



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103227110 B

(45)授权公告日 2018.09.11

(21)申请号 201310035562.5

(22)申请日 2013.01.30

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 103227110 A

(43)申请公布日 2013.07.31

(30)优先权数据
61/593281 2012.01.31 US
13/717272 2012.12.17 US

(73)专利权人 FEI 公司
地址 美国俄勒冈州

(72)发明人 C.吕埃

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
72001

代理人 蒋骏 王忠忠

(51)Int.Cl.

H01L 21/311(2006.01)

(56)对比文件

US 5958799 A,1999.09.28,
US 6069079 A,2000.05.30,
US 2009/0302431 A1,2009.12.10,
US 2008/0314871 A1,2008.12.25,
CN 1974373 A,2007.06.06,

B.LUCAS etl.“Ion Beam Assisted Etching of a Fluorinated Polyimide in order to Insert it in an Electro-Optical System”.《SYNTHETIC METALS》.1999,第102卷(第1-3期),1423-1424.

N.N.Efremow etl.“ion-beam-assisted etching of diamond”.《JOURNAL OF VACUUM SCIENCE & TECHNOLOGY B》.1985,第3卷(第1期),416-418.

审查员 纪金国

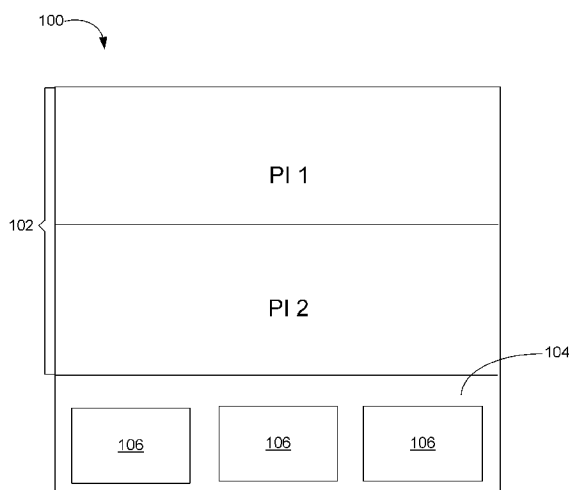
权利要求书1页 说明书8页 附图10页

(54)发明名称

低能量离子束蚀刻

(57)摘要

本发明涉及低能量粒子束蚀刻,在存在蚀刻辅助气体的情况下使用低能量聚焦离子束来去除碳质材料。申请人已经发现,当FIB的射束能量被降低时,诸如O₂的蚀刻辅助气体大大增加了蚀刻速率。在一个例子中,使用具有从8keV到14keV的射束能量的Xe⁺等离子体FIB和作为蚀刻辅助气体的O₂所蚀刻的聚酰亚胺材料,在蚀刻速率上的增加相比于默认研磨速率可以接近30倍。



1. 一种对包括碳质材料的工件的化学增强聚焦离子束研磨的方法,所述方法包括:
在工件表面处提供含氧的蚀刻辅助气体;以及,
在存在所述含氧的蚀刻辅助气体的情况下朝向碳质材料引导聚焦离子束来蚀刻该碳质材料,该聚焦离子束不具有足够的能量来从所述含氧的蚀刻辅助气体与该碳质材料之间的反应形成包含所述氧和所述碳质材料的钝化层,其中聚焦离子束具有8到14keV的射束能量,所述聚焦离子束包括Ga⁺等离子体聚焦离子束或Xe⁺等离子体聚焦离子束。
2. 如权利要求1所述的方法,其中朝向该碳质材料引导聚焦离子束包括引导具有小于10keV的聚焦离子束。
3. 如权利要求1所述的方法,其中所述含氧的蚀刻辅助气体包括O₂气体。
4. 一种对衬底的化学增强聚焦离子束研磨的方法,所述方法包括:
将衬底装载到聚焦离子束系统中;
朝向衬底提供蚀刻辅助气体,该蚀刻辅助气体包括氧化剂;
在存在蚀刻辅助气体的情况下在衬底处引导聚焦离子束;以及
使用化学增强聚焦离子束研磨来去除材料,其中聚焦离子束具有8到14keV的射束能量,所述聚焦离子束系统包括Ga⁺等离子体聚焦离子束系统或Xe⁺等离子体聚焦离子束系统。
5. 如权利要求4所述的方法,其中蚀刻辅助气体包括O₂气体。
6. 如权利要求4所述的方法,其中蚀刻辅助气体包括N₂O或NO_x。
7. 如权利要求6所述的方法,其中NO_x是NO₂或NO。
8. 如权利要求4-6中的任一项所述的方法,其中衬底包括聚酰亚胺或其他有机薄膜。
9. 如权利要求4-6中任一项所述的方法,其中使用化学增强聚焦离子束研磨来去除材料包括离子束溅射或蚀刻衬底。
10. 如权利要求4-6中任一项所述的方法,其中没有由离子、蚀刻辅助气体和衬底的相互作用而在衬底上形成抗蚀刻的钝化层。
11. 如权利要求4-6中任一项所述的方法,其中聚焦离子束系统具有大于0.5pA/ μm^2 的电流密度,小于1000ns的停留时间,以及大于 0.1×10^{-5} Torr的腔室压力。
12. 如权利要求4-6中任一项所述的方法,其中研磨速率大于 $0.3\mu\text{m}^3/\text{nC}$ 。
13. 如权利要求4所述的方法,其中使用化学增强聚焦离子束来去除材料包括去除损坏的聚酰亚胺层来暴露在损坏的聚酰亚胺层下方的未损坏的聚酰亚胺层,该未损坏的聚酰亚胺层未受到聚焦离子束的损坏且保留其电绝缘性质。
14. 如权利要求13所述的方法,其中蚀刻辅助气体包括水蒸气、O₂、N₂O或NO_x。
15. 如权利要求14所述的方法,其中NO_x是NO₂或NO。

低能量离子束蚀刻

技术领域

[0001] 本发明涉及聚酰亚胺或其他类似有机薄膜的聚焦离子束蚀刻,更具体地,涉及使用 Xe^+ 等离子体聚焦离子束来蚀刻聚酰亚胺。

背景技术

[0002] 现代集成电路(IC)由多层的导体和衬底材料(诸如绝缘体和半导体)组成。在IC中检查和编辑电路或其他隐藏内部特征,需要导航到目标区域,并研磨穿过多层衬底材料中的一个或多个。通过减少设计调试阶段期间所需的掩膜组的数量,电路编辑(CE)降低了IC的开发成本,并加速了总的上市时间(time-to-market)。

[0003] 大多数CE活动现今采用聚焦离子束(FIB)系统来执行,这通常被用于研磨掉衬底材料以暴露隐藏特征,并且还以高精度沉积材料。这些能力可以被用于切割和连接器件内的电路,以及创建用于电测试的探测点。应用包括验证设计改变、调试和优化生产中的器件,以及原型制作新的器件,而无需昂贵和费时的掩模组制造。

[0004] 通常在FIB系统中的材料去除是通过使用相对大的离子的射束来物理溅射掉衬底材料而完成的。大多数的FIB系统使用由液态金属离子源(LMIS)产生的镓离子(Ga^+),因为这样的源容易制造、在室温下操作、并且是可靠的、寿命长的、且稳定的。此外,在FIB处理期间化学剂可以被引入到工件上,以有利地操纵选定材料的研磨速率。使用化学剂来增强或抑制FIB研磨速率一般被称为“气体辅助蚀刻”(GAE)。

[0005] 因为聚酰亚胺(PI)是IC封装器件上的一种常见的包封材料,所以在电路编辑或故障分析期间,去除聚酰亚胺层的一部分通常是必要的。聚酰亚胺去除的一个常见方法是通过在有水蒸气的情况下采用 Ga^+ FIB来蚀刻聚酰亚胺层。水充当蚀刻辅助气体,且已知为将聚酰亚胺蚀刻速率增加至默认研磨速率(定义为在没有蚀刻辅助气体的情况下使用FIB的研磨速率)的5到10倍。将水蒸气用作用于有机(含碳)化合物(诸如聚酰亚胺)的蚀刻辅助气体在Russell等人的题为“用于水蒸气增强的带电粒子束加工的方法”、编号为5,958,799的美国专利申请(1999年9月28日)中被描述,其通过引用结合于本文。

[0006] 尽管 Ga^+ FIB已经是几十年来被用在IC制造中的最常见类型的FIB,但使用惰性离子(诸如氙离子(Xe^+))的等离子体FIB仪器相对于使用液态金属离子源的传统 Ga^+ FIB提供了多种显著的优点。例如,等离子体FIB提供射束电流,该射束电流是传统的基于镓的FIB中所使用的射束电流的20至100倍,这导致了材料去除速率上的极大增加。而且,使用惰性离子的等离子体FIB不导致诸如由 Ga^+ 注入所引起的有问题的离子污染。

[0007] 使用等离子体FIB(诸如 Xe^+ 等离子体FIB)以用于在由聚酰亚胺或其他类似有机薄膜所包封的IC封装器件上的电路编辑或故障分析的一个显著的缺点是,当与 Xe^+ 等离子体FIB一起使用时,水蒸气似乎不充当用于聚酰亚胺的蚀刻辅助气体。尽管聚酰亚胺去除的其他原位外(ex-situ)(FIB真空室外面的)方法是已知的,包括激光器和等离子体蚀刻工具,但现有技术中没有已知有效的用于 Xe^+ FIB工具的原位(in-situ)方法。

