



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103403520 B

(45) 授权公告日 2015. 12. 23

(21) 申请号 201280006697. 2

H01J 37/26(2006. 01)

(22) 申请日 2012. 01. 28

(56) 对比文件

(30) 优先权数据

61/437474 2011. 01. 28 US

CN 101644639 A, 2010. 02. 10, 全文.

CN 1635365 A, 2005. 07. 06, 全文.

JP 特开 2007-248082 A, 2007. 09. 27, 全文.

US 2008/0296498 A1, 2008. 12. 04, 全文.

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 07. 26

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2012/023053 2012. 01. 28

(87) PCT国际申请的公布数据

W02012/103534 EN 2012. 08. 02

(73) 专利权人 FEI 公司

地址 美国俄勒冈州

(72) 发明人 J. 布莱克伍德 M. 布雷

C. 塞诺维奇 C. 巴格

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001

代理人 易蛟鹤 汤春龙

(51) Int. Cl.

G01N 1/28(2006. 01)

H01J 37/20(2006. 01)

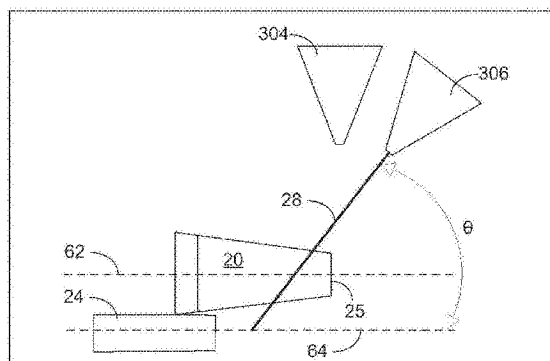
权利要求书2页 说明书10页 附图10页

(54) 发明名称

TEM 样品制备

(57) 摘要

一种制备超薄 TEM 样品的改进的方法, 该方法将背面打薄与附加清洁步骤组合起来以清除朝向 FIB 的基底表面上的表面缺陷。此附加步骤导致产生清洁、均匀的硬掩模, 该硬掩模控制样品打薄的最终结果, 并且允许可靠并且稳健地制备具有小至 10nm 范围厚度的样品。



1. 一种制备用于 TEM 分析的样品的方法,所述方法包括:
将基底加装到离子束系统内;
通过离子束铣削将样品与所述基底分离;
从该基底提取该样品,该样品具有纵轴、顶侧和底侧;
将该样品附装到样品支座上;
定位该样品支座使得该离子束横穿于该样品的纵轴;
铣削该样品的底侧以清除该样品的底表面的至少一部分以产生均匀平坦的表面;
定位该样品支座使得该样品的底侧朝向该离子束源并且使得该离子束与该样品的纵轴平行;

通过采用铣削模式来引导该离子束而打薄该样品,所述铣削模式将该样品的至少一部分打薄至 30nm 或更小的厚度。

2. 如权利要求 1 所述的方法,其中,将该样品附装到样品支座包括:
绕与该样品纵轴垂直的轴旋转该样品以倒置该样品的顶侧和底侧;以及
将倒置的样品附装到样品支座。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其中,定位该样品支座使得该离子束横穿于该样品的纵轴包括定位该样品支座使得该离子束和该样品的纵轴之间的角度在从 35 度到 90 度。

4. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其中,通过采用铣削模式来引导该离子束而打薄该样品包括将该样品的至少一部分打薄至 15 nm 或更小的厚度。

5. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其中,铣削该样品的底侧以清除该样品的底表面的至少一部分以产生均匀平坦的表面包括清除该样品的底部至少 25 nm。

6. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其中,该基底为半导体晶片或所述半导体晶片的一部分,并且有待提取的样品为有待使用 TEM 观察的集成电路的一部分。

7. 如权利要求 2 所述的方法,其中,从该基底提取该样品包括将微探针附装到释放的样品和使用附装的微探针从该基底提取该样品,并且其中,将该样品附装到样品支座包括将该样品附装到样品支座并将该微探针与附装的样品分离。

8. 如权利要求 7 所述的方法,其中,绕与该样品纵轴垂直的轴旋转该样品以倒置该样品的顶侧和底侧包括通过旋转该微探针来倒置该样品使得颠倒顶侧和底侧的定向。

9. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其中,铣削该样品的底侧以清除该样品的底表面的至少一部分以产生均匀平坦的表面包括使用具有第一加速电压的离子束铣削该样品的底侧并且然后在第二加速电压下铣削该样品的底侧,该第二加速电压小于该第一加速电压的一半。

10. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其中,铣削该样品的底侧以清除该样品的底表面的至少一部分以产生均匀平坦的表面包括使用具有 5 kV 或更低的加速电压的离子束铣削该样品的底侧。

11. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其中,铣削该样品的底侧以清除该样品的底表面的至少一部分以产生均匀平坦的表面包括使用具有 30 kV 或更高的加速电压的离子束铣削该样品的底侧。

12. 一种制备用于 TEM 分析的超薄 TEM 样品的方法,该方法包括:

将基底加装到离子束系统内,该离子束系统包括离子束源和用于使离子束沿轴聚焦并

聚焦到该基底上的光学器件；

通过离子束铣削使样品从该基底释放，所述样品具有纵轴、最靠近离子束源的顶侧和与该离子束源相对的底侧；

将微探针附装到释放的样品；

使用附装的微探针从该基底提取该样品；

通过旋转该微探针来倒置该样品使得颠倒顶侧和底侧的定向；

将倒置的样品附装到样品支座并且将该微探针与附装的样品分离；

定位该样品支座使得该离子束轴相对于该样品的纵轴在 30 度到 90 度的角度；

从该样品的底部清除至少 25nm 以产生平行于该离子束轴的平面表面；

定位该样品支座使得该样品的顶侧与该离子束源相反地定向并且使得该离子束轴与该样品的纵轴平行；以及

通过采用铣削模式来引导该离子束而打薄该样品，所述铣削模式将该样品的至少一部分打薄至 30 nm 或更小的厚度。

13. 一种用于制备超薄 TEM 样品的设备，包括：

离子束系统，该离子束系统包括离子束源、用于使离子束沿轴聚焦并聚焦到基底上的光学器件和用于操纵样品的显微操纵器；以及

用于控制该设备装置，所述装置包括：

用于将希望的样品位置设置在该基底上的部件；

用于通过离子束铣削将样品与该基底分离的部件；

用于从该基底提取该样品的部件，所述样品具有纵轴、顶侧和底侧；

用于将该样品附装到样品支座的部件；

用于定位该样品支座使得该离子束横穿于该样品的纵轴的部件；

用于铣削该样品的底侧以清除该样品的底表面的至少一部分以产生均匀平坦的表面的部件；

用于定位该样品使得该样品的底侧朝向该离子束源并且使得该离子束与该样品的纵轴平行的部件；以及

用于通过采用铣削模式来引导该离子束而打薄该样品的部件，所述铣削模式将该样品的至少一部分打薄至 30 nm 或更小的厚度。

TEM 样品制备

[0001] 本申请要求 2011 年 11 月 28 日提交的美国临时申请 61/437,474 的优先权,该申请通过引用结合于此。

[0002] 发明技术领域

[0003] 本发明涉及用于透射电子显微镜的样品的制备,并且具体地涉及具有 30nm 或更小的厚度的样品的制备。

[0004] 发明背景

[0005] 随着半导体几何结构继续收缩,制造商越来越依靠透射电子显微镜 (TEM) 来监控工艺、分析缺陷和调查界面层形态。透射电子显微镜 (TEM) 允许观察员看到具有纳米级尺寸的特征。与只使材料的表面成像的 SEM 相比,TEM 还允许分析样品的内部结构。在 TEM 中,宽束冲击样品并且透射穿过样品的电子被聚焦以形成样品的影像。样品必须足够薄以允许原光束中的电子行进穿过样品并在相反位置上射出。

[0006] 因为样品必须很薄以使用透射电子显微术观察 (无论是 TEM 还是 STEM),所以样品的制备会是精细、耗时的工作。此处所用的术语“TEM”是指 TEM 或 STEM,并且制备用于 TEM 的样品的参考文献应理解成还包括制备用于在 STEM 上观察的样品。此处所用的术语“STEM”是指 TEM 和 STEM 两者。

[0007] TEM 样品厚度通常小于 100nm,但对于一些应用而言,样品必须薄很多。在 30nm 和以下的先进工艺的情况下,为了避免小尺度结构之间的重叠,样品厚度需要小于 20nm。目前,打薄至 30nm 是困难和不稳健的。样品厚度的变化导致样品弯曲、过度铣削、或其他灾难性的缺陷。对于如此小的样品,制备是 TEM 分析中的关键步骤,TEM 分析主要确定结构特征的质量和最小和最关键结构的分析。

[0008] 即使 TEM 分析可以发现的信息会非常有价值,但制作和测量 TEM 样品的整个过程历史性地如此劳动密集和耗时以至于使用此类型分析用于制造工艺控制已不实际。而在样品制备中使用 FIB 方法将制备用于 TEM 分析的样品所需的时间减少至仅几个小时,分析来自给定晶片的 15 至 50 个 TEM 样品不是不寻常的。因此,样品制备的速度在 TEM 分析的使用中尤其对于半导体工艺控制而言是一个非常重要的因素。

