



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112712473 A

(43) 申请公布日 2021. 04. 27

(21) 申请号 202011071181.9

G01N 23/046 (2018.01)

(22) 申请日 2020.10.09

G01N 23/20 (2018.01)

(30) 优先权数据

H01J 37/28 (2006.01)

16/596538 2019.10.08 US

G06N 3/04 (2006.01)

G06N 3/08 (2006.01)

(71) 申请人 FEI 公司

G06N 20/00 (2019.01)

地址 美国俄勒冈州

(72) 发明人 R·J·P·郭伊尔茨 P·波托塞克

M·皮曼 O·马彻克

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 张凌苗 周学斌

(51) Int.Cl.

G06T 5/00 (2006.01)

G06T 7/00 (2017.01)

G06T 7/33 (2017.01)

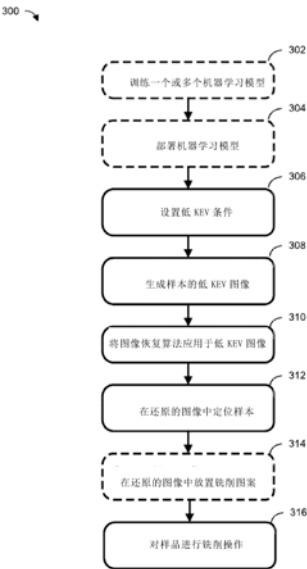
权利要求书2页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

通过机器学习对对象定位进行低KEV离子束
图像恢复

(57) 摘要

通过机器学习对对象定位进行低KEV离子束
图像恢复。公开了使用针对低keV FIB图像的图
像恢复算法来创建TEM薄片的方法和系统。示例
方法包括以低keV设置的离子束照射样品,基于
离子束照射产生的发射量生成样品的低keV离子
束图像,然后将图像恢复模型应用于样品的低
keV离子束图像生成还原的图像。然后将样品定
位在恢复的图像内,并且基于恢复的图像内的定
位的样品用离子束进行样品的低keV研磨。



1. 一种方法,其包括:
在低keV设置下用离子束照射样品;
基于离子束照射产生的发射,产生样品的低keV离子束图像;
将图像恢复模型应用于样品的低keV离子束图像以生成恢复图像;
在恢复的图像中定位样本;和
基于还原图像中的局部样本,用离子束对样本进行低keV研磨。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中,应用所述图像恢复模型包括:应用至少一种机器学习模型,所述至少一种机器学习模型包括一个或多个神经网络。
3. 根据权利要求2所述的方法,其中,所述机器学习模型被训练为识别所述恢复图像的特征,所述特征包括所述样本的特征和所述恢复图像的背景的特征。
4. 根据权利要求3所述的方法,其中,识别所述恢复图像的特征包括:基于所述恢复图像的特征来确定所述样品在所述恢复图像中的位置和取向。
5. 根据权利要求1-4中任一项所述的方法,还包括:
在一个或多个显微镜设置的基础上,确定一组算法中的最佳算法;和
其中应用图像恢复模型包括将最佳算法应用于样品的低keV离子束图像以生成恢复的图像。
6. 根据权利要求1-4中任一项所述的方法,还包括:
基于一个或多个显微镜设置,从一组算法中确定算法的组合;和
其中,应用图像恢复模型包括将算法的组合应用于样品的低keV离子束图像以生成恢复的图像。
7. 根据权利要求1-4中任一项所述的方法,还包括:用透射电子显微镜检查所述样品,并且其中,所述样品是TEM薄片。
8. 根据权利要求7所述的方法,其中,所述TEM薄片包括基准,并且其中,所述样本至少部分地基于所述基准而位于所述恢复的图像内。
9. 根据权利要求1所述的方法,还包括:使用离子束从样品材料产生样品,其中,产生样品包括:
在样品材料的区域上执行一个或多个研磨步骤,以利用离子束使样品成形;
将样品连接到样品操作探针上;和
用离子束将样品从样品材料中分离出来。
10. 根据权利要求9所述的方法,其中,所述一个或多个研磨步骤包括在高keV设置下用所述离子束照射所述样品材料的一部分,其中:
低keV设置包括将离子束设置为以200eV,500eV,1keV,2keV,5keV,8keV和/或16keV或以下的第一操作值进行操作;和
高keV设置包括离子束设置为以16keV,30keV和/或50keV或更高的第二工作值工作。
11. 根据权利要求9-10中任一项所述的方法,其中,当在低keV设置下用离子束研磨样品时,去除包括在样品产生期间由离子束引起的损坏的样品表面。
12. 根据权利要求1所述的方法,其中,将所述样本定位在所述恢复的图像内包括将所述恢复的图像的包括样本的至少一部分的区域与低能磨映射相关联。
13. 根据权利要求12所述的方法,其中,所述低能磨映射包括放置在所述恢复图像上的

图形,并且其中,执行所述样品的低keV研磨包括对所述样品的与所述恢复图像的一部分相对应的区域进行处理,图形覆盖了离子束的低keV铣削。

14.如权利要求13所述的方法,还包括在图形用户界面上呈现具有由系统自动放置的图形和批准请求的恢复图像,并且其中,至少部分基于以下步骤来执行样品的低keV研磨:接受批准。

15.带电粒子显微镜系统,包括:

被配置为保持样品的样品保持器;

离子源,被配置为用离子束照射样品;

成像系统,其被配置为响应于被离子束照射而基于样品所发射的带电粒子来捕获样品的图像;

一个或多个处理单元;和

一种存储器,其存储计算机可读指令,该计算机可读指令在由一个或多个处理单元执行时使带电粒子显微镜系统执行权利要求1的方法。

通过机器学习对对象定位进行低KEV离子束图像恢复

背景技术

[0001] 用透射电子显微镜 (TEM) 检查样品的准备工作是由较大的样品材料制成TEM薄片的过程。这涉及铣削样品材料的区域,以便创建具有允许入射电子束中的电子通过的厚度的TEM薄片,从而能够使用TEM系统进行评估和/或分析。但是,将样品材料的靠近TEM薄片的区域铣掉的过程会损坏TEM薄片的表面(例如,通过沉积和/或去除表面特征)。为了防止这种表面损伤对TEM薄片的评估和/或分析产生负面影响,当前TEM样品制备方案中的最后一步是应用带有聚焦离子束(FIB)的低keV抛光剂。

[0002] 为了均匀地施加低keV抛光,专家用户或计算机自动化软件都必须定位TEM薄片的边缘。不幸的是,在当前的TEM系统中,由于用低keV FIB捕获的低质量图像,很难定位TEM薄片的边缘。此外,在图像捕获过程中增加FIB的电压会进一步损坏TEM薄片。因此,当前FIB系统花费不成比例的开发成本来提高低keV能量下的光学性能。这不仅增加了生产成本,而且还限制了可用于系统其他光学功能的资源。

发明内容

[0003] 公开了使用针对低keV FIB图像的图像恢复算法来创建TEM薄片的方法和系统。示例方法包括以低keV设置的离子束照射样品,基于离子束照射产生的发射量生成样品的低keV离子束图像,然后将图像恢复模型应用于样品的低keV离子束图像生成还原的图像。然后将样品定位在恢复的图像内,并且基于恢复的图像内的定位的样品用离子束进行样品的低keV研磨。该方法可以进一步包括训练图像恢复模型,图像识别模块和/或其组件机器学习算法。可以基于一组相似和/或相同样本的一个或多个标记图像的训练集来进行这种训练。

