

扫描电子显微镜在加强研究生教育方面的核心作用

刘崇^{1,2} 何峰¹ 张静^{1*}

1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072

2. 上海理工大学 分析测试中心, 上海 200093

[摘要]文中探讨了扫描电子显微镜 (SEM) 在光电领域研究生培养过程中的重要作用。随着微纳加工技术的快速发展, 对光电材料和器件的微观结构观察及性能研究提出了更高的要求。SEM 以其高分辨率的显微成像技术, 在光电材料的微观结构表征、纳米器件的形貌分析以及光电过程的机理研究中发挥着关键作用。文章首先概述了 SEM 的基本原理和特点, 然后通过案例分析展示了 SEM 技术在研究生科研实践中的应用。此外, 文中还讨论了 SEM 技术在教育中的意义, 以及如何通过实验教学和科研训练提高研究生的科研素养和解决实际问题的能力。通过本论文的探讨, 期望为光电领域的教育工作者和研究生提供对 SEM 技术的深入理解, 促进其在科研和教学中的有效应用, 推动光电学科的发展和人才培养。

[关键词]研究生教育; 扫描电镜; 光电材料表征; 微纳结构分析

DOI: 10.33142/fme.v6i2.15407

中图分类号: O646

文献标识码: A

The Core Role of Scanning Electron Microscopy in Strengthening Graduate Education

LIU Chong^{1,2}, HE Feng¹, ZHANG Jing^{1*}

1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi, 710072, China

2. Center for Instrumental Analysis, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China

Abstract: This article explores the important role of scanning electron microscopy (SEM) in the cultivation process of graduate students in the field of optoelectronics. With the rapid development of micro nano processing technology, higher requirements have been put forward for the observation of microstructure and performance research of optoelectronic materials and devices. SEM plays a crucial role in characterizing the microstructure of optoelectronic materials, analyzing the morphology of nanodevices, and studying the mechanisms of optoelectronic processes through its high-resolution microscopic imaging technology. The article first outlines the basic principles and characteristics of SEM, and then demonstrates the application of SEM technology in graduate research practice through case analysis. In addition, the article also discusses the significance of SEM technology in education, as well as how to improve the research literacy and problem-solving ability of graduate students through experimental teaching and research training. Through the exploration of this paper, it is expected to provide educators and graduate students in the field of optoelectronics with a deep understanding of SEM technology, promote its effective application in scientific research and teaching, and advance the development and talent cultivation of optoelectronics.

Keywords: graduate education; scanning electron microscope; characterization of optoelectronic materials; micro and nano structures analysis

引言

光电技术作为现代科学技术的重要组成部分, 在信息技术、生物医学、材料科学以及能源领域发挥着日益重要的作用。微纳加工技术的高速发展对光电材料和器件的微观结构观察及性能研究提出了更高的要求^[1-5]。扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 作为一种高分辨率的显微成像技术, 已成为光电领域研究和研究生培养过程中不可或缺的大型仪器之一。SEM 以其独特的表面敏感性和高空间分辨率, 在光电材料的微观结构表征、纳米器件的形貌分析以及光电过程的机理研究中发挥着重要作用。研究生作为科研的新生力量, 掌握 SEM 技术不仅能够加深对光电现象的理解, 而且能够提升其实验能力和创新能力。

本论文旨在探讨 SEM 在光电领域研究生培养过程中的应用和重要性。首先, 我们将概述 SEM 的基本原理和特

点, 阐明其在光电领域研究生培养过程中的重要作用; 随后, 通过具体案例分析, 展示 SEM 技术在研究生科研实践中的具体应用。此外, 本文还将讨论 SEM 技术在研究生培养中的教育意义, 以及如何通过实验教学和科研训练, 提高研究生的科研素养和解决实际问题的能力。

通过本论文的探讨, 我们期望为光电领域的教育工作者和研究生提供对 SEM 技术的深入理解, 促进其在科研和教学中的有效应用, 进而推动光电学科的发展和人才培养。

1 扫描电镜从理论到实践各方面对研究生能力的培养

1.1 对研究生理论基础的培养

研究生在研究过程中使用扫描电镜时, 需要掌握电镜的工作原理、成像机制、分辨率限制等基础知识。作者们在培训不同学生的过程中发现, 学生在研究过程中最常犯

的错误就是将光学显微镜与扫描电子显微镜的成像原理混为一谈。光学显微镜是通过可见光来成像，当照射透明样品时，光可以穿透样品。而扫描电镜是通过电子束激发样品表面的二次电子来成像，肉眼看到的透明样品在扫描电镜中并不是透明的。这在光电领域研究生的研究过程中是经常出现的问题。这就需要学生通过对成像原理的深入了解去理解两者不同的原因。