[0008] 因此,所需要的是使用 Xe^+ 等离子束更加快速和有效地原位蚀刻聚酰亚胺和其他

有机薄膜的方法。

发明内容

[0009] 本发明的优选实施例是针对碳质或其他有机材料的化学辅助离子束蚀刻的新方法。

[0010] 申请人已经发现,当射束能量被降低时,含氧的气体(诸如 O_2)开始起到非常有效的蚀刻辅助气体的作用。例如,使用具有从8keV到14keV的射束能量的 Xe^+ 等离子体FIB和作为蚀刻辅助气体的 O_2 的实施例,可以在是聚酰亚胺的默认研磨速率接近30倍的速率下蚀刻聚酰亚胺。

[0011] 前述内容已经相当广泛地概述了本发明的特征和技术优点,以便可以更好地理解本发明下面的详细描述。本发明的附加特征和优点将在下文被描述。本领域技术人员应当理解,所披露的概念和具体实施例,可以容易被用作修改或设计用于执行本发明相同目的的其他结构的基础。本领域技术人员还应该认识到,这样的等效构造不偏离如所附权利要求书中所阐述的本发明的精神和范围。

附图说明

[0012] 为了更透彻地理解本发明及其优点,现在对结合附图所进行的下面的描述做出参考,其中:

[0013] 图1是图示了具有包封聚酰亚胺层的典型IC封装器件的一部分的示意图。

[0014] 图2是使用FIB的典型的气体辅助蚀刻过程的示意性图示。

[0015] 图3是使用较高能量的 Xe^+ 等离子体离子束的聚酰亚胺蚀刻的显微照片。

[0016] 图4是在较高的加速电压下使用 Xe^+ 等离子体FIB的气体辅助蚀刻的示意性图示。

[0017] 图5是在较低的加速电压下使用 Xe^+ 等离子体FIB的 O_2 辅助蚀刻的示意性图示。

[0018] 图6是使用较低能量的 Xe^+ 等离子体离子束的聚酰亚胺蚀刻的FIB显微照片。

[0019] 图7是大面积聚酰亚胺去除的FIB显微照片,其中聚酰亚胺的上层已被蚀刻掉以暴露两个顺序沉积的聚酰亚胺层之间的接口。

[0020] 图8是在下聚酰亚胺层被蚀刻掉且底层氧化物层被暴露的情况下的图7的大面积聚酰亚胺去除的FIB显微照片。

[0021] 图9是在本发明的实施例的聚酰亚胺蚀刻过程期间,吸附(阶段)电流作为时间的函数的曲线图。

[0022] 图10是部分损坏的聚酰亚胺表面的低倍率FIB显微照片。

[0023] 图11示出了与图10相同的聚酰亚胺薄膜的部分1001,其中矩形扫描框示出了要被执行的修复的位置。

[0024] 图12示出图示了图10和11的损坏的聚酰亚胺薄膜的修复进展的FIB图像的序列。

[0025] 附图并非旨在按比例绘制。在附图中,在各种图中所图示的每个相同或近乎相同的部件由同样的数字所表示。为清楚起见,可能不是在每幅附图中都对每个部件进行标记。

具体实施方式

[0026] 本发明的优选实施例中针对一种使用 Xe^+ 等离子体FIB的聚酰亚胺去除的新方法。

当在相对高的射束能量(>20keV)下被使用时,使用纯氧气(O₂)作为蚀刻辅助气体对PI的蚀刻速率就算有任何影响也不会太大。然而,申请人已经发现,当Xe⁺等离子体FIB的射束能量被降低时,O₂开始起到非常有效的蚀刻辅助气体的作用。根据本发明的优选实施例,取决于特定的聚酰亚胺合成物,使用具有从8keV到14keV的射束能量的Xe⁺等离子体FIB和作为蚀刻辅助气体的O₂,蚀刻速率中的增加可以相比于默认研磨速率接近其30倍。

[0027] 使用Ga+FIB的用于蚀刻聚酰亚胺(PI)薄膜的传统方法是使用水蒸气作为蚀刻辅助气体。这种技术导致30keV的加速电压(也被称为射束能量)下的PI去除速率约为2μm³/nC,尽管取决于正被去除的PI的确切类型,实际的去除速率将示出可观的变化。如上所讨论的,该去除速率通常比默认研磨速率(对于不具有蚀刻辅助气体的FIB而言)快5倍到10倍。

[0028] 尽管Xe⁺等离子体FIB的使用相比更为传统的Ga⁺FIB具有多种优点,但在任何射束能量下使用Xe⁺等离子体FIB时,水蒸气(H₂O)的使用并不明显增加PI的蚀刻速率。当在相对高的射束能量(>20keV)下使用时,使用纯氧气(O₂)作为蚀刻辅助气体对PI的蚀刻速率就算有任何影响也不会太大。

[0029] 然而,令人意外地,申请人已经发现,当Xe⁺等离子体FIB的射束能量被降低时,O₂开始起到非常有效的蚀刻辅助气体的作用。正如下面更详细地描述的,使用Xe⁺等离子体FIB的聚酰亚胺蚀刻的典型的默认研磨速率可能约为0.3μm³/nC。在30keV的射束能量下,O₂的添加对聚酰亚胺的蚀刻速率将有着很少的影响或没有影响。然而,在射束能量被降低时,蚀刻速率上的改善在<16keV处开始被看到,其中最显着的增加在8到14keV的范围中被看到。取决于特定的聚酰亚胺合成物,使用本发明的优选实施例的蚀刻速率上的增加可以相比于默认研磨速率接近其30倍。

[0030] 尽管本文中的很多讨论被限于使用Xe⁺等离子体FIB来蚀刻聚酰亚胺,本发明的一些实施例可以使用其他类型的聚焦离子束,包括使用常规的液体金属离子源的FIB系统或使用不同离子种类的等离子体FIB。同样地,本发明的实施例不仅可以用于聚酰亚胺,还可以用于其他类似有机薄膜。

[0031] 图1是图示了典型的IC封装器件100的一部分的示意性截面图,该IC封装器件100具有包封聚酰亚胺层102、起蚀刻停止作用(下面所讨论的)的二氧化硅层104,以及多个金属线106。在图1的IC封装器件中,聚酰亚胺已经在两个步骤中被沉积,产生可以与彼此稍微区别的两个聚酰亚胺层(PI 1和PI 2)。在电路编辑或故障分析的典型的简化例子中的目标可能是通过首先研磨掉或蚀刻掉聚酰亚胺层102来暴露金属线106。

[0032] 图2是使用FIB 202来处理工件的典型气体辅助蚀刻过程的示意性图示。如上面所讨论的,FIB系统中的材料去除可以通过使用相对大的离子的射束以从工件204物理溅射掉材料来完成。通过使用蚀刻气体(被称为前驱气体),能进一步增强由FIB系统进行的溅射,并且一些先前描述的问题可以被最小化,该蚀刻气体经由气体输送喷嘴201被引入到工件表面附近,使得气体分子206被吸附到表面上。

[0033] 在限定的区域上扫描离子束202,引发衬底表面的局部加热,即,增强的局部声子密度。这些声子被认为可能连同由离子束202所引发的二次电子一起,激活(或分裂)前驱气体的吸附分子206。然后这些激活的吸附分子206与表面分子205发生反应,以促进底层表面的蚀刻。然后该过程的挥发性产物208与通过溅射所去除的一些表面分子一起离开表面,并由真空系统抽走。一些蚀刻气体可以直接与工件表面发生反应(即来自射束的激活不是必

要的)。

[0034] 图3是使用较高能量的 Xe^+ 等离子体离子束的聚酰亚胺蚀刻的显微照片(使用FIB来成像工件)。如图3中所示,在方框302中聚酰亚胺300的一部分已被蚀刻掉,尽管研磨框的底部仍然是聚酰亚胺,因此不是全部所期望的聚酰亚胺材料都已经被去除。值得注意的是,聚酰亚胺表面,在研磨框之中和之外两者,在图像中均出现亮灰色。电绝缘材料(诸如聚酰亚胺)在这种类型的FIB图像中应该出现暗色。对比度中的变化是作为由离子束所引发的损坏的结果而已经致使聚酰亚胺导电的指示。尽管损坏的确切机制在目前还不清楚,申请人推论射束能量已经以这样的方式重新排列了分子,以至于致使上表面(其已暴露给射束来用于研磨或成像)在一定程度上导电。

[0035] 申请人还认为,这种损坏导致了对正被用作蚀刻气体的氧气在化学上有抵抗力的钝化层的形成。也就是说,用30keV的离子束(例如, Xe^+)所损坏的聚酰亚胺比未损坏的聚酰亚胺显著地不够反应性。如图3中所看到的,在研磨框的底部的边缘处的更暗的、未损坏的聚酰亚胺(在由虚线圆310和312所指示的区域中),看上去相比更亮的灰色区域已经在更大程度上被蚀刻。

