



(45)授权公告日 2018.03.30

权利要求书2页 说明书15页 附图20页

```

graph TD
    101[任务01(0°)  
基准和沉积] --> 102[任务02(0°)  
底部块]
    102 --> 103[任务03(180°)  
顶部块]
    103 --> 104[任务04(180°)  
顶部薄化]
    104 --> 105[任务05(0°)  
底部薄化]
    105 --> 106[任务06(0°)  
突出部和底切]
    106 --> 107[任务07(90°)  
SEM厚度]
    107 --> 108[任务08(0°)  
底部5kV抛光]
    108 --> 109[任务09(180°)  
底部5kV抛光]
    109 --> 110[任务10(90°)  
底部5kV抛光  
勾画]
    110 --> 111[任务11(90°)  
Y截面]
    111 --> 112[任务12(0°)  
设置BAA]
    112 --> 113[任务13(0°)  
XML生成]
    113 --> 114[任务14(0°)  
可选]
  
```

1. 一种形成薄片的方法,所述薄片具有观察面以用于在所述观察面中感兴趣的特征的透射电子显微镜观察,其包括:

引导带电粒子射束朝向带电粒子射束系统的真空室中的工件以引起在感兴趣的特征之上从前体气体沉积保护层,所述保护层具有与工件的溅射速率匹配的溅射速率;

引导聚焦离子射束朝向样本以铣削靠近感兴趣的特征的一个或多个基准;

引导聚焦离子射束以在感兴趣的区域的两侧上铣削空腔来形成薄片;

从所述薄片的每一侧,引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削,随着所述聚焦离子射束接近感兴趣的区域而连续地铣削到降低的深度以提供远离所述观察面倾斜的底部表面,聚焦离子射束中的离子具有第一着陆能量;

在从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削之后,进行铣削以去除分离所述空腔的材料以留下支撑所述空腔的突出部;

在进行铣削以去除分离所述空腔的材料之后,引导离子射束朝向所述观察面,所述离子射束具有低于第一着陆能量的第二着陆能量。

2. 如权利要求1所述的方法,其中所述第一着陆能量大于20,000 eV,并且所述第二着陆能量小于15,000 eV。

3. 如权利要求2所述的方法,其中所述第一着陆能量大于25,000 eV,并且所述第二着陆能量小于10,000 eV。

4. 如权利要求2所述的方法,其中所述第一着陆能量大于28,000 eV,并且所述第二着陆能量小于6,000 eV。

5. 如权利要求1所述的方法,进一步包括分离从真空室内部的样本铣削的薄片。

6. 如权利要求1所述的方法,进一步包括分离从真空室外部的样本铣削的薄片。

7. 如权利要求1所述的方法,其中引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削,随着所述聚焦离子射束接近感兴趣的区域而连续地铣削到降低的深度以提供远离所述观察面倾斜的底部表面包括把所述薄片薄化到小于100 nm的厚度。

8. 如权利要求7所述的方法,其中所述方法在没有人类干预的情形下被自动执行。

9. 如权利要求7所述的方法,其中所述薄片被薄化到小于70 nm。

10. 如权利要求7所述的方法,其中所述薄片被薄化到小于50 nm。

11. 如权利要求1所述的方法,其中引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削包括在最终铣削之前使用基准来确定射束位置。

12. 如权利要求1所述的方法,进一步包括在从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削之后,引导散焦离子射束朝向观察面,在散焦离子射束中的离子的能量小于被用于形成空腔的离子的能量。

13. 如权利要求12所述的方法,其中引导散焦离子射束朝向观察面包括以在射束的连续施加之间的延迟连续地引导散焦离子射束朝向观察面。

14. 如权利要求1所述的方法,进一步包括用扫描电子显微镜观察薄片以确定其厚度。

15. 如权利要求14所述的方法,进一步包括对薄片中的横截面进行铣削,并且在从工件分离薄片之前用扫描电子显微镜观察所述横截面。

16. 如权利要求1所述的方法,其中引导聚焦离子射束朝向样本以铣削靠近感兴趣的特征的一个或多个基准包括铣削两个基准,要形成的薄片的任一侧上一个,所述基准与要形

成的薄片的中心对准。

17. 如权利要求1所述的方法,其中引导聚焦离子射束朝向样本以铣削靠近感兴趣的特征的一个或多个基准包括铣削两个基准,要形成的薄片的任一侧上一个,所述基准从要形成的薄片的中心偏移。

18. 如权利要求1所述的方法,其中引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削包括在铣削期间确定射束漂移至少一次,并且修正所述射束的位置以补偿所述漂移。

19. 一种用于自动生产具有小于100 nm的厚度的薄片的设备,包括:

离子射束柱;

用于支撑工件的镜台;

用于控制离子射束柱和镜台的操作的控制器,所述控制器包括存储器,所述存储器存储用于执行权利要求1所述方法的计算机指令。

20. 如权利要求19所述的设备,进一步包括用于观察真空室中的工件的扫描电子显微镜柱。

用于TEM观察的薄片的制备

技术领域

[0001] 本发明涉及用于在透射电子显微镜上进行观察的样本的自动化制备(preparation)。

背景技术

[0002] 半导体制造(诸如,集成电路的加工)典型地需要光刻的使用。将电路形成其上的半导体基底(通常是硅晶片)涂覆有诸如光致抗蚀剂之类的材料,当所述材料曝光于辐射时改变溶解度。定位在辐射源和半导体基底之间的光刻工具(诸如,掩膜或刻线(reticle))投射阴影以控制所述基底的哪些区域曝光于辐射。在曝光之后,光致抗蚀剂被从曝光或未曝光的区域去除,从而在晶片上留下光致抗蚀剂的图案化层,其在后续的蚀刻或扩散工艺期间保护所述晶片的部分。

[0003] 光刻工艺允许多个集成电路器件或机电器件(通常被称为“芯片”)形成在每个晶片上。然后所述芯片被切割成单独管芯,每个包括单个集成电路器件或机电器件。最终,这些管芯经受附加的操作并且被封装成单独集成电路芯片或机电器件。

[0004] 在制造工艺期间,曝光和聚焦的变化要求由光刻工艺显影的图案被连续地监控或测量以确定所述图案的尺寸是否在可接受的范围内。这种监控(通常被称为工艺控制)的重要性随着图案大小变得更小而显著地增加,尤其是当最小特征大小接近光刻工艺可达到的分辨率的限制时。为了获得日益较高的器件密度,需要越来越小的特征大小。这可以包括互联线的宽度和间距、接触孔的间距和直径、以及表面几何形状(诸如,各种特征的角和边缘)。晶片上的特征是三维结构并且完整特性不仅必须描述表面尺寸(诸如,线或沟槽的顶部宽度),还必须描述所述特征的完整三维轮廓。工艺工程师必须能够准确地测量这种表面特征的关键尺寸(CD)以精细地调节加工工艺并且确保获得期望的器件几何形状。

[0005] 典型地,使用诸如扫描电子显微镜(SEM)之类的仪器进行CD测量。在扫描电子显微镜(SEM)中,初级电子射束聚焦于扫描要被观察的表面的精细斑点。当被初级射束撞击时,次级电子从表面被射出。所述次级电子被检测并且图像被形成,其中在图像的每个点处的亮度由当射束撞击表面上的对应斑点时检测到的次级电子的数量确定。然而,随着特征继续变得越来越小,来到了一个点,其中要被测量的特征对于由普通SEM提供的分辨率来说太小。

[0006] 透射电子显微镜(TEM)允许观察者看见极其小的特征,在纳米的数量级上。与仅对材料的表面进行成像的SEM相比,TEM还允许分析样本的内部结构。在TEM中,宽射束撞击所述样本并且透射通过所述样本的电子被聚焦来形成样本的图像。样本必须足够薄以允许初级射束中的许多电子穿过所述样本并且在相反侧离去。样本(也被称为薄片(lamella))典型地小于100 nm厚。

[0007] 在扫描透射电子显微镜(STEM)中,初级电子射束被聚焦于精细斑点,并且所述斑点被跨所述样本表面扫描。透射通过工件的电子被在样本的远侧的电子检测器收集,并且图像上每个点的强度对应于当初级射束撞击表面上的对应点时所收集的电子的数量。

[0008] 因为样本必须非常薄以供用透射电子显微镜(无论是TEM还是STEM)观察,所以样本的制备可能是精细、耗时的工作。在此所使用的术语“TEM”指的是TEM或STEM,并且提及制备用于TEM的样本将被理解为还包括制备用于在STEM上观察的样本。如在此所使用的术语“S/TEM”也指的是TEM和STEM二者。

[0009] 用于制备TEM标本的数个技术是已知的。这些技术可以涉及劈理(cleaving)、化学抛光、机械抛光、或宽束低能量离子铣削(ion milling)、或组合以上中的一个或多个。这些技术的缺点是它们不是位置特定的并且通常需要将起始材料切成越来越小的片,从而破坏了原始样本的大部分。

[0010] 通常被称为“提出(lift-out)”技术的其它技术在不破坏或损伤基底周围部分的情形下,使用聚焦离子束从基底或块状样本切割样本。这种技术有助于分析在集成电路以及对于物理或生物科学来说普通的材料的加工中所使用的工艺的结果。这些技术可以被用于以任何定向(例如,以横截面或以平面图)分析样本。一些技术提取足够薄的样本以便在TEM中直接使用;其它技术提取“组块(chunk)”或大的样本,其在观察之前需要附加的薄化。此外,这些“提出”标本还可以由除了TEM之外的其它分析工具直接分析。其中在FIB系统真空室内从基底提取样本的技术通常被称为“原位(in-situ)”技术;真空室外的样本去除(如当整个晶片被转移到另一工具以用于样本去除时)被称为“非原位(ex situ)”技术。

[0011] 在提取之前充分薄化的样本通常被转移到覆盖有薄电子透明膜的金属网格并安装在其上以便观察。图13A示出了用于安装样本的现有技术TEM网格10。典型的TEM网格10由铜、镍或金制成。

[0012] 尽管尺寸可以改变,但典型的网格可例如具有3.05mm的直径并且具有由大小90 μ m乘90 μ m的单元14组成的中间部分12以及具有35 μ m的宽度的栅栏(bar)13。碰撞电子束中的电子将能够通过所述单元14,但将被所述栅栏13阻挡。中间部分12被边缘部分16围绕。边缘部分的宽度是0.225mm。边缘部分16除了定向标记18外不具有单元。薄电子透明支撑膜的厚度15跨整个样本载体是均匀的,具有近似20 nm的值。要被分析的TEM标本被布置或安装在单元14内。

[0013] 在一个通常使用的非原位样本制备技术中,使用电子束或离子束沉积而首先在如图14中所示的样本表面21上的感兴趣的区域上沉积材料的保护层22(诸如,钨)。接下来,如图15-16中所示,使用具有相对大束大小的高束电流的聚焦离子束被用于铣削大量材料离开感兴趣的区域的前部分和后部分。两个经铣削的矩形24和25之间的剩余材料形成包括感兴趣的区域的薄垂直样本截面20。在感兴趣的区域的后侧上铣削的沟槽25小于前沟槽24。较小的后沟槽主要用以节约时间,但较小的沟槽还防止完成的样本落入较大的铣削的沟槽中,其可能使在显微操纵操作期间去除标本是困难的。

[0014] 如图17中所示,一旦标本到达期望厚度,则镜台倾斜,并且部分地沿着样本截面20的周长以一角度形成U形切口26,留下样本挂在样本顶部的任一侧的突出部(tabs)28。小突出部28允许最小量的材料在样本被完全FIB抛光后被铣削掉,从而减少在薄标本上积聚的再沉积伪像(artifact)的可能性。样本截面然后被使用渐进地更精细束的大小进一步薄化。最终,突出部28被切割以完全释放薄化薄片27。一旦材料的最终突出部被切割掉,薄片27可以被观察以在沟槽中移动或轻轻地落在其上。图18中示出了完整并且分离的薄片27。

[0015] 包含完整薄片27的晶片然后被从FIB去除,并且被布置在装备有显微操纵器的光

学显微镜下。附着到所述显微操纵器的探针被定位在所述薄片之上,并且被仔细地降低来接触它。如图19中所示的,静电力和真空力将把薄片27吸引到探针尖端29。如图20中所示的,具有附着的薄片的尖端29然后被典型地移动到TEM网格10,并且被降低直到薄片被布置在栅栏14之间的单元13之一中的网格上。

[0016] 在观察之前需要附加细化的样本被典型地直接安装到TEM样本架。图13B示出了典型的TEM样本架31,其包括部分圆形的3mm环。在一些应用中,样本30通过离子射束沉积或粘结而被附着到TEM样本架的指部32。样本从所述指部32延伸,使得在TEM(未示出)中电子射束将具有通过样本30到样本下面的检测器的自由路径。TEM样本典型地被水平安装到TEM中的样本架上(其中所述TEM网格的平面与电子射束垂直),并且观察所述样本。通常的原位提取技术在美国专利号6,570,170中被描述,进一步其描述了通过形成“U”形切口并且然后从所述“U”形的缺失侧以一角度切割样本以底切(undercut)并且释放所述样本来提取出样本。在所述样本被释放之后,探针通过FIB诱导的化学蒸气沉积而被附着到所述样本,并且其被提出。在其它应用中,探针在释放样本之前被附着。此工艺典型地导致组块类型的样本,其通常为楔形(wedge-shaped)并且大小上近似为:10 μm x 5 μm x 1 μm 。

[0017] 不幸地是,使用这种样本提取的现有技术方法的TEM样本的制备遭受多个缺点。这种方法典型地非常耗时,大约90分钟/样本,并且是劳动力密集。CD计量通常需要来自晶片上不同位置的多个样本以表征并且准予特定工艺。在一些情形下,例如,将期望分析来自给定晶片的从15到50个TEM样本。当如此多的样本必须被提取以及测量时,使用已知方法的处理来自一个晶片的样本的总时间可能是数天或甚至数周。尽管能够通过TEM分析发现的信息可能非常有价值,但创建并且测量TEM样本的整个工艺在历史上是如此的劳动力密集以及耗时,使得把这种类型的分析用于制造工艺控制是不实际的。

[0018] 特别地,以上讨论的非原位方法可能是耗时的并且难以定位薄片位置,并且所述提取探针必须被非常仔细地移动到位置中以避免损伤样本或探针尖端。一旦薄片已被完整地释放,其可能按不可预测的方式移动;它可能落在沟槽中,或在一些情形下,它实际上可能被静电力向上推动并且推出沟槽。此移动可以使利用提取探针定位和/或拾起所述薄片是困难的。探针和样本之间的静电吸引还稍微是不可预测的。在一些情形下,薄片可能不继续停留在探针尖端。替代地,它可能跳到探针的不同部分。在其它情形下,薄片可能在所述样本正在被移动时掉落。如果薄片被成功地转移到TEM网格,使所述薄片粘结到所述网格支撑膜而不是所述探针尖端可能是困难的。薄片将通常贴住探针尖端,并且本质上必须被去除到薄膜上。因此,当其被转移到所述TEM网格时,控制薄片的精确布置或定向可能是非常困难的。以上所述的原位方法提供了更多控制,但都是相当更加耗时的。把微探针附着到样本、把样本附着到样本架、以及切断所述微探针的步骤占去了相当大的时间量。样本还被移动并且附着到FIB仪器内部的TEM网格,这需要更有价值的FIB时间。

[0019] 加速样本提取和转移工艺会通过允许半导体晶片被更加快速地返回到生产线而提供时间以及潜在的收益方面的显著的优点。样本去除和传输的工艺是完全或部分的自动化不仅会加速所述工艺,而且其还会减少操作员和技术人员所需要的经验水平,因此降低了人员成本。

[0020] 由于生产薄的薄片所需的精确性,工艺尚未把自身适配成自动化。薄片越薄,使其提取工艺自动化越困难。低于100 nm厚度的薄片,特别是低于70 nm厚度的薄片,难以人工

或以自动化的方式生产。离子射束的定位的略微改变可能通过在排除感兴趣的特征的位置生产薄片或通过改变厚度而损毁所述薄片。薄的薄片可能轻微地移动位置,这改变了射束相对于薄片的位置。由于机械或热应力,薄的薄片还可以在形成期间弯曲。这些因素组合成使薄片的形成成为极度困难的自动化工艺。

[0021] 需要的是鲁棒的、可重复的并且可以是自动化的用于TEM样本制备的改进的方法。

发明内容

[0022] 因此,本发明的目的是提供能够重复生产用于在透射电子显微镜上观察的薄的薄片的鲁棒工艺。

[0023] 依据优选的实施例,若干技术被使用,其一起提供了适合于自动化的鲁棒工艺,同时提供薄片,该薄片被相对于感兴趣的特征准确布置,并且具有彼此平行并且优选地垂直于工件的表面的面。不是所有的方面均需要用于所有的实施例。

[0024] 在一些优选的实施例中,具有与基底的溅射速率匹配的溅射速率的保护层被用于感兴趣的区域之上。这种保护层有助于垂直边缘的产生,特别地当使用较低的离子能量(例如,5 keV)镓离子铣削时。使用此保护防止薄片直接在保护层下方显影“高尔夫球座(golf tee)”形状。当从硅基底提取薄片时,碳保护层可以被使用,因为碳铣削速率与硅铣削速率匹配得好于钨保护层的铣削速率与硅铣削速率匹配,特别地在低离子能量铣削时,诸如,5 KeV。在较高的离子能量的情况下,硅和钨的铣削速率尽管仍是不同的,但更加彼此接近。

