳, 或曝光参数设置不当等原因导致。这些问题表明一些学生对设备工作原理掌握不足, 操作流程不规范, 可能对版图设计、样品制备、电子束优化等理解不透彻。因此, 为提高学生对仪器的使用效果和效率, 教师应该对学生的理论知识和实际操作进行成体系的培训。

2.1 理论知识培训

SEM-电子束光刻系统属于大型仪器, 操作者在操作培训之前, 需要积累一定的理论知识, 这样在实践培训时才能事半功倍。该仪器的理论知识培训主要在 FUNSOM 研究生“纳米材料合成与表征”课程上完成。课堂上介绍并详细讲解扫描电镜电子光学系统的组成、二次电子与背散射电子信号的产生与接收、常见的扫描电镜参数与成像质量之间的关系, 以及样品表征前的制备等内容。通过理论学习, 学生能明确扫描电镜设备的构造, 了解电子束光刻功能升级的硬件和软件组

成,从而清晰认识电镜的真空系统层级,以及电子光学系统的灯丝、物镜和光阑对成像质量的影响,为后期的实际操作打下基础。

2.2 分类实操培训

为提高后期电子束光刻系统的使用质量,首先需明确仪器的使用方向和类别,针对不同应用方向,进行有针对性的使用培训。该设备在 FUNSOM 研究生及部分本科生的实验研究中,主要包括以下 3 个使用方向:

1) 用于二次套刻或在特定材料上曝光电极图案;

2) 曝光各种周期性微纳矩阵或光栅结构;

3) 曝光复杂的创意性图案。

根据不同的使用需求,将培训分为常规培训、二次套刻和版图设计 3 类。常规培训主要针对周期性微纳结构曝光,二次套刻培训主要应用于在特定材料上曝光电极图案,版图设计培训主要通过设备自带的 Raith Quantum 软件绘制简单的版图。若个别用户需曝光一些复杂的多边形或曲线图案,还需在版图设计培训中向学生介绍相应的版图绘制方法。具体培训流程和培训内容如表 1 所示。

表 1 培训流程和培训内容

培训申请	培训类别	适用类别	培训内容
申请人需结合自身设备操作能力、使用需求方向、衬底材料及版图容量等信息提交培训申请,由管理员审核后确认培训内容和时间安排	常规培训	微纳矩阵图案、微纳光栅结构	① 简单的图形绘制 ② SEM-电子束光刻系统的曝光操作流程和使用注意事项
	二次套刻	在指定的材料上进行电极图案的曝光	① 使用光学显微镜对标记和材料进行定位 ② 建立版图坐标系,根据对准标记完成写场校准、定位和曝光
	版图设计	绘制复杂的多边形或曲线图案	① 介绍L-edit或CleWin绘图软件,并示范如何通过编程导入复杂图形

2.3 难点补充培训

1) 版图设计是电子束光刻的第一步,需要重点培训。设计版图时需要考虑不同电子束参数下的曝光分辨率、写场拼接精度和套刻精度以及邻近效应等因素,以免设计超出设备能力范围的图案^[11]。培训时需介绍清楚设备的精度和应用范围。由于写场大小也是版图设计最重要的限制之一,培训时需讲解清楚如何进行版图选择或自定义写场,如写场的大小由扫描电镜的放大倍数决定,放大倍数越大,写场越小,图像信噪比越高。一般可以在 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$ 至 $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$ 的写场大小下实现微纳米尺寸的精细特征。如果版图设置超过所选写场的范围,软件会将图案分割并定位成多个写场,通过样品台移动从而使写场边缘对齐。为避免图案在拼接处产生偏移和错位,选择写场时尽可能将精细单元图案安排在同一写场内,设计版图时需考虑写场之间图层的交叠。对于高精度的曝光需求,可在培训中拓展介绍邻近效应校正软件,帮助优化曝光参数,减少邻近效应对版图精度的影响。

2) 样品准备对曝光质量具有较大影响,曝光的样品需导电且平整。需要注意的是,除硅片

外,实验中还会使用到 SiO_2 、 Si_3N_4 、GaN、蓝宝石、石英玻璃等不导电的衬底材料,需在培训中明确不同尺寸衬底的样品装载方式,对于不导电的样品需引入导电层,避免曝光图形出现畸变。在实验教学中还可引导学生分析衬底材料、抗蚀剂种类和厚度等因素对曝光质量的影响^[12],并思考如何改善曝光条件。

