

扫描电子显微镜

西瓜^{*}, 冉老师[†]

北京大学 物理学院, 北京 100871

【摘要】 本实验利用 KYKY-EM3200 型扫描电子显微镜对样品表面形貌进行了观察, 并研究了聚光镜电流对 SEM 成像质量的影响。实验中在固定加速电压 30 kV 条件下, 改变聚光镜电流并分别在不同放大倍率下获取样品表面图像。通过对比不同实验参数下的成像结果, 分析了聚光镜电流对图像衬度、分辨率以及信噪比的影响规律。为了更加定量地评价图像质量, 实验进一步利用 Python 对 SEM 图像进行了数字图像处理, 采用全局灰度衬度、基于 Sobel 算子的边缘衬度、Laplacian 方差清晰度以及基于 Gaussian 高通残差的信噪比等指标, 对不同聚光镜电流条件下的图像质量进行了分析。结果表明, 较大的聚光镜电流能够增强电子束会聚能力, 提高图像边缘分辨率, 但同时也会导致高频噪声增强, 从而降低图像信噪比。综合实验结果可以看出, SEM 成像质量实际上是在图像分辨率与噪声之间的折中, 在本实验条件下聚光镜电流取 $I = 500 \sim 600$ 时能够获得较优的综合成像效果。本实验进一步说明了数字图像处理在现代实验分析中的重要作用。

【关键词】 扫描电子显微镜, 聚光镜电流, 图像衬度, 图像分辨率, 信噪比, 数字图像处理

Scanning electron microscope

Xisense, Prof. Ran

Physics Institute, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: In this experiment, the surface morphology of a sample was investigated using a KYKY-EM3200 scanning electron microscope (SEM), and the influence of condenser current on SEM imaging quality was systematically studied. Under a fixed accelerating voltage of 30 kV, SEM images were obtained at different condenser currents and magnifications. The effects of condenser current on image contrast, spatial resolution, and signal-to-noise ratio (SNR) were analyzed by comparing the imaging results under different experimental conditions. To quantitatively evaluate the image quality, digital image processing based on Python was further applied to the SEM images. Several metrics, including global grayscale contrast, Sobel-based edge contrast, Laplacian variance sharpness, and Gaussian high-pass residual SNR, were employed to characterize the imaging performance under different condenser currents. The results show that increasing the condenser current enhances the focusing ability of the electron beam and improves edge resolution, while simultaneously amplifying high-frequency noise and reducing the image SNR. Therefore, the overall SEM imaging quality is determined by a trade-off between spatial resolution and noise. Under the experimental conditions of this work, the optimal condenser current range was found to be approximately $I = 500 \sim 600$. This experiment further demonstrates the importance of digital image processing methods in modern experimental analysis and highlights their ability to provide more objective and quantitative evaluations of imaging quality.

Key Words: Scanning electron microscopy, condenser current, image contrast, image resolution, signal-to-noise ratio, digital image processing

1 引言

扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 是一种利用聚焦电子束扫描样品表面, 并通过探测电子束与样品相互作用所产生信号来获得材料表面形貌与成分信息的重要微观表征技术。由于电子的德布罗意波长远小于可见光波长, 电子显微技术能够突破传统光学显微镜的衍射极限, 实现纳米尺度甚至原子尺度的高分辨成像, 因此在材料科学、凝聚态物理、半导体器件、生物医学以及纳米技术等领域具有重要应用价值^[1-2]。

电子显微技术的发展始于二十世纪初电子波动性的提出。1924 年德布罗意提出物质波理论后, 人们逐渐认识到电子束可以像光束一样进行聚焦与成像。1931 年, Knoll 与 Ruska 首次研制出透射电子显微镜 (TEM), 标志着电子显微学的诞生^[3]。随后, 电子光学理论不断完善, 电磁透镜技术与高真空技术快速发展, 使电子显微镜的分辨率不断提高。与透射电子显微镜不同, 扫描电子显微镜主要通过细聚焦电子束逐点扫描样品表面, 并收集二次电子、背散射电子以及特征 X 射线等信号实现成像, 因此更加适用于材料表面形貌与微区结构分析^[4]。

现代扫描电子显微镜通常由电子枪、电磁透镜系统、扫描系统、样品室以及信号探测系统组成^[5]。电子枪发射出的电子在高压电场加速后, 经聚光镜和物镜聚焦形成纳米尺度电子束, 并在扫描线圈作用下对样品表面进行光栅式扫描。当高能电子束入射到样品表面时, 会与样品中的原子发生复杂相互作用, 产生二次电子、背散射电子、俄歇电子以及特征 X 射线等多种信号。其中, 二次电子由于主要来源于样品表面数纳米范围内, 因此具有较高的表面敏感性, 通常用于观察材料表面的微观形貌; 而背散射电子则与样品原子序数密切相关, 可用于成分衬度分析^[1-2]。

相较于传统光学显微镜, SEM 具有景深大、分辨率高、放大倍数范围宽以及样品制备相对简单等优点^[6]。此外, 随着场发射电子枪、低加速电压技术以及能谱联用技术的发展, 现代 SEM 已不仅能够进行高分辨形貌观察, 还能够结合能量色散 X 射线谱 (EDS) 实现元素分析与微区成分测量, 因此已经成为现代材料研究与工业检测中的重要实验工具。

本实验通过对扫描电子显微镜结构与工作原理的学习, 掌握扫描电子显微镜的基本操作方法, 并观察不同实验参数条件下 SEM 图像质量的变化规律。通过分析加速电压、工作距离、聚光镜电流等参数对图像分辨率和景深的影响, 可以进一步理解电子束与物质相互作用的物理机制以及扫描电子显微镜成像的基本特点。

2 实验原理

2.1 电子光学基础

扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 的理论基础来源于电子光学。电子光学利用电子在电磁场中的运动规律与光线在光学介质中传播规律之间的相似性, 将电子束视作类似于光束的传播对象, 并利用静电场和磁场实现电子束的聚焦、偏转与成像^[2,5]。

