

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200580046189.7

H01L 21/44 (2006.01)

H01L 23/48 (2006.01)

H01L 23/40 (2006.01)

H01L 23/52 (2006.01)

[43] 公开日 2008年1月16日

[11] 公开号 CN 101107699A

[22] 申请日 2005.11.8

[21] 申请号 200580046189.7

[30] 优先权

[32] 2004.11.8 [33] US [31] 60/625,831

[86] 国际申请 PCT/US2005/040414 2005.11.8

[87] 国际公布 WO2006/052958 英 2006.5.18

[85] 进入国家阶段日期 2007.7.9

[71] 申请人 TEL 艾派恩有限公司

地址 美国马萨诸塞州

[72] 发明人 罗伯特·M·杰弗肯

约翰·J·豪特拉

史蒂文·R·谢尔曼

亚瑟·J·勒恩

[74] 专利代理机构 北京东方亿思知识产权代理有限  
责任公司  
代理人 李 剑

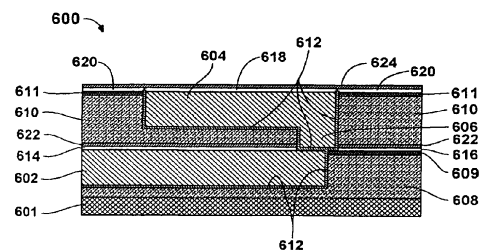
权利要求书7页 说明书21页 附图15页

[54] 发明名称

铜互连布线和形成铜互连布线的方

[57] 摘要

本发明公开了用在互连结构中的铜互连布线层(602)的表面上的一层或多层帽封层(614),以及通过应用气体团簇离子束处理而形成用于集成电路的改善的集成互连结构的方法。本发明具有降低铜扩散并且提高电迁移寿命的结果,并且避免了选择性金属帽封技术的使用和其附带的产量问题。



1. 一种在包括一个或多个铜互连表面和一个或多个电介质表面的结构上形成帽封结构的方法，包括以下步骤：

将所述结构置于低压室中；

在所述低压室内形成加速的帽封 GCIB；以及

将所述加速的帽封 GCIB 引导到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个电介质表面中的至少一个上，以在所述加速的帽封 GCIB 被引导到其上的一个或多个表面上形成至少一个帽封结构。

2. 如权利要求 1 所述的方法，还包括在所述帽封 GCIB 形成和引导步骤之前的以下步骤：

在所述低压室内形成加速的清洁 GCIB；以及

将所述加速的清洁 GCIB 引导到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个电介质表面上，以清洁所述加速的清洁 GCIB 被引导到其上的一个或多个表面上。

3. 如权利要求 2 所述的方法，其中形成加速的清洁 GCIB 还包括由选自自由 Ar、N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub> 构成的组中的至少一种气体的分子生成气体团簇离子。

4. 如权利要求 2 所述的方法，其中形成所述加速的清洁 GCIB 还包括利用在从约 3kV 到约 50kV 的范围内的加速电势加速清洁 GCIB 气体团簇离子。

5. 如权利要求 2 所述的方法，其中引导所述加速的清洁 GCIB 导致在从约  $5 \times 10^{13}$  到约  $5 \times 10^{16}$  气体团簇离子/cm<sup>2</sup> 的范围内的照射剂量被传输到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个电介质表面中的至少一个。

6. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述一个或多个电介质表面包括级间电介质层的一部分。

7. 如权利要求 1 所述的方法，其中所述一个或多个电介质表面包括位于多孔级间电介质层的至少一部分上的硬掩模层的一部分。

8. 如权利要求 1 所述的方法，其中：

形成所述加速的帽封 GCIB 还包括由如下元素生成气体团簇离子，这些元素在熔入到铜表面中时反应形成电绝缘材料，在熔入到电介质表面中时反应形成电绝缘材料；并且

所形成的至少一个帽封结构是电绝缘帽封结构。

9. 如权利要求 8 所述的方法，其中所述元素由选自由 C、N、O、Si、B 和 Ge 构成的组中的至少一种元素构成。

10. 如权利要求 8 所述的方法，其中形成所述加速的帽封 GCIB 还包括由惰性气体分子生成气体团簇离子。

11. 如权利要求 8 所述的方法，其中形成所述加速的帽封 GCIB 还包括利用在从约 3kV 到约 50kV 的范围内的加速电势加速所生成的气体团簇离子。

12. 如权利要求 8 所述的方法，其中所述引导所述加速的帽封 GCIB 的步骤导致在从约  $1 \times 10^{14}$  到约  $1 \times 10^{17}$  气体团簇离子/cm<sup>2</sup> 的范围内的照射剂量被传输到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个电介质表面中的至少一个。

13. 如权利要求 8 所述的方法，还包括形成位于所形成的至少一个帽封结构上的至少一个绝缘层的步骤。

14. 如权利要求 13 所述的方法，其中所述形成至少一个绝缘层的步骤采用了 PECVD 沉积工艺。

15. 如权利要求 13 所述的方法，其中所形成的至少一个绝缘层由选自由碳化硅、氮化硅和氮化硅碳构成的组中的一种材料构成。

16. 如权利要求 1 所述的方法，其中：

形成所述加速的帽封 GCIB 还包括由如下元素生成气体团簇离子，这些元素在熔入到铜表面中时反应形成导电材料，在熔入到电介质表面中时反应形成电绝缘材料；并且

所形成的至少一个帽封结构包括所述铜互连部分的被照射区域上的导电帽封结构和所述电介质部分的被照射区域上的电绝缘帽封结构中的至少一个。

17. 如权利要求 16 所述的方法，其中所述元素由来自自由 B 和 Ti 构成

的组中的至少一种元素构成。

18. 如权利要求 17 所述的方法，其中所述气体团簇离子还包括惰性气体分子。

19. 如权利要求 16 所述的方法，还包括形成在所形成的至少一个帽封结构上的至少一层电介质扩散阻挡膜的步骤。

20. 如权利要求 19 所述的方法，其中所述形成至少一层电介质扩散阻挡膜的步骤采用了 PECVD 沉积工艺。

21. 如权利要求 19 所述的方法，其中所述形成至少一层电介质扩散阻挡膜的步骤采用了 GCIB 沉积工艺。

22. 如权利要求 19 所述的方法，其中所形成的至少一层电介质扩散阻挡膜由选自由碳化硅、氮化硅和氮化硅碳构成的组中的一种材料构成。

23. 如权利要求 16 所述的方法，其中形成所述加速的帽封 GCIB 还包括利用在从约 3kV 到约 50kV 的范围内的加速电势加速所生成的气体团簇离子。

24. 如权利要求 16 所述的方法，其中所述引导所述加速的帽封 GCIB 的步骤导致在从约  $1 \times 10^{14}$  到约  $1 \times 10^{17}$  气体团簇离子/cm<sup>2</sup> 的范围内的照射剂量被传输到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个电介质表面中的至少一个。

25. 一种在具有一个或多个铜互连表面和覆盖电介质材料的一个或多个阻挡层表面的结构上形成帽封结构的方法，包括以下步骤：

将所述结构置于低压室中；

在所述低压室内形成加速的刻蚀和帽封 GCIB；以及

将所述加速的刻蚀和帽封 GCIB 引导到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个阻挡层表面中的至少一个上，以在所述加速的刻蚀和帽封 GCIB 被引导到其上的一个或多个铜互连表面上形成帽封结构，并刻蚀掉所述加速的刻蚀和帽封 GCIB 被引导到其上的一个或多个阻挡层表面以暴露下面的电介质材料。

26. 如权利要求 25 所述的方法，还包括以下步骤：

测量作为衬底表面上的位置的函数的一个或多个阻挡层的厚度，其各

自对应于所述一个或多个阻挡层表面之一；以及

生成关于所述衬底表面上所述一个或多个阻挡层厚度的图；

其中所述引导步骤还包括补偿所述一个或多个测得的阻挡层厚度以便去除最小量的暴露电介质材料。

27. 如权利要求 25 所述的方法，其中形成所述加速的刻蚀和帽封 GCIB 还包括由包括选自由 F 和 S 构成的组中的至少一种元素的气体生成气体团簇离子。

28. 如权利要求 25 所述的方法，其中形成所述加速的刻蚀和帽封 GCIB 还包括由包括选自由 F、S、Ar、Xe 和 N 构成的组中的至少一种元素的气体生成气体团簇离子。

29. 如权利要求 25 所述的方法，其中形成所述加速的刻蚀和帽封 GCIB 包括：

由以约 200sccm 到约 3000sccm 的喷嘴气体流率流动的源气体生成气体团簇离子；以及

利用在从约 10kV 到约 50kV 的范围内的加速电势加速所述气体团簇离子。

30. 如权利要求 25 所述的方法，还包括在所述刻蚀和帽封 GCIB 形成和引导步骤之前的以下步骤：

在所述低压室内形成加速的清洁 GCIB；以及

将所述加速的清洁 GCIB 引导到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个阻挡层表面中的至少一个上，以便清洁所述加速的清洁 GCIB 被引导到其上的至少一个表面。

31. 如权利要求 30 所述的方法，其中形成所述加速的清洁 GCIB 包括由包括选自由 Ar、N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub> 构成的组中的至少一种气体的一种或多种气体生成气体团簇离子。

32. 如权利要求 31 所述的方法，其中形成所述加速的清洁 GCIB 还包括利用在从约 3kV 到约 50kV 的范围内的加速电势加速所生成的气体团簇离子。

33. 如权利要求 30 所述的方法，其中引导所述加速的清洁 GCIB 导致

在从约  $5 \times 10^{13}$  到约  $5 \times 10^{16}$  气体团簇离子/cm<sup>2</sup> 的范围内的照射剂量被传输到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个阻挡层表面中的至少一个。

34. 一种在具有一个或多个铜互连表面和覆盖电介质材料的一个或多个阻挡层表面的结构上形成帽封结构的方法，包括以下步骤：

将所述结构置于低压室中；

在所述低压室内形成加速的刻蚀 GCIB；

将所述加速的刻蚀 GCIB 引导到所述一个或多个阻挡层表面上，以便刻蚀掉所述刻蚀 GCIB 被引导到其上的一个或多个阻挡层表面以暴露下面的所述电介质材料；

在所述低压室内形成加速的帽封 GCIB；以及

将所述加速的帽封 GCIB 引导到所述一个或多个铜互连表面上，以便在其上形成一个或多个帽封结构。

35. 如权利要求 34 所述的方法，还包括以下步骤：

测量作为所述衬底表面上的位置的函数一个或多个阻挡层的厚度，其各自与所述一个或多个阻挡层表面之一相关联；以及

生成关于所述衬底表面上阻挡层厚度的图；

其中所述引导所述加速的刻蚀 GCIB 的步骤还包括补偿所述一个或多个测得的阻挡层厚度，以便去除最小量的暴露电介质材料。

36. 如权利要求 34 所述的方法，其中所述加速的帽封 GCIB 由选自自由 C、N、O、Si、B、Ge、Ti、S 和 F 构成的组中的至少一种元素构成。

37. 如权利要求 34 所述的方法，其中所述加速的帽封 GCIB 由选自包含 C、N、O、Si、B、Ge 和 Ti 的组中的至少一种元素构成。

38. 如权利要求 36 所述的方法，其中所述加速的帽封 GCIB 气体团簇离子还包括选自自由 Ar 和 Xe 构成的组中的至少一种气体。

39. 如权利要求 37 所述的方法，其中所述加速的帽封 GCIB 气体团簇离子还包括选自自由 Ar 和 Xe 构成的组中的至少一种气体。

40. 如权利要求 34 所述的方法，其中：

形成所述加速的帽封 GCIB 包括利用在从约 3kV 到约 50kV 的范围内

的加速电势加速帽封 GCIB 气体团簇离子；并且

所述引导所述加速的帽封 GCIB 的步骤导致在从约  $1 \times 10^{14}$  到约  $1 \times 10^{17}$  气体团簇离子/cm<sup>2</sup> 的范围内的照射剂量被传输到所述一个或多个铜互连表面中的至少一个。

