



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 02816875.5

[43] 公开日 2004 年 11 月 24 日

[11] 公开号 CN 1550037A

[22] 申请日 2002.8.26 [21] 申请号 02816875.5

[30] 优先权

[32] 2001.8.27 [33] US [31] 60/315,251

[86] 国际申请 PCT/US2002/027178 2002.8.26

[87] 国际公布 WO2003/019629 英 2003.3.6

[85] 进入国家阶段日期 2004.2.27

[71] 申请人 恩普泰斯特有限责任公司

地址 美国加利福尼亚

[72] 发明人 V·V·马卡罗夫 J·F·鲁伊斯

T-T·米奥

[74] 专利代理机构 北京市中咨律师事务所

代理人 杨晓光 李 峥

权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 6 页

[54] 发明名称 用带电粒子束微细加工铜的方法

[57] 摘要

一种微细加工方法，所述微细加工方法包括在有助蚀剂情况下用带电粒子束蚀刻衬底，所述衬底具有叠加在介质层之上的铜。助蚀剂选自氨、乙酸、硫羟乙酸及它们组合。

1. 一种微细加工法，包括：

(a) 提供衬底，所述衬底包括介质层和叠加在上述介质层上的铜；及

(b) 在有助蚀剂情况下，用带电粒子束蚀刻上述铜，上述助蚀剂包括气体，所述气体从氨、乙酸、硫羟乙酸及它们组合的中选定。

2. 根据权利要求1的方法，其中上述助蚀剂包括水和氨的混合物。

3. 根据权利要求2的方法，其中上述水和氨的混合物是从氢氧化铵前体中获得的。

4. 根据权利要求1的方法，其中上述助蚀剂包括氨。

5. 根据权利要求1的方法，其中上述助蚀剂还包括水。

6. 根据权利要求4的方法，其中上述助蚀剂还包括乙酸。

7. 根据权利要求1的方法，其中上述助蚀剂包括硫羟乙酸。

8. 根据权利要求1的方法，还包括

(c) 在有上述助蚀剂情况下以介质蚀刻速率用上述带电粒子束蚀刻上述介质层。

9. 根据权利要求8的方法，其中上述介质蚀刻速率低于不用助蚀剂的方法的介质蚀刻速率。

10. 根据权利要求1的方法，其中上述衬底包括二氧化硅，以及上述助蚀剂提供铜相对于二氧化硅的平均选择性为至少是4。

11. 根据权利要求1的方法，其中上述衬底包括二氧化硅，以及上述助蚀剂提供铜相对于二氧化硅的平均选择性为至少是6。

12. 根据权利要求1的方法，其中上述介质层包括化合物，所述化合物选自硅氧化物、有机硅氧化物、二氧化硅、碳化硅、氮化硅、氟化的硅氧化物、氢倍半硅氧烷及它们的组合。

13. 根据权利要求 1 的方法, 其中上述介质层包括多个层。

14. 根据权利要求 1 的方法, 还包括在上述衬底上限定蚀刻区, 并在上述蚀刻区内用上述带电粒子束蚀刻上述铜, 其中上述蚀刻区在蚀刻之后基本上没有再沉积的未络合的铜。

15. 根据权利要求 1 的方法, 还包括在上述衬底上限定蚀刻区, 并在上述蚀刻区内用上述带电粒子束蚀刻上述铜, 其中靠近上述蚀刻区的区域在蚀刻之后基本上没有再沉积的未络合的铜。

16. 根据权利要求 14 的方法, 其中上述预定的蚀刻区在上述蚀刻之后基本上没有导电的铜。

17. 根据权利要求 14 的方法, 其中上述预定的蚀刻区在上述蚀刻之后基本上没有导电的铜络合物。

18. 根据权利要求 15 的方法, 其中上述在上述蚀刻区附近的区域在蚀刻之后基本上没有导电的铜。

19. 根据权利要求 15 所述的方法, 其中上述在上述蚀刻区附近的区域在蚀刻之后基本上没有导电的铜络合物。

20. 根据权利要求 1 的方法, 还包括以铜蚀刻速率用上述带电粒子束蚀刻上述铜, 上述铜蚀刻速率取决于铜的晶向, 其中减少了上述铜蚀刻速率对上述铜晶向的上述依赖性。

21. 根据权利要求 1 的方法, 其中上述带电粒子束包括等离子体射束。

22. 根据权利要求 21 的方法, 其中上述等离子体射束包括宽离子束。

23. 根据权利要求 1 的方法, 其中上述带电粒子束包括聚焦粒子束。

24. 根据权利要求 1 的方法, 还包括蚀刻上述铜以便在上述铜中形成断开。

25. 根据权利要求 24 的方法, 其中上述衬底是集成电路, 所述集成电路具有线路, 并且上述断开实施上述线路的编辑。

用带电粒子束微细加工铜的方法

技术领域

本发明涉及在有助蚀剂的情况下用带电粒子束微细加工铜。

背景技术

铝、钨、和铜已用于集成电路中的金属相互连接。由于其低电阻率，铜特别是在高性能集成电路中尤其理想。在一种典型的操作中，铜是沉积到若干空隙中，所述若干空隙用全局平版印刷法微细加工成一种介质材料如二氧化硅的表面，以便在一预定图形中产生一系列的金属相互连接。