[0036] 图4是在更高的加速电压(>16keV)下使用 Xe^+ 等离子体FIB的气体辅助蚀刻的示意性图示。如图2中,蚀刻气体(在这种情况下为 O_2)被引入到工件表面附近,使得气体分子406被吸附到表面上。申请人认为, Xe^+ 等离子体FIB 402中的较高能量离子与表面分子505发生反应,以引起不与氧气显著发生反应的钝化层404的形成来促进蚀刻。结果,离子溅射是用于材料去除的唯一显著的机制。并且当离子束溅射掉损坏的聚酰亚胺分子410时,它也损坏底层聚酰亚胺分子410,使得氧化学性质几乎没有机会辅助未损坏聚酰亚胺的蚀刻。

[0037] 在较低的射束能量下,申请人认为,从离子束所产生的对聚酰亚胺的损坏少得多。结果,氧化学性质确实有机会增强未损坏的聚酰亚胺的蚀刻。图5是在较低的加速电压(从8keV到14keV)下使用 Xe^+ 等离子体FIB 502的气体辅助(O_2)蚀刻的示意性图示。例如,可以使用具有大于 $0.5\text{pA}/\mu\text{m}^2$ 的电流密度,小于1000ns的停留时间,以及大于 $0.1 \times 10^{-5}\text{Torr}$ 的腔室压力的 Xe^+ 等离子体FIB来执行蚀刻。在一个实施例中,射束是8keV下的 Xe^+ 等离子体FIB,电流为 $4\text{pA}/\mu\text{m}^2$,停留时间=100纳秒,像素重叠=0%, O_2 阀打开情况下的腔室压力= $2 \times 10^{-5}\text{Torr}$ 。这些条件已在实验上被确定以导致 $\sim 9.8\mu\text{m}^3/\text{nC}$ 的去除速率,而使用 Xe^+ 等离子体FIB来蚀刻聚酰亚胺的常规方法(30keV下,水辅助蚀刻)导致了 $\sim 0.35\mu\text{m}^3/\text{nC}$ 的去除速率。在这种情况下,使用本发明的优选实施例所实现的去除速率是使用水辅助蚀刻时的去除速率的25倍以上。

[0038] 申请人认为,较低能量的离子不会引起如图4的例子中所看到的显著钝化层的创建。从而,引入的 O_2 分子506被吸附到未损坏的聚酰亚胺上。在限定的区域上进行扫描的离子束502激活(或分裂)了前驱气体的吸附 O_2 分子506,然后这些吸附 O_2 分子506与表面分子505发生反应,以促进底层表面的蚀刻。然后该过程的挥发性组分508与通过溅射509所去除的一些表面分子一起离开该表面,并由真空系统抽走。尽管在这些较低的射束能量下一些聚酰亚胺分子仍可能被损坏,但那些损坏的聚酰亚胺分子510将很可能被射束的物理溅射作用所去除。

[0039] 本文中描述的化学反应代表了申请人对于本发明的各种实施例如何起作用的理解,并且被呈现以辅助本领域技术人员将本文中所描述的例子延伸到其他实施例,但与无

论申请人的基础理论的理解是否正确无关,本发明已被示为起作用。

[0040] 为何 O_2 比水更有效背后的物理性质仍正在被研究,并且还没有被很好地理解。本文中描述的理论代表了申请人对于本发明的各种实施例如何起作用的理解,并且被呈现以辅助本领域技术人员将本文中所描述的例子延伸到其他实施例。然而,经验观察的是,作为供采用 Xe^+ 等离子体FIB来蚀刻聚酰亚胺使用的蚀刻辅助气体, O_2 优于水是不容置疑的,与无论申请人的基础理论的理解是否正确无关。

[0041] 图6是使用较低能量(8keV到14keV)的 Xe^+ 等离子体离子束的聚酰亚胺蚀刻的FIB显微照片。在氧化物602的沟槽601的底部处(其为暗色材料)看上去与明亮肘形特征的金属线604处在同一高度。平面沟槽底部由氧气辅助蚀刻的选择性产生,因为在存在FIB的情况下,氧气不会引起金属或氧化物的蚀刻。而是,聚酰亚胺被选择性地去除,且其他特征留下未损坏。

[0042] 如图6中也示出的,围绕沟槽的聚酰亚胺的表面606也示出了亮灰色对比度,其指示了由离子束造成的损坏。在图6的工件中,这种损坏是在30keV下使用 Xe^+ 等离子体离子束来对导航阶段进行设立(为沟槽定位期望的位置)的结果。只要没有由这种损坏所导致的IC器件的关键斜角线之间的漏电,以任何种类的全局方式修复该表面损坏通常将不是必要的。

[0043] 尽管上面的讨论已集中在 O_2 作为蚀刻辅助气体的使用上,但是其他气体,包括但不限于 N_2O 、 NO_2 、 NO 、 NO_x 、以及其他强氧化剂也可以是有效的,或者甚至比 O_2 更好地执行。申请人还指出,聚酰亚胺的不同合成物可能不同地表现。例如,在上面指出的实验结果之后,研究了聚酰亚胺的不同合成物。尽管第二种类型的聚酰亚胺表现略有不同,但结果无疑是一致的。对于第二工件,用于最佳去除的离子能量稍高(10-14keV),且最大去除速率稍低($6.2\mu m^3/nC$)。然而,与现有技术相比,本文中描述的方法仍产生使用 Xe^+ 等离子体FIB的极大改善的聚酰亚胺蚀刻,其是上述的常规去除速率的17倍以上。

[0044] 图7是聚酰亚胺蚀刻的FIB显微照片,其中聚酰亚胺的上层已被蚀刻掉以暴露两个顺序沉积的聚酰亚胺层之间的接口。图8图示了大面积聚酰亚胺去除的另一个例子800。沟槽802的底部处的暗色材料801是暴露的二氧化硅。

[0045] 图9是本发明的聚酰亚胺蚀刻过程期间,吸附(阶段)电流901作为时间902的函数的曲线图900。曲线903示出了两个平稳段904和905,与复合聚酰亚胺外敷层的不同层的去除相对应。端点曲线图中的这些特性特征给出了FIB研磨已经进展了多深的操作符和指示。

[0046] 如上面所讨论的,尽管聚酰亚胺通常是电绝缘体(并因此在FIB图像中出现暗色),暴露于高能量离子可能损坏材料,将其转化成部分导电的物质,并使其在FIB图像中出现明亮。电路编辑(CE)期间,来自损坏且导电的聚酰亚胺的漏电通路的存在可能引起编辑失败。类似地,涉及无源电压对比度隔离切削的故障分析(FA)应用可能无法耐受漏电,该漏电也可能由导电聚酰亚胺所引起。

[0047] 上面描述的方法,也可以在FIB处理之后被用来“修复”损坏的聚酰亚胺,从而恢复其电绝缘性质,并使其在FIB图像中再次出现暗色。这允许FIB工具,尤其是 Xe^+ 等离子体工具,被用于涉及聚酰亚胺的更广泛的CE和FA应用,而无惧FIB处理已经从根本上改变了工件的电性质。值得注意的是,根据本发明的这个实施例的聚酰亚胺修复,既可以被用于 Ga^+ FIB系统又可以被用于 Xe^+ FIB系统。

[0048] 图10是部分损坏的聚酰亚胺表面1001的低倍率FIB显微照片。位于该图右下方的暗色区域1004是未损坏的绝缘性的聚酰亚胺。位于该图左侧且中央的较亮的区域1006是损坏的聚酰亚胺,并且作为暴露于高能量(30keV)的 Xe^+ 离子的结果,呈现为是部分导电的。位于右上方的明亮对象1008是气体注入喷嘴的端部。

[0049] 可以在存在水或 O_2 的情况下使用低能量($\leq 8\text{keV}$)离子来修复该损坏的聚酰亚胺。图11示出与图10相同的聚酰亚胺薄膜部分1001,其中矩形扫描框1110示出了要被执行的修复的位置。当离子束在存在 O_2 的情况下对扫描框1110内的区域进行扫描时,损坏的聚酰亚胺将逐渐被消耗,且FIB图像中的亮发光将消退。注意的是,损坏的聚酰亚胺实际上没有正被“修复”,而是使用气体辅助的低能量蚀刻来缓慢和逐渐地正被去除。图12示出图示了图10和11的损坏的聚酰亚胺薄膜的修复的进展的FIB图像的序列。在存在氧气的情况下中心扫描区域1110被暴露于低能量(8keV) Xe^+ 离子。当修复随着时间而进行(箭头124),且聚酰亚胺在有氧气的情况下在低能量下被蚀刻时,当损坏的聚酰亚胺逐渐被去除以在下面暴露未损坏的聚酰亚胺时扫描框内的损坏的明亮区域在FIB图像中变暗。注意的是,用低能量的 Xe^+ 选择性地去除聚酰亚胺的损坏部分,而不由 Xe^+ 离子的低能量(8keV对比30keV,以产生初始的损坏区域)而对底层聚酰亚胺引入附加的损坏是可能的。对于这种类型的聚酰亚胺修复,特定工具参数可以变化,但通常离子能量从8至12keV的范围变动,腔室压力(具有氧气流动)约为 $1 \times 10^{-5}\text{torr}$,像素停留时间为100ns,且像素重叠为0%。

