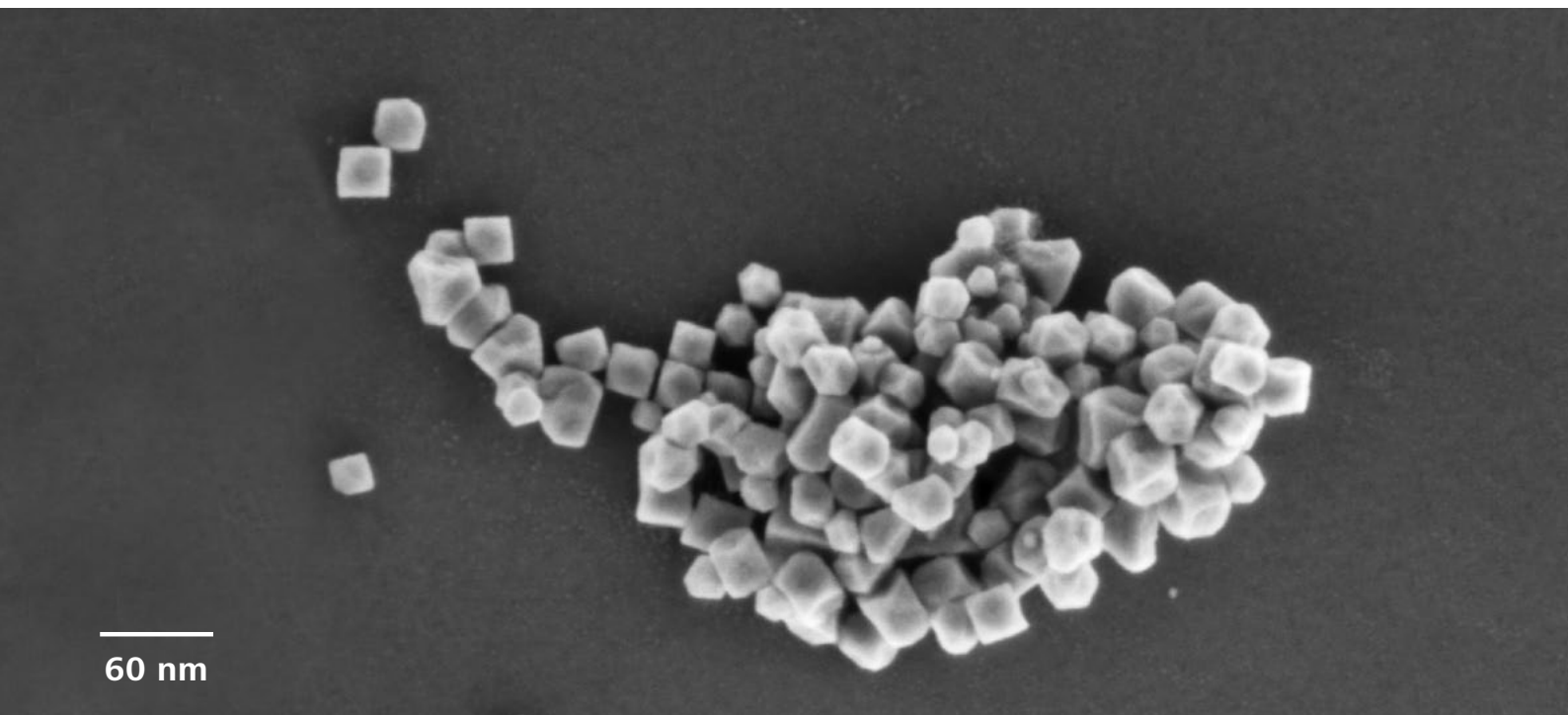


Gemini 电子光学系统的发展： 1 千伏以下亚纳米成像的新篇章



Seeing beyond

作者: Luyang Han 博士, Benjamin Tordoff 博士
Carl Zeiss Microscopy GmbH (德国奥伯科亨)

