



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 106252187 B

(45) 授权公告日 2020.12.01

(21) 申请号 201610400193.9

(22) 申请日 2016.06.08

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106252187 A

(43) 申请公布日 2016.12.21

(30) 优先权数据

15171227.0 2015.06.09 EP

(73) 专利权人 FEI 公司

地址 美国俄勒冈州

(72) 发明人 P.波托塞克 F.鲍霍贝

M.P.W.范登博加尔德 E.科克马兹

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 周学斌 陈岚

(51) Int.Cl.

H01J 37/26 (2006.01)

H01J 37/28 (2006.01)

(56) 对比文件

US 6175417 B1, 2001.01.16

US 2002092985 A1, 2002.07.18

EP 2869328 A1, 2015.05.06

CN 104217910 A, 2014.12.17

CN 103839743 A, 2014.06.04

审查员 邓辉

权利要求书2页 说明书10页 附图5页

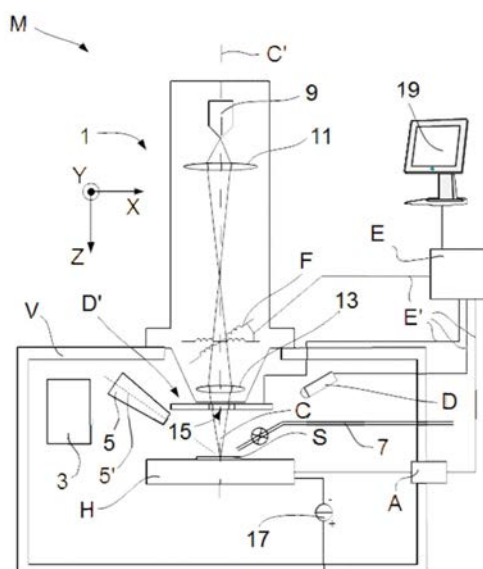
(54) 发明名称

在带电粒子显微镜中分析样品表面改性的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种在带电粒子显微镜中分析样品的表面改性的方法。一种使用以下各项来研究样品的方法：-带电粒子显微镜，其包括：-样品保持器，用于保持样品；-源，用于产生带电粒子辐射射束；-照明器，用于指引所述射束以便照射样品的表面；-成像检测器，用于接收响应于所述照射而从样品放射的辐射通量，以便产生所述表面的至少部分的图像；-可以被调用以通过在所述表面上执行选自包括材料去除、材料沉积及其组合的组的过程来对所述表面进行改性的装置，该方法包括以下步骤：-产生并存储样品的第一、初始表面的第一图像；-在初级改性步骤中，调用所述装置以便对所述第一表面进行改性，从而产生第二、已改性表面；-产生并存储所述第二表面的第二图像；-使用数学上的图像相似性度量来执行所述第二图像和第一图像的像素方面比较，以便生成针对所述初级改性步骤的初级品质因

数。



1. 一种使用以下各项来研究样品的方法：
 - 带电粒子显微镜,其包括:
 - 样品保持器,用于保持样品;
 - 源,用于产生带电粒子辐射射束;
 - 照明器,用于指引所述射束以便照射样品的表面;
 - 成像检测器,用于接收响应于所述照射而从样品放射的辐射通量,以便产生所述表面的至少部分的图像;
 - 能够被调用以通过在所述表面上执行选自包括材料去除、材料沉积及其组合的组的过程来对所述表面进行改性的装置,该方法的特征在于以下步骤:
 - 产生并存储样品的第一、初始表面的第一图像;
 - 在初级改性步骤中,朝向所述第一表面引导所述射束以便对所述第一表面进行改性,从而产生第二、经改性表面;
 - 产生并存储所述第二表面的第二图像;
 - 使用数学上的图像相似性度量来执行所述第二图像和第一图像的像素方面比较,以便生成指示第一图像和第二图像之间的相似程度的初级品质因数;
 - 将初级品质因数与上阈值和下阈值进行比较;以及
 - 响应于初级品质因数高于上阈值,通过调整初级改性步骤中的至少一个参数来实行第一表面改性程序,以及响应于初级品质因数低于下阈值来实行第二、不同的表面改性程序。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中,使用所述初级品质因数来判断以下情形中的至少一个:
 - 所述初级改性步骤未能对所述第一表面进行改性;
 - 所述初级改性步骤对所述第一表面改性不足;
 - 所述第二表面相对于所述第一表面被毁坏。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中,基于所述初级品质因数来调整所述初级改性步骤中的至少一个参数。
4. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述初级品质因数被用来量化由所述初级改性步骤在所述样品中产生的厚度改变。
5. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述图像相似性度量选自包括SSIM、MSE、PSNR、MIR及其组合和混合的组。
6. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述装置选自包括以下各项的组:
 - 机械切割工具;
 - 聚焦粒子束铣工具;
 - 蚀刻装置;
 - 射束诱导沉积工具;
 - PVD装置;
 - CVD装置,以及其组合。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述装置原位位于所述带电粒子显微镜中。

8. 一种带电粒子显微镜,其包括:

- 样品保持器,其用于保持样品;
- 源,其用于产生带电粒子辐射射束;
- 照明器,用于指引所述射束以便照射样品的表面;
- 成像检测器,用于接收响应于所述照射而从样品放射的辐射通量,以便产生所述表面的至少部分的图像;

其特征在于所述显微镜包括电子处理器,所述电子处理器适合于:

- 获取所述样品的表面的第一图像;
- 基于第一组参数通过照射所述表面来对所述样品的表面进行改性;
- 获取经改性表面的第二图像;
- 使用数学上的图像相似性度量来执行由所述检测器产生的第一图像和第二图像的像素方面比较;
- 生成数值品质因数,其指示从所述比较得到的图像相似程度;
- 将数值品质因数与上阈值和下阈值进行比较;以及
- 响应于数值品质因数高于上阈值,基于与第一组参数不同的第二组参数来实行所述经改性表面的第一表面改性程序,以及响应于数值品质因数低于下阈值来实行所述经改性表面的第二、不同的表面改性程序。

9. 根据权利要求8所述的显微镜,其中通过选自包括材料去除、材料沉积及其组合的组的过程来对所述样品的表面进行改性,

以及其中,所述处理器适合于:

- 在所述表面改性步骤之前编辑所述第一图像;
- 在表面改性步骤之后编辑所述第二图像;
- 使用所述品质因数来评定表面改性步骤的成功评级。

10. 一种方法,包括:

利用带电粒子显微镜来获取样本表面的第一图像;