[0050] 申请人已经确定的是,对于这种类型的有限材料去除,包括水蒸气、 N_2O 、 NO_2 、 NO 的其他气体以及其他强氧化剂可以作为蚀刻辅助气体而有效。离子能量对该过程来说是显著的组成部分。与所使用的气体无关,如果离子能量过高($>8\text{keV}$),损坏的积累将超过损坏的副产品的去除。虽然上述实施例描述了在高真空中将气体引导向工件,但本发明可以在其中气体被工件表面所包含的环境扫描电子显微镜或环境室中被实现。虽然上述实施例描述了聚酰亚胺的蚀刻,但可以通过本发明的实施例来蚀刻任何碳质材料或有机材料。其他材料可以被蚀刻,并且可以使用其他蚀刻辅助气体,其中离子能量是足够低的,以便不形成抗蚀刻的钝化层,却足够高来蚀刻衬底材料。

[0051] 根据本发明的一些实施例,一种对包括碳质材料的工件的化学增强离子束研磨的方法,包括:在工件表面处提供含氧的蚀刻辅助气体,并且在存在蚀刻辅助气体的情况下朝向碳质材料引导离子束来蚀刻碳质材料,该离子束不具有足够的能量来从包括氧气的含氧蚀刻辅助气体与碳质材料之间的反应形成钝化层。

[0052] 在一些实施例中,该方法其中的朝向碳质材料引导离子束包括引导具有小于16keV的离子束。而在一些实施例中,该方法其中的朝向碳质材料引导离子束包括引导具有小于10keV的离子束。

[0053] 在一些实施例中,该方法其中的朝向碳质材料引导离子束包括引导氙离子的射束。而在一些实施例中,该方法其中的朝向碳质材料引导离子束包括朝向聚酰亚胺材料引导具有小于16keV的能量的氙离子的射束。在一些实施例中,该方法其中的朝向工件引导含氧的蚀刻辅助气体包括朝向工件引导 O_2 。

[0054] 根据本发明的一些实施例,一种对衬底的化学增强离子束研磨的方法包括:将衬底装载到离子束系统中,朝向工件提供包括氧化剂的蚀刻辅助气体,在存在蚀刻辅助气体的情况下在工件处引导具有小于16keV的射束能量的离子束,以及使用化学增强离子束研

磨来去除材料。

[0055] 在一些实施例中,该方法其中的蚀刻辅助气体包括 O_2 气体。而在一些实施例中,该方其中的蚀刻辅助气体包括 N_2O 、 NO_2 、 NO 或 NO_x 。

[0056] 在一些实施例中,该方法其中的衬底包括聚酰亚胺或其他有机薄膜。而在一些实施例中,该方法其中的离子束具有8到14keV的射束能量。在一些实施例中,该方法其中的使用化学增强离子束研磨来去除材料包括离子束溅射或蚀刻衬底。

[0057] 在一些实施例中,该方法其中的离子束系统包括 Xe^+ 等离子体聚焦离子束系统或其他等离子体聚焦离子束系统。而在一些实施例中,该方法其中没有由离子、蚀刻辅助气体和衬底的反应而在衬底上形成显著的钝化层。在一些实施例中,该方法其中的离子束系统具有 $4pA/\mu m^2$ 的电流密度,100ns的停留时间,0%的像素重叠,以及 2×10^{-5} Torr的腔室压力。

[0058] 在一些实施例中,该方法其中的研磨速率大于 $0.3\mu m^3/nC$ 。而在一些实施例中,该方法其中的使用化学增强离子束研磨来去除材料包括去除损坏的聚酰亚胺层来暴露位于损坏的层下方的聚酰亚胺的未损坏的层,该未损坏的层未被离子束所损坏且保留其电绝缘性质。在一些实施例中,该方法其中的离子束具有小于或等于8keV的射束能量。

[0059] 在一些实施例中,该方法其中的蚀刻辅助气体包括水蒸气、 O_2 、 N_2O 、 NO_2 、 NO 或 NO_x 。而在一些实施例中,该方法其中的离子束系统包括 Ga^+ 等离子体聚焦离子束系统或 Xe^+ 等离子体聚焦离子束系统。

[0060] 尽管以上的本发明的描述主要针对蚀刻聚酰亚胺或其他类似有机薄膜的方法,但应该认识到,执行这样的方法的操作的装置将进一步处于本发明的范围内。另外,应该认识到,本发明的实施例可以经由计算机硬件、硬件和软件两者的组合、或通过在非瞬时性的计算机可读存储器中存储的计算机指令来实现。根据本说明书中所描述的方法和附图,该方法可以在使用标准的编程技术的计算机程序(包括配置有计算机程序的非瞬时性的计算机可读存储介质,其中存储介质被如此配置使得计算机以特定和预定义的方式来进行操作)中被实现。每个程序可以在高级别程序上的或面向对象的编程语言中被实现来与计算机系统通信。然而,如果需要的话,可以在汇编或机器语言中实现该程序。在任何情况下,语言可以是编译的或解译的语言。此外,该程序可以在为了该目的而编制的专用集成电路上运行。

[0061] 另外,方法可以在任何类型的计算平台中被实现,包括但不限于个人计算机、小型计算机、大型机(main-frame)、工作站、联网或分布式计算环境、与带电粒子工具或其他成像设备分离、一体或与之通信的计算机平台,等等。本发明的多个方面可以在存储于存储介质或设备上的机器可读代码中被实现,无论该存储介质或设备对于该计算平台是可移除的还是一体的,诸如硬盘、光学读和/或写存储介质、RAM、ROM,等等,以便由可编程计算机可读取,用于在存储介质或设备被计算机读取来执行本文中所描述的过程时,配置和操作计算机。此外,可以通过有线或无线网络来传输机器可读代码或其部分。当这样的介质包含用于结合微处理器或其他数据处理器来实现以上描述的步骤的指令或程序时,本文所描述的发明包括这些和其他各种类型的计算机可读存储介质。本发明还包括当根据本文所描述的方法和技术来编程时的计算机本身。

[0062] 计算机程序可以被应用到输入数据以执行本文所描述的功能,并从而转换输入数据以生成输出数据。输出信息被应用到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的和有形的对象,包括在显示器上产生物理的和有形的对象的特定视觉描绘。

[0063] 本发明的优选实施例还使用粒子束装置,诸如FIB或SEM,以便使用粒子的射束来成像工件。用于成像工件的这种粒子与工件固有地进行相互作用,导致了一定程度的物理转换。另外,遍及本说明书,利用诸如“计算”、“确定”、“测量”、“生成”、“检测”、“形成”等等的术语的讨论,也指的是计算机系统或类似的电子设备的动作和过程,其将计算机系统内表示为物理量的数据操纵和转换成计算机系统或其他信息存储、传输或显示设备内类似地表示为物理量的其他数据。

[0064] 本发明具有广泛的适用性,并可以提供许多益处,如以上的例子中所描述和示出的那样。取决于特定的应用,实施例将极大地变化,并且不是每一个实施例都将提供所有的益处,并满足由本发明可实现的所有目的。适于执行本发明的粒子束系统是商业上可得的,例如从本申请的受让人FEI公司在商业上可得。

[0065] 尽管大部分先前的描述针对半导体晶片,但本发明可以被应用于任何合适的衬底或表面。另外,无论何时术语“自动”、“自动化”或类似术语在本文中被使用,那些术语将被理解为包括自动或自动化的过程或步骤的手动启动。在下面的讨论和权利要求中,术语“包括”和“包含”以可扩充(open-ended)的方式被使用,并因此应被解释为意味着“包括,但不限于...”。术语“集成电路”指的是在微芯片表面上形成图案的一组电子部件和它们的互连(统称为内部电气电路元件)。术语“半导体器件”一般指的是集成电路(IC),其可以是与半导体晶片一体的、独立于晶片的、或是为了在电路板上使用而封装的。本文所使用的术语“FIB”或“聚焦离子束”指的是任何准直离子束,包括由离子光学器件所聚焦的射束和成形离子束。

[0066] 在这个意义上,在本说明书中没有特别限定任何术语,该意图在于术语将被给予其明白和普通的含义。附图旨在辅助理解本发明,并且除非另有指示,附图没有按比例绘制。

[0067] 尽管本发明及其优点已经被详细描述,但应当理解的是,在不脱离如由所附权利要求所限定的本发明的精神和范围的情况下,可以对本文所描述的实施例做出各种改变、替换和变更。此外,本申请的范围并非旨在被限于说明书中所描述的过程、机器、制造、物质的组成、装置、方法和步骤的特定的实施例。如本领域的普通技术人员将根据本发明的公开容易理解的,执行与本文中所描述的对应实施例基本上相同的功能或实现与其基本上相同的结果的当前现有的或以后将要开发的过程、机器、制造、物质的组成、装置、方法或步骤,可以根据本发明而被利用。因此,所附权利要求旨在将这样的过程,机器、机器、制造、物质的组成、装置、方法或步骤包括在其范围之内。