日期: 2020 年 11 月

引言

在过去的 20 年里, 扫描电子显微镜 (SEM) 研究的一个主要方向是在更低电压下实现更高的分辨率。由于在二维材料、超材料和半导体器件制造等领域的突破已接近摩尔定律的极限, 必须进一步了解样品的极表面结构及其化学性质。

无论是钨灯丝还是场发射 SEM (FE-SEM), 性能的关键都是其电子光学镜筒。蔡司的 FE-SEM 是基于 Gemini 镜筒设计的, 这款镜筒自 1993 年首次推出以来, 已经取得了许多技术上的进步。低加速电压成像的优势在于, 它减小了电子束在样品上的作用区域, 从而可以获取样品极表面信息。此外, 通过降低用于探测样品的电子能量, 可以避免 SEM 检测中对绝缘样品的荷电效应。此外, 降低电子束的能量可以有效减少对样品的辐照损伤, 这对于生物样品和半导体器件等敏感样品的成像至关重要 [1]。

物镜设计的进步

众所周知, 为了在低电压下得到较小的电子束斑, 必须采用低球差和色差 (Cs 和 Cc) 的特殊物镜设计。为了克服这个问题, 在基本的实施方案中, 可以将样品浸入强磁场 (单极磁透镜) 或强电场 (样品台减速) 中, 甚至两者兼之。然而, 这些方法除了对样品的形状和倾斜样品的能力有限制, 也还对可以研究的样品类型提出了严格的限制。蔡司的 Gemini 镜筒设计是通过将封闭式磁透镜与镜筒内束流减速装置相结合可以获得与浸没式透镜相当甚至更好的分辨率, 同时保持高度的样品灵活性 [2], 并避免磁化样品。

基于这样的原理, 蔡司在 1993 年开发了第一台商用 FE-SEM, 命名为 DSM-982, 采用了 Gemini 电子光学系统。这种复合透镜的一个显著特点是, 色差和球差 (Cc 和 Cs) 都随着电子能量的增加而减小 (图 1), 这对于在极低的电子束能量下 (如低于 1 keV 的电子束能量) 获得良好的分辨率特别有帮助。DSM-982 是第一台商用 SEM, 电子能量小于 1 keV 的情况下, 它的分辨率优于 10 nm [3]。基于相同的复合式磁场与静电场透镜原理, Gemini 电子光学系统在过去的几十年中不断得到改进。2015 年, 配备有 Nano-twin 透镜的蔡司 GeminiSEM 500 问世。它的 Cs 和 Cc 值降低到原始 Gemini 镜筒设计的三分之一以下。该设计还降低了施加在样品上的磁场强度, 仅为浸没式透镜施加在样品上磁场强度的 1/1000。

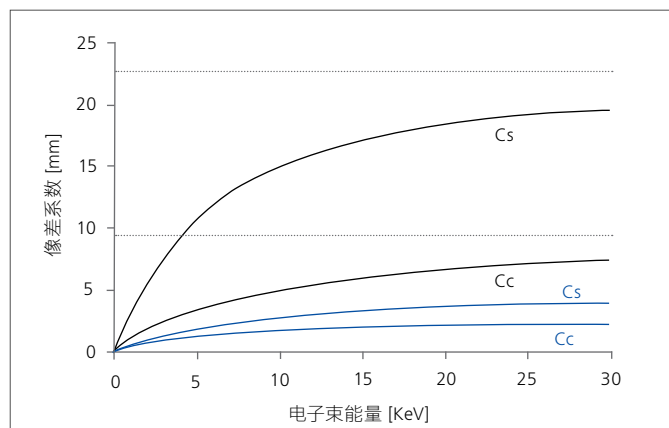


图 1: 原 Gemini 镜筒 (黑色曲线) 和 Nano-twin 镜筒 (蓝色曲线) 在 1 mm 工作距离下不同电子束能量的球差和色差 (Cs 和 Cc)。