[0025] 对适合于自动化的可重复工艺做出贡献的另一个方面是使用“搁板(shelf)铣削”,其中所述射束被朝向观察面逐渐地移动,并且当所述射束接近所述面时,减少铣削深度以产生远离感兴趣的特征倾斜的底部。这使薄片的较低部分是厚的并且在结构上合理以通过保持薄片免于在薄化期间移动而促进自动化。

[0026] 在另一方面,基准被用于定位所述射束以用于最终高离子能量(例如,30 keV)铣削。在之前的方法中,薄片的边缘被用于进行被认为是更准确的最终铣削,因为其直接参考正被切割的对象,而不是不同的对象。申请人已发现因为所述基准更稳定并且能够更容易地识别,所以使用所述基准替换所述薄片边缘改进了准确性,其有助于自动化切割布置。相比于基于薄片的单个边缘进行配准(registration)的传统方法而言,基准提供两个边缘来进行平均以用于改进的定位。

[0027] 在另一方面,突出部在高离子能量(例如,30 keV)最终薄化之后被完成。这使薄片刚性地耦合到所述基底,并且因此使其相对于基底上的基准是稳定的。薄片位置上的任何移位可以导致厚度或切割布置的不稳定性。

[0028] 在另一方面,仅在所有的薄化铣削完成之后,但在低电压抛光铣削被执行之前,薄片被围绕边缘切割以产生突出部。这在薄化期间提供了增加的机械支撑,其使薄片更稳定并且允许更准确的射束布置以用于薄化。

[0029] 在另一方面,散焦的低离子能量(例如,5 keV)抛光和图案刷新延迟(以降低递送到样本的功率),被用于最终的切割;这减小了薄片的变形。

[0030] 前述已经相当宽泛地概述了本发明的特征和技术优点,以便使接下来的本发明的详细描述可以被更好地理解。本发明的附加特征和优点此后将被描述。应被本领域技术人员认识到的是:所公开的概念和具体实施例可以被容易地用作修改或设计其它结构以用于

执行本发明的相同目的的基础。还应被本领域的技术人员认识到的是：这种等价的结构不背离在所附的权利要求中阐述的发明的精神和范围。

附图说明

- [0031] 为了更完整地理解本发明及其优点，现在结合附图参考接下来的描述，其中：
- [0032] 图1示出了依据本发明实施例的50 nm工艺的概览。
- [0033] 图2A和2B是任务01之后的薄片的图像。
- [0034] 图3A和3B是任务02之后的薄片的图像。
- [0035] 图4A和4B是任务03之后的薄片的图像。
- [0036] 图5A和5B是任务04之后的薄片的图像。
- [0037] 图6A和6B是任务05之后的薄片的图像。
- [0038] 图7A和7B是任务06之后的薄片的图像。
- [0039] 图8A是可选任务07中的SEM自上而下厚度测量的图像。
- [0040] 图8B是依据本发明一个实施例的在可选任务07中的厚度测量中使用的薄片的区域的放大图像。
- [0041] 图9A和9B是任务08之后的薄片的图像。
- [0042] 图10A和10B是任务09之后的薄片的图像。
- [0043] 图11A和11B是任务10之后的薄片的图像。
- [0044] 图12A是任务11中的Y截面(Y-section)测量的图像。
- [0045] 图12B是用于任务11中的Y截面测量的薄片的横截面的放大图像。
- [0046] 图13A和13B示出了典型的现有技术TEM网格。
- [0047] 图14-17图示了依据现有技术的非原位样本制备技术中的步骤。
- [0048] 图18是依据现有技术的完整并分离的薄片的显微图。
- [0049] 图19-20图示了依据现有技术的使用探针和静电吸引的薄片的转移。
- [0050] 所述附图不旨在按比例绘制。在附图中，在各个图中图示的每个相同或接近相同的部件由相同的附图标记表示。为了清晰的目的，不是每个部件都可以在每个附图中被标记。

具体实施方式

- [0051] 本发明优选的实施例针对一种用于薄片布置和侧壁正交性的改进的控制的方法。这允许完全自动化地产生具有小于100 nm的厚度的薄片，小于70 nm的薄片或小于50 nm的薄片。
- [0052] 如下面描述的本发明的实施例生产一种薄片，其中完成的薄片的观察区域的厚度优选地以小于25%（更优选地以小于10%，以及甚至更优选地以小于3%）在观察区域上改变。完成的薄片的面优选地与基底表面正交，在5度内，更优选地在1度内，以及甚至更优选地在0.5度内。
- [0053] 完成的薄片的观察区域典型地是0.2 μ m和5 μ m之间宽，并且多至2 μ m深。
- [0054] 图1示出了依据本发明的实施例的工艺概览。单独的步骤在随后的段落中被更详细地描述。在步骤101中（任务01），感兴趣的特征被定位并且基准被铣削，使得期望的薄

片中心精确地处于基准之间。在步骤102和103中(分别为任务02和任务03),针对每个铣削使用相同铣削偏移对称地执行底部和顶部块铣削,使得最终的结果是均匀的楔形薄片,其在所述基准之间居中。在步骤104和105中(分别为任务04和任务05),通过保持每个铣削的偏移相等而对称地执行顶部和底部薄化铣削,使得边缘或“搁板”结构在薄化窗口下面的薄片的任一侧上被产生。在步骤106中(任务06),两个突出部铣削中的第一个去除总薄片高度的顶部1/3。然后两个突出部铣削中的第二个去除总薄片高度的底部1/3。底切铣削还使薄片的底部与基底分离。在可选的步骤107中(可选任务07),作为工艺监控步骤,薄片厚度在自上而下的图像中被测量。自上而下的测量可以通过参考Y截面测量(即横断的薄片的测量)而被校准,不过横断薄片使其不能用于表征半导体制造工艺。在步骤108和109中(分别为任务08和任务09),低kV抛光对称地去除由底切铣削的射束产生的无定形损伤层。由于低kV意味着小于大约10,000 kV,更优选地小于7,500 kV,并且最优选地5000 kV或更少。在可选的步骤110中(可选任务10),如果薄片作为横截面以表征薄片产生工艺,低kV钨勾画(delineation)步骤最小化Y截面对薄片的几何形状的影响,并且有助于区分Y截面的薄片的边缘。在步骤111中(可选任务11),薄片在薄化窗口的中心被切割,从而提供薄片厚度的直接测量,但在工艺中破坏所述薄片。在任务04、05、06、08和09中,用SEM检查样本的可选步骤可以在每个步骤的开始和/或结束处被执行以用于监控薄片产生工艺。

[0055] 图2A和2B是步骤101之后的薄片204的图像。在步骤101,感兴趣的特征203被定位并且基准201、202被用离子射束铣削,使得期望的薄片中心204优选地精确处于基准201、202之间。线基准201将被用于定位块图案化步骤,并且方形基准202将被用于最终薄化图案的布置。

[0056] 这些特征的布置将定义薄片布置,因此应当施加万分的小心以确保这些图案相对于感兴趣的特征的准确性和可重复性。使用定位感兴趣的特征的电路的计算机辅助设计图和工件的表面上可见的特征来定位感兴趣的特征,其相对于可见表面特征可能不是可见的。

[0057] 两个漂移修正铣削(DCM)标记205在此任务的开始处被产生。这些被DCM算法使用以补偿任何漂移,所述漂移可能在铣削期间或者甚至在配准图像和图案发起之间发生。例如,在被转让给本发明的受让方的Andrew Wells的美国专利公开号为20090218488的“Beam Positioning For Beam Processing(用于射束处理的射束定位)”中描述了漂移控制算法。

[0058] DCM标记205被布置在基准201、202之前,并且在产生基准201、202时被利用以确保最佳准确性是可能的。基准201、202优选地被铣削,在期望薄片204的任一侧上一个。基准201、202可以与薄片204成一直线,或偏移达已知量。

[0059] 已知的是,把保护层施加到正被处理的区域以保护感兴趣的区域。当使用比工件更硬的保护层时,保护层使得非常薄的薄片的顶部在Y截面观察时具有“高尔夫球座”的轮廓。钨是比硅更硬且更致密的材料,并且具有显著较低的蚀刻速率,这导致钨帽比薄片宽。碳保护层(被用于替代钨层)具有与硅的蚀刻速率更加接近地匹配的蚀刻速率。如上所述,在被用于铣削空腔的情形下,在此所使用的“匹配”的溅射速率意味着两种材料的溅射速率的比优选小于1.5:1,并且更优选小于1.2:1。当在半导体工件中形成薄片时,优选使用具有匹配的蚀刻速率的保护层,诸如,作为硅上保护层的碳沉积。匹配的溅射速率还减少了可能干扰成像的薄片上的帘幕化(curtainning)、伪像。

[0060] 虽然感兴趣的区域上的保护层优选具有与工件的溅射速率匹配的溅射速率,远离感兴趣的区域的保护层(其中基准被铣削)可以由诸如钨之类的材料制成,所述材料具有较低的溅射速率以在射束被导向作为位置参考的基准的时间期间保护所述基准。

[0061] 图3A和3B是在步骤102中铣削底部块之后的薄片304的图像。图4A和4B是在步骤103中顶部块铣削之后的薄片404的图像。在步骤102和103中,底部块铣削306和顶部块铣削307被对称地执行,即,它们在薄片304、404的任一侧上使用相同的铣削策略,并且被设计成使用相同的铣削偏移,使得最终的结果是在基准201、202之间居中的均匀楔形薄片404。

[0062] 块铣削典型地被以相对高的射束电流执行,诸如在3nA和30nA之间,更优选地在5nA和20nA之间,甚至更优选地在大约8nA和15nA之间,并且在一些实施例中,以大约12.2nA的射束电流。这样的高射束电流会破坏DCM标记205,如果射束被导向DCM长达铣削所需的30秒钟。为了最小化任何残余镜台移动,块铣削在三次通过中被分裂,在每次通过之间具有重新配准。三次块通过由以下组成:规则横截面,其去除所述薄片的任一侧上的大多数的材料;孔清洁小矩形框铣削(大约3微米或更小),其从孔的底部去除一些再沉积的材料并且通常使薄片袋针对非原位采集装置针而被更好地制备,以及清洁横截面,其以高准确性定义块状薄片面的边缘。

[0063] 图5A和5B是在步骤104中顶部薄化后的薄片504的图像。图6A和6B是在步骤105中底部薄化后的薄片604的图像。在步骤104和105中,顶部薄化铣削508和底部薄化铣削609也是对称的,并且铣削偏移被保持相等。薄化铣削508、609在薄化窗口508、609下方在薄片504、604的任一侧上留下壁架(ledge)510、611或“搁板”。该壁架510、611增加薄片504、604的结构完整性,其有助于保持其在“提出”期间免于破裂。壁架结构510、611通过使用清洁横截面产生,其剂量仅足以去除再沉积的溅射的材料和大约1 μ m的底层材料,如以下所述。在清洁横截面之后,在薄片面存在确保薄化窗口508、609是垂直的更长的线铣削。典型地使用高射束能量、小于大约100pA的射束电流以及大约1度的射束倾斜执行所述线铣削。

[0064] 可以通过开始与恰好离开块状薄片的薄片面平行的自上而下的线光栅图案来产生壁架结构510、611。线图案被以小的增量朝向切割面移动。线光栅的剂量应当使得其仅去除薄片504、604的大约1微米的顶部。线光栅的位置继续朝向期望的最终薄片面增加。每个后续切割比之前的切割去除更少的材料,因为在切割的底部的射束的入射角度大于所述射束以其撞击所述侧壁的掠射角,因此所述底部铣削变慢。定义薄片面的最终线光栅将具有之前光栅的大约2-3倍的剂量以使薄片面与晶片表面正交。

[0065] 清洁横截面可以被认为是缓慢地朝向最终切割面位置前进的线铣削:所述射束跨与期望最终切割面平行的线进行前后扫掠,并且在间隔处所述线朝向期望的最终切割面前进直到其到达。间隔由铣削的剂量确定。所述剂量通常以每平方微米的纳米库伦来度量,并且本质上是定义每单位区域有多少离子撞击工件的一种方式。当使用清洁横截面时,剂量典型地被设置确保在线扫描增加之前,从切割面顶部一路向下到沟槽底部的材料被去除。然而,在此工艺中,剂量被选择使得每个线扫描仅去除一部分切割面,并且每条线浅于之前的线。每条线的剂量是恒定的,但因为擦地角溅射的动力学,每条线是更浅的,因为之前的线不沿着切割面去除所有的材料,其导致在底部远离期望的最终切割面的斜坡。该效果复合,因为下一条线的剂量不足够高以去除切割面上的所有材料,并且在底部存在斜坡。因为材料的溅射速率在擦地角处通常是最高,其中当射束接近更正交的入射角时溅射速率急

剧降低,从斜坡去除的材料量小于从侧壁去除的量。

[0066] 薄片侧壁优选地被垂直定向且平行。然而,在浅的清洁横截面的末端,所述薄片在顶部是薄的,而在底部变得更宽。通过用为浅的清洁横截面的剂量的2-3倍的剂量执行最终线铣削而使侧壁变直,并且在薄片底部的宽截面防止整个搁板(在薄化窗口之下的厚区域)被去除。这对薄片面的垂直性做出贡献。

[0067] 可替换地,但不太合期望地,可以通过把线光栅图案布置在块状薄片的外边缘内侧而产生厚的块状薄片(大约1 μ m到1.5 μ m厚)。线图案的剂量将以每个增量而增加铣削深度,但不会一路铣削通过块状薄片。线光栅图案在达到最终的切割面之前停止。在这种情形下,块状薄片被制成为少许厚,并且替代用针对变浅的深度调节的剂量开始所述薄片(以利用擦地角溅射速率),95pA薄铣削在薄片的顶部开始,并且被调节成具有减少的深度。

[0068] 在步骤104和105中,高离子能量薄化步骤的准确性是重要的。高离子能量优选在15 keV和50 keV之间,更优选地在20 keV和40 keV之间,甚至更优选地在25 keV和35 keV之间,并且最优选地为大约30 keV。调节低kV抛光步骤以去除薄化窗口508、609上的无定形损伤层,即抛光步骤应去除仅足以摆脱之前的离子铣削步骤的层损伤的材料。最终的薄片厚度由任务04和任务05中的铣削偏移定义。

[0069] 第一突出部铣削612在步骤105的结束被完成。填充的低能量矩形铣削完整地覆盖所述薄片604。调节剂量以去除总薄片高度的顶部1/3,因此这个铣削的位置不是关键的。低能量矩形铣削的范围覆盖所述搁板611,薄化窗口609,以及甚至在保护层的顶部上延伸超过609的一小段距离。此目的是把整个区域曝光于低能量离子的簇射(shower)以去除由30 kV的射束产生的无定形层。低能量抛光铣削有意地比薄化窗口大以更好的容许低能量射束中固有的铣削布置不准确性,但其仅稍微大于所述薄化窗口609,并且优选地不一路去到所述突出部612。

[0070] 图7A和7B是在步骤106之后的薄片的图像。第二突出部铣削713被设计成去除总薄片高度的底部1/3。此铣削713的布置是关键的:切割太远并且所述薄片可能变得分离,而切割太小并且所述突出部可能不被打破。

[0071] 底切铣削714把所述薄片704的底部与基底分离。在薄片的底部具有由第二块铣削步骤产生的材料桥。其从与第一块铣削相同侧被修整。

[0072] 在最终的30 kV薄化任务之后完成突出部612、713和底切714,使得薄片704在位置关键薄化步骤期间被尽可能刚性地附到基底。当薄片704在底部被释放并且所述突出部被切割时,薄片704可以相对于基准201、202移位。因为铣削全部被相对于基准202、202布置,薄片移位的量将直接转换成厚度或布置可重复性。低kV清洁工艺不像此一样敏感,因为低kV射束照亮整个薄化窗口,并且相对均匀地去除材料。在低kV清洁步骤期间的射束的位置不是关键的。低keV抛光步骤优选地在步骤106之后执行,以去除在之前的高电压铣削步骤期间沉积在薄片面上的任何材料。还需要低kV清洁来减小厚度,同时最小化由于先前的30 kV步骤引起的无定形损伤。低能量铣削被最后执行的主要原因是限制无定形层。一旦执行低能量抛光,工件优选地是不遭受任何高能离子,其将冒增加损伤层的危险。避免高压离子包括避免针对定位产生所述突出部的铣削所需的图像使用离子射束。

[0073] 图8A是可选步骤107中SEM自上而下的厚度测量的图像。图8B是依据本发明的一个实施例的用于可选步骤107中的厚度测量的薄片804的区域815的放大图像。

[0074] 可选步骤107具有自上而下的薄片厚度测量,其旨在一旦薄片厚度已被使用破坏性的Y截面测量校准时用作工艺监控步骤。为了进行Y截面测量,晶片被旋转90度,使得SEM的倾斜轴与薄片804的长度排在一起。横截面的厚度的更准确的测量被用于校准自上而下的SEM厚度测量。SEM自上而下的技术被用于例程监控,因为在此阶段的厚度表现为用于最终的薄化的厚度的良好预测器,并且自上而下的SEM测量是非破坏性的。预测将不是完美的,并且可以随着工具的不同而改变,但应足以监控工艺偏移。