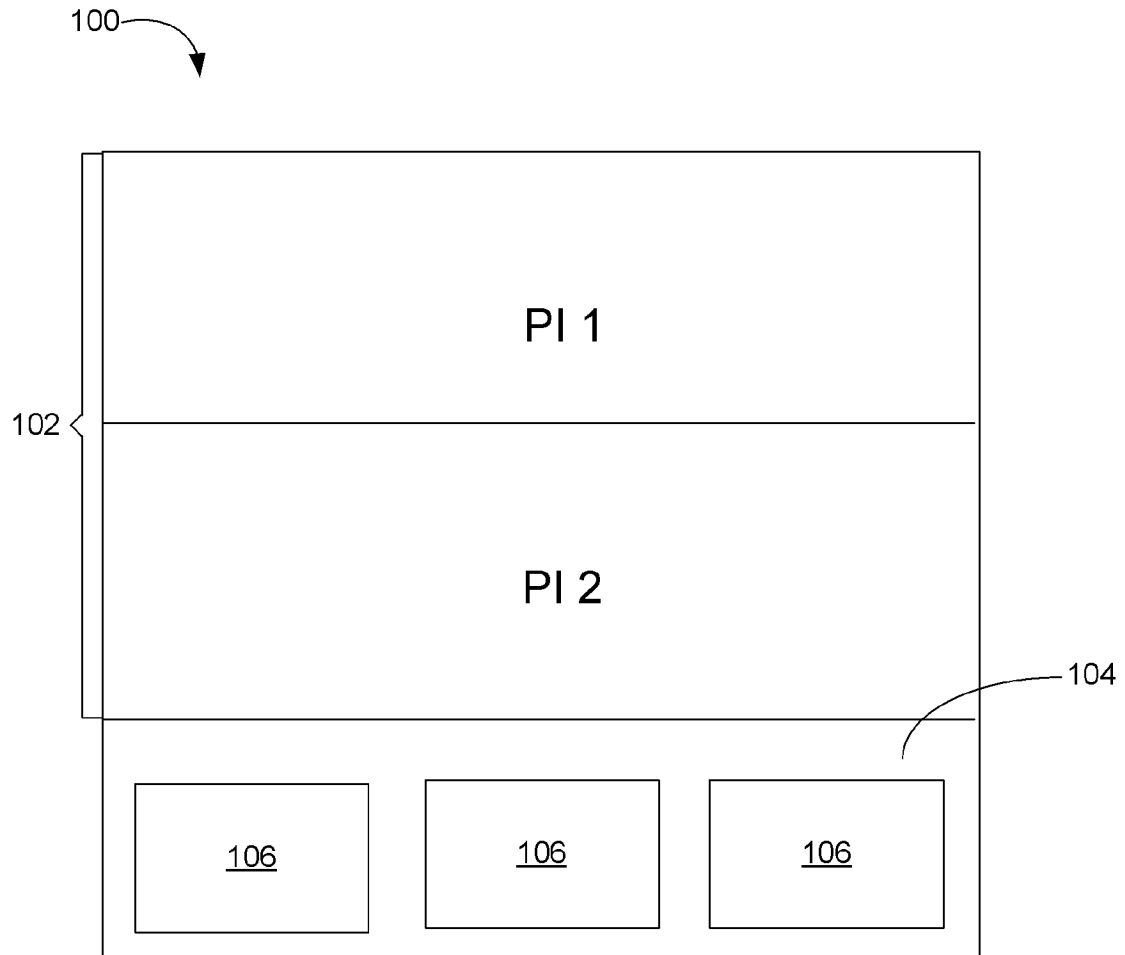


图 1

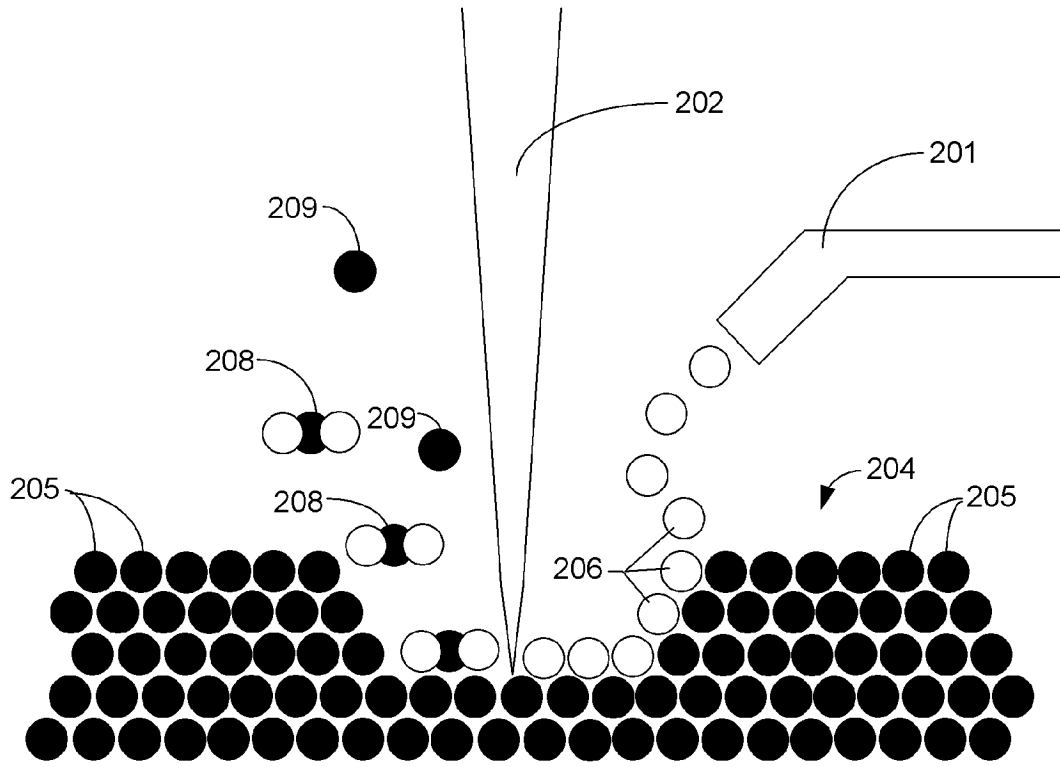


图 2

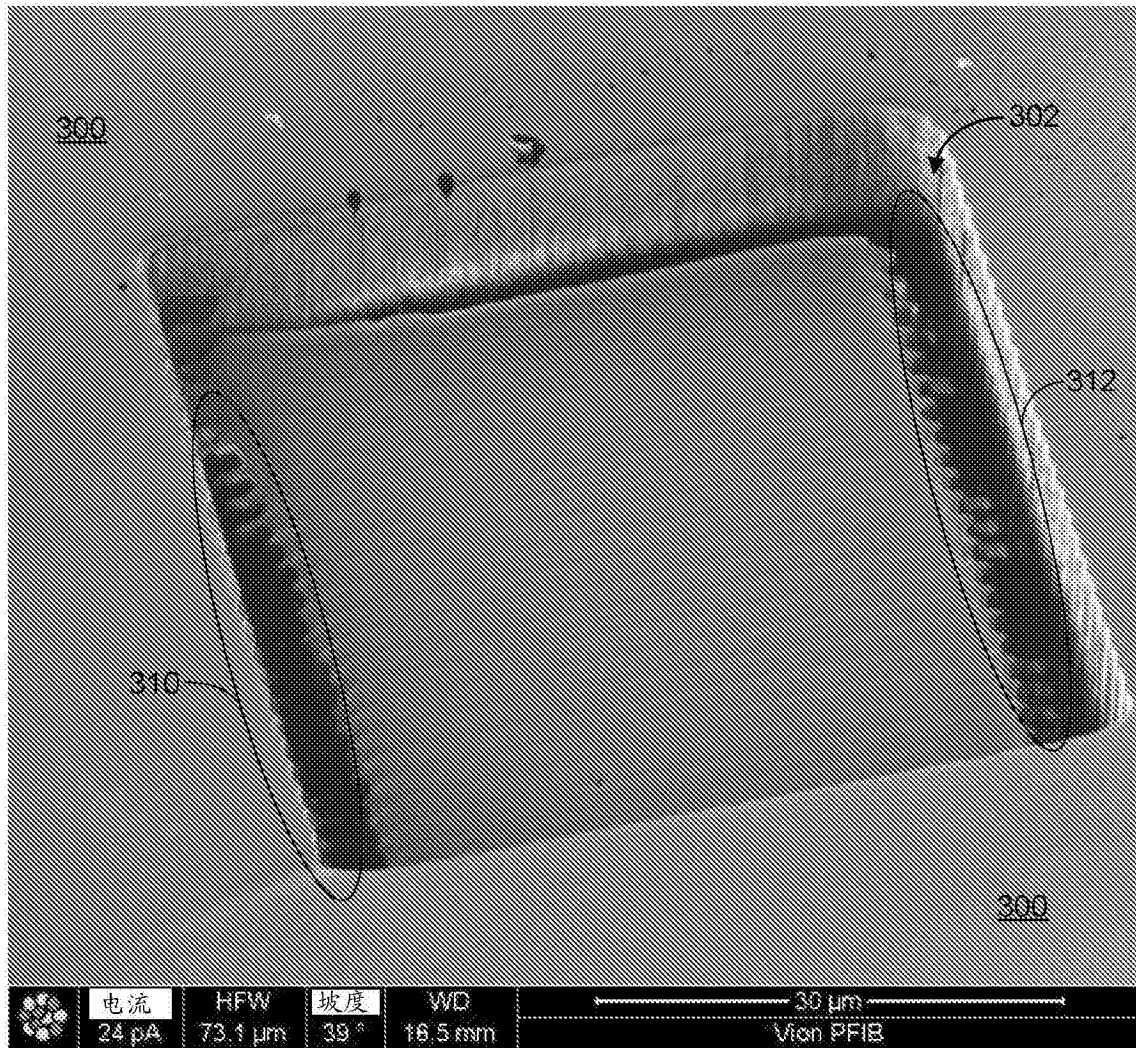


图 3