41. 如权利要求 34 所述的方法，还包括在所述形成和引导步骤之前的以下步骤：

在所述低压室内形成加速的清洁 GCIB；

将所述加速的清洁 GCIB 引导到所述一个或多个铜互连表面和一个或多个阻挡层表面中的至少一个上，以便清洁所述加速的清洁 GCIB 被引导到其上的至少一个表面。

42. 如权利要求 41 所述的方法，其中所述加速的清洁 GCIB 由在由 Ar、N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub> 构成的组中的至少一种气体分子构成。

43. 如权利要求 41 所述的方法，其中：

形成所述加速的清洁 GCIB 包括利用在从约 3kV 到约 50kV 的范围内的加速电势加速清洁 GCIB 气体团簇离子；并且

所述引导所述清洁 GCIB 的步骤导致在从约  $5 \times 10^{13}$  到约  $5 \times 10^{16}$  气体团簇离子/cm<sup>2</sup> 的范围内的照射剂量被传输到所述一个或多个铜互连表面和所述一个或多个阻挡层表面中的至少一个，以便清洁所述加速的清洁 GCIB 被引导到其上的至少一个表面。

44. 如权利要求 34 所述的方法，其中形成所述加速的刻蚀 GCIB 包括以下步骤：

由以约 200sccm 到约 3000sccm 的喷嘴气体流率流动的源气体生成气体团簇离子；以及

利用在从约 10kV 到约 50kV 的范围内的加速电势加速所述气体团簇离子。

45. 一种在其表面上包括 GCIB 熔入的帽封结构的铜互连。

46. 如权利要求 45 所述的铜互连，其中所述帽封结构是所述表面上的薄膜。

47. 如权利要求 46 所述的铜互连，其中所述薄膜是导电的。

48. 如权利要求 46 所述的铜互连, 其中所述薄膜是电介质膜。
49. 如权利要求 46 所述的铜互连, 其中所述薄膜由选自由 C、N、O、Si、B、Ge、Ti、F 和 S 构成的组中的一种或多种元素构成。
50. 如权利要求 46 所述的铜互连, 其中所述薄膜由选自由氧化物、碳化物和氮化物构成的组中的至少一种材料构成。
51. 如权利要求 46 所述的铜互连, 其中所述薄膜由选自由  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、SiCN、BN、 $\text{CuF}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CuCO}_3$ 、B、Ti 和硼硅酸盐玻璃构成的组中的材料构成。
52. 如权利要求 45 所述的铜互连, 还包括上覆的电介质扩散阻挡膜。
53. 如权利要求 52 所述的铜互连, 其中所述电介质扩散阻挡膜由选自由  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、SiCN 和 SiC 构成的组中的材料构成。
54. 一种在其表面上包括 GCIB 熔入的薄膜帽封结构的级间电介质层。
55. 如权利要求 54 所述的级间电介质层, 其中所述薄膜由选自由 C、N、O、Si、B、Ge、Ti、F 和 S 构成的组中的一种或多种元素构成。
56. 一种在其表面上包括 GCIB 熔入的薄膜帽封结构的硬掩模层。
57. 如权利要求 56 所述的硬掩模层, 其中所述薄膜由选自由 B 和 Ti 构成的组中的一种或多种元素构成。
58. 如权利要求 54 所述的级间电介质层, 还包括上覆的由选自由  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、SiCN 和 SiC 构成的组中的材料构成的电介质扩散阻挡膜。
59. 如权利要求 56 所述的硬掩模层, 还包括上覆的由选自由  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、SiCN 和 SiC 构成的组中的材料构成的电介质扩散阻挡膜。



## 铜互连布线和形成铜互连布线的方法

### 相关申请的交叉引用

该申请要求 2004 年 11 月 8 日提交的题为“Copper Interconnect Wiring and Method of Forming Thereof”的美国临时申请 No. 60/625,831 的优先权，该申请的内容通过引用结合于此。

### 技术领域

本发明一般地涉及铜互连布线层的表面上的帽封层以及用于通过应用气体团簇离子束（gas-cluster ion-beam, GCIB）处理来形成用于半导体集成电路的互连结构的改进方法。

### 背景技术

半导体按“摩尔法则”不断缩小尺寸而密度更高并且性能更强，已经提供了工业和我们的社会生产力方面的极大进步。然而，这一发展带来的问题是需要越来越小的互连线路中承载越来越高的电流。当这种小电线中的电流密度和温度变得过高时，互连线路可以由于被称为电迁移的现象而失效。发生在高电流密度互连线路中的所谓的“电子风”（electron wind）的效应导致金属原子被从其原始晶格位置扫出，从而导致线路中开路的发生，或者在这些扩散的金属原子聚集的区域处发生挤压短路。铜作为替代铝的布线材料的引入提供了电迁移寿命方面的极大提高，然而，互连布线的不断缩小表明在未来还将需要额外的铜电迁移寿命的提高。

与铝互连不同（铝互连由于铝原子沿晶粒边界的扩散而失效），铜互连电迁移失效模式由沿着表面和界面的扩散控制。具体而言，对于传统的铜布线互连方案，铜线路的顶面一般具有上覆的电介质帽封层，其必须具有良好的扩散阻挡性能以防止铜迁移到周围的电介质中。两种最常用的电介质帽封材料是氮化硅和氮化硅碳，其传统上是利用等离子体增强化学气

相沉积 (PECVD) 技术沉积的。然而, 这些 PECVD 沉积的帽封材料与铜形成有缺陷的界面, 这导致沿铜线路的顶面的铜迁移增强, 并因此导致更高的电迁移失效率。铜线路结构的其他表面一般具有与阻挡层或双层 (一般是金属性的, 例如 TaN/Ta、TaN/Ru 或 Ru) 的界面, 其形成了与铜的强界面以限制铜的扩散, 并因此抑制电迁移效应。我们将这种阻挡层或双层称为“阻挡层”。

已经尝试通过利用选择性沉积的金属帽封铜线路的顶面来改善铜布线的电迁移。事实上, 当顶部的铜界面已经由选择性钨或选择性磷化钴钨 (CoWP) 金属层帽封时, 铜电迁移寿命方面的极大提高已经见诸于报道。然而, 使用选择性金属帽封解决方案的所有方法都可能在相邻的绝缘体表面上沉积一定的金属, 因此导致相邻金属线之间不希望发生的泄漏或短路。本发明使用气体团簇离子束处理来解决许多这些问题。

图 1 示出了常用在铜双镶嵌集成工艺中的现有技术氮化硅帽封的铜互连的布线方案 300 的示意图。其包括第一铜线路层 302、第二铜线路层 304 和连接这两个铜层的铜过孔结构 306。这两个线路层 302 和 304 以及过孔结构 306 的侧壁和底部都衬有阻挡层 312。阻挡层 312 提供了优异的扩散阻挡性能, 这防止了铜扩散到相邻的绝缘体结构中, 并且还提供了与铜的优异的低扩散界面, 这抑制了沿这些界面的电迁移。第一级间 (inter-level) 电介质层 308 和第二级间电介质层 310 提供了铜线路之间的绝缘。第一铜线路层 302 的顶面和第二铜线路层 304 的顶面各自分别覆盖有绝缘阻挡膜 314 和 316, 这种绝缘阻挡膜一般是由氮化硅或氮化硅碳组成的。这些绝缘阻挡膜 314 和 316 传统上利用 PECVD 沉积, 并且其与暴露的铜表面形成的界面在一定程度上是有缺陷的, 并且提供了用于供铜原子迁移的快速扩散路径。在该现有技术布线方案中, 几乎所有的不希望出现的材料移动都是沿着这些界面在铜电迁移期间发生的。在与此类似的传统的双镶嵌铜互连中, 在每个互连级处, 在级间电介质层中形成了沟槽和过孔并且随后沉积了铜以形成互连线路和过孔之后, 接着一般进行利用化学机械抛光 (CMP) 技术执行的平坦化步骤。阻蚀剂被用在 CMP 和 CMP 后刷洗清洁工艺中, 并且这些阻蚀剂和其他污染物必须在帽封层的沉积之前利用

现场清洁从铜表面去除。使用场外清洁工艺将使铜表面易于受到腐蚀和氧化。PECVD 反应器一般不被配置为在绝缘体帽封层沉积之前对铜表面执行有效的现场清洁。尽管未在图 1 中示出，但是布线方案 300 一般形成在包含需要电气互连（以完成集成电路）的有源和/或无源元件的半导体衬底上。

图 2 示出了现有技术的选择性金属帽封的铜互连的布线方案 400。其包括第一铜线路层 402、第二铜线路层 404 和连接这两个铜层的铜过孔结构 406。这两个线路层 402 和 404 以及过孔结构 406 的侧壁和底部都衬有阻挡层 412。阻挡层 412 提供了优异的扩散阻挡性能，这防止了铜扩散到相邻的绝缘体结构中，并且还提供了与铜的优异的低扩散界面，这抑制了沿这些界面的电迁移。第一级间电介质层 408 和第二级间电介质层 410 提供铜线路之间的绝缘。第一铜线路层 402 的顶面和第二铜线路层 404 的顶面各自分别由选择性沉积的金属层 414 和 416 帽封，所述金属层一般由分别利用化学气相沉积（CVD）或无电技术沉积的选择性钨或选择性 CoWP 组成。在该传统的双镶嵌铜互连中，在每个互连级处，在级间电介质层中形成了沟槽和过孔并且随后沉积了铜以形成互连线路和过孔之后，接着进行一般利用化学机械抛光（CMP）技术执行的平坦化步骤。阻蚀剂被用在 CMP 和 CMP 后刷洗清洁工艺中，并且这些阻蚀剂和其他污染物必须在帽封层的沉积之前被从铜表面去除。当铜层的顶部铜界面已经由钨或 CoWP 金属层帽封时，在铜电迁移寿命方面的巨大提高已经见诸于报道。然而，使用选择性金属帽封解决方案的所有方法都有可能例如在相邻的绝缘体表面上沉积了不想要的金属 418，并因此可能导致相邻金属线之间的电泄漏或短路。尽管选择性金属沉积技术提供了非常大的电迁移改善方面的希望，但是它们还未广泛地实现在制造中，这是因为由于不想要的金属的沉积而引起的半导体芯片的产量损失的高概率。尽管未在图 2 中示出，但是布线方案 400 一般形成在包含需要电气互连（以完成集成电路）的有源和/或无源元件的半导体衬底上。使用气体团簇离子束来处理表面是本领域中已知的（例如见 Deguchi 等人的美国专利 5,814,194）。这里使用的术语“气体团簇”是材料的纳米尺度的聚集体，所述材料在标准的温度和压强