[0004] 用于在显微镜系统中自动定向样品的系统,包括配置为保持样品的样品架,配置为用离子束照射样品的离子源以及配置为基于发射的带电粒子捕获样品的图像的成像系统由样品响应离子束的照射而产生。根据本公开的系统还包括一个或多个处理单元,以及存储计算机可读指令的存储器,该计算机可读指令在由一个或多个处理单元执行时使带电粒子显微镜系统执行用于根据本公开,使用用于低keV FIB图像的图像恢复算法来创建TEM薄片。

附图说明

[0005] 参考附图描述具体实施方式。在图中,参考标号最左边的一个或多个数字识别所述参考标号首次出现的图。不同图中的相同参考标号指示相似或相同的项目。

[0006] 图1说明了示例带电粒子环境对于使用图像恢复算法为低keV FIB图像制备TEM薄片根据本发明,在带电粒子系统中。

[0007] 图2描绘了说明用于带电粒子系统中低keV FIB图像的图像恢复算法的TEM薄片制备的示例计算架构的示意图。

[0008] 图3显示了一组图,这些图说明了使用带电粒子系统中低keV FIB图像的图像恢复

算法进行TEM薄片制备的过程。

[0009] 图4是一个示意图图1示出了本文公开的系统和方法在低keV图像内定位样品的应用。根据本发明在显微镜图像中对样品的图像。

[0010] 贯穿图式的若干视图,相同的参考标号指代对应的零件。大体来说,在各图中,可能包含在给定实例中的元件以实线示出,而对于给定实例为任选的元件以虚线示出。然而,以实线示出的元件并非对于本公开的所有实例都是必要的,且以实线展示的元件可从特定实例省略,而不脱离本公开的范围。

具体实施方式

[0011] 本文公开了使用用于低keV FIB图像的图像恢复算法来创建TEM薄片的方法和系统。更具体地,本公开包括利用机器学习算法来改善用低keV FIB照射捕获的图像的清晰度的改进的方法和系统。与先前的TEM薄片制备工艺相比,这使薄片定位更容易,并且低keV抛光更准确。通过克服现有的TEM薄片制备系统所面临的这些定位和精度挑战,根据本发明的方法和系统还允许可靠地自动化TEM薄片制备过程,这在以前是不可能的。然而,这仅是本文公开的本发明的特定应用的说明,并且该方法和系统可以用于改善低keV FIB图像的分辨率以用于其他应用。

[0012] 上述公开问题的一种解决方案包括在TEM薄片制备过程中使用低keV FIB在带电粒子显微镜系统内捕获TEM薄片的图像,然后应用神经网络图像处理以创建改进的低keV FIB图像。具有更高的分辨率。然后可以将TEM薄片定位在改进的低keV FIB图像内,这允许在带电粒子显微镜系统内应用低keV抛光步骤。在一些实施例中,改进的低keV FIB图像允许神经网络算法定位TEM薄片,然后自动放置和/或选择低keV抛光图案。

[0013] 图1是示例的图示带电粒子环境100使用图像恢复算法为低keV FIB图像制备TEM薄片根据本发明,在带电粒子系统102中的电子束在电子束中。具体地,1显示示例带电粒子环境100包括例带电粒子系统102,用于样品104的制备,评估和/或分析。样品104可以是天然存在的样品(例如,生物样品,材料样品等),或者是制备的样品(TEM薄片,集成电路等)。这个例子带电粒子系统102被示为是双束系统,其包括透射电子显微镜系统106和聚焦离子束系统108。但是,在其他实施例中,系统可以是或包括一种或多种不同类型的光学和/或带电粒子显微镜。

[0014] 的透射电子显微镜系统106包含电子资源110沿着发射轴114并朝着发射轴114发射电子束112。加速镜116。发射轴112是沿着轴的长度延伸的中心轴。透射电子显微镜系统106从电子资源110并通过样本104。的加速器镜头116加速/减速,聚焦和/或引导镜头电子束112朝向聚焦柱118。聚焦柱118聚焦电子束112使其入射到样品104的至少一部分上。在某些实施例中,聚焦柱118物镜可包括孔,扫描线圈和上物镜中的一个或多个。例如,聚焦柱118被配置为将来自电子源110的电子聚焦到样品104上的小点上。可以通过经由扫描线圈调整电子束方向来扫描样品104的不同位置。另外,聚焦柱118可以校正和/或调节像差的像差(例如,几何像差,色差)。电子束112。

[0015] 穿过样品104的电子120可以进入投影仪122。在一实施例中,投影仪122可以是与聚焦柱118分开的部分。在另一个实施例中,投影仪122可以是聚焦镜筒118中的透镜场的透镜场的延伸。可以调节投影仪122,使得穿过样品104的直接电子120撞击在显微镜检测器系

统122上。

[0016] 在图在图1中,显微镜检测器系统124被示为包括盘形明场检测器和暗场检测器。在一些实施例中,显微镜检测器系统124可以包括一个或多个其他检测器。替代地或另外,显微镜检测器系统124可以包括扫描电子显微镜检测器系统,聚焦离子束检测器系统,扫描电子显微镜二次电子检测器系统,聚焦离子束二次电子检测器系统和光学显微镜检测器系统。

[0017] 图.图1说明了聚焦离子束系统108,包括带电粒子源126,该带电粒子源126构造为沿着离子发射带电粒子束128发射轴130朝向离子聚焦柱130。离子发射轴130是沿着轴的长度延伸的中心轴。聚焦离子束系统108来自带电粒子源126并通过样本104。离子聚焦柱130被配置为聚焦带电粒子束128,使得其入射在样品104的区域上。在某些实施例中,离子聚焦柱130物镜可包括孔,扫描线圈和上物镜中的一个或多个。例如,离子聚焦柱130被配置为将来自带电粒子源126的离子聚焦到样品104上的一个小点上。聚焦离子束系统108配置为用带电粒子照射和/或研磨样品104。通过经由扫描线圈调整带电粒子束的方向,可以照射和/或研磨样品104的不同位置。另外,可以通过离子聚焦柱130来调节样品104上被照射和/或研磨的斑点的大小。的聚焦离子束系统108能够在包括低keV模式的多个电压设置下操作(例如,在聚焦离子束系统108处设置为在200eV,500eV,1keV,2keV,5keV,8keV和/或16keV或以下的工作值下工作)和高keV模式(例如,将聚焦离子束系统108设置为以16keV,30keV和/或50keV或更高的第二操作值进行操作)。

[0018] 图.图1进一步说明了示例带电粒子系统102,进一步包括样品架132,样品操纵探针134,化学物质输送单元136,计算设备138和一个或多个成像传感器140。样品保持器132被配置为保持样品104,并且能够相对于带电粒子系统102平移,旋转和/或倾斜样品104。类似地,样本操纵探针134被配置为保持,运输和/或以其他方式操纵样本104。成像传感器140被配置为基于由样品104被带电粒子束128照射而产生的发射来检测传感器数据。在一些实施例中,辐照样品包括扫描带电粒子束成像,使得其移动穿过样品。为了防止损坏样品104(例如,原子探针,TEM断层摄影术样品制备物,薄片,块,狗骨,电话簿,TEM薄片,具有一个或多个窗口的TEM薄片等),聚焦离子束系统108当照射样品104以进行成像时,其以低keV模式操作。计算设备138被配置为随后基于来自成像传感器140的传感器数据来生成样本104的图像。在一些实施例中,图像是灰度图像,其示出指示样品的形状和/或材料的对比度。不幸的是,由于聚焦离子束系统108在照射样品104以进行成像时以低keV模式运行,因此由计算设备138生成的图像具有较低的细节和/或分辨率。

