



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118777338 A

(43) 申请公布日 2024. 10. 15

(21) 申请号 202410996271.0

(22) 申请日 2021.04.07

(30) 优先权数据

16/843770 2020.04.08 US

(62) 分案原申请数据

202110372501.2 2021.04.07

(71) 申请人 FEI 公司

地址 美国俄勒冈州

(72) 发明人 B·J·詹森 E·维索尔伦

E·弗兰肯

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

专利代理师 邹愉 任霄

(51) Int. Cl.

G01N 23/044 (2018.01)

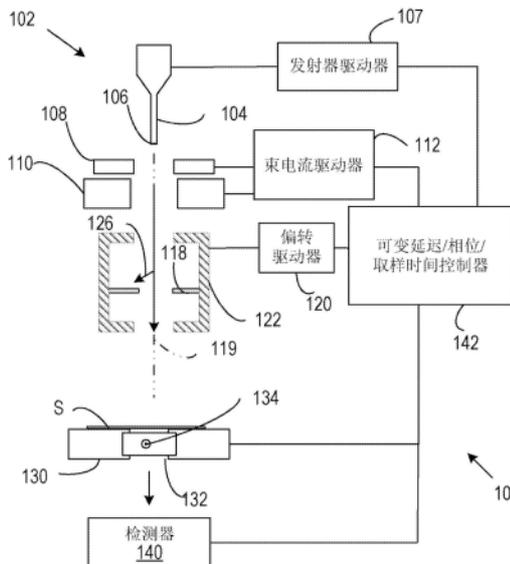
权利要求书2页 说明书10页 附图7页

(54) 发明名称

用于断层摄影中的随机角度取样的旋转样品保持件

(57) 摘要

本发明涉及用于断层摄影中的随机角度取样的旋转样品保持件。一种方法包括：将样品旋转到由第一角度间步长大小限定的第一多个绝对角度中的每个绝对角度；在每次旋转后，用相应电子束脉冲对样品进行照射，同时响应于照射而获取样品的相应图像；将样品旋转到与该第一多个绝对角度中的绝对角度不一致的第二多个绝对角度中的每个绝对角度，其中该第二多个绝对角度中的至少一个绝对角度基于样品的三维(3D)断层重建来选择，该3D断层重建基于多个所获取的图像来计算；以及在每次旋转到该第二多个绝对角度中的与该第一多个绝对角度中的绝对角度不一致的绝对角度后，用相应电子束脉冲对样品进行照射，同时响应于照射而获取样品的相应图像。



1. 一种方法,所述方法包括:

将样品旋转由第一角度间步长大小限定的第一多个绝对角度中的每个绝对角度;

在每次旋转之后,用相应电子束脉冲对所述样品进行照射,同时响应于照射而获取所述样品的相应图像;

将所述样品旋转至与所述第一多个绝对角度中的绝对角度不一致的第二多个绝对角度中的每个绝对角度,其中所述第二多个绝对角度中的至少一个绝对角度是基于所述样品的三维(3D)断层重建来选择的,所述3D断层重建是基于多个所获取的图像来计算的;以及

在每次旋转至所述第二多个绝对角度中的与所述第一多个绝对角度中的绝对角度不一致的绝对角度之后,用相应电子束脉冲对所述样品进行照射,同时响应于照射而获取所述样品的相应图像。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中所有旋转在同一方向上。

3. 根据权利要求2所述的方法,其中所述第二多个绝对角度中的至少一个绝对角度是基于第二角度间步长大小来选择的。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中所述第一角度间步长大小是所述第二角度间步长大小的整数倍。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中每个图像是通过响应于相应照射而检测从所述样品发射的带电粒子或电磁辐射来获取的。

6. 根据权利要求1所述的方法,所述方法还包括计算所述样品的3D断层重建,所述3D断层重建是基于所有所获取的图像来计算的。

7. 根据权利要求1所述的方法,其中到绝对角度的每次旋转是通过编码器来确定的。

8. 一种方法,所述方法包括:

用电子束脉冲对样品进行照射,同时响应于照射而获取所述样品的图像,其中所述样品在照射期间以等于0的绝对角度取向;

选择旋转角度 $\varphi$ ;

将整数乘数 $m$ 设置为0;

重复地:

递增所述整数乘数 $m$ ,

将所述样品旋转至绝对角度 $\alpha$ ,其中 $\alpha = +m\varphi$ ,

用相应后续电子束脉冲对所述样品进行照射,同时响应于照射而获取所述样品的相应图像,

将所述样品旋转至绝对角度 $\beta$ ,其中 $\beta = -m\varphi$ ,以及

用相应后续电子束脉冲对所述样品进行照射,同时响应于照射而获取所述样品的相应图像;以及

将所述样品旋转至基于所述样品的3D断层重建而选择的绝对角度,以及用电子束脉冲对所述样品进行照射,同时响应于照射而以基于所述重建选择的所述绝对角度获取所述样品的图像,所述3D断层重建是基于多个所获取的图像来计算的。

9. 根据权利要求8所述的方法,其中每个图像是通过响应于相应照射而检测从所述样品发射的带电粒子或电磁辐射来获取的。

10. 根据权利要求8所述的方法,所述方法还包括基于所有所获取的图像来计算所述样

品的断层重建。

11. 根据权利要求8所述的方法,其中到绝对角度的每次旋转是通过编码器来确定的。

12. 一种设备,所述设备包括:

可旋转样品保持件;

电子束源;

检测系统,所述检测系统能够操作以响应于所述电子束源对所述样品的照射而获取所述样品的图像;和

一个或多个电子控制器、计算机或处理器,所述一个或多个电子控制器、计算机或处理器电耦合到所述可旋转样品保持件、所述电子束源和所述检测系统,所述一个或多个控制器、计算机或处理器包括处理器可执行指令,所述处理器可执行指令能够操作以:

使所述可旋转样品保持件将所述可旋转样品保持件上的样品旋转到由第一角度间步长大小限定的第一多个绝对角度中的每个绝对角度;

在每次旋转之后,使所述电子束源用相应电子束脉冲对所述样品进行照射,同时同步地使所述检测系统响应于相应照射而获取所述样品的相应图像;

使所述可旋转样品保持件将所述样品旋转到第二多个绝对角度中的与所述第一多个绝对角度中的绝对角度不一致的每个绝对角度,其中所述第二多个绝对角度包括基于所述样品的3D断层重建来选择的至少一个绝对角度,所述3D断层重建是基于多个所获取的图像来计算的;以及

在每次旋转到所述第二多个绝对角度中的与所述第一多个绝对角度中的绝对角度不一致的绝对角度之后,使所述电子束源用相应电子束脉冲对所述样品进行照射,同时同步地使所述检测系统响应于相应照射而获取所述样品的相应图像。

13. 根据权利要求12所述的设备,其中每个图像是通过由所述检测系统响应于相应照射而检测从所述样品发射的带电粒子或电磁辐射来获取的。

14. 根据权利要求12所述的设备,其中所述一个或多个电子控制器、计算机或处理器还能够操作以基于所述多个图像来计算所述样品的断层重建。

15. 根据权利要求12所述的设备,所述设备还包括编码器,所述编码器耦合到所述可旋转样品保持件并且电耦合到所述一个或多个电子控制器、计算机或处理器,其中所述一个或多个电子控制器、计算机或处理器能够操作以读取所述编码器。

## 用于断层摄影中的随机角度取样的旋转样品保持件

本申请为2021年4月7日提交的题为“用于断层摄影中的随机角度取样的旋转样品保持件”的中国专利申请(申请号:202110372501.2;申请日:2021年4月7日)的分案申请。

### 技术领域

[0001] 本公开涉及电子断层摄影。

### 背景技术

[0002] 断层摄影成像电子显微镜基于获取多个曝光角度处的样品图像。这些角度典型地通过使样品步进经过一系列上升角度来设置。在其它实例中,通过使样品前后倾斜来设定角度。这些常规方法的一个困难是常规电子显微镜中可用的倾斜角度的范围有限。此外,鉴于连续的大角度运动和角度方向改变,可能难以精确地设置角度,特别是在前后倾斜方案中。由于需要多次启动和停止,因此前后倾斜也可能是耗时的。此外,常规的上升角度取样方案对于辐射敏感性样品不是最佳的,其中首先对样品最小倾斜的角度进行取样可能是有益的。由于这些和其它原因,需要可替代的方法。