条件下是气相的。这种气体团簇一般由几个到数千个分子的聚集体构成，这些分子松散键合以形成气体团簇。气体团簇可以通过电子轰击或其他方式被离子化，从而允许其形成为具有可控能量的定向束。这些离子一般各自承载  $q \cdot e$  的正电荷（其中  $e$  是电子电荷， $q$  是代表气体团簇离子的电荷状态的从 1 到若干数的整数）。非离子化的气体团簇也可以存在于气体团簇离子束内。较大尺度的气体团簇离子通常是最有用的，因为其能够每气体团簇离子承载相当的能量，同时每分子仍只具有适度能量。气体团簇在撞击后分解，其中每个个体分子只承载总气体团簇离子能量的一小部分。因此，大的气体团簇离子的撞击效果是相当可观的，但是局限于非常浅的表面区域。这使得气体团簇离子对于多种表面修饰工艺都是有效的，而不会产生传统的单体离子束处理的较深亚表面损伤特性。用于产生和加速这种 GCIB 的手段在先前引用的参考文件（US 5,814,194）中有所描述。当前可用的气体团簇离子源产生具有宽分布尺度  $N$  的气体团簇离子（其中  $N$  = 每个气体团簇离子中的分子数，在如同氩之类的单原子气体的情况下，单原子气体的原子将被称为分子，并且这种单原子气体的离子化原子将被称为分子离子，或简称为单体离子，这在整篇说明书中都是如此）。许多有用的表面处理效应可以通过利用 GCIB 轰击表面来实现。这些处理效应包括但不一定限于清洁、平滑、刻蚀、掺杂和膜形成或生长。Allen 等人的美国专利 6,537,606 教导了使用 GCIB 来对初始不均匀的薄膜进行修正性刻蚀以提高其空间均匀性的技术。美国 6,537,606 的全部内容通过引用结合于此。

在有能量的气体团簇撞击在固态目标的表面上之后，进入目标表面的团簇原子的渗透一般是非常浅的，这是因为渗透深度受限于每个个体构成原子的低能量，并且主要取决于在气体团簇离子撞击期间发生的瞬时热效应。然后，气体团簇在撞击时离解，于是个别气体原子变得自由以反弹并可能从目标表面逃出。除了由逃出的个别气体原子带走的能量外，在撞击之前有能量的团簇的总能量沉积在目标表面上的撞击区中。目标撞击区的尺寸取决于团簇的能量，但是在撞击团簇的横截面尺寸的量级上，并且很小，例如对于由 1000 个原子构成的团簇而言直径大约 30 埃。由于由团簇

承载的总能量中的大部分沉积到目标上的小撞击区中，因此在撞击点处的目标材料内发生强烈的热瞬态。热瞬态随着能量通过传导到目标中的更深处从撞击区损耗而快速消散。热瞬态的持续时间由目标材料的传导率确定，但是一般小于  $10^{-6}$  秒。

接近气体团簇撞击点处，目标表面的一定体积可能瞬间达到好几百到数千 Kelvin 度的温度。例如，承载 10keV 总能量的气体团簇的撞击已被估计能够在高度搅动的、近似于半球形的整个区域中产生高达约 2000 Kelvin 度的瞬间温度，该区域延伸到表面下约 100 埃的地方。这种高热瞬态有利于工件和气体团簇离子束成份的混合和反应，从而导致电迁移寿命的提高。

在有能量的气体团簇撞击点下方的目标体积内的高温瞬态出现后，受影响的区域快速冷却。某些气体团簇成份在这一过程期间逃离，而其他保持下来并且变为结合在表面中。原始表面材料的一部分也可以通过溅射或相似效应而去除。通常，气体团簇的更具挥发性和惰性的成份更有可能逃离，而挥发性较低和更具化学反应性的成份更有可能结合在表面中。尽管实际的工艺可能复杂的多，但是为了方便起见，将气体团簇撞击点和周围受影响的区域认为是“熔化区”（melt zone），其中气体团簇原子可能短暂地与衬底表面相互作用并混合，并且气体团簇材料或者逃离表面，或者熔入到表面中到达受影响区域的深度。术语“熔入”（infusion）被发明人用来指与“注入”（implantation）相区别的一种工艺，“注入”是一种产生完全不同结果的完全不同的工艺。有能量的气体团簇离子中的稀有气体（例如氦和氙，其是挥发性的并且非反应性的）有很高的概率从受影响区域逃离，而诸如碳、硼、氟、硫、氮、氧、锆和硅之类的材料（其是挥发性较低的和/或更有可能形成化学键的）更有可能留在受影响区域中，从而结合在衬底表面中。

作为示例而非限制，诸如氦和氙之类的稀有惰性气体可以与包含挥发性较低和更具反应性的元素的气体混合以形成混合团簇。这种气体团簇可以利用现有的气体团簇离子束处理设备形成（下文中将描述），这是利用合适的源气体混合物作为用于气体团簇离子束生成的源气体，或者通过将

两种或更多种气体（或气体混合物）馈送到气体团簇离子发生源并允许其在源中进行混合而实现的。在最近的公开中，Borland 等人（“USJ and strained-Si formation using infusion doping and desposition”，Solid State Technology, 2004 年 5 月，53 页）已经表明 GCIB 熔入可以产生多个渐变的（graded）表面层，其从衬底材料平滑地转变到表面上的沉积层。

因此，本发明的一个目的是提供如下方法，所述方法用于在互连结构中帽封铜线路，以减轻对不希望出现的电迁移效应的易受影响性，而无需使用选择性金属沉积帽。

本发明的又一目的是提供用于有效地在互连结构中帽封铜互连，而不会影响相邻电介质材料的绝缘或泄漏性能的方法。

本发明的另一目的是提供如下方法，所述方法用于为具有高工艺产量的电路形成多级铜互连并降低由于电迁移效应造成的易失效性。

本发明的又一目的是提供用于集成电路的改善的帽封铜互连层，其特征在于高工艺产量和低的易电迁移失效性。

## 附图说明

为了更好地理解本发明以及其他和进一步的目标，参考附图和具体实施方式，其中：

图 1 是示出了现有技术的氮化硅帽封铜互连布线方案的示意图；

图 2 是示出了现有技术的选择性金属帽封铜互连布线方案的示意图；

图 3 是示出了现有技术的 GCIB 处理装置的基本元件的示意图；

图 4A、4B、4C、4D 和 4E 是示出了根据本发明第一实施例通过 GCIB 熔入进行的铜互连帽封工艺的示意图；

图 5A、5B、5C、5D、5E、5F、5G、5H、5I、5J、5K 和 5L 是示出了根据本发明第二实施例利用 GCIB 熔入和沉积进行的铜互连帽封工艺的示意图；以及

图 6A、6B、6C、6D、6E、6F 和 6G 是示出了根据本发明第三实施例利用 GCIB 熔入和沉积进行的铜互连帽封工艺的示意图。

## 具体实施方式

图 3 示出了现有技术已知形式的 GCIB 处理装置 100 的典型配置的基本元件的示意图，其可以描述如下：真空容器 102 被划分为三个连通室，源室 104、离子化/加速室 106 和处理室 108。这三个室分别被真空泵系统 146a、146b 和 146c 抽到合适的工作压强。存储在第一气体存储汽缸 111 中的第一可压缩源气体 112（例如，氩或氮或预混气体混合物）在压强下通过第一气体截止阀 115 以及第一气体计量阀 113 和气体馈送管 114，进入停滞室 116。存储在可选的第二气体存储汽缸 230 中的可选第二可压缩源气体 232（例如，二氧化碳、氧气或预混气体混合物）在压强下通过第二气体截止阀 236 和第二气体计量阀 234 进入。当这两个气体源都被使用时，它们在气体馈送管 114 和停滞室 116 中混合。停滞室 116 中的气体或气体混合物通过适当形状的喷嘴 110 被注射到基本的低压真空中。得到超声波气体喷流 118。由喷流膨胀导致的冷却使得气体喷流 118 的一部分冷凝为气体团簇，每个气体团簇由数个到数千个弱键合原子或分子构成。气体漏孔 120 从气体团簇喷流中部分分离还未被冷凝为气体团簇喷流的气体分子，以便最小化下游区域中的压强，在下游区域中较高的压强是有害的（例如，离子化器 122、高压电极 126 和处理室 108）。合适的可压缩源气体 112 包括但不限于氩、氮、二氧化碳、氧以及其他气体和/或气体混合物。

在形成了包含气体团簇的超声波气体喷流 118 后，气体团簇被在离子化器 122 中离子化。离子化器 122 一般是电子撞击离子化器，其从一个或多个白炽灯丝 124 中产生热电子，并加速和引导这些电子，使其与穿过离子化器 122 的气体喷流 118 中的气体团簇碰撞。电子撞击从气体团簇中驱逐出电子，使得气体团簇的一部分变为正离子化。某些气体团簇可能被驱逐出多于一个电子，并且可能变为多离子化。一组适当偏置的高电压电极 126 从离子化器中提取出气体团簇离子，形成束，然后将其加速到期望能量（一般加速电势从数百 V 到数十 kV），并对其聚焦以形成 GCIB 128。灯丝电源 136 提供灯丝电压  $V_f$  以加热离子化器灯丝 124。阳极电源 134 提供阳极电压  $V_A$  以加速从灯丝 124 发射的热电子，以使其照射包含气体团

簇的气体喷流 118 从而产生离子。提取电源 138 提供提取电压  $V_E$  以偏置高电压电极，从而从离子化器 122 的离子化区域中提取出离子并形成 GCIB 128。加速器电源 140 提供加速电压  $V_{Acc}$  以相对于离子化器 122 偏置高电压电极，以便使总 GCIB 加速电势等于  $V_{Acc}$ 。一个或多个透镜电源（例如示为 142 和 144）可以被提供用来利用聚焦电压（例如  $V_{L1}$  和  $V_{L2}$ ）偏置高电压电极，以聚焦 GCIB 128。

工件 152 可以是要由 GCIB 处理处理的半导体晶片或其他工件，其被夹持在工件夹持器 150 上，工件夹持器 150 可以放置在 GCIB 128 的路径中。由于大多数应用期望大工件的处理并且获得空间均匀的结果，因此扫描系统是合乎需要的，以均匀地扫描大面积的 GCIB 128 从而产生空间均匀的结果。

GCIB 128 是静止的，具有 GCIB 轴 129，并且工件 152 通过 GCIB 128 被机械扫描以将 GCIB 128 的效果分布在工件 152 的整个表面上。