通过一个特定的化学方法帮助的带电粒子束微细加工对集成电路设计和故障检修期间的局部微细加工金属相互连接是有用的方法。聚焦离子束（FIB）微细加工在这方面，特别是在调试、编辑、验证、计量和过程控制中尤其有用。在带电粒子束微细加工中，金属迹线常常是在有特定化学药品帮助除去金属化的情况下暴露于一个比如是镓离子射束中。带电粒子束微细加工已经成功地用来微细加工铝和钨迹线，形成坚牢而洁净的刻槽。

然而，在铜的情况下产生问题。某些化学药品如碘基的那些化学药品一般不适用于铜金属化。碘基化学药品可以自然地蚀刻铜，并在离起始射束暴露点的几百微米内侵蚀露出的铜。这种侵蚀作用可能显示出严重的可靠性问题如高电阻率、漏电、及最后的导体故障。

各个铜迹线包括具有各种不同晶向的微晶粒，使各微晶粒以不同的速率蚀刻。这些微晶粒的存在，导致在某些方向上的铜中十分显著的沟道效应。最终结果是铜不均匀地蚀刻，因而限制了带电粒子束法在微细加工铜相互连接中的应用。另外，下面的介质层可以由于不均匀蚀刻而受到某种损伤。

理想的情况是一种能增加带电粒子束方法的使用的方法，以便蚀刻能以最小再沉积实施，并提供洁净的电绝缘。还有理想的是提供一种具有精确铣削铜的能力的方法，以便保证高的绝缘电阻，因此提供电路修改所必需的电绝缘。

发明内容

本发明提供一种用于微细加工半导体材料的方法，所述方法有利地改善了铜相互连接的蚀刻和分离（比如刻槽）。深埋式迹线可以用本发明的方法在一衬底中刻槽。

在本发明的一个方面，该方法包括在有一种助蚀剂情况下用带电粒子束微细加工衬底，并因而在铜中形成一种断开或分离。该方法包括：（a）提供衬底，所述衬底包括介质层和在介质层上面的铜；及（b）在有助蚀剂情况下用带电粒子束蚀刻铜。助蚀剂可以包括氨、乙酸、硫羟乙酸或它们的组合。

本发明提供一种用合适的化学药品蚀刻铜的方法，此处化学药品帮助达到铜相对于在下面的介质层比较高的选择性，形成更洁净、更均匀的铣削和刻槽。通过增加铜的选择性，表面粗糙度形成在离子轰击下减少。在经过蚀刻的材料再沉积和可以再沉积的任何材料的电导率也得到了减少。

在本申请中，下列术语将具有以下意义：

“选择性”是铜（Cu）与介质材料除去速率之间的比值（在相同条件下测得的）；及“除去速率”和“蚀刻速率”是每单位时间的平均厚度变化，并以比如，微米/秒为单位。

附图说明

图 1A-1C 是示出在有水情况下实施的铜蚀刻结果的显微照片；

图 2A-2D 是示出在有氨情况下实施的铜蚀刻结果的显微照片；

图 3A-3C 是示出在有氨和乙酸情况下实施的铜蚀刻结果的显微照片；

图 4A-4D 是示出在有硫羧乙酸情况下实施的铜蚀刻结果的显微照片；

图 5A-5C 是示出在有由氢氧化铵产生的氨和水情况下实施的铜蚀刻结果的显微照片；

图 6 是示出了例 6 和 7 结果的显微照片。

优选实施例的详细说明

铜的不均匀，效率低的蚀刻被认为是因为蚀刻速率（比如除去速率）对铜的晶向依赖性造成的。依赖于晶粒的微细加工现已表明是由于 Ga^+ 在某些取向中的沟道效应造成的；更密堆积的（111）晶面造成靠近表面的能量沉积，和由此增加的在更敞开的晶面上的溅射。这在例如器件修改操作（如通过各电源面或总线铣削到露出下层金属）期间特别重要，因为下面的介质层可能损伤。

有两种一般方法来解决不均匀蚀刻的问题：（1）提供更均匀的铜微细加工（以便抑制表面粗糙度形成）和（2）增加铜相对于下层介质的蚀刻选择性（以防介质损坏）。

本发明的方法可以在有助蚀剂情况下通过用一种带电粒子束蚀刻铜层，来微细加工一个衬底。通过在这种环境中蚀刻或铣削铜，相对于下面介质层的蚀刻选择性提高，导致在衬底中形成更洁净、更均匀的铜刻槽。另外，助蚀剂提供微细加工在一个介质层上的细的单个迹线及大而厚的铜电源面和接地面的能力。