1924 年, 德布罗意提出物质波理论, 认为电子等实物粒子同样具有波粒二象性, 其德布罗意波长满足

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.1)$$

其中 h 为普朗克常数, p 为粒子动量。对于经过加速电压 U 加速的电子, 在非相对论近似下有

$$p = \sqrt{2meU} \quad (2.2)$$

因此电子波长可表示为

$$\lambda \approx \sqrt{\frac{150}{U}} \text{ \AA} \quad (2.3)$$

由此可见，在几十千伏加速电压条件下，电子束波长远小于可见光波长，因此电子显微镜能够突破光学显微镜的衍射极限，实现纳米尺度的高分辨成像^[3,7]。

在电子光学中，应用于电子束聚焦与成像的电磁场通常具有旋转对称性。在柱坐标系 (r, θ, z) 下，静电势满足拉普拉斯方程

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = 0 \quad (2.4)$$

利用电子在电磁场中的最小作用量原理

$$\delta \int p_s ds = 0 \quad (2.5)$$

可建立电子束轨迹与几何光学之间的对应关系，从而形成电子光学理论基础^[5]。

2.2 扫描电子显微镜成像原理

如图1所示，扫描电子显微镜主要由电子枪、电子光学系统、扫描系统、样品室以及信号探测系统组成^[1]。电子枪发射出的电子在高压电场作用下被加速，经聚光镜和物镜聚焦后形成细电子束，并在扫描线圈作用下对样品表面进行逐点扫描。

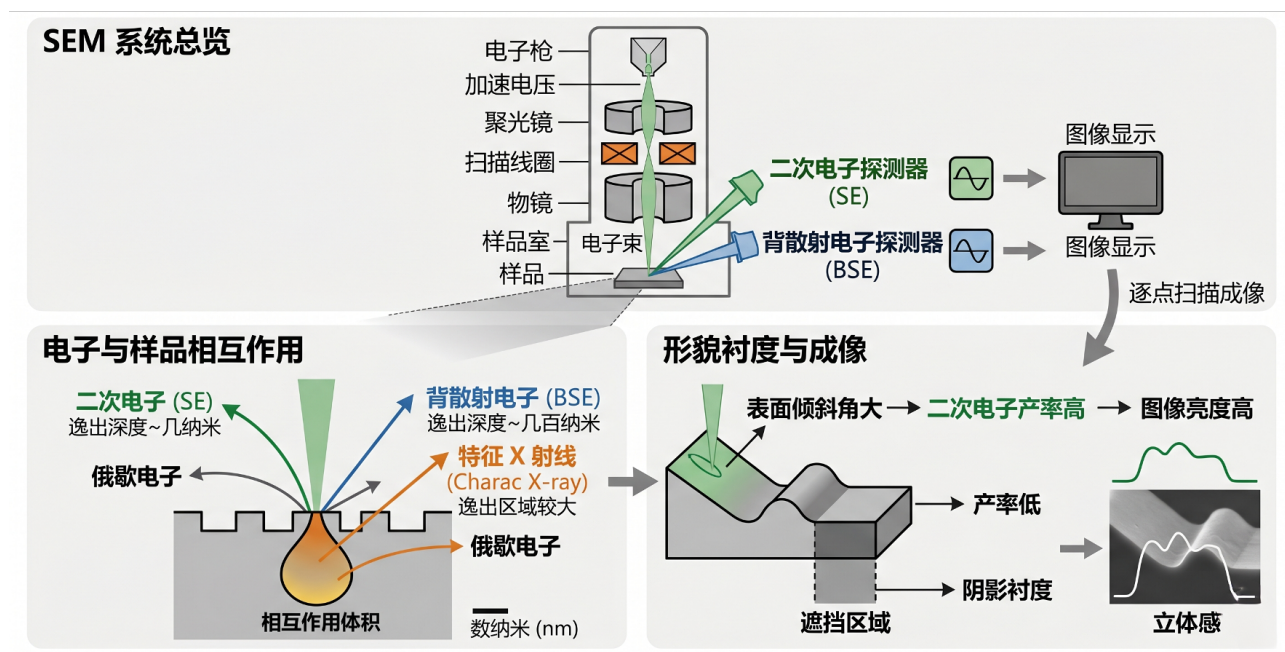


图 1 SEM 的结构及原理示意图

当高能电子束入射样品表面时，会与样品中的原子发生复杂相互作用，产生多种信号，包括二次电子 (Secondary Electron, SE)、背散射电子 (Backscattered Electron, BSE)、特征 X 射线以及俄歇电子等^[4]。其中，二次电子主要来源于样品表面数纳米范围内，因此具有较高的表面敏感性，通常用于样品表面形貌成像。

SEM 的成像方式属于逐点扫描成像。电子束扫描到样品某一点时，该点产生的二次电子被探测器收集，并转换为对应像素点的亮度信号。当电子束完成整片区域扫描后，即可形成样品表面的二维图像。

二次电子像的衬度主要来源于样品表面的形貌差异。当电子束以固定方向入射时，样品表面的倾斜角不同，将导致二次电子产率不同。一般而言，表面倾角越大，逸出的二次电子越容易被探测器收集，因此图像亮度更高。此外，表面凸起结构还会遮挡部分区域的二次电子形成“阴影衬度”，从而进一步增强样品表面的立体感^[2]。

2.3 聚光镜电流对成像的影响

聚光镜是扫描电子显微镜电子光学系统中的重要组成部分，其作用类似于光学显微镜中的聚焦透镜。通过调节聚光镜电流，可以改变电磁透镜的磁场强度，从而改变电子束的会聚能力^[1-2]。