X 扫描致动器 202 提供沿 X 扫描运动 208 的方向（进出纸平面）的工件夹持器 150 的线性运动。Y 扫描致动器 204 提供沿 Y 扫描运动 210 的方向的工件夹持器 150 的线性运动，Y 扫描运动 210 一般垂直于 X 扫描运动 208。X 扫描和 Y 扫描运动的组合使由工件夹持器 150 夹持的工件 152 以类光栅扫描运动穿过 GCIB 128 运动，从而导致 GCIB 128 对工件 152 的表面进行均匀（或者以其他方式被编程的）照射，以处理工件 152。工件夹持器 150 以相对于 GCIB 128 的轴的某一角度放置工件 152，以使得 GCIB 128 相对于工件 152 的表面具有某一束入射角 206。该束入射角 206 可以是 90 度或某一其他角度，但是一般是 90 度或接近 90 度。在 Y 扫描期间，工件 152 和工件夹持器 150 从图示位置移动到备用位置“A”，这两个位置分别由标号 152A 和 150A 指示。注意，在这两个位置之间的移动中，工件 152 通过 GCIB 128 被扫描，并且在两个极端位置处，完全移出 GCIB 128 的路径（过扫描）。尽管未在图 3 中明确示出，但是沿（一般）垂直的 X 扫描运动 208 的方向（进出纸平面）执行类似的扫描和过扫描。

束流传感器 218 被放置在 GCIB 128 的路径中工件夹持器 150 的外部，以便在工件夹持器 150 被扫描到 GCIB 128 的路径之外时拦截 GCIB



128 的样本。束流传感器 218 一般是法拉第帽等等，其是封闭的（除了束进入开口以外），并且一般利用电绝缘配件 212 附着到真空容器 102 的壁上。

可以是基于微计算机的控制器的控制器 220 通过电缆 216 连接到 X 扫描致动器 202 和 Y 扫描致动器 204，并且控制 X 扫描致动器 202 和 Y 扫描致动器 204 以便将工件 152 放入/放出 GCIB 128 并相对于 GCIB 128 均匀地扫描工件 152 以实现 GCIB 128 对工件 152 的期望处理。控制器 220 利用导线 214 接收由束流传感器 218 收集的样本束流，从而监视 GCIB 并控制工件 152 所接收的 GCIB 剂量，这是通过在已传输了预定的期望剂量时从 GCIB 128 中移走工件 152 而实现的。

图 4A 是示出了根据本发明第一实施例利用 GCIB 熔入帽封的铜互连的布线方案 500 的示意图（以示例而非限制性方式示出了两个铜线路层互连级）。该示意图示出了衬底 501，衬底 501 支撑第一铜线路层 502、第二铜线路层 504 和连接这两个铜层的铜过孔结构 506，其中的每一个都可以利用传统技术形成。衬底 501 一般是包含需要电气互连的有源和/或无源元件（可能包括较低互连级）的半导体衬底。这两个铜线路层 502 和 504 以及过孔结构 506 的侧壁和底部都衬有 TaN/Ta 或其他传统的阻挡层 512，这种阻挡层可以利用传统技术形成。第一级间电介质层 508 和第二级间电介质层 510 提供铜线路层和其他组件之间的电绝缘，并且可以利用传统技术形成。第一铜线路层 502 的顶面和第一级间电介质层 508 的顶面以及第二铜线路层 504 的顶面和第二级间电介质层 510 的顶面都通过 GCIB 处理被帽封，以形成帽封膜 514、516 和 518。优选地，在每个互连级的顶面执行独立的 GCIB 帽封工艺。在传统的双镶嵌铜互连中，在级间电介质层中形成了沟槽和过孔并且随后沉积了铜以形成互连线路和过孔之后，一般利用化学机械抛光（CMP）技术对暴露的铜和级间电介质层材料表面执行平坦化步骤。蚀蚀剂被用在要在 CMP 技术和 CMP 后刷洗清洁工艺中被抛光的表面上，并且优选地紧接在帽封层形成之前利用现场清洁从铜和电介质表面中（和其他污染物一起）去除（这里所用的“现场”意味着清洁发生在其中执行帽封沉积的相同的减压气氛中，而无需在清洁和帽封步骤之间

返回到大气压强，并且降低了在清洁步骤和帽封步骤之间重新污染清洁后的表面的机会)。PECVD 反应器一般并不被配置为在绝缘体帽封层沉积之前执行有效的铜表面的现场清洁。与 PECVD 系统不同，GCIB 处理系统（例如处理装置 100）很容易并且一般被配置为现场实现顺序的清洁和帽封。在清洁了暴露的铜和级间电介质表面之后（其可以通过如下所述的 GCIB 处理来执行），优选地现场 GCIB 熔入工艺被用于帽封平坦化后的表面（同时帽封铜和暴露的级间电介质）。

图 4B 示出了布线方案 500 的初步阶段 500B。在图示阶段中，一个互连级已形成在衬底 501 上。该互连级包括已经利用传统技术沉积在衬底上的第一级间电介质 508。传统的沟槽和过孔已经形成在第一级间电介质 508 中，并且已经衬有传统的阻挡层 512。铜已经利用传统技术沉积在沟槽和过孔中。该结构的上表面已经利用传统工艺平坦化和清洁。第一铜线路层 502 和第一级间电介质层 508 的上表面具有残留污染物 503。在这一阶段，以及在每个后续互连级的相应阶段（假定多于一个互连级），可以执行 GCIB 清洁工艺。GCIB 清洁包括利用由气体 Ar、N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 或 H<sub>2</sub> 中的任何一种或其混合物的分子组成的 GCIB 团簇离子照射要清洁的表面，并且使用优选地在从约 3kV 到约 50kV 范围内的束加速电势  $V_{Acc}$ ，其中总气体团簇离子剂量在从约  $5 \times 10^{13}$  到约  $5 \times 10^{16}$  离子/cm<sup>2</sup> 的范围内。本领域技术人员将认识到，本发明并不局限于这些示例性气体，而是可以利用从铜表面去除 CMP 后残留物、氧化铜和其他污染物的其他气体或气体混合物。优选地（尽管不是本发明必需的），该 GCIB 清洁工艺是现场清洁工艺。

图 4C 示出了在 GCIB 清洁步骤后的布线方案 500 的阶段 500C。第一铜线路层 502 和第一级间电介质层 508 的上表面已被清洁掉污染物，并且准备用于帽封步骤。在这一阶段以及在每个后续互连级的相应阶段（假定多于一个互连级），执行 GCIB 帽封工艺。GCIB 帽封工艺包括利用由反应性元素构成的 GCIB 照射第一铜线路层 502 和/或第一级间电介质层 508 的上表面，这些反应性元素在熔入到原先暴露的电介质和/或铜表面中时形成了绝缘材料。具有例如由 C、N、O、Si、B 或 Ge 或其混合物构成的气

体团簇离子元素的 GCIB 是合适的，并且可以在铜上形成渐变帽封膜，例如  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiCN}$ 、 $\text{CuCO}_3$  和  $\text{BN}$ 。也可以采用在熔入到铜和/或相邻绝缘体中时形成合适的电介质材料的其他元素和组合。可以采用诸如  $\text{CH}_4$ 、 $\text{SiH}_4$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{B}_2\text{H}_6$ 、 $\text{GeH}_4$  和其混合物之类的源气体。这些气体可以用于以其纯净形式或者通过将其与诸如 Ar 或 Xe 之类的惰性气体混合而形成团簇离子。参考图 3 的 GCIB 处理装置 100，可以使用在从约 3kV 到约 50kV 的范围内的束加速电势  $V_{\text{Acc}}$ ，其中总气体团簇离子剂量在从约  $1 \times 10^{14}$  到约  $1 \times 10^{17}$  离子/ $\text{cm}^2$  的范围内，以实现熔入。

图 4D 示出了在 GCIB 帽封步骤后的布线方案 500 的阶段 500D。在铜表面和/或相邻的级间电介质表面上，GCIB 工艺的撞击能量和热瞬态特性熔入暴露于 GCIB 的铜线路和/或相邻的级间电介质结构的顶面，从而分别形成帽封层 514 和 516。帽封层 514 和 516 可以各自可选地另外包括充当电介质阻挡膜的上层部分。在形成工艺的初始部分期间，混合的铜/GCIB 物质组分的渐变层 514A 被熔入到铜表面中。该混合层提供了任何随后沉积的电介质阻挡膜 514B 和下层铜之间的渐变界面，从而限制了表面处的铜扩散并且提高了电迁移的寿命。尽管随后沉积的电介质阻挡层 514B 可以是利用传统 PECVD 沉积的独立、额外的膜，但是优选地其是作为 GCIB 帽封熔入步骤的继续由 GCIB 沉积的，这仅仅继续帽封 GCIB 照射工艺，该工艺首先创建混合的渐变层，直到工艺从熔入工艺前进到（伴随着剂量增大）纯粹沉积工艺为止，从而在铜的熔入表面处的混合层的上方沉积了电介质材料。该初始的熔入混合渐变层 514A 用作帽封层，并且随着 GCIB 照射的继续，电介质材料随后的额外沉积形成了沉积的电介质阻挡膜 514B。这形成了由于混合渐变层而与铜互连集成的电介质膜，从而得到了包括较长的电迁移寿命在内的改善界面性能。形成帽封层 514 的同一（或另一）帽封 GCIB 优选地在级间电介质 508 上形成帽封层 516。与帽封层 514 相似，帽封层 516 可以是双层（bi-layer）。帽封层 516 最初在表面处形成混合电介质/GCIB 物质组分的混合渐变层，并且随着 GCIB 处理的继续或者额外的独立（例如 PECVD）沉积也可以包括沉积的电介质阻挡膜。例如，如果电介质阻挡膜 514B 不是利用延长的 GCIB 工艺形成的，

或者如果需要特别厚的电介质阻挡膜 514B, 则熔入的帽封层 514A 或帽封层 516 可以可选地利用传统的绝缘层 (例如 PECVD 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiCN}$  或  $\text{SiC}$ ) 掩盖, 以提供电介质阻挡膜用于额外的铜扩散阻挡或过孔刻蚀停止性能。在帽封步骤和任何电介质阻挡膜的形成后, 如果需要可以利用传统技术添加额外的互连级。

图 4E 示出了在 GCIB 帽封 (包括电介质阻挡) 的第一互连级上添加了第二互连级后布线方案 500 的阶段 500E。在这一阶段, 第二互连级已经形成在被帽封的层 514 和 516 上。第二互连级由第二级间电介质 510 构成, 第二级间电介质 510 已经利用传统技术沉积在被帽封的层 514 和 516 上。沟槽和过孔已形成在第二级间电介质 510 中, 沟槽和过孔已经衬有阻挡层 512, 并且铜已经利用传统技术沉积在沟槽和过孔中。该结构的上表面已经利用诸如 CMP 之类的传统工艺被平坦化和清洁。第二铜线路层 504 和第二级间电介质层 510 的上表面被示为具有残留污染物 505。在第二互连级 (如果有的话) 和后续的更高互连级 (如果有的话) 处, 如上所述将 GCIB 清洁和 GCIB 熔入步骤应用于布线方案 500, 从而形成 (例如) 诸如图 4A 中所示的帽封膜 518。相应地, 按需要可以形成两级或多级互连结构。

因此, 所述技术提供了减少的电迁移, 并避免了与选择性金属帽封工艺相关联的不希望出现的副作用。在电介质表面上, 熔入层和电介质保持绝缘, 并且极薄的熔入层对层的总介电常数和层间电容的影响可以忽略。