本发明的微细加工法包括提供一个衬底，所述衬底包括一个介质层和在介质层上面的铜；并在有助蚀剂情况下用一带电粒子束蚀刻铜，此处助蚀剂是一种气体，所述气体具有氨、乙酸、硫代乙酸或它们的组合。本方法还可以包括在有助蚀剂情况下用带电粒子束蚀刻介质层。尽管铜是一种蚀刻用目标衬底的优选金属，但应该考虑，各种金属包括例如银（Ag）、金（Au）及其组合都可以用本发明的方法蚀刻。

一方面，本方法可以包括一个在衬底上限定一个蚀刻区并蚀刻所述蚀刻区内的铜的步骤。在蚀刻之后，限定的蚀刻区基本上没有再沉积的未络

合的铜。用本发明的方法蚀刻铜对集成电路设计修改是有用的。尤其是，可以将铜蚀刻以便形成一个良好的断开。然后，断开可以用编辑过程或重新布线电路进行修改。

助蚀剂可以是任何气态物质，上述气态物质能提供高选择性，以便增加除去介质层上铜的速率。助蚀剂优选地是对一种粒子束系统（比如 FIB 柱，真空）是非腐蚀性的，而且在有这个射束情况下与铜也是反应性的。优选的是，助蚀剂是一种可以作为蒸汽引入真空中的化合物。

现已发现，包括一种气态化合物如氨、乙酸、硫羟乙酸或它们的组合等的助蚀剂，当它们与一种带电粒子束结合使用时，可以提供改善的蚀刻结果。可以加水到助蚀剂中。在一种优选方法中，采用氨与水的混合物，并且这种混合物可以用经过蒸发的氢氧化铵产生。

再沉积常常与粒子束蚀刻有关。然而，采用本发明一种方法的微细加工，可以减少在目标蚀刻区及其附近区域中的经过蚀刻的材料（导电的铜和铜络合物）的再沉积。

除了减少再沉积的量之外，本发明的一种优选方法还可以减少任何可以再沉积的材料的电导率水平。这是通过用优选的助蚀剂完成的，上述优选的助蚀剂可以将一种导电材料转变成不导电材料。例如，尽管不希望受理论约束，但应该相信，在氨与水的气态混合物情况下，铜与上述混合物反应，以生成不导电的络合物或化合物如氧化铜（CuO），一种公知的绝缘体。这是有利的，因为不导电的铜络合物或化合物的粒子如果再沉积到一个蚀刻区或它的附近区域中，会产生极小的影响。因此，即使这些化合物的粒子变得在经过腐蚀的区域及其附近区域中再沉积，也仍然会遇到刻蚀出来的（比如在特定点/区域处隔离铜）不导电区域的对象，因为再沉积的粒子基本上是不导电的。相比之下，在没有这种助蚀剂情况下所进行的蚀刻方法仍可以让未反应的铜再沉积。这是不希望的，因为未反应的铜会是导电的，并因此不能把经过刻蚀的区域看成是一种“洁净的”或高度绝缘的区域。在本发明的一个优选方面，蚀刻法形成一个经过蚀刻的区域，所述经过蚀刻的区域基本上没有导电的铜、导电的铜络合物和/或再沉积的

未络合的铜。还优选的是，靠近蚀刻区的区域，如任何邻近的非蚀刻表面，基本上都是没有导电的铜、导电的铜络合物、和/或再沉积的未络合的铜。

在本发明的方法中使用助蚀剂，提供改进的铜相对于介质层的选择性。尤其是，现已发现，相对于包括二氧化硅的介质可以达到更高的铜选择性。高铜选择性是所希望的，因为除去速率随铜晶粒取向不同而有很大变化（高达 10 倍）。

其中，铜蚀刻依赖于铜的晶向。现已发现，这种依赖性可通过利用一种助蚀剂减少。在铜层暴露于助蚀剂中时，铜的反应（比如氧化作用）得到一种更随意的表面结构。尽管不希望受理论约束，但应该想到铜的表面晶向在某种程度上变得无定形并因而被随机化。表面晶向中的随机性又增加了通过粒子束轰击所达到的蚀刻（材料除去）的均匀性。

铜相对于 SiO_2 的平均“自然”选择性约为 2。选择性可以用各种不同方法增加，这些方法包括例如增加铜的蚀刻，或减少 SiO_2 的蚀刻。可以看出，在有助蚀剂情况下一种使用带电粒子束的微细加工方法可以有利地将蚀刻法的选择性增加到 2，此处选择性是相对于 SiO_2 为一种气体化学药品而特征化的。在一种优选方法中，蚀刻可以在选择性为 6 处进行，与不用助蚀剂的蚀刻法相比，选择性大大增加。