另一个经常出现的问题是分辨率。放大倍数在 500 倍以下的样品可以直接使用光学显微镜进行观察分析。好的光学显微镜，其分辨率最小在 200nm 左右^[6]，而扫描电镜的分辨率最小可以达到 0.8nm。根据不同的测试需求选择合适的测试仪器也是学生培养过程中的一个重要环节。

1.2 实验技能的培养

实践是检验理论的最好方式。在光电领域的研究生培养中，通过操作 SEM 进行实验，学生能够将理论知识转化为实际操作技能。从样品的制备、仪器的调整到图像的获取和分析，每一步都需要学生细心操作和不断实践，以提高实验技能和解决实验中遇到的问题的能力。首先，从样品制备来说，光电领域主要为 Si 与 SiO₂ 块体样品，表面或有覆盖金属薄膜、导电胶，或有激光加工结构。首先需要判断基体与表面是否导电，要确保电子束扫描样品表面时积聚的电荷可以与金属样品台形成导电通道，否则会出现严重的表面电荷现象，无法对样品细节进行清晰地观察。其次，要针对样品导电性的强弱选择不同的电压和电流进行观测。导电性强的样品可以用 10kV、5kV 等较高电压配合 2nA 和 1nA 的电流进行实验观测；而导电性较弱的样品则需要选择 2kV、1kV 的低电压搭配 200pA、100pA 的小电流进行观测。

通过对研究生进行理论教育可以帮助学生建立起对 SEM 操作的科学认知，而且为后续的实验设计与操作及后续数据分析打下坚实的基础。

2 扫描电镜在光电领域研究中的具体应用

随着半导体行业对微纳尺度高分辨率结构的需求增加，传统的激光直接写入技术受到衍射极限的限制。为了克服这一限制，研究者们发展了受激发射耗尽 (STED) 技术，并将其应用于激光直接写入 (STED-LDW)。通过调整激发光束的平均功率、写入速度和偏振状态，博士研究生陈国梁发现在特定的条件下可以实现最小线宽为 63nm 和最小线间距为 173nm 的超分辨率结构。SEM 能够提供高分辨率的图像，使研究者能够观察到激光直接写入 (LDW) 系统制造的微纳结构的细节，这里以上海理工大学博士研究生陈国梁所发表论文中的内容为例，具体内容如图 1 所示^[7]。通过 SEM 图像，研究者可以准确测量制造出的线宽和线间距，这对于评估 LDW 系统性能和优化工艺参数至关重要。另外，SEM 的应用能够揭示微纳结构的表面特征，如粗糙度和形态，这对于理解材料的物理和化学特性以及加工参数如何影响 LDW 过程非常重要。SEM 图像可以用来评估 LDW 过程中产生的结构的质量，包括识别可能的缺陷，

如断裂的线或不均匀的宽度，从而指导工艺的改进。SEM 还可以与能量色散 X 射线光谱 (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) 等技术结合使用，以分析材料的成分和分布，进一步研究 LDW 过程中材料的相互作用。在这篇论文报道的研究中，SEM 的使用是实验部分的关键环节，它不仅帮助作者观察和分析了 LDW 系统产生的微观结构，而且为优化系统设计和工艺参数提供了重要数据，对于作者而言，SEM 提供了重大帮助，是一个有着重要意义的研究手段。除此之外，硕士研究生使用 SEM 对飞秒激光诱导微结构进行观察分析，对其研究和毕业论文起到了重要帮助作用^[8]。

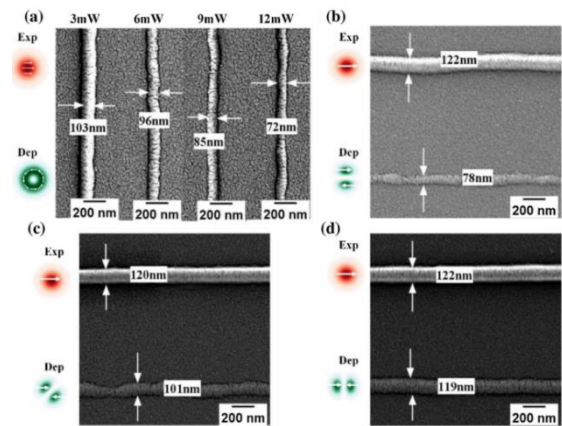


图 1 在不同耗尽光束强度分布下，由激发光束处理的纳米线的尺寸 (b)-(d) 展示了在其他条件保持不变的情况下，不同耗尽光束强度分布的处理结果^[7]