[0075] 为了使用碳保护层形成半导体的薄片,自上而下的SEM度量在30 kV抛光之后工作良好,但低kV工艺在碳顶部引起一些变形,其导致测量的不准确性。

[0076] 不需要此任务来产生薄片804并且可以跳过此任务以提高薄片生产量。然而,优选的是:周期性地执行Y截面并且把所述测量与自上而下的SEM测量相比较以校准自上而下的SEM,并且然后周期性地监控厚度稳定性。

[0077] 图9A和9B是在步骤108之后的薄片的图像。图10A和10B是在步骤109之后的薄片的图像。低kV抛光步骤是对称的,并且被设计成去除由较高能量(典型地为30 keV)射束产生的无定形损伤层。射束照亮整个薄化的区域并且所去除的材料量由施加到区域的剂量定义。

[0078] 当在具有碳保护层的半导体上执行低kV抛光步骤时,优选的是使射束散焦,并且使用图案刷新延迟。在射束处于最佳聚焦和/或不具有图案刷新延迟的情形下,观察到薄片薄化窗口的附加变形。射束被散焦,使得斑点大小增加大于25%、大于50%、或者更优选地大于100%。

[0079] “图案刷新延迟”意指工作循环小于100%。当射束不在正被薄化的材料上入射时提供延迟。减小的工作循环允许入射能量从正被薄化的区域消散。

[0080] 工作循环可以被减少例如至小于80%、小于50%、小于25%或小于15%。申请人已发现大约20%的工作循环生产具有减少的变形的薄片。即,在扫描射束之后,在相同区域上再次扫描射束之前施加延迟。

[0081] 在本发明的一些实现中,这种薄化窗口上的有效工作循环的减少还可以通过扩大扫描区域至适当大的值而实现。

[0082] 图11A和11B是在可选步骤110之后的薄片的图像。在可选步骤110中,低kV钨勾画步骤被设计成最小化30 kV的Y截面对薄片的几何形状的影响,并且有助于区分用于Y截面的薄片的边缘(特别地为工艺的半导体分支)。

[0083] 此工艺旨在被结合Y截面任务而使用。运行此任务将使薄片无用,因此其应被禁用,除非当生成Y截面测量时。

[0084] 图12A是在可选步骤111中的Y截面测量的图像。图12B是在可选步骤111中的Y截面测量中使用的薄片的横截面的放大图像。

[0085] 可选步骤111在薄化窗口的中心切割薄片。这提供了薄片厚度的直接测量,但破坏了工艺中的薄片。这应被用于在工艺中进行调节,并且偶尔确认薄片厚度。

[0086] 薄片布置准确性和可重复性很大程度上取决于感兴趣的特征的几何形状。关于薄片布置,边缘探测器通常比用于确定特征的精细位置的图案匹配更加准确。图案匹配应被用于粗略地定位特征而边缘探测器应被用于精细定位(只要有可能)。还关于薄片布置,配准图像的像素密度对于特征定位的准确性和可重复性是关键。机器视觉准确性典型地以

像素的片段被引用,因此越小的像素间距将典型地导致越好的准确性。这由射束的探针大小限制。像素密度是HFW和图像分辨率的函数。

[0087] 保护层的SEM沉积可以被用于保护敏感表面免受FIB损伤,但这可能导致薄片布置问题,除非可识别标记在感兴趣的特征已被覆盖有SEM沉积之后对于FIB可见。

[0088] 基准应被相对于感兴趣的特征准确地定位。特征配准的任何不准确性将直接转换成薄片布置误差。基准可以被使用现有计量数据(例如来自定位缺陷的工具或来自CAD数据)布置。

[0089] 施加以铣削空腔的总剂量可能需要改变以计及工件中一个或多个材料的一个或多个溅射速率。块铣削应曝光比预期薄片深0.5-1.0 μm 的切割面。在一些实施例中,用户进行实验以确定铣削深度并在形成期望薄片之前调整离子剂量。块铣削剂量应是对称的,除非存在关于需要其是非对称(诸如,在一侧而不在另一侧的金属焊盘)的工件的事物,并且在这种情形下,剂量应被调节以在两侧曝光相同的深度。

[0090] 薄化铣削应切割晶片表面以下大约1 μm 深的垂直切割面。

[0091] 低kV清洁铣削的主要目的是去除由块和薄铣削产生的FIB引起的损伤层(也被称为无定形层)。因此,重要的是:熟悉基底材料并且知道30 kV和5 kV之间的损伤层厚度的近似差异(例如,在30 kV的Si损伤层是大约25 nm并且在5 kV的损伤层是大约6 nm,对于大约19 nm的差异)。低kV清洁铣削的目的是从每侧去除稍大于所述损伤层差异。为了设置用于30 kV薄化任务的目标厚度,将两倍的损伤层差异加到期望的薄片厚度(对于Si,30 kV目标将是50 nm+2*19 nm=大约88 nm)。

[0092] 在制备薄片之后,其被安装在TEM样本网格中以便观察。薄片从工件的去除可以被“非原位”地执行,即,真空室或薄片的外部可以在真空室内部被去除,并且被使用离子射束沉积安装到网格。对于非原位的去除,许多薄片可以在单个工件上被制备,其然后被从所述真空室去除。薄片可以从工件被去除,并且布置在TEM样本网格上。以上所述的工艺可以被自动化以在真空室中制备用于非原位去除的各种指定位置处的多个薄片。

[0093] 本发明还提供了典型的离子射束系统,聚焦离子射束(FIB)系统。FIB系统包括具有上颈部分的抽空外壳,液体金属离子源或其它离子源和聚焦柱位于其内。也可以使用其它类型的离子源(诸如多尖端或其它等离子体源)及其它光柱(诸如定形的射束柱),以及电子射束和激光器系统。

[0094] 离子射束从液体金属离子源通过离子射束聚焦柱,并且在偏转板处被示意性地指示的静电偏转部件之间朝向工件,所述工件例如包括在下室内的镜台上定位的半导体器件。镜台还可以支撑一个或多个TEM样本架,使得样本可以从半导体器件被提取,并且移动到TEM样本架。镜台可以优选地在水平面(X和Y轴)并且垂直地(Z轴)移动。镜台还可以倾斜近似六十(60)度,并且围绕所述Z轴旋转。系统控制器控制FIB系统的不同部分的操作。通过系统控制器,用户可以控制离子射束通过输入到传统用户接口的命令以期望的方式被扫描。替代地,系统控制器可以依据存储在计算机可读存储器(诸如,RAM、ROM、或者磁盘或光盘)中的编程指令控制FIB系统。存储器可以存储用于以自动化或半自动化的方式执行以上所述的方法的指令。来自SEM的图像可以由软件识别,以判定何时继续处理、何时停止处理、以及在哪里定位用于铣削的射束。

[0095] 例如,用户可以使用指向设备勾画显示屏上的感兴趣的区域,并且然后所述系统

可以自动执行以下所描述的步骤来提取样本。在一些实施例中, FIB系统合并图像识别软件(诸如, 可从Cognex公司(Natick, Massachusetts)以商业方式得到的软件)来自动识别感兴趣的区域, 并且然后系统可以依据本发明人工或自动地提取样本。例如, 系统可以在包括多个器件的半导体晶片上自动定位相似特征, 并且取不同(或相同)的器件上的那些特征的样本。

[0096] 采用离子泵以用于抽空上颈部分。在真空控制器的控制下用涡轮分子和机械泵送系统抽空下室。真空系统在下室内提供近似 1×10^{-7} 托(1.3×10^{-7} 毫巴)和 5×10^{-4} 托(6.7×10^{-4} 毫巴)之间的真空。如果蚀刻辅助气体、蚀刻减速气体、或沉积前体气体被使用, 室背景压力可以升高, 典型地至大约 1×10^{-5} 托(1.3×10^{-5} 毫巴)。

[0097] 高电压电源被连接至液体金属离子源, 以及被连接至离子射束聚焦柱中的适合电极, 以用于形成近似1 keV至60 keV的离子射束并且引导其朝向样本。偏转控制器和放大器(被依据由图案生成器提供的规定图案操作)被耦合到偏转板, 从而离子射束可以被人工或自动地控制以在工件的上表面上描绘出对应的图案。在一些系统中, 偏转板被布置在最终透镜之前, 如本领域公知的。当消隐控制器(未示出)将消隐电压施加到消隐电极时, 离子射束聚焦柱内的射束消隐电极(未示出)使离子射束撞击到消隐光圈(未示出)上, 而不是目标上。

[0098] 液体金属离子源典型地提供镓金属离子射束。源典型地能够被聚焦到工件处的子1/10微米宽的射束中用于通过离子铣削、增强的蚀刻、材料沉积来修改工件, 或者用于使工件成像的目的。用于检测次级离子或电子发射的带电粒子检测器(诸如, Everhart Thornley或多通道板)被连接至视频电路, 其向视频监视器提供驱动信号, 并且从控制器接收偏转信号。

[0099] 下室内的带电粒子检测器的位置可以在不同的实施例中改变。例如, 带电粒子检测器可以与离子射束同轴, 并且包括用于允许离子射束通过的孔。在其它实施例中, 次级粒子可以通过最终的透镜被收集, 并且然后转向离开用于收集的轴。扫描电子显微镜(SEM)(连同其电源和控制)可选地提供有FIB系统。

[0100] 气体递送系统延伸到下室中以用于引入并引导气体蒸汽朝向工件。被转让给本发明的受让方的Casella等的美国专利号为5,851,413的“Gas Delivery System for Particle Beam Processing(用于粒子射束处理的气体递送系统)”描述了适合的气体递送系统。同样被转让给本发明的受让方的Rasmussen的美国专利号为5,435,850的“Gas Injection System(气体注入系统)”描述了另一个气体递送系统。例如, 碘可以被递送以增强蚀刻, 或金属有机化合物可以被递送以沉积金属。

[0101] 显微操纵器(诸如, 来自Omniprob公司(Dallas, Texas)的AutoProbe 200™, 或来自Kleindiek Nanotechnik(Reutlingen, Germany)的Model MM3A)可以精确地移动真空室内的对象。显微操纵器可以包括在真空室外部定位的精密电动机以提供在真空室内定位的部分的X、Y、Z和 θ (theta)控制。显微操纵器可以与用于操控小对象的不同的末端执行器适合。在以下所描述的实施例中, 末端执行器是细探针。细探针可以电连接到系统控制器以把电荷施加到探针以控制样本和探针之间的吸引。

[0102] 打开门以便把工件插入到X-Y镜台上, 其可以被加热或冷却, 并且还用于服务内部气体供应存储库(如果其被使用)。门被互锁使得其在系统处于真空的情形下不能被打开。

高电压电源把适合的加速度电压提供到离子射束聚焦柱聚焦中的电极,以用于使离子射束通电并聚焦。当其撞击工件时,材料被溅射,被从样本物理的喷射。替代地,离子射束可以分解前体气体来沉积材料。聚焦离子射束系统是商业上可得到,例如,从FEI公司(Hillsboro, Oregon),本发明的受让方。尽管以上提供了适合的硬件的示例,但本发明不限于以任何特定类型的硬件来实现。

[0103] 依据本发明的一些实施例,一种形成薄片的方法,所述薄片具有观察面以用于在所述观察面中感兴趣的特征的透射电子显微镜观察,其包括:引导带电粒子射束朝向带电粒子射束系统的真空室中的工件以引起在感兴趣的特征之上从前体气体沉积保护层,所述保护层具有与工件的溅射速率匹配的溅射速率;引导聚焦离子射束朝向样本以铣削靠近感兴趣的特征的一个或多个基准;引导聚焦离子射束以在感兴趣的区域的两侧上铣削空腔以形成薄片;从所述薄片的每一侧,引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削,随着所述射束接近感兴趣的区域而连续地铣削到降低的深度以提供远离所述观察面倾斜的底部表面,聚焦离子射束中的离子具有第一着陆能量(landing energy);在从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削之后,进行铣削以去除分离所述空腔的材料以留下支撑所述空腔的突出部;以及在铣削以去除分离所述空腔的材料之后,引导离子射束朝向所述观察面,所述离子射束具有低于第一着陆能量的第二着陆能量。

[0104] 在一些实施例中,所述第一着陆能量大于20,000 eV,并且所述第二着陆能量小于15,000 eV。在一些实施例中,所述第一着陆能量大于25,000 eV,并且所述第二着陆能量小于10,000 eV。在一些实施例中,所述第一着陆能量大于28,000 eV,并且所述第二着陆能量小于6,000 eV。

[0105] 在一些实施例中,所述方法进一步包括分离从真空室内部的样本铣削的薄片。在一些实施例中,所述方法进一步包括分离从真空室外部的样本铣削的薄片。

[0106] 在一些实施例中,引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削,随着所述射束接近感兴趣的区域而连续地铣削到降低的深度以提供远离所述观察面倾斜的底部表面包括把所述薄片薄化到小于100 nm的厚度。在一些实施例中,所述步骤在没有人类干预的情形下被自动执行。在一些实施例中,所述薄片被薄化到小于70 nm。在一些实施例中,所述薄片被薄化到小于50 nm。

[0107] 在一些实施例中,引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削包括在最终铣削之前使用基准而确定射束位置。在一些实施例中,所述方法进一步包括在从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削之后,引导散焦离子射束以朝向观察面,在散焦离子射束中的离子的能量小于被用于形成空腔的离子的能量。在一些实施例中,引导散焦离子射束以朝向观察面包括连续地引导散焦离子射束朝向观察面,具有在射束的连续施加之间的延迟。

[0108] 在一些实施例中,所述方法进一步包括用扫描电子显微镜观察薄片以确定其厚度。在一些实施例中,所述方法进一步包括对薄片中的横截面进行铣削,并且在薄片从工件分离之前用扫描电子显微镜观察所述横截面。在一些实施例中,引导聚焦离子射束朝向样本以铣削靠近感兴趣的特征的一个或多个基准包括铣削两个基准,要形成的薄片的任一侧上一个,所述基准与要形成的薄片的中心对准。

[0109] 在一些实施例中,引导聚焦离子射束朝向样本以铣削靠近感兴趣的特征的一个或

多个基准包括铣削两个基准,要形成的薄片的任一侧上一个,所述基准从要形成的薄片的中心偏移。在一些实施例中,引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削包括在铣削期间确定射束漂移至少一次,并且修正所述射束的位置以补偿所述漂移。

[0110] 依据本发明的一些实施例,一种用于自动生产具有小于100 nm的厚度的薄片的设备,其包括离子射束柱;用于支撑工件的镜台;用于控制离子射束柱和镜台的操作的控制器,所述控制器包括存储器,所述存储器存储用于执行如下步骤的计算机指令:引导带电粒子射束朝向带电粒子射束系统的真空室中的工件以引起在感兴趣的特征之上从前体气体沉积保护层,所述保护层具有与工件的溅射速率匹配的溅射速率;引导聚焦离子射束朝向样本以铣削靠近感兴趣的特征的一个或多个基准;引导聚焦离子射束以在感兴趣的区域的两侧上铣削空腔以形成薄片;从所述薄片的每一侧,引导聚焦离子射束以从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削,随着所述射束接近所述感兴趣的区域而连续地铣削到降低的深度以提供远离所述观察面倾斜的底部表面,聚焦离子射束中的离子具有第一着陆能量;在从所述空腔逐渐更靠近所述观察面地进行铣削之后,进行铣削以去除分离所述空腔的材料以留下支撑所述空腔的突出部;在进行铣削以去除分离所述空腔的材料之后,引导离子射束朝向所述观察面,所述离子射束具有低于第一着陆能量的第二着陆能量。

[0111] 在一些实施例中,所述设备进一步包括用于观察真空室中的工件的扫描电子显微镜柱。

[0112] 尽管以上本发明的描述主要针对生产TEM薄片的方法,所述方法是鲁棒的、可重复的并且因此适于自动化,应认识到执行此方法的操作的装置会进一步在本发明的范围内。此外,应认识到的是:本发明的实施例可以经由计算机硬件、软件、或二者的组合来实现。可以依据本说明书中所描述的方法和附图,使用标准编程技术——包括用计算机程序配置的计算机可读存储介质,其中如此配置的存储介质促使计算机以特定和预定义的方式进行操作——以计算机程序实现所述方法。每个程序可以以高级的面向过程或对象的编程语言来实现,从而与计算机系统进行通信。然而,程序可以以汇编或机器语言来实现(如果期望的话)。在任何情形下,语言可以是编译或解释的语言。此外,程序可以在被编程用于所述目的的专用集成电路上运行。

[0113] 此外,方法可以以任何类型的计算平台实现,包括但不限于:个人计算机、迷你计算机、主机、工作站、联网或分布的计算环境、计算机平台,该计算机平台与带电粒子工具或其它成像设备等通信、分离或与其成为整体。本发明的方面可以以存储在存储介质或设备(无论是对计算平台可去除的还是与其成为整体)上的机器可读代码实现,所述存储介质或设备诸如硬盘、光读取和/或写入存储介质、RAM、ROM等,使得其可由可编程计算机读取,以用于当所述存储介质或设备被所述计算机读取以执行在此描述的过程时配置和操作所述计算机。此外,机器可读代码或其部分可以通过有线或无线网络进行发送。在此描述的发明包括这些以及各种其它类型的计算机可读存储介质,当这种介质包含用于结合微处理器或其它数据处理器实现以上所述的步骤的指令或程序时。本发明还包括计算机本身,当被依据在此描述的方法和技术进行编程时。