在某些方法中，蚀刻一个铜层可以穿透该铜层以便露出介质层。因此，改进的端点检测是一种微细加工方法的理想性能。本发明的方法可提供足够的端点检测以便能以访问下面用于编辑，电子束探测或其他电气测试的电路所期望的精度铣削一个 Cu 阻挡层/介质界面。在本发明的实际操作中，介质层如 SiO_2 的蚀刻速率可以大大减小，与不用助蚀剂的蚀刻相比，蚀刻速率可以减小多达约 9-10 倍。因此，以助蚀剂化学药品穿过铜层的微细加工可以快速完成（由于铜的高选择性），还在接触下面的介质层时，基本上可以延缓或阻止粗糙度形成（由于减小了介质的蚀刻速率）。这有利地使损伤介质层减至最少。

用本发明的方法微细加工一个衬底可以使一个蚀刻区的表面粗糙度减至最小（亦即使均匀度增加）。尤其是，经过蚀刻的迹线可以形成为具有

良好的底面均匀性（底面高度相对于平均水平面的变化）。各迹线一般是一个相互连接的水平部分，所述相互连接可以用几个金属化水平面制成，并且一般是为承载电力、接地和/或信号的较细金属化预留。承载电力、接地和/或时钟信号的平面或较宽金属化也可以用本发明的方法修改和微细加工。

微细加工法的另一个优点是最终刻槽的“洁净度”水平。正如刚说明的，经过蚀刻的材料再沉积常常与常规的微细加工方法有关。在本发明的方法中，铜或铜络合物的最小再沉积在经过蚀刻的区域及靠近经过蚀刻的区域的区域中发生。例如，现已发现，一种洁净的微细加工迹线刻槽可以得到，并可以具有大于约 $500\text{M}\Omega$ 的刻槽电阻。这尤其是对于编辑操作可能是有利的。用例如电压对比评价由本发明方法所制得的刻槽表明，使各铜迹线刻槽隔离可以达到。相比之下，电压对比揭示，在不用本发明的助蚀剂情况下，刻槽可能是非隔离的。

在本方法的实际操作中，在有一种助蚀剂情况下的微细加工提供在刻蚀之后不留残留物的能力，尤其是不留在暴露于空气中时能自发反应的残留物。因此，可以把称为“蚀刻后腐蚀”的不期望的副作用如果不消除的话也减至最小。

一种优选的衬底是一种铜叠加在一个介质层之上的材料。介质层可以包括多个层，每一层都包括一种介质材料。合适的介质材料可以是任何含硅的材料。优选的介质包括硅基化合物，所述硅基化合物包括但不限于：各种硅氧化物（包括二氧化硅）、碳化硅、氮化硅、或它们的组合。另一些合适的介质材料包括例如具有低介电常数（K）的材料，如有机硅氧化物、氟化的硅氧化物及它们的组合。可选择地，这些低K介质可以与碳化硅、氮化硅、及氧化硅进行组合。介质材料还有另一些例子包括例如氟化的硅酸盐玻璃（FSG）、碳掺杂的硅氧烷或有机硅酸盐玻璃（OSG）、氢倍半硅氧烷（HSQ）、其它的硅玻璃及它们的组合。现已发现，FSG 介质在商业上对半导体制造是有用的。因此，一种优选的方法也能改善铜相对于 FSG 的蚀刻选择性。

在此所用的“铜”涉及任何类型的铜材料，其中包括铜合金，尤其是在半导体制造中所应用和考虑的那些铜合金。铜可以是在任何类型的衬底之中或之上，如半导体衬底或器件。铜层通常在另一种材料亦即一种介质的上面。铜层通常具有一个薄的上面层或下面层，所述薄的上面层或下面层是在铜层和下面的衬底或介质之间，如一个薄的扩散阻挡层、钝化层、氧化物层或绝缘层。在本发明中可以是工件的一些铜层和衬底的实例包括，但不限于，在美国专利 6,057,223；5,959,358；5,899,740 及 5,766,379 中所示出的那些，上述专利的公开内容作为整体在此引入作为参考。

在此所提供的本发明方法可以在各种方法中使用，这些方法包括例如成形、设计调试、编辑、探测和验证及其它电气操作或测试。蚀刻优选的是用一种能制备多晶铜迹线的方法进行，尤其是在深度亚微米、FIB 铣削通路中进行。一方面，本发明的方法可以在集成电路（IC）设计、调试或器件修改过程中实施。另一方面，微细加工是按照一个预定的模式进行，如一般为微电子学集成电路设计、MEMS（微型机电一体化系统）装置和纳米技术结构而执行的模式。

