



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104865276 B

(45)授权公告日 2017.07.21

(21)申请号 201510087134.6

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2015.02.25

G01N 23/04(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

审查员 周宏卉

申请公布号 CN 104865276 A

(43)申请公布日 2015.08.26

(30)优先权数据

14156356.9 2014.02.24 EP

(73)专利权人 FEI 公司

地址 美国俄勒冈州

(72)发明人 I.拉兹 E.G.T.博思 F.博格霍贝

B.布伊斯塞 K.S.塞德 S.拉扎

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 申屠伟进 张懿

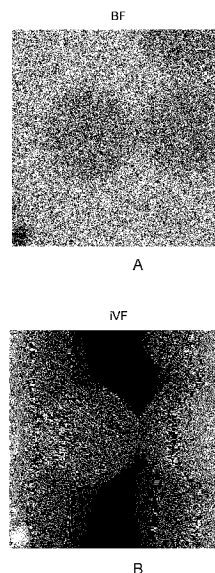
权利要求书3页 说明书17页 附图13页

(54)发明名称

在带电粒子显微镜中检查样本的方法

(57)摘要

一种在扫描透射类型的带电粒子显微镜中检查样本的方法,包括如下步骤:—提供带电粒子射束,所述射束通过发光器从源被引导以便照射样本;—提供检测器,用于检测带电粒子穿过样本的通量;—使得所述射束横跨样本表面进行扫描,并且记录作为扫描位置的函数的检测器输出,从而产生样本的带电粒子图像的累积,该方法还包括如下步骤:—把检测器体现为包括多个检测分段;—组合来自检测器的不同分段的信号,以便在每个扫描位置处从检测器产生向量输出,并且编译这个数据以产生向量场;—通过使所述向量场经受二维积分操作来以数学方式处理所述向量场,由此产生积分向量场图像。



1. 一种在扫描透射类型的带电粒子显微镜中检查样本的方法,包括:
 提供带电粒子射束,所述射束通过发光器从源被引导以便照射样本;
 提供检测器,用于检测带电粒子穿过样本的通量,所述检测器被体现为包括多个检测分段;

使得所述射束横跨样本表面进行扫描,并且记录作为扫描位置的函数的检测器输出,从而产生样本的带电粒子图像的累积,

包括:

组合来自检测器的不同分段的信号,以便在每个扫描位置处从检测器产生向量输出,并且编译这个数据以产生向量场;

通过使所述向量场经受二维积分操作来以数学方式处理所述向量场,由此产生积分向量场图像。

2. 根据权利要求1的方法,其中:

所述检测器被体现为包括四个象限;

所述向量输出通过计算互补象限对之间的差信号来产生。

3. 根据权利要求2的方法,其中所述积分向量场图像通过使它经受选自包括如下各项的组中的至少一个操作而被后处理:

滤波;

开角校正;

反卷积校正,

及其组合。

4. 根据权利要求2的方法,其中所述积分向量场图像通过使其经受拉普拉斯操作而被进一步操纵。

5. 根据权利要求2的方法,其中所述积分向量场图像通过使其经受单个微分操作而被进一步操纵。

6. 根据权利要求2的方法,其中对向量场 $\vec{E}$ 的所述以数学方式处理包括:作为包括如下定义的目标函数 I 的函数最小化的拟合问题,找到电位 ϕ 的估计值 $\hat{\phi}$:

$$I(\phi) = \iint \|(-\nabla\phi) - \vec{E}\|^2 dx dy = \iint \|\nabla\phi + \vec{E}\|^2 dx dy$$

针对笛卡尔坐标 (x, y) ,沿所述射束在样本上的扫描路径。

7. 根据权利要求1的方法,其中:

所述检测器被体现为包括像素阵列的像素化检测器;

所述向量输出使用包括如下步骤的过程来产生:

比较各像素值以确定在检测器上所述通量的质心的方位;

表达检测器上所述质心的坐标位置。

8. 根据权利要求7的方法,其中带电粒子是电子。

9. 根据权利要求7的方法,其中所述积分向量场图像通过使它经受选自包括如下各项的组中的至少一个操作而被后处理:

滤波;

开角校正;

反卷积校正，
及其组合。

10. 根据权利要求7的方法，其中所述积分向量场图像通过使其经受拉普拉斯操作而被进一步操纵。

11. 根据权利要求7的方法，其中所述积分向量场图像通过使其经受单个微分操作而被进一步操纵。

12. 根据权利要求7的方法，其中对向量场 $\tilde{\mathbf{E}}$ 的所述以数学方式处理包括：作为包括如下定义的目标函数 I 的函数最小化的拟合问题，找到电位 φ 的估计值 $\hat{\varphi}$ ：

$$I(\varphi) = \iint \|(-\nabla\varphi) - \tilde{\mathbf{E}}\|^2 dx dy = \iint \|\nabla\varphi + \tilde{\mathbf{E}}\|^2 dx dy$$

针对笛卡尔坐标 (x, y) ，沿所述射束在样本上的扫描路径。

13. 根据权利要求1的方法，其中所采用的检测器是位置敏感检测器。

14. 根据权利要求1的方法，其中所述积分向量场图像通过使它经受选自包括如下各项的组中的至少一个操作而被后处理：

滤波；
开角校正；
反卷积校正，
及其组合。

15. 根据权利要求1的方法，其中所述积分向量场图像通过使其经受拉普拉斯操作而被进一步操纵。

16. 根据权利要求1的方法，其中所述积分向量场图像通过使其经受单个微分操作而被进一步操纵。

17. 根据权利要求1的方法，其中对向量场 $\tilde{\mathbf{E}}$ 的所述以数学方式处理包括：作为包括如下定义的目标函数 I 的函数最小化的拟合问题，找到电位 φ 的估计值 $\hat{\varphi}$ ：

$$I(\varphi) = \iint \|(-\nabla\varphi) - \tilde{\mathbf{E}}\|^2 dx dy = \iint \|\nabla\varphi + \tilde{\mathbf{E}}\|^2 dx dy$$

针对笛卡尔坐标 (x, y) ，沿所述射束在样本上的扫描路径。

18. 根据权利要求17的方法，其中所述函数最小化利用从包括如下各项的组中选择的至少一项技术来实现：

泊松求解技术；
基函数重构；
使用基于 L_p 范数的目标函数的残差最小化；
使用M估计器的残差最小化；
各向异性加权；
扩散张量的应用；
正则函数的应用，
以及其组合。

19. 根据权利要求1的方法，其中带电粒子是电子。

20. 一种扫描透射类型的带电粒子显微镜，包括：
样本保持器，用于保持样本；

源,用于产生带电粒子射束;

发光器,用于引导所述射束以便照射所述样本;

检测器,用于响应于所述照射而检测穿过样本的带电粒子的通量,所述检测器被体现为包括多个检测分段;

扫描装置,用于使所述射束相对于样本表面进行扫描运动;

控制器,用于记录作为扫描位置的函数的所述检测器的输出,从而产生样本的带电粒子图像的累积,

其特征在于:

所述控制器被体现为执行下列附加动作:

组合来自检测器的不同分段的信号,以便在每个扫描位置处从检测器产生向量输出,并且编译这个数据以产生向量场;

通过使所述向量场经受二维积分操作来以数学方式处理所述向量场,由此产生积分向量场图像。

在带电粒子显微镜中检查样本的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及在扫描透射类型的带电粒子显微镜中检查样本的方法,方法包括如下步骤:

[0002] -提供带电粒子射束,所述射束通过发光器从源被引导以便照射样本;

[0003] -提供检测器用于检测带电粒子穿过样本的通量;

[0004] -使得所述射束横跨样本表面进行扫描,并且记录作为扫描位置的函数的检测器输出,从而允许累积样本的带电粒子图像。

[0005] 本发明还涉及可以在其中执行这种方法的带电粒子显微镜。

背景技术

[0006] 如贯穿本文本所使用的,接下来的术语应当被理解为与下面的解释一致:

[0007] -短语“带电粒子”包括电子或离子(通常为正离子,诸如例如镓离子或氢离子,但是负离子也是可能的;所讨论的离子可以是带电原子或分子)。例如,该术语也可以指的是质子。

[0008] -术语“显微镜”指的是用于创建通常太小而不能利用裸人眼看到令人满意的细节的对象、特征或部件的放大图像。在带电粒子显微镜(CPM)中,从发光器将带电粒子的成像射束引导到样本上。在透射类型的CPM(TCPM)中,检测器通常被用于在成像系统的帮助下拦截穿过样本的带电粒子的通量,成像系统用于将所述通量(的部分)聚焦到检测器上。这种TCPM可以被用在扫描模式(STCPM)中,在该情况下,来自发光器的带电粒子射束横跨样本进行扫描,并且检测器输出作为扫描位置的函数被记录。除成像之外,CPM也可以具有其它功能,诸如执行光谱法、检查衍射图、执行(局部化)表面改性(例如,研磨、蚀刻、沉积),等等。

[0009] -术语“发光器”指的是包括能够用于操纵来自源(例如,肖特基源或离子枪)的“原始”带电粒子射束的一个或多个静电和/或磁透镜的粒子光学镜筒,例如用于向其提供某种聚焦或偏转,和/或减轻其中的一个或多个像差。如果需要,发光器可以被提供有偏转器系统,偏转器系统可以被调用来使得所述射束横跨被调查的样本执行扫描运动。

[0010] 在下面,有时可以“作为示例”在电子显微术的特定情境中阐述本发明。然而,这样的简化仅仅旨在用于清楚/说明性的目的,并且不应当被解释为进行限制。

[0011] 带电粒子显微术是用于尤其以电子显微术的形式来将微观对象成像的公知的且越来越重要的技术。历史上,电子显微镜的基本类已经经受演进而成为许多公知的装置种类,诸如透射电子显微镜(TEM)、扫描电子显微镜(SEM)和扫描透射电子显微镜(STEM),并且也演进成各个子种类,诸如所谓的“双射束”工具(例如FIB-SEM),其另外地采用“加工”聚焦离子射束(FIB),以允许支持性活动,诸如例如离子射束研磨或离子射束诱导沉积(IBID)。在TEM中,用于照射样本的电子射束与在SEM的情况下相比将通常具有显著更高的能量(例如300keV对10keV),以便允许其组成电子穿透样本的全部深度;出于相关的理由,与在SEM中被调查的样本相比,在TEM中被调查的样本也将通常需要更薄。在传统的电子显微镜中,在给定成像捕捉期间在延长时间段内成像射束“开启”;然而,电子显微镜同样是可用的,其

中成像基于电子的相对短的“闪现”或“突发”而发生,例如,当尝试将移动的样本或辐射敏感的样品成像时,这样的方式是具有潜在益处的。能够例如从以下维基百科链接收集关于在这里阐明的一些主题的更多信息:

[0012] http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope

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

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

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

[0016] 此外,关于非基于电子的CPM的一些信息例如可以从诸如以下各项的来源收集:

[0017] http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_Helium_Ion_Microscope

[0018] - W.H. Escovitz, T.R. Fox and R. Levi-Setti, Scanning Transmission Ion Microscope with a Field Ion Source, Proc. Nat. Acad. Sci. USA 72(5), pp 1826-1828 (1975)。

[0019] (S) TEM是相对通用的工具,并且能够在各种模式中被用于调查样本。除“常规”TEM成像之外,还存在专用STEM技术,诸如BF(明视场)、ADF(环形暗视场)和HAADF(高角度ADF)成像,例如,如在下面的维基百科链接中提及的:

[0020] http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_tomography

[0021] <http://en.wikipedia.org/wiki/HAADF>。

[0022] 虽然这些技术具有它们自己的优势,但是它们还遭受各种缺陷。例如,在“常规”TEM成像的情况下,容易理解的图像仅能够通过使原始数据经受相对繁重的MTF(调制传递函数)/CTF(对比度传递函数)反演来获得。在另一方面,诸如BF、ADF和HAADF成像之类的专用技术是相对“浪费的”,因为为了实现期望的对比度,它们必须把它们自己限制为对于在来自样本的所检测到的通量中的信号粒子使用相对较窄角度范围;因为相对很少的可用电子被用于成像,所以这种技术易于遭受次优的信噪比(SNR)。这是重要的问题:许多样本(诸如例如生物和/或低温样品)可能对辐射诱发的损坏是高度敏感的,从而使得人们通常不能放任于如下方式的滥用:通过使用增加的图像累积时间和/或增加的照射束电流来尝试提高SNR,因为这可能导致不可接受的样本损坏;在这种情况下,不得不丢弃来自样本的相对较大部分的有价值可用通量是令人沮丧的。通过收集更大角度范围的所述通量来缓解这个问题的任何尝试通常将导致更差的对比度。

发明内容

[0023] 本发明的目的是解决这些问题。具体来说,本发明的目的是提供一种利用STCPM来调查样本的完全新方法。此外,本发明的目的是这个方法应当更高效地利用可用资源并且提供当前利用现有技术不可获得的结果。

[0024] 这些和其它目的在上面的开始段落中阐述的方法中被实现,该方法特征在于下列步骤:

[0025] -把检测器体现为包括多个检测分段;

[0026] -组合来自检测器的不同分段的信号,以便在每个扫描位置处从检测器产生向量输出,并且编译这个数据以产生向量场;

[0027] -通过使向量场经受二维积分操作来以数学方式处理所述向量场,由此产生积分向量场图像。

[0028] 在本发明的这个阐明的情境中,可以给出下面的附加解释:

[0029] -来自检测器的“向量”输出是能够被认为具有量值和方向的输出,其与将仅具有量值的标量输出相对。这样的向量输出通常能够以坐标系方式来表达,例如在笛卡尔坐标(X, Y)或例如极坐标(r, θ)中。这种向量输出的示例是静电电势场梯度或电场,其将具有量值(斜率值)和方向(最大斜率的线)两者。把检测器再分成个体分段(区)并且组合/处理来自这种分段的输出通常允许从撞击检测器的带电粒子通量提取向量。

[0030] -在先前项目中的操作产生针对样本上二维扫描区域中每个位置的向量值。编译这个数据因此导致样本的扫描区域的向量场(即具有每一点处向量值的“映射”)的创建。

[0031] -所采用的积分操作是“二维的”,因为所述向量场是二维的。在这个情境下,应当注意的是,二维积分操作通常不能被认为是两个独立、线性(即一维)积分的简单并列。相反地,该积分操作是“错综复杂的”(或退化的),因为在一个方向的积分对于在另一方向的积分结果具有同时发生的效果。该积分在二维扫描区域上执行,该二维扫描区域通过STCPM中的带电粒子射束的扫描运动而被描出/光栅化(rastered)。针对这个路径中的每个点,存在如先前的项目中提及的方位特定向量值。

[0032] -上面阐述的向量场的二维积分产生标量结果(标量场)。

[0033] 这些点将在下面被更详细地阐明。

[0034] 根据本发明的方法具有多个醒目的优点。例如:

[0035] -本发明的积分向量场图像使用向量场作为输入,并且这在每个点具有关联的量值和方向。这个方向(相位)信息的存在创建了现有成像技术不产生的深度和其它额外图像细节。

[0036] -通过积分向量场,本发明在不需要将其自己限制到所检测通量中带电粒子的预定义的角度范围的情况下实现了图像对比度。不同于“常规”STEM成像,例如它在原理上能够检测穿过样本的带电粒子的全部通量,并且仍提供对比度好的图像。因为它能够同时“处理”所述通量中的各种角度范围,所以它能够同时显示样本图像的傅里叶频谱中的高频和低频成分两者。

[0037] -先前的点实现了SNR的急剧改进。例如,这允许对辐射敏感样本的更加有效的调查,因为:

[0038] · 对于给定辐射剂量,与现有技术相比,可以收集更多信息;或者替代地,

[0039] · 为了获得给定量的数据,与现有技术相比,通常需要较低的辐射剂量。

[0040] -因为本方法基本上提供了相对充足的对比度,人们限制具有用(过度的)对比度换(更多的)分辨率的实践可能性。为了这个目的,所获得的分辨率可以通过变更撞击样本的带电粒子射束的照射模式来调整(例如通过调整输入射束开角/会聚角、在填充圆锥体(所谓的“在轴上”)和中空圆锥体(所谓的“离轴”或“环形”)照射之间切换等),这有效地用于改变照射射束的数值孔径(NA)。例如,人们能够选择执行双步骤(或多步骤)调查,其中:

[0041] · 人们初始使用相对较低分辨率(较小NA)但是相对较高对比度,例如用于获得关于样本的大体形状信息;

[0042] · 然后人们可以切换到较高分辨率(较大NA)和较低对比度以用于进一步的样本

分析。

[0043] 作为关于撞击射束的所选照射模式的一般描述,应当注意的是,除了上面提到的对照射射束的有效NA的调整,人们还能够例如调整所述射束的聚焦/散焦,由此使得射束聚焦(交叉)以达到样本内的不同深度。这在研究厚样本时可能是尤其值得关注的,其中不同图像的焦点系列可以被获得并且稍后通过求解(数学)线性逆问题而被用在样本的三维重构中。在带电粒子显微镜中,撞击样本的射束(的照射模式)经常被称为“探测器”。

[0044] -本方法可以产生不需要应用诸如MTF/CTF校正之类技术而能够被直接理解的成像结果。例如,如果上面提到的向量是静电电势场梯度或电场,那么在二维中对它积分将产生样本的静电电势场的映射-其是带电粒子显微镜中直接可理解/有含义的物理量,因为它与带电粒子波在穿过样本时(使得它弹性散射)所经受的相位偏移的量成正比。

[0045] -根据本发明的方案不需要复杂图像采集方案(具有关联的校准/对准方面),诸如由诸如叠层成像(ptychography)和全息成像之类的技术所规定的那个。

[0046] 本发明的这些和其它方面将在下面更详细地阐明。

[0047] 在本发明的特定实施例中:

[0048] -所采用的检测器被体现为包括四个象限;

[0049] -所述向量输出通过计算互补象限对之间的差信号来产生。

[0050] 这样的四象限检测器可以如下那样被采用。检测器可以沿撞击样本的粒子光学射束的(推测的)光学轴以如下方式来设置:这个(推测的)光学轴在四个象限(被定向为面对样本(的背侧))的中心共同角处拦截检测器。替代地,检测器可以被体现为具有中心孔(开口),并且这个孔能够以所述(推测的)光学轴为中心。沿这个轴传播并且在样本中未经受偏转的带电粒子然后将撞击检测器的中心,而在样本中经受偏转(散射)的带电粒子将使其轨迹从所述轴偏移开,并且撞击到检测器的象限中的一个(或多个)上。在实践中,穿过样本并从样本出来的带电粒子通量将被扇形散开成(准)圆锥形,具有尤其依赖于样本的结构/组成的平均偏转(从光学轴)。通过计算检测器的不同象限(来自不同象限的所检测电流)之间的差信号,人们能够获得所述平均偏转的(初步)量化-因为这样的计算显示与另一象限相比所述通量更多落在一个象限上的相对程度。人们现在能够(例如)选择笛卡尔坐标系(X, Y)以使得一个(相对)象限对跨在X轴上而另一个(相对)象限对跨在互补的Y轴上;在该情况下,执行上面提到的差计算能够产生具有(X, Y)坐标的梯度向量。这个向量针对在样本/检测器上扫描出的路径中的每个坐标点将具有给定值(量值/方向),因此定义向量场(其例如能够通过将它绘制为所谓的“针图”而被直观化,类似于在气象学中绘制风场的方式)。这个向量场然后能够关于X和Y以二维方式积分,从而产生本发明的新的积分向量场图像。用于执行这个重要积分操作的合适数学算法将在后面被更详细地阐述。

[0051] 在刚讨论的实施例中以及在本发明的其它实施例(诸如下面将讨论的接下来的两个)中应当被明确注意的是,在本发明中所采用的向量可以乘以一个或多个比例常数而不影响本发明的关键点。例如,(粒子)辐射斑点在分段检测器上(相对于所选原点)的位置自身是向量。然而,适当考虑检测器的操作原理,这样的向量可以被分配特定的物理含义,例如静电电势场梯度(电场),其也是向量。在数学上,它使得哪个向量被二维积分没有差别:人们能够经由简单(结果)比例常数来从一个向量转换到另一个(并且从一个积分结果转换到另一个)。

[0052] 在本发明的替代实施例(其可以被认为是先前讨论实施例的改进(或“更高分辨率”版本))中,下列各项适用:

[0053] -所采用的检测器被体现为包括像素阵列的像素化检测器;

[0054] -使用包括如下步骤的过程来产生所述向量输出:

[0055] · 比较各像素值以确定在检测器上所述通量的质心的方位;

[0056] · 表达检测器上所述质心的坐标位置。

[0057] 关于这个实施例,应当注意下列各项:

[0058] -像素的所述阵列(矩阵布置)例如可以沿正交(笛卡尔)网格或例如同心圆(极坐标布置)的嵌套集合来布局。这样的布置可以分别适合于上面提到的笛卡尔或极坐标中质心坐标的表达。

[0059] -这种检测器的示例包括CMOS、CCD和SSPM(固态光电倍增器)阵列,例如包括1024x1024像素(多个或部分)。

[0060] -因为这样的阵列中的检测分段(像素)通常比先前实施例中的检测分段(象限)小得多且多得多,所以它们通常允许对上面提到的平均偏转的更加准确的定位,其经由所述质心的方位来显现自己。

[0061] -在检测器区(小块)(其中像素通过上面提到的粒子通量的撞击而被激励)之内,所述质心可以将其自己显现为在所述区中间的(相对局部的)“亮斑点”和/或显现为所述区的所计算的“中心”位置。

[0062] -比较来自各个受激励像素的(电信号的)值并且根据其确定质心位置是相对简单的事情。这可以自动(例如,利用图案/图像识别软件)和/或手动(例如,通过视觉上显示检测器输出的再现并且允许操作员使用例如计算机鼠标、触控笔或触摸屏来选择质心位置)完成。

[0063] 在本发明的再另一实施例中,所采用的检测器是位置敏感检测器(PSD)。这样的检测器以不同的形式可用,诸如:

[0064] -所谓的“各向同性传感器”,其中辐射敏感半导体薄片(例如PIN二极管层)以几个(例如四个)外围电极为边界。撞击薄片的辐射斑点使得局部电阻改变,这在所述电极中导致不同的电流。所述斑点的位置随后根据相对简单的几何等式得出,所述几何等式包括所述电流(中某些)的差以及和。这样的检测器被认为是“分段的”,因为它使用电极的分布来有效地把辐射敏感薄片再分成不同的“电检测区域”。

[0065] -所谓的“离散传感器”,其采用诸如先前实施例中阐述的那样的类型的像素阵列,并且其使用例如摄像测量技术来产生撞击辐射斑点的位置。

[0066] 在两种情况中,斑点位置(的中心)(例如在(X, Y)坐标中)是向量,如由本发明规定的那样。对于关于PSD的一些一般信息,参考下面的维基百科链接:

[0067] http://en.wikipedia.org/wiki/Position_sensitive_device。

[0068] 关于由本发明规定的二维积分操作,向量场积分领域(向量微积分的子领域)提供了适当地处理从所采用的分段检测器提取的向量场所需要的基础数学架构。在所涉及的向量是梯度的特定情况中(其允许关于其可积分性采用某些简化),则可以应用梯度场积分的更特定领域的技术。能够被用于对所采集的图像数据执行这样的梯度场积分的算法的示例例如可以从下面技术期刊中的文章来收集,它们涉及(光子-光学)机器视觉/光度立体问

题:

[0069] - Robert T. Frankot, Rama Chellappa, *IEEE Transactions On Pattern Analysis And Machine Intelligence*, 10 (4) (1988).

[0070] - Amit Agrawal, Rama Chellappa, Ramesh Raskar, *Computer Vision, ICCV, 10th IEEE International Conference* (2005)。

[0071] 补充地,关于向量微分学的更一般性质的信息可以从下面的维基百科链接获得:

[0072] http://en.wikipedia.org/wiki/Vector_calculus。

[0073] 一旦根据本发明的二维向量场积分已被执行,则产生的“原始”积分向量场图像可以通过使其经受进一步的数学操纵而被后处理(即“被改进”)(如果期望这样的话)。这样的操纵例如可以包括选自包括如下各项的组中的至少一个操作:

[0074] -滤波(例如低通滤波,高通滤波,带通滤波);

[0075] -开角校正;

[0076] -反卷积校正,

[0077] 及其组合。这样的技术可以进一步阐明如下:

[0078] • (i) (a) 低通滤波:

[0079] 低通滤波是能够被用于增强图像(的傅里叶变换)中的低频信息并且能够(例如)使用高斯滤波器来实现的滤波技术。这个技术在其中能够有用的示例是人们对还包含高频信息(像原子或原子列等)的图像中的内(接触)电势或样本厚度感兴趣的情况。

[0080] • (i) (b) 高通滤波:

[0081] 高通滤波是帮助增强图像(的傅里叶变换)中的高频信息并且能够(例如)通过从对应的初始图像减去经低通滤波的图像来实现的滤波技术。这个技术能够有用的情况的示例是人们对在还示出低频信息(像内(接触)电势、厚度等)的图像中看见原子或原子列感兴趣的情况。

[0082] • (i) (c) 带通滤波:

[0083] 带通滤波器能够被认为是低通和高通滤波器的组合。它衰减/去除给定范围之外的频率并且使落入该范围内的频率通过。

[0084] • (ii) 开角校正:

[0085] 开角校正是能够利用下面的数学关系来描述的尖端校正:

[0086] $I_{WF}^{Corr} = IFT \{ FT \{ I_{WF} \} \cdot Filt \}$

[0087]
$$Filt = \begin{cases} \frac{1}{1 - \frac{q}{K q_{max}}} & q < q_{max} \\ 0 & q \geq q_{max} \end{cases}$$

[0088] 其中:

[0089] -FT标示傅里叶变换,并且IFT标示逆傅里叶变换;