通过朝向所述表面引导所述带电粒子利用带电粒子显微镜来实行所述表面的初级改性来产生经改性表面;

利用带电粒子显微镜来获取所述经改性表面的第二图像;

确定第一图像和第二图像之间的相似度水平;

将所述相似度水平与上阈值和下阈值进行比较;

基于所述相似度水平高于所述上阈值来确定所述初级改性未能对第一表面进行改性;并且实行经改性表面的第一改性;以及

基于所述相似度水平低于所述下阈值来确定经改性表面由于初级改性相对于所述第一表面被毁坏,并且实行经改性表面的第二改性,其中所述初级改性、第一改性和第二改性彼此不同。

在带电粒子显微镜中分析样品表面改性的方法

[0001] 本发明涉及一种使用以下各项来研究样品的方法：

[0002] - 带电粒子显微镜，其包括：

[0003] · 样品保持器，用于保持样品；

[0004] · 源，用于产生带电粒子辐射射束；

[0005] · 照明器，用于指引所述射束以便照射样品的表面；

[0006] · 成像检测器，用于接收响应于所述照射而从样品放射的辐射通量，以便产生所述表面的至少部分的图像；

[0007] - 可以被调用以通过在所述表面上执行选自包括材料去除、材料沉积及其组合的组的过程来对所述表面进行改性的装置。

[0008] 本发明还涉及一种可以用于执行此类方法的带电粒子显微镜。

[0009] 带电粒子显微术是用于对显微对象进行成像的众所周知且越来越重要的技术，特别是以电子显微术的形式。历史上，电子显微镜的基本种类已经经历演变到许多众所周知的显微镜种类，诸如透射电子显微镜 (TEM)、扫描电子显微镜 (SEM) 以及扫描透射电子显微镜 (STEM)，并且还演变成各种子类，诸如所谓的“双射束”工具 (例如 FIB-SEM)，其另外采用“加工”聚焦离子束 (FIB)，例如允许诸如离子束铣或离子束诱导沉积 (IBID) 之类的支持性活动。更具体地：

[0010] - 在 SEM 中，通过扫描电子束进行的样品照射促成来自样品的“辅助”辐射的放射，例如以次级电子、背散射电子、X 射线和光致发光 (红外、可见和/或紫外光子) 的形式；这个放射中的辐射的一个或多个分量然后被检测并且用于图像累积和/或光谱分析 (例如如在 EDX (能量色散 X 射线光谱学) 的情况下) 的目的。

[0011] - 在 TEM 中，用来照射样品的电子束被选择成具有足够高的能量以穿透样品 (其为此将一般地比在 SEM 样品的情况下更薄)；然后从样品放射的透射电子的通量可以用来创建图像，或者产生光谱 (例如如在 EELS 的情况下；EELS = 电子能量损耗光谱学)。如果此类 TEM 在扫描模式下操作 (因此变成 STEM)，则在照射电子束的扫描运动期间将累积讨论中的图像/光谱。

[0012] 例如从以下 Wikipedia 链接可以收集到关于这里阐述的某些话题的更多信息：

[0013] http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope

[0014] http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_electron_microscope

[0015] http://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscopy

[0016] http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_transmission_electron_microscopy

[0017] 如使用电子作为照射射束的替换一样，还可以使用其它种类的带电粒子来执行带电粒子显微术。在这个方面，短语“带电粒子”应被宽泛地解释为包含例如电子、正离子 (例如 Ga 离子或 He 离子)、负离子、质子和正电子。关于基于离子的显微术，例如可以从诸如以下之类的源收集到某些进一步的信息：

[0018] - http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_Helium_Ion_Microscope

[0019] - W.H. Escovitz, T.R. Fox and R. Levi-Setti, *Scanning Transmission Ion Microscope with a Field Ion Source*, Proc. W Nat. W Acad. Sci. USA 72(5), pp 1826-1828 (1975).

[0020] - <http://www.innovationmagazine.com/innovation/volumes/v7n1/coverstory3.shtml>

[0021] 应注意的是除成像和/或光谱学之外,带电粒子显微镜(CPM)还可具有其它功能,诸如检查衍射图样,执行(局部化)表面改性(例如铣、蚀刻、沉积)等。

[0022] 在所有情况下,带电粒子显微镜(CPM)将包括至少以下部件:

[0023] - 辐射源,诸如肖特基电子源或离子枪。

[0024] - 照明器,其用来操纵来自源的“原始”辐射束并对其执行某些操作,诸如聚焦、像差减轻、(用光阑/可变光阑/聚光孔径)裁剪、滤波等。其将一般地包括一个或多个带电粒子透镜,并且也可包括其它类型的粒子光学部件。如果期望的话,可以为照明器提供偏转器系统,其可以被调用以引起其输出束束来跨被研究的样品而执行扫描运动。

[0025] - 样品保持器,研究中的样品可以被保持和定位(例如倾斜、旋转)在该样品保持器上。如果期望的话,可以移动此保持器,以便实现束束相对于样品的扫描运动。一般地,此类样品保持器将被连接到诸如机械载台之类的定位系统。

[0026] - 检测器,其本质上可以是单一的或复合式/分布式的,并且根据正在记录的辐射/实体该检测器可以采取许多不同形式。此类检测器例如可用来登记强度值,捕捉图像或记录光谱。示例包括光电倍增管(包括固态光电倍增管SSPM)、光电二极管、(像素化的)CMOS检测器、(像素化的)CCD检测器、光伏电池等,其可例如与闪烁器膜相结合地使用。针对X射线检测,通常使用例如所谓的硅漂移检测器(SDD)或硅锂(Si(Li))检测器。通常,CPM将包括各种类型的若干检测器。

[0027] 在透射型CPM(诸如(S)TEM)的情况下,还将使用以下各项:

[0028] - 成像系统,其本质上获得透射通过样品(平面)的带电粒子并将其引导(聚焦)到分析/感测装备(诸如检测/成像设备、光谱学单元等)上。如上文提及的照明器一样,成像系统还可执行其它功能,诸如相差减轻、裁剪、滤波等,并且其将一般地包括一个或多个带电粒子透镜和/或其它类型的粒子光学部件。

[0029] 在下文中,有时可(通过示例的方式)在电子显微术的特定背景下阐述本发明。然而,此类简化仅仅意图用于清楚/说明性目的,并且不应解释为限制。

[0030] 存在如在上文的开头段落中阐述的方法的许多实例,其中借助于可以位于非原位(在CPM外面)或原位(在CPM内)的装置/模块来执行表面改性。此类表面改性的示例包括以下各项:

[0031] (i) 机械切割工具(减性/材料去除过程):

[0032] 在这里,使用诸如超薄切片机、金刚石刻划工具、黑曜石刀片、磨机或车床之类的接触工具(一遍或多遍运行)来从样品表面(的部分)切割/刮/削一片材料。

[0033] (ii) 聚焦粒子束铣(减性/材料去除过程):

[0034] 在这里,可以跨样品表面(的部分)扫描所选能量/尺寸的聚焦粒子束(例如离子或电子束)以便从那里烧蚀材料。如果期望的话,可在连续的迭代中重复此程序,以便连续地去除材料的更大厚度。如果期望的话,该程序适用于图案化材料去除。

[0035] (iii) 蚀刻装置 (减性/材料去除过程) :

[0036] 在这种情况下,使用化学试剂(诸如气相蚀刻剂)来从样品表面去除材料。如果期望的话,可以使用聚焦粒子束来激活/催化此过程,这允许使得该过程是高度局部化/图案化的,如果期望的话。此类方法的示例包括IBIE(离子束诱导蚀刻)和EBIE(电子束诱导蚀刻)。

[0037] (iv) 射束诱导沉积 (加性/材料沉积过程) :

[0038] 这里的示例包括IBID(离子束诱导沉积)和EBID(电子束诱导沉积),其中使用聚焦射束来(局部地)鼓动/促成来自大量的前驱气体的材料的沉积。

[0039] (v) 物理汽相沉积 (PVD) (加性/材料沉积过程) :

[0040] 示例包括例如溅射和分子束外延(MBE)。

[0041] (vi) 化学汽相沉积 (CVD) (加性/材料沉积过程) :

[0042] 特定示例包括例如PCVD(等离子体辅助CVD)和MOCVD(金属有机CVD)。

[0043] 技术(i)-(iv)可以(但不一定必须)使用CPM中的原位模块来执行;例如还可以在非原位执行技术(i),如在所谓的ATLUM工具(自动化带材收集车床超微切片机)的情况下,如例如在以下链接中阐述的:

[0044] <http://cbs.fas.harvard.edu/science/connectome-project/atlum>

[0045] 照惯例在非原位执行技术(v)和(vi),但其原则上还可以使用原位模块来执行。

[0046] 例如在以下文献中阐述了在CPM中采用表面改性技术的特定方式:

[0047] - US 8,232,523,其中将物理切片(例如用超薄切片机)与计算图像重建组合以便增加重建的深度范围;

[0048] - EP 2824445 A1,其中使用各种表面改性技术来改善来自样品上的感兴趣区域的拉曼光谱信号。

[0049] 此类方法存在的问题是由于在其中对表面改性样品进行成像的CPM通常将具有纳米或亚纳米分辨率,并且由于讨论中的样品常常将是非常纤细/脆弱的(例如因为其是极薄的(如在TEM样品的情况下)或者例如因为其已被玻璃化),如果要产生令人满意的结果(例如在质量上、在数量上以及在可能的重新运行、修补、样本损坏等的环境下的产率/生产能力方面),将必须非常精确地执行所采用的表面改性技术。到目前为止,不存在监视此类操作的精确方式:反而其本质上是趋向于相当碰巧的和偶然的,并且严重地依赖于执行样品研究的人的先前经验/技巧,并且在一定程度上还依赖于运气。

[0050] 本发明的目的是解决这些问题。更具体地,本发明的目的是提供可以监视如上文提及的表面改性技术的方式。特别地,本发明的目的是此类监视应使得能够实现失败或毁坏的表面改性尝试的相对快速的识别。另外,本发明的目的是提供一种监视技术,其可以潜在地产生定性和定量输出两者。

[0051] 在如在上文的开头段落中所阐述的方法中实现了这些及其它目的,该方法的特征在于以下步骤:

[0052] - 产生并存储样品的第一、初始表面的第一图像;

[0053] - 在初级改性步骤中,调用所述装置以便对所述第一表面进行改性,从而提供第二、已改性表面;

[0054] - 产生并存储所述第二表面的第二图像;

[0055] - 使用数学上的图像相似性度量 (ISM) 来执行所述第二 (CPM) 图像和第一 (CPM) 图像的像素方面比较, 以便生成针对所述初级改性步骤的初级品质因数 (FOM)。

[0056] 本发明利用这样的事实, 即在表面改性之后样本被转移到具有成像能力的设备 (CPM)。其还利用这样的事实, 即可以使用数学上的 ISM 作为基础来使用若干客观定义准则来执行图像的自动化像素方面比较, 基于此, 可以生成 (例如, 基于相关度的) FOM 或“分数”, 其是讨论中的图像的相似性 (或相异性) 的计量器; 在这样做时, ISM 将图像视为 (并保存为) 被以逐坐标 (逐像素) 方式比较的数学字段, 从而允许 (图像间/图像内) 形状改变检测和量化, 其在要在图像上执行字段毁坏 (标量化) 操作 (诸如例如加和或积分) 的情况下将是不可能的。因此, 当在与给定表面改性尝试有关的“之前的”和“之后的”图像 (分别是上述第一图像和第二图像) 上执行此类 ISM 时, 此类 ISM 可以用来 (自主地) 确定所述尝试对讨论中的表面具有什么影响 (如果有的话)。例如:

[0057] (a) 如果从所述“之前的”和“之后的”图像的比较产生的 FOM 具有在预定义上阈值以上的值, 则可以认为讨论中的表面改性尝试已失败/未做到 (例如由于不良的对准/校准、过程失败 (诸如阻塞的气体导管、射束射不出等)、失败的同步等)。考虑到其中所采用的 ISM 是所谓的结构相似性指数度量 (SSIM) 的具体实例, 那么可以以这种方式解释上限 FOM 值 (例如处于或非常接近于 +1)。

[0058] (b) 相反地, 如果从所述“之前的”和“之后的”图像的比较产生的 FOM 在预定义下阈值以下, 则可以认为讨论中的表面改性尝试已经以某种方式 (例如通过在其上面留下碎片或者对其造成非计划的机械损伤) 毁坏表面。再次考虑上述 SSIM 的具体实例, 可以用这种方式解释下限 FOM 值 (例如处于或非常接近于 -1 或 0, 这取决于所采用的 SSIM 定义/归一化)。