[0019] 根据本发明,带电粒子系统102可以被配置为经由薄片制备过程来生成和分析TEM薄片。即,带电粒子系统102可以被配置为从较大的源材料产生TEM薄片。例如,聚焦离子束系统108可以研磨掉围绕TEM薄片的源材料的部分(即,去除源材料的部分,以便保留TEM薄片)。然后可以使用化学传递单元136将样品操纵探针134附接到TEM薄片,并且聚焦离子束系统108可以进一步研磨和/或切掉部分源材料,使得TEM薄片不再与之连接。原始资料。样本操纵探针134然后可以在带电粒子系统102内平移和/或重新定向TEM薄片。然后可以将TEM薄片附接到样品保持器132以进行抛光和分析。备选地,可以在附接至样品操纵探针134的同时抛光和/或分析TEM薄片。由于在研磨时聚焦离子束系统在高keV模式下运行,因此在部分源材料的研磨过程中,带较高能量的带电粒子束可能会损坏TEM薄片的表面。另外,研

磨可能由于源材料的一部分被研磨而导致在TEM薄片的表面上沉积。

[0020] 抛光TEM薄片包括聚焦离子束系统108,其在低keV模式下操作并且用低功率带电粒子束照射TEM薄片,该低功率带电粒子束仅从TEM薄片中去掉少量材料。以这种方式,去除了TEM薄片的生产(即,研磨)期间产生的表面上的受损部分和/或沉积物。抛光后,可以用透射电子显微镜系统106分析TEM薄片。

[0021] 抛光TEM薄片的过程包括定位TEM薄片,然后确定要经受低keV模式电荷粒子束的区域。在一些实施例中,这包括在基于来自成像传感器140的传感器数据来配置由计算设备138生成的一个或多个图像中识别TEM薄片的位置,然后选择图像的对应区域。到将要被辐照的区域聚焦离子束系统运行108在低keV模式下运行。

[0022] TEM薄片可以由用户手动定位在这种图像内,或者可以由计算设备128或其组合自动检测。例如,计算设备128可以估计图像中的TEM薄片的位置,然后向用户呈现图形用户界面,其识别所估计的位置并提示用户进行验证。确定图像中的TEM薄片的位置可以包括确定图像中的TEM薄片的位置和/或取向。

[0023] 然而,如上所述,由于聚焦离子束系统108在照射TEM薄片以进行成像时以低keV模式操作,因此由计算设备138生成的图像具有较低的细节和/或分辨率。这意味着很难确定所生成图像中TEM薄片的精确位置。本文提出的系统和方法通过将是一个或多个图像恢复模型应用于图像以生成图像的恢复版本来克服该困难。图像恢复模型对应于机器学习模型(例如,人工神经网络,卷积神经网络,递归神经网络,监督模型,非监督模型等),已经被训练以恢复使用聚焦离子束系统108操作生成的图像。在低keV模式下,恢复的图像具有提高的细节和/或分辨率。在一些实施例中,计算设备138被配置为基于图像的特征,显微镜系统102的设置或两者来确定最佳算法和/或算法集合以应用于特定图像。一旦图像恢复模型生成了这样的恢复图像,计算设备138就能够识别图像中的特征(例如,阴影,边缘,基准,边界,结构,背景特征,样本104特征等),图像的位置。还原图像中的TEM薄片,或两者兼有。例如,计算设备138可以首先识别恢复的图像内的特征,然后基于所识别的特征来确定TEM薄片在恢复的图像中的位置。

[0024] 一旦确定了TEM薄片的位置,就确定了恢复图像的区域,该区域描绘了将要通过聚焦离子束系统操作108进行抛光的区域。这可以包括将恢复的图像的这种区域与低能量磨坊映射相关联。低能磨坊映射描述了将由聚焦离子束系统108进行抛光的图像区域。在一些实施例中,低能量映射对应于标识包括在区域内,区域的边界等中的图像的像素的坐标。可替代地,或此外,低能量映射可以是覆盖的图形。由用户,计算机算法或它们的组合粘贴到恢复的图像上。例如,机器学习算法可以基于图像中标识的更多特征,将低能量映射图形覆盖在恢复的图像上。替代地,计算系统138可以呈现图形用户界面,该图形用户界面允许用户将低能量映射图形放置在恢复的图像上,或者批准低能量映射图形的定位,该低能量映射图形被机器学习算法自动覆盖。

[0025] 本领域技术人员将认识到,图1中描绘的计算设备138可以被配置为包括:图1仅是说明性的,并且不意图限制本公开的范围。计算系统和装置可包含可执行所指示功能的硬件或软件的任何组合,包含计算机、网络装置、网络家电、PDA、无线电话、控制器、示波器、放大器等。计算装置128还可连接到未示出的其它装置,或实际上可作为独立的系统操作。另外,在一些实施方案中,由所示出的组件提供的功能性可组合在更少的组件中或分布在额

外组件中。类似地,在一些实施方案中,可不提供所示出的组件中的一些的功能性和/或可使用其它额外功能性。

[0026] 还应注意,计算设备138可以是示例的组件。带电粒子系统102,可能是与示例不同的设备带电粒子系统102与示例通信带电粒子系统102通过网络通信接口或其组合。例如一个例子带电粒子系统102可以包括作为示例的组成部分的第一计算设备138带电粒子系统102,并充当驱动示例操作的控制器带电粒子系统102(例如,通过操作扫描线圈等来调整样品104上的扫描位置)。在这样的实施例中,示例带电粒子系统102还可以包括第二计算设备138,其是与示例分离的台式计算机带电粒子系统102并可执行以处理从一个或多个成像传感器140和显微镜检测系统124中的一个或两个接收的数据以生成样品104的图像和/或执行其他类型的分析。计算设备138可以进一步被配置为经由键盘,鼠标,触摸板,触摸屏等接收用户选择。

[0027] 图。图2描绘了示出用于在带电粒子系统中使用用于低keV FIB图像的图像恢复算法的TEM薄片制备的示例计算架构200的示意图。示例计算体系结构200示出了可用于实现本公开中描述的技术的硬件和软件组件的附加细节。本领域技术人员将理解,计算体系结构200可以在单个计算设备中实现,或者可以在多个计算设备之间实现。例如,计算架构200中描绘的各个模块和/或数据构造可以由不同的计算设备执行和/或存储在不同的计算设备上。以这种方式,根据本发明的发明方法的不同处理步骤可以由单独的计算设备执行和/或执行。

[0028] 在示例计算架构200中,计算设备包括一个或多个处理器202和通信地耦合到一个或多个处理器202的存储器204。示例计算体系结构200可以包括存储在存储器204中的成像模块206,图像恢复模块208,图像识别模块210,控制模块212和可选的训练模块214。示例计算体系结构200进一步被示为可选地包括存储在存储器204上的训练集216。训练集216是数据结构(例如,图像,文件,表格等)或数据结构的集合,其用于训练图像恢复模块208和/或其组件机器学习算法以恢复通过辐照产生的图像。在低keV模式下运行的离子束源。