扫描电镜不仅可以提供材料平面结构的形貌，还可以通过旋转样品台，对样品的立体结构进行观察和分析。根据材料特性，通过选择不同电压与电流的配合，可以对材料的立体形貌、高度、厚度以及透明度进行观察。图 2 为本文作者们在工作中为博士研究生课题内容进行的测试^[9]。通过图 2 可以看出样品的高度信息，通过不同透明度预估材料的厚度，也可以看到材料在立体角度的连续性。SEM 结果为样品的观察提供了立体结构方面的信息，提供研究生们在材料制备过程中出现的结构缺陷，结合加工参数，可以帮助研究生在激光加工过程中进一步优化加工参数。

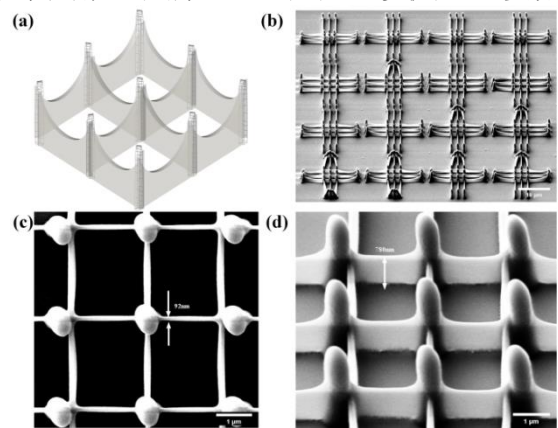


图 2 展示样品立体信息、高度信息、透明度、连续性的 SEM 图片^[9]

3 扫描电镜对研究生综合能力的培养

3.1 数据分析能力

研究生在掌握 SEM 操作技能的同时,还能结合观测结果培养数据分析和解释的能力。通过对 SEM 图像中观测对象的定量分析,研究生们能够学会如何从微观结构中提取有效信息,并探索其与光电材料和器件的加工参数与所表现出来的性能的变化规律。此外,学生还需学会如何运用统计方法来评估实验结果的可靠性,需要学习 Excel、Origin 等数据处理软件的操作方法对数据进行归纳总结和优化。

3.2 创新思维与科研能力的培养

在研究生教育中,培养学生的创新思维和科研能力至关重要。通过 SEM 的实验研究,研究生们可以探索新的样品制备技术、样品加工方法和数据分析方法。这种探索精神不仅能够激发学生的科研兴趣,而且有助于他们在光电领域开展原创性研究。

4 结论

通过本文的研究,我们得出以下结论:扫描电子显微镜(SEM)是光电领域研究生培养中不可或缺的工具。它不仅加深了学生对光电现象的理解,而且提升了他们的实验技能和创新能力。研究生通过操作 SEM,能够将理论知识转化为实际操作技能,并在实验设计、样品制备、图像获取和分析等方面积累实践经验。此外,SEM 图像的定量分析培养了学生的数据分析和解释能力,而探索新的样品制备技术和数据分析方法则激发了学生的创新思维和科研兴趣。这些能力的培养对学生未来在光电领域的职业发展具有重要意义。

[参考文献]

[1]刘婷婷,董彦达,张磊,等.扫描电镜类大型仪器在环境学科教学科研中的应用与管理[J].分析仪器,2023(1):99-104.

器,2023(1):99-104.

[2]岳丽杰,杨克森,韩金生,等.材料腐蚀与防护实验教学案例设计[J].实验技术与管理,2024(41):155-162.

[3]张毅,欧阳静,杨阳.扫描电镜实验课程教学模式探索[J].科教导刊,2024(11):122-124.

[4]高国超,夏鹏,吉健维.扫描电镜大型仪器应用于地质类本科实验教学的探讨[J].科教文汇,2023(17):86-90.

[5]齐美丽,姚圣坤.扫描电镜在“材料分析测试方法”课程中的教学改革探索[J].广东化工,2023(50):206-219.

[6]C. LIU.Oxidation and carburisation of 9Cr-1Mo steel in both simulant and in-service AGR coolant gases [D].Bristol,UK: University of Bristol,2018.

[7]G. CHEN, D. MO, J. CHEN, et al.Self-aligned dual-beam superresolution laser direct writing with a polarization-engineered depletion beam [J].Photonics Research,2024,12(6):1194-1200.

[8]Q. LI, Z. XU, H. ZHANG, et al.Dynamic visible-infrared transmittance regulation based on fluoroaluminate glass by femtosecond-laser-customized induced microstructure [J].Ceramics International,2024(50):8480-8489.

[9]G. CHEN, H. TENG, J. CHEN, Q. ZHAN.Fabrication in sub-diffraction limit high-aspect-ratio nanostructures via laser direct writing [J].Chinese Optics Letters,2024(23):11-13.

作者简介:刘崇(1984-),女,上海理工大学工程师,主要从事大型仪器在光电材料、金属材料方面的应用研究;张静(1982-),女,西北工业大学副教授,主要从事材料的多尺度缺陷组织及其模拟研究。