[0114] 计算机程序可以被应用于输入数据以执行在此描述的功能,并且从而转换所述输入数据以生成输出数据。输出信息被应用于一个或多个输出设备,诸如显示监视器。在本发

明的优选实施例中,转换的数据表示物理和有形的对象,包括在显示器上产生物理和有形的对象的特定视觉描述。

[0115] 本发明优选的实施例还利用粒子射束设备(诸如,FIB或SEM)以便使用粒子射束对样本进行成像。用于对样本成像的这样的粒子与样本内在地互相作用,从而导致某种程度的物理变形。此外,贯穿本说明书,使用诸如“计算”、“确定”、“测量”、“生成”、“检测”、“形成”等之类的术语的讨论也指代计算机系统或类似电子设备的动作和工艺,其把表示为计算机系统内的物理量的数据操控和转换成类似地表示为计算机系统或其它信息存储、传输或显示设备内的物理量的其它数据。

[0116] 本发明具有广阔的应用性,并且可以提供如在以上的示例中示出和描述的许多益处。实施例将依赖于特定的应用而发生巨大改变,并且不是每个实施例都将提供所有的益处并且满足可由本发明实现的所有目的。适于执行本发明的离子射束系统在商业上是可得到的,例如,从FEI公司,本申请的受让方。然而,尽管之前描述的大部分针对FIB铣削和成像的使用,用于处理期望样本的射束可以包括例如来自液体金属离子源或等离子体源的例如电子射束、激光射束或聚焦或定形的离子射束或任何其它带电离子射束。此外,尽管之前描述的大部分针对粒子射束系统,本发明可以应用于任何适合的样本成像系统,其采用可移动的样本镜台来导航到样本特征的位置。

[0117] 尽管之前描述的大部分针对半导体晶片,本发明可以应用于任何适合的基底或表面。此外,无论何时在此使用术语“自动的”、“自动化的”、或类似的术语,那些术语将被理解成包括自动或自动化的工艺或步骤的人工启动。无论何时使用计算机处理自动地处理扫描或图像,应被理解的是:原始图像数据可以在不曾生成实际可观察图像的情形下被处理。术语“图像”被用于广阔的意义来包括不仅示出表面现象的显示图像,还包括表征表面以下或其上的多个点的信息的任何集合。对应于在粒子射束处于表面上的不同点处时所收集的次级电子的数据集合是一种类型的“图像”,即使所述数据不被显示。收集关于样本或工件上点的信息是“成像”。

[0118] 在接下来的讨论和权利要求中,术语“包括”和“包含”被用于开放的形式,并且因此应被解释成意指“包括,但不限于……”。术语“集成电路”是指在微芯片的表面上图案化的一组电子部件及其互连(统称为内部电气电路元件)。术语“半导体器件”一般是指集成电路(IC),其可以与半导体晶片成为整体、与晶片分离、或被封装以供在电路板上使用。术语“FIB”或“聚焦离子射束”在此被使用以指代任何校准的离子射束,包括离子光学器件聚焦的射束以及定形的离子射束。

[0119] 当在此讨论系统镜台或射束布置或导航的位置误差或准确性时,术语 $\pm 100\text{ nm}$ (或 $\pm 30\text{ nm}$ 或 $\pm X\text{ nm}$)意指射束可以指向在 100 nm (或 30 nm 或 $X\text{ nm}$)的最大误差内的样本上的位置。术语“ $\pm X\text{ nm}$ 的准确性”或“ $\pm X\text{ nm}$ 的定位准确性或更好”意指准确性为至少 $X\text{ nm}$,并且包括全部更小的值。术语“ $X\text{ nm}$ 的准确性或更大”意指准确性最佳为 $X\text{ nm}$,并且包括全部更大的值。

[0120] 就任何术语未在本说明书中具体定义来说,旨在所述术语被给予其平常并且普通的含义。所述附图旨在辅助理解本发明,并且未按比例绘制,除非以其它方式指出。

[0121] 尽管本发明及其优点已被详细描述,应被理解的是:在不背离由所附权利要求定义的发明的精神和范围的情形下,可以对在此描述的实施例做出各种改变、替代、以及变

更。此外,本申请的范围不旨在被限制到本说明书中所描述的工艺、机器、制造、主题构成、装置、方法和步骤的特定实施例。如本领域普通技术人员将从本发明的公开容易地认识到的,可以依据本发明使用与在此描述的对应实施例执行大体上相同的功能或实现大体上相同的结果的当前存在或随后被开发的工艺、机器、制造、主题构成、装置、方法或步骤。因此,所附权利要求旨在将这种工艺、机器、制造、主题构成、装置、方法或步骤包括在其范围内。