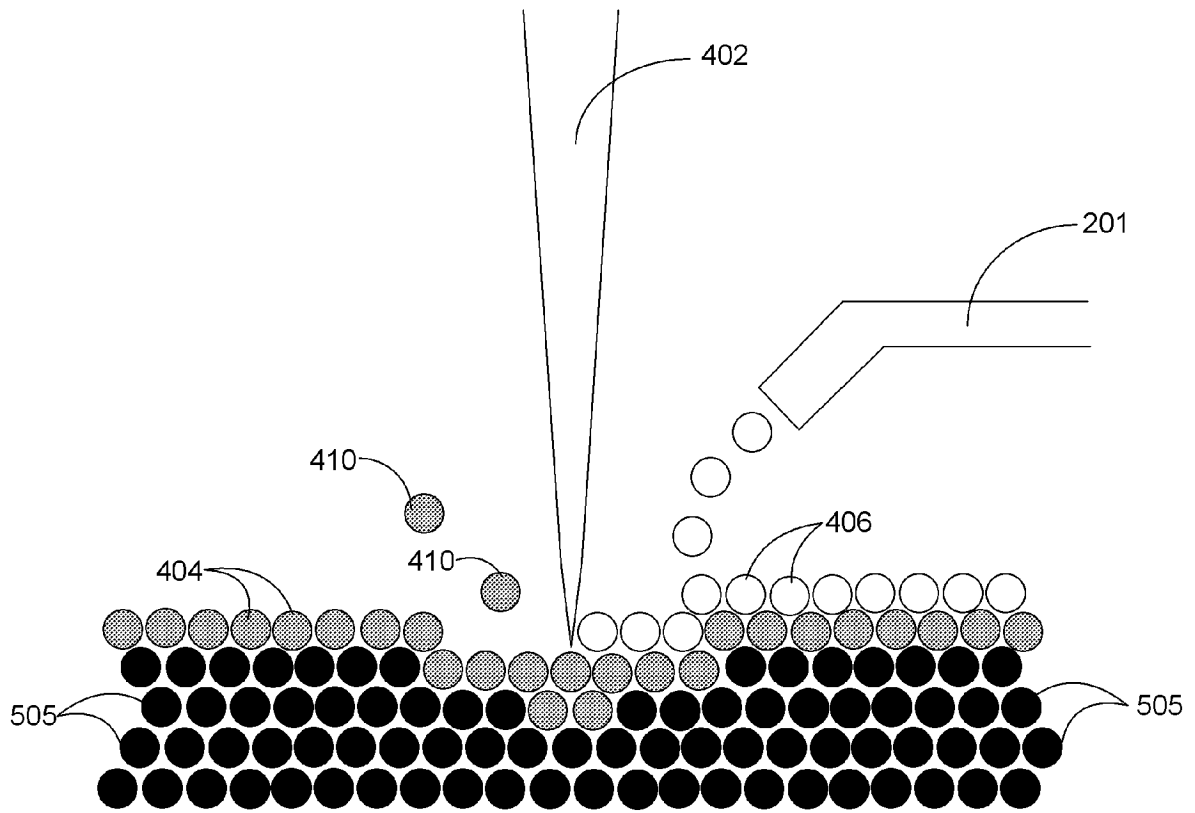


图 4

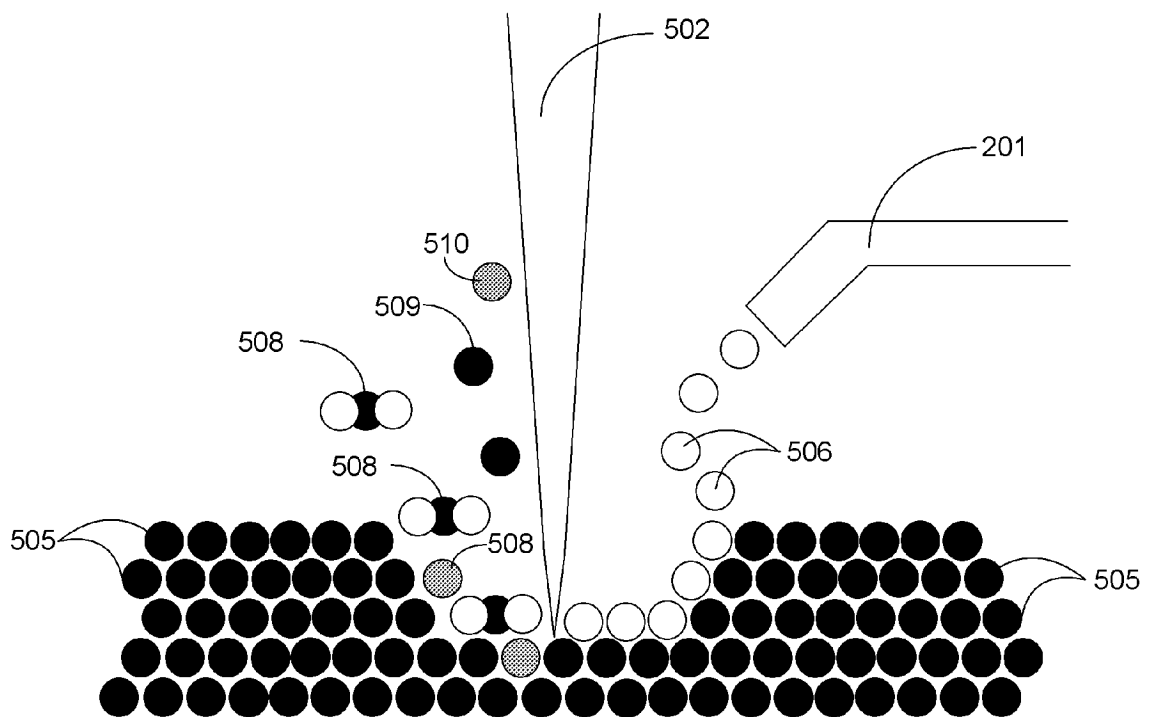


图 5

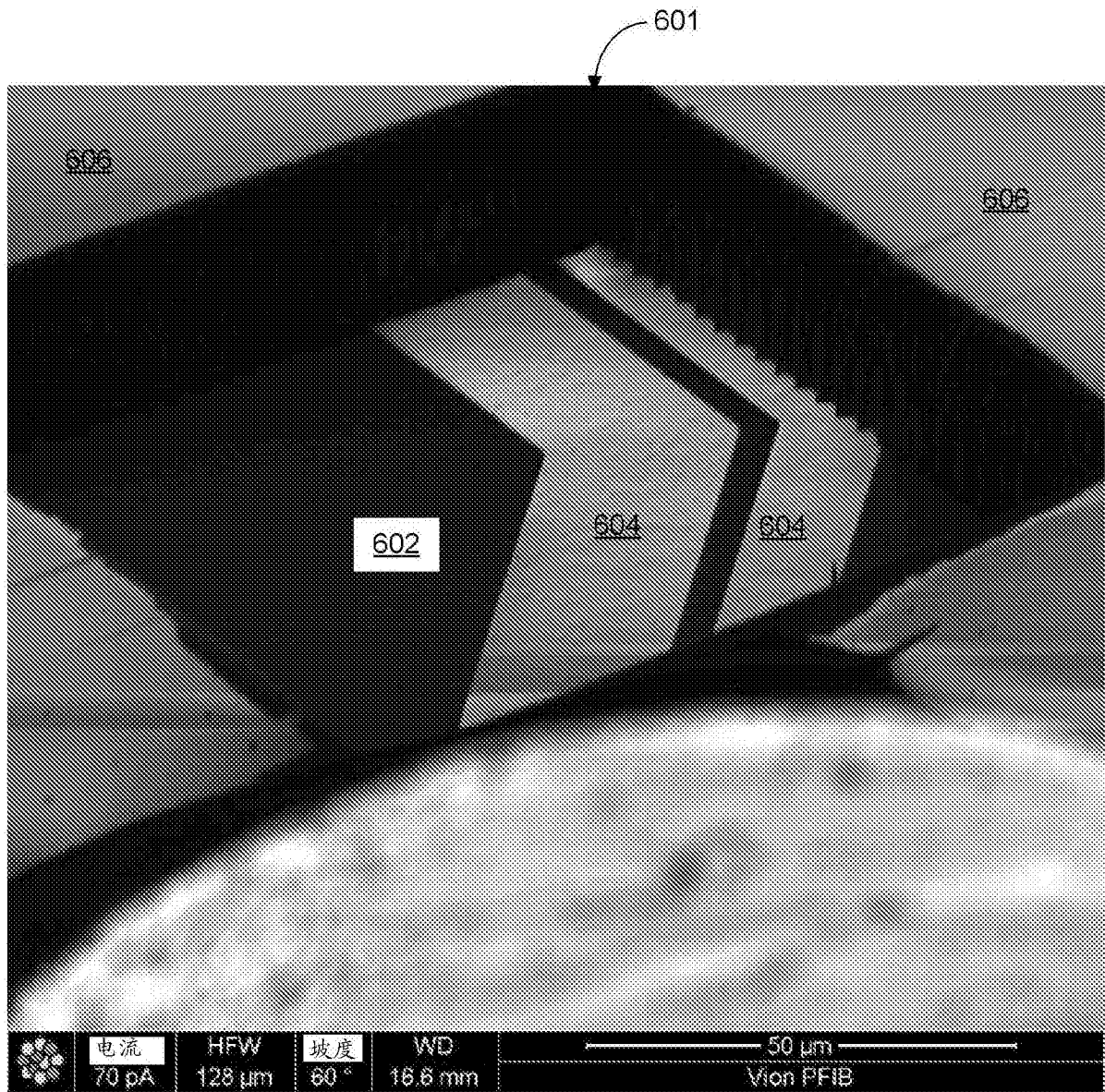


图 6