[0009] 制备超薄 (厚度小于 30nm) TEM 样品的一个很重要的问题通常称为“垂落 (curtaining)”,其中,打薄后,集成电路的表面上的不均匀的高密度材料在 TEM 样品上产生非平面的面。具有这些类型结构或密度变化的样品的自上而下打薄将导致竖直脊从样品的顶部 (顶部被定义为最靠近离子束源) 附近的密度较大的材料 (即,金属线) 向下延伸至横截面的面,沿与离子束方向平行的方向走向。最经常在半导体材料中观察到垂落,在半导体材料中,多层图案化的具有低溅射效率的材料阻挡更快溅射效率的材料。在展示不同地形区域的材料中也可以观察到垂落,在这些区域中,溅射效率的变化随铣削入射角而不同。垂落人为现象降低了 TEM 成像的质量并限制了最小有用试样厚度。对于此处被定义为具有小于 30nm 厚度的样品的超薄 TEM 样品,明显地,两个横截面的面非常靠近,所以垂落影响造成的厚度变化会导致样品不可用。图 1A 和图 1B 示出了在样品面上显示有垂落的打薄后的样品的显微照片。

[0010] 为了在 TEM 样品制备中最小化垂落,众所周知的是倒置样品使得样品(基底)的底部面朝 FIB 柱。由于样品的基底部分将不具有如金属线或晶体管的嵌入特征,垂落人为现象将不会被引入到包含相关区域的样品面的那一部分,即,半导体的顶面上的电路层。虽然此技术对于具有 50nm 至 100nm 厚度的 TEM 样品而言相当有效,但对于具有 30nm 或更小的样品厚度的超薄样品而言,即使在打薄前通过倒置样品制备的样品经常显示铣削人为现象,导致不希望的不均匀样品面。

[0011] 因此,仍需要一种 TEM 样品制备的改进的方法,以允许制备超薄 TEM 样品。

[0012] 发明概述

[0013] 因此,本发明的目标是提供一种制备超薄 TEM 样品的改进的方法。本发明的优选实施例将目前的背面打薄工艺与附加清洁步骤结合起来以清除面朝 FIB 的基底表面上的表面缺陷。此附加步骤导致产生清洁、均匀的“硬掩模”,该硬掩模控制样品打薄的最终结果,并且允许可靠并且稳健地制备具有小至 10nm 范围厚度的样品。

[0014] 为了更好地理解以下本发明的详细描述,上文已经相当广泛地概述了本发明的特征和技术优点。下文将描述本发明的附加特征和优点。本领域的普通技术人员应认识到,所披露的概念和具体实施例可以容易地用作修改或设计用于实施本发明的相同目的的其他结构的基础。本领域的普通技术人员还应意识到此类等效构造不脱离所附权利要求书中所要求保护的本发明的精神和范围。

[0015] 附图简要说明

[0016] 为了更加彻底地理解本发明和本发明的优点,现在结合附图参考以下说明,其中:

[0017] 图 1A 为显示垂落的打薄后的 TEM 样品的显微照片;

[0018] 图 1B 为倒置后的 TEM 样品的显微照片,其中,垂落在相关区域外;

[0019] 图 2 为显示有待在更大基底内提取的 TEM 样品的位置的示意性图示;

[0020] 图 3A 至图 3D 为显示典型现场从块型 TEM 提出的顺序的显微照片影像;

[0021] 图 4A 至图 4C 为显示将倒置后的 TEM 样品安装在 TEM 样品格栅上的顺序的显微照片影像;

[0022] 图 5 为显示安装在 TEM 样品格栅上的倒置后的 TEM 样品的示意性图示;

[0023] 图 6 为示意性图示,显示了倾斜的倒置后的 TEM 样品从而使得 FIB 可以用于清洁基底背面表面;

[0024] 图 7A 示出了清洁前的基底背面表面的自顶向下的显微照片;

[0025] 图 7B 为图 7A 的样品的侧视图的显微照片,示出了 FIB 切削线的位置;

[0026] 图 7C 为 FIB 清洁切削后并且实质性上清除了基底背面表面上的所有不均匀性的图 7A 的基底背面表面的自顶向下的显微照片;

[0027] 图 8A 和 8B 示出了已经使用 FIB 清洁基底背面表面后打薄样品的过程;

[0028] 图 9 示出了在没有基底背面清洁步骤情况下的所生产的约 20nm 厚 TEM 样品的显微照片;

[0029] 图 10 示出了使用附加基底背面清洁步骤的所生产的厚度小于 15nm 的 TEM 样品的显微照片;

[0030] 图 11 为一个流程图,示出了根据本发明的优选实施例制作超薄 TEM 样品的步骤;

以及

[0031] 图 12 示出了可以用于实现本发明的典型双束 FIB/STEM 系统。

[0032] 不旨在按比例绘制附图。在附图中,用相同的数字表示各图中所示的每个完全相同或几乎完全相同的部件。出于清晰性的目的,在每张图中,可能没有为每个部件进行标号。

[0033] 优选实施方案的详细描述

[0034] 本发明的优选实施例主要针对制备超薄 TEM 样品的新方法。本发明的优选实施例将目前的背面打薄工艺与附加清洁步骤结合起来以清除面朝 FIB 的基底表面上的表面缺陷。在典型的 TEM 样品提取过程中,样品的底部表面将积聚来自样品提取离子铣削过程的再沉积材料。在大块材料清除过程中产生的铣削人为现象也会造成底部表面上的不均匀性。申请人已经发现样品的基底侧的表面上的这些材料或地形学变化对 TEM 样品打薄过程具有重要影响。在 TEM 样品(也称为薄片)被打薄时,这些类型的表面变化贯穿铣削过程并导致限制样品可以被打薄至的最小厚度的侧壁不均匀性。申请人已经发现这些类型的不均匀性已经导致历史性地限制成功地将样品打薄至比 30nm 更薄。

[0035] 本发明的优选实施例将附加步骤引入背面打薄 TEM 样品的制备,在该 TEM 样品中,用 FIB “清洁”面向 FIB 的基底表面以形成均匀的背面基底表面。如以下更加详细描述, FIB 可以用于铣削掉“脏”基底表面,形成了在 TEM 样品打薄过程中起到一种“硬掩模”作用的清洁、均匀的基底表面,在 TEM 样品打薄过程中,它保护下面(当样品被倒置时)相关区域并且它控制光滑、平坦的 TEM 样品面的产生。尽管不希望地增加了制备 TEM 样品所需的时间量,形成硬掩模的附加步骤允许可靠并且稳健地制备具有小至 10nm 范围厚度的样品。此处描述的方法的可靠性使这些方法特别适合用于自动化样品制备。

[0036] 虽然希望通过铣削掉样品背面的一部分形成的平坦表面尽可能均匀地平坦以避免在薄片打薄过程中引起不规则性或人为现象,但本领域普通技术人员将认识到必须根据生产 TEM 样品所增加的时间和费用权衡此愿望。如以下更加详细描述,申请人已经发现使用离子束例如 30kV 的镓离子束来铣削掉或“切削掉”所提取的样品的底部的一部分通常产生足够平滑的表面以制备超薄 TEM 样品。如此处所使用的,词组“超薄 TEM 样品”将用于表示整个薄片或薄片的一部分(如足够大用于 TEM 成像的“窗口”)被打薄至 30nm 或更小的厚度的样品。

[0037] 本发明的优选方法或装置具有许多新方面,并且出于不同的目的,因为本发明可以体现在不同的方法或装置,所以不需要在每个实施例中介绍每个方面。而且,所描述的实施例的许多方面是可以单独获得专利的。

[0038] 图 11 为一个流程图,示出了根据本发明的优选实施例制作超薄 TEM 样品的步骤。图 2 至图 10 中示出了该过程的各个步骤。

[0039] 首先,在步骤 201 中,基底如半导体晶片加装进具有 FIB 柱和 SEM 柱二者的双束 FIB/STEM 系统。还参见图 12,典型的双束系统 302 配置是具有纵轴的电子柱 304 以及具有相对于竖直而倾斜(一般倾斜大约 52 度)的轴的离子柱 306。如本领域内众所周知的,尽管还可以手动转移晶片,但优选地通过多晶片载体和自动装载机器人(未示出)转移晶片。

[0040] 在步骤 202 中,确定有待从基底上提取的样品(包含相关特征)的位置。例如,基底可以是半导体晶片或半导体晶片的一部分,并且有待提取的部分可以包括有待使用 TEM

观察的集成电路的一部分。可以使用现有技术中已知的各种方法确定样品的位置。例如，可以使用基于用于半导体晶片的 CAD 数据的坐标定位样品位置。还可以使用影像识别软件自动定位晶片表面上的薄片位置。例如从美国马萨诸塞州纳蒂克的康奈视公司获得合适的影像识别软件。可以“训练”影像识别软件以通过使用具有类似特征的样品影像或通过使用来自 CAD 数据的几何信息定位所希望的薄片位置。

[0041] 图 2 为显示有待在更大基底 21 上提取的样品 20 的位置的示意性图示。为了方便，朝向最靠近带电粒子束的基底表面的样品的上部分此处将称为样品 26 的“顶部”，即使从该基底上移除该样品和改变其定向。同样，远离最靠近带电粒子束的基底表面定向的和朝向大块基底材料的样品的下部分此处将称为样品 27 的“底部”，即使从该基底上移除该样品和改变其方向。通过虚线 62 示出了样品的纵轴。