[0090] -Filt是专用开角校正器滤波函数;

[0091] $-q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2}$ 是频域(傅里叶域)中的密度;

[0092] $-q_{max}$ 是(样本上)撞击射束斑点的最高频率,根据 $q_{max} = a/\lambda$,其依赖于射束的开角 a ,其中 λ 是撞击射束的带电粒子波长;

[0093] -因数K是调谐参数,其值可以(例如)凭经验获得,例如K=1.5。

[0094] 实质上,这种开角校正的目的是允许撞击样本的粒子射束的NA。

[0095] • (iii)反卷积校正:

[0096] 上面所获得的原始图像 I_{iVF} 可以被写成互相关(参见实施例8):

$$[0097] \quad I_{iVF} = \frac{1}{2\pi} |Probe|^2 * Orig$$

[0098] 其中:

[0099] -Orig是描述初始图像的函数,量化带电粒子射束在穿过样本而使得它在每个扫描位置经受弹性散射时所经受的相位偏移。

[0100] -Probe是描述用于照射所讨论的样本的照射配置/粒子光学射束的函数。它通常将包括可能的缺陷,诸如相差、不相干性等。probe函数可以凭经验确定或者在理论上预测/建模。

[0101] 在傅里叶域中,这变为:

$$[0102] \quad FT\{I_{iVF}\} = \frac{1}{2\pi} \overline{FT\{|Probe|^2\}} \cdot FT\{Orig\}$$

[0103] 其中横线标示复共轭。为了获得经校正的初始图像(理想地,Orig),可以应用反卷积步骤。例如:

$$[0104] \quad I_{iVF}^{Corr} = IFT\left\{FT\{I_{iVF}\} / \left(\frac{1}{2\pi} \overline{FT\{|Probe|^2\}} + Eps\right)\right\}$$

[0105] 其中Eps是调谐因数。

[0106] 为了完成这个步骤,Probe函数的幅值必须完全已知。如果 $|Probe|^2$ 函数可以由狄拉克δ函数(Dirac delta function)来近似,则这个类型的详尽反卷积步骤是不必要的,据此人们容易获得:

$$[0107] \quad I_{iVF} = \frac{1}{2\pi} Orig.$$

[0108] 技术人员将理解,通常,这里描述的技术(i)-(iii)可以被单独或组合地应用。

[0109] 在本发明的另一实施例中,上面提到的发明性积分向量场图像可以通过使其经受拉普拉斯操作而被进一步操纵。拉普拉斯算子是二阶微分算子,当对函数f执行时,其在二维欧几里得空间中采用如下形式:

$$[0110] \quad \Delta f = \nabla^2 f = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) f$$

[0111] 在当前情况中,实体f可以是本发明产生的“原始”积分向量场图像(iVF)或者是经后处理的积分向量场图像(PiVF),如先前实施例中提到的。执行这个拉普拉斯操作产生一图像(LiVF或LPiVF),该图像针对一些特征能够产生改进的分辨率(尽管以其它图像质量为可能的代价)。参见例如下面实施例4和5中给出的示例。应当注意的是,执行这里描述的拉普拉斯操作可以(如果期望/必要)通过乘以比例/缩放/校正常数(诸如例如-1)来完成;这例如可以被完成以便使得拉普拉斯操作的结果与特定物理解释更一致。

[0112] 应当明确注意的是,本发明与所谓的微分相位对比度(DPC)技术完全不同。在DPC方法中,四象限检测器被用于产生标量差图像,诸如下面图5C和5D中示出的S1-S3或S2-S4图像。不同于本发明,DPC技术不寻求从这样的标量图像提取向量值,并且不编译关联的向

量场；因此，DPC遗漏本发明所固有的方向（相位）（和关联的深度）信息。DPC方案也不执行本发明的向量积分，并且因此不实现本发明的有优势的角度独立性和噪声减小。因为DPC不产生积分图像，所有它也不允许上面阐述的类型(i)–(iii)的后处理技术。

附图说明

[0113] 现在将在示例性实施例和所附示意图的基础上更详细地阐明本发明，其中：

[0114] 图1呈现可以在其中执行本发明实施例的STCPM的纵向截面正视图；

[0115] 图2描绘根据本发明的分段检测器（象限检测器）的特定实施例的平面视图，该分段检测器可以被用在图1的对象中；

[0116] 图3描绘根据本发明的分段检测器（像素化检测器）的另一实施例的平面视图，该分段检测器可以被用在图1的对象中；

[0117] 图4图示现有技术（左）和本发明（右）之间的某些差别，尤其关于被所采用的检测器捕捉和使用的带电粒子通量的角度范围；

[0118] 图5A–5H示出根据现有技术和本发明的不同方面的GaN晶体的不同类型的STEM图像；

[0119] 图6A–6D示出根据现有技术和本发明的不同方面的样本的不同类型的STEM图像，所述样本包括无定形碳载体上的乳胶小球的集合；

[0120] 图7示出根据现有技术和本发明的不同方面的低温样本的不同类型电子显微镜图像，该低温样本包括在水冰基质中的蚯蚓血红蛋白；

[0121] 图8A–8C示出根据现有技术和本发明的不同方面的样本的不同类型的STEM图像，该样本包括在石墨烯基底上的不规则碳杂质；

[0122] 图9示出使用本发明的特定方面获得的与图8A–8C中相同的样本的图像；

[0123] 在各个图中，可以使用对应的参考标记来指示相关的、对应的各部分。应当注意的是，各图通常不成比例。

具体实施方式

[0124] 实施例1

[0125] 图1是适用于与本发明结合使用的STCPM1的实施例的高度示意描绘。在该图中，真空机壳2将STCPM（其在该情况下是STEM（即具有扫描功能的TEM））封装。在所描绘的STEM中，电子源4（诸如例如像肖特基枪）产生穿过电子光学发光器6的电子射束，电子光学发光器6用来将它们引导/聚焦到（基本上平坦的）样本S的所选择区域上。该发光器6具有电子光学轴8，并且通常将包括各种静电/磁透镜、（扫描）偏转器、校正器（诸如象散校正装置）等等；通常，其也能够包括聚光系统。

[0126] 样本S保持在能够由定位设备（载物台）12以多自由度定位的样本保持器10上；例如，样本保持器10可以包括能够（特别地）在XY平面（参见所描绘的笛卡尔坐标系）中移动的指状物。这样的移动允许沿着轴8（在Z方向）行进电子射束照射/成像/检查样本S的不同区域（和/或允许执行扫描运动，作为射束扫描的替代方式）。可选冷却设备14与支持设备10密切热接触，并且能够将后者维持在低温温度，例如使用循环低温冷剂以实现和维持期望低温。

[0127] 沿轴8行进的聚焦电子射束将以如下方式与样本S交互:即引起各种类型的“受激”辐射从样本S射出,各种类型的“受激”辐射包括(例如)二次电子、背散射电子、X射线和光学辐射(阴极发光);如果需要,能够借助于检测器22(例如可以是组合的闪烁器/光电倍增器或EDX(能散X射线光谱学)检测器)来检测这些辐射类型中的一个或多个。然而,本发明中的主要关注点是穿过(通过)样本S、从其出来并且继续沿着轴8传播(基本上,尽管通常具有一些偏转/散射)的电子。这样的透射电子进入成像系统(组合的物镜/投射透镜)24,其通常将包括各种静电/磁透镜、偏转器、校正器(诸如象散校正装置),等等。在正常(非扫描)TEM模式中,该成像系统24能够将透射电子聚焦到荧光屏26上,如果期望,荧光屏26能够被缩回/拉回(如由箭头28示意地指示的)以便使其离开轴8的路径。将由成像系统24在屏幕26上形成样本S的(部分的)图像,并且这可以通过位于壁2的适当部分中的观察口30来观察。用于屏幕26的缩回机构性质上例如可以是机械和/或电的,并且不在这里被描绘。

[0128] 作为对观察屏幕26上图像的替代方式,人们可以改为利用电子检测器D,尤其在STEM模式中。为了这个目的,可以实行调整器透镜24'以便使从成像系统24出来的电子的焦点移位,并且把它们重新引导/聚焦到检测器D上(而不是缩回的屏幕26(参见上面)的屏幕上)。在检测器D处,电子可以形成图像(或衍射图),该图像可以由控制器50处理并且显示在显示设备(未描绘)上,诸如例如平板显示器。在STEM模式中,从检测器D的输出可以被记录为在样本S上的(X,Y)扫描射束位置的函数,并且可以构造成为作为X,Y函数的检测器输出的“映射”的图像。技术人员将非常熟悉这些各种可能性,其在这里不需要进一步阐明。

[0129] 注意到,控制器(计算机处理器)50经由控制线(总线)50' 连接到各种图示的部件。该控制器50能够提供各种功能,诸如将动作同步、提供定位点、处理信号、执行计算以及在显示设备(未描绘)上显示消息/信息。不用说,(示意描绘)的控制器50可以(部分地)在机壳2内部或外部,并且视需要可以具有整体或复合结构。技术人员将理解,机壳2的内部不必被保持为严格的真空;例如在所谓的“环境TEM”中,给定气体的本底大气被故意地引入/维持在机壳2内。

[0130] 在本发明的情境中,下面的附加点值得进一步阐明:

[0131] -检测器D被体现为分段检测器,其例如可以是象限传感器、像素化CMOS/CCD/SSPM检测器或例如PSD。这种检测器的特定实施例在图2和3的平面图中示出,并且将在下面被讨论。

[0132] -如果沿粒子光学轴8传播的带电粒子射束穿过样本S,而在样本中未经受任何散射/偏转,则它将(基本上)对称地撞击检测器D的中心/原点0,并且(基本上)给出“零”读数。这种情况在图2和3中被更详细地示出,图2和3示出以点0为原点的笛卡尔轴X、Y,虚线圆以原点为中心,该虚线圆示意地表示具有质心C' 的(鬼)带电粒子射束的撞击印迹B',以使得:

[0133] · 在图2中,这个印迹B' 对称地重叠在检测象限(电极)Q1、Q2、Q3、Q4上。如果来自这些象限的检测信号(电流)分别由S1、S2、S3、S4标示,那么这个情况将在相对的象限对之间产生零差信号S1-S3和S2-S4。

[0134] · 在图3中,描绘检测像素P的正交矩阵(例如在可能具有重叠闪烁层的CMOS检测器中),在所述像素矩阵的所选原点0和质心C' 之间存在零偏差。

[0135] -在另一方面,如果带电粒子射束在样本S中经受一些散射/偏转,它将降落在检测器D上与原点0偏离的位置处。在这个情境中,图2和3示出了具有质心C的射束印迹B,质心C

不再以0为中心。点C相对于0的位置定义向量V,具有关联的量值(长度)和方向(例如相对于X轴的指向角)。这个向量V可以按照点C的坐标(X_c, Y_c)来表达,其可以被提取如下:

[0136] 在图2中,人们能够使用下面的公式得出 X_c, Y_c 的(初步)估计值:

$$[0137] \quad X_c \sim \frac{S_1 - S_3}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4}, \quad Y_c \sim \frac{S_2 - S_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (1)$$

[0138] 在图3中,人们能够通过检查来自各个像素P的输出信号来得出 X_c, Y_c 的值,因为被射束印迹B撞击的像素P将与印迹B之外的像素给出不同输出信号(例如,电阻、电压或电流)。C的方位然后能够例如通过注释产生极值信号的那个特定像素的坐标而被直接推导出,或者通过以数学方式计算被B撞击的一组像素P的质心而间接确定,或者经由组合两种方案的混合技术。

[0139] 技术人员将理解射束印迹B的尺寸可以通过调整例如图1的STCPM的所谓“摄像机长度”来变更。

[0140] 当输入带电粒子射束横跨样本S进行扫描以描出二维扫描路径(区域)时,在先前项目中阐述的方案可以被用于获得沿所述扫描路径的每个坐标位置的V的值。这允许对作为样本S上扫描位置的函数的向量V的“映射”的编译,其相当于数学场(并且还相当于物理场,其中向量V可以被分配(成比例的)物理含义,诸如静电场向量)。

[0141] 由先前步骤产生的向量场现在可以在二维上被积分,以便根据本发明获得经积分的向量场图像。本发明的这个方面将在下个示例(特定参考STEM,但是同样适用于一般的STCPM)中被更详细地阐明。

[0142] 实施例2

[0143] 积分梯度场

[0144] 如上面阐述的,所测量的向量场 $\tilde{\mathbf{E}}(x, y) = (\tilde{E}_x(x, y), \tilde{E}_y(x, y))^T$ 能够(例如)在每个坐标点 (x, y) 处根据检测器分段差使用如下表达式而被得出:

$$[0145] \quad \tilde{E}_x = \frac{S_1 - S_3}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (2a)$$

$$[0146] \quad \tilde{E}_y = \frac{S_2 - S_4}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (2b)$$

[0147] 其中,为了简单,标量场 $\tilde{E}_x, \tilde{E}_y$ 和 $S_{i=1, \dots, 4}$ 中的空间索引 (x, y) 被省略,并且其中上标T标示矩阵的转置。