[0029] 例如,训练集216可以包括已经通过以低keV模式操作的离子束源的照射而产生的样本(例如,TEM薄片)的图像,并且图像的特征(例如,阴影,边缘,基准),边界,结构,背景特征,样本特征等)都已标记。此外,或在替代示例中,训练集216可以包括通过以低keV模式运行的离子束源辐照生成的样本图像,以及通过离子辐照生成的相同样本的图像。光束源以高keV模式工作。

[0030] 如本文所用,术语“模块”旨在表示出于论述目的的可执行指令的实例划分,而不希望表示任何类型的要求或所要求的方法、方式或组织。因此,尽管描述了各种“模块”,但它们的功能性和/或类似的功能性可以不同方式布置(例如,组合成较少数目的模块,分解成大量模块等)。

[0031] 此外,虽然本文中将特定功能和模块描述为由处理器上可执行的软件和/或固件实施,但在其它例子中,模块中的任一个或所有模块可全部或部分由硬件(例如,专门化处理单元等)实施以执行所描述的功能。如以上在各种实施方式中所讨论的,本文中示例计算架构200相关联地描述的模块可以跨多个计算设备执行。

[0032] 成像模块206可以由处理器202执行以从带电粒子显微镜系统(例如,带电粒子系统102)的成像传感器接收传感器数据,并在带电粒子显微镜系统内生成样品的图像。在一

些实施例中,图像是灰度图像,其示出了指示样品(例如,TEM薄片)的形状和/或材料的对比度。传感器数据由成像传感器根据由带电粒子束辐照样品产生的检测事件生成。例如,传感器数据可以基于对来自被带电粒子柱(例如,聚焦离子束系统108)的离子束照射的样品的发射的检测生成。为了防止在照射过程中损坏样品,将带电粒子柱设置为在照射样品时以低keV模式运行,这会降低入射到样品上的带电粒子束的强度。虽然光束强度的这种减小减少了对样品的损害,但是这也导致检测事件的数量减少和/或由成像传感器生成的传感器数据的质量降低。这意味着由成像模块生成的图像通常是低质量的图像(例如,低细节,模糊,低分辨率等)。这意味着很难确定样本在生成的图像中的精确位置。

[0033] 图像恢复模块208可以由处理器202执行以生成由成像模块206生成的图像的恢复版本。恢复的图像是由成像模块206生成的图像的版本,其具有改进的细节和/或分辨率,使得样本,背景和/或其特征能够由人或自动系统识别/定位。图像恢复模块208包括一个或多个图像恢复模型,其被配置为生成图像的恢复版本。单独的此类图像恢复模型对应于已训练以恢复样本(例如TEM薄片)图像的机器学习模型(例如,人工神经网络,卷积神经网络,递归神经网络,监督模型,无监督模型等)。通过带电粒子柱的照射而产生的 α 被设定为以低keV模式工作。在一些实施例中,图像恢复模块208可执行以基于图像的特征,关联的带电粒子显微镜系统的设置/特征,确定最佳图像恢复模型和/或图像恢复模型的集合以应用于特定图像。或两者。

[0034] 一旦图像恢复模型208生成了这样的恢复图像,图像识别模块210就可以由处理器202执行以识别图像中的特征(例如,阴影,边缘,基准,边界,结构,背景特征,样本特征等)。样本在还原后的图像中的位置和/或方向,或两者兼而有之。例如,图像恢复模型208可以首先识别恢复的图像内的特征,然后基于所识别的特征来确定样本在恢复的图像中的位置。

[0035] 一旦在恢复的图像中确定了样品的位置和/或取向,图像识别模块210就可以进一步执行以识别恢复的图像的区域,该区域描绘了将使用带电粒子列进行抛光的区域。在低keV模式下工作。这可以包括将恢复的图像的这种区域与低能磨映射相关联,该映射描述了要通过带电粒子柱进行抛光的图像区域。低能量映射可以对应于标识包括在区域内,区域的边界等中的图像的像素的坐标。可替代地,或者此外,低能量映射可以是覆盖在恢复的图像上的图形。用户的图像,计算机算法或其组合。例如,机器学习算法或其他类型的算法可以基于图像中识别出的更多特征,将低能量映射图形覆盖在恢复的图像上。替代地,图像识别模块210可以呈现图形用户界面,该图形用户界面允许用户将低能量映射图形放置在恢复的图像上,或者批准低能量映射图形的定位,该低能量映射图形被机器学习算法自动覆盖。在允许用户将低能量映射图形放置在恢复的图像上的实施例中,图形用户界面可以呈现一个或多个叠加图形以帮助用户正确地放置低能量映射图形。例如,覆盖图形可以包括恢复的图像中的样本的轴,样本的边缘,样本的边界,样本的特征等。图像识别模块210可以执行为基于图像自动放置覆盖图形。还原图像的确定特征。

[0036] 控制模块212可以由处理器202执行,以使计算设备和/或相关的带电粒子显微镜系统(例如,带电粒子系统102)采取一个或多个动作。例如,控制模块212可以使相关的带电粒子显微镜系统重新定位/定向样品,用电子显微镜柱扫描样品,用聚焦离子束柱照射样品,调整聚焦离子束柱的设置。或电子显微镜柱(例如,调整相应束的电压),调整聚焦离子束柱或电子显微镜柱的光学设置等。

[0037] 控制模块212可进一步执行以基于恢复的图像,低能图谱或其组合,使用以低keV模式操作的带电粒子柱来使样品(例如,TEM薄片)抛光。例如,控制模块212可以使带电粒子柱以低keV模式操作,以照射与低能量映射图形覆盖的恢复图像的部分相对应的样品区域。

[0038] 计算架构200可以可选地包括训练模块214,其可以执行以训练图像恢复模型208,图像识别模块210和/或其组件机器学习算法。训练模块214基于对相似和/或相同样本的一个或多个标记图像的训练集合,促进图像恢复模型208,图像识别模块210和/或其组件机器学习算法的训练。标记图像的标签可以包括与样品的特定关键点相对应的图像的区域和/或点,与特定类别的像素的分组相对应的图像的部分(即,分割信息)。图像的训练集可由专业的人类操作者、由计算算法或其组合来标记。

[0039] 在一些实施例中,训练模块214可以被配置为从样品的单个标记图像,模型和/或CAD图等生成一个或多个标记图像的训练集。例如,训练模块214可以执行标记的图像,模型和/或CAD图的一个或多个变形操作以形成多个标记的变形图像。训练模块214可以被配置为利用新的训练数据执行附加训练,然后发送更新以提高图像恢复模型208,图像识别模块210和/或其组件机器学习算法的性能。

[0040] 如上所述,计算架构200包括一个或多个处理器202,其被配置为执行存储在一个或多个处理器可访问的存储器204中的指令,应用或程序。在一些示例中,一个或多个处理器202可以包括硬件处理器,该硬件处理器包括但不限于硬件中央处理单元(CPU),图形处理单元(GPU)等。尽管在许多情况下,该技术在本文中被描述为由一个或多个处理器202执行,但是在一些情况下,该技术可以由一个或多个硬件逻辑组件(例如现场可编程门阵列(FPGA),复杂的可编程门阵列(CPLD),专用集成电路(ASIC),片上系统(SoC)或其组合。