[0059] (c) 在这两个极端情况之间, 可以定义对应于表面改性技术的最佳性能的理想“FOM 带”。如果 FOM 位于此带外面 (但是在上文涉及的下阈值和上阈值之内), 则可以推断表面改性尝试已经部分成功, 但为次佳的。

[0060] 在 (a) 和 (c) 的情况下, 可以例如考虑用已调整参数 (诸如切割工具/射束位置、辅助气体压力、程序持续时间等) 来试图另一表面改性尝试; 如果期望的话, 这可以在连续的迭代中完成, 最终朝着目标 FOM 值收敛。在情况 (b) 中, 可以考虑在继续进行进一步的活动之前清洁/重新调节样品表面; 如果期望的话, 还可以在连续的步骤/迭代中完成此过程, 最终朝着目标 FOM 值收敛。根据这些示例, 看到本发明提供了对程序的有用监视, 否则该程序是众所周知地模糊不清的。

[0061] 关于在本发明中使用的实际的 ISM 存在各种可能性。上文已提到了这些中的一个 (SSIM) 并且根据以下关系产生 (从相应的第一图像和第二图像的对应的 (坐标) 位置获得的) 针对两个正方形 ($N \times N$) 图像“图块”A 和 B 之间的相似性的 FOM 值 $F_{SSIM}(A, B)$:

$$[0062] \quad F_{SSIM}(A, B) = \frac{(2\mu_A\mu_B + C_1)(2\sigma_{AB} + C_2)}{(\mu_A^2 + \mu_B^2 + C_1)(\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + C_2)}$$

[0063] 其中:

[0064] μ_A 是 A 的/之上的平均值;

[0065] μ_B 是 B 的/之上的平均值;

[0066] σ_A^2 是A中/的方差;

[0067] σ_B^2 是B中/的方差;

[0068] σ_{AB} 是A和B的协方差;

[0069] $C_1 = k_1 L^2$ 和 $C_2 = k_2 L^2$ 是防止在小分母值的情况下的“失控”的“平滑化”变量,其中:

[0070] \cdot L是A和B中的像素值的动态范围;通常, $L = 2^n - 1$, 其中, n是每个像素的位数;

[0071] \cdot k_1 和 k_2 分别地被设置成0.01和0.03的常规值。

[0072] 此值通常仅针对亮度(而不是色度)计算,并且将产生其量值范围取决于所采用的归一化但照惯例位于+1的上限值(精确图像匹配)与-1或0的下限值(完全的图像失配)之间的数(FOM)。

[0073] 与此相关的,还可以例如基于诸如以下定义来定义“相异性”SSIM(DSSIM):

$$[0074] \quad F_{DSSIM}(A, B) = \frac{1 - F_{SSIM}(A, B)}{N}$$

[0075] 其中, N是归一化因数, 例如 $N=2$ 。在本发明中也可以使用此类度量, 如果这样期望的话。

[0076] 本发明不限于使用上述SSIM, 并且如果期望的话可以选择使用其它ISM。ISM的其它示例包括例如:

[0077] \cdot 均方误差(MSE), 其被定义如下:

$$[0078] \quad F_{MSE}(A, B) = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [A(i, j) - B(i, j)]^2$$

[0079] 针对两个 $m \times n$ 单色图像A和B(或相应坐标处的图像部分)。这照惯例将产生具有取决于图像像素值归一化的值的数(FOM); 例如:

[0080] \cdot 针对在范围0-1内的图像像素值, F_{MSE} 也将位于范围0-1内, 其中0对应于精确图像匹配以及1对应于完全的图像失配;

[0081] \cdot 针对在范围0-255内的图像像素值, F_{MSE} 将位于范围0-255²内, 其中0对应于精确图像匹配以及255²对应于完全的图像失配。

[0082] \cdot 峰值信噪比(PSNR), 其被定义如下:

$$[0083] \quad F_{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{P_{MAX}^2}{F_{MSE}}$$

[0084] 其中, F_{MSE} 如在先前项目中阐述的那样, 以及 P_{MAX} 是讨论中的图像中的最大可能像素值; 例如:

[0085] \cdot P_{MAX} 具有用于使用每个样本8位来表示的像素的255的值;

[0086] \cdot P_{MAX} 具有用于使用每个样本N位来表示的像素的 $2^N - 1$ 的更一般的值。

[0087] PSNR的优点是其值(最终)独立于图像像素值范围。

[0088] · 区域交互信息(MIR),其定义如下:

$$[0089] \quad F_{MIR}(A, B) = \sum_{a \in A} \sum_{b \in B} p(a, b) \log \left(\frac{p(a, b)}{p(a)p(b)} \right)$$

[0090] 其中:

[0091] $p(a, b)$ 是A和B的联合概率分布函数;

[0092] $p(a)$ 、 $p(b)$ 分别是A和B的边际概率分布函数。

[0093] 这可以以这样的方式进行归一化,例如其将产生针对完全的图像失配的0的值和针对精确图像匹配的1的值。

[0094] 可以例如从由A.A. Goshtasby所著的出版物*Image registration*, Advances in Computer Vision and Pattern Recognition, 第二章, Springer-Verlag, London (2012) [DOI 10.1007/978-1-4471-2458-0_2]中收集关于图像比较的数学(如在其它学科中应用的)的更多信息。应明确地注意到的是如在本发明中使用的数学上的ISM与例如发射产生测量和其它此类标量化测量具有本质上不同的性质;例如,如果固定区域的特征在图像场内改变位置和/或形状,则数学上的ISM将登记此变化,而标量化测量不会。更具体地:

[0095] - 本发明的数学上的ISM在逐成员的基础上比较两个分布,并从该比较提取度量值(多变量方法);

[0096] - 标量化测量首先将每个分布转换成数(从而毁坏每个分布的某些细节),并且然后比较讨论中的两个数。

[0097] 标量化度量常常被用于蚀刻中的端点检测,由此,标记的亮度改变(例如对应于累积次级电子产量)与根据下面的(例如相对低亮度的)基板的(例如相对高亮度的)给定的材料的(完整)去除相一致;为此,可故意地向样品中的给定深度引入相对亮的标记材料(诸如金),以充当将在其被蚀刻掉时将熄灭(并且因此影响整体的产量)的成像“信标”。