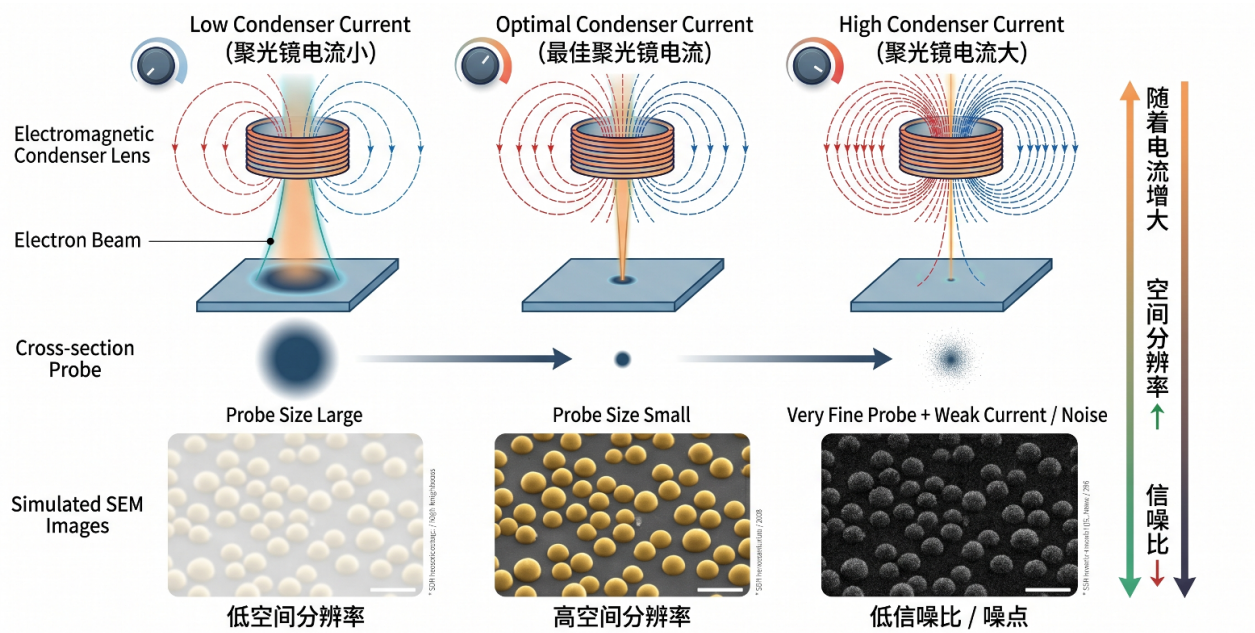


图 2 聚光镜电流对于成像质量的影响

当聚光镜电流较小时，电子束会聚能力较弱，最终形成的电子探针尺寸较大，因此图像分辨率较低；随着聚光镜电流增大，电子束逐渐被压缩为更细的束斑，电子探针尺寸减小，从而能够获得更高的空间分辨率。

然而，聚光镜电流并非越大越好。当电子束过于纤细时，束流会减弱，同时电子束发散效应以及系统噪声会逐渐增强，导致图像中出现明显噪点，使图像信噪比下降。此外，过大的聚光镜电流还可能导致景深减小以及样品局部区域亮度不均匀等问题。因此，在实际实验中需要综合考虑图像分辨率、景深以及噪声之间的平衡，选择适当的聚光镜电流参数，以获得最佳成像效果^[1]。

3 实验装置

本实验使用的扫描电子显微镜型号为 KYKY-EM3200，其主要由电子枪、电子光学系统、扫描系统、样品室、真空系统以及信号探测与显示系统组成^[5]。实验装置结构示意图如图 1 所示。

电子枪位于镜筒顶部，其阴极灯丝在加热后发射电子，在高压电场作用下电子被加速形成高能电子束。本实验中电子束的加速电压最高可达 30 kV。电子束经过聚光镜和物镜等电磁透镜后被进一步压缩聚焦，在样品表面形成尺寸很小的电子探针，从而提高系统的空间分辨率。

在末级透镜附近安装有扫描线圈，用于控制电子束在样品表面进行逐点扫描。扫描方式采用光栅扫描模式，即电子束按照从左到右、从上到下的顺序依次扫描样品表面。当电子束入射到样品后，会与样品中的原子发生相互作用，产生二次电子、背散射电子以及特征 X 射线等多种信号。其中，本实验主要利用二次电子信号进行表面形貌成像。

样品室内部安装有二次电子探测器。样品产生的二次电子在探测器栅极正电场的吸引下进入闪烁体，并通过光导系统与光电倍增管转换为电信号，随后经过视频放大器放大，最终在计算机显示系统中形成样品的扫描电子显微图像。

为了减少电子束在空气中的散射并保护电子枪正常工作，SEM 必须工作在高真空环境下。本实验采用

机械泵与分子泵联合抽真空的方式获得工作真空。实验过程中,当系统真空度达到工作要求后,方可开启高压并进行样品观察。

实验中主要可调参数包括加速电压、聚光镜电流、工作距离、物镜电流、亮度以及对比度等。其中聚光镜电流直接影响电子束的会聚能力,从而影响电子探针尺寸与图像分辨率,因此本实验重点研究聚光镜电流变化对 SEM 成像质量的影响。

4 结果与分析

根据实验手册完成容器抽真空,扫描电镜开机,并预调相关系数后,调节电子束准直以及焦距,像散等参数使样品的像清晰。本实验在固定加速电压 30 kV 的条件下,改变聚光镜电流 $I = 400, 450, 500, 550, 600, 650$, 分别在低倍率 $\times 1.5k$ 和高倍率 $\times 11k$ 下观察样品表面形貌。实验结果如图 3 所示。