[0148] 根据STEM对比度形成理论已知的是, $\tilde{\mathbf{E}}$ 是被成像样本的感兴趣区域中实际电场E的测量值。这个测量值不可避免地由光学器件、检测器、电子器件等中的缺陷所引起的噪声和畸变所破坏。根据基础电磁学,已知的是静电电势函数 $\varphi(x, y)$ [下面也称为电势映射]与电场有关如下:

$$[0149] \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (3)$$

[0150] 这里的目的是获得样品的每个扫描方位处的电势映射。但是按其有噪声形式 $\tilde{\mathbf{E}}$ 的测量电场将最可能是不“可积分的”,即不能由梯度算子从平滑电势函数得出。在给出有噪

声测量值 $\tilde{\mathbf{E}}$ 的情况下对于电势映射的估计值 $\hat{\phi}$ 的探求可以被公式化为拟合问题,产生被如下定义的目标函数 J 的函数最小化:

$$[0151] \quad J(\phi) = \iint \|(-\nabla\phi) - \tilde{\mathbf{E}}\|^2 dx dy = \iint \|\nabla\phi + \tilde{\mathbf{E}}\|^2 dx dy \quad (4)$$

[0152] 其中 $\nabla\phi = (\phi_x, \phi_y)^T = (\frac{\partial\phi}{\partial x}, \frac{\partial\phi}{\partial y})^T$ 。人们基本上一直在最小平方意义上寻找对从平滑电势函数 ϕ 得出的梯度场的测量值的最接近拟合。

[0153] 为了寻求 J 的最小值,人们必须满足欧拉-拉格朗日 (Euler-Lagrange) 等式:

$$[0154] \quad \frac{\partial \|\nabla\phi + \tilde{\mathbf{E}}\|^2}{\partial \phi} - \frac{d}{dx} \frac{\partial \|\nabla\phi + \tilde{\mathbf{E}}\|^2}{\partial \phi_x} - \frac{d}{dy} \frac{\partial \|\nabla\phi + \tilde{\mathbf{E}}\|^2}{\partial \phi_y} = 0 \quad (5)$$

[0155] 其可以被扩展为:

$$[0156] \quad -\frac{d}{dx} \frac{\partial [(\phi_x + \tilde{E}_x)^2 + (\phi_y + \tilde{E}_y)^2]}{\partial \phi_x} - \frac{d}{dy} \frac{\partial [(\phi_x + \tilde{E}_x)^2 + (\phi_y + \tilde{E}_y)^2]}{\partial \phi_y} = 0 \quad (6)$$

[0157] 最后产生:

$$[0158] \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = -\left(\frac{\partial \tilde{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{E}_y}{\partial y}\right) \quad (7)$$

[0159] 其是人们需要求解以获得 $\hat{\phi}$ 的泊松等式。

[0160] 泊松求解

[0161] 使用(7)中导数的有限差,人们获得:

$$[0162] \quad \frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{\Delta^2} + \frac{\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}}{\Delta^2} = -\left(\frac{(\tilde{E}_x)_{i+1,j} - (\tilde{E}_x)_{i-1,j}}{\Delta} + \frac{(\tilde{E}_y)_{i,j+1} - (\tilde{E}_y)_{i,j-1}}{\Delta}\right) \quad (8)$$

[0163] 其中 Δ 是所谓的网格步进尺寸(这里假设在x和y方向相等)。(8)中的右侧量从测量得知并且将一起被归并成项 $\hat{\rho}_{i,j}$ 以简化表示:

$$[0164] \quad \frac{\phi_{i+1,j} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i-1,j}}{\Delta^2} + \frac{\phi_{i,j+1} - 2\phi_{i,j} + \phi_{i,j-1}}{\Delta^2} = \hat{\rho}_{i,j} \quad (9)$$

[0165] 其在重新布置之后产生:

$$[0166] \quad \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j-1} - 4\phi_{i,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i+1,j} = \Delta^2 \hat{\rho}_{i,j} \quad (10)$$

[0167] 其中 $i = 2, \dots, N-1$ 和 $j = 2, \dots, M-1$,其中(N, M)是要被重构的图像的维度。

[0168] (10)中的系统产生矩阵公式:

$$[0169] \quad L\phi = \rho \quad (11)$$

[0170] 其中 ϕ 和 ρ 分别表示电势映射和测量值的向量形式(这些向量的尺寸是 $N \times M$,即

图像的尺寸)。所谓的拉普拉斯(Laplacian)矩阵 L 的维度是 $(N \times M)^2$,但是非常稀疏并且针对上面使用的离散化方案具有称为“具有边缘的三对角线”的特别形式。所谓的狄利克雷和诺依曼边界条件通常被用于固定电势映射的边沿处的 ϕ 的值。

[0171] (11)的线性系统针对典型的STEM图像趋向于非常大,并且通常将使用数值方法来求解,诸如双对梯度方法。类似方案先前已经被用于外形重构问题中,如讨论的,例如在 Ruggero Pintus, Simona Podda and Massimo Vanzi, *14th European Microscopy Congress, Aachen, Germany*, pp. 597-598, Springer (2008) 的期刊文章中。

[0172] 人们应当注意到,导数的其它形式的离散化可以被用在先前描述的方案中,并且该整体技术常规地被称为泊松求解方法。这种方法的特定示例是所谓的多网格泊松求解,其被优化成在数值上对泊松等式进行求解,其开始于粗筛/网格并且然后是细筛/网格,由此增加积分速度。

[0173] 基函数重构

[0174] 对(7)进行求解的另一方案是使用所谓的Frankot-Chellapa算法,其上面提到的Frankot和Chellapa的期刊文章中提出,其先前被用于根据光度立体图像的深度重构。把该方法适配于当前问题,人们能够通过把所述导数投射到可空间积分的傅里叶基函数中来重构电势映射。在实践中,这通过把傅里叶变换 $FT(\cdot)$ 应用到(7)的两侧以获得如下等式来完成:

$$[\omega_x^2 + \omega_y^2]FT(\phi) = -\sqrt{-1}(\omega_x FT(\tilde{E}_x) + \omega_y FT(\tilde{E}_y)) \quad (12)$$

[0176] 根据上面的等式,可以通过逆傅里叶变换(IFT)来获得 $\hat{\phi}$:

$$\hat{\phi} = IFT\left(-\sqrt{-1} \frac{\omega_x FT(\tilde{E}_x) + \omega_y FT(\tilde{E}_y)}{\omega_x^2 + \omega_y^2}\right) \quad (13)$$

[0178] 正和逆变换可以使用所谓的离散傅里叶变换(DFT)来实施,在这种情况下,所采用的边界条件是周期性的。替代地,人们可以使用所谓的离散正弦变换(DST),其对应于狄利克雷边界条件(在边界处 $\phi = 0$)的使用。人们还可以使用所谓的离散余弦变换(DCT),对应于诺依曼边界条件(在边界处 $\nabla \phi \cdot \mathbf{n} = 0$, $\mathbf{n}$ 是在给定边界方位处的法向量)的使用。

[0179] 一般化和改进的解决方案

[0180] 虽然通常良好地起作用,但是泊松求解和基函数技术可以通过计及数据中明显不连续点(异常值)的方法而被进一步增强。出于该目的,目标函数 J 可以被修改为合并不同的残差 R (在(4)中,残差是 $R(p) = \|r\|^2$),人们例如可以使用少于2个包括所谓的基于 L_p 范数的目标函数的指数:

$$J(\phi) = \iint R(-\nabla \phi, \tilde{E}) dx dy = \iint \|(-\nabla \phi) - \tilde{E}\|^{\frac{1}{p}} dx dy, \quad p \geq 1 \quad (14)$$

[0182] 该残差也可以选自通常用在所谓的M估计器中的函数集合(通常使用的一类可靠估计器)。在这个情况下, R 可以选自诸如所谓的Huber、Cauchy和Tuckey函数之类的函数之中。再次,来自对目标函数的这种修改的期望结果将避免过度平滑重构并且更准确地计及数据集中的真实/物理不连续点。实现这一点的另一方式是使用 J 中的各向异性加权函数 W_x 和 W_y :

$$[0183] \quad J(\varphi) = \iint w_x(\epsilon_x^{k-1})(-\varphi_x - \tilde{E}_x)^2 + w_y(\epsilon_y^{k-1})(-\varphi_y - \tilde{E}_y)^2 dx dy$$

(15)

[0184] 其中加权函数依赖于在迭代k-1处的残差:

$$[0185] \quad R(\epsilon_x^{k-1}) = R(-\varphi_x^{k-1}, \tilde{E}_x) \quad \text{和} \quad R(\epsilon_y^{k-1}) = R(-\varphi_y^{k-1}, \tilde{E}_y) \quad (15a)。$$

[0186] 在上面提到的Agrawal、Chellappa和Raskar的期刊文章中,被示出的是,对于根据光度立体图像的深度重构问题,对这种各向异性加权的使用(其可以是二元的或连续的)在深度映射恢复过程中导致改进的结果。

[0187] 在另一方案中,人们还可以把扩散张量D应用到向量场 $\nabla\varphi$ 和 $\tilde{E}$,目的是在针对 φ 的求解过程期间平滑数据同时保持不连续点,导致对(4)的修改成为:

$$[0188] \quad J(\varphi) = \iint \|D(-\nabla\varphi) - D(\tilde{E})\|^2 dx dy \quad (16)$$

[0189] 最后,正则化技术可以被用于限制解空间。这通常通过在诸如下面的目标函数J的公式中添加罚函数来完成:

$$[0190] \quad J(\varphi) = \iint [\|(-\nabla\varphi) - \tilde{E}\|^2 + \lambda f(\nabla\varphi)] dx dy \quad (17)$$

[0191] 正则化函数 $f(\nabla\varphi)$ 可以出于稳定迭代解的收敛性的目的而被用于对 φ 施加各种约束。它还可以被用于合并到关于所寻求的电势场或其它样品/成像条件的优化过程现有技术中。

[0192] 实施例3

[0193] 图4图示(在立面/纵向截面中)现有技术(左)和本发明(右)之间的某些差别,尤其关于所采用的检测器D捕捉和使用的带电粒子通量的角度范围:

[0194] -粒子光学轴8,样本S和检测器D(参见图1)。

[0195] -带电粒子的输入射束IB,示出为沿轴8朝样本S(的上表面)传播。这个射束被描绘为穿过开口AP和粒子光学物镜OL从而变为粒子的会聚射束(填充的圆锥体)的准直射束。

[0196] -输出通量OF,包括已穿过样本S并且从样本S(的下表面)出来的射束IB的带电粒子,在这里被示出为粒子的发散圆锥体。

[0197] 现在应当注意下面各项:

[0198] (A) [现有技术]

[0199] 在左侧子图中,示意地图示不同类型的检测器D。具体为:

[0200] -明视场(BF)检测器仅捕捉OF的轴8附近的中心分量。

[0201] -环形暗视场(ADF)检测器仅捕捉OF的远离轴8的受限圆环(中空圆锥体)。

[0202] -还图示了OF的甚至更加呈扇形散开的高角度ADF(HAADF)成分,朝ADF检测器元件的周界外侧的未描绘的HAADF检测器元件前进。

[0203] 非常明显的是,这些检测技术中的每一个把其自己限制为仅检查在OF中存在的不同角度范围(角度分布)的相对较小部分。

[0204] (B) [本发明]

[0205] 相反地,在右侧子图中,OF的基本整个角度分布被检测器D(其在这里被描绘为是四象限检测器,其中图示了两个象限Q1和Q3)捕捉和使用。虚线指示通量OF' 的未偏转/未散

射“参考”圆锥体(基本上对应于引起图2中的射束印迹B'的那个),而实线指示通量 OF' 的偏转/散射圆锥体(类型诸如是引起图2中的射束印迹B的那个)。要注意,通量圆锥体 OF' 、 OF' 的散射角度在这里被放大:其通常是大约几毫弧度。

[0206] 通常,捕捉输出磁通 OF 的这种大角度范围[情况(B)]将产生对比度差的图像;因此,在现有技术中使用的逐个完成方案[情况(A)]相对而言是非常浪费的,因为它在任何给定时间丢弃了 OF 的大部分。然而本发明允许情况(B)中的高效率通量收集方案被用于产生对比度好的图像,这归因于本发明人规定的创新的向量场积分过程。

[0207] 实施例4

[0208] 图5A-5G示出了根据现有技术和本发明的不同方面的GaN晶体的不同类型的STEM图像。在所有情况中,所描绘的视场是大约 $4.39\text{nm} \times 4.39\text{nm}$ 。更具体地,个体图像可以被进一步阐明如下:

[0209] · 图5A:这是明视场(BF)图像,与诸如图4的左侧示出的设置之类的设置(的部分)相关联。可以看见对角线布置的斑点的重复结构,但是没有更多的细节可以被确定无疑地辨别。

[0210] · 图5B:这是高角度环形暗视场(HAADF)图像,与诸如图4的左侧示出的设置之类的设置(的另一部分)相关联。再一次,可以看见对角线布置的斑点的重复结构,但是没有更多进一步细节。