[0042] 在步骤 204 中，通过用聚焦离子束铣削将样品 20 完全或部分地与基底 21 分离。如以下所讨论的，可以通过使用从美国俄勒冈州希尔斯伯勒的 FEI 公司的本发明的受让人可以获得的双束 FIB/SEM 系统如 Helios1200Expida™1255 双束™系统来完成此步骤。接下来，通过 FIB 感应的化学气相沉积将微探针尖 23 附装到样品上。在仅部分地分离样品的情况下，然后通过进一步的 FIB 铣削使样品完全释放。此过程通常产生尺寸大约为 $10 \times 5 \times 5 \mu\text{m}$ 的楔形样品 20。在步骤 206 中，然后通过所附装的微探针 23 将样品 20 提出基底 21。在图 3A 至图 3D 的显微照片中按顺序示出了此顺序。

[0043] 在步骤 208 中，然后通过所附装的微探针将样品运至如图 4A 中所示的 TEM 样品支座 24 上。样品支座 24 可以包括例如 TEM 指型格栅。还参见图 12，该 TEM 样品支座优选地竖直安装在一个台上从而使得 TEM 样品支座 24 的纵轴 64 与该样品台表面的平面垂直。在图 4A 中所示的实施例中，样品的纵轴 62 基本上与 TEM 样品支座 24 的纵轴 64 平行。尽管其他定向是可能的，但为了简单起见，此处描述了此定向。

[0044] 在步骤 210 中，然后通过旋转微探针倒置样品从而使得样品的基底侧 25（也称为背面）面朝上。换言之，为了颠倒样品的顶侧和底侧，围绕与样品的纵轴垂直的轴旋转样品。图 4B 示出了靠近 TEM 样品支座的样品的自上而下图。在步骤 212 中，如图 4C 中所示，将样品 20 附装到样品支座 24（再次用 FIB 感应的 CVD）上并且微探针 23 所附装在的样品的端部被切开。图 5 为显示安装在 TEM 样品格栅上的倒置 TEM 样品的示意性图示。

[0045] 如显微照片 4B 和 4C 中所示，基底背面（倒置样品后面朝上）具有再沉积或铣削人为现象造成的实质性的不均匀。通过倒置样品已经向上旋转此“脏”基底面并且该基底面面向 FIB。申请人已经发现基底背面上的这些不均匀性对将样品打薄至 30nm 或更小厚度的最终结果具有重要影响。因此，在步骤 214 中，鉴于 FIB 系统中所使用的台 / 操纵器，倾斜样品从而使得 FIB 将尽可能与基底背面表面垂直。图 6 中示意性地示出了这种情况。在图 6 中所示的系统中，从 0 度（竖直）到大致 90 度（水平）倾斜 TEM 样品支座 24。在步骤 216 中，然后使用 FIB 以切削线 27 所示的角度铣削掉基底背面表面。但有待清除的材料实际量值将通常取决于所存在的表面不规则性

[0046] 若 FIB 相对于 SEM 柱的纵轴处于 52 度下，则将使 FIB 的切削线 28 相对于样品支座 24 的轴 64 处于大约 38 度下（并且因此相对于样品的纵轴 62）。虽然图 6 中的 FIB 切削线 27 不与基底背面表面垂直，但在此角度下的清洁切削将仍足够清除以上所述的样品表面不均匀性并产生均匀平坦的背面表面。术语“均匀平坦”的使用旨在表达铣削后背面

表面为平面且没有任何明显的不规则性。本术语不旨在隐含平坦表面有必要与样品纵轴垂直。事实上,如此处所描述的,平坦背面表面相对于样品的纵轴的角度可以在宽范围角度内的任何地方,优选地在从 35 度到 90 度的任何地方。

[0047] 可以通过在较低操作加速电压下使用 FIB 将基底背面表面整理平滑或整理平坦从而铣削掉或切削掉所提取的样品的底部部分。这在不引起明显再沉积和铣削人为现象的情况下用于清除表面上的不均匀性,产生后切削清洁和平滑的基底背面表面。优选地,使用例如 5kV FIB 而非通常用于清除大块材料的约 30kV FIB 来完成背面铣削。然而,申请人已经发现此步骤对 FIB 束破坏不特别敏感,并且所以,不总是需要低 kV FIB 铣削用于清洁背面表面。换言之,使用 30kV FIB 清除背面表面的一部分经常将产生足够平滑的表面以大大提高薄片的质量。将不得不根据增加的生产时间来权衡获得更加平滑表面的愿望以确定在给定的情况下哪种方法最优。

[0048] 图 7A 示出了上述清洁切削前的基底背面表面 25 的自顶向下的显微照片。图 7B 为图 7A 的样品 20 的侧视图的显微照片,其中虚线 27 示出了切削线的位置。并且最后,图 7C 为 FIB 清洁切削(使用 5kV FIB)后并且实质性上清除了基底背面表面 25 上的所有不均匀性的图 7A 的基底背面表面 25 的自顶向下的显微照片。

[0049] 在步骤 218 中,一旦已经形成了更均匀的基底背面表面,则可以将样品倾斜回使得基底背面表面再次面向 FIB 束。然后在步骤 220 中,优选地从两侧通过用如图 8A 和图 8B 中所示的离子束铣削,将样品打薄成电子透明薄片。如上所述产生的面向 FIB 的均匀表面消除了 TEM 样品的两侧上的横截面厚度变化。图 9 示出了在没有基底背面清洁步骤情况下的所生产的 20nm 厚 TEM 样品的显微照片。如图 9 中所示,此 TEM 样品具有实质性的厚度变化。然而,图 10 示出了使用附加基底背面清洁步骤的生产的厚度小于 15nm 的 TEM 样品的横截面显微照片。如图 10 中的样品上没有垂落所示,尽管图 10 中的样品比图 9 中的样品薄至少 25%,但图 10 中并没有呈现在图 9 的样品中看到的厚度变化。

[0050] 最后,在步骤 222 中,或者在双束系统中或者在运至单独 TEM 仪器后使用电子束和 TEM 检测器可以使样品 20 成像。

[0051] 图 12 描绘了示例性双束 FIB/SEM 系统 302 的实施例,该系统被配备成实施根据本发明的方法。如以上所讨论的,本发明的实施例可以用于多种多样的应用中,其中材料沉积到基底的目标表面上,包括从玻璃化生物样品上制备 TEM 样品。通常在双束电子束/聚焦离子束系统内进行这种样品的制备和分析,如现在所述的那个。图 17 描绘了可以用于实施本发明的实施例的示例性双束系统 302。例如从美国俄勒冈州希尔斯伯勒的 FEI 公司、本申请的受让人可以商购适合的双束系统。虽然以下提供了适合的硬件的示例,但本发明不局限于以任何具体类型硬件被实现。

[0052] 双束系统 302 具有竖直安装的电子束柱 304 和以大约与可抽空试样室 308 的垂线成 52 度角安装的聚焦离子束(FIB)柱 306。可以通过泵系统 309 抽空该试样室,该泵系统通常包括涡轮分子泵、油扩散泵、离子吸气泵、涡旋泵中的一个或多个或者其组合或其他已知的泵送装置。

[0053] 电子束柱 304 包括用于产生电子的电子源 310(如肖特基发射器或冷场发射器)和形成电子 316 的精细聚焦束的电子光学透镜 312 和 314。电子源 310 通常保持在工件 318 的电势以上的 500V 和 30kV 之间的电势下,该工件通常保持在接地电势。

[0054] 因此,电子以大约 500eV 到 30keV 的着陆能量冲击工件 318。可以在工件上应用负电势以减小电子的着陆能量,这减小了电子与工件表面的交互作用量,从而减小了成核位点的尺寸。工件 318 可以包括例如半导体器件、微机电系统 (MEMS)、或光刻掩膜。可以通过偏转线圈 320 在工件 318 的表面上定位并且扫描电子 316 的束的冲击点。通过扫描电子显微镜电源和控制单元 322 控制透镜 312 和 314 以及偏转线圈 320 的操作。透镜和偏转单元可以使用电场、磁场或它们的组合。

[0055] 工件 318 在试样室 308 内的可移动台 324 上。台 324 可以优选地沿水平面 (X 轴和 Y 轴) 和垂直 (Z 轴) 移动并且可以用大约六十 (60) 度倾斜和绕 Z 轴旋转。可以打开门 327 以用于将工件 318 插到 X-Y-Z 台 324 上并且 (若使用的话) 还用作内部供气容器 (未示出)。联锁该门从而使得若抽空了试样室 308 时不能打开该门。

[0056] 多个喷气系统 (GIS) 330 (示出了两个) 安装在真空室上。每个 GIS 包括用于容装前驱体或活化材料的容器 (未示出) 和用于将气体引导向工件的表面的针 332。每个 GIS 进一步包括用于调节前驱体材料向工件的供应的装置 334。在本示例中,该调节装置被描述成一个可调节的阀门,但该调节装置还可以包括例如用于加热前驱体材料以控制其蒸汽压力的调节加热器。