[0098] 如上文所阐述的,如果在上述情况(a)或(c)中获得不可接受的FOM值,则可以重复表面改性程序,以希望获得更好的FOM值。这可以被“盲目地”(以“碰巧的”方式)完成,然而,在本发明的特定实施例中,其反而被“智能地”(以“受控”方式)完成。在此后一种情况下,使用初级品质因数(其从初级改性步骤产生)来调整对(新创建的)第二表面执行的次级改性步骤的至少一个参数。换言之,使用初级FOM(或其某种衍生物/混合体)作为到反馈环路的输入,在该反馈环路中(连续地)对表面改性程序的一个或多个参数进行微调以便加速收敛到可接受的最终FOM值。此类参数的示例是例如:

[0099] - 用于机械切割工具的厚度设置;

[0100] - 用于聚焦粒子束铣工具的射束能量和/或扫描速度(每个位置的驻留时间);

[0101] - 用于化学蚀刻工具的蚀刻剂温度/压力/流速和/或蚀刻时间;

[0102] - 用于射束诱导沉积工具的前驱气体压力/流速和/或射束能量/扫描速度;

[0103] - 用于PVD工具的沉积速度(例如溅射速率或蒸发温度)和/或沉积时间;

[0104] - 用于CVD工具的前驱气体压力/流速和/或沉积时间。

[0105] 如果已知(或怀疑)特定参数线性地影响从表面去除/向表面添加的材料的厚度,则此类调整可能(例如)(部分地)由以下形式的关系式或其混合体/衍生物控制:

[0106] $Parameter_new = Parameter_old \times (1 - FOM_present/FOM_ideal)$ 。

[0107] 在本发明的另一(略微相关的)实施例中,使用所述初级品质因数来量化由初级改性步骤在所述样品中产生的厚度改变。这可以例如基于以下各项中的一个或多个完成:

[0108] - 在先校准;

[0109] - FOM如何根据厚度变化而改变的物理模型;

[0110] - 基于先前获得的数据对的外推/内插,

[0111] 等。以这种方式量化(减性或加性)厚度改变允许更精确地评定进一步厚度改变所需的性质/程度以及允许表面改性过程本身的修正/微调。

[0112] 现在将基于示例性实施例和随附的示意图来更详细地阐明本发明,在所述随附的示意图中:

[0113] 图1呈递了其中可以实行本发明的实施例的特定类型的CPM的纵向横截面立视图。

[0114] 图2A以图形方式描绘了(根据本发明计算的)ISM FOM值,其针对在老鼠脑样品上执行的表面改性技术的多次迭代。

[0115] 图2B示出了在生成图2A时使用老鼠脑样品的暴露表面的标称图像。

[0116] 图3A和3B示出了其中图2A的表面改性迭代中的一个造成样品表面的毁坏/污染以导致不合格的FOM值的情况的图像。

[0117] 图4A-4C显示了结果是经标记的FOM值的与图2A的表面改性迭代中的一个相关联的获取误差。

[0118] 图5A-5C显示了结果是经标记的FOM值的与图2A的表面改性迭代中的一个相关联的成像误差。

[0119] 实施例1

[0120] 图1是有助于结合本发明使用的CPM的实施例的高度示意性描绘;更具体地,其示出了扫描型显微镜M的实施例,其在这种情况下是SEM(但在本发明的背景下,其例如可以仅有效地是基于离子的显微镜,或者例如TEM)。显微镜M包括粒子光学柱/照明器1,其产生沿着粒子光轴C'传播的输入带电粒子的射束C(在这种情况下,为电子束)。粒子光学柱1被安装在真空室V上,真空室V包括用于对样品S进行保持/定位的样品保持器H和相关联的载台/致动器A。使用真空泵(未描绘)把真空室V抽空。借助于电压源17,样品保持器H或至少样品S可以(如果期望的话)相对于接地被偏置(浮置)到一电位。

[0121] 粒子光学柱1包括电子源9(诸如肖特基发射器)、将电子束C聚焦到样品S上的(静电/磁性)透镜11、13(一般地,在结构方面比这里的示意性描绘更复杂)以及用以执行射束C的射束偏转/扫描的偏转单元F。当射束C撞击到样品S上/或跨样品S扫描时,其将促成各种类型的“受激”辐射的发射,诸如背散射电子、次级电子、X射线和阴极发光(红外、可见光和/或紫外光子);然后可以使用一个或多个检测器来感测/记录这些辐射类型中的一个或多个,所述检测器可通常通过将根据样品上的扫描位置的检测器输出的“映射”(或“矩阵”)组合来形成图像、光谱、衍射图样等。本图示出了两个检测器,D、D',其可例如体现如下:

[0122] - 检测器D例如可以是电子检测器(诸如SSPM)、X射线检测器(诸如SDD或Si(Li)传感器)或光检测器(诸如光电二极管)。

[0123] - 检测器D'是分段电子检测器,其包括布置在(允许射束C通过的)中心孔径15周围的多个独立检测段(例如象限)。此类检测器可以例如用来研究从样品S出现的输出(次级或背散射)电子的通量(的角相关)。

[0124] 这些仅仅是示例,并且技术人员将理解的是其它检测器类型、数目和几何结构/配置是可能的。

[0125] 显微镜M还包括尤其用于控制偏转单元F、透镜11和13以及检测器D、D'的控制器/计算机处理单元E,并在显示单元19(诸如平板显示器)上显示从检测器D、D'收集的信息;此类控制经由控制线(总线)E'发生。控制器E(或另一控制器)可以另外用来执行各种数学处理,诸如组合、积分、减法、伪彩着色、边缘增强以及技术人员已知的其它处理。另外,在此类处理中可包括(例如被用于粒子分析的)自动化识别过程。

[0126] 在本发明的上下文中,显微镜M还包括原位表面改性装置,其可以被调用以通过在样品表面S的呈现(顶部)表面上执行诸如材料去除、材料沉积等过程来对该表面进行改性。如上文已指示的,此类装置可以采取许多不同形式,并且在本图中仅示出了(许多之中的)几个可能性。更特别地:

[0127] - 项目3例如是原位机械切割工具,诸如(可缩回)超薄切片机、刀或磨机。替换地,其可能是例如用于执行PVD或CVD的原位沉积站或蚀刻单元。当期望时,可以用致动器A来使样品保持器H移动以便“访问”项目3以在样品S上执行受控表面改性。

[0128] - 项目5是次级粒子光学柱,其在当前实例下是例如离子柱。其具有相关联的次级粒子光轴5',其通常贯穿样品S的平面内的轴C'。其可以例如用来在样品S上执行离子铣。替换地,与气体进入容许导管7(其可以用来容许特定前驱气体的可控流动)组合,其可以用来执行IBID或IBIE。当然还可以颠倒项目1和5的角色/性质,例如使用离子柱用于成像以及使用电子柱用于执行EBID或EBIE。