智能自动光路调节电子光学引擎

蔡司现在推出了几项技术成果, 通过改进过的 Nano-twin 透镜, 进一步扩展 Gemini 镜筒设计的应用范围和性能。此外, 这些发展在低于 1 kV 的电压下实现了优于 1 nm 的分辨率, 而无需将样品浸没在电场或磁场中。由于采用了智能自动光路调节 (Smart Autopilot) 的新电子光学 (EO) 引擎, 孔径角可根据当前的工作条件进行实时优化, 以达到尽可能高的分辨率。新引擎采用了新的扫描模式, 以实现非常大的观察视野, 并使大视野样本导航和高分辨率成像之间实现无缝切换。最后, 该智能自动光路调节功能使用具有专利的视差法, 实现极快的自动聚焦和电子束对中。

在低电子束能量下获得的高分辨率图像的例子如下列图片所示。图 2 所示的蒙脱石颗粒是不导电的。为了避免荷电, 通过选择相应的光阑孔径大小, 在 800 V 下使用 15 pA 电流对该样品进行成像。智能自动光路调节会自动优化聚光镜的励磁电流, 以达到该特定条件下的最高分辨率。由于这样的样品是不导电的, 所以在样品上施加反向电场是不可行的, 因为这会引起静电荷电效应, 从而损坏系统。Gemini 镜筒设计无需这样的反向电场, 通过 Nano-twin 透镜与智能自动光路调节的结合, 就可以获得分辨率极高的图像。

与之类似, 图 3 所示的 FeMn 磁性纳米颗粒不能浸没在磁场中成像, 因为这会使这些纳米颗粒被吸入镜筒, 可能会导致 SEM 光学系统的损坏。

同样，带 Nano-twin 透镜和智能自动光路调节的 Gemini 镜筒设计规避了这些问题。虽然分辨率通常被视为所有 SEM 的基本指标，但低倍放大性能的重要性通常被低估。蔡司的新智能自动光路调节引擎提供新型扫描模式，以实现大观察视野 (FoV)，来帮助在样品上导航。这一功能可以在不