### 发明内容

[0003] 如本文所公开的,断层摄影获取中的随机角度取样可有益于重构质量,并且可实现动态变形样品的重构。在本文公开的典型实例中,旋转样品保持件的频闪带电粒子束(CPB)曝光允许断层摄影获取中的随机角度取样。样品可以恒定或可变的角速度旋转,并且样品角度可以通过选择曝光时间来挑选。如本文所用,曝光持续时间通常被选择成使得曝光期间的样品旋转不产生不能接受的图像模糊,并且这类曝光在本文中称为“频闪”曝光。

[0004] 代表性方法包含使样品在一个方向上旋转,所述旋转是连续的,其中所述样品通过多次转动而旋转,并且其中所述样品的完整转动的所有角度都是可用的。用多个电子束脉冲以脉冲速率且在所述样品旋转的同时对所述样品进行照明。可替代地,可用X射线对所述样品进行照射。响应于所述照明,获取所述样品的多个图像,每个图像以所述样品的相对角度与其它所获取的图像中的至少一个不同的方式获取,并且确定所述样品在每个所获取的图像中的相对角度。在一些实例中,确定所述样品的相对角度与图像的相应获取一致地或在图像的相应获取之后执行。在一些实施例中,基于所述样品的断层摄影重构或在其期间,确定所述样品在每个所获取的图像中的绝对角度。如本文所用,绝对角度是所述样品相对于固定参照物的定向角度。在一些实例中,确定所述样品在每个所获取的图像中的相对角度包括:在获取时读取联接到可旋转样品保持件的编码器,所述可旋转样品保持件使所述样品旋转。如本文所用,以第一角度获取的第一投影图像与以第二角度获取的第二投影图像之间的相对角度被定义为施加到所述样品以将所述样品从第一投影角度(即,第一投影方向)移动到第二投影角度(即,第二投影方向)所需的旋转。在代表性实例中,基于所述编码器的读取,确定所述样品在每个所获取的图像中的绝对角度。在其它实例中,确定所述样品在每个所获取的图像中的相对角度包括:基于所述样品的重构或基于旋转时间来确定

相对角度。脉冲速率可以是可变的,如在所述样品的每次转动都变化或在所述样品的多次转动之后变化,或者脉冲速率可在所述样品的每个全程旋转之后改变。在一些实例中,在所述样品的每个全程旋转之后增加或减小脉冲速率,并且所述旋转处于恒定的或可变的速率。

[0005] 代表性设备包含可旋转样品保持件,其可操作来使样品在一个方向上通过多次转动连续地旋转,并且其中所述样品的完整转动的所有角度都是可用的。电子束源可操作来用多个电子束脉冲以脉冲速率且在所述样品旋转的同时对所述样品进行照射;检测系统可操作来获取与所述多个电子束脉冲相对应的所述样品的多个图像。所述检测系统可包括电子检测器,所述电子检测器被安置成接收响应于所述样品的所述电子束照射的电子脉冲部分,并且其中每个图像以所述样品的相对角度与其它所获取的图像中的至少一个不同的方式获取。在一些实施例中,控制器被配置成确定所述样品在每个所获取的图像中的相对角度或绝对角度。在一些实例中,编码器在图像获取时联接到可旋转样品保持件。根据代表性实例,所述电子束源的脉冲速率可使用随机间隔、非恒定间隔或泊松分布间隔来变化,并且所述电子束源可操作来以在所述样品的每个全程旋转之后改变的脉冲速率产生电子束脉冲。

[0006] 含有处理器可执行指令的至少一个计算机可读介质被配置成控制电子束系统,以使可旋转样品保持件样品在一个方向上通过多次转动连续地旋转,并且其中安置在所述可旋转样品保持件上的样品的完整转动的所有角度都是可用的。在所述样品旋转时,用具有多个电子束脉冲的电子束源以脉冲速率对所述样品进行照射;获取与所述多个电子束脉冲中的每一个相对应的所述样品的多个图像,并且基于所获取的多个图像来重构所述样品。

[0007] 在一些实例中,方法包括:使样品单向地旋转经过包括至少一个全程旋转转动的角度范围。在单向旋转期间,对多个角度处的旋转样品进行频闪地照射,并且获取相应多个角度中的每一个处的样品图像。在一些情况下,基于样品图像来产生样品的断层摄影图像。根据一些实例,在样品图像获取之前、之后或期间,确定与样品图像相关联的相对旋转角度或绝对旋转角度。在一些情况下,基于断层摄影重构来确定与样品图像相关联的样品相对角度和/或样品绝对角度。在进一步的实施例中,将样品固定至可旋转样品保持件,并且用联接到可旋转样品保持件的编码器来确定相对旋转角度和/或绝对旋转角度。在一些实例中,以可变脉冲速率、固定脉冲速率或以随机时间间隔(如泊松分布间隔)对旋转样品进行频闪地照射。在进一步的实例中,旋转样品的频闪曝光处于可变脉冲速率,所述可变脉冲速率基于旋转样品的旋转角度或旋转数目来确定。根据代表性实例,使样品单向地旋转经过包括多个全程旋转的角度范围。

[0008] 代表性设备包括可切换带电粒子束(CPB)源和可旋转样品台,所述可旋转样品台可操作来使样品旋转至少一个完整转动。控制器联接到CPB源和可旋转样品台,并且被配置成在样品的单向旋转期间在多个角度处使安置在可旋转样品台上的所述样品曝光,其中所述多个曝光角度在大于 $360^\circ$ 的范围内。在一些实例中,控制器被联接成在样品的单向旋转期间在多个角度处激活CPB源,以频闪地使样品曝光于CPB。在其它实例中,控制器被联接成使CPB无效,使得样品在样品的单向旋转期间在多个角度处频闪地曝光于CPB。根据一些实施例,旋转编码器联接到可旋转样品台,并且为曝光角度中的每一个提供相对旋转角度和绝对旋转角度中的至少一个。在一些实例中,控制器以固定或可变速率或随机时间建立频

闪曝光。在进一步的实例中,至少一个CPB检测器被联接成检测响应于样品的CPB曝光而产生的辐射并产生相应的断层摄影图像。在实施例中,控制器被联接成基于断层摄影图像和多个角度来产生与样品相对应的断层摄影重构、并在断层摄影重构期间产生多个角度的角度估计。

[0009] 电子束设备包含控制器,所述控制器被安置成联接到电子束源。至少一个计算机可读介质联接到控制器,并且含有控制器可执行指令,其使控制器引导电子束源在样品的单向旋转期间在多个任意角度处对样品进行频闪地照射,并且获取相应的多个角度中的每一个处的样品图像。根据一些实例,至少一个计算机可读介质进一步含有控制器可执行指令,以基于样品图像重构样品的断层摄影图像、并且确定与样品图像相关联的相对旋转角度和/或绝对旋转角度。在一些实例中,与样品图像相关联的相对旋转角度和/或绝对旋转角度在获取样品图像之后确定、或者基于断层摄影重构来确定。在另外的实例中,至少一个计算机可读介质进一步含有控制器可执行指令,其用于采用联接到可旋转样品保持件的编码器来确定相对旋转角度和/或绝对旋转角度。在其它代表性实施例中,控制器被联接成引导电子束源在样品的单向旋转期间在多个任意角度处或以基于随机时间间隔(如泊松分布间隔)的可变脉冲速率对样品进行频闪地照射,其中任意角度的角度范围包括多个全程旋转。