[0211] · 图5C和5D:这些图像在诸如图4的右侧和图2中描绘的设置之类的设置中使用四象限检测器形成。它们是“减色”或“梯度”图像,其中图5C示出基于 $S1-S3$ 信号的标量图像,并且图5D示出基于 $S2-S4$ 信号的对应标量图像。在这些图像中,图5A和5B的斑点开始变得有些更结构化,但是仍然相当不详细。

[0212] · 图5E:这里,成为图5C和5D基础的数据已被处理为属于向量(V)的相应X-和Y-成分,从而允许构建向量场(参见上面的等式(1))。这个场然后经受根据本发明的二维积分过程,由此产生经积分的向量场(iVF)图像,其基本上是GaN样本上静电电势的映射。对该图像的仔细检查显示之前提到的“斑点”在性质上实际是二元的,其中每个包括相对大的项(Ga原子)和相对小的项(N原子)。要特别注意的是如下事实:这个图像具有图5A-5D中所缺乏的深度含义。此外,图像的左上方显示图5A-5D中所缺乏的基底损坏(辐射损坏,由于射束停留)。

[0213] · 图5F:这里,图5E的图像已通过使它经受开角校正(见前面)而被“净化”(处理),因此产生经处理的iVF(PiVF)图像。在这个图像中,个体Ga和N原子更加清晰可见。还清晰可见的是如下事实:该结构在性质上是交替的,由此:

[0214] -沿一些对角线,N原子被布置在其关联的Ga原子下方;

[0215] -沿其它(邻近)对角线,N原子被布置在其关联的Ga原子右侧。

[0216] 对图5E的图像执行的开角校正用于增强其深度,并且在图像左上方的基底损坏现在甚至更清晰。

[0217] · 图5G:这个图像示出在使图5E经受拉普拉斯操作(产生LiVF图像)之后的图5E的对象,并且基本上呈现GaN样本中电荷密度的映射。与先前的两幅图相比,可以注意如下各项:

[0218] -深度含义被减少;

[0219] -N原子在图5G中显现为变得更清晰,但是Ga原子显现为在形状上变得更扩散;

[0220] -在图5E、5F的左上角可见的样本损坏在图5G中不可见。

[0221] · 图5H:这个图像示出使图5F经受拉普拉斯操作(产生LPiVF图像)之后的图5F的对象。因为基础数据在执行拉普拉斯操作之前被处理/滤波,所以该图像与图5G中的那个相比趋向于更明晰。

[0222] 实施例5

[0223] 图6A-6D示出根据现有技术和本发明的不同方面的样本的不同类型的STEM图像,所述样本包括无定形碳载体上的乳胶小球的集合。在所有情况中,所描绘的视场是大约198.85nm x 198.85nm。更具体地,个体图像可以被进一步阐明如下:

[0224] · 图6A:这是明视场(BF)图像,与诸如图4的左侧示出的设置之类的设置(的部分)相关联。乳胶小球将自己显现为平坦的、扩散的斑点。

[0225] · 图6B:这是根据本发明的积分向量场(iVF)图像。这个图像具有显著的深度,如由小球的可见临边昏暗所显现的,将它们显示为球状体而不是圆盘。

[0226] · 图6C:这里,图6C的iVF图像通过使其经受高通滤波操作而被“净化”(处理),因此产生经处理的iVF(PiVF)图像,具有甚至更醒目的深度分辨率。

[0227] · 图6D:这个图像示出了在使图6B经受拉普拉斯操作(产生LiVF图像)之后的图6B的对象,并且基本上呈现样本中电荷密度的映射。与图6A的BF图像相比,该小球的轮廓被增强,但是图6B和6C的深度方面已被丢失。

[0228] 实施例6

[0229] 图7示出根据现有技术和本发明的不同方面的低温样本的不同类型电子显微镜图像,该低温样本包括在水冰基质中的蚯蚓血红蛋白(具有六重对称性的分子形状)。更具体地,该个体图像可以被进一步阐明如下:

[0230] · 左:常规(非扫描)TEM(CTEM)图像,描绘(从上到下)了分别具有0.8 μm 、1.2 μm 、2.0 μm 、2.4 μm 和4.9 μm 散焦值的图像系列。要注意,在这个系列中,所采用的最大散焦给出了最好的对比度。在这个系列的每个成员中的视场是大约45nm x 45nm。

[0231] · 右:根据本发明的积分向量场(iVF)图像,与任何CTEM图像相比,其呈现了更多的细节。在这个情况中,视场是大约30nm x 30nm。

[0232] 要注意,在两种情况中整体电子剂量是相同的($10 \text{ e}/\text{\AA}^2$ (每平方埃电子数)),这是通常所规定的用于使在低温条件下的生物样本成像的极端低的剂量。除了本发明,基于STEM的技术在这样的低剂量条件下没有示出任何有意义的信号。

[0233] 实施例7

[0234] 图8A-8C示出根据现有技术和本发明的不同方面的样本的不同类型的STEM图像,该样本包括在石墨烯基底上的不规则碳杂质。更具体地,个体图像可以被进一步阐明如下:

[0235] · 图8A:这是环形明视场(ABF)图像,与诸如图4的左侧示出的设置之类的设置(的部分)相关联。该图像相对平坦和单调。

[0236] · 图8B:这个图像在诸如图4的右侧和图2中描绘的设置之类的设置中使用四象限检测器形成。它是“减色”或“梯度”图像,基于S2-S4信号。它比图8A具有更大深度和更多细节。

[0237] · 图8C:这是根据本发明的积分向量场(iVF)图像。该图像具有显著的深度和细

节。

[0238] 实施例8

[0239] 通过使用位置敏感检测器(PSD)并且测量薄的、非磁性样本,人们获得(按照定义)向量场图像成分,其作为检测器平面处电子密度分布 $I_D(\vec{k}, \vec{r}_p)$ 的质心(COM)的成分:

$$[0240] \quad I_x^{COM}(\vec{r}_p) = \iint_{-\infty}^{\infty} k_x I_D(\vec{k}, \vec{r}_p) d^2 \vec{k} \quad I_y^{COM}(\vec{r}_p) = \iint_{-\infty}^{\infty} k_y I_D(\vec{k}, \vec{r}_p) d^2 \vec{k} \quad (18)$$

[0241] 其中 $\vec{r}_p$ 表示撞击样本的探测器(聚焦电子射束)的位置,并且 $\vec{k} = (k_x, k_y)$ 是检测器平面中的坐标。那么全向量场图像可以被形成为:

$$[0242] \quad \overline{I^{COM}}(\vec{r}_p) = I_x^{COM}(\vec{r}_p) \cdot \vec{x}_0 + I_y^{COM}(\vec{r}_p) \cdot \vec{y}_0 \quad (19)$$

[0243] 其中 $\vec{x}_0$ 和 $\vec{y}_0$ 是两个垂直方向上的单位向量。

[0244] 在检测器处的电子密度分布由下式给出:

$$[0245] \quad I_D(\vec{k}, \vec{r}_p) = |\mathcal{F}\{\psi_{in}(\vec{r} - \vec{r}_p) e^{i\varphi(\vec{r})}\}(\vec{k})|^2 \quad (20)$$

[0246] 其中 $\psi_{in}(\vec{r} - \vec{r}_p)$ 是撞击电子波(即探测器),其在位置 $\vec{r}_p$ 照射样本,而 $e^{i\varphi(\vec{r})}$ 是样本的透射函数。相位 $\varphi(\vec{r})$ 与样本的内静电电势场成比例。成像 $\varphi(\vec{r})$ 是任何电子显微镜成像技术的最终目标。表达式19可以被重写为:

$$[0247] \quad \overline{I^{COM}}(\vec{r}_p) = \frac{1}{2\pi} (|\psi_{in}(\vec{r})|^2 * \nabla \varphi(\vec{r}))(\vec{r}_p) = -\frac{1}{2\pi} (|\psi_{in}(\vec{r})|^2 * \vec{E}(\vec{r}))(\vec{r}_p) \quad (21)$$

[0248] 其中 $\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla \varphi(\vec{r})$ 是样本的内电场(其是样本的静电电势场的负梯度)并且算子“*”标示互相关。明显的是,所获得的向量场图像 $\overline{I^{COM}}(\vec{r}_p)$ 直接表示样本的内电场 $\vec{E}(\vec{r})$ 。其成分在上面(18)中阐述。

[0249] 接下来,使用任何任意路径 l 执行根据本发明的积分步骤,如下:

$$[0250] \quad I^{COM}(\vec{r}_p) = \int_{l=\vec{r}_{ref}}^{\vec{r}_p} \overline{I^{COM}}(\vec{r}) \cdot d\vec{l} \quad (22)$$

[0251] 因为在非磁性样本的情况中,仅有的场是电场,电场是保守向量场,所以这个任意路径被允许。在数值上,这可以按许多方式来执行(参见上文)。在分析上,它可以通过将(21)引入到(22)中来计算出,从而产生:

$$[0252] \quad I^{COM}(\vec{r}_p) = \frac{1}{2\pi} (|\psi_{in}(\vec{r})|^2 * \varphi(\vec{r}))(\vec{r}_p) \quad (23)$$

[0253] 清楚的是,利用这个提出的积分步骤,人们获得直接表示 $\varphi(\vec{r})$ 的标量场图像,这是电子显微镜中的优选对象。

[0254] 实施例9

[0255] CPM图像经常是非常有噪声的,例如归因于剂量限制。两个有噪声信号相减以便获得上面提到的“减色”或“梯度”图像(参见例如图5C、5D、8B)易于增加伴随的噪声的量,从而导致相对较低的SNR。为了减轻这个效果,人们能够通过微分(一次)上面提及的iVF(或

PiVF) [以便分别获得DiVF (或dPiVF) 图像] 来获得“增强”的减色/梯度图像。在这样做时, 可以利用Frankot–Chellapa算法(参见上文), 其中基本上, 电势 φ 被适配到所测量电场 $\vec{E}$ 的噪声成分以便最小化:

$$[0256] \quad \iint |\nabla\varphi + \vec{E}|^2 dx dy$$

[0257] 在这个步骤中, 噪声被正则化, 如从如下事实中可以看见的: 自由度的数量(即像素的数量)减少到二分之一(两个图像组合成一个结果图像)。当产生的电势随后被微分时, 自由度的数量保持不变, 并且因此产生的diVF (或dPiVF) 图像与初始图像相比具有较小的噪声。被去除的噪声部分是不能被写为标量电势的梯度的部分。

[0258] 应当注意的是, 这里提及的单个微分(倒微分算子/倒三角)产生向量结果(在笛卡尔坐标系的情况下具有例如X和Y成分)。如果期望, 这些成分能够使用偏微分(例如 $\frac{\partial}{\partial x}$ 或 $\frac{\partial}{\partial y}$) 被彼此分离地计算。

[0259] 这个技术的示例被示出在图9中, 其与图8A–8C和上面的实施例7涉及相同的样本。图9示出这里提到的diVF(Y) [偏微分w.r.t. Y] 图像, 并且对应于图8B的增强版本(具有更明晰的细节)。