[0129] 实际上,可能存在项目3、5中的仅一个。替换地,可能存在甚至更多的此类表面改性模块。此外,如上文所阐述的,还可以利用位于室/外壳V外面的一个或多个非原位表面改性设备/工具。此类考虑是选择、可用空间、期望多用途性等的事宜。

[0130] 当在样品S上(例如使用项目3和/或5)来执行表面改性时,其最终目标将是/向样品S的初始表面去除或添加期望的层厚度。然而,实际上,可能未能(令人满意地)实现此目的,以及反而去除/添加太少或太多的材料,和/或损坏/毁坏样品表面,例如通过在其上面产生碎片/污染。在某些实例中,当样品S返回到位于离子柱1下面的其检查位置以便允许对新产生的样品表面进行成像(并由显微镜操作员进行视觉检查)或(例如经由光谱和/或衍射图样)另外进行研究时,这种情况将(在某种(有限的)程度上)定性地显现其自己。然而,定量检查例程将更有价值,特别是可以(半)自动地执行的例程。本发明提供了此类定量信息,因为其使用“之前的”和“之后的”图像的(自主)数学比较来产生对在样品上最后执行的表面改性步骤的有意义的数值“分数”或“等级”(FOM)。如上文所解释的,此分数值然后可以用来(自主地)做出关于所述表面改性是否可接受的判定,并且,如果其不可接受,可以用作(自主地)执行/修整后续表面改性迭代的基础。此类计算、分析和控制可以由处理器E(中运行的软件/固件)或另一(专用)处理器单元执行。

[0131] 实施例2

[0132] 图2A以图形方式描绘了根据本发明计算的针对在老鼠脑样品上执行的表面改性技术的多次迭代的ISM FOM值。在这种特定情况下,使用超薄切片机来重复地从样品上刮削掉给定的薄膜厚度 d_s ,由此:

[0133] - 在一组的迭代中, $d_s=10\text{nm}$ (图2A中的短划线);

[0134] - 另一组迭代中, $d_s = 20\text{nm}$ (图2A中的实线)。

[0135] 在每次迭代之后获得样品的新近改性表面的图像, 并且根据本发明, 针对关于每次迭代的每个相应成对的“之前的”和“之后的”图像来计算ISM FOM值(“之前的”图像是在在前迭代之后获得的图像)。更特别地, 在本情况中, 每个图像被划分成 2048×2048 “像素”或“图块”, 并根据上文给定的公式来计算 $F_{SSIM}(A, B)$ 。然后针对迭代索引(I)来绘制此值(F)以产生图2A, 由此, 将纵轴(F值)再分成十个“十个一组”或“带”, 每个具有0.1的高度/范围。根据图2A的检查, 以下是显而易见的:

[0136] - 针对10nm切割(短划线), F值经常是在最上的带(0.9-1)中, 并且仅相对偶尔地在其外面(显著的例外(尖峰)在索引80处, 这将在下面相对于图4A-4C来更详细地讨论)。这指示在许多情况下表面改性未能从样品去除材料(F等于或非常接近于1)。

[0137] 针对20nm切割(实线), 在最上的带(0.9-1)中仍存在某些数据点, 但是大多数现在位于“标称”带中, 诸如0.6-0.7/0.7-0.8。显著的例外(尖峰)在以下索引处发生:

[0138] · 48和83, 其将在下面相对于图3A、3B来更详细地讨论;

[0139] · 64, 其将在下面相对于图5A-5C来更详细地讨论。

[0140] 根据本发明, 可以将进入/朝向图2A的下带的显著尖峰(相对接近于0的F值)理解为表面改性迭代并未按照计划进行的指标, 如现在将更详细地阐述的。

[0141] 图2B示出了在生成图2A时使用的小鼠脑样品的暴露表面的标称图像; 这是样品“应该”怎样寻求令人满意地执行的表面改性迭代的示例, 并且其将被用于以下讨论的参考/标准。

[0142] · 返回图2A, 这示出到最下F值带(0-0.1)的边界上的两个深尖峰, 即一个在索引48处且一个在索引83处(两者都出现在 $d_s = 20\text{nm}$ 的情况下的测量结果集合中)。根据本发明, 可以将此类低F值(接近于零)解释为表面改性迭代已经毁坏样品的表面的指标, 并且此解释被图3A和3B证实, 图3A和3B示出了分别对应于这两个索引(图3A中的I 48; 图3B中的I 83)的表面改性后样品图像。这些图清楚地示出了样品表面上的碎片的存在, 最有可能在薄化步骤之后已落到新近暴露的表面上的样品薄片的形式。

[0143] · 在图2A中还存在两个尖峰, 其延伸直到第三最下F值带(0.2-0.3)的边界, 一个出现在I 64($d_s = 20\text{nm}$)周围且另一个出现在I 80($d_s = 10\text{nm}$)周围。

[0144] · 从这些中的第二个开始, 图4A和4B分别地示出了索引I 79和I 80处的样品图像, 并且图4C示出了通过用一个图像减去另一图像而获得的“差图像”。图4B的仔细检查显示了以突然的图像内横向移位(从图像的底部向上路径的约2/5)的形式的不连续性, 这可能在图像获取期间由射束/台阶扫描位置的突然跳动造成。图4C中的差图像更清楚地显示了此移位(连同两个其它此类移位), 其看起来是(准)周期性地(从图像的底部到顶部)出现。由于这些移位, 显著地减小了F值($F \sim 0.3$)。可以将此类F值表现解释为存在问题(在这种情况下为扫描误差)且可能值得采取系统检查的标志。

[0145] · 图5A和5B分别地示出了指数I 63和I 64处的样品图像, 并且图5C示出了通过用一个图像减去另一图像而获得的“差图像”。图5B的(由经训练的眼睛的)仔细检查指示(可能由透镜像差引起的)图像像差的存在, 该图像像差主要在上边缘和下边缘附近。图5C中的差图像更清楚地显示了此像差, 跨图像的中间具有相对无特征的“平地”, 但是沿着其上和下边缘具有明显的“拓扑结构”。由于此像差, 显著地减小了F值($F \sim 0.3$)。再次地, 可以将此