[0010] 通过参考附图进行的以下详细描述,所公开技术的前述和其它特征将变得更加显而易见。

### 附图说明

[0011] 图1A绘示了包括可旋转样品台的代表性CPB显微镜。

[0012] 图1B至1D绘示了用图1A的CPB显微镜获得的代表性样品旋转。

[0013] 图1E绘示了被安置成用于旋转的代表性针形或柱形样品。

[0014] 图2绘示了用连续可旋转样品台获取用于断层摄影的随机角度CPB图像的另一代表性系统。

[0015] 图3绘示了用连续可旋转样品台获取用于断层摄影的随机角度CPB图像的代表性系统。

[0016] 图4绘示了使用通过旋转样品的随机角度频闪曝光获得的图像来产生断层摄影重构的代表性方法。

[0017] 图5绘示了基于随机曝光时间作为样品旋转速度的函数来获取样品图像的代表性方法。

[0018] 图6绘示了用样品台获取CPB图像的代表性系统,所述样品台可用DC电动机旋转。

[0019] 图7绘示了获取用于断层摄影重构的CPB图像的另一方法。

[0020] 图8绘示了获取和分析用于断层摄影重构的图像的代表性计算环境。

### 具体实施方式

[0021] 本文公开了用于带电粒子断层摄影的方法和设备。典型地,将样品安置在可旋转样品台上,以便重复地曝光于带电粒子束(CPB)。通常参考透射电子显微镜来描述所公开的实例,但也可使用其它CPB。可替代地,可采用X射线对样品进行照射,并且获得基于X射线的

图像。在一些实例中,以随机或其它角度序列对旋转样品的频闪照明用于获取要在断层摄影重构中使用的图像序列。可以均匀的角速度旋转样品,并且可基于一个或多个系列的角度值来建立随机角度曝光,所述一个或多个系列的角度值可以根据需要生成或者从计算机可读存储(如存储器)中检索。可基于与样品旋转相关联的相位、基于样品旋转速度的曝光时间的集合来规定角度,在图像获取期间随机生成角度,或以其它方式规定角度。样品可以固定或可变速度旋转,并且在旋转的同时对其频闪地进行照射。频闪照射可处于包括随机持续时间旋转处的固定或可变速率。可以在照射之前、期间或之后确定照射角度,并且照射角度可以为固定或可变的角度的(包括随机角度)分布。

[0022] 如本文所用,“列”通常是指一个或多个CPB光学元件、或元件(如CPB源、CPB透镜、CPB偏转器、CPB光圈、消像散器或其它CPB光学元件)的组合。一种或此类光学元件可用于产生脉冲CPB,其可被导向到样品以提供脉冲曝光。此类脉冲曝光通常被称为“频闪”曝光,以指示有效曝光时间相对于产生合适图像的样品旋转足够短,即没有过度运动诱发的模糊。合适的曝光时间可与小于0.0001、0.001、0.01度或其它角度的旋转相对应。任何允许最大曝光持续时间的规格可取决于图像放大率和预期分辨率。在所公开的实例中,对CPB或CPB列通电以产生频闪CPB曝光,但连续CPB可与频闪检测一起使用,所述频闪检测即,对响应于CPB曝光而产生的、且在检测时间窗口中接收的带电粒子或电磁辐射的检测,在本文中被称为“频闪”检测。在频闪曝光中,除频闪组件之外,CPB还可具有连续组件。在许多实际的实例中,优选脉冲曝光,以便减少由包括连续组件的CPB曝光产生的样品降解。连续组件可能会导致不希望的产品改变,而不会改善断层摄影图像。

[0023] 在一些实例中,使用在多个角度(如随机角度或随机角度差)下的曝光来获取样品图像。如本文所用,随机或随机选择是指间隔不均匀并且可使用随机或伪随机数生成器选择的值,或者以其他方式近似随机选择的值。将被认识到的是,通常可采用所谓的伪随机数发生器来选择此类随机值的任何集合。可使用随机值的一个或多个集合,并且不同的集合可包括不同的值和/或不同数目的值。可以基于随机数的对应集合以及被处理成建立对应的角度、曝光时间或相位的集合的随机数来确定与角度、曝光时间或相位相关联的值。例如,如果获得N个随机数 $R_i$ 在0至1之间的集合,则角度 $\alpha_i$ 可被选择为 $\pi R_i$ 弧度、 $2\pi R_i$ 弧度、或更典型地地、 $A\pi R_i$ 弧度,其中 $A\pi$ 弧度是要使用的总角度范围。角度 $\alpha_i$ 可被规定为正和负,并且在任何特定角度 $\alpha_i$ 下的曝光均可以包括多个旋转,即, $\alpha_i$ 是以弧度 $2\pi$ 或 $\pi$ 为模的旋转角度。可以基于随机数的集合来类似地指定曝光时间、相对时间、相位和相对相位。还可根据需要使用时(on the fly)生成值。在一些实例中,所选择或所生成的值用于图像重构,并且集合中的每个图像与具有特定值的相应随机数相关联。

[0024] 在一些实例中,为方便起见,使用恒定的样品旋转速度进行样品曝光,但可使用非均匀速度,如单调递增或递减速率、或任意递增和递减速率。通过均匀、恒定的旋转,获取随机曝光角度处的样品。如上文所讨论,此类随机曝光可基于可根据需要存储或生成的随机曝光时间或旋转相位。可替代地,样品旋转可以可变速度(如随机速度)进行,并且曝光时间可由恒定延迟分开。

[0025] 在一些实例中,旋转速度是恒定的或可变的,并且频闪曝光可具有不同的脉冲分布,如随机的、以可变速率固定的、或其组合。可以在获取一些或全部图像之后确定相对和/或绝对曝光角度。

**[0026] 实例1**

参照图1A, CPB系统100包括CPB发射器102, 其可以包括场发射器104或从发射器尖端106产生CPB的其它发射源。CPB电流可由如由发射器驱动器107提供的施加到场发射器104或发射器尖端106的电压中的一个或多个控制。抑制器电极108安置在场发射器104周围, 典型地用于抑制杂散带电粒子发射, 并且提取器电极110被安置成建立相对于发射器尖端106的电压, 以感应所选择的CPB电流。束电流驱动器112联接到抑制器电极108和提取器电极110。如图1A所示, 抑制器电极108、提取器电极110和场发射器104或发射器尖端106中的任何一个或全部可采用发射器驱动器107或束电流驱动器112来控制, 以产生脉冲或其它可变CPB, 使得样品S可被频闪地曝光。一个或多个额外的束光圈可沿着CPB系统轴线119安置, 并且可用于通过例如除在预定曝光时间之外阻挡CPB来控制CPB。例如, 限定在光圈板118中的光圈可用于响应于将偏转电压从偏转驱动器120施加到束偏转器122 (如谐振束偏转器) 而阻挡或衰减CPB。随着束偏转器122被激活, CPB 126被偏转成由光圈板118阻挡。可提供额外的光圈和偏转器, 但在图1A中未示出。图1A的实例还可使用枪透镜来提供束调制, 但此种透镜未示出。除通过驱动一个或多个CPB透镜、偏转器、光圈板或其它CPB光学元件提供的CPB调制之外, 还可以响应于采用一个或多个脉冲或调制光束对合适目标的照射而产生脉冲CPB发射。可根据需要使用CPB光学元件来进一步调制此类CPB。

**[0027]** 样品S安置在样品台130上, 所述样品台可响应于电动机或其它机构132的激活而围绕轴线134旋转到期望的角度 $\alpha$ 。在一些实施例中, 由于样品的连续旋转, 因此样品的所有角度可能都是可用的。尽管所有角度均可用, 但由于数据收集有限, 可以避免某些角度 (取决于样品形状)。例如, 呈现需要CPB传送穿过样品相对较长部分的样品的面的角度可能是不期望的。典型地, 通过应用于产生带电粒子 (例如, 散射的CPB部分、二次电子) 或电磁辐射 (例如, X射线) 的多个角度和相应的频闪 (脉冲) 电子束发射来调整样品, 所述带电粒子或电磁辐射由探测器140接收以产生相应的图像。随后可对这些图像进行断层摄影处理。控制器142被联接成产生频闪CPB发射并使样品S以多个角度相对于轴线119定位。这些角度可以是随机角度, 并且可包括样品S围绕轴线119的一个或多个完整旋转。控制器通常控制脉冲定时和脉冲分布, 以获得期望角度处的图像。