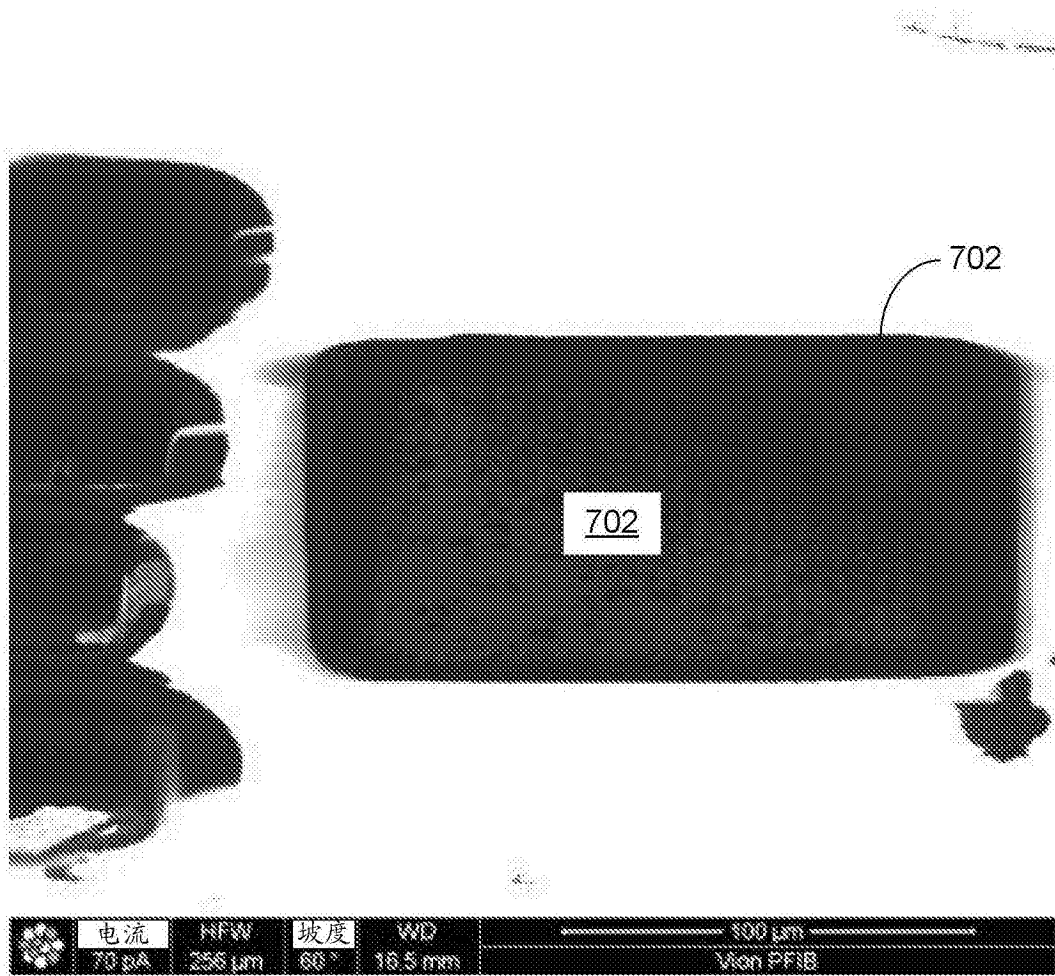


图 7

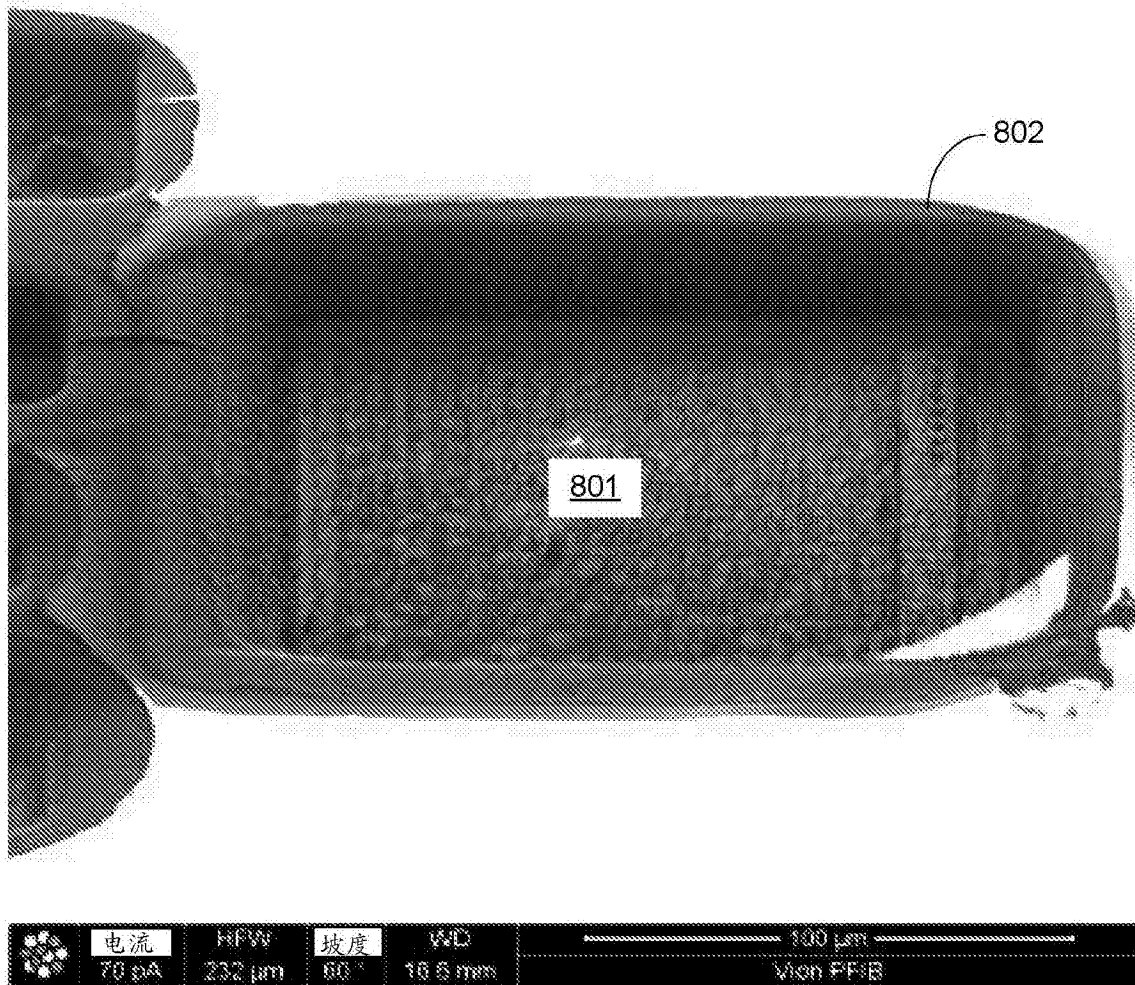


图 8

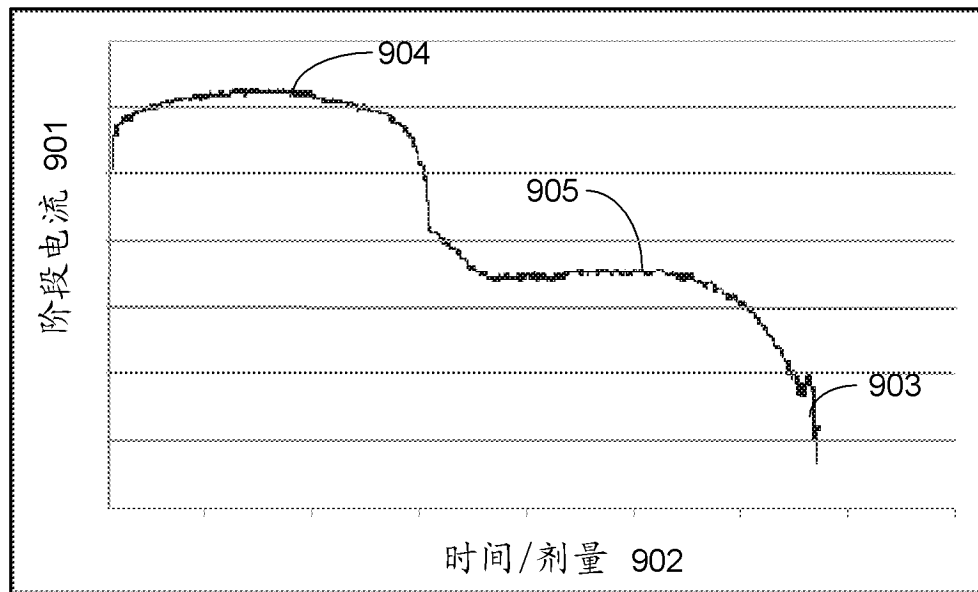


图 9