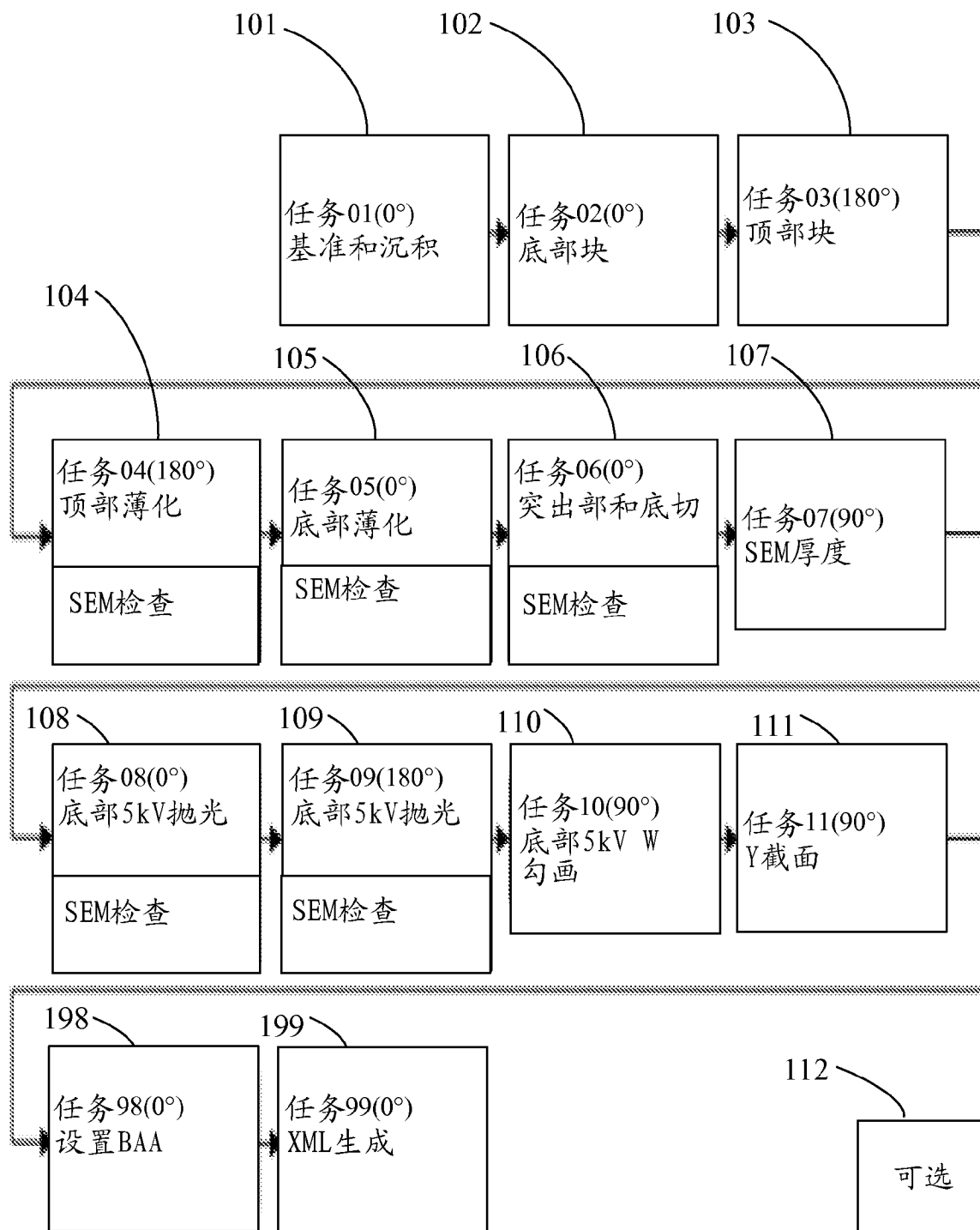


图 1

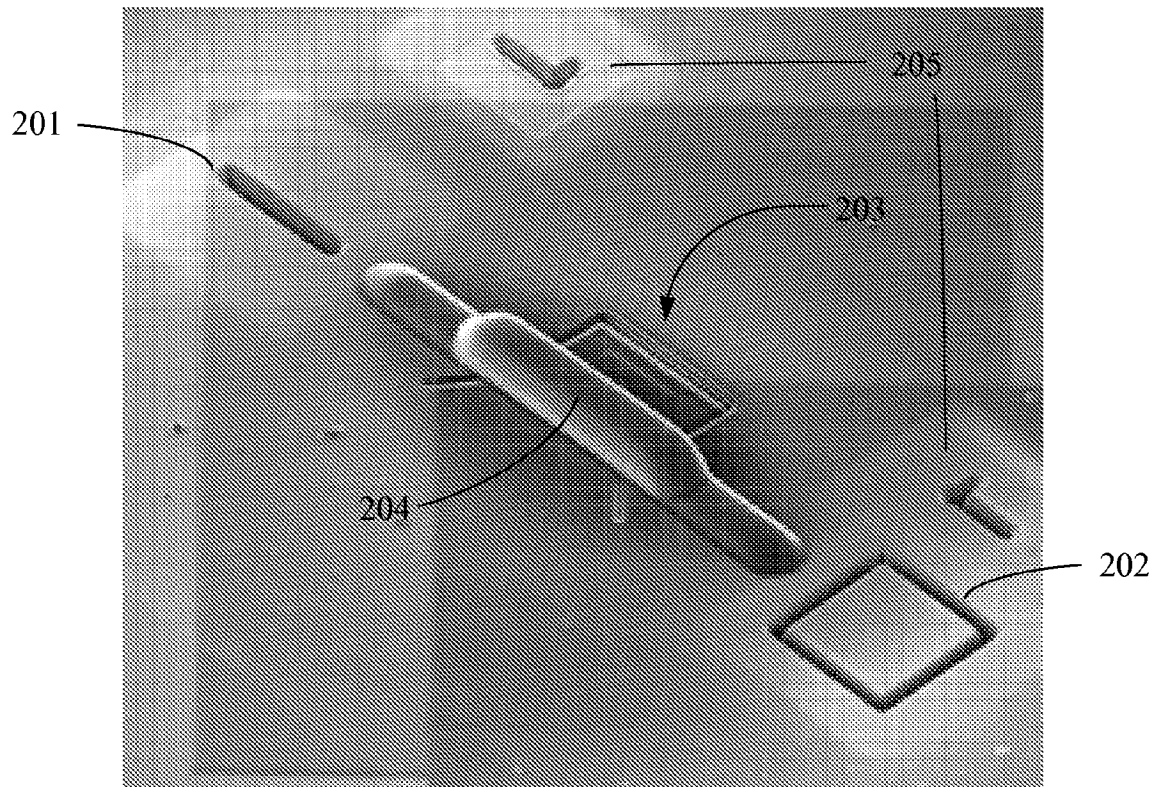


图 2A

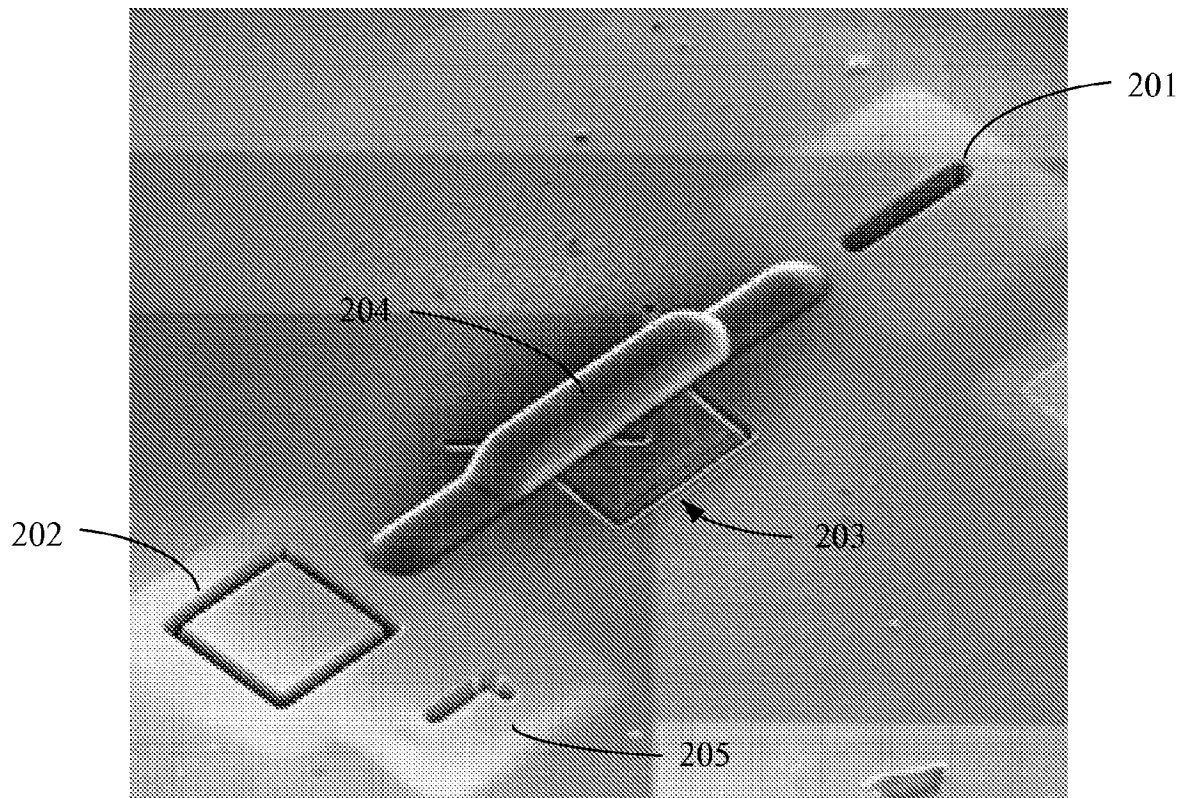


图 2B

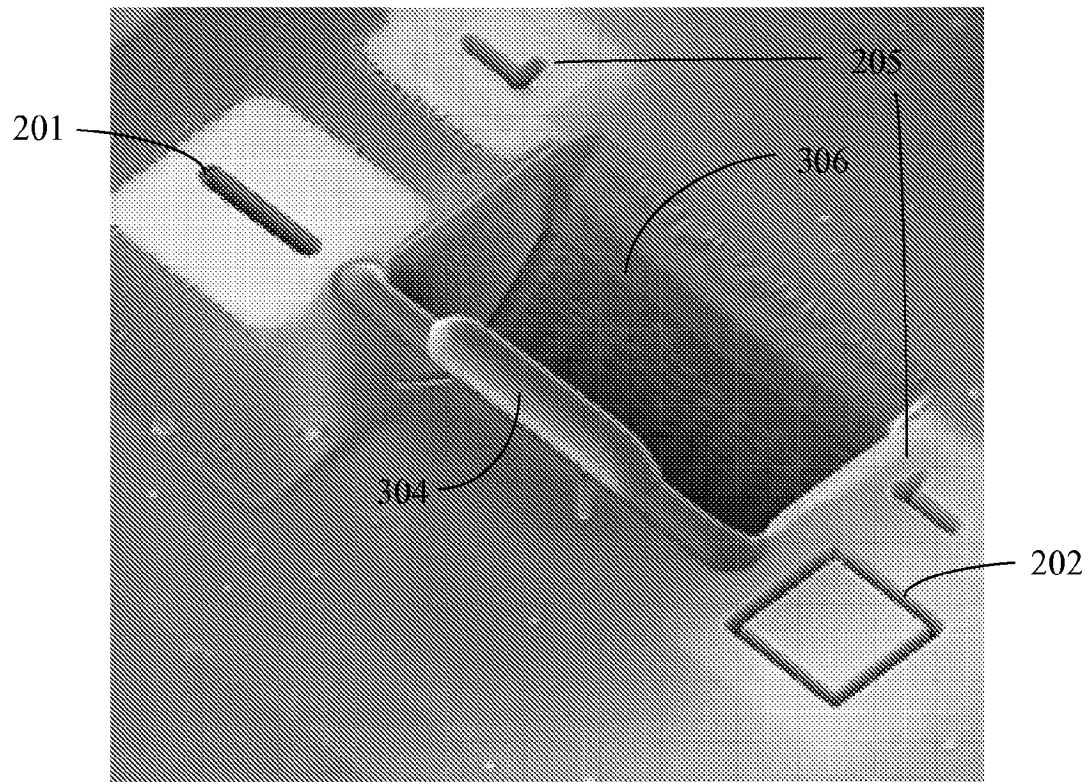


图 3A

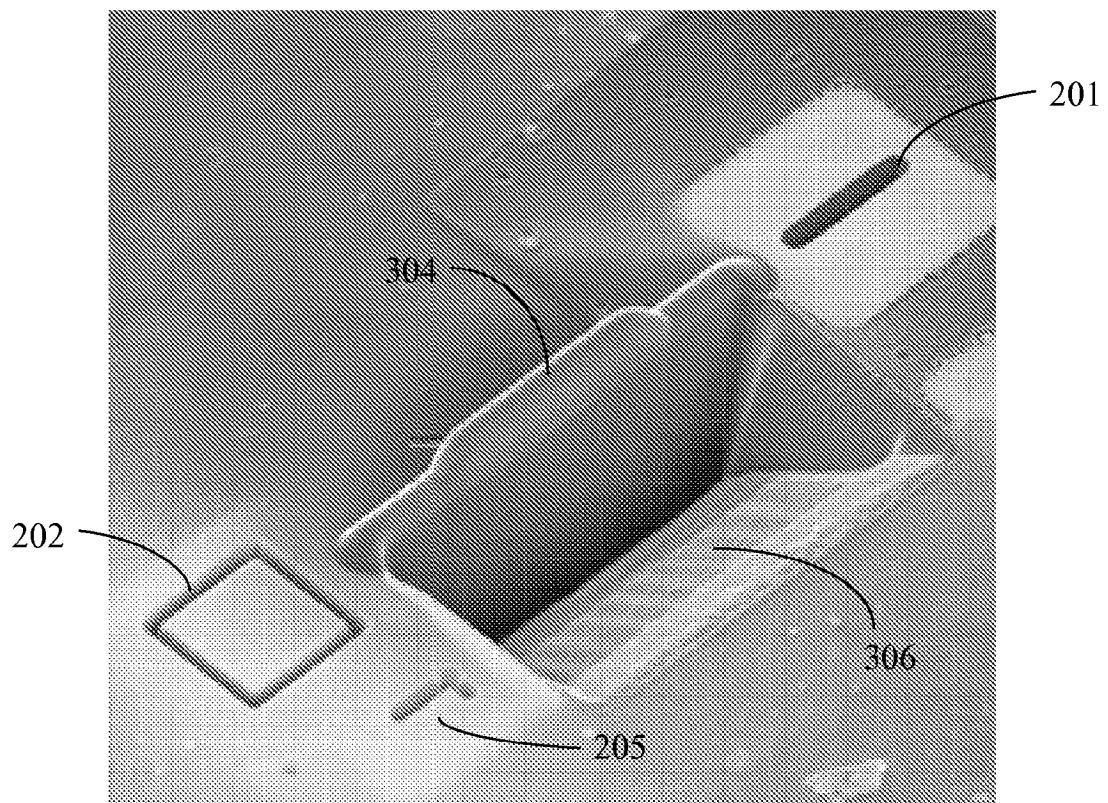


图 3B

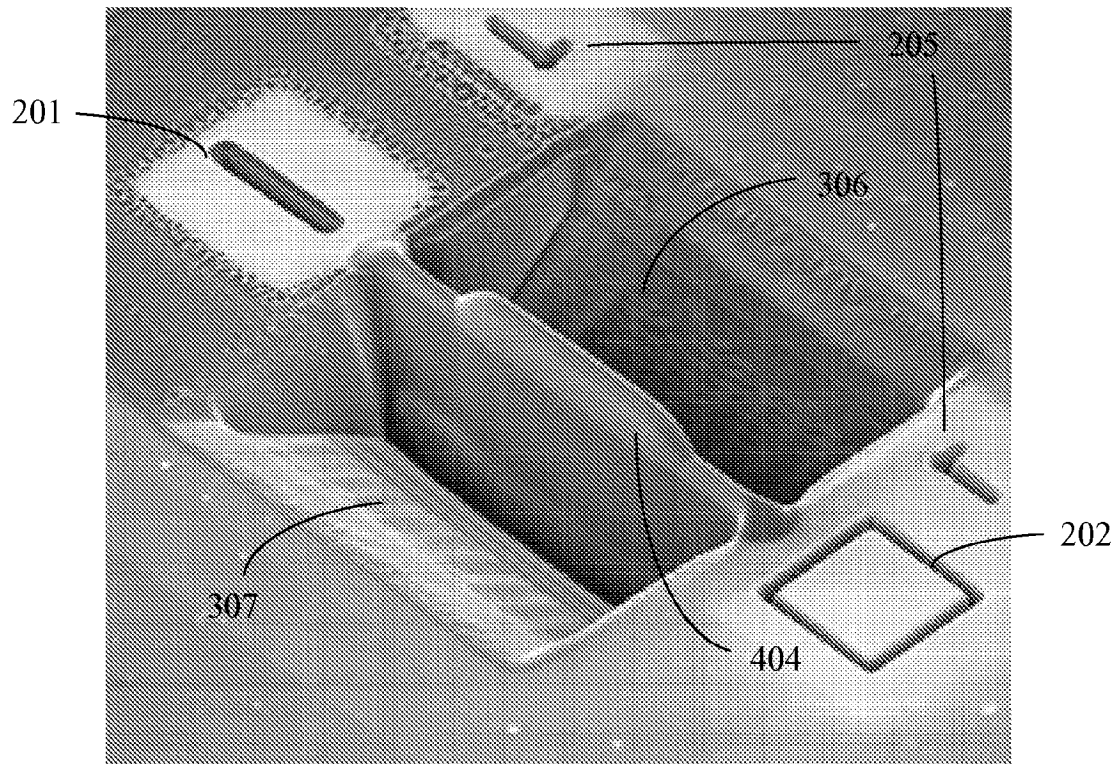


图 4A

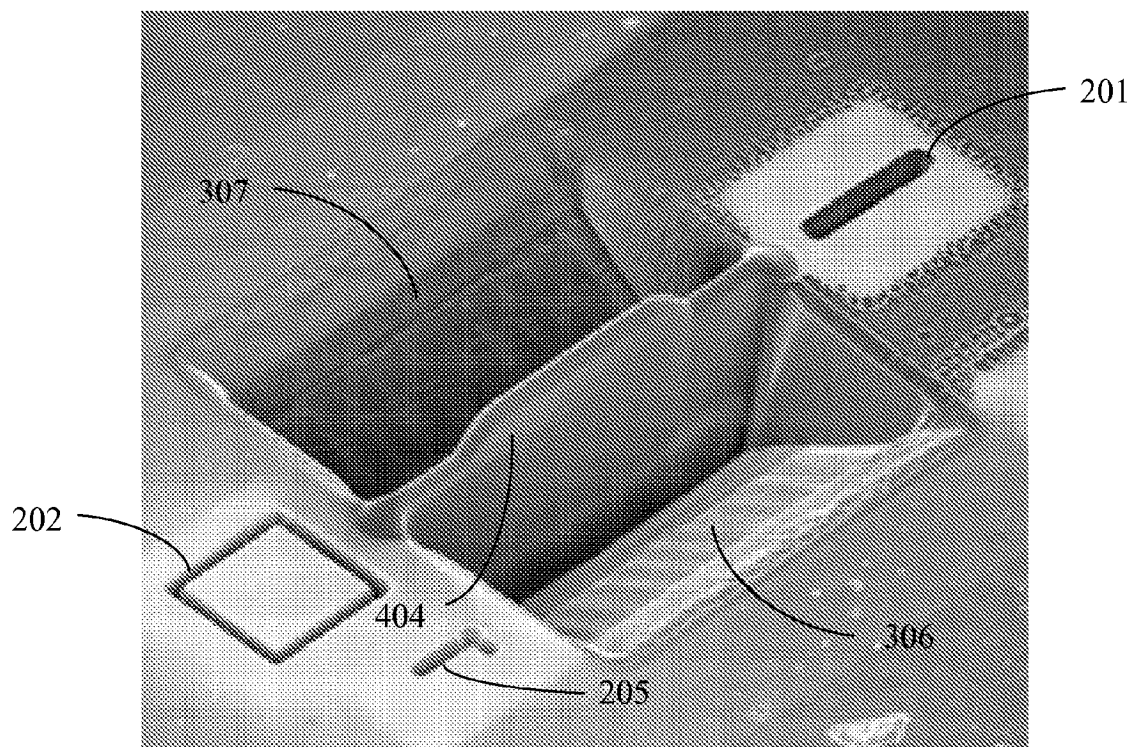


图 4B

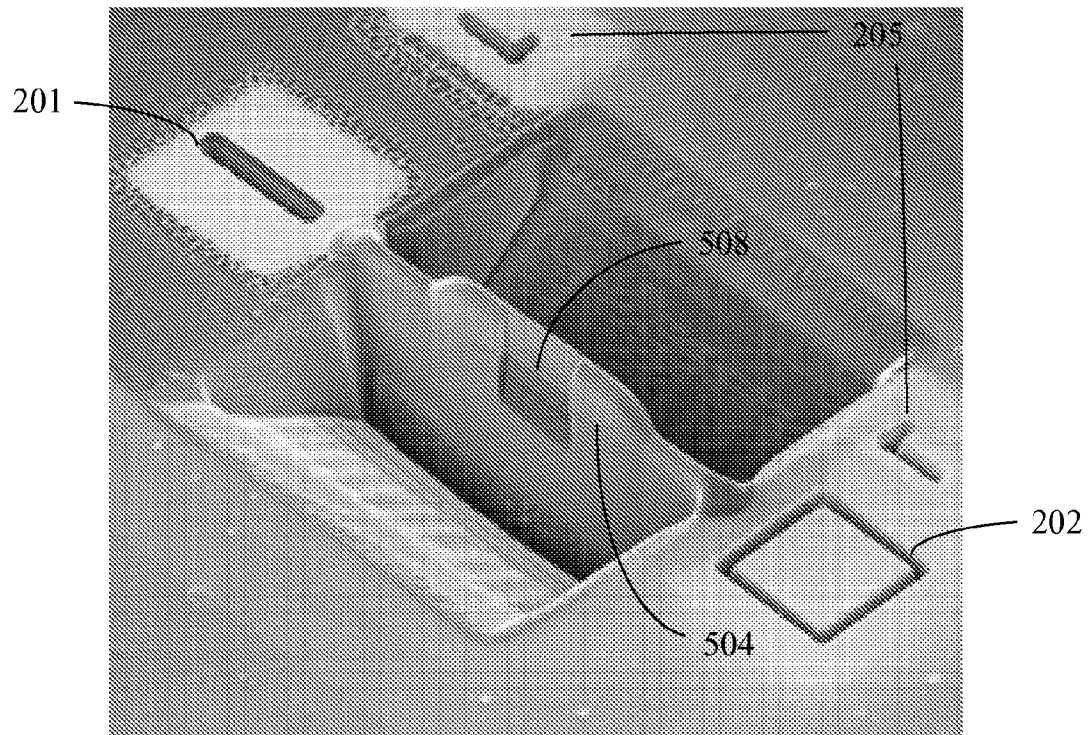


图 5A