[0057] 当电子束 316 内的电子冲击工件 318 时,次级电子、反向散射电子和俄歇电子被发射并且可以被检测到以形成影像或确定该工件的信息。例如,如 Everhard-Thornley 检测器的次级电子检测器 336 或能够监测低能电子的半导体检测器装置检测到次级电子。位于 TEM 样品支座 224 和台 225 下面的 STEM 检测器 262 可以采集透射穿过安装在 TEM 样品支座上的样品的电子。向系统控制器 338 提供来自检测器 336、362 的信号。所述控制器 338 还控制检测器信号、透镜、电子源、GIS、台和泵以及该仪器的其他物件。监控器 340 用于显示用户控制和使用该信号的工件的影像

[0058] 在真空控制器 341 的控制下通过泵系统 309 抽空室 308。该真空系统在室 308 内提供大约 3×10^{-6} mbar 的真空。当适合的前驱体或活化剂气体被引到样品表面时,该室背景压力可能上升,通常上升至约 5×10^{-5} mbar。

[0059] 聚焦离子束柱 306 包括上部颈部部分 344,离子源 346 位于该颈部部分内,和包括引出电极 350 的聚焦柱 348 和包括物镜 351 的静电光学系统。离子源 346 可以包括液态金属镓离子源、等离子体离子源、液态金属合金源或任何其他类型的离子源。聚焦柱 348 的轴倾斜离开电子柱的轴 52 度。离子束 352 从离子源 346 穿过聚焦柱 348 以及静电偏转器 354 之间通向工件 318。

[0060] FIB 电源和控制单元 356 在离子源 346 处提供电势。离子源 346 通常保持在工件的电势以上的 1kV 和 60kV 之间的电势,该工件通常保持在接地电势。因此,离子以大约 1keV 到 60keV 的着陆能量冲击工件 318。FIB 电源和控制单元 356 耦联在偏转板 354 上,这些偏转板能够致使离子束在工件 318 的上表面上描绘出相应的图案。在一些系统中,如本领域内众所周知的,偏转板放置在最后一个透镜前。当 FIB 电源和控制单元 356 向消隐电极上施加消隐电压时,离子束聚焦柱 348 内的束消隐电极 (未示出) 致使离子束 352 冲击到消隐孔径 (未示出) 上而不是工件 318 上。

[0061] 离子源 346 通常提供一束仅带正电的镓离子,该离子束可以聚焦到工件 318 处的十分之一微米宽的子束内,以便通过离子铣削、增强蚀刻、材料沉积来修改工件 318 或用于

使工件 318 成像。

[0062] 显微操纵器 357 如来自美国德克萨斯州达拉斯 Omniprobe 公司的自动探针 200™ 或来自德国伊罗特林根 Kleindiek Nanotechnik 公司的型号 MM3A 可以精确地在真空室内移动对象。显微操纵器 357 可以包括位于真空室外的精密电机 358, 以提供位于该真空室内的部分 359 的 X、Y、Z 和 θ 控制。显微操纵器 357 可以配备有用于操纵小型对象的不同的末端执行器。在此处所述的实施例中, 该末端执行器为一个细探针 360。如本领域内众所周知的, 显微操纵器 (或微探针) 可以用于将 TEM 样品 (其通常通过离子束已经从基底释放) 转移到 TEM 样品支座 361 上以供分析。

[0063] 系统控制器 338 控制双束系统 302 的各部分的操作。贯穿系统控制器 338, 用户可以通过输入到常规用户接口的命令来致使离子束 352 或电子束 316 以一种所希望的方式被扫描。可替代地, 系统控制器 338 可以根据程序指令控制双束系统 302。图 3 为示意性图示, 其没有包括典型双束系统的所有元件并且其没有反映出所有元件的外观和尺寸或所有元件之间的关系。

[0064] 根据本发明的优选实施例, 一种用于制备供 TEM 分析的样品, 包括:

- [0065] • 将基底加装到离子束系统内;
- [0066] • 通过离子束铣削将样品与该基底分离;
- [0067] • 从该基底上提取该样品, 所述样品具有纵轴、顶侧和底侧;
- [0068] • 将该样品附装到样品支座上;
- [0069] • 定位该样品支座从而使得该离子束横穿于该样品的纵轴;
- [0070] • 铣削该样品的底侧以清除该样品的底部表面的至少一部分以产生均匀平坦的表面;
- [0071] • 定位该样品支座从而使得该样品的底侧朝向该离子束源并且使得该离子束与该样品的纵轴平行;
- [0072] • 通过采用铣削模式来引导该离子束而打薄该样品, 所述铣削模式将样品的至少一部分打薄至 30nm 或更小的厚度。

[0073] 在一些优选实施例中, 将该样品附装到样品支座上包括: 绕与该样品纵轴垂直的轴旋转该样品以倒置该样品的顶侧和底侧; 以及将倒置后的样品附装在样品支座上。

[0074] 在一些优选实施例中, 定位该样品支座使得该离子束横穿于该样品的纵轴包括定位该样品支座使得该离子束和该样品的纵轴之间的角度在从 35 度到 90 度。

[0075] 在一些优选实施例中, 通过采用铣削模式来引导该离子束而打薄该样品包括将该样品的至少一部分打薄至 15nm 或更小的厚度。

[0076] 在一些优选实施例中, 铣削该样品的底侧以清除该样品的底侧的至少一部分以产生均匀平坦的表面包括清除该样品的底部至少 25nm。

[0077] 在一些优选实施例中, 该基底为半导体晶片或半导体晶片的一部分, 并且有待提取的样品为有待使用 TEM 观察的集成电路的一部分。

[0078] 在一些优选实施例中, 从该基底上提取该样品包括将微探针附装到所释放的样品上和使用所附装的微探针从该基底上提取该样品, 并且其中, 将该样品附装到样品支座上包括将该样品附装到样品支座上并将该微探针与所附装的样品分离。在一些优选实施例中, 绕与该样品纵轴垂直的轴旋转该样品以倒置该样品的顶侧和底侧包括通过旋转该微探

针来倒置该样品使得颠倒顶侧和底侧的定向。

[0079] 在一些优选实施例中, 铣削该样品的底侧以清除该样品的底侧的至少一部分以产生均匀平坦的表面包括使用具有第一加速电压的离子束铣削该样品的底侧并且然后在第二加速电压下铣削该样品的底侧, 第二加速电压小于第一加速电压的一半。在一些优选实施例中, 铣削该样品的底侧以清除该样品的底侧的至少一部分以产生均匀平坦的表面包括使用具有 5kV 或更低的加速电压的离子束铣削该样品的底侧。在一些优选实施例中, 铣削该样品的底侧以清除该样品的底侧的至少一部分以产生均匀平坦的表面包括使用具有 30kV 或更高的加速电压的离子束铣削该样品的底侧。

[0080] 本发明的优选实施例包括用于实施此处所述的方法的设备。优选实施例还包括配置有计算机程序的非瞬态计算机可读存储介质, 其中, 如此配置的存储介质致使计算机控制带电粒子束系统实施此处所述的方法的步骤。

[0081] 根据本发明的优选实施例, 一种制备用于 TEM 分析的超薄 TEM 样品, 包括:

[0082] • 将基底加装到离子束系统内, 该离子束系统包括离子束源和用于使离子束沿轴聚焦并聚焦到该基底上的光学器件;

[0083] • 通过离子束铣削使样品从该基底释放, 所述样品具有纵轴、最靠近离子束源的顶侧和与该离子束源相对的底侧;

[0084] • 将微探针附装到所释放的样品上;

[0085] • 使用所附装的微探针从该基底提取该样品;

[0086] • 通过旋转该微探针来倒置该样品从而使得颠倒顶侧和底侧的定向;

[0087] • 将倒置后的样品附装到样品支座上并且将该微探针与所附装的样品分离;

[0088] • 定位该样品支座从而使得该离子束轴相对于该样品的纵轴在 30 度到 90 度的角度;

[0089] • 从该样品的底部清除至少 25nm 以产生平行于离子束轴的平面表面;

[0090] • 定位该样品支座从而使得该样品的顶侧与该离子束源相反地定向并且使得离子束轴与该样品的纵轴平行;

[0091] • 通过采用铣削模式来引导该离子束而打薄该样品, 所述铣削模式将该样品的至少一部分打薄至 30nm 或更小的厚度。

[0092] 根据本发明的优选实施例, 一种用于制备超薄 TEM 样品的设备, 包括:

[0093] • 离子束系统, 该离子束系统包括离子束源、用于使离子束沿轴聚焦并聚焦到基底上的光学器件和用于操纵样品的显微操纵器; 以及

[0094] • 存储计算机指令的计算机可读存储器, 这些指令包括用于控制该设备和致使该设备实施如下步骤的程序:

[0095] • 将所希望的样品位置定位在基底上;

[0096] • 通过离子束铣削将样品与该基底分离;

[0097] • 从该基底上提取该样品, 所述样品具有纵轴、顶侧和底侧;

[0098] • 将该样品附装到样品支座上;

[0099] • 定位该样品支座使得该离子束横穿于该样品的纵轴;

[0100] • 铣削该样品的底侧以清除该样品的底部表面的至少一部分以产生均匀平坦的表面;