[0041] 一个或多个处理器202可访问的存储器204是计算机可读介质的示例。计算机可读介质可包含两种类型的计算机可读介质,即计算机存储介质和通信介质。计算机存储介质可包含在任何方法或技术中实施用于存储例如计算机可读指令、数据结构、程序模块或其它数据等信息的易失性和非易失性的以及可移除和不可移除的介质。计算机存储介质包含(但不限于)随机存取存储器(RAM)、只读存储器(ROM)、可擦除可编程只读存储器(EEPROM)、快闪存储器或其它存储器技术、压缩光盘只读存储器(CD-ROM)、数字通用光盘(DVD),或其它光学存储装置、磁带盒、磁带、磁盘存储装置或其它磁性存储装置,或可用于存储所要信息且可由计算装置访问的任何其它非传输介质。大体来说,计算机存储介质可包含计算机可执行指令,其当由一个或多个处理单元执行时使执行本文中所描述的各种功能和/或操作。相比而言,通信介质体现计算机可读指令、数据结构、程序模块,或例如载波等经调制数据信号中的其它数据,或其它传输机制。如本文所定义,计算机存储介质不包含通信介质。

[0042] 本领域技术人员还将认识到,出于存储器管理和数据完整性的目的,可以在存储器204和其他存储设备之间传送其项或部分。备选地,在其他实施方式中,一些或全部软件组件可以在另一设备上的存储器中执行并与计算设备通信。系统组件或数据结构中的一些或全部还可存储(例如,作为指令或结构化数据)在非暂时性计算机可访问介质或便携式制品上以由适当的驱动器读取,所述适当的驱动器的各种实例在上文描述。在一些实施方式中,可以将存储在与计算设备分离的计算机可访问介质上的指令经由传输介质或经由诸如无线链路之类的通信介质传送的诸如电,电磁或数字信号之类的信号传输至计算设备。各

种实施方案可进一步包含接收、发送或存储根据以上描述在计算机可访问介质上实施的指令和/或数据。

[0043] 图.图3是示出为逻辑流程图中的块的集合的说明性过程的流程图,其表示可以以硬件,软件或其组合来实现的一系列操作。在软件的上下文中,块表示存储在一个或多个计算机可读存储介质上的计算机可执行指令,其在由一个或多个处理器执行时执行所叙述的操作。一般来说,计算机可执行指令包含执行特定功能或实施特定抽象数据类型的例程、程序、对象、组件、数据结构等。描述操作的次序并不意图解释为限制,且任何数目的所描述块可以任何次序和/或并行组合以实施所述过程。

[0044] 具体地,图3是用于带电粒子系统中的用于低keV FIB图像的图像恢复算法的TEM薄片制备的说明性过程300的流程图。。可以在环境100中和/或通过一个或多个计算设备138,和/或通过计算架构200和/或在其他环境和计算设备中实现过程300。

[0045] 在302,训练一个或多个机器学习模型以恢复样本的低keV图像和/或在恢复的图像内定位样本。具体地,使用相似和/或相同样本的一个或多个标记图像的训练集来训练机器学习模型(例如,CNN,GAN,神经网络等)。标记图像的标签可包含(但不限于)对应于样本的特定关键点的图像的区和/或点、对应于特定种类(即,分段信息)的像素的分组的图像的区段。图像的训练集可由专业的人类操作者、由计算算法或其组合来标记。例如,训练集可以自动地从单个标记的图像,模型和/或计算机辅助设计图生成。样品通过使变形和/或以其他方式使源标记图像/模型/ CAD图变形以形成多个标记图像的计算算法来实现。在一些实施例中,机器学习模型可以被周期性地重新训练以提高性能。

[0046] 在304,可选地部署训练有素的机器学习模型。例如,可以由中央计算设备训练并分配给与相应的带电粒子显微镜系统分别关联并执行本文公开的系统和方法。此外,定期对一个或多个机器学习模型进行重新训练可以将更新发送到执行本文公开的系统和方法的消费者计算设备,以改善其性能。先前已部署的机器学习模型。

[0047] 在306,将带电粒子显微镜系统的聚焦离子束柱设置为低keV条件(例如, $HV = 2\text{keV}$, $I = 100\text{pA}$)。当带电粒子显微镜系统设置为低keV条件时,将设置带电粒子显微镜系统内的离子束系统以200eV,500eV,1keV,2keV,5keV,8keV和/或16keV或以下的工作值工作。如上所述,将带电粒子柱设置为在低keV条件下运行,以防止在照射期间对样品的损坏。即,通过减少带电粒子束的着陆能量,当照射用于使带电粒子束成像的样本时,使得样本发射可以被图像传感器检测到的发射,而不会引起样本的结构损坏。但是,由于带电粒子束的能量较低,因此与使用较高能量的带电粒子束的辐射相比,由辐射引起的发射事件更少。

[0048] 在308,由带电粒子显微镜系统产生样品的低keV图像。带电粒子显微镜系统。具体地,带电粒子显微镜系统的成像系统在带电粒子显微镜系统内生成样品的图像。在各种实施例中,样品可以对应于但不限于是TEM薄片。应当指出,由于低keV图像是由检测到的发射事件产生的,该发射事件是由以低keV条件运行的聚焦离子束柱辐照样品引起的,因此成像传感器产生的传感器数据的数量和/或质量。这导致样品的低keV图像通常是低质量图像(例如,低细节,模糊,低分辨率等)。例如,在低keV下,图像的分辨率可能使得很难确定样品在其中的精确位置。

[0049] 在310处,图像恢复算法通过以下方式被应用于样本的低keV图像:带电粒子显微镜系统。具体来说,带电粒子显微镜系统适用于图像还原算法,可生成具有以下特征的低

keV图像的还原版本:改进的细节和/或分辨率,使得样本,背景和/或其特征能够被人为或自动化系统识别/定位。图像恢复算法可包括已被训练以恢复样本的低keV图像的一个或多个机器学习模型,例如在步骤302中训练的图像。

[0050] 在312,将样本定位在恢复的图像中。在一些实施例中,带电粒子显微镜系统的使用者可以对样品进行定位。替代地,图像恢复算法可以基于恢复的图像的特征自动地定位样本和/或帮助用户定位样本。例如,图像恢复算法可以进一步执行为识别还原图像中的特征(例如阴影,边缘,基准,边界,结构,背景特征,样本特征等),然后确定样本在还原图像中的位置和/或方向。尽管在方法300中将步骤312示为与310分开,但在某些实施例中,可以与在步骤310中应用的图像恢复算法并行和/或通过图像恢复算法对样本进行定位。

[0051] 在314,将铣削图案可选地放置在恢复的图像内。例如,铣削图案可以对应于由用户,计算机算法或其组合覆盖在恢复的图像上的图形,其中铣削图形覆盖的图像部分对应于图像中要通过带电进行抛光的区域粒子列。在一些实施例中,可以由带电粒子显微镜系统或其用户自动放置铣削图案。例如,带电粒子显微镜系统可以基于恢复图像的一个或多个特征来自动放置铣削图案。在替代实施例中,带电粒子显微镜系统可以呈现图形用户界面,该图形用户界面允许用户将铣削图案图形放置在恢复的图像上,或批准由机器学习算法自动覆盖的低能量映射图形的定位。另外,在允许用户将低能量映射图形放置在恢复的图像上的情况下,图形用户界面可以呈现一个或多个叠加图形以帮助用户正确地放置低能量映射图形。