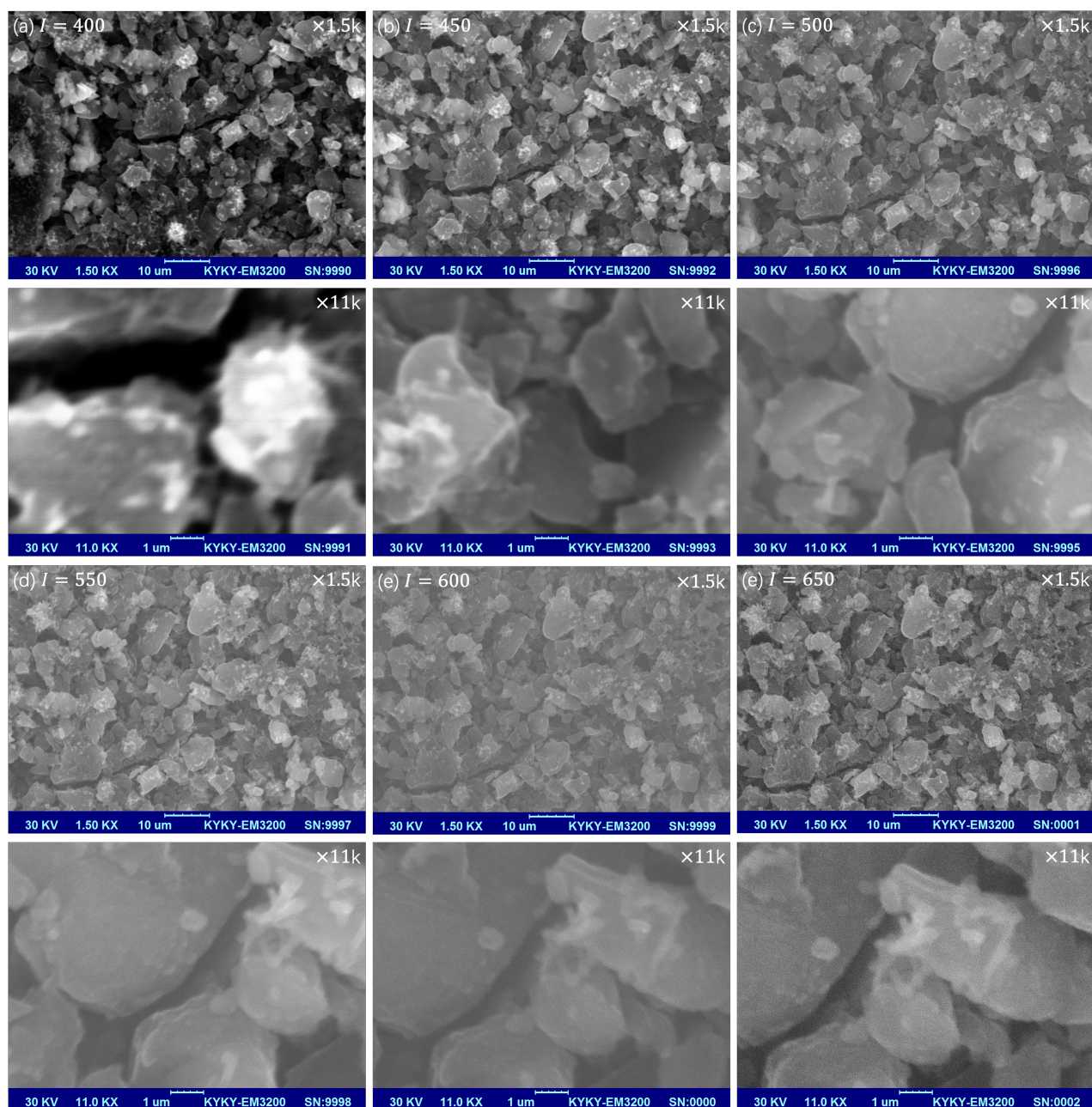


图 3 不同聚光镜电流下的 SEM 成像结果

下面我们将围绕衬度,分辨率和信噪比三个方面,分析聚光镜电流对成像质量的影响。

4.1 图像衬度

为了更加定量地分析聚光镜电流对成像质量的影响, 实验中进一步利用 Python 对 SEM 图像进行了数字图像处理。处理过程中, 首先将原始图像转换为灰度图像, 并裁剪掉图像中的标尺、文字以及仪器参数区域, 仅保留实际成像部分用于后续分析。

最初, 采用全局灰度衬度 (global contrast) 作为图像衬度的评价指标, 其定义为图像灰度标准差与平均灰度之比, 即

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}} \quad (4.1)$$

其中 $\bar{I}$ 为图像平均灰度, σ_I 为灰度标准差。该指标能够描述整幅图像灰度分布的整体起伏程度。不同聚光镜电流下得到的全局衬度结果如图 4(a) 所示。然而, 从结果可以发现, 全局衬度在较低聚光镜电流 $I = 400$ 时反而达到最大值, 这与直接观察图像时得到的“低电流下图像较模糊”的现象并不一致。进一步分析认为, 这是由于不同 SEM 图像对应的样品区域并不完全相同, 不同区域中颗粒分布、亮暗结构以及整体灰度背景存在差异, 因此全局灰度标准差不仅反映了图像边缘信息, 同时还混合了样品本身的大尺度形貌变化与亮度分布差异。对于 SEM 图像而言, 直接利用全局灰度衬度比较不同图像的成像质量并不完全合理。

因此, 为了更加准确地衡量样品边缘的清晰程度, 进一步采用基于 Sobel 算子的边缘衬度 (edge contrast) 作为新的评价指标。Sobel 算子通过计算图像灰度在空间中的一阶梯度来提取边缘信息, 其梯度幅值定义为

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (4.2)$$

其中 G_x 与 G_y 分别表示图像在 x 与 y 方向上的灰度梯度。实验中利用 Sobel 算子对灰度图像进行边缘检测, 并取整幅图像梯度幅值的平均值作为边缘衬度指标:

$$C_{\text{edge}} = \langle G \rangle \quad (4.3)$$

该指标本质上反映了图像灰度在局部区域内变化的剧烈程度, 因此能够更加直接地描述颗粒边界是否清晰以及图像细节是否丰富。不同聚光镜电流对应的边缘衬度结果如图 4(b) 所示。相比于全局衬度, 边缘衬度与实际观察到的图像清晰程度更加一致。随着聚光镜电流增大, 电子束会聚能力逐渐增强, 电子探针尺寸减小, 图像中的颗粒边缘逐渐清晰, 因此边缘衬度整体呈增加趋势。当聚光镜电流达到 $I = 650$ 时, 边缘衬度达到最大值, 此时图像中大量高频细节被增强, 但同时也可以观察到明显的高频噪声。这说明较大的聚光镜电流虽然能够提高图像边缘分辨能力, 但同时会增强系统噪声, 因此成像质量并非随聚光镜电流单调提高, 而是在分辨率与信噪比之间存在一定的权衡关系。