本方法的有用的带电粒子束的一些实例包括等离子体束和聚焦离子束。合适的等离子体束系统包括衬底暴露于其中的宽离子束及有源束或偏置束。聚焦粒子束加工是已知的，并且在例如美国专利 5,616,92；5,840,630；5,798,529 及 6,140,655 中已经公开。一种优选的方法使用聚焦离子束，如在美国专利 5,140,164 中所公开的那样，所述美国专利 5,140,164 使用镓离子束。

可以包括在本发明蚀刻方法中的另一些方法包括化学处理法，如在例如美国专利 5,700,526；5,747,818；5,840,630 中所说明的方法。

本发明将通过下面一些实例进一步进行说明。这些实例不打算限制权利要求书的范围。相反，这些实例只提供用作举例说明的目的。

实例

在下面每个实例中，都使用一种聚焦离子束（FIB）仪器——一种 Schlumberger Probe System 的 IDS P2Xplus 型或 IDS P3Xa 型系统。射束

能量为 30KeV。

对例 1-5, 样品包括 SiO_2 柱图形, 上述 SiO_2 柱穿过 $1.5\mu\text{m}$ 厚的铜层的表面。每个柱都具有约为 $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ 的截面积, 和约 $1.5\mu\text{m}$ 的高。选择性根据蚀刻的铜量与各柱蚀刻掉的 SiO_2 量二者的比值估计。

每个样品在 SiO_2 上都有一个 Ta 阻挡层。在每个样品上测量刻槽电阻, 此处蚀刻一个 $1.3\mu\text{m}$ 宽的铜线, 以便蚀刻铜及其 Ta (钽) 阻挡层。

用 FIB 仪器蚀刻之后估计残留铜的水平及铜的再沉积量。

对例 6-7, 各样品都含有迹线, 所述迹线具有约 $1.1\mu\text{m} \times 1.1\mu\text{m}$ 的截面积。在样品上没有柱。

对照例 1

在这个实例中, 用于对照目的助蚀剂是水。在 FIB 仪器的室内的典型工作压力是 $6 \times 10^{-5}\text{Torr}$ 。

图 1A-1C 中提供在这个实例中所蚀刻的衬底的显微照片。最少残留铜在蚀刻区中能看到, 并且铜再沉积的水平估计为“低”。据估计, 在有这种化学药品情况下的蚀刻达到平均选择性为 4。达到最佳选择性所需的时间量为 120min。

例 2

所用的助蚀剂是氨气。引入蚀刻室的气体流量用一个质量流量控制器和一个压力调节器控制。室内的工作压力为约 $9 \times 10^{-5}\text{Torr}$ 。

图 2A-2D 是从这个实例中的样品所拍的显微照片。最少残留铜在蚀刻区中能看到, 并且把铜再沉积的水平估计为“高”。达到最佳选择性所需的时间量为 2h45min。据估计, 在有这种化学药品情况下的蚀刻达到平均选择性为 3。这个选择性高于不用助蚀剂的样品的选择性。

例 3

所用的助蚀剂是氨气和乙酸的组合。室内每种化学药品的工作压力为约 $3.5 \times 10^{-5}\text{Torr}$ 。

图 3A-3C 是从这个实例中的样品所拍的显微照片。最少残留铜在蚀刻区中能看到, 并把铜再沉积的水平估计为“低”。达到最佳选择性所需的

时间量为 37min。据估计，在有这种化学药品情况下的蚀刻达到一个平均选择性为 4。这个选择性高于没有用助蚀剂的样品的选择性。

例 4

在这个实验中所用的助蚀剂是硫羧乙酸。室内典型的工作压力为 2.4×10^{-5} Torr。

图 4A-4D 是从这个实例中的样品所拍的 FIB 显微照片。能看到很洁净的铜蚀刻。把铜再沉积的水平估计为“中等”。达到最佳选择性所需的时间量为 50-60min。据估计，在有这种化学药品情况下的蚀刻达到平均选择性为 4。这个选择性高于没有用助蚀剂的样品的选择性。

例 5

助蚀剂是氨和水的混合物，其中前体是氢氧化铵。室内的工作压力为约 1×10^{-5} 托。

图 5A-5C 是从这个实例中的样品所拍的 FIB 显微照片。在蚀刻区中能看到很少量的残留铜，并把铜再沉积的水平估计为“极低”。达到最佳选择性所需的时间量为 40min。据估计，在有这种化学药品情况下的蚀刻达到平均选择性为 6。这个选择性大大高于对照例 1 及没有用助蚀剂的样品中的选择性。

例 6 和 7

用下列过程在对照样品（对照例 6）和本发明样品（例 7）中制成测量为 $1.5\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 的刻槽。