类F值表现解释为存在问题(在这种情况下为像差问题)且系统检查将谨慎的标志。

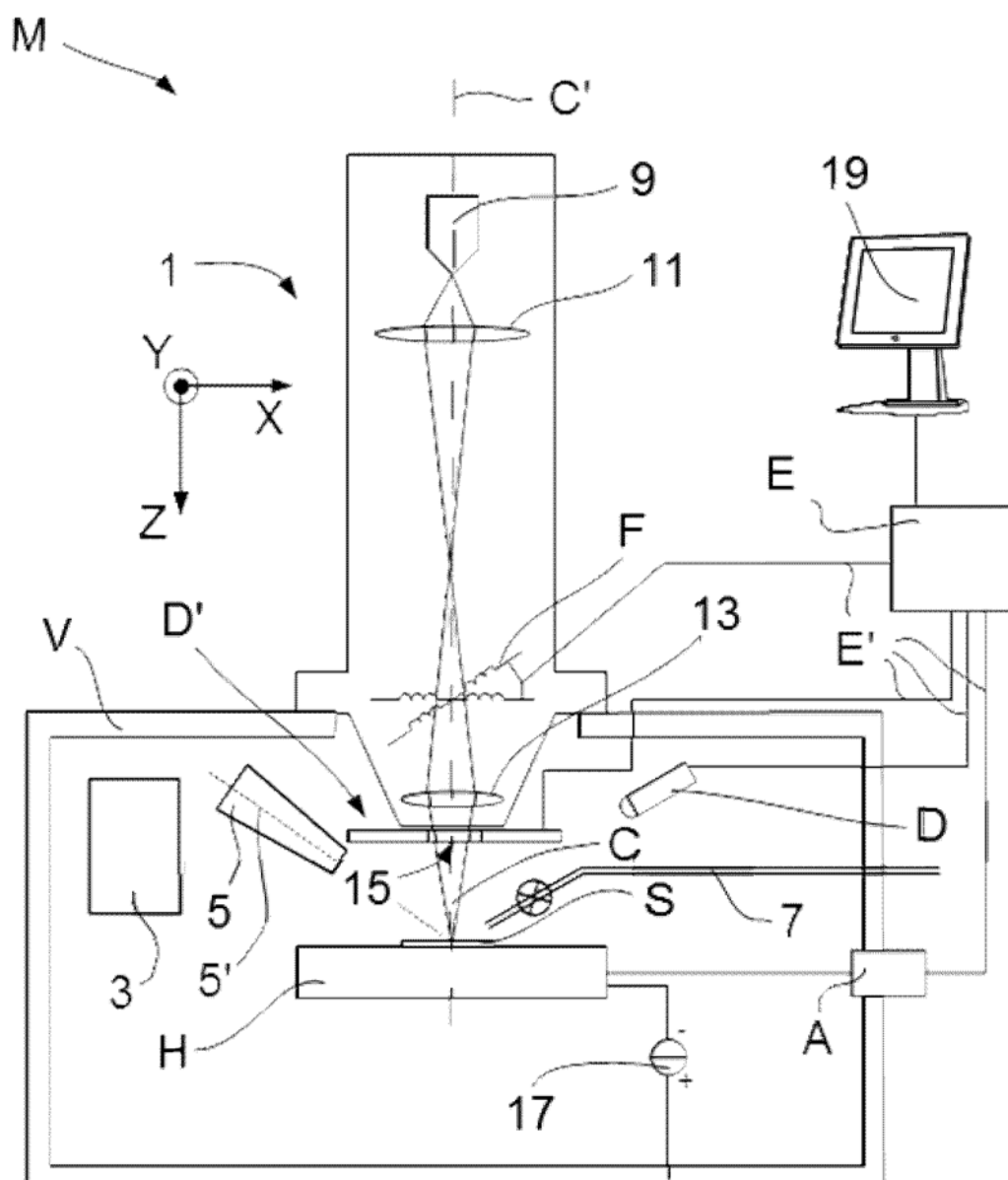


图 1

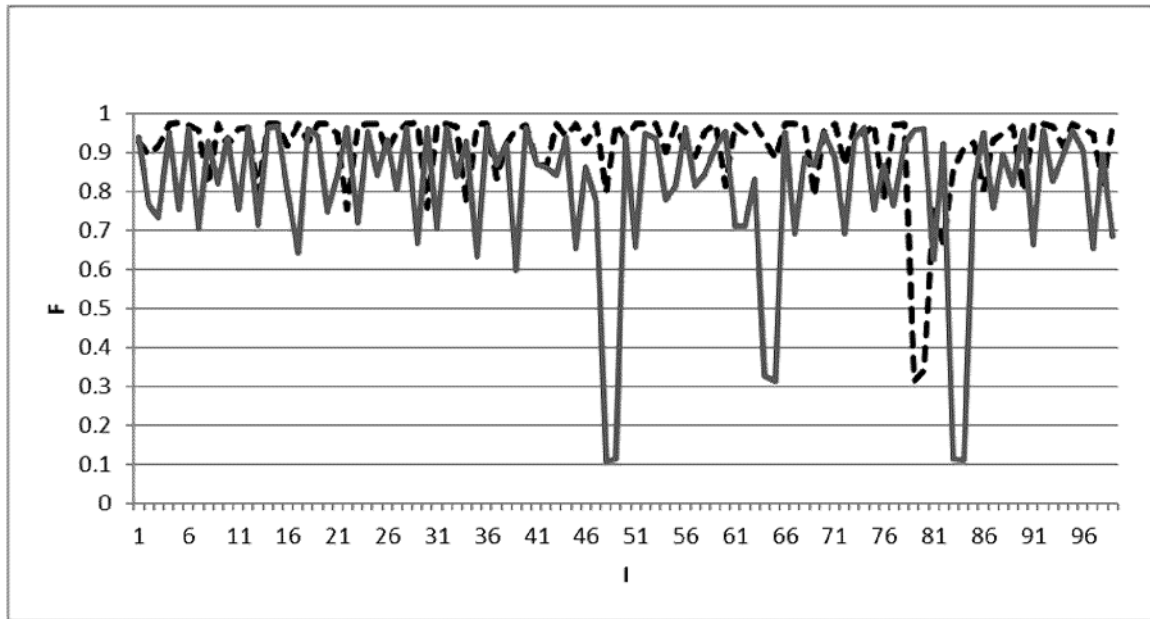


图 2A

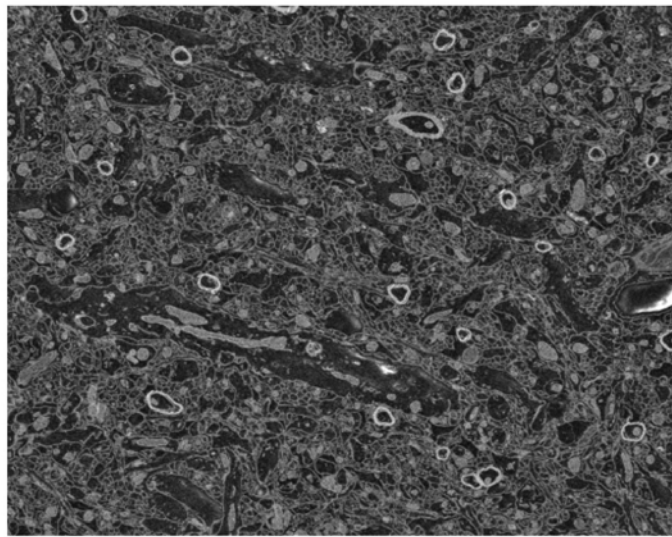


图 2B

I 48

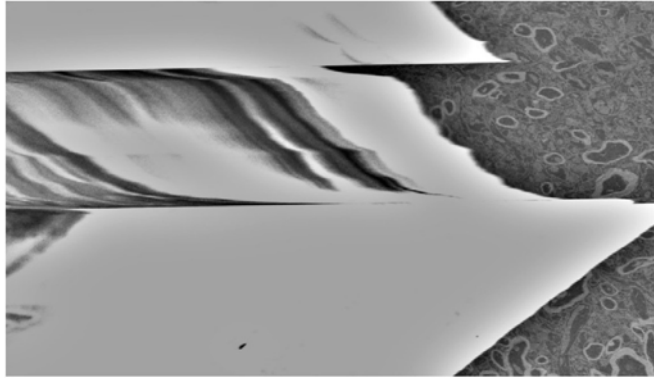


图 3A

I 83

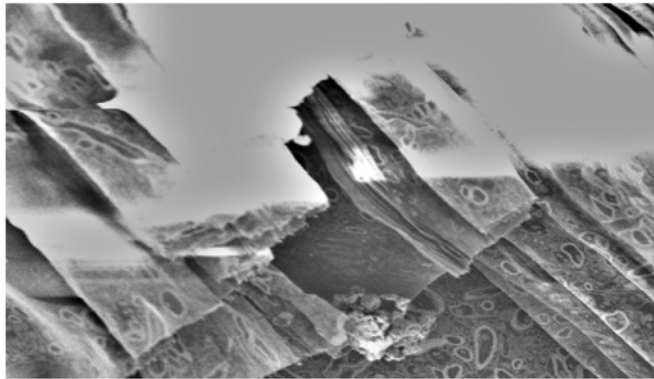


图 3B

I 79 (---)

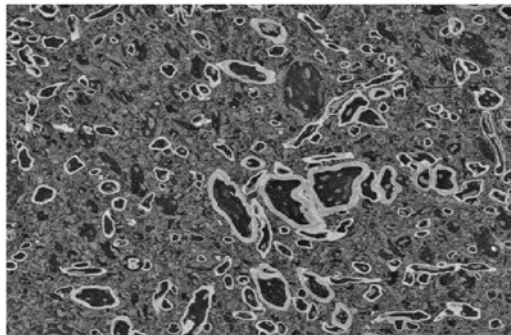