**[0028]** 图1B至1D绘示了样品S的单向旋转以提供任意旋转。在这些实例中, 可使用初始近正入射曝光, 使得可减少该曝光的任何样品降解。为方便起见, 对于样品S的小于 $\pi/2$ 的顺时针旋转, 有效旋转角度 $\alpha$ 被认为是正的; 对于样品S的小于 $\pi/2$ 的逆时针旋转, 有效旋转角度 $\alpha$ 被认为是负的。为方便起见, 有效的旋转角度参考CPB系统轴线119。可以使用连续的顺时针或逆时针旋转来实现以任意初始旋转角度开始的任意样品旋转。如图1B所示, 样品S被安置成使得CPB系统轴线119与样品表面法线129基本上是平行的, 即,  $\alpha_1 = 0$ 。在图1C中, 样品S顺时针旋转, 使得样品S相对于CPB系统轴线119以角度 $\alpha_2 > 0$ 被安置。在图1D中, 样品S进一步顺时针旋转角度 $2\pi - |\alpha_3|$ , 使得样品S相对于CPB系统轴线119以角度 $\alpha_3 < 0$ 被安置。在不改变旋转方向的情况下, 可以使用样品S的额外的完整旋转转动来获得额外的旋转角度。顺时针或逆时针旋转可用于获得样品旋转角度 $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ 的任意集合, 并且任何特定角度可用于初始曝光。根据需要, 这些旋转角度都可设有单向旋转。

**[0029]** 图1A至1D中的样品S示出为薄片, 但也可使用其它形状。如图1E所示, 样品S' 可具有圆柱形、柱形或针形的形状, 并且类似地旋转。

[0030] 在一些实例中,在以较大倾斜获取图像之前,获取与较小倾斜角度相关联的图像。例如,最初可获得一系列小倾斜(相对于CPB系统轴线的顺时针和逆时针两者)处的曝光,并且一些曝光可能需要多于360度或多次转动的单向样品旋转。倾斜角度 $\alpha$ 通常以360度为模来获得。然后,可进行较大倾斜处的曝光,并且此类曝光可能需要多于360度的单向样品旋转。

#### [0031] 实例2

参照图2,CPB显微镜或其它CPB成像系统200包括样品台202,所述样品台被安置成使样品S围绕轴线201旋转。在典型的实例中,此种旋转是连续的,并且旋转角度可大到180度、360度、720度或其它值。台驱动器206可致动来产生样品台202的此类旋转。样品台202和/或台驱动器206联接到允许确定样本旋转角度的回转式编码器208。台驱动器206和回转式编码器208通常联接到可启动或调节台旋转的控制器210。控制器210还联接到存储器212,所述存储器存储定义各个频闪曝光的值序列。此类值可存储为例如一系列曝光时间、样品倾斜角度、或者曝光之间的相对相位或时间差。在一些实例中,基于样品的预定旋转或基于样品台202的固定或可变旋转速度来计算实际曝光时间。

[0032] 控制器210联接到CPB源和/或列213,以基于所存储的值序列产生脉冲CPB 214。检测器218被安置成接收响应于脉冲CPB 214而产生的带电粒子或电磁辐射,如散射电子、二次电子、X射线、或其它带电或中性粒子、或其它电磁辐射。检测器218联接到控制器210,使得可使用存储在存储器220中的计算机可执行指令来存储与脉冲曝光相关联的图像以用于断层摄影处理。可替代地,控制器210可经由有线或无线网络将图像传送到任意位置以用于断层摄影处理、重构和显示。

#### [0033] 实例3

参照图3,CPB成像系统300包括被配置成接收样品S的样品台302。台驱动器304联接到样品台302以产生围绕轴线301的样品旋转。在大多数情况下,提供样品S与样品台302的平移运动,但平移组件在图3中未详细示出。台驱动器304可产生固定频率 $f$ 下的样品旋转。该频率可由台驱动器304的一个或多个用户或控制器输入来设置,但也可在内部固定。在大多数情况下,样品旋转的启动由用户输入来提供,以准备用于图像获取。如图所示,台驱动器304可提供一个或多个输出处的固定频率 $f$ 的指示。脉冲定序器310联接到CPB源或列312,以产生样品S在样品角度或角度差序列上的频闪曝光。脉冲定序器310还可输出对频闪曝光的时间或相对时间的其它指示的数据值。检测器314接收响应于频闪曝光的辐射,并且产生相应的样品图像,所述样品图像可被输出用于远程或本地处理以产生断层摄影图像。如图3所示,不测量取样角度,并且重构基于角度或角度差的序列。

#### [0034] 实例4

参照图4,代表性方法400包括:在402处,选择可与样品角度 $\alpha_1, \dots, \alpha_N$ 相关联的脉冲分布,其中 $N$ 是正整数。脉冲分布可直接被规定为曝光时间、曝光速率或速率组合、或随机时间。曝光时间也可直接与角度相关联,如相对于样品旋转的相对相位,或可方便地以其它方式规定。典型地,角度是随机的。在404处,针对采用单向样本旋转的脉冲分布的脉冲中的每一个,来获取频闪图像。在一些情况下,脉冲分布产生样品角度 $\alpha_1, \dots, \alpha_N$ ,这些角度以 $2\pi$ 为模、以 $\pi$ 为模或以其它为模被规定(以弧度表示),并且可采用大于90度、180度、或360度的一个或多个旋转来实现。随后,在406处,处理针对每个脉冲的频闪图像,以产生断层摄影重

构。

#### [0035] 实例5

参照图5,方法500包括:在502处,建立样品旋转速度 $f(t)$ ,其典型地是恒定速率,即 $f(t) = \text{恒定}$ ,但可以使用任意的可变旋转速度。通常,优选单极速率( $f(t) > 0$ 弧度/秒),使得在曝光期间样品旋转在单一方向上。单向运动减少或消除与方向改变相关联的旋转伪影,并且可允许更快速的样品旋转并因此以相继更快速变化的(相对)角度对样品成像。在504处,选择曝光时间/脉冲分布。可使用随机数来建立曝光时间,然后对所述随机数进行缩放以产生随机曝光时间。对于固定或可变 $f(t)$ ,样品曝光时间可均匀间隔开,或者可基于均匀和随机间隔的组合或一些其它分布。也可使用随机旋转,但在图5中未示出,因为在曝光期间维持或多或少恒定的旋转速度通常更方便。在506处,频闪曝光用于获得针对曝光时间中的每一个的图像,并且在508处,可传送图像以用于断层摄影处理或存储。在一些情况下,不将相关联的曝光角度与图像一起传送,但典型地传送每个图像和相关联的角度。

#### [0036] 实例6

参照图6,CPB成像系统600包括被配置成保持样品S的样品台602。样品台602联接到DC电动机604,使得样品S可围绕与CPB曝光轴线608不平行(典型地垂直)的轴线606旋转经过任意角度 $\alpha$ 。编码器610向控制器612提供旋转角度的指示,所述控制器联接到CPB源或CPB列614,其向脉冲CPB 615提供样品S的频闪曝光。检测器616被安置成响应于曝光于脉冲CPB 615而接收来自样品S的电磁辐射或带电粒子620。例如,可产生X射线、二次电子、散射电子、或者其它散射、反射、衍射带电粒子。检测器616联接到控制器612,并且向控制器612提供图像数据。控制器612可被配置成处理所接收到的图像、引导所接收到的图像用于远程处理,以及控制CPB源/柱614、DC电动机604、样品台602,以及接收来自编码器610的旋转数据。

#### [0037] 实例7

参照图7,获取用于断层摄影处理的图像的方法700包括:在702处,建立初始旋转角度和旋转频率。在704处,对计数器I进行初始化,其中I是正整数,并且在706处,在时间 $T_1$ 处对样品进行曝光。在708处,存储响应于曝光所获得的图像,并且在710处,确定是否要获得额外的曝光。如果是,则在712处,递增计数器I,并且重复进行曝光和图像存储。一旦曝光完成,则在714处,传送所获取的图像以用于断层摄影重构。

#### [0038] 实例8

图8和以下讨论旨在提供对在其中可实施所公开的技术的示范性计算环境的简要一般概述。尽管不是必需的,但在由个人计算机(PC)执行的计算机可执行指令(如程序模块)的一般上下文中描述了本公开的技术。通常,程序模块包括执行特定任务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。此外,所公开的技术可用包括以下的其它计算机系统配置来实施:手持装置、多处理器系统、基于微处理器或可编程的消费型电子装置、网络PC、微型计算机、大型计算机等。还可在通过通信网络链接的远程处理装置执行任务的分布式计算环境中实践所公开的技术。在分布式计算环境中,程序模块可位于本地存储器存储装置和远程存储器存储装置两者中。