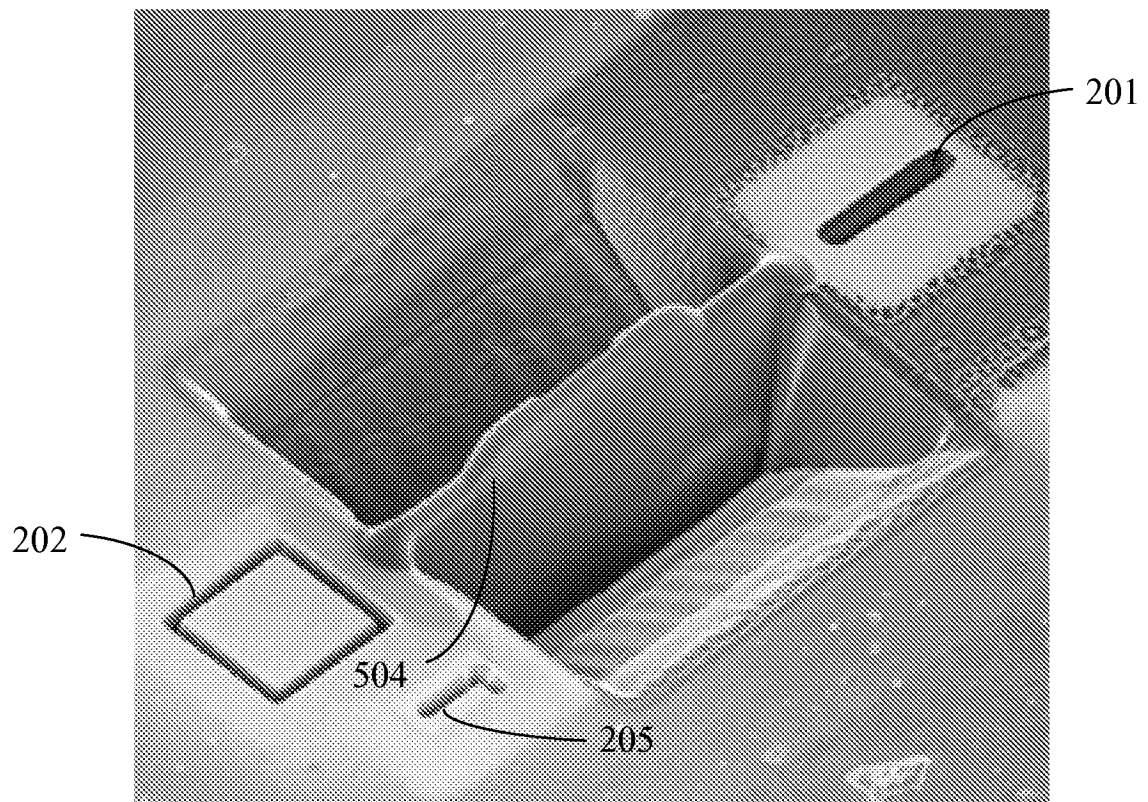


图 5B

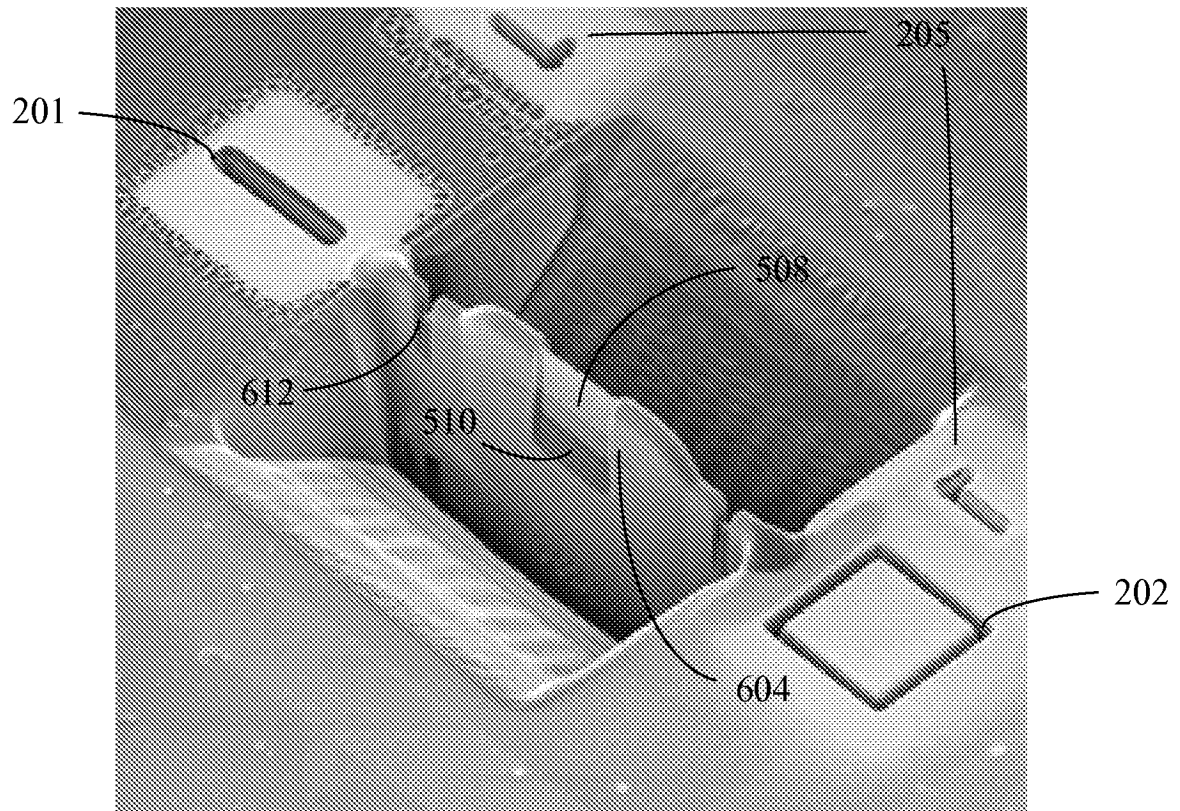


图 6A

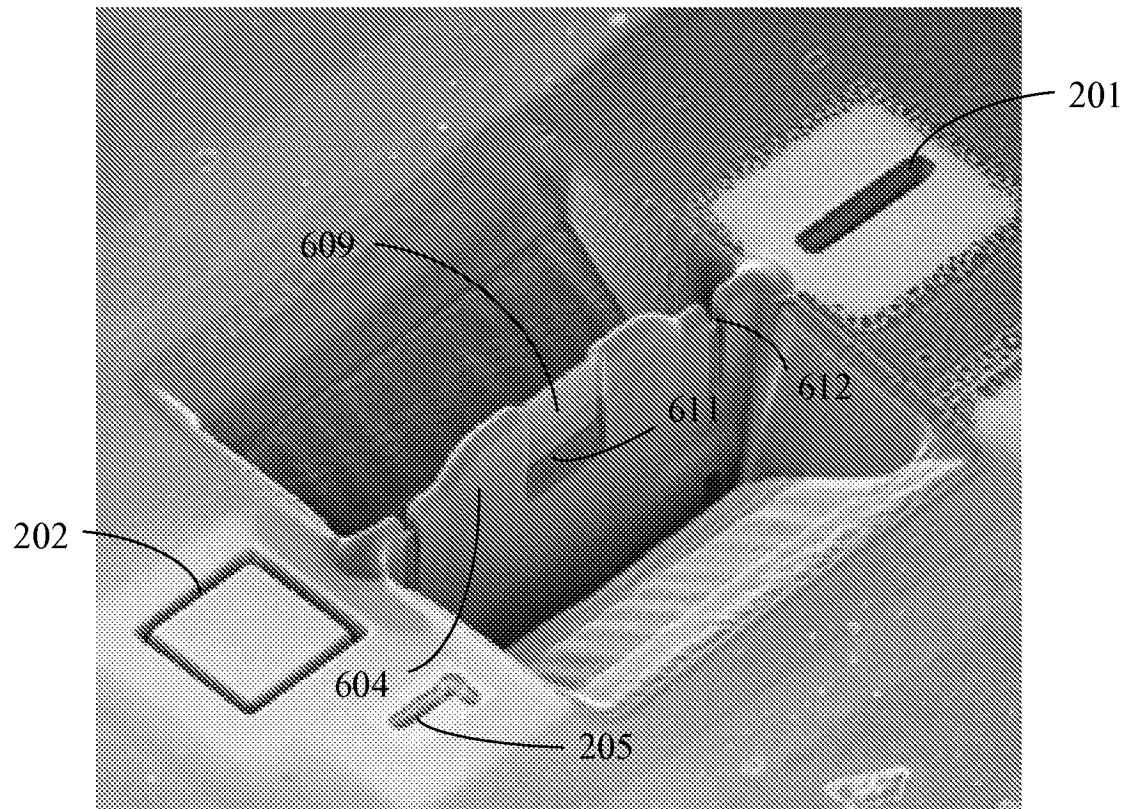


图 6B

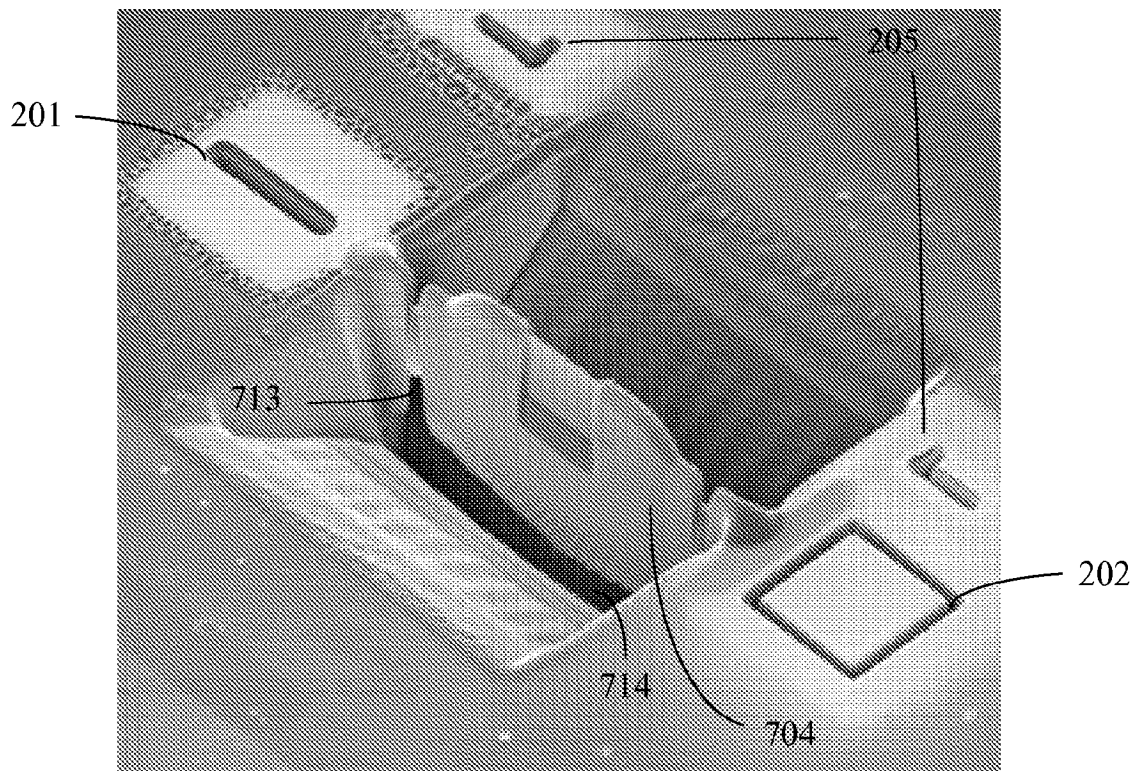


图 7A

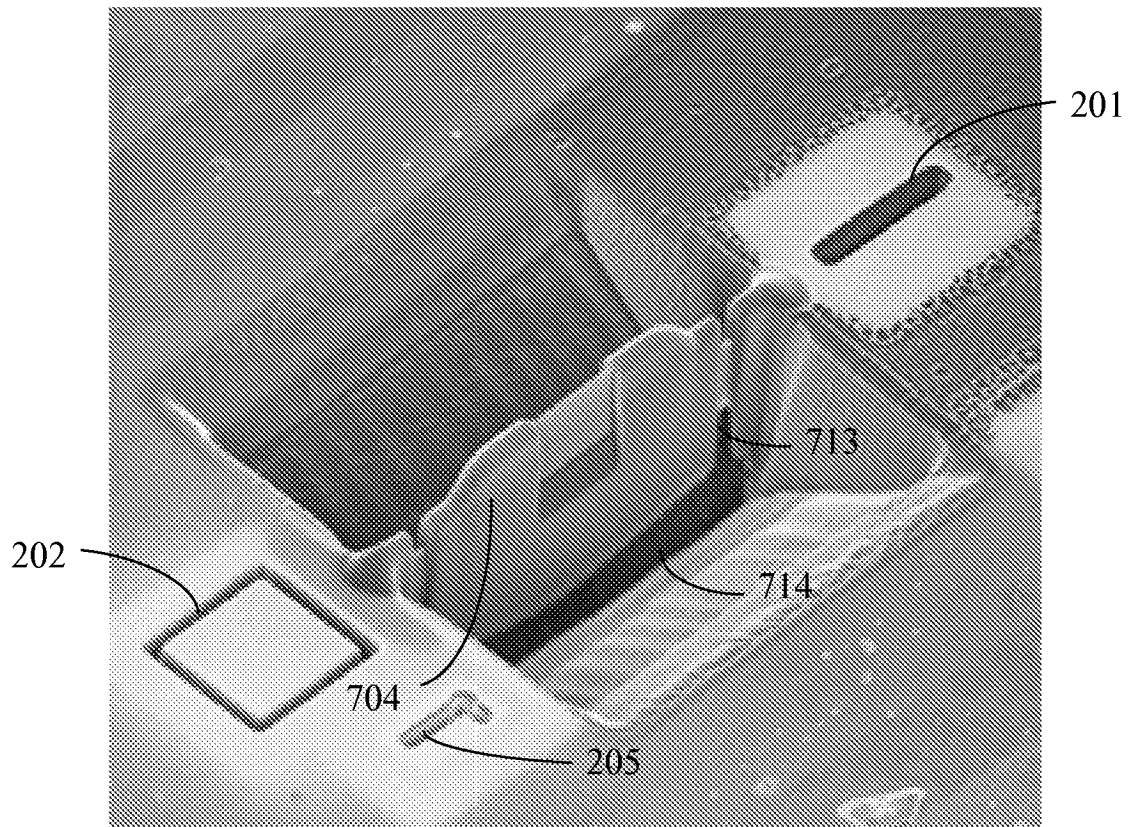


图 7B

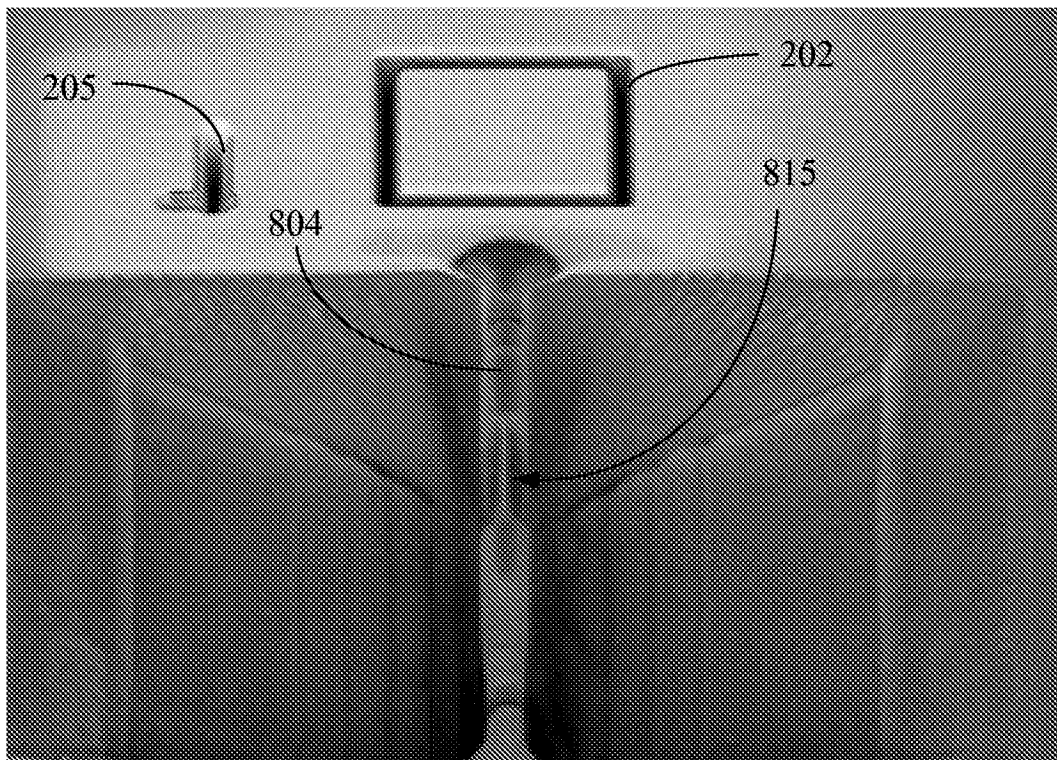


图 8A

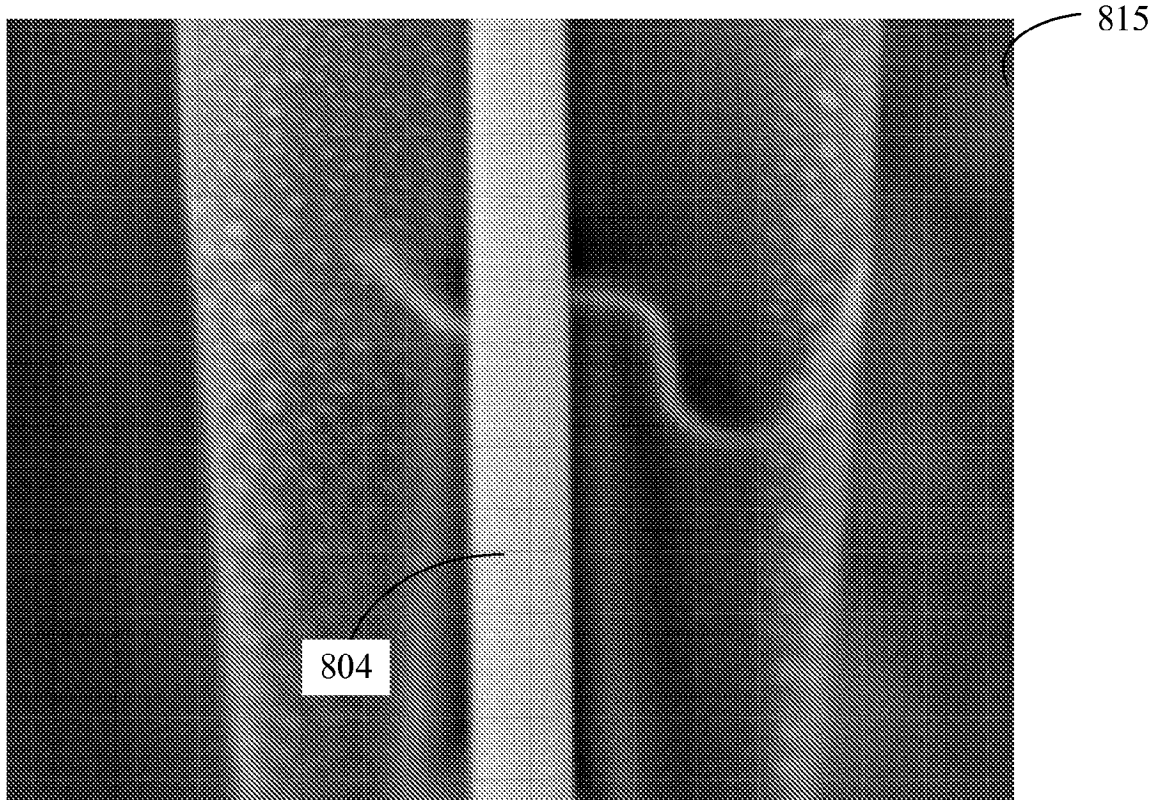


图 8B

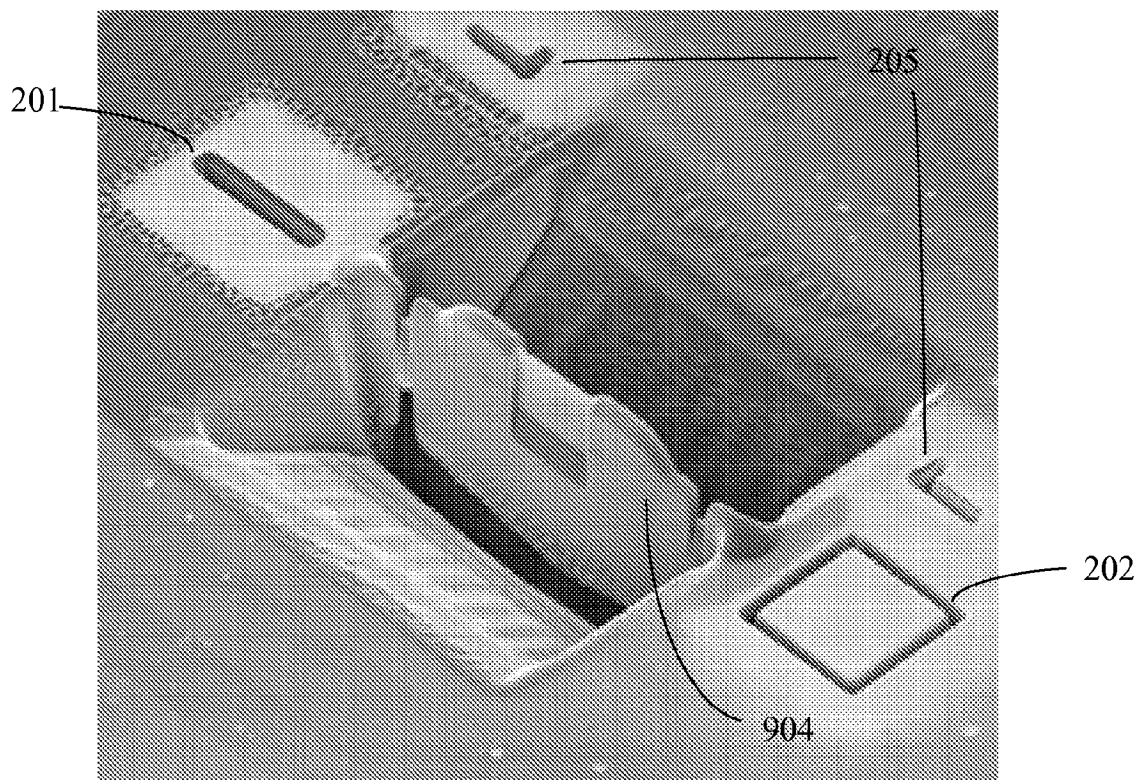


图 9A

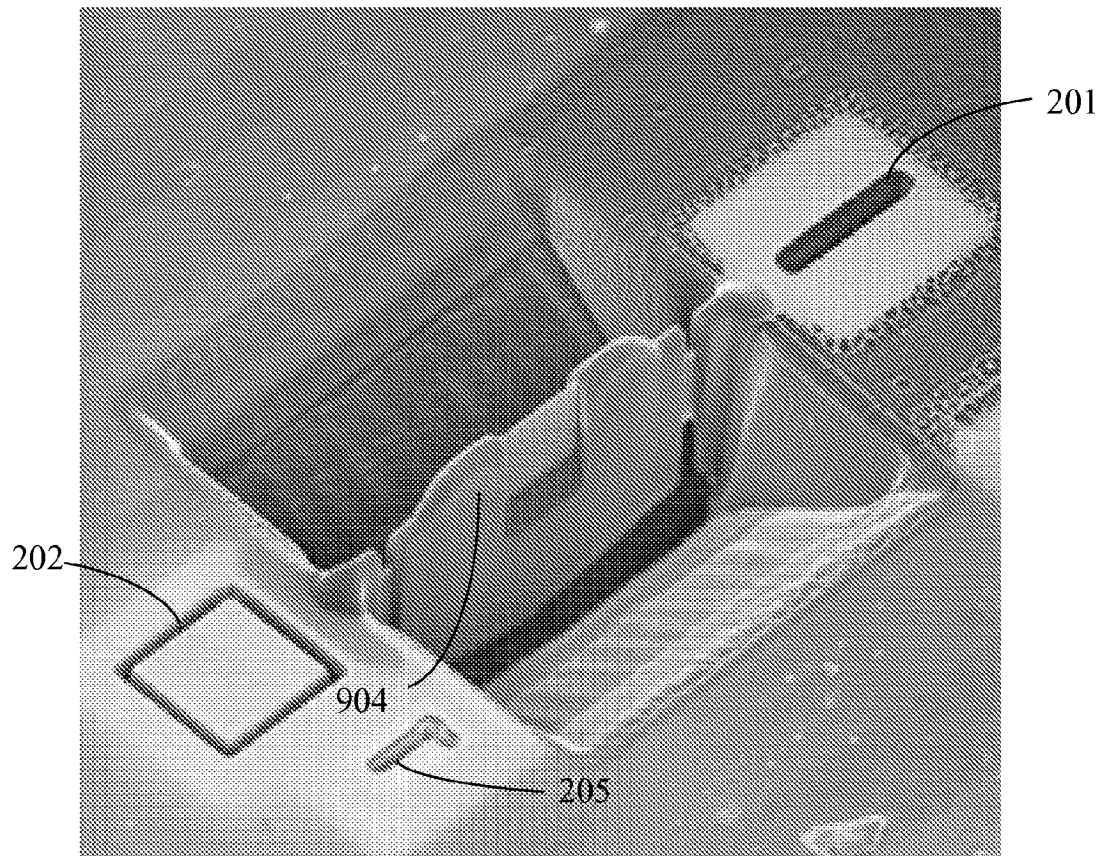