图 4A

I 80 (---)

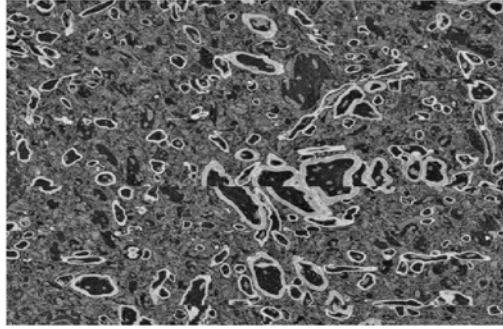


图 4B

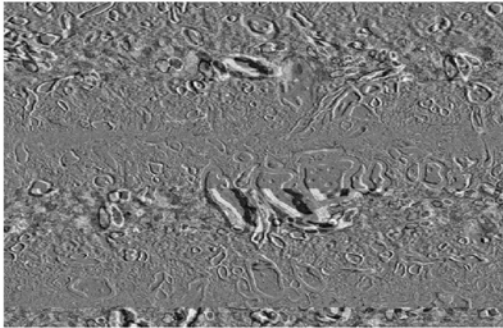
 Δ I 80 - I 79 (---)

图 4C

I 63

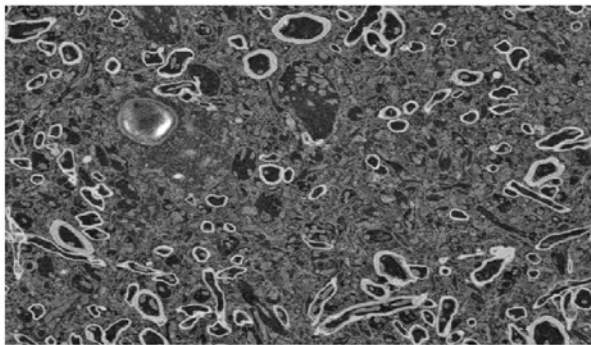


图 5A

I 64

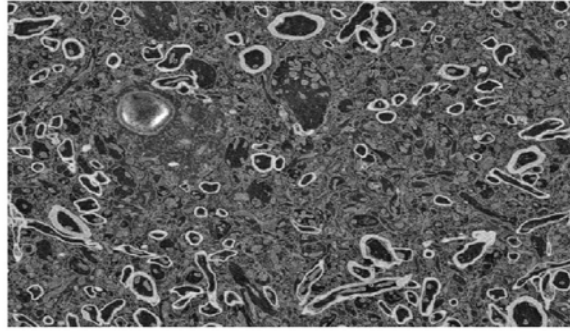


图 5B

Δ I 64 - I 63

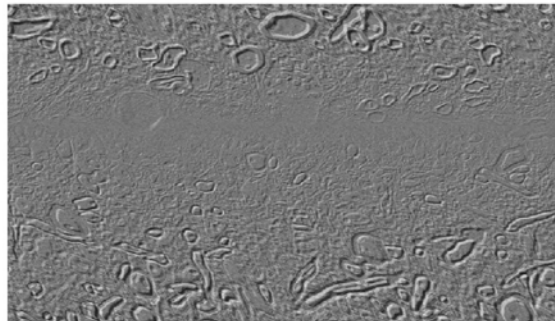


图 5C