用镱离子束（Schlumberger IDS P3X FIB 仪器）来腐蚀铜，此处电流是 3pA。

对于对照例 6（没有助蚀剂），在残留室压为 1×10^{-6} Torr（0.000001Torr）或更低的压力下实施刻槽。腐蚀需要约 6min，以便完成刻槽。

对例 7，用本发明的一种优选方法所制成的刻槽是在室内 NH_3 和 H_2O 的压力下实施。氨/水混合物的前体是 28% 的氨水溶液。室压为 3×10^{-5} Torr。输送气体的喷口具有 0.5mm 内径，并与垂直于表面的方向成约

30°角，横向距工作区域中心约 0.2mm 和纵向距工作区域中心约 0.3mm 设置。蚀刻需要约 7min，以便完成刻槽。

现在参见图 6，利用绘电压对比图象，可以看出，由有助蚀剂情况下蚀刻所形成的标示为 (10) 的刻槽区是很“洁净的”并且是绝缘的。相比之下，对照刻槽 (20) 具有光亮的区域 (用箭头 25 指出)，这表明导电铜再沉积到目标刻槽区附近的区域上。从电压对比可知，据估计，刻槽电阻大于 2×10^{10} 欧姆，表明高度电绝缘。

已经对本发明的一些实施例作了说明。尽管如此，应该理解，在不脱离本发明的精神和范围情况下，可以进行各种修改。因此，其它实施例是在后面权利要求书的范围内的。

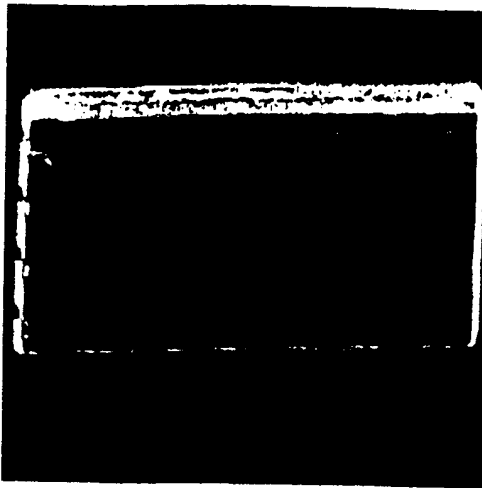


图 1A

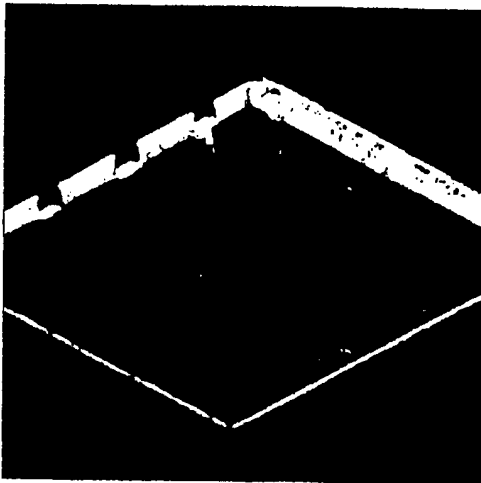


图 1B

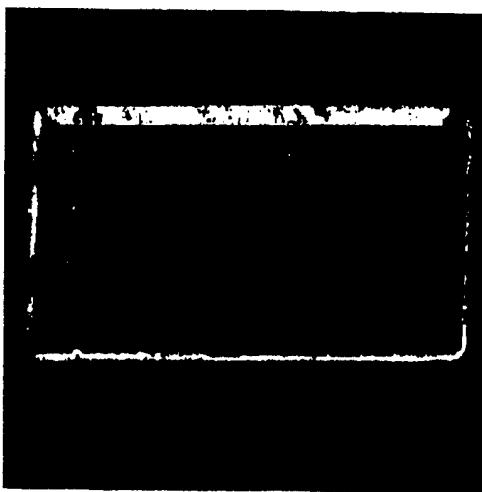


图 1C

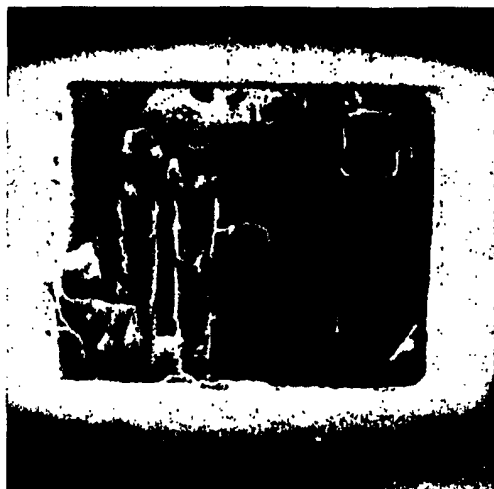


图 2A

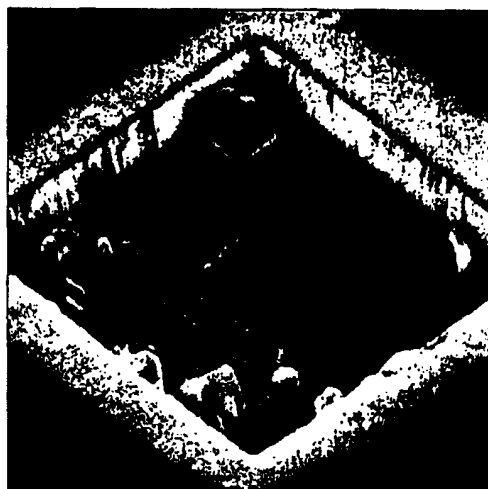


图 2B



图 2C



图 2D

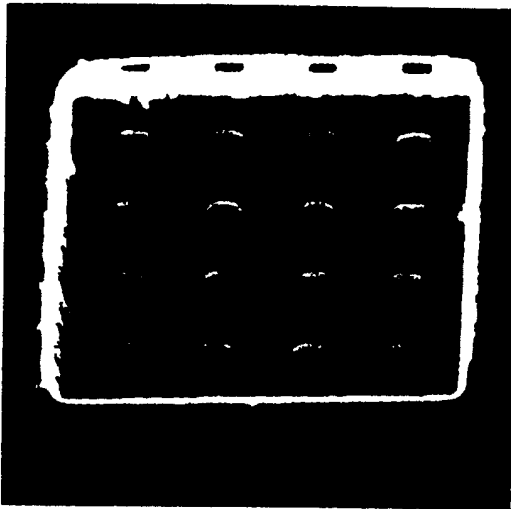


图 3A

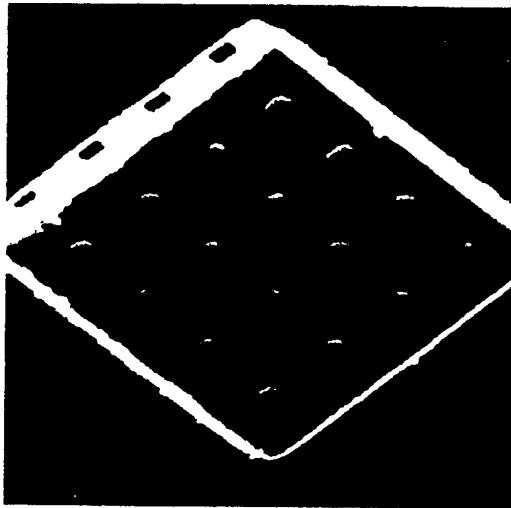