图 5A 是示出了根据本发明第二实施例利用 GCIB 熔入和沉积帽封的铜互连的布线方案 600 的示意图 (以示例而非限制性方式示出了两个铜线路层互连级)。该示意图示出了衬底 601, 衬底 601 支撑第一铜线路层 602、第二铜线路层 604 和连接这两个铜层的铜过孔结构 606, 其中的每一个都可以利用传统技术形成。衬底 601 一般是包含需要电气互连的有源和/或无源元件 (可能包括更低互连级) 的半导体衬底。这两个铜线路层 602 和 604 以及过孔结构 606 的侧壁和底部都衬有  $\text{TaN}/\text{Ta}$  或其他阻挡层 612, 这种阻挡层可以利用传统技术形成。第一级间电介质层 608 和第二级间电介质层 610 提供铜线路层之间的电绝缘, 并且可以利用传统技术形成。通

常希望级间电介质层 608 和 610 可以是多孔的以增强其介电性能。在这种情况下，级间电介质层可以可选地在其上沉积有硬掩模层，例如分别是第一硬掩模层 609 和第二硬掩模层 611，其各自由诸如  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiC}$  或  $\text{Si}_3\text{N}_4$  之类的材料构成，并且可以利用传统技术沉积。第一铜线路层 602、第一级间电介质层 608 的顶面（或者可选地，如果存在的话，第一硬掩模层 609 的顶面）、第二铜线路层 604 和第二级间电介质层 610 的顶面（或者可选地，如果存在的话，第二硬掩模层 611 的顶面）都通过 GCIB 处理帽封以形成帽封膜 614、616、618 和 620。该第二实施例与第一实施例的区别在于，组成 GCIB 气体团簇离子的元素被选择使得熔入的物质在铜表面（铜帽封膜 614 和 618）上保持导体特性。然而，熔入元素也被选择使得当熔入到每个互连级的电介质区域中的级间电介质和/或电介质硬掩模材料（级间电介质或硬掩模帽封膜 616 和 620）的表面中时该相同的元素形成绝缘膜。增强的电介质扩散阻挡（阻挡膜 622 用于第一互连级，阻挡膜 624 用于第二互连级）优选地是通过 GCIB 沉积形成的，但是也可以利用传统技术形成。这些阻挡膜还增强了 GCIB 熔入帽封的过孔刻蚀停止性能和扩散阻挡性能。

GCIB 熔入工艺优选地应用在每个互连级的顶面处以形成铜和级间电介质帽封。如上所述，在铜互连和级间电介质的 CMP 平坦化后，优选地使用 GCIB 现场清洁。图 5G 图示了其中级间电介质层 608 和 610 在其顶面上没有硬掩模层 609 和 611 的布线方案 600G。下面将对用于构造布线方案 600G 的工艺给出描述。

图 5B 示出了布线方案 600G 的初步阶段 600B。建立在衬底 601 上的互连级由传统沉积的第一级间电介质 608 构成，其中沟槽和过孔已经形成并且衬有阻挡层 612。铜已经利用传统技术沉积在沟槽和过孔中。该结构的上表面已被平坦化和清洁。第一铜线路层 602 和第一级间电介质层 608 的上表面被示为具有残留污染物 603。在这一阶段和每个后续互连级（假定多于一个互连级）的每个阶段的顶面处，如上所述可以执行 GCIB 清洁工艺。优选地（尽管不是本发明必需的），该 GCIB 清洁工艺可以是现场清洁工艺。

图 5C 示出了在布线方案 600G 的构造中 GCIB 清洁步骤后的中间阶段 600C。第一铜线路层 602 和第一级间电介质层 608 的上表面已被清洁掉污染物，并且准备用于帽封步骤。GCIB 帽封工艺现在可应用于这一阶段和每个后续互连级（假定多于一个互连级）的每个阶段的清洁顶面。（优选地现场）GCIB 熔入工艺被用于同时（或者通过独立的帽封 GCIB）帽封平坦化后的表面（铜和/或暴露的级间电介质）。GCIB 帽封工艺包括利用由反应性元素构成的 GCIB 照射第一铜线路层 602 和第一级间电介质层 608 的上表面，这些反应性元素在其熔入到铜表面中时形成导电材料，但是在其熔入到级间电介质表面中时形成电绝缘材料。另外，这些导电元素被选择以便不具有在铜中的高固态可溶性，以避免对其导电率的不利影响。非限制性地，具有包括元素 B 或 Ti 的气体团簇离子的 GCIB 是合适的，并且与适当的电介质硬掩模材料相组合以形成绝缘氧化物、碳化物或氮化物，电介质硬掩模材料例如但不限于  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{SiCN}$ 、 $\text{SiCOH}$  等。包含 B 和 Ti 的某些合适的源气体包括但不限于  $\text{B}_2\text{H}_6$ 、 $\text{TiCl}_4$ 、四二乙氨基钛（TDEAT）和四二甲氨基钛（TDMAT）。这些气体可以按其纯净形式使用，或者与诸如 Ar 或 Xe 之类的惰性气体混合使用。在电介质表面上，这种熔入例如形成了  $\text{TiO}_2$  和硼硅酸盐玻璃的渐变膜，而在铜表面上，其例如形成了硼和钛的渐变膜。参考图 3 的 GCIB 装置 100，可以使用优选地在从约 3kV 到约 50kV 的范围内的束加速电势  $V_{\text{Acc}}$ ，并且总气体团簇离子剂量在从约  $1 \times 10^{14}$  到约  $1 \times 10^{17}$  离子/ $\text{cm}^2$  的范围内。在铜和电介质表面上，GCIB 熔入工艺的撞击能量产生了瞬时高温区，这种瞬时高温区有利于熔入物质与现有电介质或电介质硬掩模层的反应，以形成新的绝缘（在级间电介质或硬掩模上）材料并还在铜线路表面上形成熔入导电膜，从而限制铜界面的扩散并提高电迁移寿命。因此，单个 GCIB 帽封熔入步骤在第一铜线路层 602 上形成了导电帽封膜 614，在第一级间电介质层 608 上形成了电绝缘帽封膜 616。

图 5D 示出了在布线方案 600G 的构造中在 GCIB 帽封步骤后的阶段 600D。GCIB 工艺可以在这一阶段和每个后续互连级的每个阶段的顶面处执行，以形成电介质扩散阻挡膜。电介质扩散阻挡膜 622 优选地由氮化硅

碳构成，但是可以是氮化硅、碳化硅和其他电介质膜。传统上，其可以通过 PECVD 沉积，但是优选地其是通过利用由进行反应以沉积绝缘材料的元素形成的 GCIB 照射要在其上沉积阻挡膜 622 的帽封膜（614 和 616）的表面而沉积的。具有气体团簇离子元素（例如 C、N 和 Si 或其混合物）的 GCIB 是合适的，并且可以在铜上沉积扩散阻挡膜，例如  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、SiCN 和 SiC。诸如 C、N 和 Si 之类的源气体包括但不限于  $\text{CH}_4$ 、 $\text{SiH}_4$ 、 $\text{NH}_3$  和  $\text{N}_2$ 。这些气体可以用于利用纯净气体或通过诸如 Ar 或 Xe 之类的惰性气体相组合来形成用于沉积的气体团簇离子。使用优选地在从约 3kV 到约 50kV 的范围内的束加速电势  $V_{\text{Acc}}$ ，其中总气体团簇离子剂量在从约  $1 \times 10^{14}$  到约  $1 \times 10^{17}$  离子/ $\text{cm}^2$  的范围内。

图 5E 示出了在布线方案 600G 的构造中在阻挡膜 622 的沉积后的阶段 600E。图 5F 示出了在布线方案 600G 的构造中的阶段 600F，其反映了在 GCIB 帽封（包括电介质阻挡膜）的第一互连级和阻挡膜 622 上添加第二互连级。第二互连级由沉积在阻挡膜 622 上的第二级间电介质 610 构成，其中沟槽和过孔已经形成并且衬有阻挡层 612。铜已经利用传统技术沉积在沟槽和过孔中。该结构的上表面已经利用传统工艺被平坦化和清洁。第二铜线路层 604 和第二级间电介质层 610 的上表面被示为具有残留污染物 626。在第二互连级和后续更高互连级（如果有的话）的顶面处，可以如上所述应用 GCIB 清洁以及 GCIB 熔入和 GCIBGCIB 沉积步骤，以构造布线方案 600G。这些处理步骤形成了帽封膜 618、620 和阻挡膜 624。相应地，按需要可以形成图 5G 的两互连级结构或多级互连结构。

图 5H 示出了在构造如图 5A 完整所示的布线方案 600（具有硬掩模层 609 和 611）的过程中的初步阶段 600H。建立在衬底 601 上的第一互连级由利用传统技术沉积在衬底上的第一级间电介质 608 构成。利用传统技术形成的硬掩模层 609 覆盖了第一级间电介质 608 的顶面。沟槽和过孔已经形成在第一级间电介质 608 中，并且衬有阻挡层 612，并且铜已经沉积在沟槽和过孔中。该结构的上表面已经利用传统的清洁工艺被平坦化和清洁。第一铜线路层 602 和硬掩模层 609 的上表面被示为具有残留污染物 605。在这一阶段和每个后续互连级的相应阶段的顶面处，如上所述优选

地执行 GCIB 清洁工艺。优选地（尽管不是本发明必需的），该 GCIB 清洁工艺是现场清洁工艺。

图 5I 示出了在构造（图 5A 的）布线方案 600 的过程中在 GCIB 清洁步骤后的阶段 600I。第一铜线路层 602 和硬掩模层 609 的上表面已被清洁掉污染物，并且准备用于帽封步骤。在这一阶段和每个后续互连级的相应阶段的顶面处，如上所述可以执行 GCIB 帽封工艺以形成帽封层 614 和 616。在该实施例中，帽封层 616 形成在硬掩模层 609 上，而不是直接形成在第一级间电介质层 608 上。

图 5J 示出了在构造布线方案 600 的过程中在形成帽封层 614 和 616 的步骤后的阶段 600J。如上所述，GCIB 工艺可以应用于这一阶段和每个后续互连级的每个相应阶段的顶面处，以在帽封层 614 和 616 上形成电介质扩散阻挡膜 622。

图 5K 示出了在构造布线方案 600 的过程中在阻挡膜 622 的沉积后的阶段 600K。

图 5L 示出了在构造布线方案 600 的过程中在 GCIB 帽封（包括电介质阻挡膜）的第一互连级上添加了第二互连级后的阶段 600L。在这一阶段，第二互连级已形成在阻挡膜 622 上。第二互连级由已经利用传统技术沉积在阻挡膜 622 上的第二级间电介质 610 构成。利用传统技术形成的硬掩模层 611 覆盖了第二级间电介质 610 的顶面。传统的沟槽和过孔已经形成在第二级间电介质 610 中，这些沟槽和过孔衬有传统的阻挡层 612，并且铜已经利用传统技术沉积在沟槽和过孔中。该结构的上表面已经利用传统工艺被平坦化和清洁。第二铜线路层 604 和硬掩模层 611 的上表面被示为具有残留污染物 613。在第二互连级（如果有的话）以及在后续的更高互连级（如果有的话），如上所述将 GCIB 清洁以及 GCIB 熔入和 GCIB 沉积步骤用于布线方案 600，从而形成（例如）帽封膜 618 和 620 并形成阻挡膜 624。相应地，按需要可以形成图 5A 的两互连级结构或多级互连结构。