[0101] • 定位该样品从而使得该样品的底侧朝向该离子束源并且使得该离子束与该样品的纵轴平行 ;以及

[0102] • 通过采用铣削模式来引导该离子束而打薄该样品,所述铣削模式将该样品的至少一部分打薄至 30nm 或更小的厚度。

[0103] 尽管以上本发明的说明书主要针对制备超薄 TEM 样品的方法,但应认识到执行这种方法的操作的设备并进一步在本发明的范围内。进一步地,应认识到可以通过计算机硬件、硬件和软件两者的组合、或存储在非瞬态计算机可读存储器内的计算机指令来实施本发明的实施例。可以在使用标准编程技术的计算机程序(包括配置有计算机程序的非瞬态计算机可读存储介质)内根据本说明书内所述的方法和图执行这些方法,其中,如此配置的存储介质致使计算机以一种特定和预定义的方式运行。可以用高级程序语音或面向对象编程语言来执行每个程序以与计算机系统通信。然而,若希望,可以用汇编或机器语言执行这些程序。在任何情况下,该语言可以是编译型或解释型语言。而且,该程序可以在被编程用于该目的专用集成电路上运行。

[0104] 进一步地,可以用任何类型的计算平台实现方法论,包括但不限于与带电粒子工具或其他成像装置等等分离、整合或通信的个人计算机、微型计算机、主机、工作站、网络或分布式计算环境、计算机平台等等。可以用存储在无论是可移动的还是与计算平台整合的存储介质或装置(如硬盘、光读和 / 或写入存储介质、RAM、ROM 等等)上的机器可读代码实现本发明的方面从而使得该代码可以被可编程计算机读取,用于当计算机读取存储介质或装置时对计算机进行配置和操作以执行此处所述的程序。而且,可以在有线或无线网络上传输机器可读代码或部分机器可读代码。当这类介质包含用于结合微处理器和其他数据处理单元执行上述步骤的指令或程序时,此处所述的本发明包括这些和其他类型计算机可读存储介质。本发明还包括当根据此处所述方法和技术被编程时的计算机本身。

[0105] 计算机程序可以应用于输入数据以执行此处所述的功能并且从而转换该输入数据以生成输出数据。输出信息应用于一个或多个输出装置上,如显示监控器。在本发明的优选实施例中,所转换的数据表示物理和有形对象,包括在显示器上产生这些物理和有形对象的具体视觉描绘。

[0106] 为了使用粒子束使样品成像,本发明的优选实施例还利用了粒子束设备,如 FIB 或 SEM。用于使样品成像的这类粒子内在地与样品相互作用,导致某种程度上的物理变形。进一步地,贯穿本说明书,使用如“计算”、“确定”、“测量”、“生成”、“检测”、“形成”等术语的讨论也指计算机系统或类似电子装置的动作和过程,该计算机系统或类似电子装置操纵和将计算机系统内的按物理量表示的数据转换成计算机系统或其他信息存储、传输或显示装置内的按物理量类似表示的其他数据。

[0107] 本发明具有广泛的可应用性并且可以提供如以上示例中所示和所述的许多利益。实施例根据特定应用将有很大不同,并且不是每个实施例将提供所有这些利益和满足本发明可以实现的所有目标。适用于实施本发明的粒子束系统可以从例如 FEI 公司、本发明的受让人商购。

[0108] 尽管之前描述许多针对半导体晶片,但本发明可以应用于任何合适的基底或表面。进一步地,无论何时在此处使用术语“自动”、“自动化”或类似术语,那些术语将被理解成包括手动地启动自动或自动化过程或步骤。在以下讨论中和在权利要求中,以开放式的

方式使用术语“包括”和“包含”，并且因此应被解释为表示“包括但不限于”。术语“集成电路”指一组电子部件和它们的在微芯片上形成图案的互连（统称为内部电路元件）。术语“半导体器件”通常指可以与半导体晶片整合的、与晶片绝缘的（singulated）或被封装以供在电路板上使用的集成电路（IC）术语“FIB”或“聚焦离子束”此处用于指任何准直的离子束，包括被离子光学器件聚焦的束和成形离子束。

[0109] 就本说明书中没有专门定义任何术语，目的是给出术语的简单且普通的意思。附图旨在辅助理解本发明，并且除非另外指明，否则未按比例绘制。

[0110] 尽管已经详细描述了本发明及其优点，但应理解到在不脱离所附权利要求书所定义的本发明的精神和范围的情况下可以对这些实施例做各种变化、替换和改动。而且，本发明的范围并非旨在局限于在本说明书中所述的工艺、机器、制造物、物质的组合物、手段、方法以及步骤的具体实施例。如本领域的普通技术人员将从本发明的披露中轻易认识到的，可以根据本发明利用现有的或往后要开发的、大体上执行相同功能或大体上实现和此处所述的对应实施例相同结果的工艺、机器、制造物、物质的组合物、手段、方法以及步骤。相应地，所附权利要求书是旨在于将此类工艺、机器、制造物、物质的组合物、手段、方法或步骤包括在它们的范围内。