[0039] 参考图8,用于实施所公开的技术的示例性系统包括呈示范性常规PC 800形式的通用计算装置,所述通用计算装置包括一个或多个处理单元802、系统存储器804和将包括

系统存储器804的各种系统组件联接到一个或多个处理单元802的系统总线806。系统总线806可为若干类型的总线结构中任何一种,其包括存储器总线或存储器控制器、外围总线和使用各种总线架构中任何一种的局部总线。示范性系统存储器804包括只读存储器(ROM)808和随机存取存储器(RAM)810。基本输入/输出系统(BIOS)812存储在ROM 808中,所述基本输入/输出系统含有帮助在PC 800内的元件之间传递信息的基本例程。

[0040] 示范性PC 800进一步包括一个或多个存储装置830,如用于从硬盘读取和向硬盘写入的硬盘驱动器、用于从可移除式磁盘读取或向可移除式磁盘写入的磁盘驱动器,以及用于从可移除式光盘(如CD-ROM或其它光学介质)读取或向可移除式光盘写入的光盘驱动器。此类存储装置可分别通过硬盘驱动器接口、磁盘驱动器接口和光盘驱动器接口连接到系统总线806。驱动器及其相关联的计算机可读介质为PC 800提供计算机可读指令、数据结构、程序模块和其它数据的非易失性存储。可以存储可由PC访问的数据的其它类型的计算机可读介质,如磁带盒、闪存卡、数字视频光盘、CD、DVD、RAM、ROM等,也可用在示范性操作环境中。

[0041] 数个程序模块可存储在存储装置830中,所述存储装置包括操作系统、一个或多个应用程序、其它程序模块和程序数据。用户可通过一个或多个输入装置840(如键盘)和指点装置(如鼠标)向PC 800输入命令和信息。其它输入装置可包括数码相机、麦克风、操纵杆、游戏板、圆盘式卫星天线、扫描仪等。这些和其它输入装置通常通过联接到系统总线806的串行端口接口连接到一个或多个处理单元802,但也可通过如并行端口、游戏端口或通用串行总线(USB)等其它接口进行连接。监测器846或其它类型的显示装置也经由接口(如视频适配器)连接到系统总线806。可包括其它外围输出装置,如扬声器和打印机(未示出)。

[0042] 可使用到一个或多个远程计算机(如远程计算机860)的逻辑连接在网络化环境中操作PC 800。在一些实例中,包括一个或多个网络或通信连接850。远程计算机860可为另一台PC、服务器、路由器、网络PC或对等装置或其它常见网络节点,并且典型地包括上文关于PC 800描述的许多或所有元件,尽管在图8中仅仅图示了存储器存储装置862。个人计算机800和/或远程计算机860可连接到逻辑局域网(LAN)和广域网(WAN)。此类网络环境在办公室、全企业计算机网络,内联网和因特网中是常见的。

[0043] 当在LAN联网环境中使用时,PC 800通过网络接口连接到LAN。当在WAN联网环境中使用时,PC 800典型地包括调制解调器或用于通过如因特网等WAN建立通信的其它器件。在网络化环境中,相对于个人计算机800描绘的程序模块或其部分可以存储在远程存储器存储装置、或者LAN或WAN上的其它位置中。示出的网络连接是示范性的,并且可使用在计算机之间建立通信链路的其它器件。

[0044] 如图8所示,存储器810包括存储计算机可执行指令的部分804A、806B、806C,所述计算机可执行指令分别用于生成随机序列(或存储一个或多个此类序列)、存储图像数据以及台和CPB系统控制。与CPB系统或与CPB系统相关联的组件的通信设有一个或多个模拟数字转换器(ADC)870或者一个或多个数字模拟转换器(DAC)871。

[0045] 一般注意事项

如本申请书和权利要求书中所使用,除非上下文另外明确指示,否则单数形式“一个(a/an)”和“所述(the)”包括复数形式。另外,术语“包括”意指“包含”。此外,术语“联接”不排除联接项之间存在中间元件。

[0046] 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。任何操作理论均是为了便于阐释,但本公开的系统、方法和设备不限于此类操作理论。

[0047] 尽管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,否则该种描述方式涵盖重新布置。例如,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,附图可能没有示出所公开的系统、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。另外,本说明书有时使用像“产生”和“提供”的术语来描述公开的方法。这些术语是所执行的实际操作的高水平抽象。与这些术语相对应的实际操作将根据特定实施而变化,并且可由本领域普通技术人员容易地辨别。

[0048] 在一些实例中,值、程序或设备被称为“最低”、“最佳”、“最小”等。将被认识到的是,此类描述旨在指示可在许多使用的功能替代方案中进行选择,并且此类选择不需要更好、更小或者优选于其它选择。

[0049] 参考指示为“上方”、“下方”、“上部”、“下部”等的方向来描述实例。这些术语用于方便描述,但不暗示任何特定的空间定向。

[0050] 术语“图像”在本文中用于指代如在计算机监视器上的显示图像、或者可用于产生显示图像的数字或模拟表示。数字表示可以如JPEG、TIFF或其它格式等各种格式存储。可使用阵列检测器或单一元件检测器连同对样品的合适扫描一起来产生图像信号。在大多数实际实例中,图像是2维的。

[0051] 样品台旋转可设有各种种类的电动机和致动器,包括DC电动机、步进电动机、回转式压电电动机、AC电动机或其它设备。旋转角度可采用用光学编码器、磁编码器或其它装置检测。连续旋转是指在图像获取期间被允许进行的旋转。例如,施加到步进电动机以产生旋转的驱动信号序列可在图像获取期间继续,并且不需要在所选择的成像角度处的等待时间。尽管使用了步进电动机,但旋转被称为是连续的。在其它实例中,允许连续(即非步进)电动机自由旋转样品。可在随机时间处获取图像。在一些实例中,基于泊松分布来选择随机时间间隔。在该情况下,选择最小时间间隔  $\Delta t$  和平均时间间隔  $\bar{N}\Delta t$ , 并且相关联的泊松分布被定义为:

$$P(n) = \frac{N^n}{n!} e^{-N},$$

其中n是整数个时间间隔,并且用于图像获取的取样时间间隔被选择为  $n \Delta t$ 。此类时间间隔可使用合适的随机过程来实施,所述随机过程使用计算机可执行指令(如随机或伪随机数)来定义。

[0052] 在一些情况下,对角度范围进行粗略地取样并且然后进行细化。例如,使用  $20^\circ$  的角度步长,然后是  $5^\circ$  的步长(跳过先前取样角度),并且然后是  $1^\circ$  的步长(跳过先前取样角度)。在另一实例中,被称为“剂量对称”的获取以  $0^\circ$  的样品倾斜开始,然后是  $+2^\circ$ 、 $-2^\circ$ 、 $+4^\circ$ 、 $-4^\circ$ 、 $+6^\circ$ 、 $-6^\circ$  等角度。在又其它实例中,可使用即时重构来挑选一个或多个角度,所述即时重

构可检测哪个角度将含有最有用的信息。

[0053] 鉴于所公开的本发明的原理可应用于许多可能的实施例,应认识到,所说明的实施例仅为优选的实例并且不应被视为是限制性的。因此,我们要求保护落在在所附权利要求的范围和精神内的所有。