[0052] 在316处,由样品对样品执行研磨操作。带电粒子显微镜系统。这可以包括但不限于抛光样品。例如,p去除样品的步骤可以包括:带电粒子显微镜系统用在低keV模式下运行的聚焦离子束系统照射样品,使得带电粒子束仅从样品中去除少量物质。以这种方式,可以去除在样品的生产(即,研磨)期间在样品的表面上产生的受损部分和/或沉积物。抛光后,可通过带电粒子显微镜系统分析样品。

[0053] 图。图4示出了应用400,本文公开的系统和方法以在低keV图像内定位样本。根据本发明的显微镜图像中的样品图像。图。图4包括在带电粒子显微镜系统内的样品102的低keV图像402,其是通过以在低keV模式(例如, $HV = 2\text{keV}$, $I = 100\text{pA}$)下操作的聚焦离子束照射样品而产生的。从图2中可以看出,如图4所示,低keV图像402具有非常低的质量,因此难以确定样品102的精确边界,或者样品102在何处结束并且样品架132开始。

[0054] 图。图4还示出了由根据本发明的带电粒子显微镜系统生成的低keV图像404的恢复版本。可以看出,一种或多种图像恢复算法(例如,CNN,GAN,神经网络等)的应用已放大了图像的分辨率,从而使样品102和样品支架132的边界清晰可见。此外,在低keV图像404的还原版本中,可以看到基准406,它在低keV图像402中是完全无法检测到的。图。图4还包括低能量映射图形408,其已经覆盖在低keV图像404的恢复版本上。

[0055] 在以下枚举的段落中描述根据本公开的发明主题的实例。

[0056] A1.一种方法,其包括:

在低keV设置下用离子束照射样品;

基于离子束照射产生的发射,产生样品的低keV离子束图像;

将图像恢复模型应用于样品的低keV离子束图像以生成恢复图像;

在还原的图像中定位样本;和

基于还原图像中的局部样本,用离子束对样本进行低keV研磨。

[0057] A1.1.段落A1的方法,其中应用图像恢复模型包括应用卷积神经网络(CNN)。

[0058] A1.1.1.段落A1.1的方法,其中机器学习模型是卷积神经网络(CNN),生成对手网络(GAN)和/或神经网络之一。

[0059] A1.1.2.A1.1-1-A1.1.1中任一段的方法,其中训练机器学习模型以识别样本的特征和恢复的图像的背景的特征,并且其中根据样本的特征对样本进行定位还原图像的背景样本和特征。

[0060] A1.2.段落A1-A1.1.2中的任何一个的方法,进一步包括基于一个或多个显微镜设置确定一组算法中的最佳算法,并且其中应用图像恢复模型包括将最佳算法应用于低keV离子束图像。样本以生成还原的图像。

[0061] A1.2.1.段落A1.2的方法,其中最佳算法是机器学习模型。

[0062] A1.2.2.A1.2-A1.2.1段中任何一个的方法,其中算法集中的每个算法是机器学习模型。

[0063] A1.3.段落A1-A1.2.2中的任何一个的方法,还包括基于一个或多个显微镜设置,从一组算法中确定算法的组合,并且其中,应用图像恢复模型包括将算法的组合应用于低keV离子样品的光束图像以生成还原图像。

[0064] A2.A1-A1.3段中任何一项的方法,还包括用带电粒子显微镜检查和/或分析样品。

[0065] A3.A1-A2段中任一段的方法,其中样品是薄片。

[0066] A3.1.段落A3的方法,其中,所述薄片包括基准,并且其中,所述样本至少部分地基于所述基准而位于所述恢复的图像内。

[0067] A4.A1-A3.1段中任一段的方法,进一步包括使用离子束从样品材料中产生样品,其中产生样品包括:

在样品材料的区域上执行一个或多个研磨步骤,以利用离子束使样品成形;

将样品连接到样品操作探针上;和

用离子束将样品从样品材料中分离出来。

[0068] A4.1.段落A4的方法,其中一个或多个研磨步骤是在高keV设定下操作的离子束下进行的。

[0069] A4.1.1.段落A4.1的方法,其中,高keV设置包括将离子束设置为以等于或高于16keV,30keV和/或50keV的第二操作值进行操作。

[0070] A4.2.段落A4-A4.1中任一段的方法,进一步包括将样品附接到样品架,并且其中照射样品对应于当样品被附接到样品架时以低keV设置用离子束照射样品。

[0071] A4.3.段落A4-A4.2中任一项的方法,其中,当在低keV设置下用离子束照射样品时,样品的表面包括在创建样品过程中由离子束引起的损坏,并且其中低keV用离子束研磨样品可以消除样品表面的损伤。

[0072] A5.A1-A4.3段中任一段的方法,还包括为离子束设置低keV设置。

[0073] A5.1.A1-A5段落中任何一个的方法,其中低keV设置包括设置的离子束以200eV,500eV,1keV,2keV,5keV,8keV和/或16keV或以下的工作值工作。

[0074] A6.A1-A5.2段中任一段的方法,还包括自动识别恢复的图像中的样本。

[0075] A6.1.段落A6的方法,其中,识别恢复的图像的特征,基于所述特征,确定样品在恢

复的图像中的位置和/或取向。

[0076] A6.2.段落A6-A6.1中的任何一个的方法,还包括向用户呈现恢复的图像和/或恢复的图像的所识别的特征。

[0077] A7.A1-A6.2段中任一段的方法,其中将样本定位在恢复的图像内包括将恢复的图像的包括样本的至少一部分的区域与低能磨映射相关联。

[0078] A7.1.段落A7的方法,其中,低能磨贴图包括放置在恢复的图像上的图形,并且其中,执行样品的低keV铣削包括对与所描绘的样品部分相对应的样品区域进行处理。在还原图像中被图形覆盖到离子束的低keV铣削。

[0079] A7.1.1.段落A7.1的方法,其中,图形是矩形。

[0080] A7.1.2.A7.1-A7.1.1段中任何一项的方法,其中图形是由用户通过用户界面放置的。

[0081] A7.1.3.A7.1-A7.1.2段中任何一项的方法,其中图形是由系统自动放置的。

[0082] A7.1.3.1.段落A7.1.3的方法,其中使用其他机器学习算法放置图形。

[0083] A7.1.3.2.段落A7.1.3的方法,其中使用边缘发现算法放置图形。

[0084] A7.1.3.3.段落A7.1.3的方法,其中,使用模板匹配来放置图形。

[0085] A7.1.3.4.段落A7.1.3的方法,其中使用基于特征的匹配来放置图形。

[0086] A7.1.3.4.A7.1.3-A7.1.3.2中任何一项的方法,其中进一步包括在图形用户界面上显示具有系统自动放置的图形和批准请求的还原图像,其中低keV铣削至少部分地基于对批准的接收来执行样品的确认。

[0087] A8.A1-A7.1.3.3中任一段的方法,其中用离子束进行样品的低keV铣削包括用离子束进行切割步骤。

[0088] B1.带电粒子显微镜系统,包括:

被配置为保持样品的样品保持器;

离子源,被配置为用离子束照射样品;

成像系统,其被配置为响应于被离子束照射而基于样品所发射的带电粒子来捕获样品的图像;