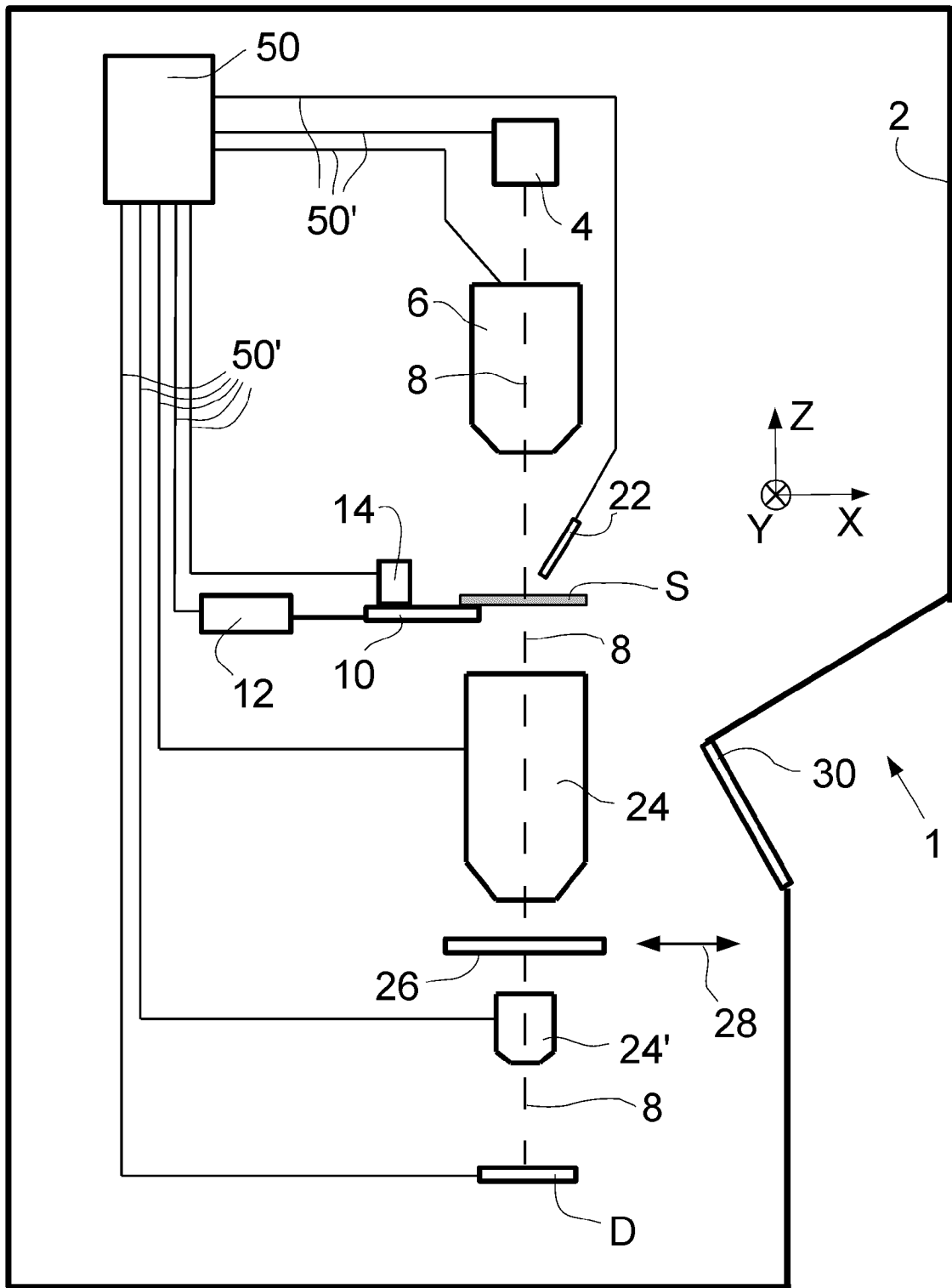


图 1

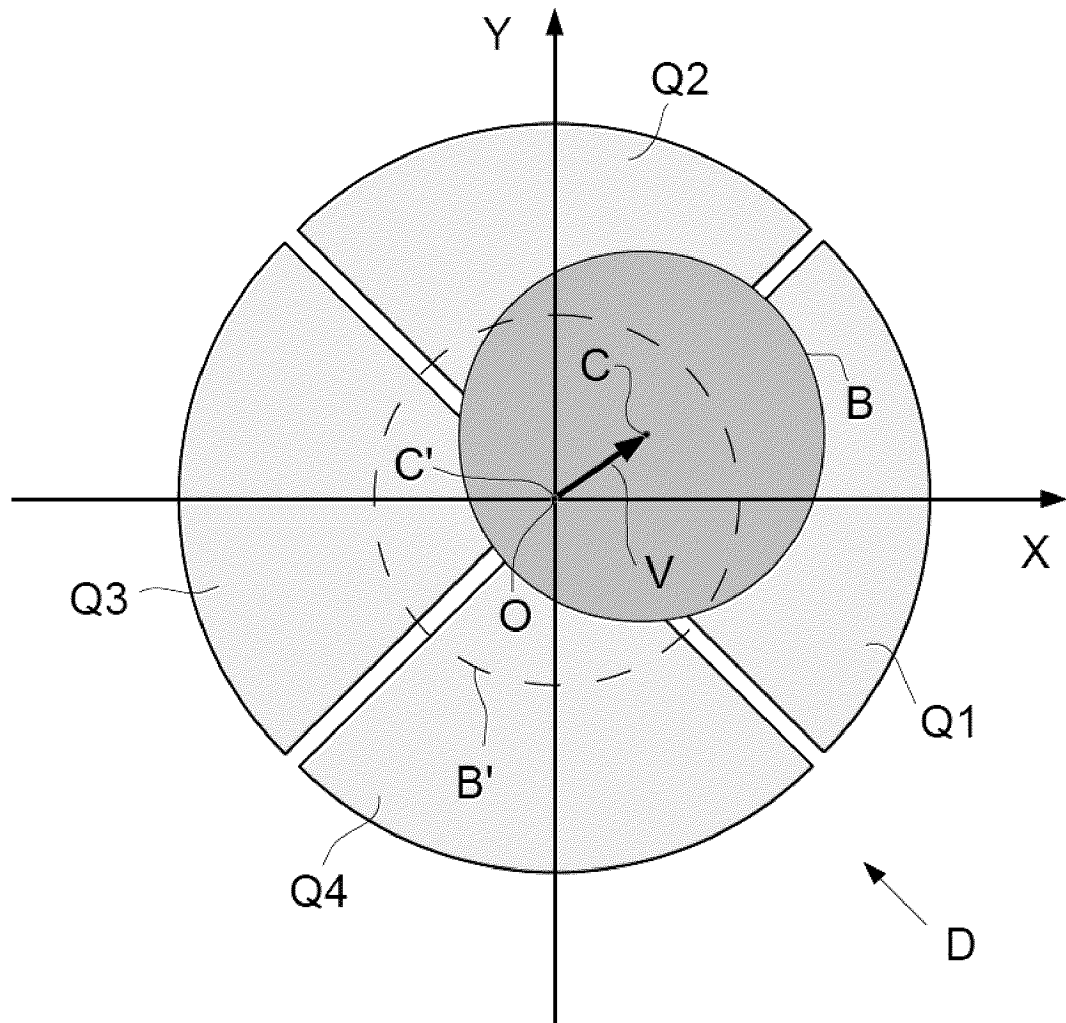


图 2

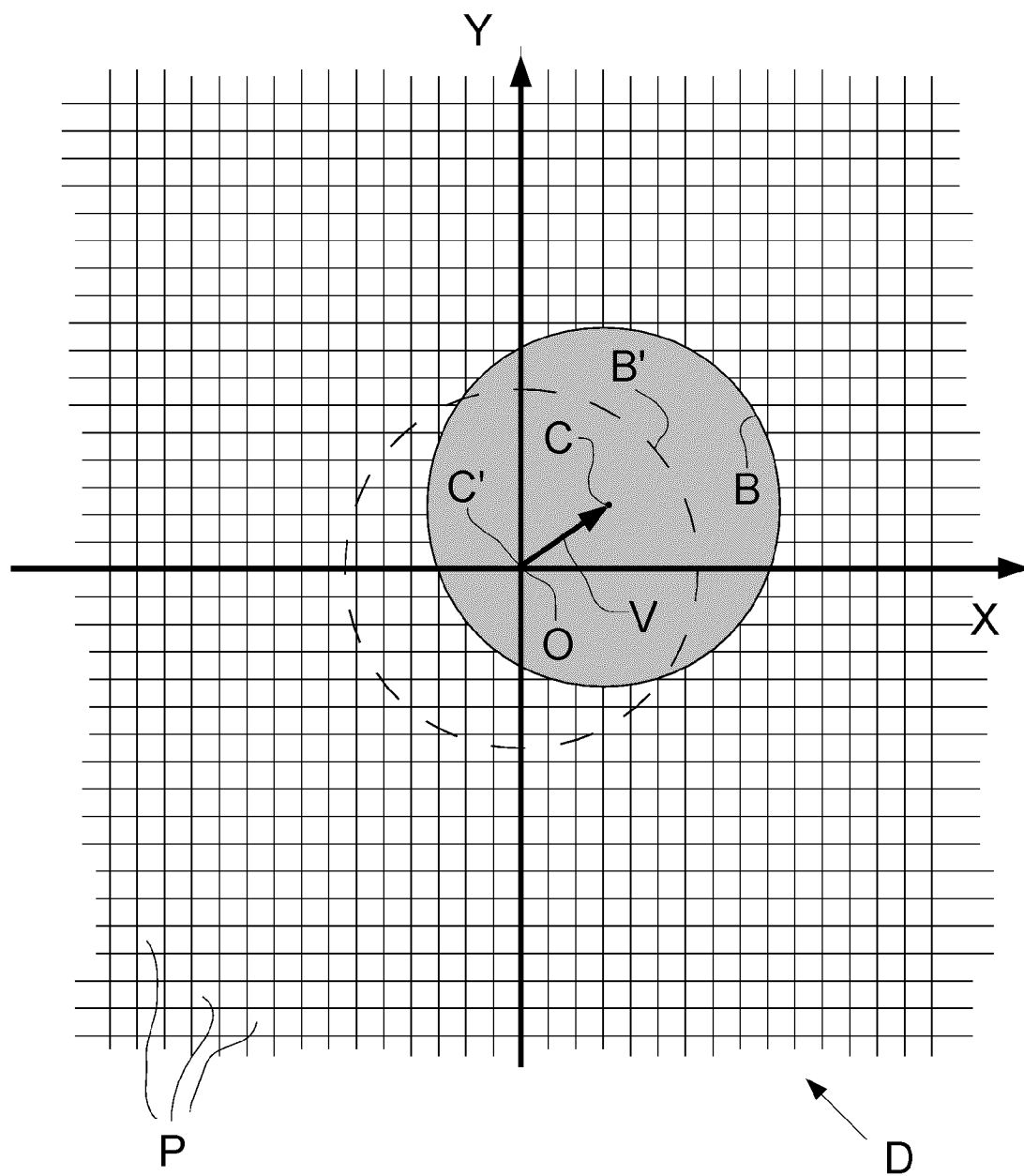


图 3

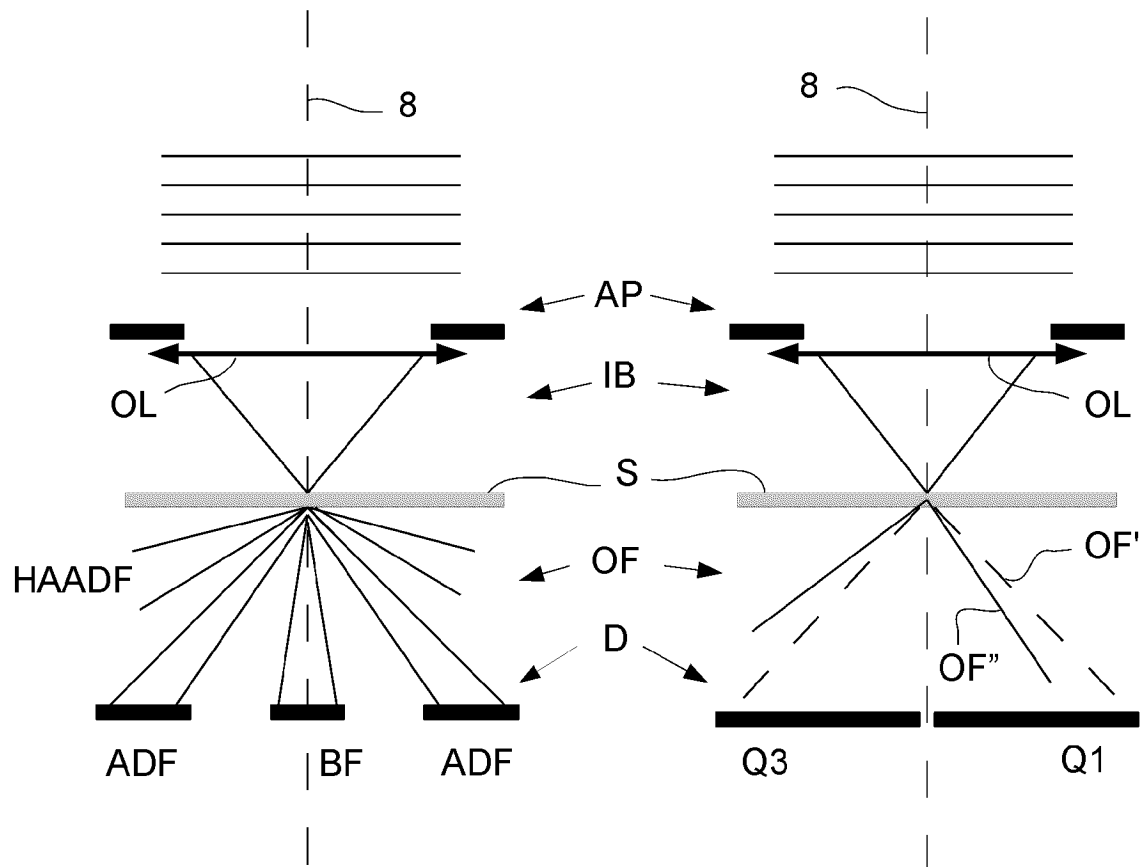


图 4

BF

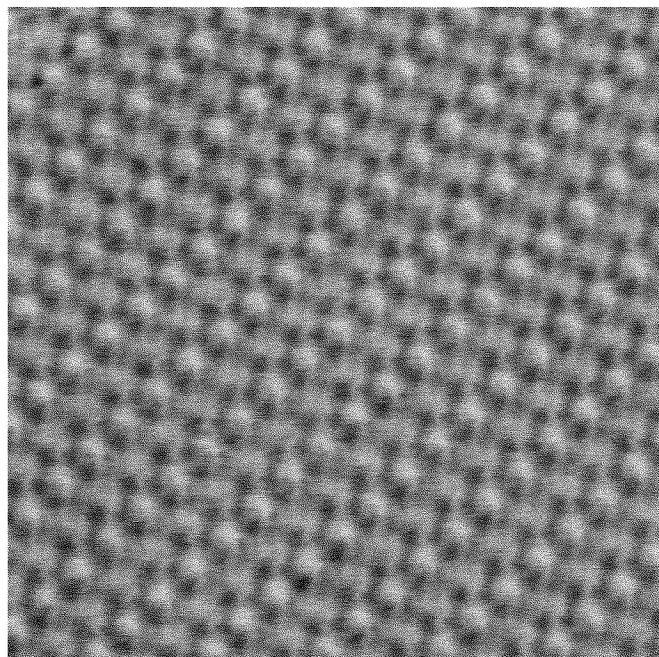


图 5A

HAADF

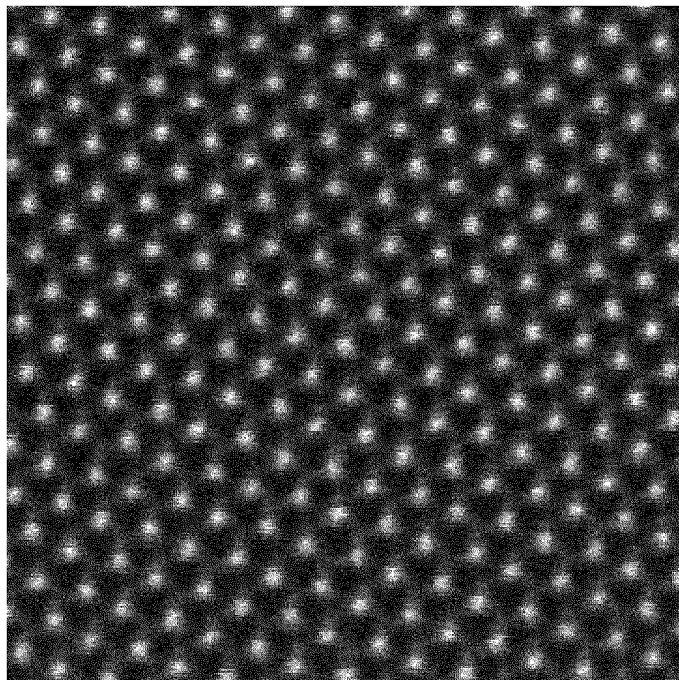


图 5B

S1-S3

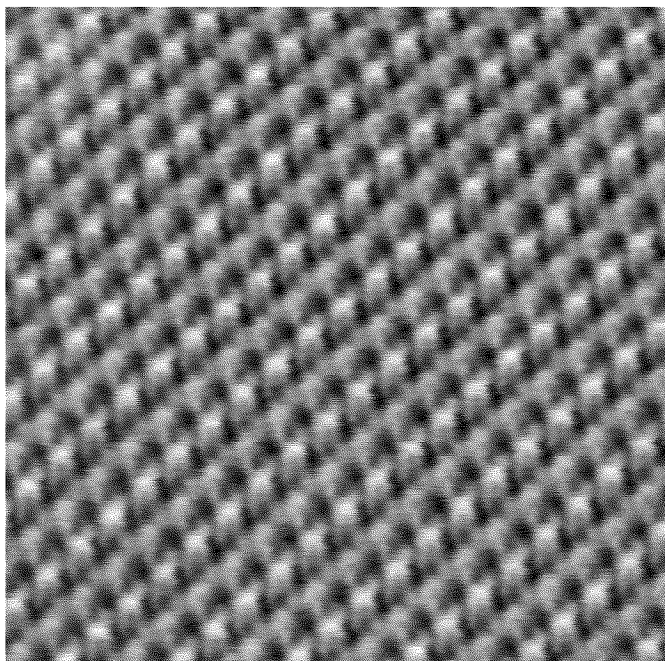


图 5C

S2-S4