图 9B

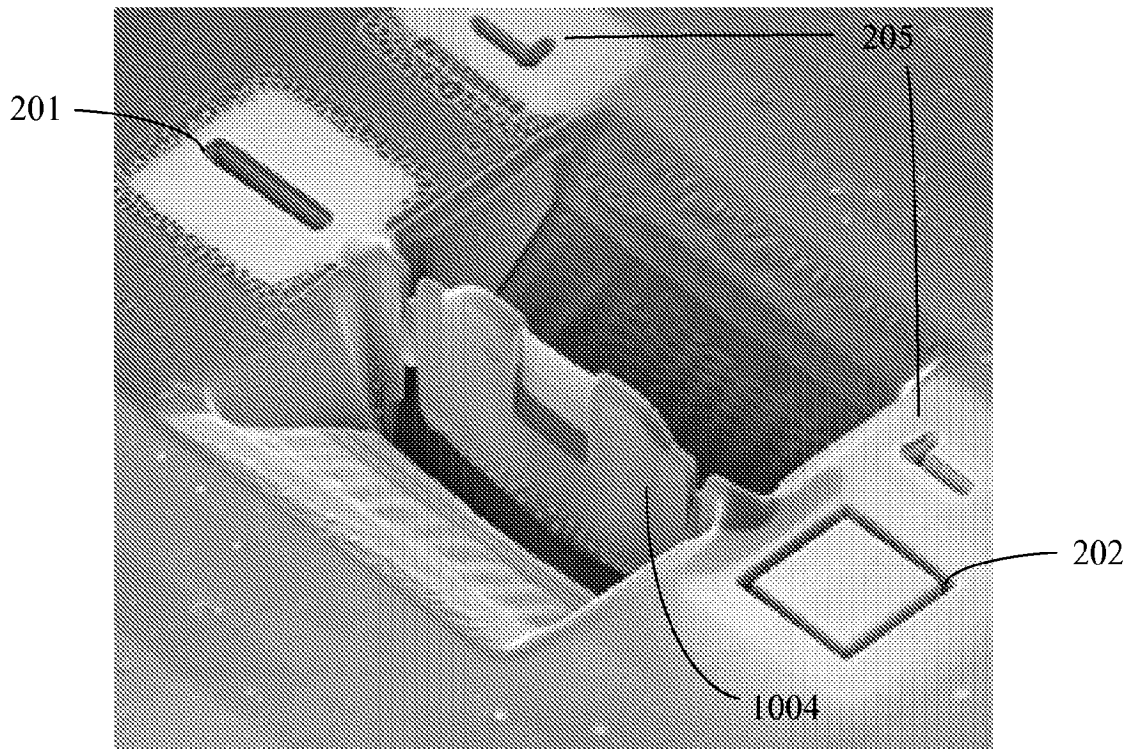


图 10A

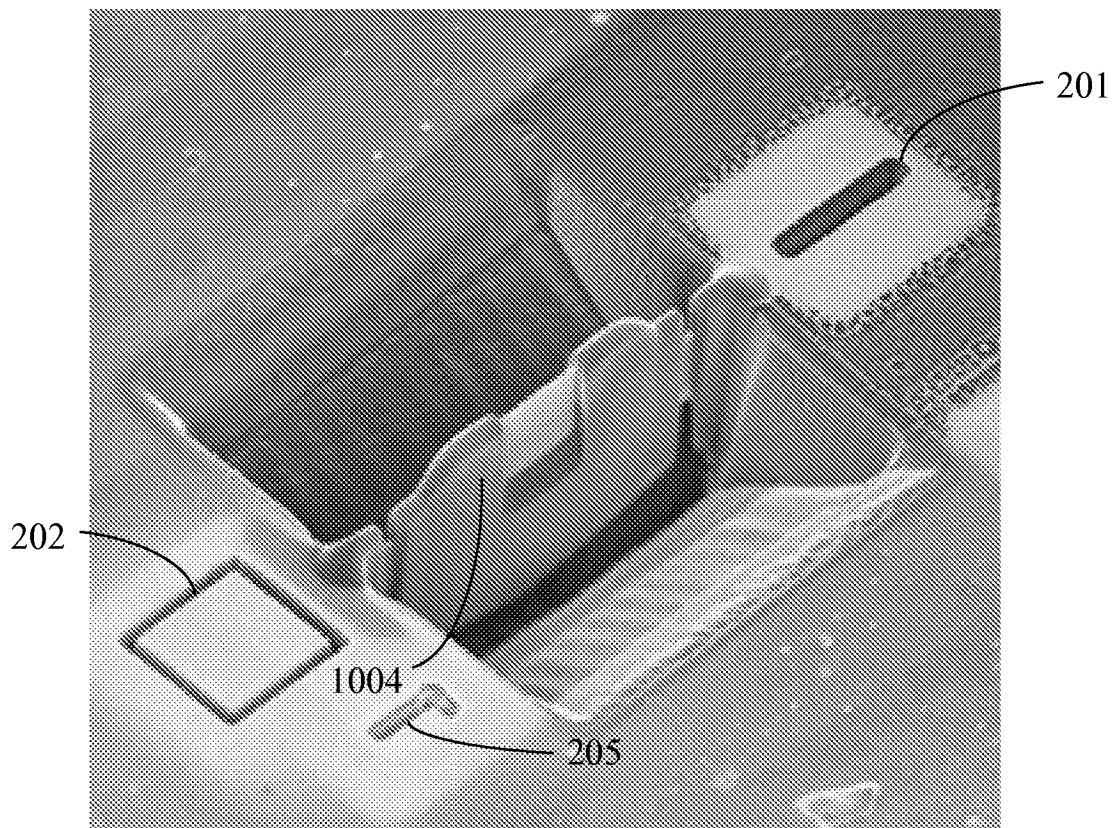


图 10B

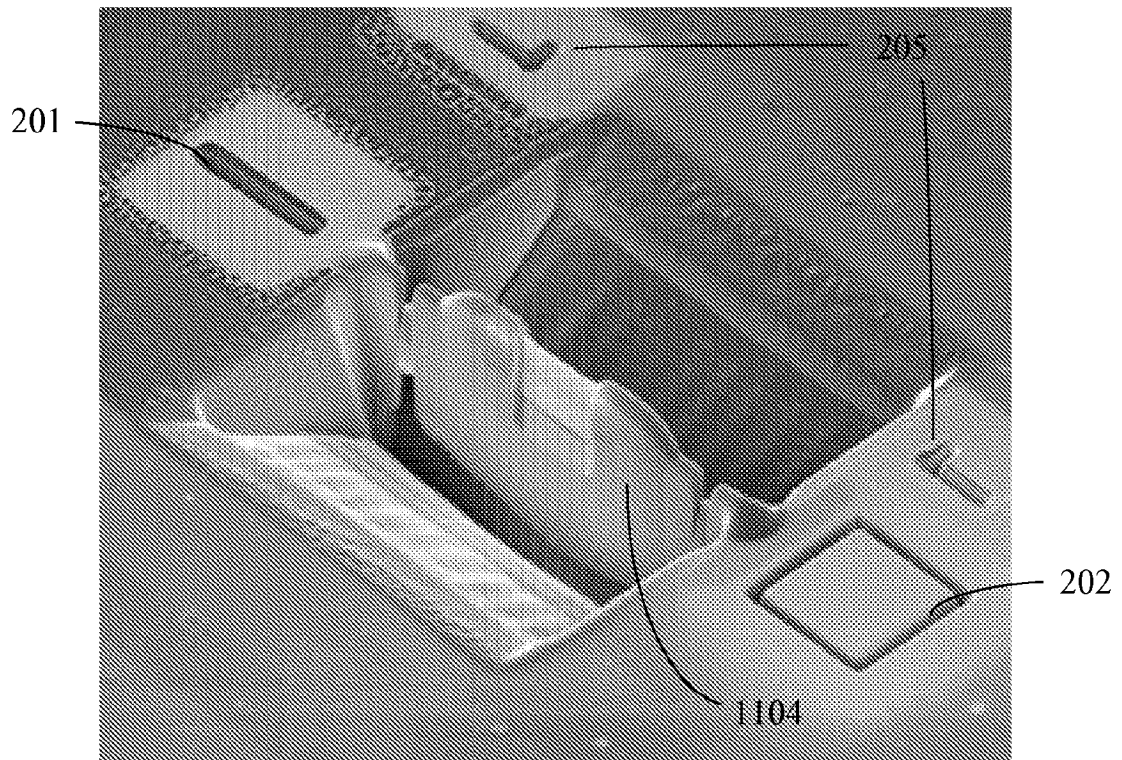


图 11A

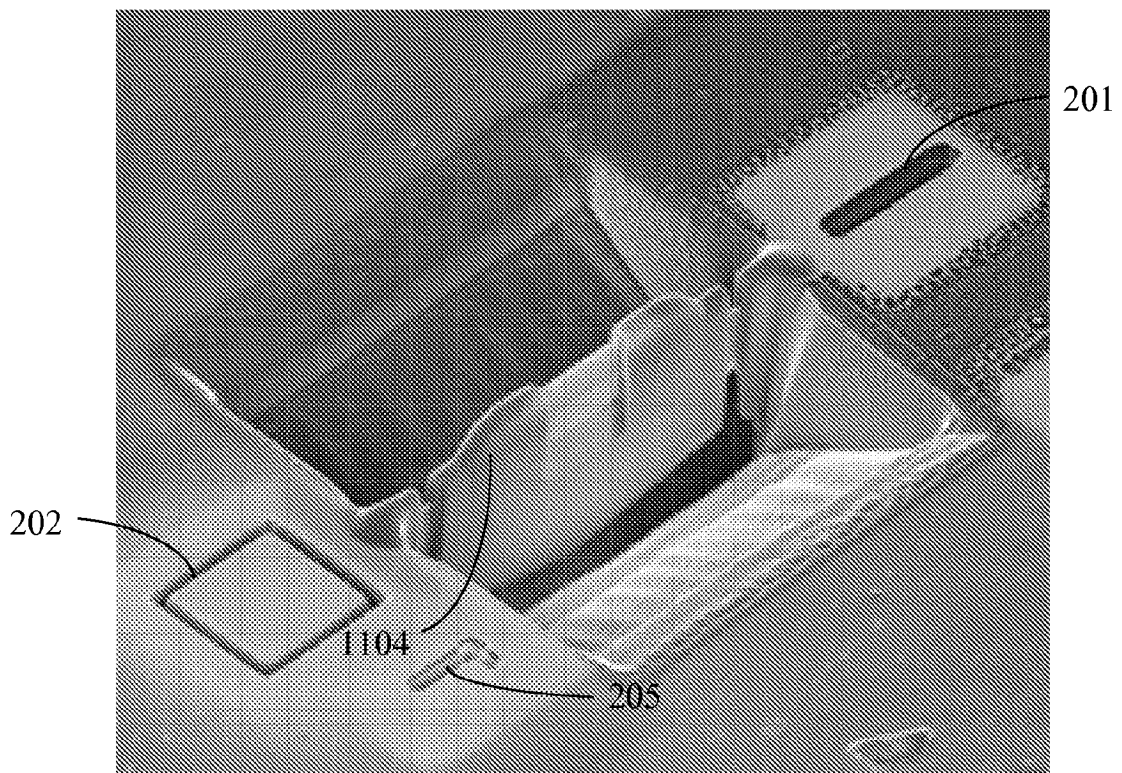


图 11B

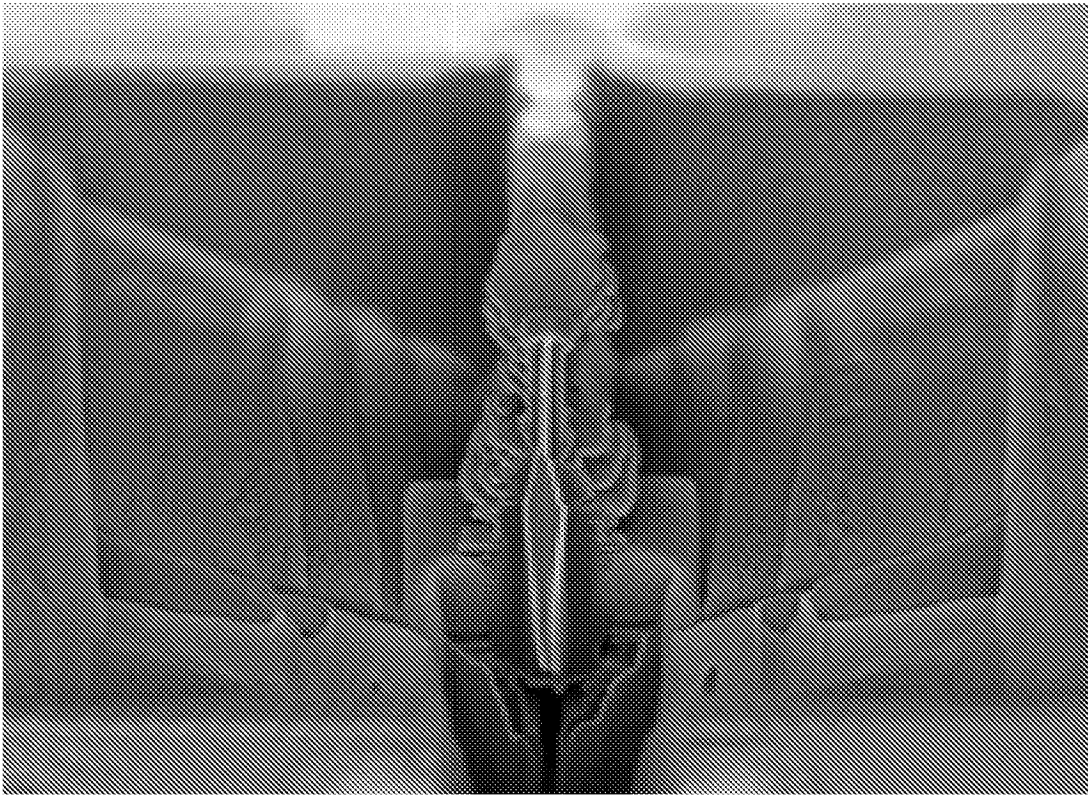


图 12A

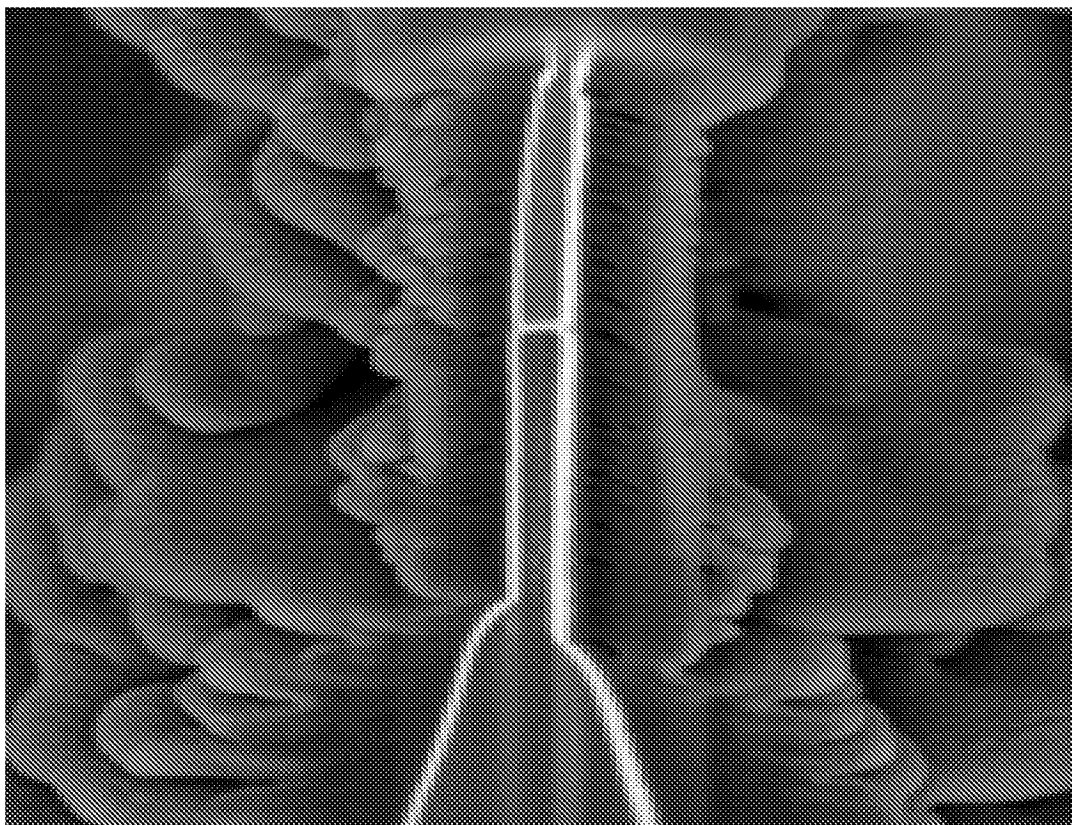
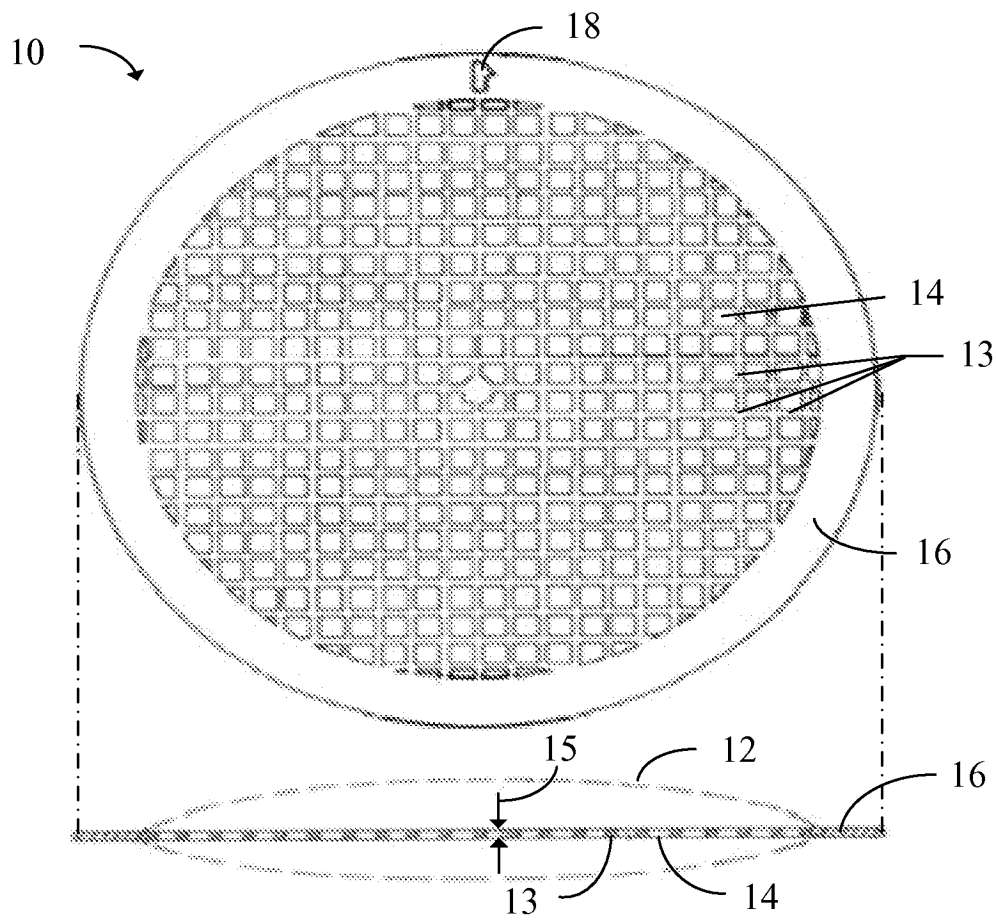
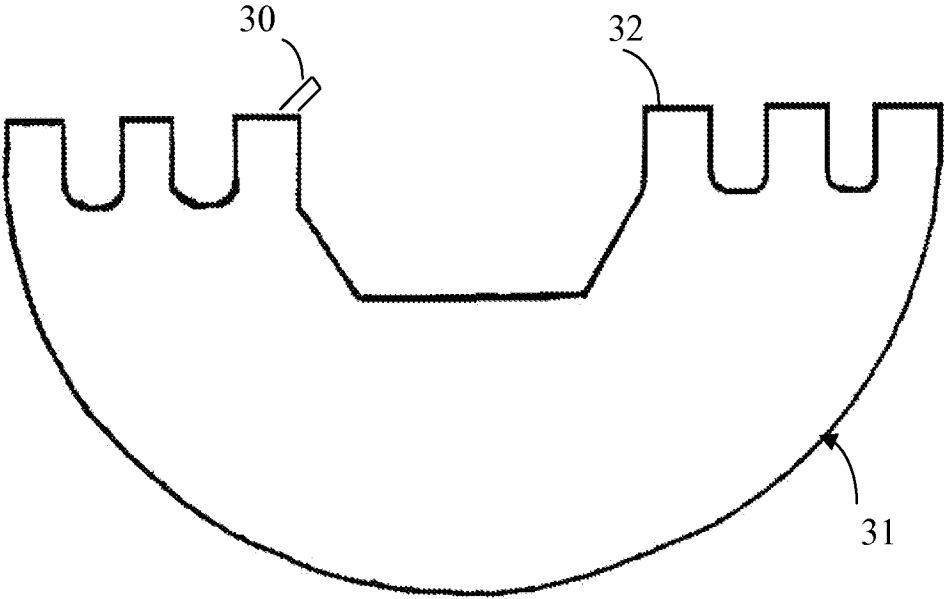


图 12B