一个或多个处理单元;和

存储器存储计算机可读指令,该计算机可读指令在由一个或多个处理单元执行时使带电粒子显微镜系统执行段落A1-A8中的任一个的方法。

[0089] C1.使用B1段的带电粒子显微镜系统。

[0090] 在本文中所描述的系统、设备和方法不应解释为以任何方式进行限制。实际上,本公开针对各个所公开实施例的所有新颖和非显而易见的特征和方面,无论是单独地还是以彼此形成的各种组合和子组合。所公开的系统、方法和设备不限于任何特定方面或特征或其组合,所公开的系统、方法和设备也不要求存在任何一个或多个特定优点或解决任何一个或多个特定问题。任何操作理论都是为了便于阐释,但是本公开的系统、方法和设备不限于此类操作理论。

[0091] 虽然为了便于呈现而以特定的循序次序来描述所公开的方法中的一些方法的操作,但应理解,除非下文所陈述的特定语言要求特定排序,否则这种描述方式涵盖重新布置。举例来说,在一些情况下,可重新布置或同时执行循序描述的操作。此外,为了简单起

见,附图可能没有展示所公开的系统、方法和设备可以与其它系统、方法和设备结合使用的各种方式。此外,描述内容有时使用比如“确定”、“识别”、“产生”和“提供”等术语来描述所公开的方法。这些术语是所执行的实际操作的高级抽象化。与这些术语相对应的实际操作将取决于特定实施方案而变化,并且容易由所属领域的普通技术人员辨别。