因此，所公开的技术降低了电迁移，并避免了与选择性金属帽封工艺相关联的不希望出现的副作用。在电介质表面上，电介质在帽封后保持绝



缘，并且极薄的熔入层对于介电常数的影响可以忽略。

图 6A 是根据本发明第三实施例利用 GCIB 熔入帽封的铜互连的布线方案 700 的示意图（以示例而非限制性方式示出了两个铜线路层互连级）。该示意图示出了衬底 701，衬底 701 支撑第一铜线路层 702、第二铜线路层 704 和连接这两个铜层的铜过孔结构 706，其中的每一个都可以利用传统技术形成。衬底 701 一般是包含需要电气互连的有源和/或无源元件（可能包括更低互连级）的半导体衬底。这两个铜线路层 702 和 704 以及过孔结构 706 的侧壁和底部都衬有阻挡层 712，阻挡层 712 可以利用传统技术形成。第一级间电介质层 708 和第二级间电介质层 710 提供铜线路之间的电绝缘，并且可以利用传统技术形成。第一级间电介质层 708 具有上表面 709，第二级间电介质层 710 具有上表面 710。如下面更详细地说明的，在每个铜线路互连级，按照传统方式沉积的阻挡层 712 最初覆盖了级间电介质层 708 和 710 的上表面 709 和 711。在本发明的该实施例中，下文中将描述的 GCIB 处理从上表面 709 和 711 中去除了阻挡层 712 的材料，因此，其并不出现在图 6A 中所示的完整结构的表面上。第一铜线路层 702 的顶面和第二铜线路层 704 的顶面通过 GCIB 处理帽封以形成熔入的帽封膜 713 和 715。熔入的铜帽封膜 713 和 715 以及相邻的级间电介质层 708 和 710 可以额外地分别利用电介质阻挡膜 714 和 716 帽封，以提供改善的铜扩散性能和过孔刻蚀停止性能。电介质阻挡膜 714 和 716 优选地是氮化硅碳，但是也可以是氮化硅或碳化硅或其他合适的电介质，并且可以利用 PECVD 通过传统方式沉积，但是优选地通过 GCIB 沉积施加。

图 6B 示出了在构造布线方案 700 的过程中的初步阶段 700B。在图示阶段中，一个互连级已经形成在衬底 701 上。该互连级由已沉积在衬底上的第一级间电介质 708 构成。沟槽和过孔已经形成在第一级间电介质 708 中，并且衬有阻挡层 712。铜已经沉积在沟槽和过孔中。阻挡层 712 最初覆盖了级间电介质层 708 的上表面 709。铜过载（overburden）已经通过传统 CMP 去除，从而停止在阻挡层 712 的材料上。另外，利用传统的 CMP 工艺条件（被选择为优选地以比阻挡层材料高得多的速率去除铜），例如利用相比于阻挡材料选择性去除铜的高选择性浆料，铜略微凹陷低于阻挡

层 712 的顶面，如图所示。该表面已经利用传统工艺清洁。第一铜线路层 702 和阻挡层 712 的上表面被示为具有残留污染物 703。在这一阶段和每个后续互连级的每个阶段的顶面处可以应用如上所述的 GCIB 清洁工艺。

图 6C 示出了构造布线方案 700 的过程中在 GCIB 清洁步骤后的阶段 700C。第一铜线路层 702 和阻挡层 712 的上表面已被清洁掉污染物，并且准备用于帽封步骤。现在可以应用 GCIB 帽封工艺。（优选地现场）GCIB 刻蚀和熔入帽封工艺被用于同时帽封第一铜线路层 702 的表面和刻蚀掉阻挡层 712，阻挡层 712 上覆于上表面 709 上。GCIB 刻蚀和帽封工艺包括利用由反应性元素构成的 GCIB 照射第一铜线路层 702 和第一级间电介质层 708 的上表面，反应性元素在熔入到铜表面中时形成帽封材料，但是刻蚀阻挡层 712 的材料。GCIB 照射刻蚀掉上表面 709 上暴露的阻挡层 712 的材料同时将帽封物质熔入到第一铜线路层 702 中，形成了帽封膜 713。包含元素氟和/或硫在内的源气体（包括但不限于  $\text{SF}_6$ 、 $\text{CF}_4$ 、 $\text{C}_4\text{F}_8$  或  $\text{NF}_3$ ）被用于形成 GCIB。这些气体可以用于利用纯净气体或者通过与  $\text{N}_2$  或与诸如 Ar 或 Xe 之类的惰性气体相混合来形成气体团簇离子以进行熔入。这种熔入形成了铜帽封膜，例如  $\text{CuF}_2$ 。使用优选地在从约 10kV 到约 50kV 的范围内的束加速电势  $V_{\text{Acc}}$ ，并且可以使用在从约 200sccm 到约 3000sccm 的范围内的喷嘴气体流。例如，用于刻蚀阻挡层材料同时形成铜帽封膜的优选工艺使用流率为 700sccm 的  $\text{N}_2$  中 10%  $\text{NF}_3$  的源气体混合物。GCIB 刻蚀和熔入工艺一直进行，直到所有的阻挡层材料都被去除为止，这导致第一级间电介质层 708 的相对未改变的上表面 709，还得到已经熔入有帽封膜 713 的铜表面。由于在大部分工艺期间上表面 709 被阻挡层 712 的材料与 GCIB 屏蔽，因此对上表面 709 的影响很小。

图 6D 示出了在构造布线方案 700 的过程中在 GCIB 刻蚀和帽封步骤后的阶段 700D。第一铜线路层 702 的上表面已经被帽封层 713 帽封，并且阻挡层 712 已被刻蚀掉，从而暴露了第一级间电介质层 708 的上表面 709。该结构准备用于形成电介质阻挡膜。现在可以执行 GCIB 工艺以便利用与如上所述用于沉积阻挡膜 622 相同的方法在帽封层 713 和第一级间电介质层 708 的上表面 709 上形成电介质扩散阻挡膜 714。

图 6E 示出了在构造布线方案 700 的过程中在形成电介质扩散阻挡膜 714 后的阶段 700E。

图 6F 示出了在构造布线方案 700 的过程中在 GCIB 帽封（包括电介质阻挡膜）的第一互连级上添加第二互连级后的阶段 700F。在这一阶段，第二互连级已经形成在阻挡膜 714 上。第二互连级由已沉积在阻挡膜 714 上的第二级间电介质 710 构成。沟槽和过孔已经形成在第二级间电介质 710 中，并且衬有阻挡层 712。铜已经利用传统技术沉积在沟槽和过孔中。阻挡层 712 最初覆盖了级间电介质层 710 的上表面。铜过载已经通过传统 CMP 去除，从而停止在阻挡层 712 的材料上。另外，利用传统的 CMP 工艺条件（被选择为优选地以比阻挡层材料高得多的速率去除铜），例如利用相比于阻挡材料选择性去除铜的高选择性浆料，铜略微凹陷低于阻挡层 712 的顶面，如图所示。该表面已经利用传统工艺清洁。第二铜线路层 704 和阻挡层 712 的上表面被示为具有残留污染物 717。在第二互连级（如果有的话）和后续的更高互连级（如果有的话），如以上针对布线方案 700 中的第一互连级所述，应用 GCIB 清洁以及 GCIB（刻蚀和熔入帽封）和 GCIB 沉积步骤，从而形成（例如）帽封膜 715 和阻挡膜 716。相应地，按需要可以构造图 6A 的两互连级结构或多级互连结构。

在上述布线方案 700 中的 CMP 铜过载去除后，如果暴露的阻挡层材料具有不希望出现的空间不均匀的厚度，则可选地（但是优选地）以补偿性方式使 GCIB 刻蚀空间不均匀。通过首先利用传统的金属膜制图仪（例如，Rudolph Technologies METAPULSE<sup>®</sup>-II 金属膜测量系统，可以从 USA, NJ07836 Flanders, One Rudolph Road 的 Rudolph Technologies Inc. 购得）对工件晶片的整个表面上的阻挡层厚度制图，则可以如上所述使得阻挡层刻蚀成为补偿性刻蚀，这导致在阻挡层材料较厚处产生较大的刻蚀，而在阻挡层材料较薄处产生较小的刻蚀，从而使得由于阻挡层材料的初始厚度而本该被过刻蚀的区域中的下层级间电介质的去除最小化。这种空间补偿性刻蚀是利用所测得的阻挡层厚度图与在 Allen 等人的美国专利 No. 6,537,606（'606 专利）中教导的技术相结合而实现的，该专利的内容通过引用结合于此。气体团簇离子束处理设备，例如配备有根据在'606 专利中

公开的技术根据测量图工作的自动补偿性刻蚀能力的 Epion Corporation nFusion™ GCIB 处理系统 (Epion Corporation, Billerica, MA), 可以购得。

在本发明的该实施例中, 优选地如上所述, 阻挡层刻蚀和铜帽封都是在一个步骤中利用 GCIB 处理执行的, 以同时执行这两者。还可以 (在某些情形中可能有用) 将阻挡层刻蚀和铜帽封处理作为分离的 GCIB 处理步骤利用对于每一步有不同特性的 GCIB 加以执行。在这种情况下, 在达到图 6C 中所示的阶段时, 最初位于级间电介质层 708 的上表面 709 上的阻挡层材料在 GCIB 帽封步骤之前通过 GCIB 刻蚀工艺去除。在 GCIB 刻蚀步骤后, 该结构表现为图 6G 中所示, 并且准备用于铜线路层和级间电介质层帽封, 其是利用前文中在本发明的各种实施例中描述的 GCIB 帽封工艺执行的。在每个互连级, 优选的刻蚀步骤是利用 GCIB 团簇离子照射要清洁的表面, GCIB 团簇离子是由包含元素氟的一种或多种源气体形成的, 这些气体包括但不限于 SF<sub>6</sub>、CF<sub>4</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 或 NF<sub>3</sub>。这些气体可以用于利用纯净气体或通过 N<sub>2</sub> 或与诸如 Ar 或 Xe 之类的惰性气体相混合来形成气体团簇离子, 以进行刻蚀。使用优选地在从约 10kV 到约 50kV 的范围内的束加速电势 V<sub>Acc</sub>, 并且可以使用在从约 200sccm 到约 3000sccm 的范围内的喷嘴气体流。例如, 用于刻蚀阻挡层材料的优选工艺使用流率为 700sccm 的 N<sub>2</sub> 中 10% NF<sub>3</sub> 的源气体混合物。在需要时, GCIB 刻蚀步骤可以是前文中所述的补偿性刻蚀步骤, 以补偿阻挡层材料厚度的初始空间不均匀性。

尽管已经参考各种实施例描述了本发明, 但是应当认识到, 本发明也能够具有在本发明精神内的广泛的多种进一步和其他的实施例。例如, 本领域技术人员将很清楚, 本发明并不限于双镶嵌集成方案, 而是可以同样地适用于其他铜互连方案。另外, 尽管本发明是针对包括各种化合物 (例如 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>、SiC、SiCN、BN、CuF<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、CuCO<sub>3</sub>、B、Ti、氮化硅、碳化硅、氮化硅碳、氮化硼、氟化铜、二氧化钛、碳酸铜、硼、钛和硼硅酸盐玻璃) 的熔入和沉积的膜或层描述的, 但是本领域技术人员将会理解, 在实施本发明时形成的许多膜和层是渐变的, 并且即使在最纯净的形式, 它