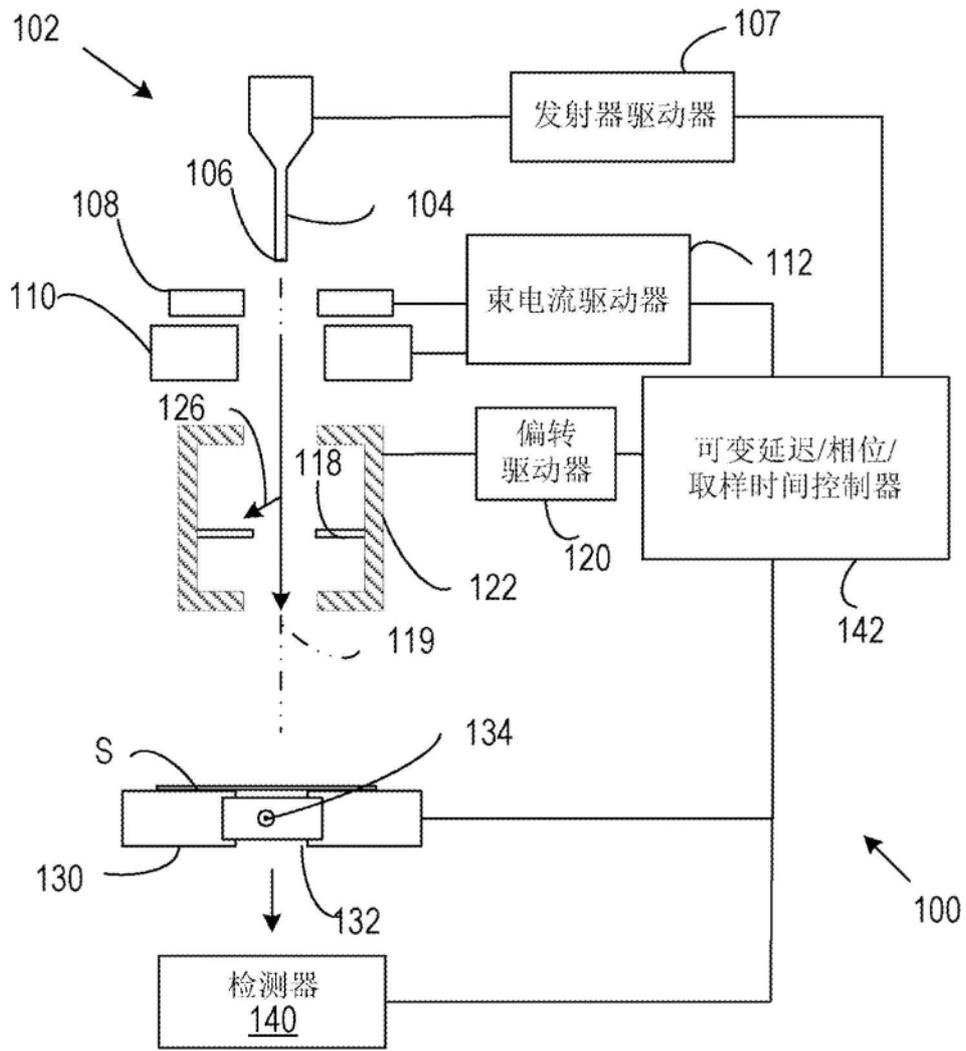


图1A

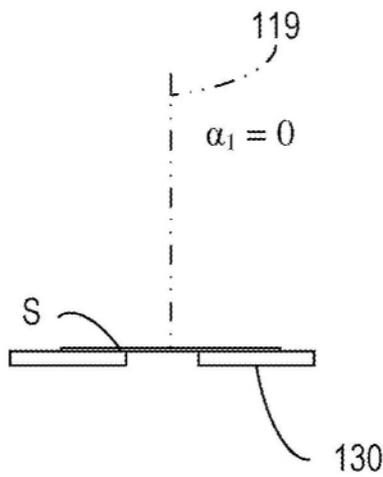


图1B

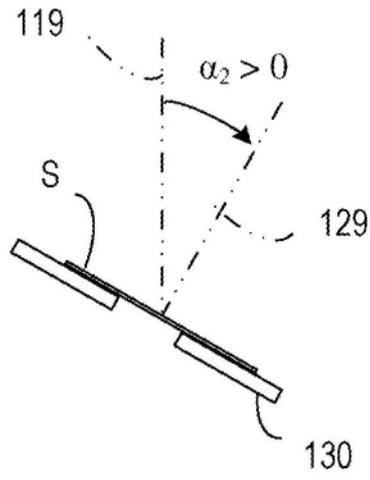


图1C

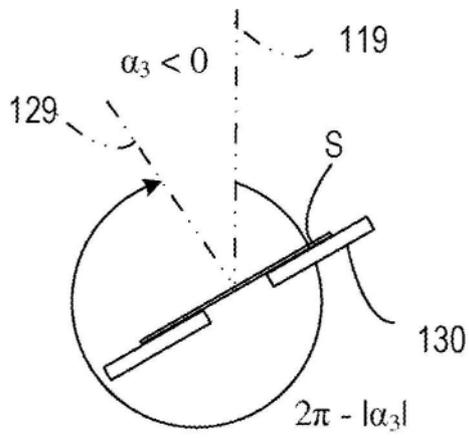