3) 电子束优化是图像曝光质量的关键因素,各优化注意事项如表 2 所示。通过对电子束优化的重点培训,加深学生对电子与样品相互作用所激发的各种信号的理解和应用,让学生清楚如何处理实验材料,熟练掌握扫描电镜使用技巧,善于评估曝光结果并加以优化,从而为学生开展创新性的探索实验打下良好基础。

2.4 实践操作考核

通过前阶段的实操和难点补充培训,使用者需在标准的操作步骤基础上,掌握如何选取合适电镜参数和曝光剂量设置等。在实践操作考核中,应由操作者自己制备样品和版图,自行装载样品并操作。此过程中仪器管理员给予使用监督、操作指导和建议,并根据已有的教学和使用经验,引导学生自主改进电镜或曝光参

数。通过实践操作考核,不仅可促进学生规范使用扫描电镜,更能通过学生的实践情况对之前的

培训内容进行复盘,从而不断改进培训形式和培训内容。

表2 曝光参数的优化注意事项

电子束优化	对曝光精度的影响	使用注意事项
加速电压	图像分辨率和电子束穿透深度随加速电压增加而提高	① 大多数基于扫描电镜改造的电子束曝光设备使用20 kV或30 kV加速电压用于精细图案的曝光 ② 在选择加速电压时需考虑膜厚、放大倍数、衬底导电性等因素
工作距离	分辨率随工作距离减少而提高,景深随工作距离减少而变差	① 推荐5~10 mm之间的工作距离用于书写精细特征结构 ② 注意曝光时样品表面与电子束优化时的工作距离应保持相同,这将不改变前期扫描电镜电子束的优化条件
束流	图像分辨率和景深随束流降低而提高,信噪比样品损伤随束流增大而增加	① 实际束流数值可通过样品台上的法拉第杯测量 ② 通过调节扫描电镜上的光阑孔径和聚光镜电流改变束流大小
合轴和像散	减少入射电子束的像差和像散,使图像更清晰,获得更高分辨率	① 像散严重时需考虑合轴是否有误 ② 物镜内是否有污染
写场对准	写场是电子束通过扫描线圈进行书写的最大范围,准确的写场对准是进行写场拼接和套刻的前提	① 写场对准需要保证棋盘标样完好无变形、电子束聚焦良好、正确消像散和合轴 ② 在光刻高精度图像时可在由大到小的扫描范围下进行2次手动写场对准,增加对准其准确性
曝光剂量	曝光剂量是抗蚀剂单位面积上接受的电子数量,其剂量太高或太低可能导致图像过曝或显影不完全。曝光剂量与束流、电子束停留时间和电子移动步长有关,其关系表达式为:曝光剂量=(电子束)停留时间×束流/(电子束)步长	① 曝光剂量的设置需考虑多种因素。其中抗蚀剂灵敏性越高、抗蚀剂厚度越薄,版图图案越密集、电子束加速电压越大、衬底材料密度越高,则所需曝光剂量越低 ② 在第一次使用时,通常会对同一图案做一系列不同的剂量曝光实验,从而找出最合适对曝光剂量

3 设备的维护保养

为了延长仪器设备的使用寿命,确保仪器使用效果,使用人员和管理人员应共同做好相应的维护保养工作。SEM-电子束光刻系统的维护保养包括以下3个方面。

1) 设备使用时的规范操作和检查。由扫描电镜改造的电子束光刻系统,虽然上手操作较为简单,但其设备结构复杂,各种零部件及耗材价格昂贵。设备使用人员应避免出现如错误操作撞到电镜极靴或样品污染电镜腔体等问题,并保持自主维护意识,确保设备处于良好的工作状态。使用前检查房间温度和湿度是否正常,空压机、真空泵和不间断电源运行是否稳定无异响或报错等。使用时避免环境和震动对设备的影响,对设备或环境异常予以重视和警觉。若房间内温度持续上升,则需确认空调是否出现故障,若空压机反复启动则可能是单向阀堵塞^[13],异常问题需及时向设备管理员汇报,避免对设备或实验室造成更大损失。此外,用于电子束光刻等微纳加工技术本就对灰尘敏感,进入实验室时需穿戴相应防尘服,同时避免在设备周围引入灰尘。