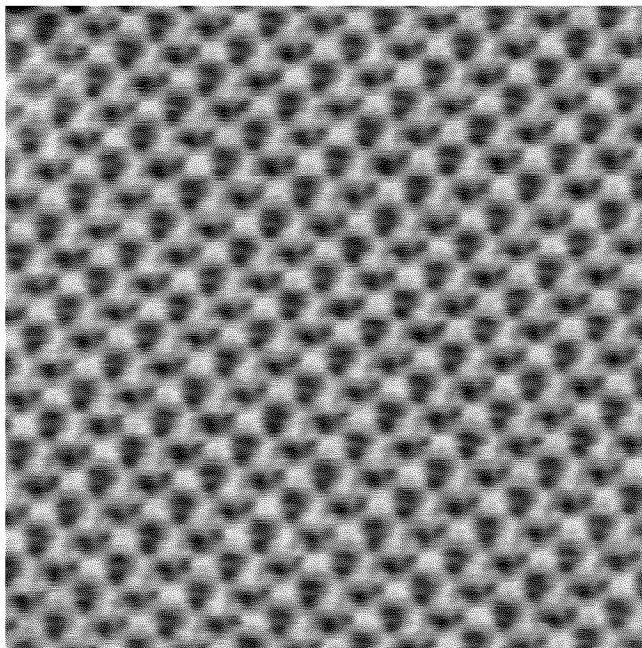


图 5D

iVF

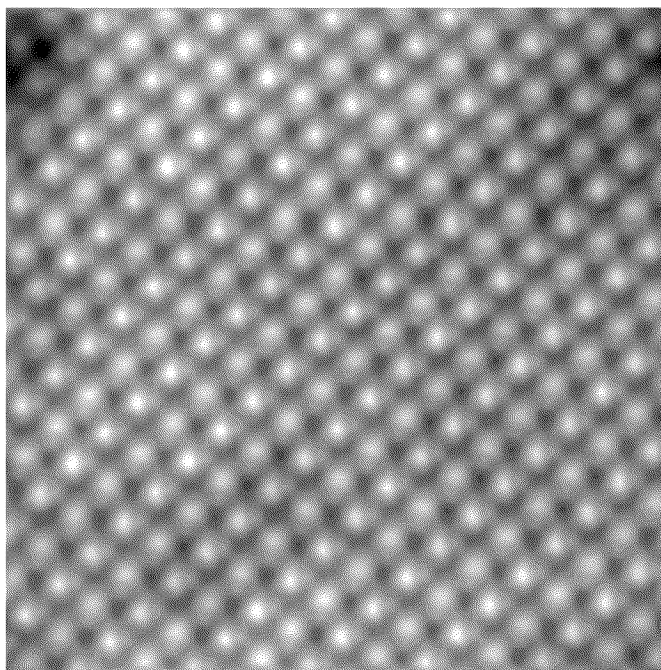


图 5E

PiVF

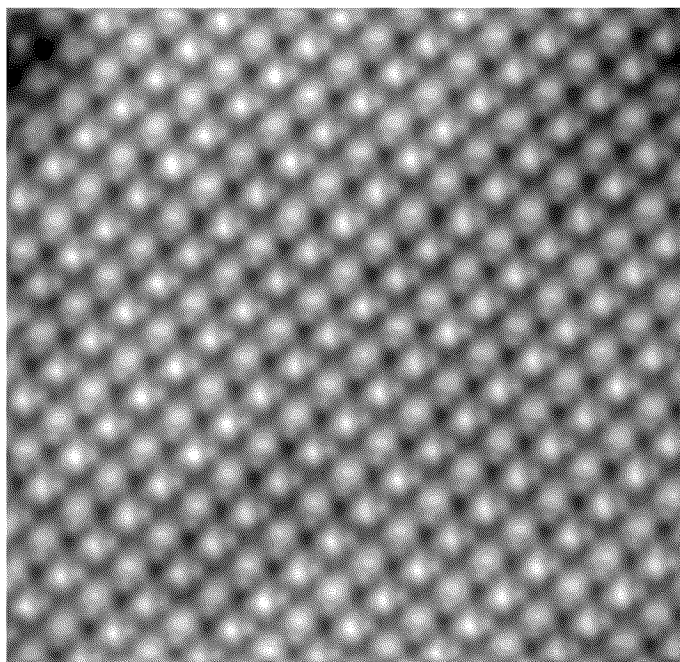


图 5F

LiVF

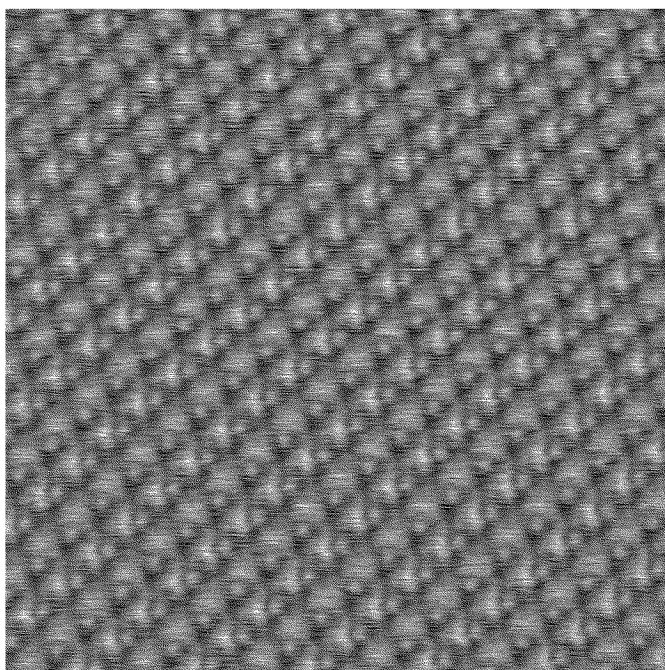


图 5G

LPIVF

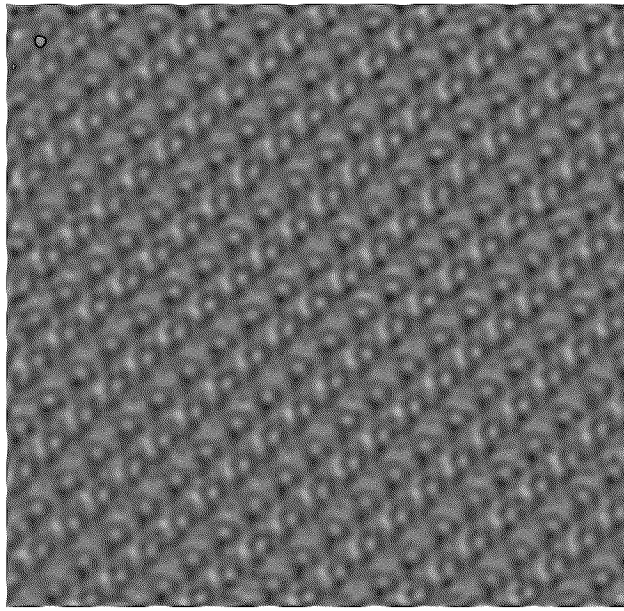


图 5H

BF

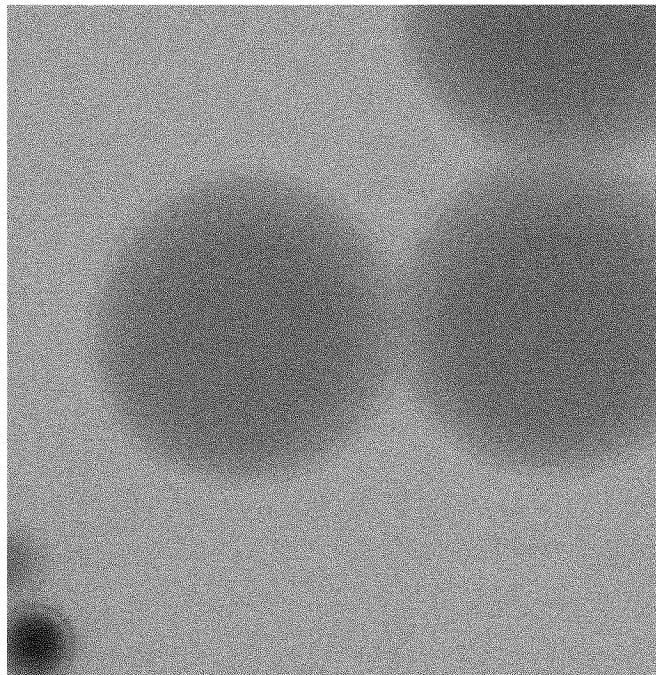


图 6A

iVF

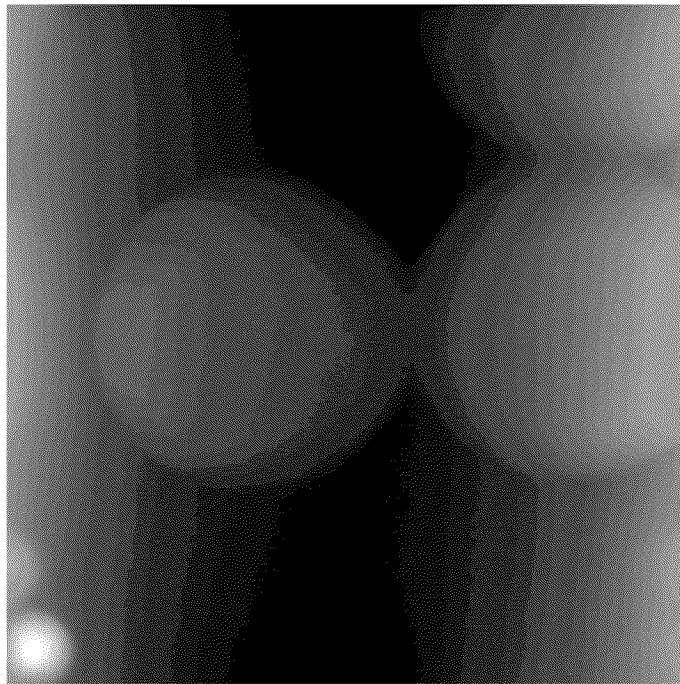


图 6B

PiVF