[0111] 我们的权利要求如下：

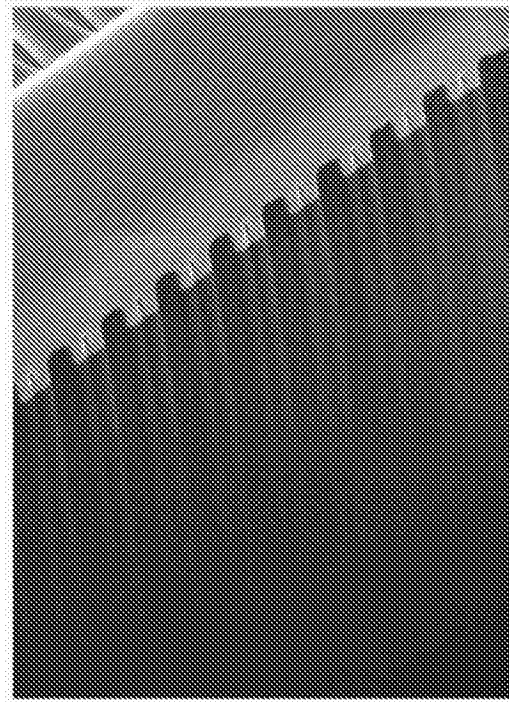


图 1A

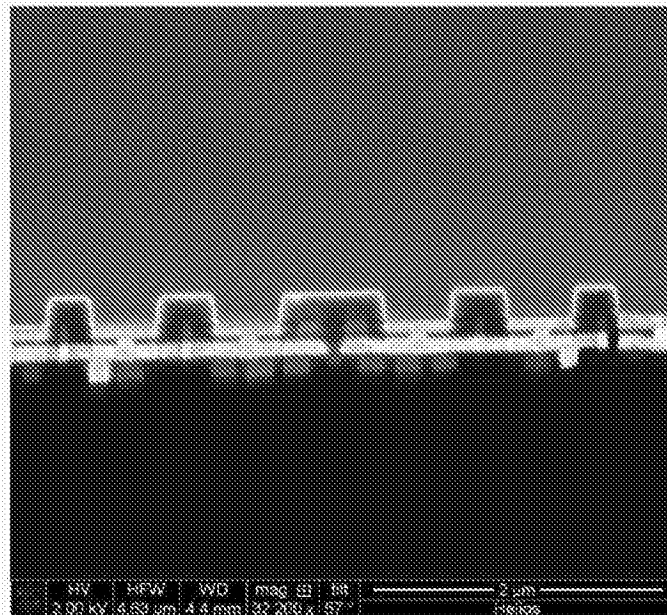


图 1B

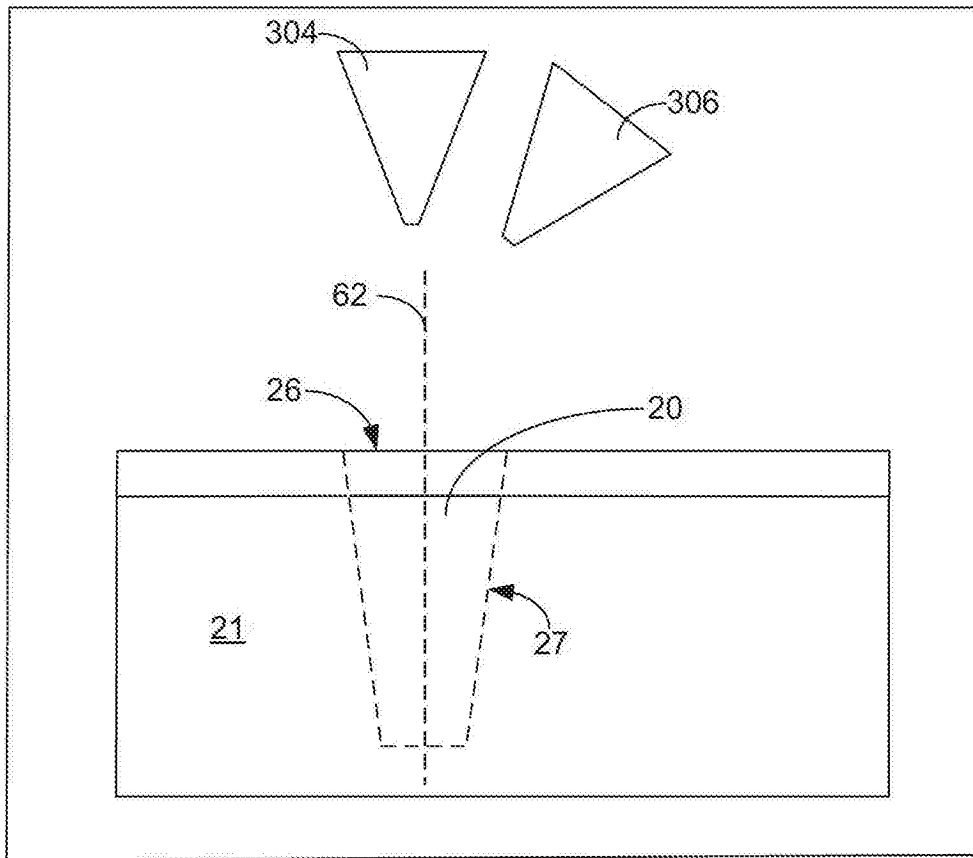


图 2

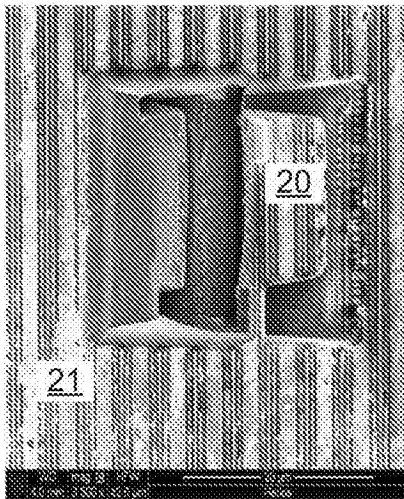


图 3A

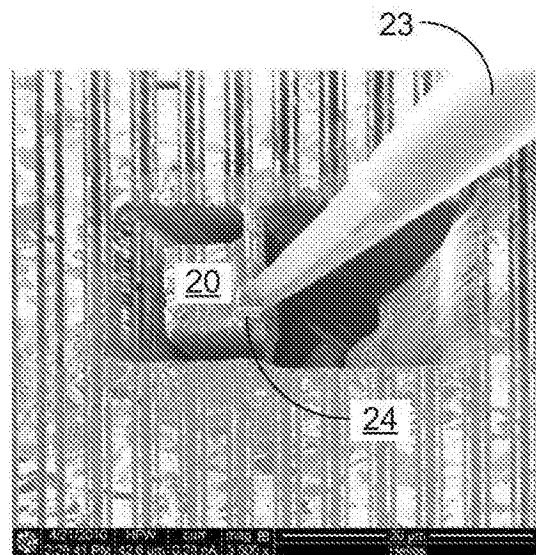


图 3B