图1D

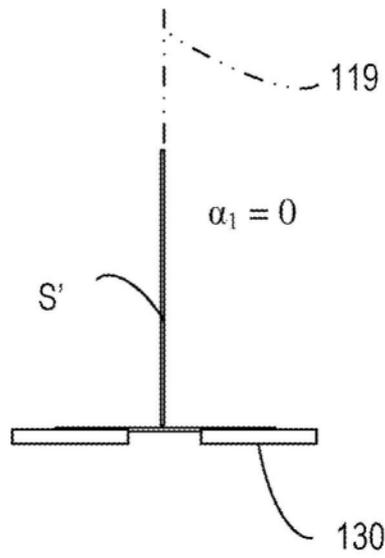


图1E

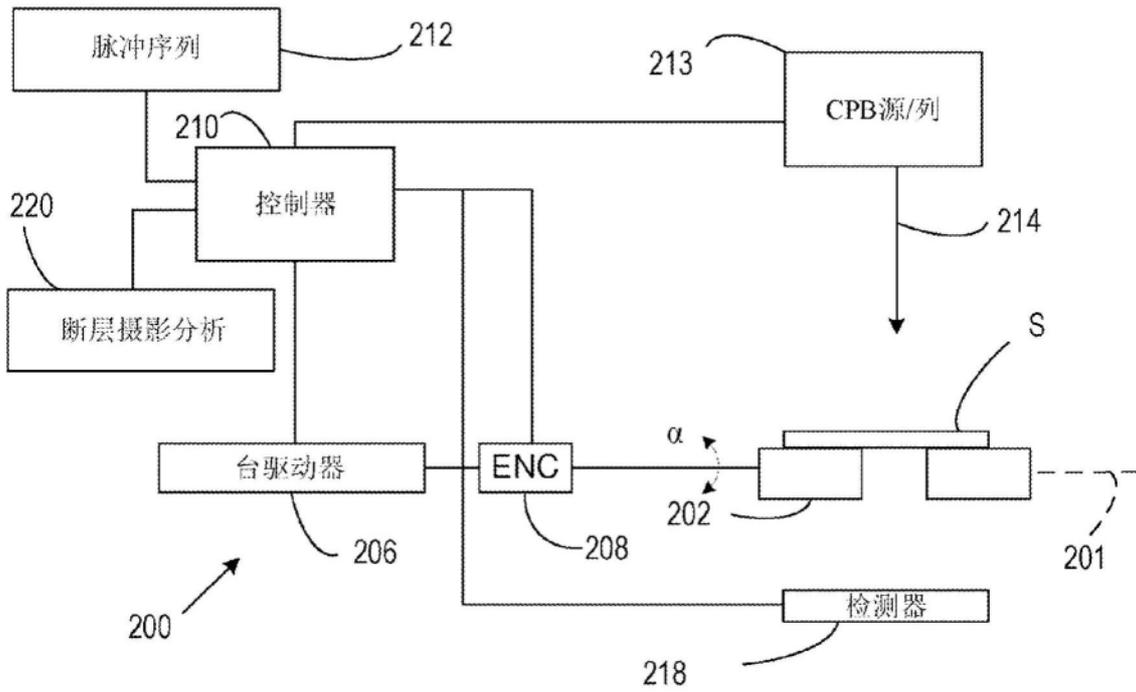


图2

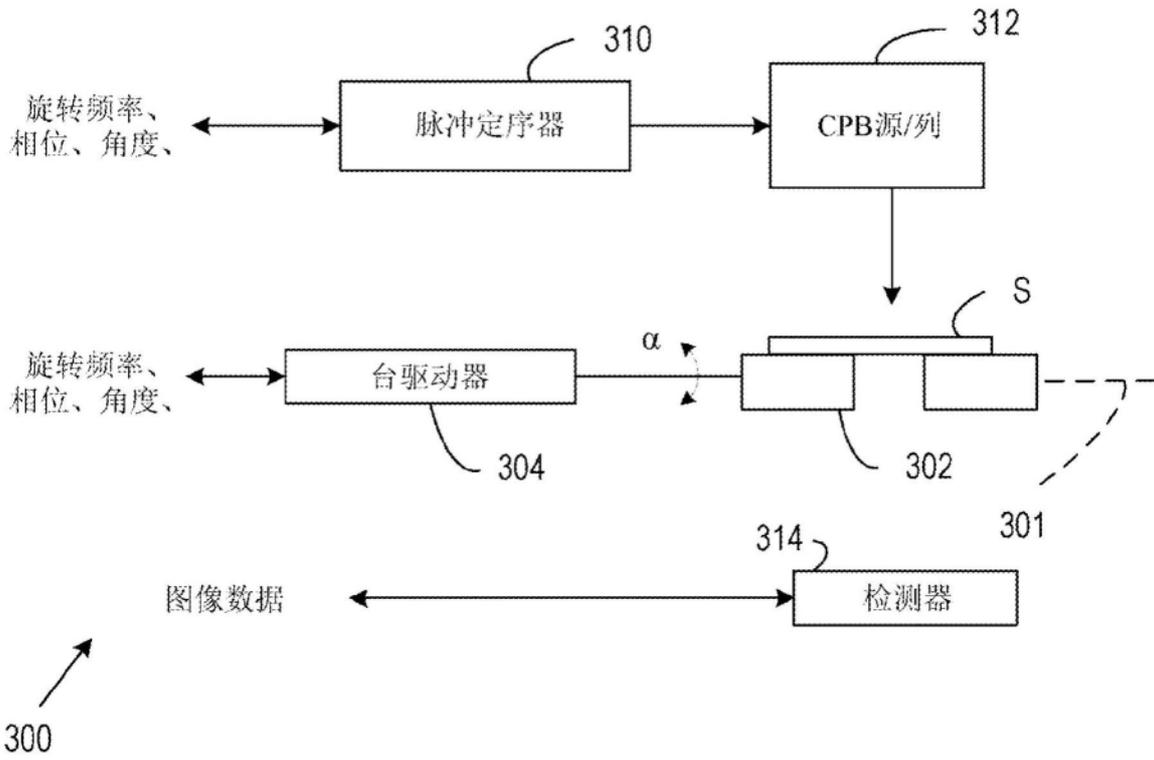


图3

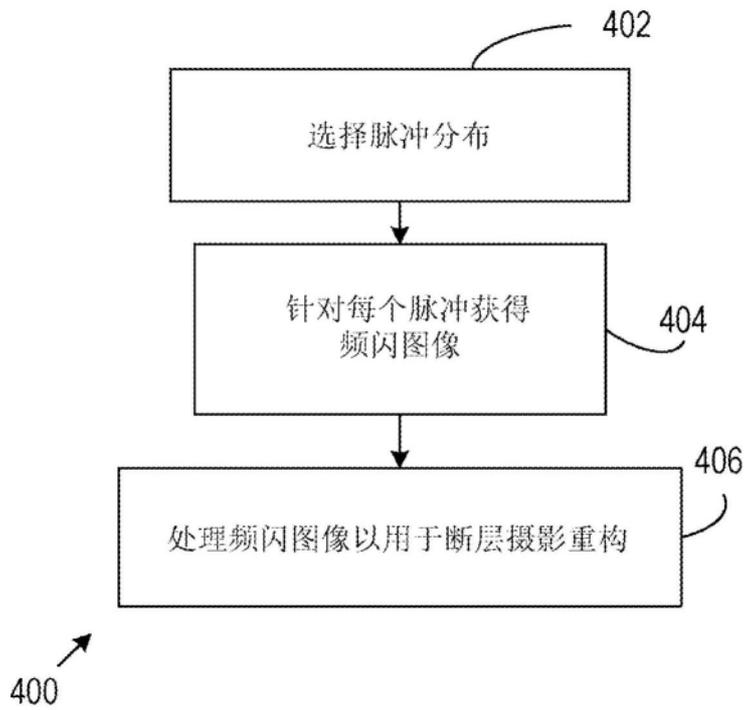