2) 设备管理人员的有效管理。为保证设备使

用规范有序,管理员应对使用者进行操作考核,并请考核通过人员签署使用承诺书,才能授权仪器的使用。为统计设备使用情况并责任到人,管理人员应规定操作者提前预约设备使用时间,并在预约时间内刷卡上机使用。对于不爱惜设备的使用行为,管理人员及时取消该使用者的独立上机资格,同时由于人为原因造成的设备损坏,将向责任人按一定比例追责缴维修费。另外,管理人员可在设备旁张贴注意事项和设备操作流程,防止有学生因长时间未使用设备而导致操作疏漏,并收集设备使用反馈情况,持续更新培训内容,提高设备的使用质量^[14]。

3) 设备保养。设备管理者须确保实验室环境和设备各部件运行正常,定期调试设备,保证扫描图像清晰。针对系统辅助设备,维护者还应定期检查并记录各部件运行状态,如检查UPS电源运行状态、给空压机放水、机械泵更换泵油、循环水冷机除尘和换水等。针对电子光路系统,设备管理者需持续监测电镜镜筒真空、电子枪室真空、灯丝电流值等。若镜筒真空或电子枪室真空分别低于 5×10^{-5} Pa和 5×10^{-7} Pa,则会严重影响灯丝寿命,须及时排查环境温度或湿度、样品是否放气、离子泵是否异常等问题。

综上所述,对于 SEM-电子束光刻系统的使用和管理,使用者须严格遵守操作规程,管理者应做好管理工作,并定期进行维护保养,保持设备状态良好,以确保设备能够高效率稳定地运行。

4 结束语

本文通过对扫描电镜进行升级改造,获得低成本、易操作的 SEM-电子束光刻设备,并设计了完备的培训方案。升级后的设备和培训方案使学生深入了解场发射扫描电镜的工作原理和组成结构,掌握微纳加工中电子束光刻的操作应用,对仪器的安全操作有了更深的认识,在拓展学生知识面的同时,也培养了其实践能力和科研素养。本文也为高校教师管理相关仪器提供了培训范本,为仪器的维护保养提供了参考依据。

参考文献

- [1] MATSUMOTO H, NOMURA H, KIMURA H, et al. Current performance and future plans on electron multi-beam mask writers toward high-NA EUV era [C] // Proceedings of SPIE Advanced Lithography + Patterning. San Jose: Novel Patterning Technologies, 2023: 1249708.
- [2] GEORGE R B. Electron-beam technology in microelectronic fabrication[M]. Pittsburgh: Academic Press, 1980.
- [3] 郝晓亮, 赵英伟, 孙虎, 等. 热场发射电子枪在电子束光刻机中的应用研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(4): 44-47.
- [4] 梁惠康, 段辉高. 电子束光刻设备发展现状及展望[J]. 科技导报, 2022, 40(11): 33-44.
- [5] 王振宇, 成立, 祝俊, 等. 电子束曝光技术及其应用综述[J]. 半导体技术, 2006(6): 418-422.
- [6] 郝晓亮, 赵英伟, 王秀海, 等. 电子束直写曝光机的原理与常见问题分析[J]. 电子工业专用设备, 2020, 49(2): 48-52.
- [7] SHEN Y Q, ZHENG W W, ZHU K C, et al. Variability and yield in h-BN-based memristive circuits: The role of each type of defect[J]. Advanced Materials, 2021, 33(41): 2103656.
- [8] ZHU K C, PAZOS S, AGUIRRE F, et al. Hybrid 2D-CMOS microchips for memristive applications[J]. Nature, 2023, 618(7963): 57-62.
- [9] MA P, LIU K Z, HUANG G G, et al. Epsilon-near-zero substrate-enabled strong coupling between molecular vibrations and mid-infrared plasmons[J]. Optics Letters, 2022, 47(17): 4524-4527.
- [10] 朱文昌, 吴海华. 微纳加工与表征技术在高性能集成有机光电器件研究中的应用[J]. 中阿科技论坛 (中英文), 2022(9): 121-127.
- [11] 尤春, 刘维维. 电子束曝光邻近效应修正研究[J]. 电子与封装, 2018, 18(10): 40-43.
- [12] 颜泽林, 马志兵, 汪炜. 微细阵列结构电子束加工试验研究[J]. 电加工与模具, 2021(3): 61-65.
- [13] 夏晓飞, 张辰, 张雪松, 等. Quanta200F 场发射环境扫描电镜故障排除二例[J]. 分析仪器, 2014(3): 119-120.
- [14] 赵鹏, 于川茗. 新工科背景下大型仪器培训体系的创新与实践: 以扫描电镜为例[J]. 化学教育 (中英文), 2022, 43(22): 49-54.

编辑 王燕