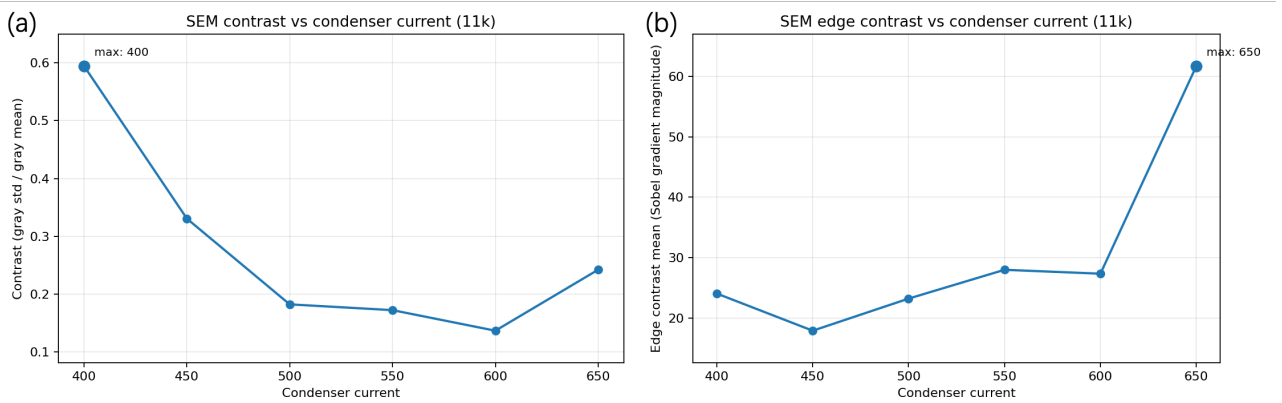


图 4 不同聚光镜电流下的图像衬度分析结果: (a) 全局灰度衬度; (b) 基于 Sobel 算子的边缘衬度

当然，衬度这个分析图像质量的方法对于样品位置和图像亮度，对比度等因素的依赖度过高，很值得我们更进一步的定量实验考查他的依赖关系，不过遗憾的是本次实验没有将这些数据全部记录下来，所以对于衬度的讨论只能止步于此了。

4.2 图像分辨率

除了衬度之外，图像分辨率也是评价 SEM 成像质量的重要指标。对于扫描电子显微镜而言，分辨率本质上反映了系统区分样品微小结构细节的能力。当聚光镜电流增大时，电子束的会聚能力增强，电子探针尺寸减小，因此理论上能够获得更高的空间分辨率。然而，较大的聚光镜电流同时也可能带来更强的高频噪声，因此需要进一步进行定量分析。

实验中采用 Python 对不同聚光镜电流下获得的高倍率 ($\times 11k$) SEM 图像进行了清晰度分析。处理过程中，首先将图像转换为灰度图像，并裁剪掉底部包含标尺、仪器参数以及文字标注的区域，仅保留实际 SEM 成像区域参与运算。随后利用 Laplacian 算子对图像进行二阶微分处理。Laplacian 算子能够突出图像中的高频信息与边缘结构，其定义为

$$\nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \quad (4.4)$$

其中 $I(x, y)$ 表示图像灰度分布。由于清晰图像通常具有更加明显的边缘与更丰富的高频细节，因此实验中采用 Laplacian 结果的方差作为图像清晰度指标：

$$S = \text{Var}(\nabla^2 I) \quad (4.5)$$

该指标越大，说明图像中的边缘变化越剧烈，高频细节越丰富，因此对应更高的图像分辨率。

图 5(a) 给出了 Laplacian 算子作用后的典型中间处理结果。可以看到，经过二阶微分后，图像中的高频结构与边缘区域被显著增强，而较平滑区域则被抑制，因此该方法能够较好地提取样品颗粒边缘信息。

不同聚光镜电流下得到的图像清晰度分析结果如图 5(b) 所示。从结果可以看出，在较低聚光镜电流条件下，图像清晰度较低。当聚光镜电流由 $I = 450$ 增大至 $I = 550 \sim 600$ 时，Laplacian 方差明显增加，说明图像中的颗粒边缘逐渐清晰，样品细节更加丰富。这与直接观察 SEM 图像得到的结果一致，表明较大的聚光镜电流能够增强电子束的会聚能力，从而提高空间分辨率。

当聚光镜电流进一步增大至 $I = 650$ 时，图像清晰度指标出现大幅提高。然而结合原始 SEM 图像可以发现，此时图像中已经出现较明显的高频噪声。由于 Laplacian 算子对于高频分量非常敏感，因此随机噪声也有可能 会导致方差快速增大。所以我们还需要进一步对信噪比进行分析。