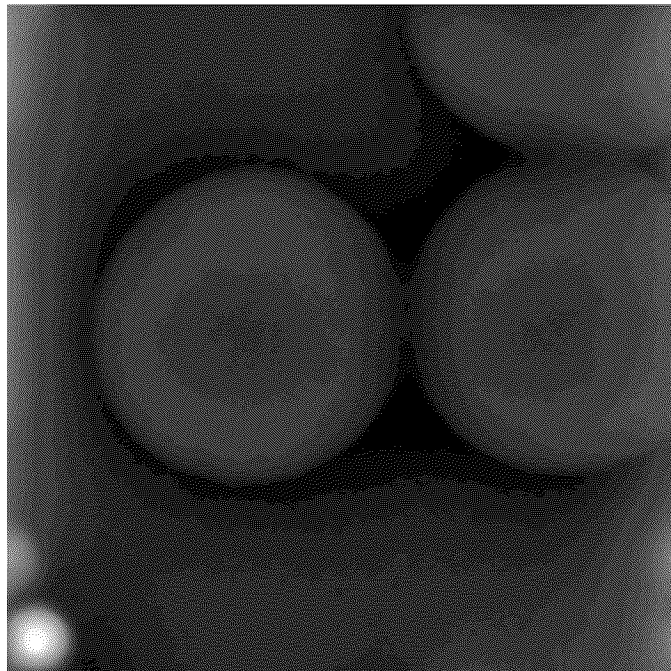


图 6C

LiVF

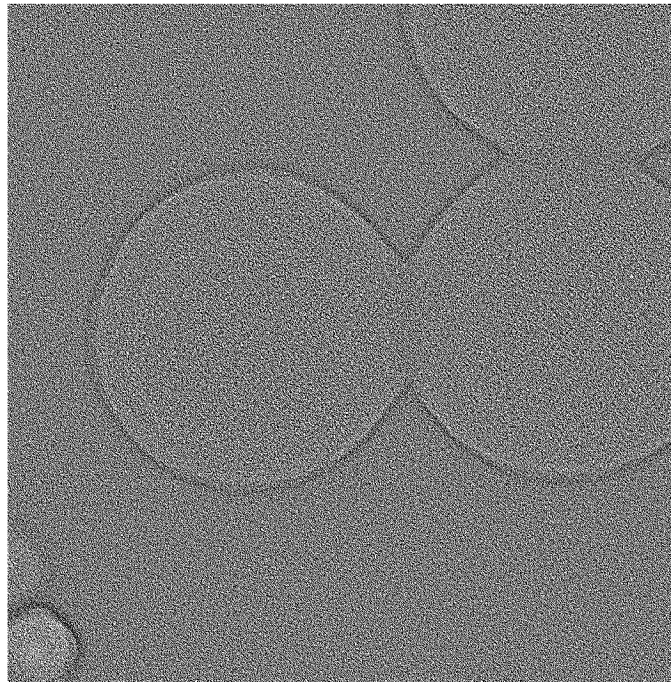


图 6D

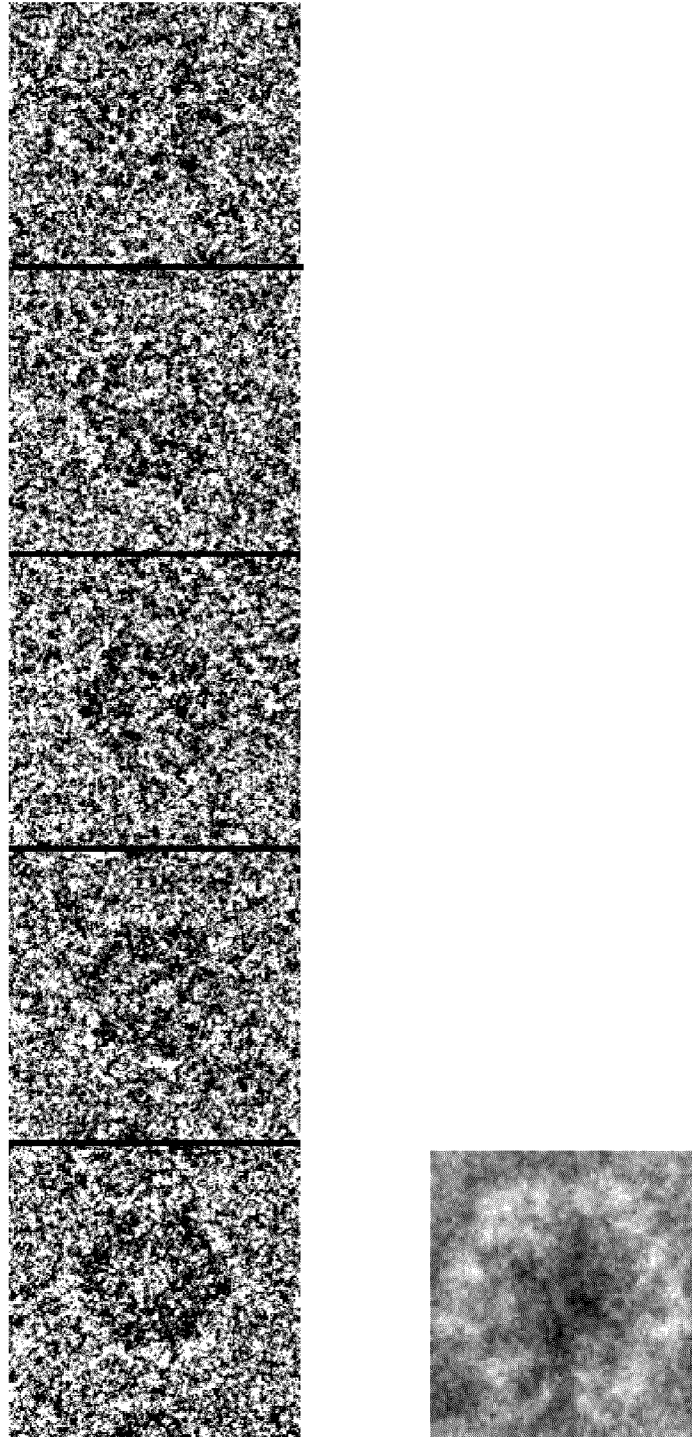


图 7

ABF

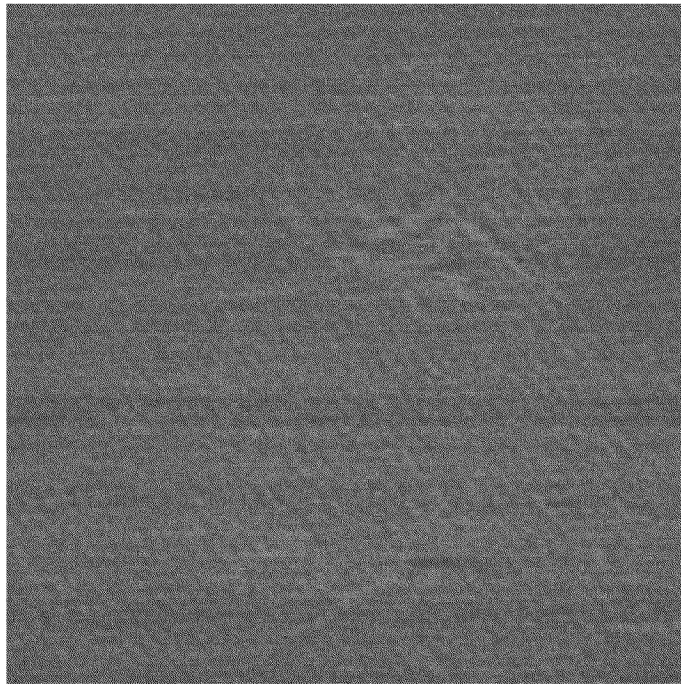


图 8A

S2-S4

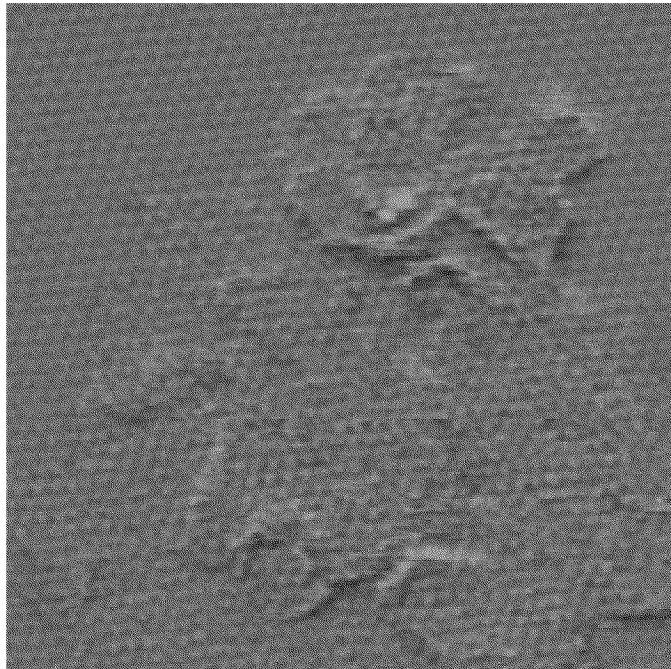


图 8B

iVF

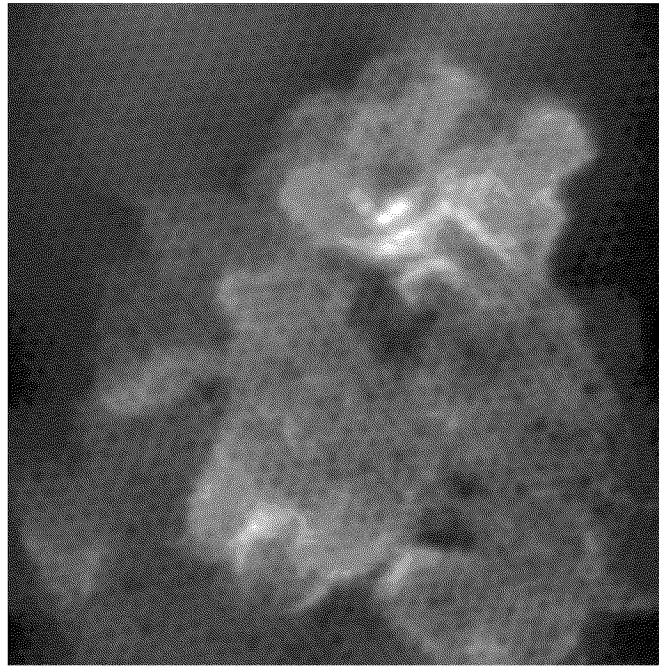


图 8C

diVF(Y)

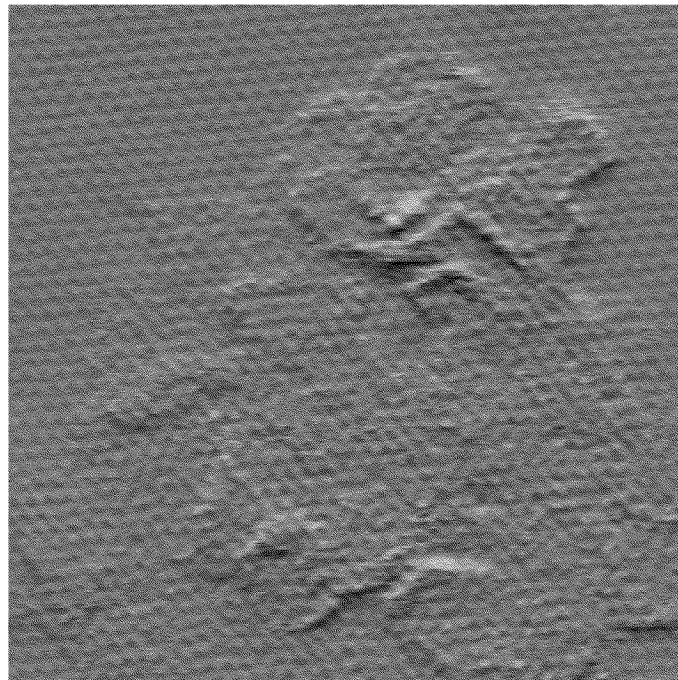


图 9