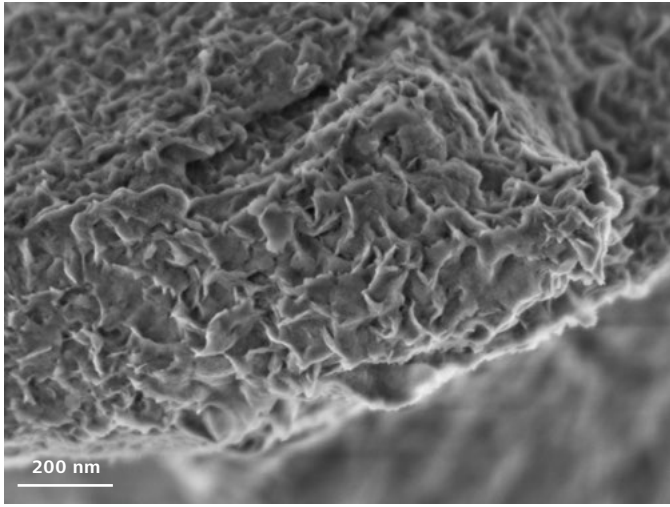


图 2: 在 800 V 电子束能量下获得的蒙脱石颗粒的高分辨率图像。即使样品不导电，也能很好地分辨出断裂表面的细小片状结构。

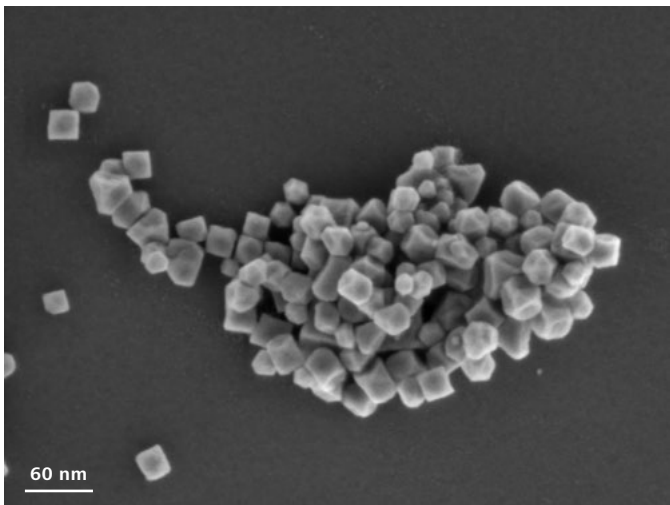


图 3: 在 1 kV 电子束能量下获得的 FeMn 磁性纳米颗粒的高分辨率图像。即使样品具有磁性，仍然可以获得非常高的分辨率。

改变电压的情况下，只通过扫描线圈改变电子束的运动轨迹实现。

这保证了普通成像模式和大观察视野模式之间的无缝衔接，而无需改变任何电子光学元件的电压，并且所有探测器都能保持一致的对比度和亮度。在图 4 所示的例子中，3 枚欧元硬币在 5kV 电子束能量下成像。在普通的成像模式下，最大观察视野 (FoV) 约为 4 毫米，仅够覆盖单枚硬币的一小部分 (图 4 上图)。EO 引擎可以让所有三枚硬币在同一画面中成像。

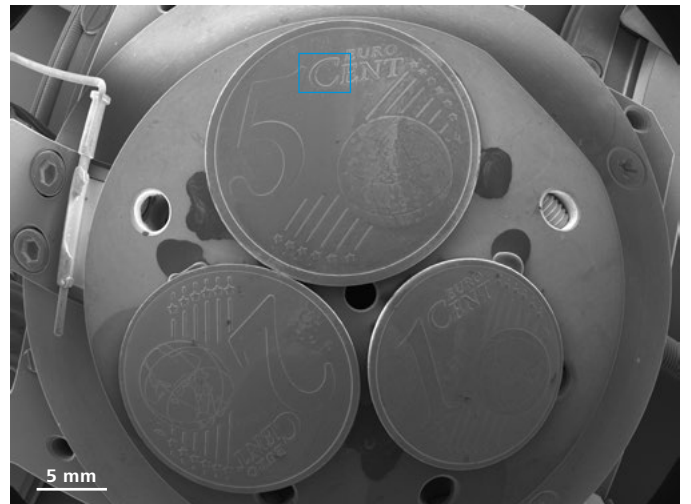
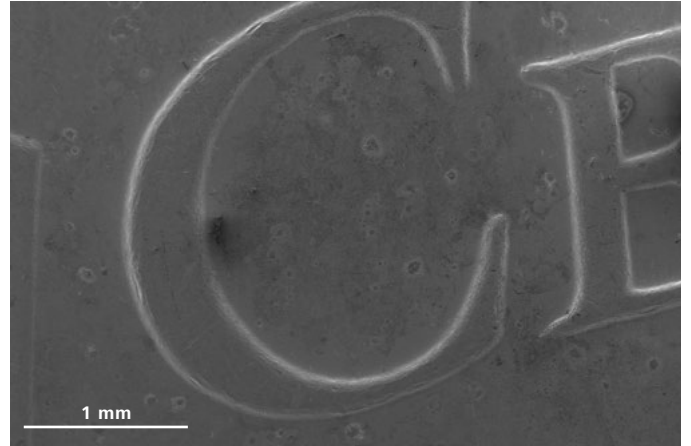


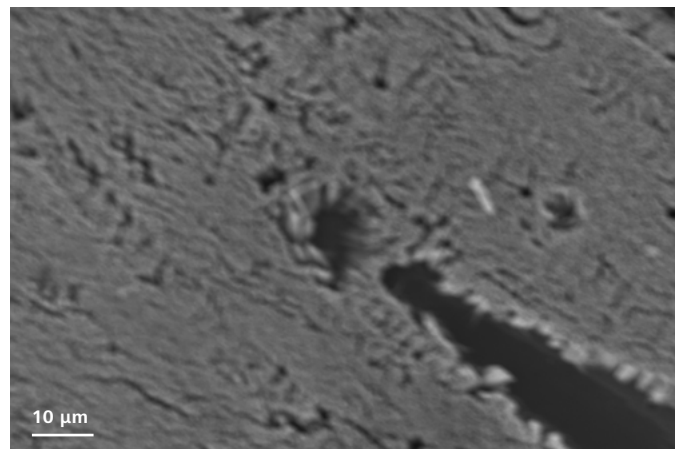
图 4: 在普通成像模式下以最大观察视野 (FoV) 成像的欧元硬币 (上图)，以及使用新的 EO 引擎智能自动光路调节功能以大观察视野 (FoV) 模式成像的欧元硬币 (下图)。