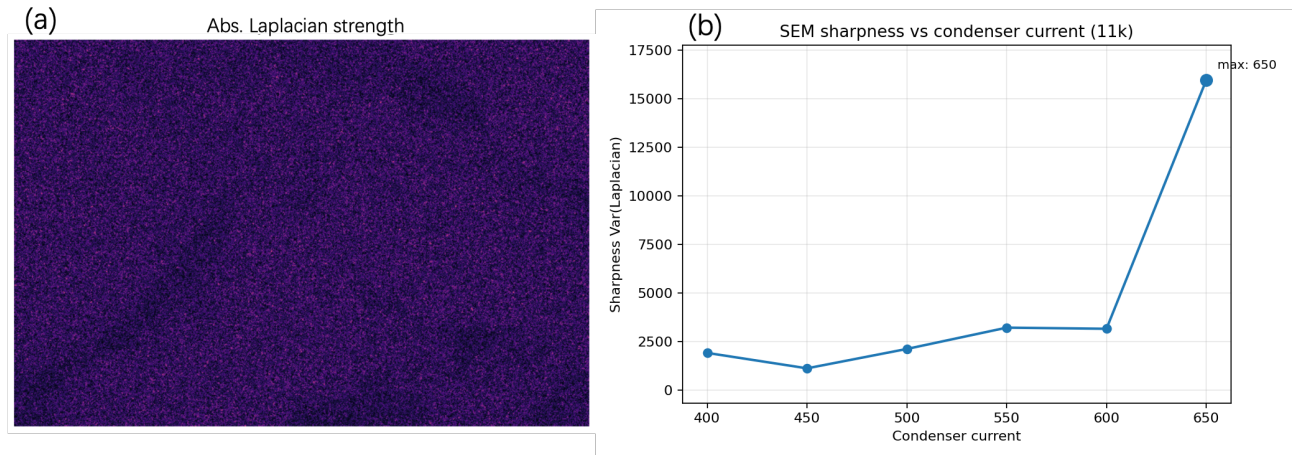


图 5 (a) Laplacian 算子作用后的图像中间结果；(b) 不同聚光镜电流下的图像清晰度分析结果

4.3 图像信噪比

除了衬度与分辨率之外，信噪比（Signal-to-Noise Ratio, SNR）同样是评价 SEM 成像质量的重要指标。对于扫描电子显微镜而言，较高的信噪比意味着图像中的有效形貌信息相对于随机噪声更加明显，从而能够更加准确地观察样品表面结构。

实验中采用 Python 对不同聚光镜电流下的高倍率（ $\times 11k$ ）SEM 图像进行了信噪比分析。处理过程中，首先将原始图像转换为灰度图像，并裁剪掉底部包含标尺与仪器参数的区域。随后利用 Gaussian 滤波对图像进行平滑处理，以估计图像中的低频背景：

$$I_{\text{smooth}} = G_{\sigma} * I \quad (4.6)$$

其中 G_{σ} 表示 Gaussian 核函数，本实验中取 $\sigma = 3$ 。平滑后的图像主要保留样品的大尺度结构，而高频部分则主要对应噪声与局部细节。

进一步利用原始图像与平滑图像之差构造高通残差：

$$I_{\text{noise}} = I - I_{\text{smooth}} \quad (4.7)$$

该高通残差中主要包含随机噪声以及局部高频结构。为了尽可能避免样品真实边缘结构对噪声估计的影响，实验中进一步利用 Sobel 梯度对图像进行边缘检测，并选取梯度较低的区域作为“平坦区域（flat region）”，仅利用这些区域估计噪声强度。图 6(a) 给出了 Gaussian 平滑背景以及平坦区域掩膜的中间处理结果，其中红色区域对应低梯度区域。

噪声强度定义为高通残差在平坦区域中的标准差：

$$\sigma_{\text{noise}} = \sqrt{\langle (I_{\text{noise}} - \langle I_{\text{noise}} \rangle)^2 \rangle} \quad (4.8)$$

进一步定义图像信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{\bar{I}}{\sigma_{\text{noise}}} \quad (4.9)$$

其中 $\bar{I}$ 为图像平均灰度。该定义反映了有效图像信号相对于随机噪声的强弱关系。

不同聚光镜电流下得到的信噪比分析结果如图 6(b) 所示。从结果可以看出，信噪比在 $I = 450$ 时达到最大值，随后随着聚光镜电流继续增大而逐渐下降。当聚光镜电流较大时，电子束会聚增强，虽然能够提高图像分辨率，但同时也会导致图像中的高频噪声增强，因此整体信噪比下降。

特别是在 $I = 650$ 时，尽管前述边缘衬度与 Laplacian 清晰度指标均达到较高数值，但信噪比已经明显降低。这说明此时图像中的大量高频信息实际上来源于随机噪声，而并非真实样品结构。因此，仅依据边缘增强或 Laplacian 方差并不能完全评价图像质量，必须同时结合信噪比进行分析。

另一方面，需要指出的是，不同聚光镜电流下的图像调焦状态可能存在一定差异。例如在 $I = 500$ 与 $I = 550$ 时，图像可能尚未达到最佳聚焦状态，因此其清晰度与信噪比结果可能略低于理论最优值。因此，本实验结果更适合用于分析聚光镜电流变化对 SEM 成像趋势的影响，而并非严格给出系统的最佳工作参数。

综合衬度、分辨率以及信噪比分析结果可以看出，较大的聚光镜电流能够提高电子束会聚能力并增强边缘分辨率，但同时也会增强高频噪声，从而降低图像信噪比。因此，SEM 成像质量实际上是在分辨率与噪声之间的折中。结合实验结果，本实验中较优的聚光镜电流范围约为 $I = 500 \sim 600$ 。

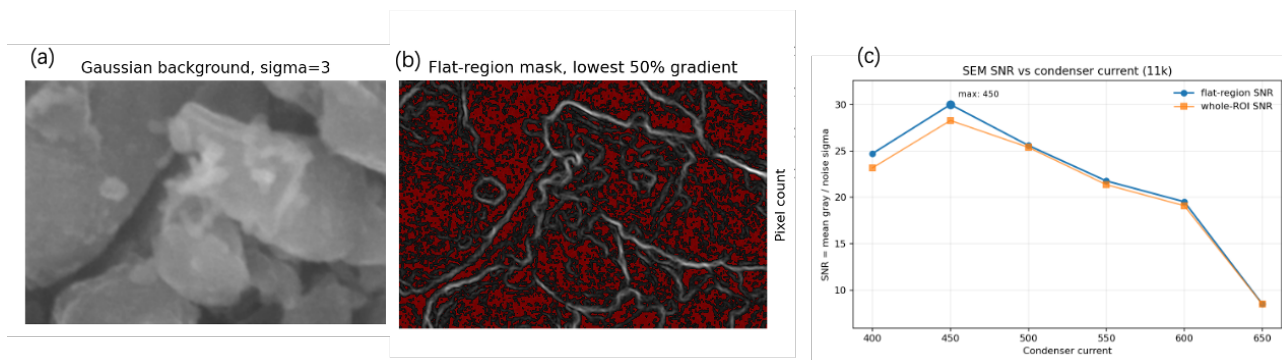


图 6 (a)(b) 信噪比分析中的中间处理结果；(c) 不同聚光镜电流下的信噪比分析结果

5 总结

本实验通过对扫描电子显微镜结构与工作原理的学习，掌握了 SEM 的基本操作方法，包括样品装载、系统抽真空、电子束准直、焦距调节以及像散校正等实验步骤，并成功获得了不同聚光镜电流条件下的样品表面形貌图像。