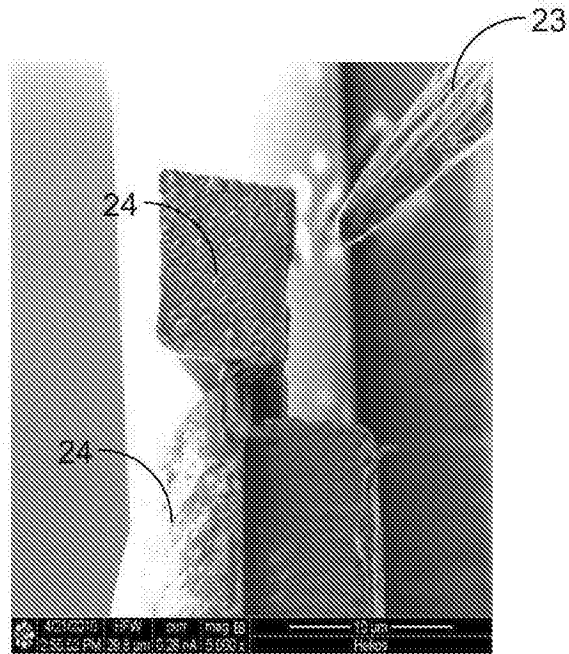


图 4C

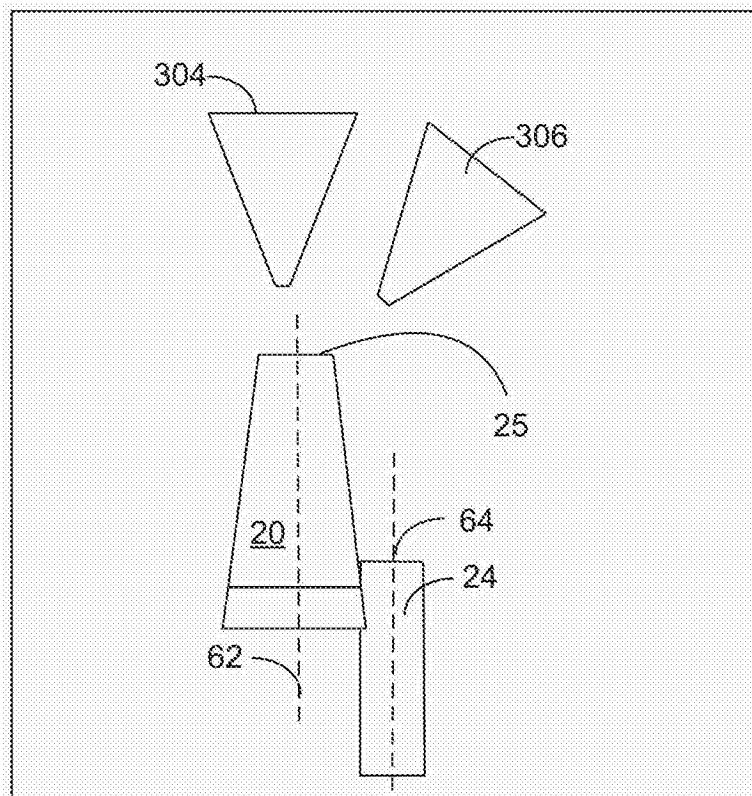


图 5

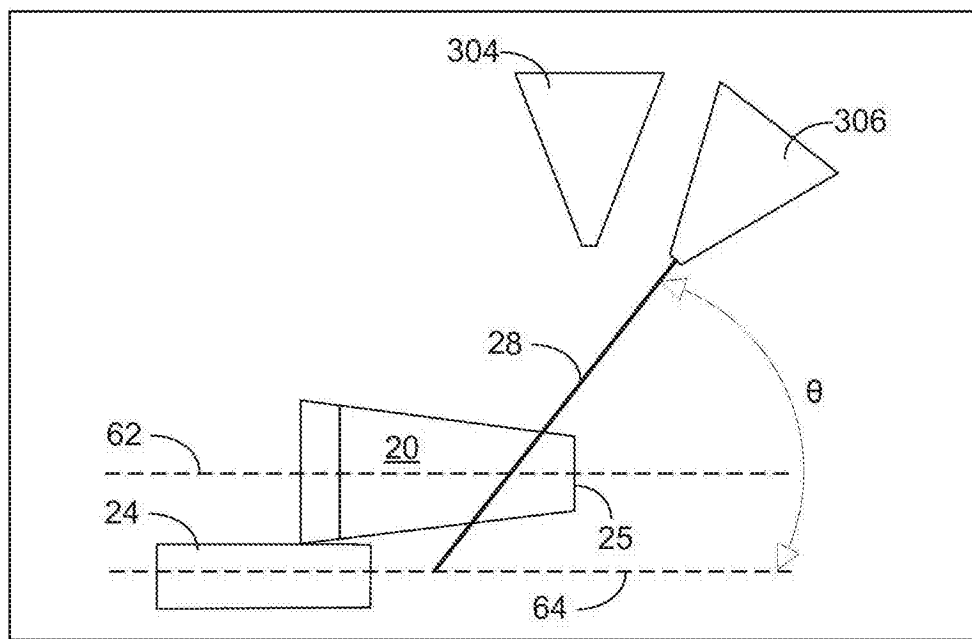


图 6

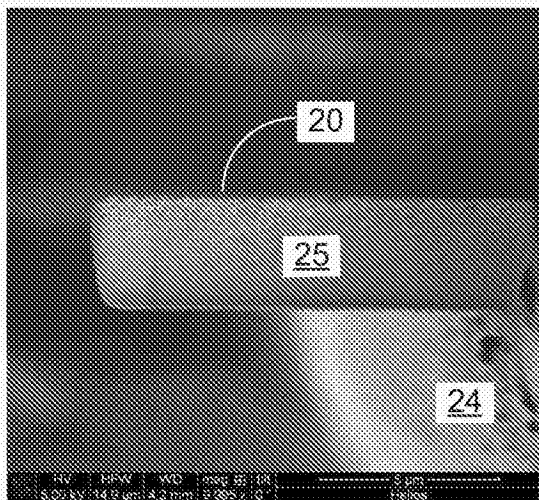


图 7A

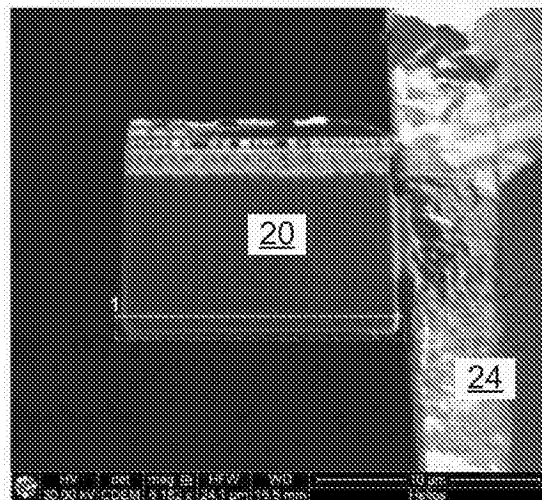


图 7B

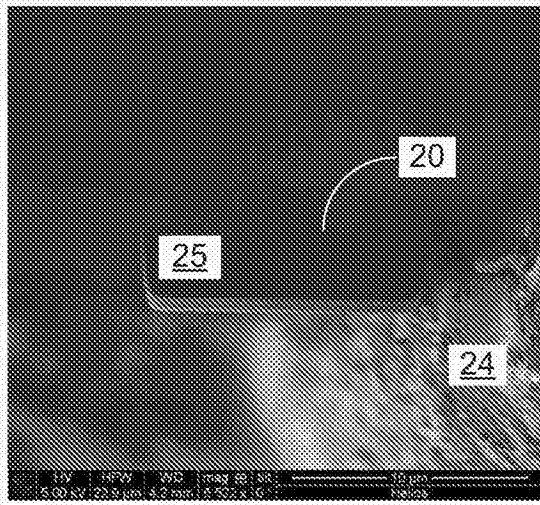


图 7C