蓝色方块显示的是普通成像模式下最大观察视野 (FoV) 的位置和大小。

智能自动光路调节引擎的另一个优势在于其自动快速准确对焦和电子束对中的功能。在这里，EO 计算用于调整焦点和对准显微镜。所需的时间如表 1 所示，该表格显示，自动对焦的时间特别快。作为示例，图 5 以图片组的形式显示了在自动对焦的前后，自动对焦的准确度。这项新功能是对目前已有的自动对焦粗调、自动消像散和自动亮度对比度功能的补充。通过自动化设计，它提高了速度，增强了易用性，无论用户的操作水平高低都可以轻松使用。

	时长
自动对焦	<1s
自动对中	<4s

表 1: 基于 EO 引擎自动功能的性能



↓ 对焦 1 秒后

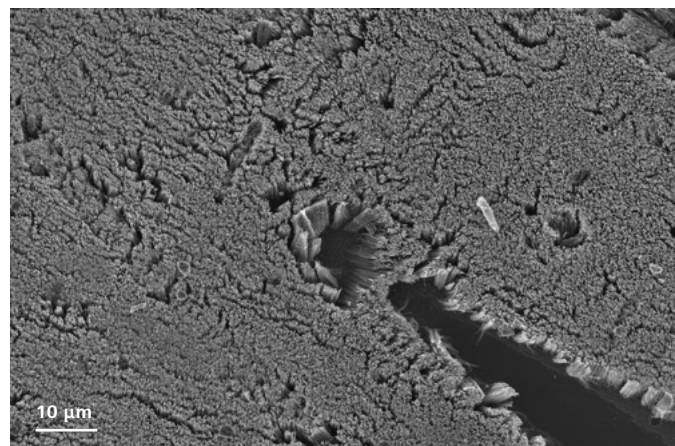


图 5: 超快微调对焦实例。样品: 碳纳米管簇。

总结

在率先开发出使用浸没式透镜的低电压高分辨成像技术后，蔡司继续在这一领域不断创新，于 2015 年推出了 Nano-twin 透镜，而其在该领域的最新发展是采用了智能自动光路调节的新 EO 光学引擎。智能自动光路调节可根据现有的条件，实时优化孔径角，来进一步提高低电压下的分辨率。智能自动光路调节还利用高性能的 Nano-twin 透镜大幅增加了可用的观察视野。其另一项功能是自动对焦和自动电子束对中，这进一步增强了系统的易用性。值得注意的是，系统新的自动对焦功能首次可以在不超过一秒的时间内实现。

参考:

- [1] Reimer, L. Imaging formation in low-voltage scanning electron microscopy. SPIE optical engineering press, 1993.
- [2] Orloff, J. Handbook of Charged Particle Optics (2nd edition). CRC Press, 2009.
- [3] Jaksch, H. & Martin, J. P. High-resolution, low-voltage SEM for true surface imaging and analysis. Journal of Analytical Chemistry, Volume 353, Issue 3-4, pp 378-382, October 1995.



蔡司显微镜



Carl Zeiss Microscopy GmbH
07745 Jena, Germany
microscopy@zeiss.com
www.zeiss.com/geminisem

卡尔蔡司（上海）管理有限公司
200131 上海，中国
E-mail: info.microscopy.cn@zeiss.com
全国免费服务热线：4006800720

上海办：(021) 20821188
北京办：(010) 85174188
广州办：(020) 37197558
成都办：(028) 62726777