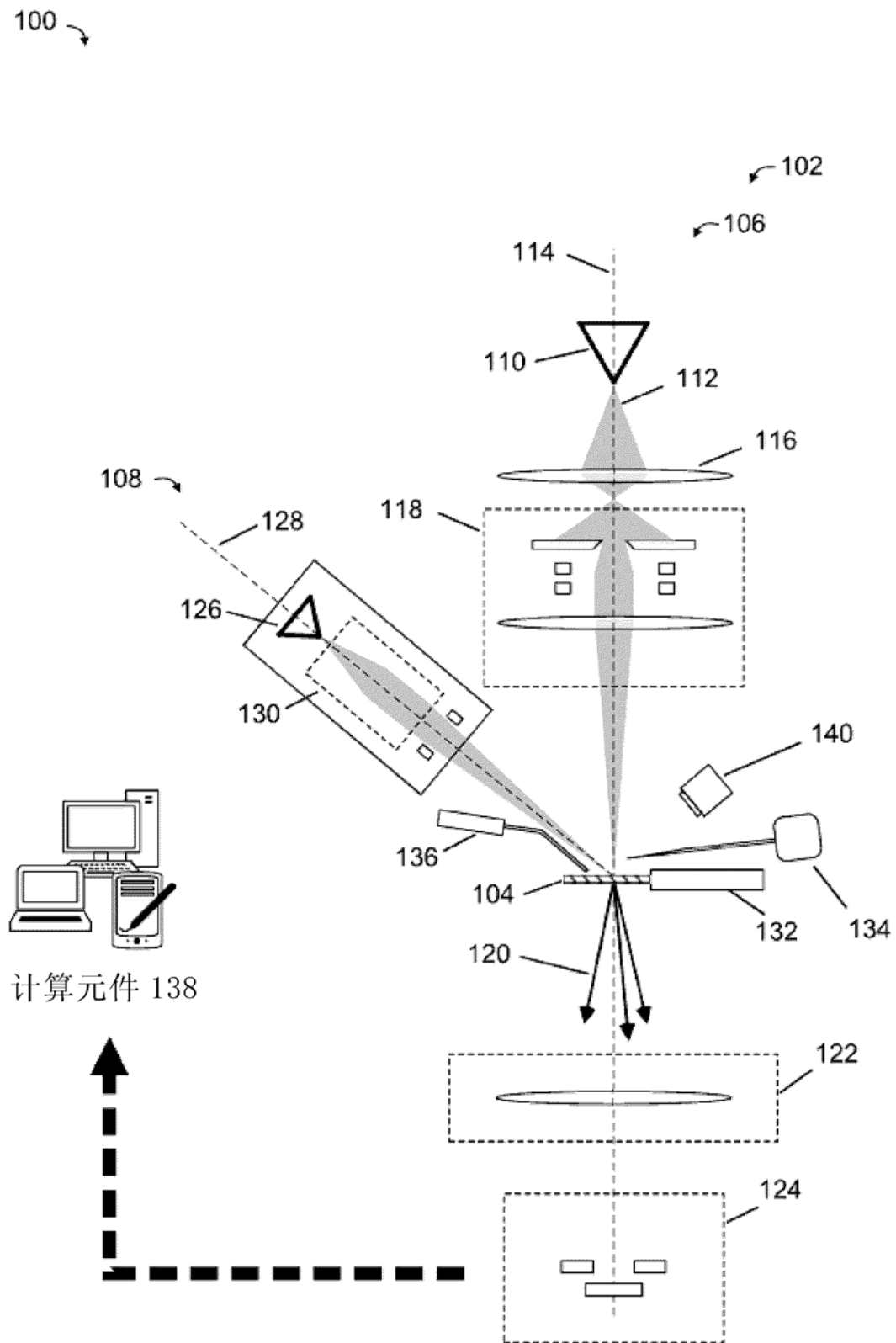


图 1

200

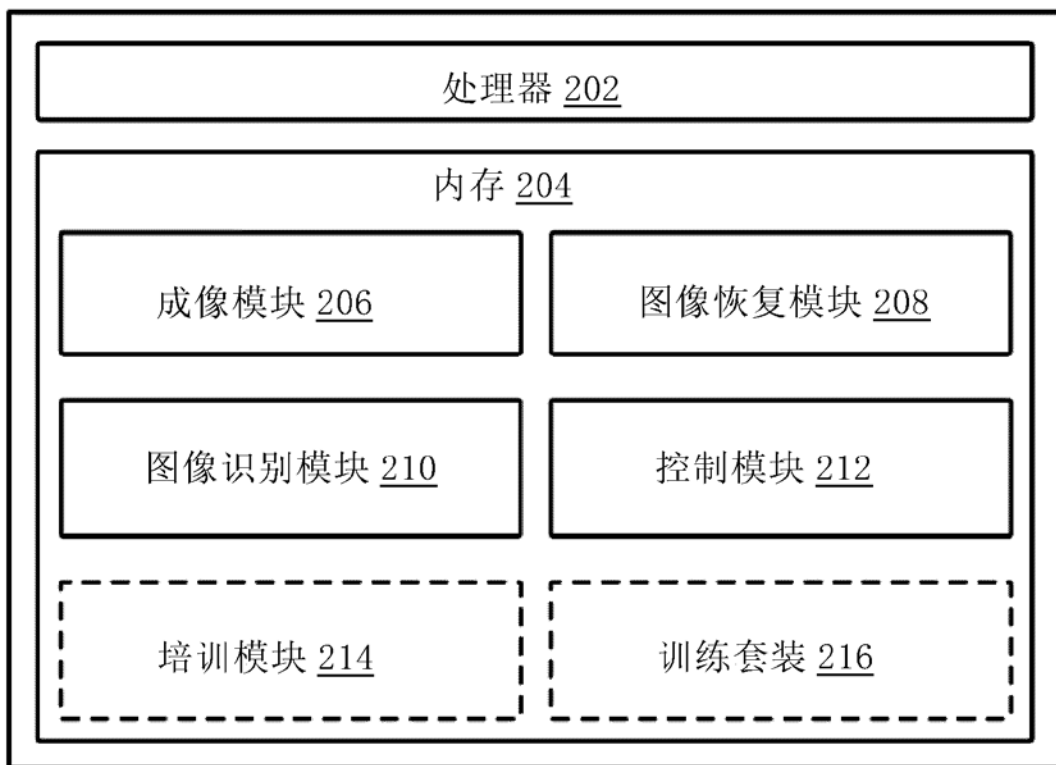


图 2

300

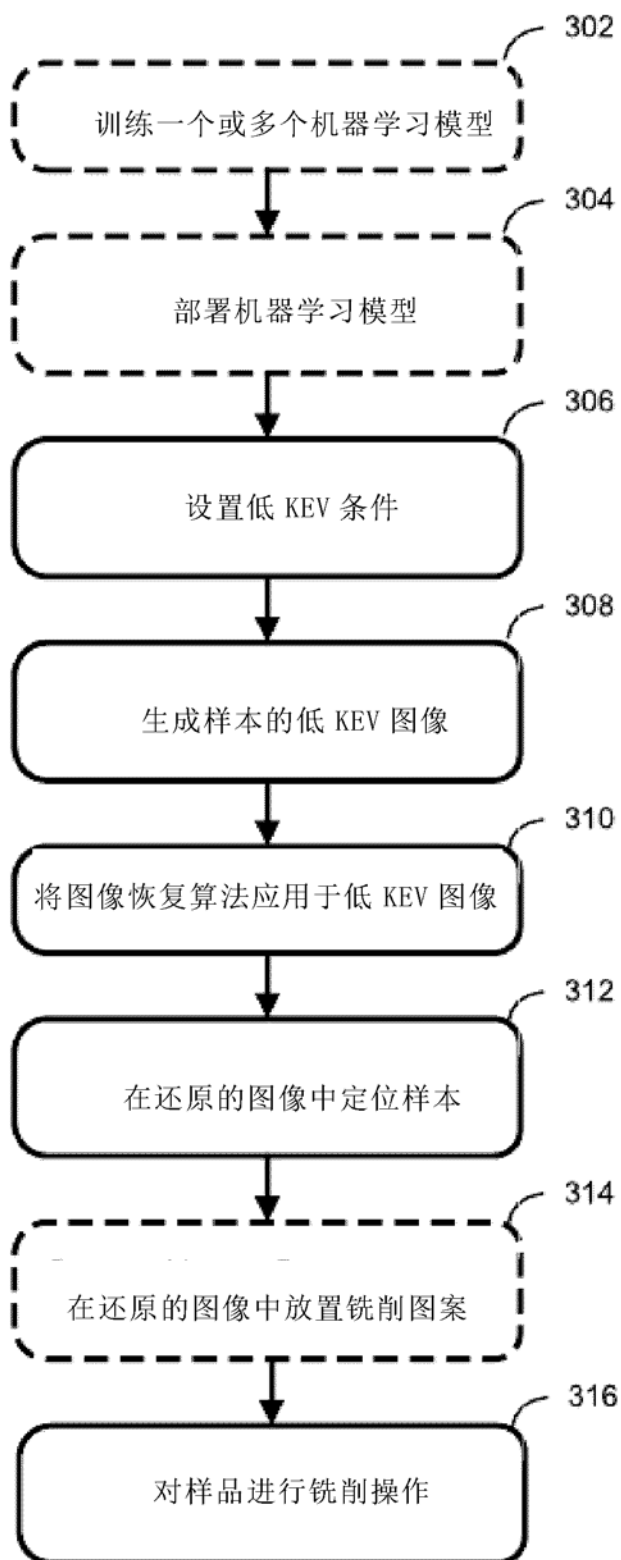


图 3

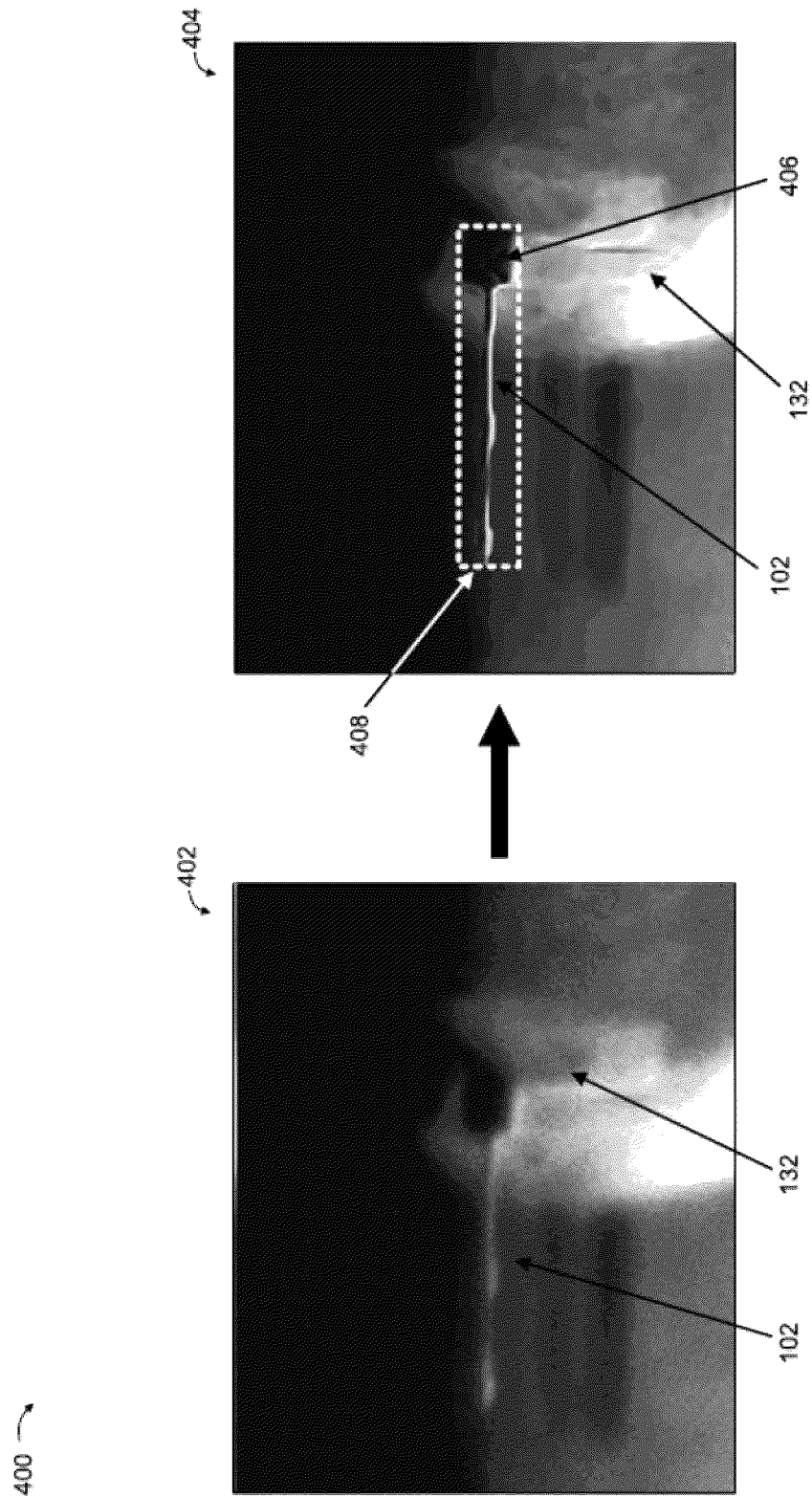


图 4