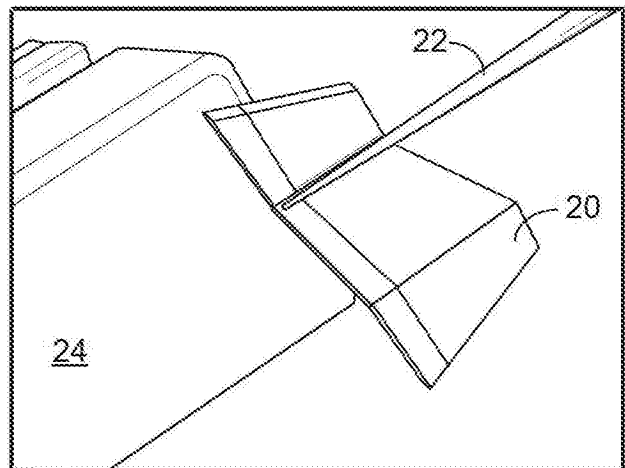


图 8A

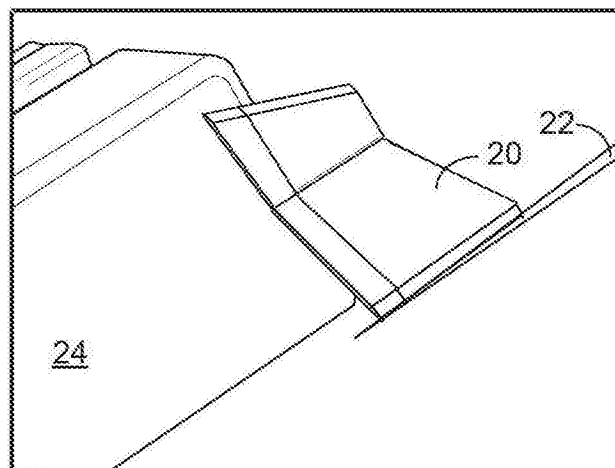


图 8B

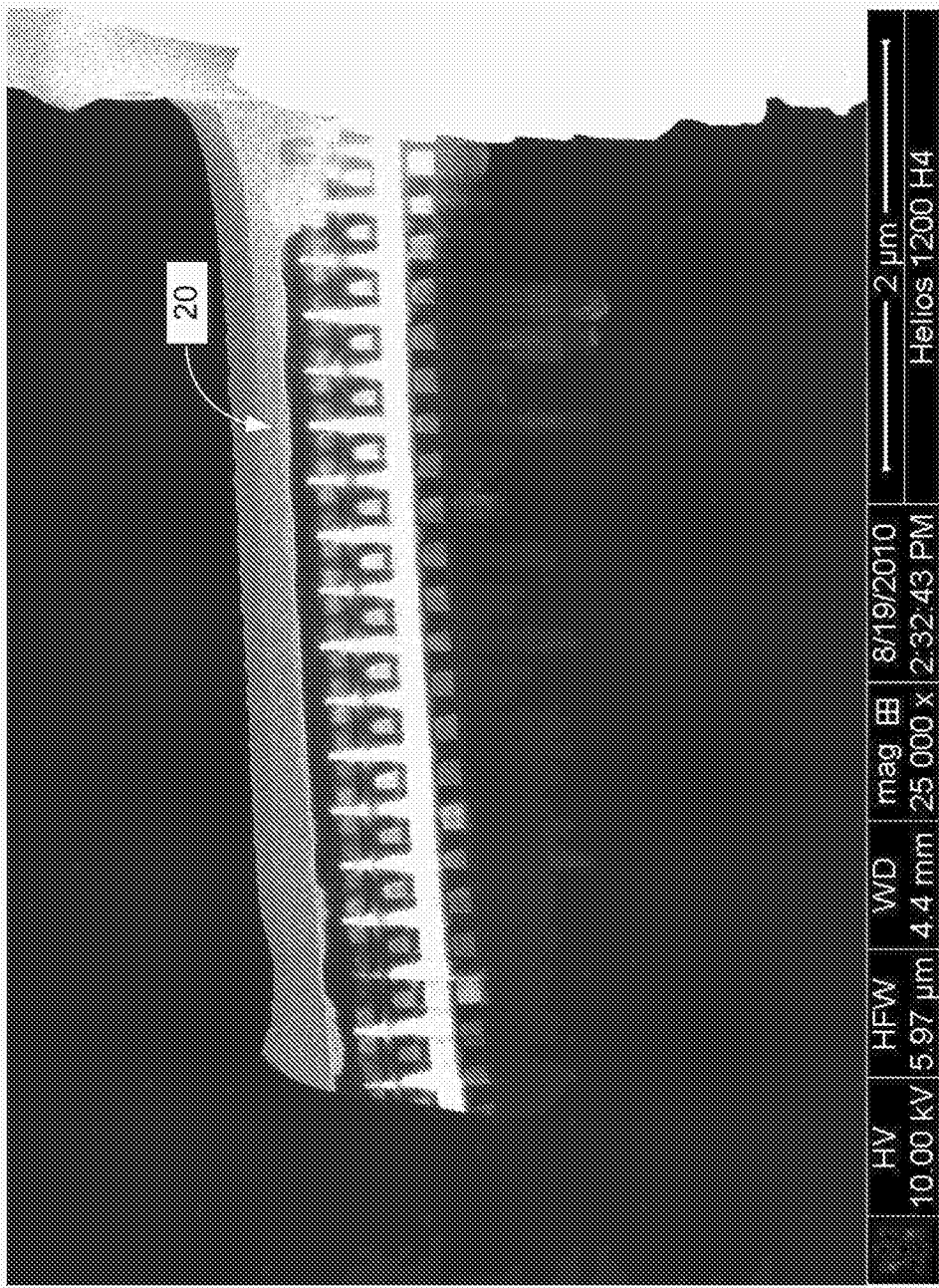


图 9

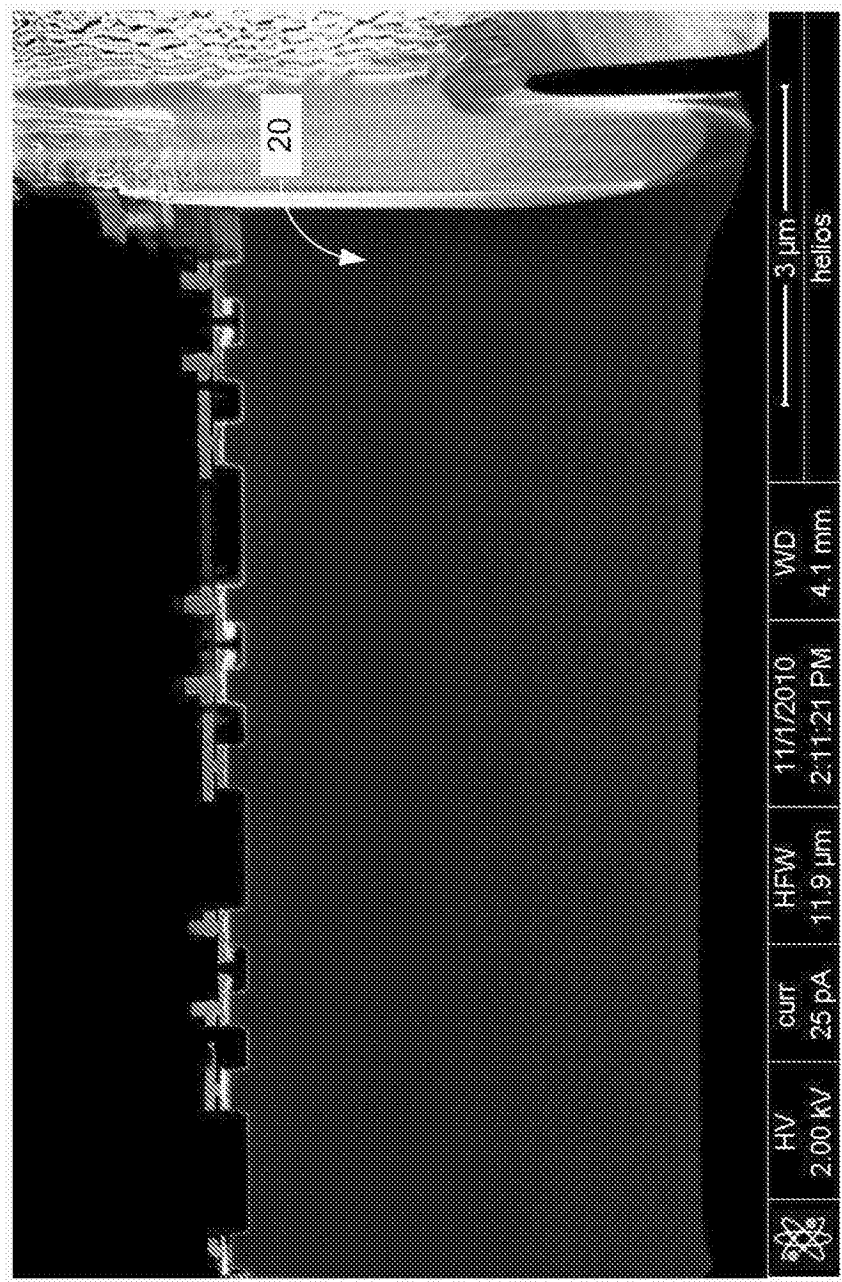


图 10

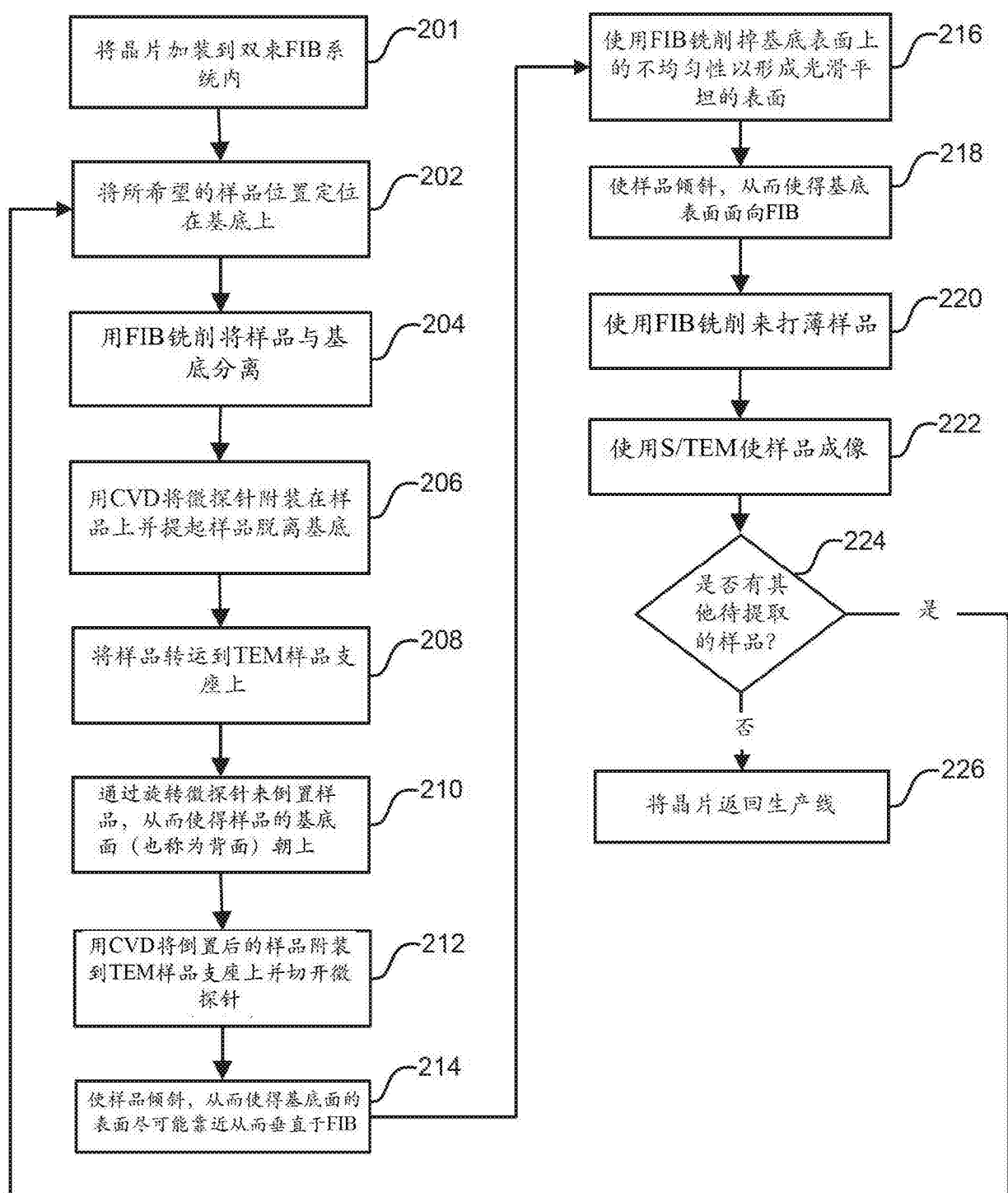


图 11

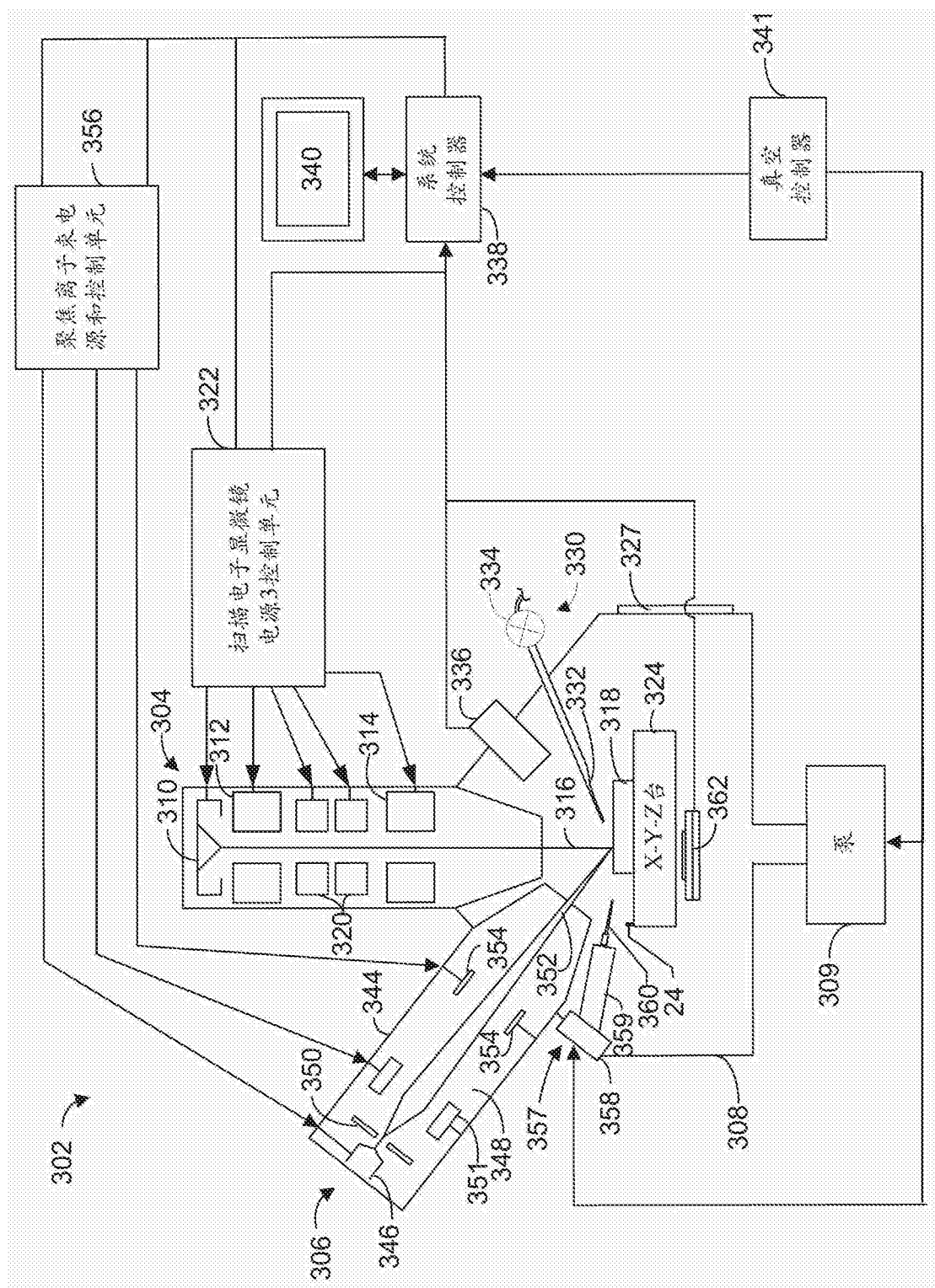


图 12