图 3B

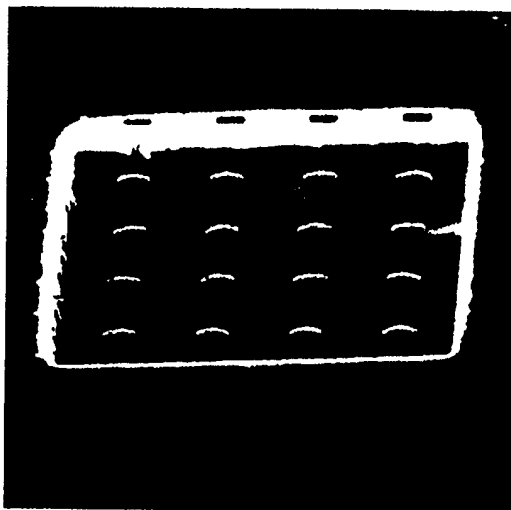


图 3C

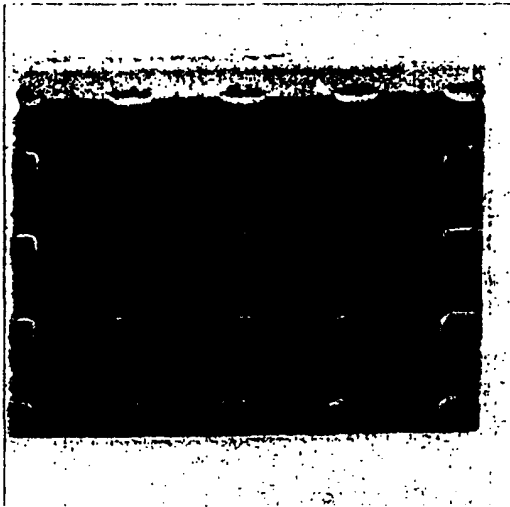


图 4A

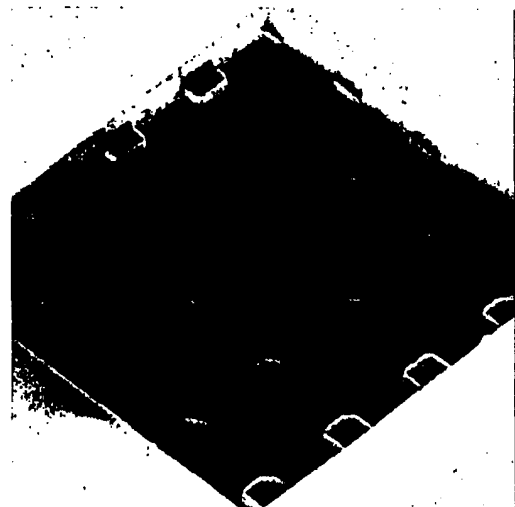


图 4B

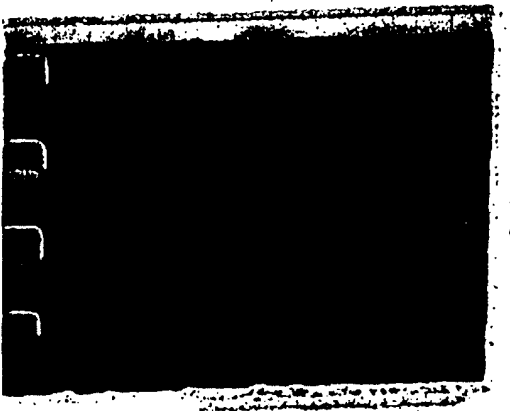


图 4C

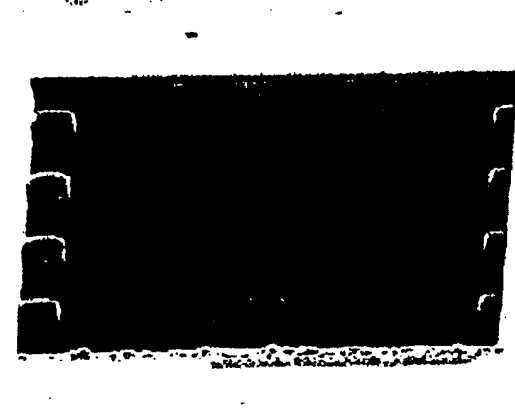


图 4D

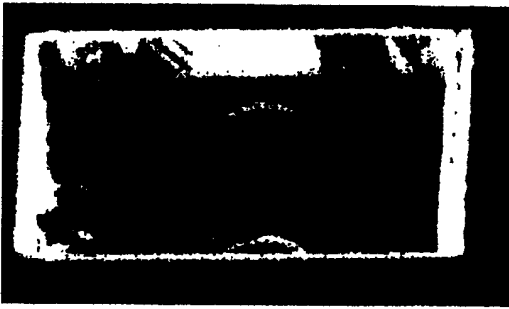


图 5A

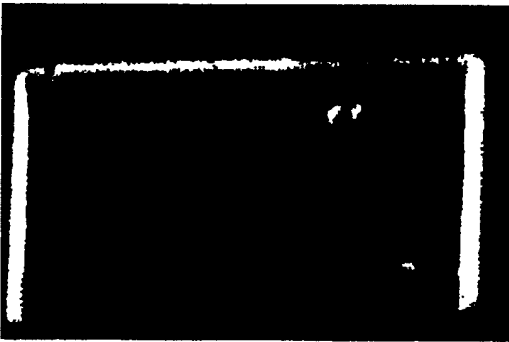


图 5B

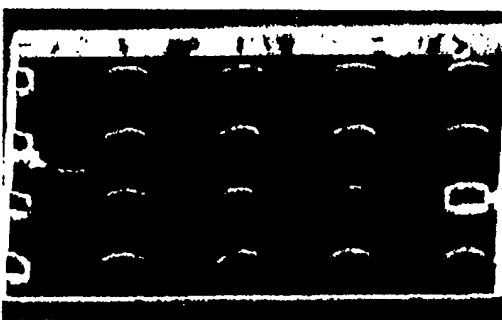


图 5C

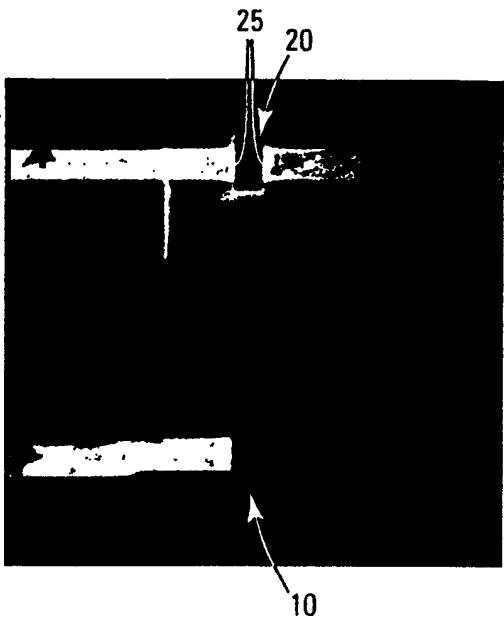


图 6