实验结果表明，聚光镜电流会显著影响 SEM 的成像质量。当聚光镜电流较小时，电子束会聚能力较弱，电子探针尺寸较大，因此图像边缘较为模糊，空间分辨率较低；随着聚光镜电流增大，电子束逐渐被压缩为更细的束斑，图像中的颗粒边界逐渐清晰，细节信息更加丰富。然而，当聚光镜电流继续增大时，虽然图像边缘增强明显，但同时也伴随着高频噪声的快速增加，导致图像信噪比下降。因此，SEM 成像质量实际上是在分辨率与噪声之间的平衡。

为了更加定量地分析聚光镜电流对成像质量的影响，本实验进一步利用 Python 对 SEM 图像进行了数字图像处理与分析。实验中分别采用全局灰度衬度、基于 Sobel 算子的边缘衬度、Laplacian 方差清晰度以及基于 Gaussian 高通残差的信噪比等指标，对不同聚光镜电流下的图像质量进行了比较分析。结果表明，相较于简单的全局灰度衬度，边缘衬度、Laplacian 方差以及信噪比能够更加有效地反映 SEM 图像的真实成像质量。

综合实验结果可以看出，在本实验条件下，聚光镜电流取 $I = 500 \sim 600$ 时能够较好地兼顾图像分辨率与信噪比，从而获得较优的 SEM 成像效果。同时，本实验也说明了数字图像处理方法在现代实验分析中的重要作用，通过程序化定量分析能够更加客观地评价实验结果，并进一步提高实验数据分析的可靠性与可重复性。

致谢

感谢冉广照老师的悉心指导感谢范逸恒同学的协助

参考文献

- [1] GOLDSTEIN J, NEWBURY D E, ECHLIN P, et al. Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis[M]. 3rd ed. Springer, 2003.
- [2] REIMER L. Scanning electron microscopy: Physics of image formation and microanalysis[M]. Springer, 1998.
- [3] RUSKA E. The development of the electron microscope and of electron microscopy[J]. Reviews of Modern Physics, 1987, 59(3): 627-638.
- [4] EVERHART T E, THORNLEY R F M. Wide-band detector for micro-microampere low-energy electron currents[J]. Journal of Scientific Instruments, 1960, 37(7): 246-248.
- [5] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验 (第四版) [M]. 高等教育出版社, 2015.
- [6] 章晓中. 电子显微学分析[M]. 清华大学出版社, 2006.
- [7] DE BROGLIE L. Recherches sur la théorie des quanta[J]. Annales de Physique, 1924, 10: 22-128.

附录 A：思考题

1. 本实验为什么要求水冷？什么情况下轰鸣器会响？

扫描电子显微镜在工作过程中需要使用扩散泵维持高真空环境，同时电子枪灯丝和部分电子学系统在工作时也会产生较大的热量，因此必须采用循环水冷系统进行散热。如果冷却不足，扩散泵油温过高，不仅会降低抽真空效率，还可能导致扩散泵损坏甚至出现返油现象，从而污染镜筒真空系统并影响电子束稳定性。实验过程中，当循环冷却水流量不足、冷却系统故障或者扩散泵温度过高时，系统保护电路会触发报警，此时仪器轰鸣器会发出警报声，以提醒操作者及时关闭高压或停止实验。此外，当真空系统异常、高压系统工作不稳定等情况下，仪器也可能触发报警保护。

2. 样品放置位置与图像方位有什么关系？

SEM 图像中的方向与样品在样品台的实际摆放方向直接相关。由于扫描电子束是在样品表面按照固定方向进行光栅扫描，因此当样品发生旋转时，最终获得的图像也会对应发生旋转。此外，样品台的倾斜会改变样品表面相对于电子束和探测器的位置关系，从而影响二次电子的收集效率以及图像衬度。对于具有明显方向性的样品，例如晶体台阶、裂纹或者纤维结构，样品放置方向会直接影响图像中结构的观察效果。适当调整样品方向能够增强边缘衬度，提高某些微观结构的可辨识度。

3. 如何选择高压档？

SEM 的加速电压会直接影响电子束能量、电子束穿透深度以及样品信号强度。一般而言，较高的加速电压能够提高电子束亮度与束流稳定性，同时减小电子束衍射效应，因此有利于提高空间分辨率；但同时，电子束在样品中的穿透深度也会增大，从而降低表面敏感性，并可能对绝缘样品或生物样品造成损伤。对于金属样品或需要较高分辨率观察时，通常可采用较高加速电压；而对于表面敏感测量、低维材料或绝缘样品，则更适合采用较低加速电压，以减少样品充电效应和电子束损伤。因此，高压档的选择需要综合考虑样品材料、分辨率需求以及表面敏感性等因素。

4. 观察时如何能够获得清晰的扫描图像？

为了获得清晰的 SEM 图像，需要综合调节电子束会聚状态以及成像参数。实验中首先需要保证系统真空满足要求，并通过电子束准直使电子束稳定。随后调节焦距（focus）使电子束在样品表面形成最小束斑，并进一步利用像散校正（stigmator）消除电子束在不同方向上的聚焦差异。此外，还需要合理选择聚光镜电流、工作距离以及扫描速度等参数。适当增大聚光镜电流能够提高空间分辨率，但过大的聚光镜电流会增强高频噪声，因此需要在分辨率与信噪比之间进行平衡。实验中通常需要在较高放大倍率下进行精细聚焦，然后再切换至目标倍率进行拍摄。

5. 如何操作能观察到薄膜断口？

观察薄膜断口时，需要首先制备出具有明显断裂边缘的样品区域。实验中通常通过机械弯折、划痕或冷冻断裂等方式获得断口结构，并尽量避免断口受到污染或进一步损伤。在 SEM 观察时，一般需要将样品适当倾斜，使断口侧面能够直接暴露在电子束与探测器视场中，从而增强断口结构的形貌衬度。同时应适当减小工作距离并提高放大倍率，以便观察断口处的微观形貌，例如层状结构、裂纹扩展方向以及颗粒边界等细节。