图4

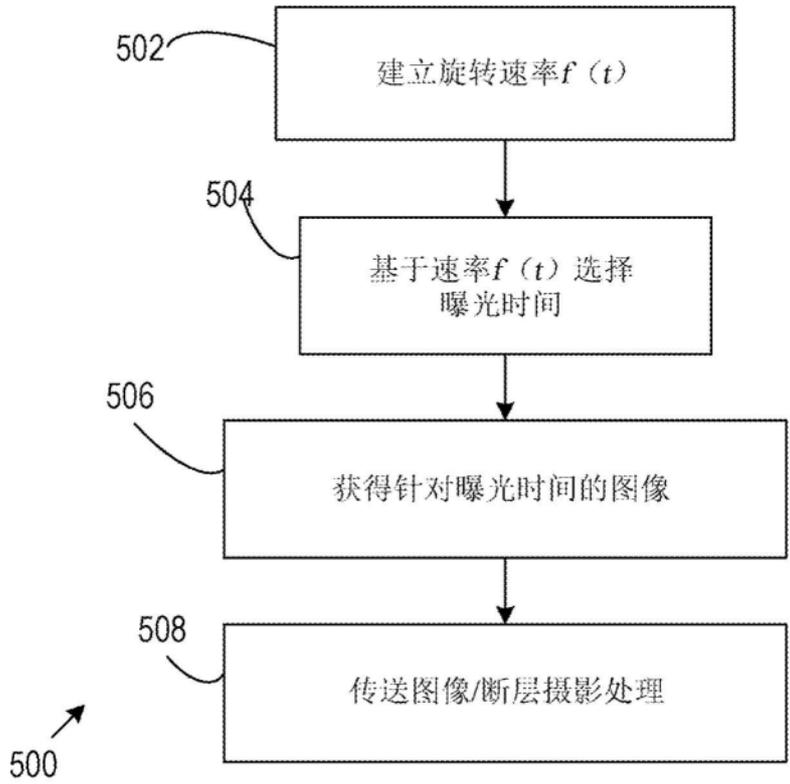


图5

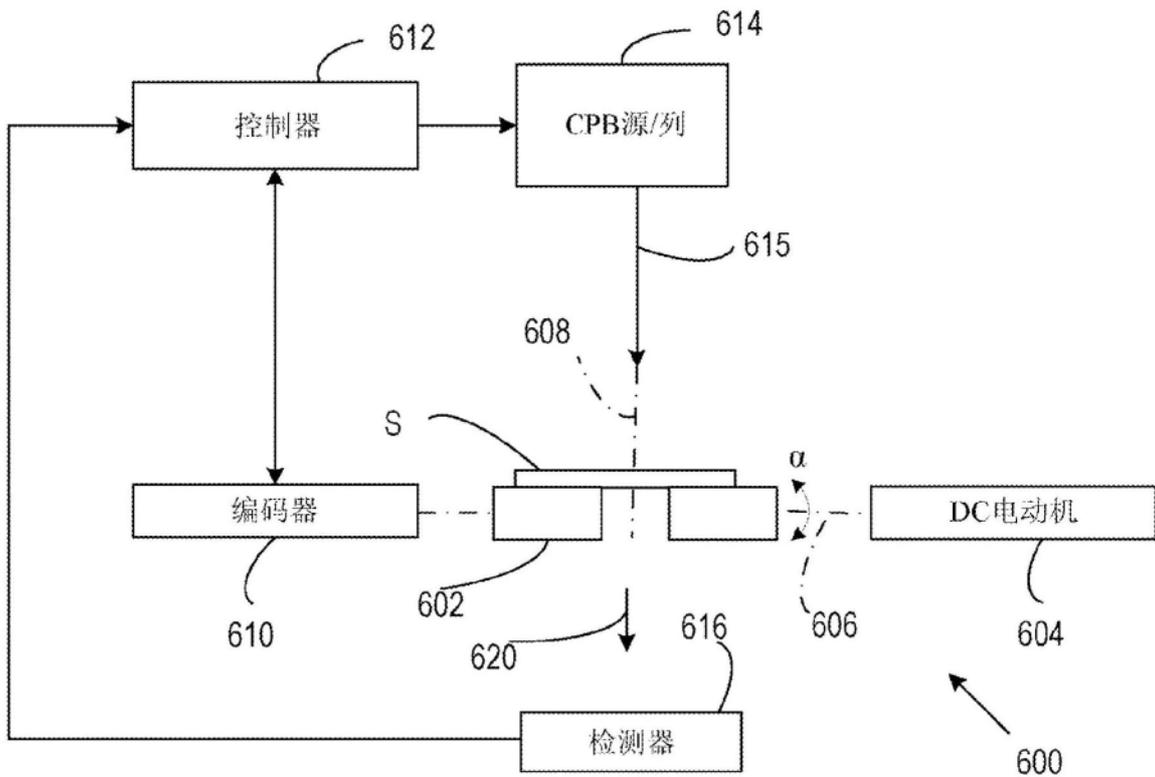


图6

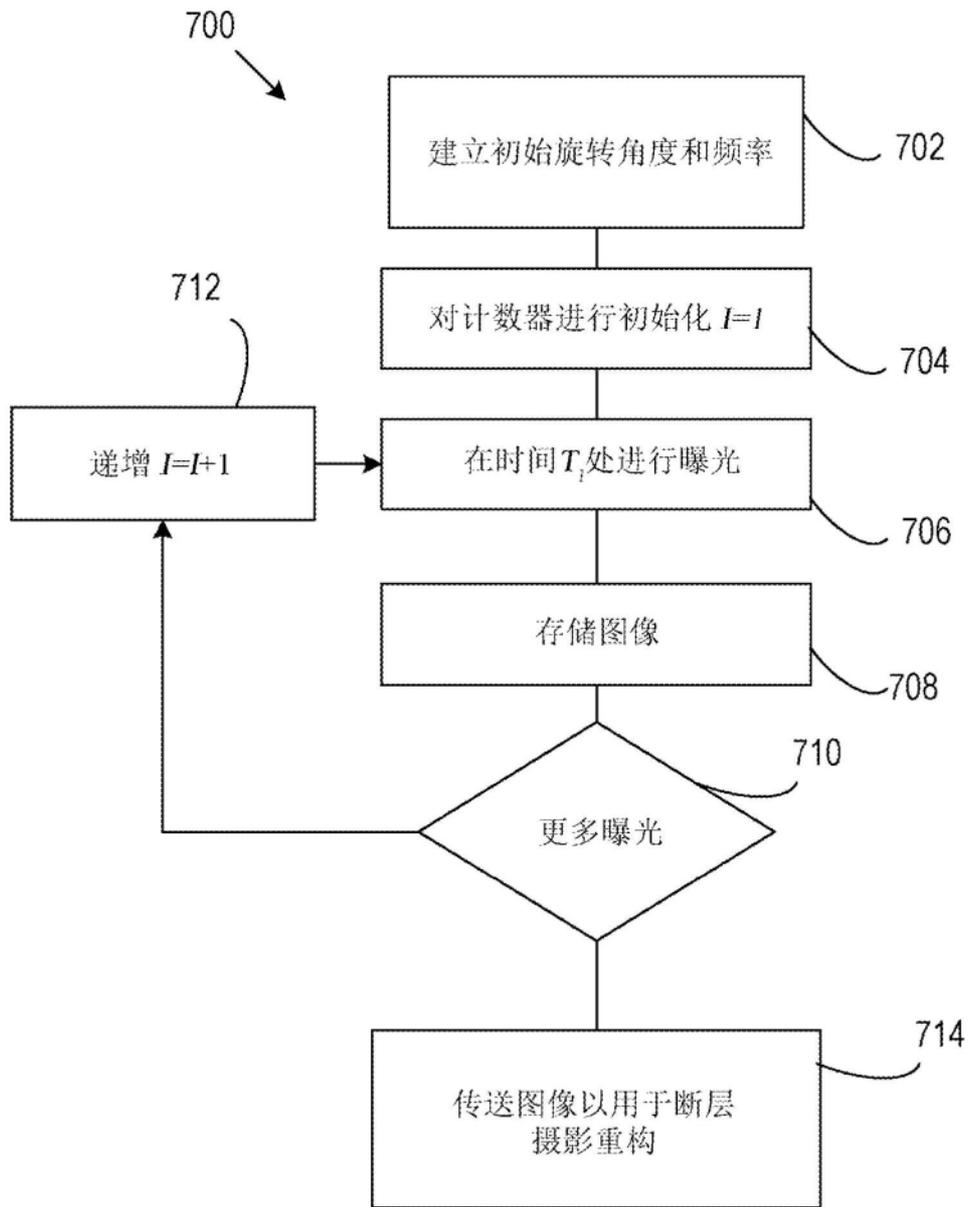


图7

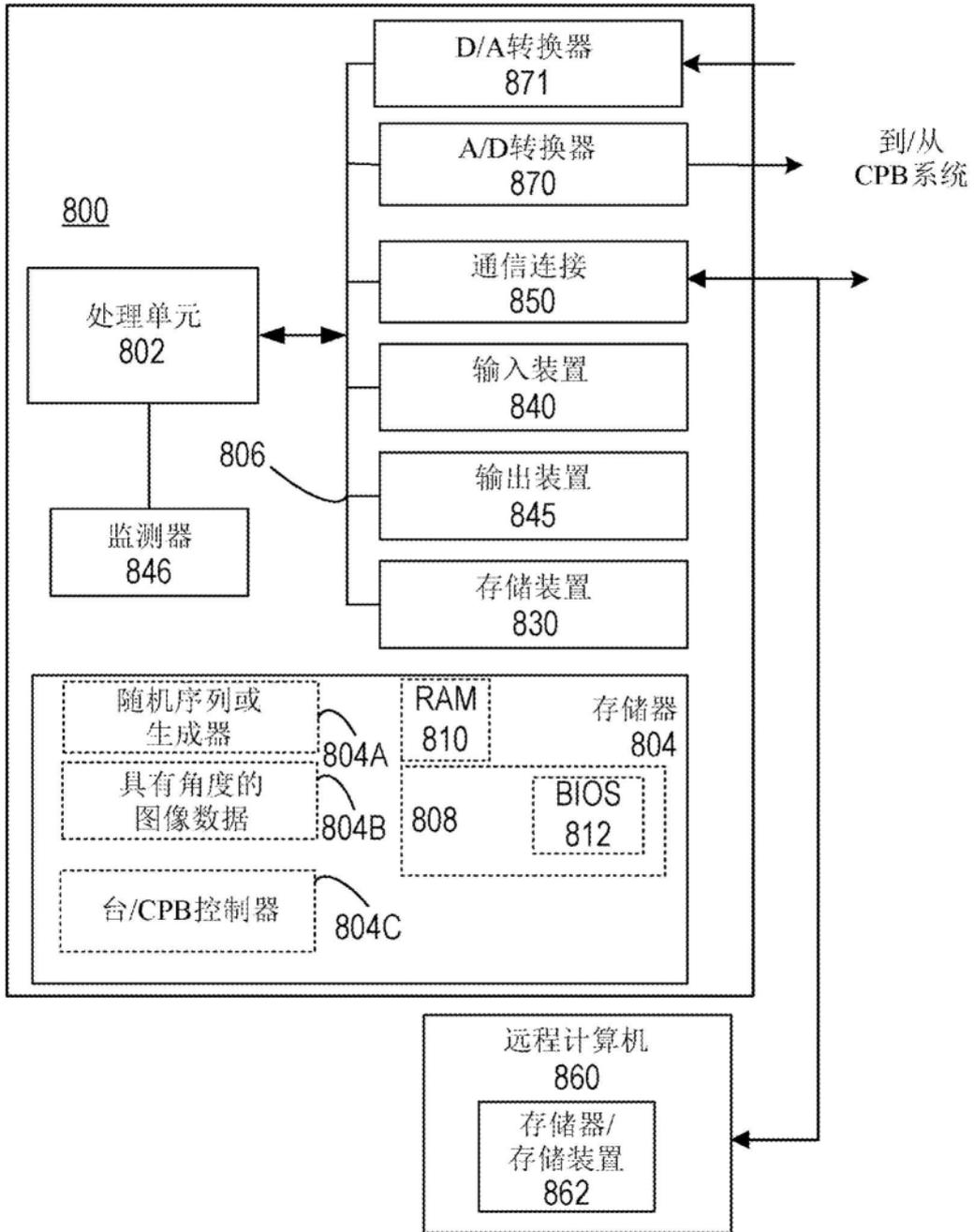


图8