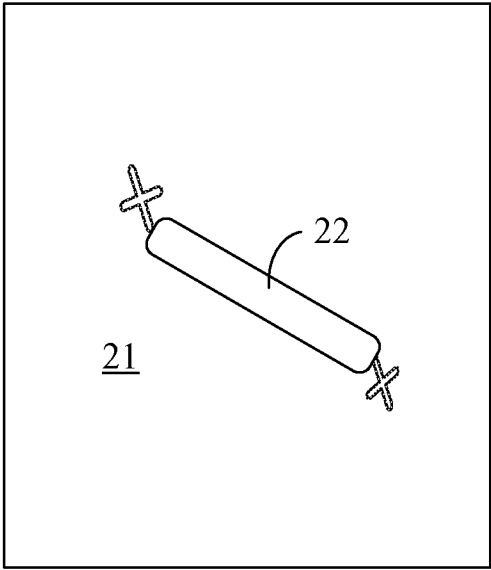
现有技术

图 13A



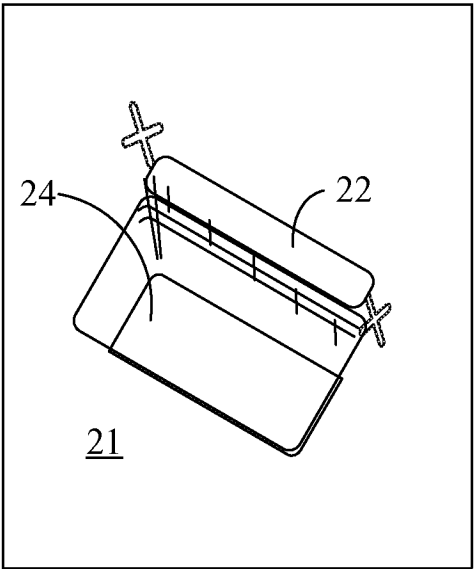
现有技术

图 13B



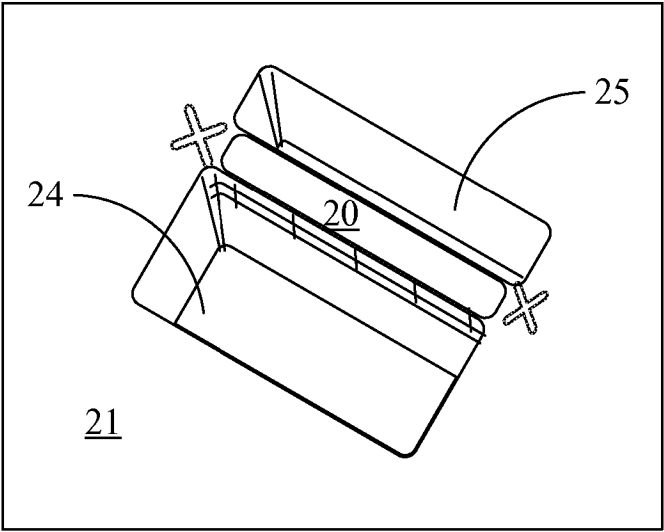
现有技术

图 14



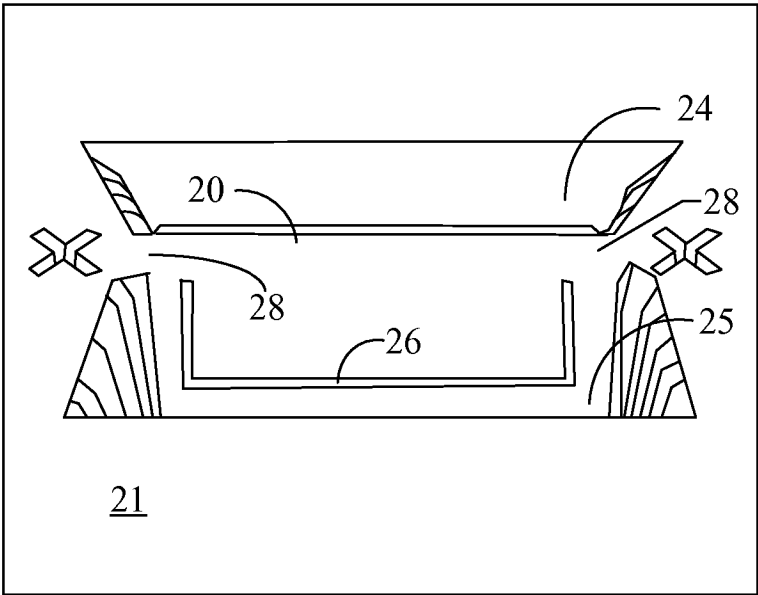
现有技术

图 15



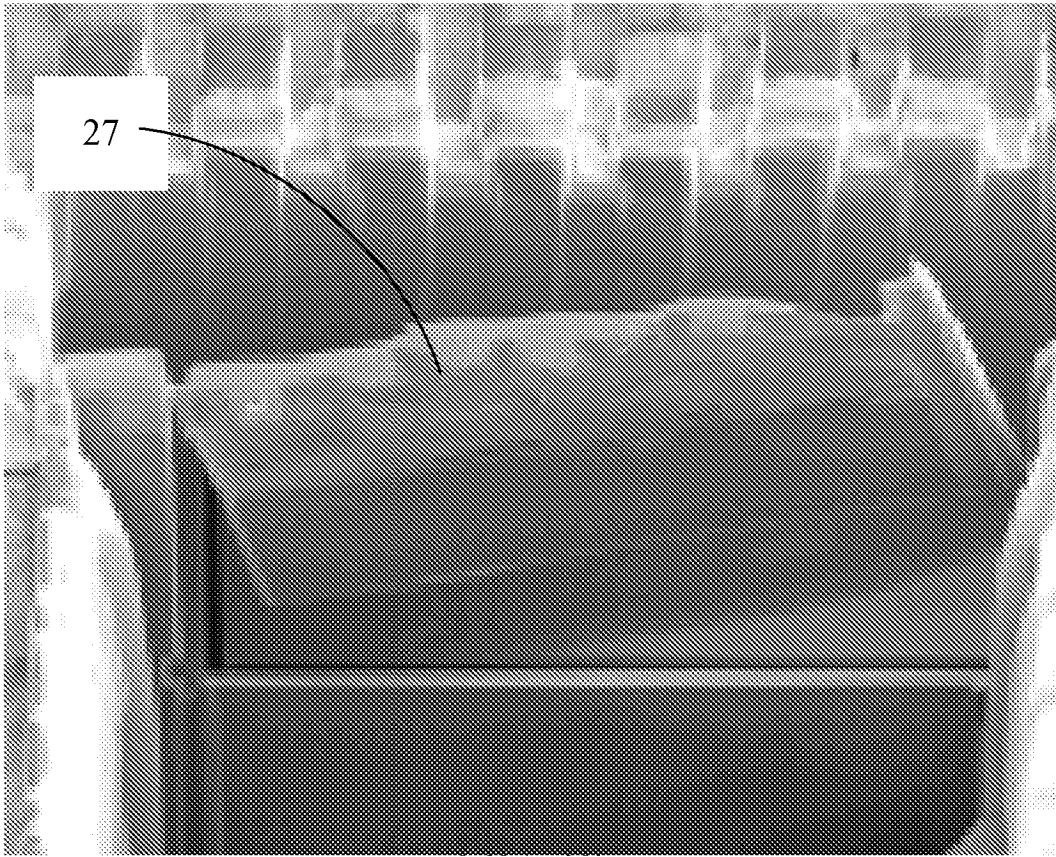
现有技术

图 16



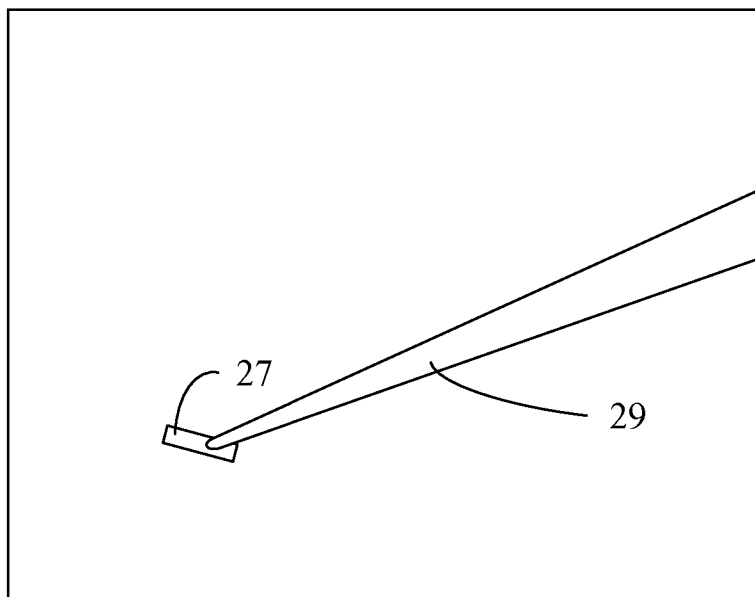
现有技术

图 17



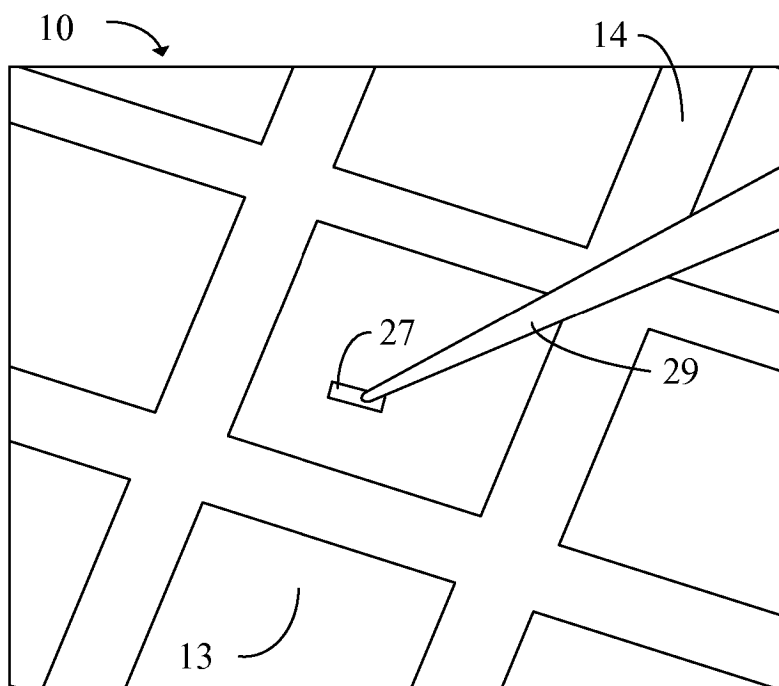
现有技术

图 18



现有技术

图 19



现有技术

图 20