---

们也不具有化学分子式或名称暗示的精确化学当量，而是具有近似的化学当量，并且可以额外包括氢和/或其他杂质，这对于用在相似应用中的膜来说是正常的。

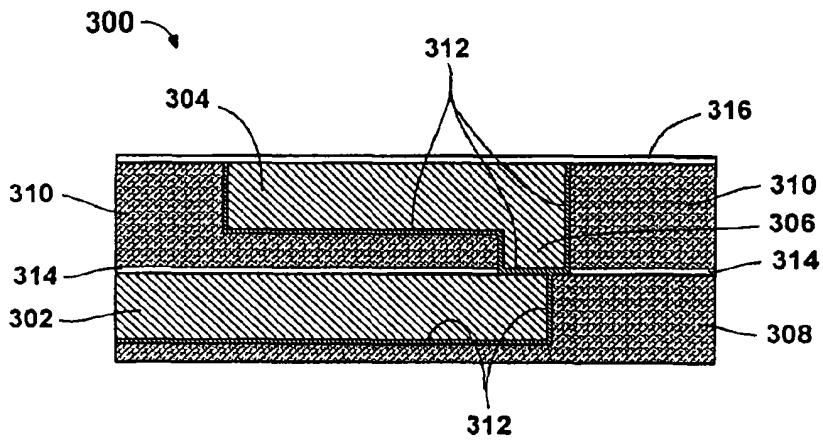


图1  
(现有技术)

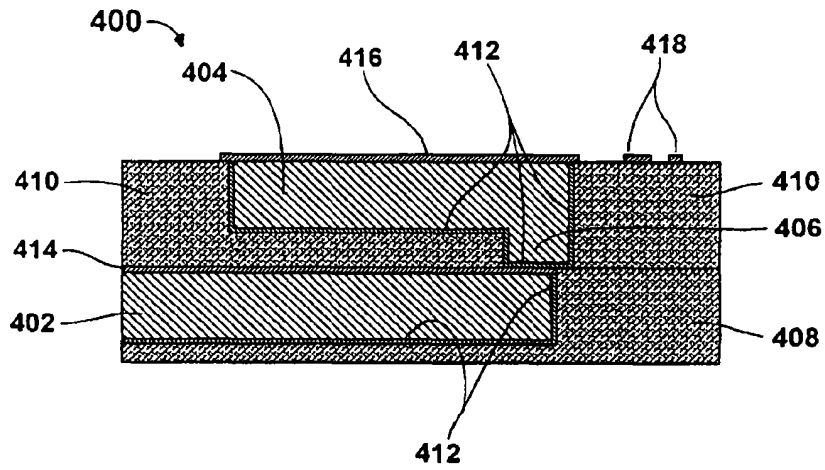


图2  
(现有技术)

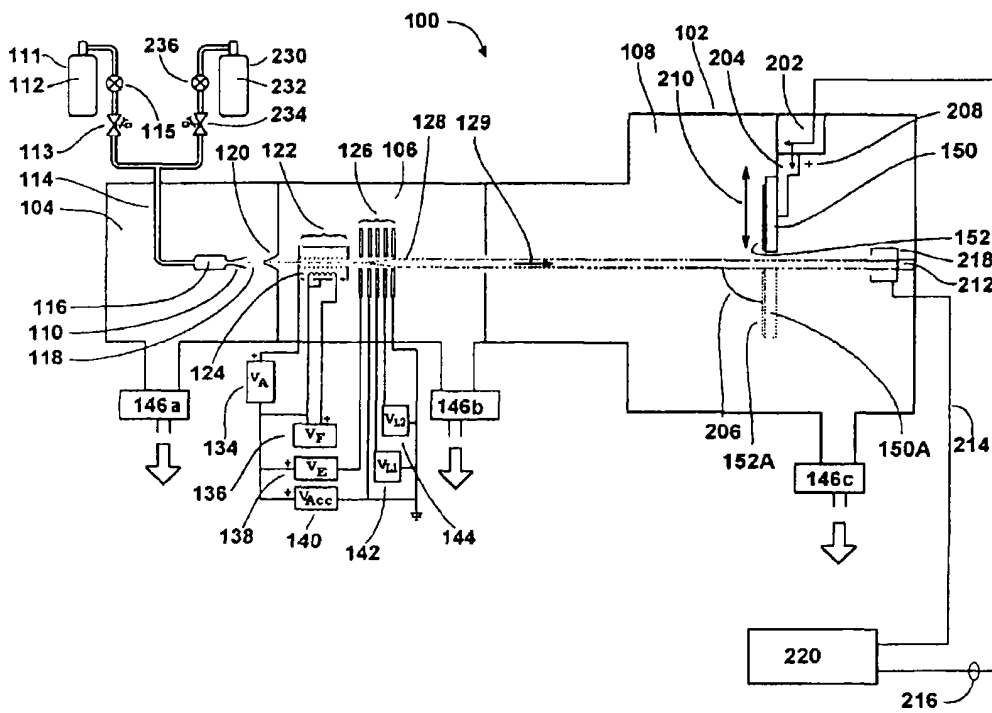


图3  
(现有技术)