6. 拍照时如何选择亮度、对比度以保证获得满意的底片？

SEM 图像中的亮度（brightness）主要决定图像整体灰度水平，而对比度（contrast）则决定不同区域之间灰度差异的强弱。实验中需要根据样品特征合理调节这两个参数。若亮度过低，则图像整体偏暗，细节难以分辨；若亮度过高，则容易出现局部饱和区域，导致信息丢失。因此通常需要将图像灰度分布调整到较

均匀范围内。对比度过低时图像层次不明显，而过高则可能导致部分区域灰度截断，因此应根据样品形貌适当调节，以使颗粒边界和细节结构具有较好的可辨识度。此外，在较高放大倍率下，由于图像噪声更加明显，因此还需要综合考虑扫描速度、束流强度以及图像平均等因素，以获得更加清晰稳定的 SEM 图像。

7. 如何确定照片上图像的放大倍数？

SEM 图像中的放大倍数本质上由显示系统中的图像尺寸与样品实际扫描区域大小共同决定。实验中通常可利用图像中的标尺 (scale bar) 进行校准。设标尺对应实际长度为 L ，而其在图像中的测量长度为 l ，则图像放大倍数可表示为 $M = l/L$ 。由于现代 SEM 图像通常已经由系统自动标定放大倍数，因此实际测量中更常利用图中的标尺直接获得样品尺寸信息，而不是单纯依赖图像放大倍率。

8. 如何评判一幅 SEM 照片的优劣？

实际上本文就是在讨论这个问题。我认为需要综合考虑图像分辨率、衬度、信噪比以及样品信息完整性等多个方面。首先，高质量的 SEM 图像应具有较高的空间分辨率，即样品边界清晰、细节结构丰富，不存在明显失焦或像散。其次，图像应具有适当衬度，使不同结构之间能够明显区分。此外，图像中的随机噪声应尽可能低，以保证较高的信噪比。除了成像质量本身，还需要考虑图像是否真实反映样品结构。例如，是否存在电子束损伤、样品充电效应、漂移模糊以及人为后处理造成的伪影等。对于科学研究而言，一幅优秀的 SEM 图像不仅应具有良好的视觉效果，更重要的是能够准确、可靠地反映样品真实的微观结构信息。

附录 B：有关图像质量的程序分析数据

为了更加定量地分析聚光镜电流对 SEM 成像质量的影响，实验中利用 Python 对不同聚光镜电流条件下获得的高倍率 ($\times 11k$) SEM 图像进行了数字图像处理与统计分析。分析指标包括全局灰度衬度以及基于 Sobel 算子的边缘衬度，结果分别如表 1 与表 2 所示。以及后续分辨率分析数据如表 3 所示，信噪比数据如表 6 所示。

表 1 不同聚光镜电流下的全局灰度衬度分析结果

聚光镜电流 I	放大倍率	平均灰度	灰度标准差	全局衬度 $\sigma/\bar{I}$
400	$\times 11k$	113.315	67.331	0.594
450	$\times 11k$	105.664	34.929	0.331
500	$\times 11k$	129.590	23.637	0.182
550	$\times 11k$	134.138	23.125	0.172
600	$\times 11k$	118.521	16.222	0.137
650	$\times 11k$	118.878	28.802	0.242

表 2 不同聚光镜电流下的边缘衬度分析结果

聚光镜电流 I	放大倍率	平均灰度	边缘衬度均值	边缘标准差	边缘梯度 95% 分位数
400	$\times 11k$	113.315	24.072	15.806	53.254
450	$\times 11k$	105.664	17.927	10.441	37.336
500	$\times 11k$	129.590	23.236	12.671	46.690
550	$\times 11k$	134.138	28.000	15.286	56.321
600	$\times 11k$	118.521	27.357	14.983	55.154
650	$\times 11k$	118.878	61.692	32.529	121.062

表 3 不同聚光镜电流下的图像清晰度分析结果

聚光镜电流 I	放大倍率	平均灰度	Laplacian 标准差	清晰度 $\text{Var}(\nabla^2 I)$
400	$\times 11k$	113.315	43.615	1902.311
450	$\times 11k$	105.664	33.295	1108.561
500	$\times 11k$	129.590	45.899	2106.712
550	$\times 11k$	134.138	56.594	3202.919
600	$\times 11k$	118.521	56.082	3145.237
650	$\times 11k$	118.878	126.315	15955.413

表 4 不同聚光镜电流下的图像信噪比分析结果

聚光镜电流 I	放大倍率	平均灰度	平坦区域噪声 σ_{flat}	SNR_{flat}	全区域噪声 σ_{all}	SNR_{all}
400	$\times 11k$	113.315	4.584	24.720	4.889	23.179
450	$\times 11k$	105.664	3.523	29.997	3.737	28.278
500	$\times 11k$	129.590	5.064	25.592	5.104	25.388
550	$\times 11k$	134.138	6.162	21.768	6.279	21.364
600	$\times 11k$	118.521	6.069	19.530	6.205	19.102
650	$\times 11k$	118.878	13.940	8.528	13.958	8.517

附录 C：数据处理使用的代码

本实验的数据处理与分析主要基于 Python 编程语言完成，综合使用了 `numpy`、`matplotlib`、`scipy` 以及 `pandas` 等科学计算与数据处理库，对实验数据进行读取、处理、可视化以及拟合分析。相关代码已整理并上传至 GitHub 仓库，读者可通过 https://github.com/xisena1/PKU-modern-physical-experiment-code/tree/main/SEM_experiment6 获取完整项目文件并复现实验数据处理过程。

本项目采用 MIT 开源协议，允许在非商业用途下自由查看、修改与使用。如需获取代码，可在目标目录下通过 `bash` 终端执行

```
git clone https://github.com/xisena1/PKU-modern-physical-experiment-code.git
```

将仓库克隆至本地。在项目目录中已提供基于 `.venv` 的虚拟环境配置，用户进入虚拟环境后即可直接运行相关 `.py` 文件完成数据处理与分析。此外，也可通过

```
pip install numpy matplotlib pandas scipy opencv-python
```

手动安装所需依赖库，从而在本地环境中独立运行代码。