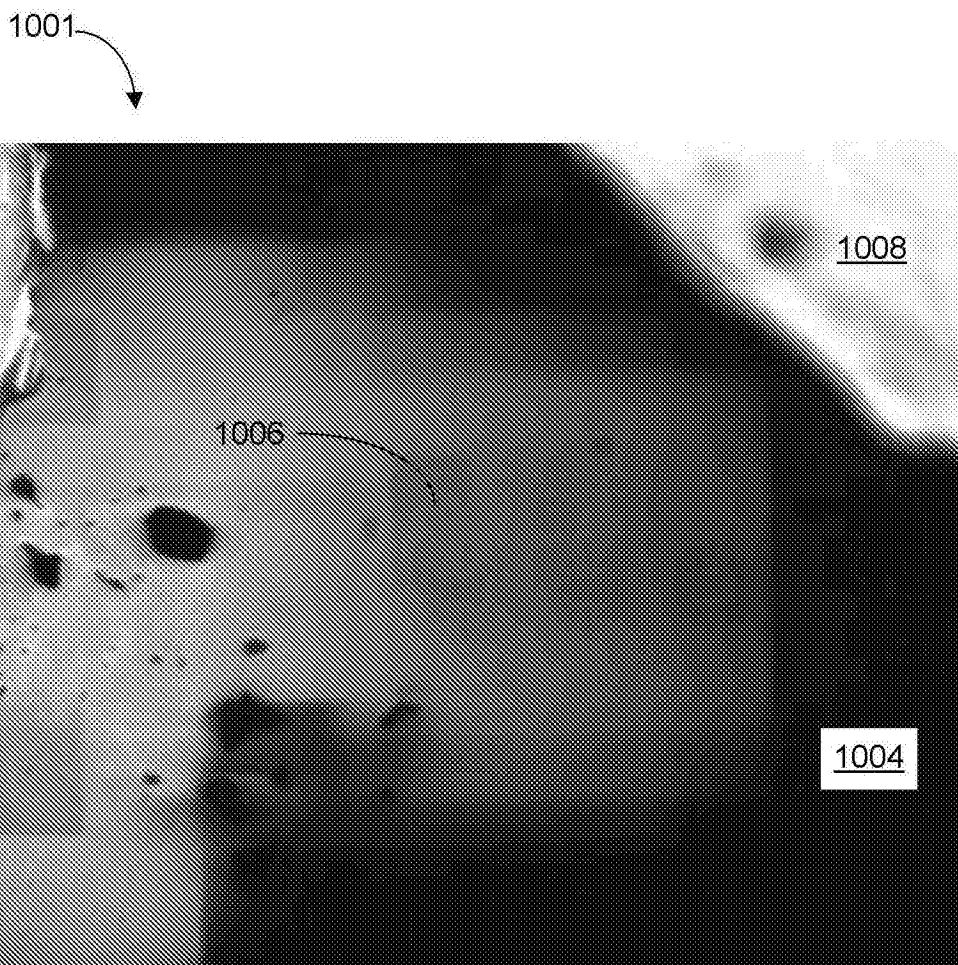


图 10

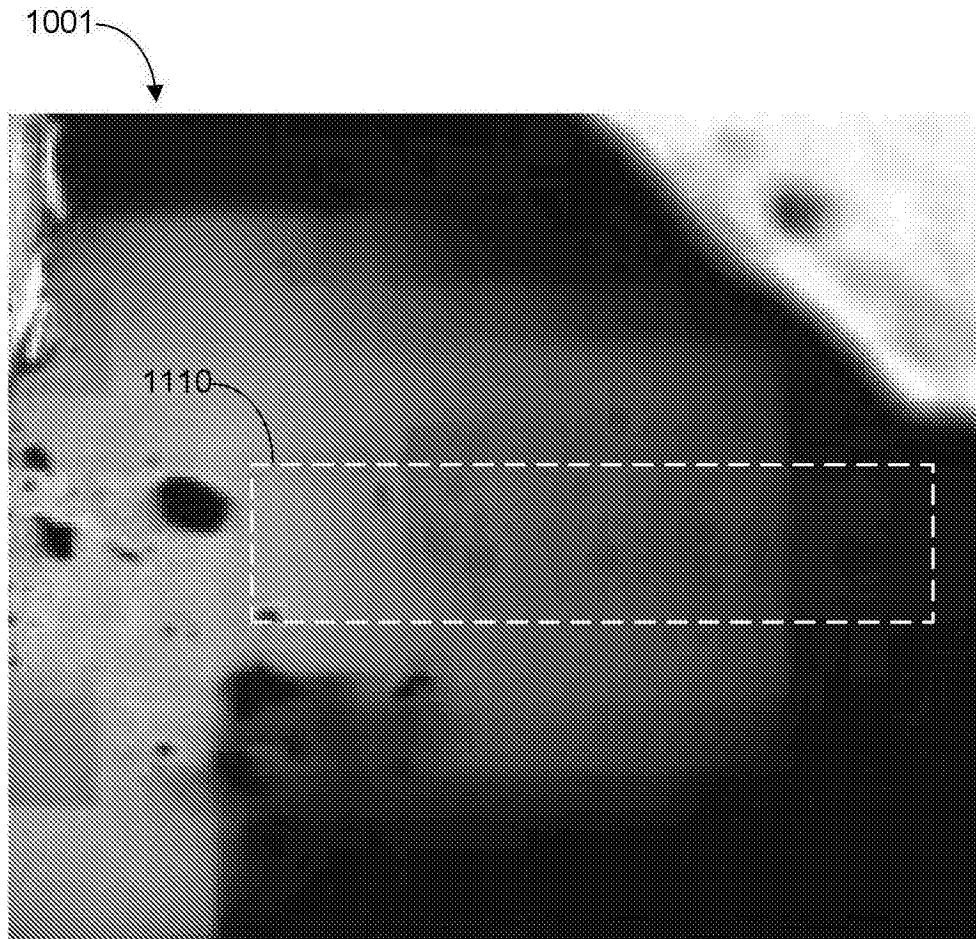


图 11

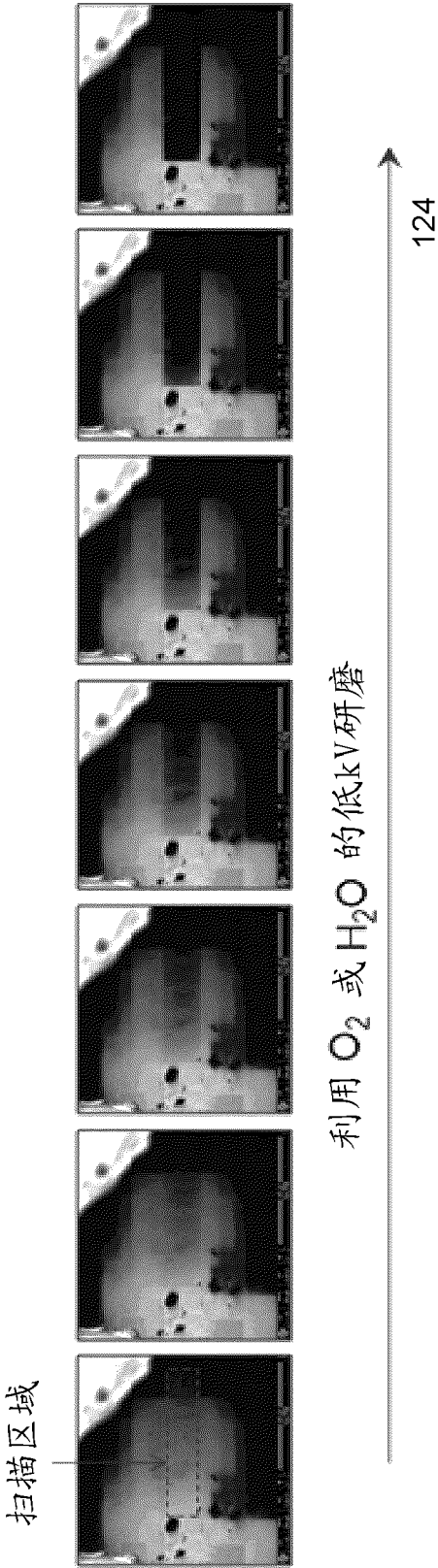


图 12