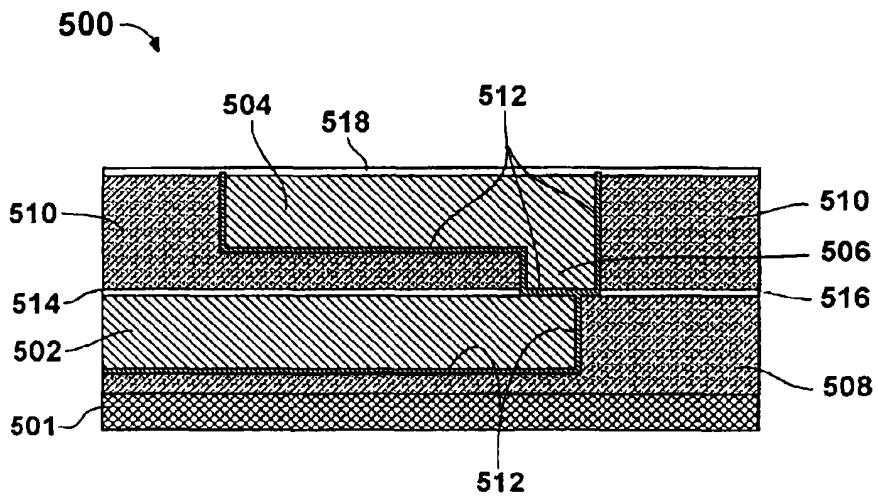


图4A

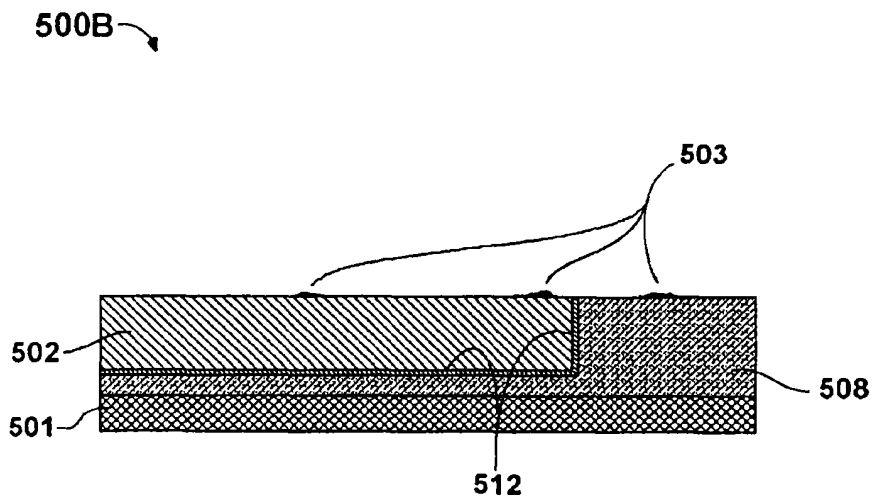


图4B



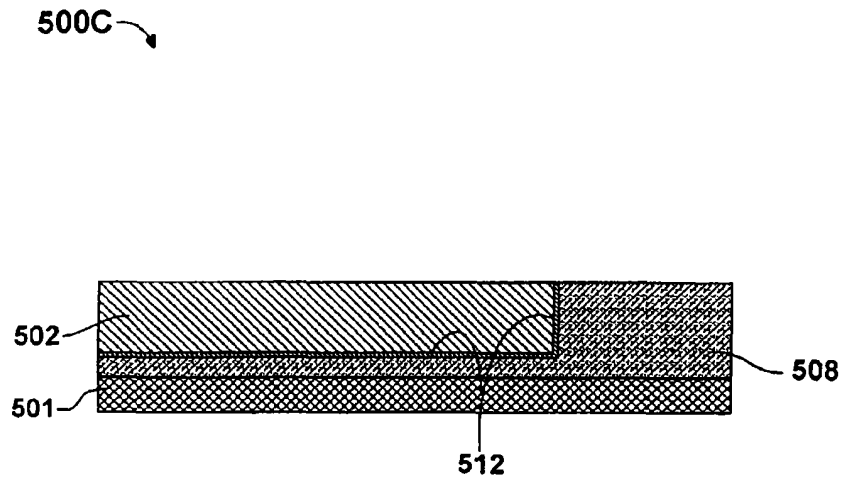


图4C

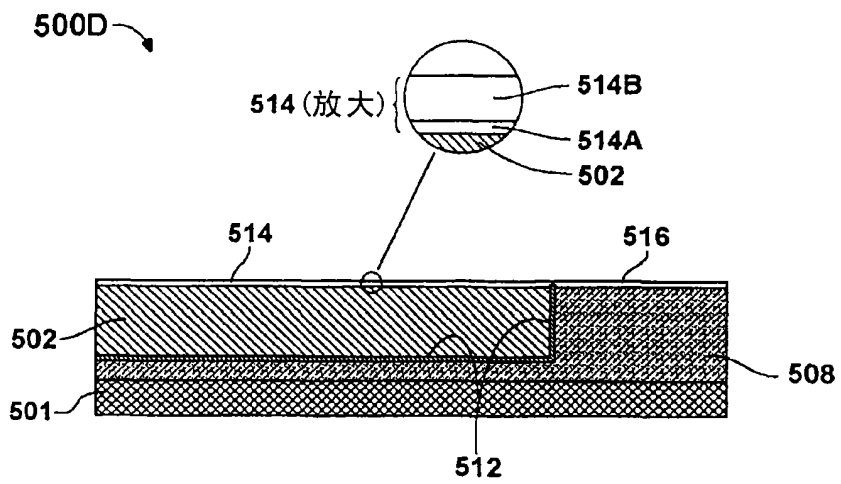


图4D

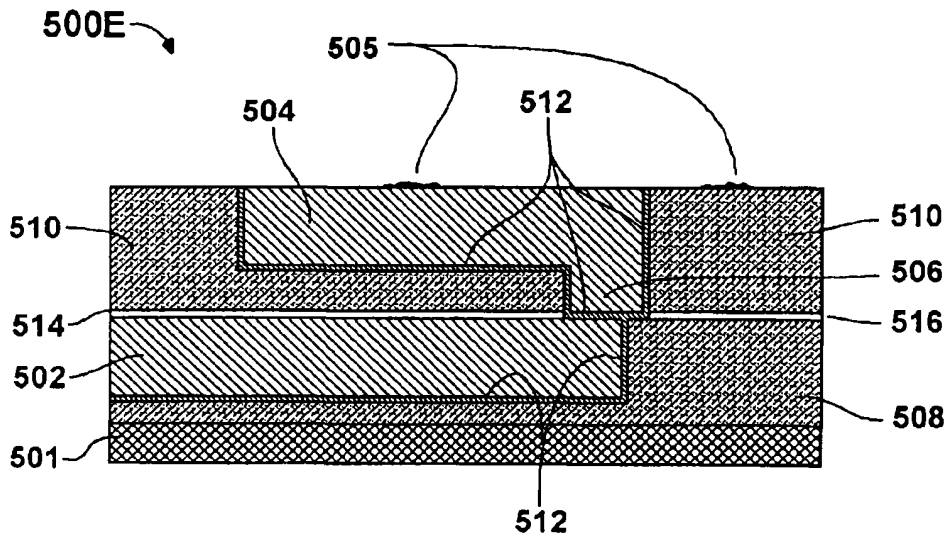


图4E

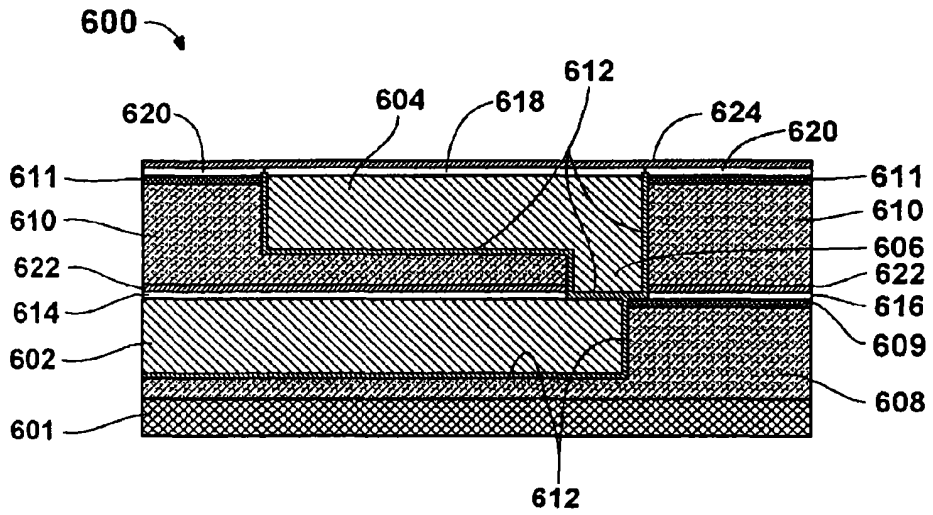


图5A

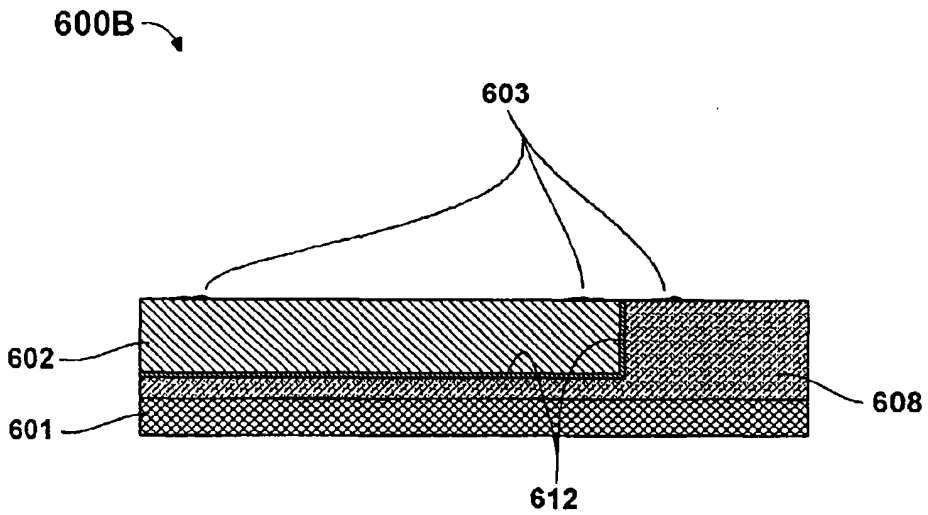


图5B

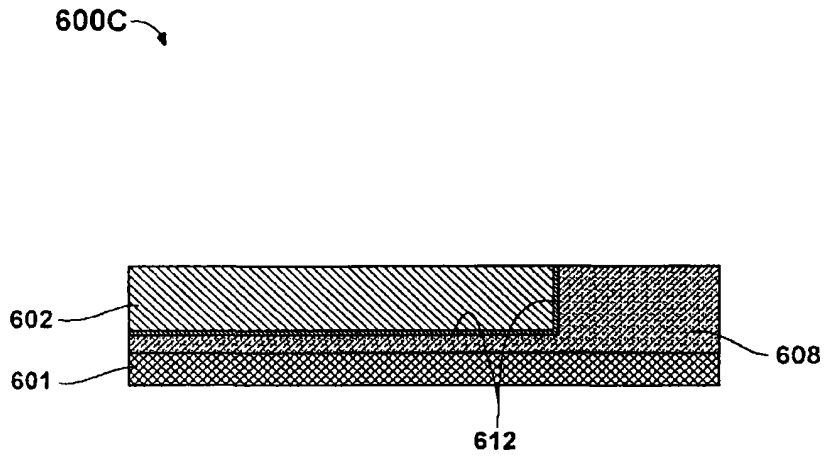


图5C

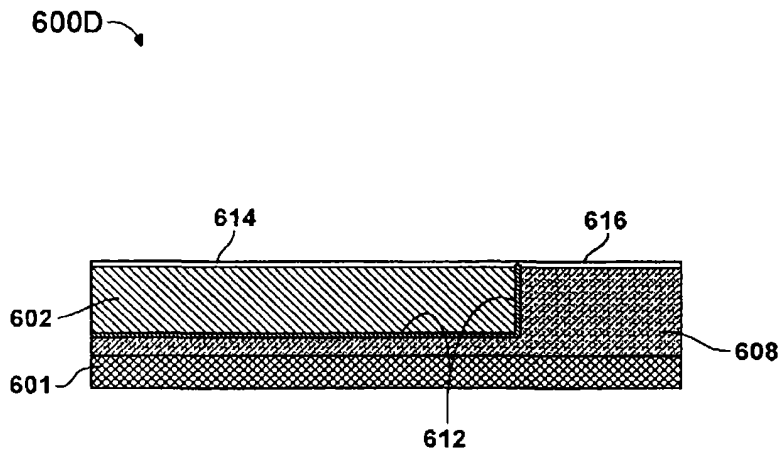


图5D

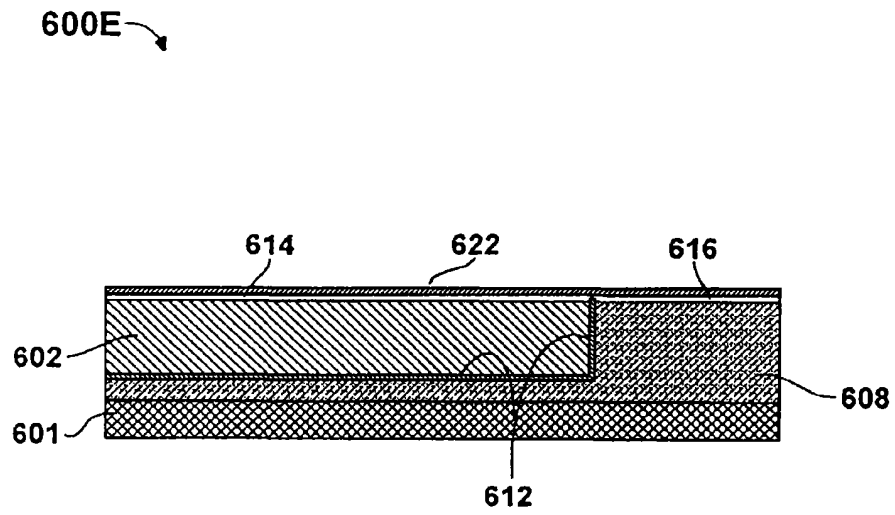


图5E

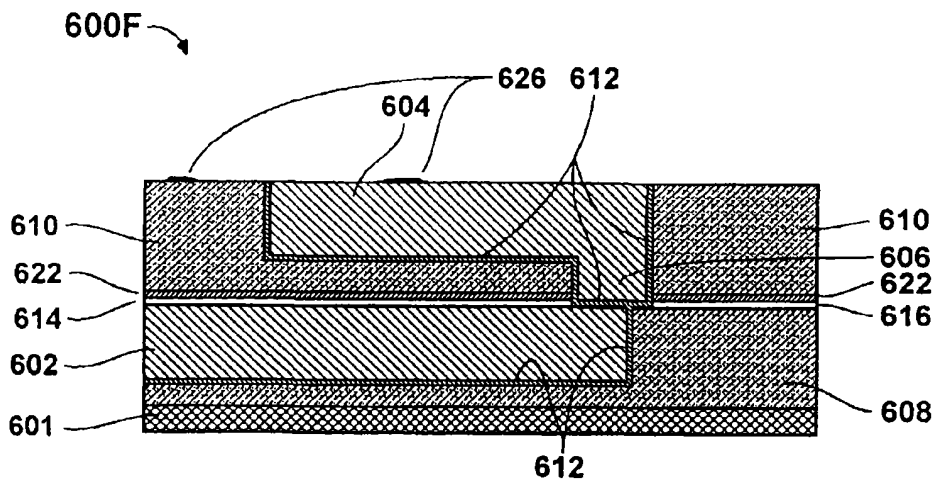


图5F

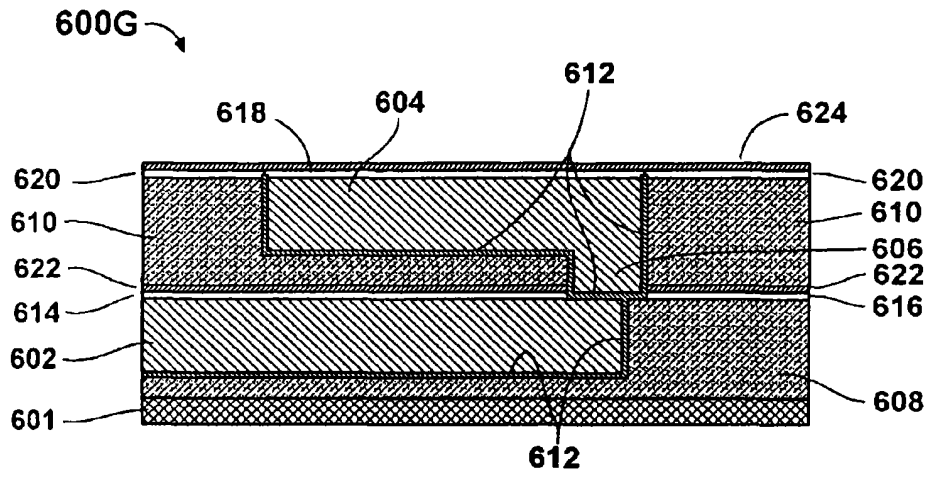


图5G

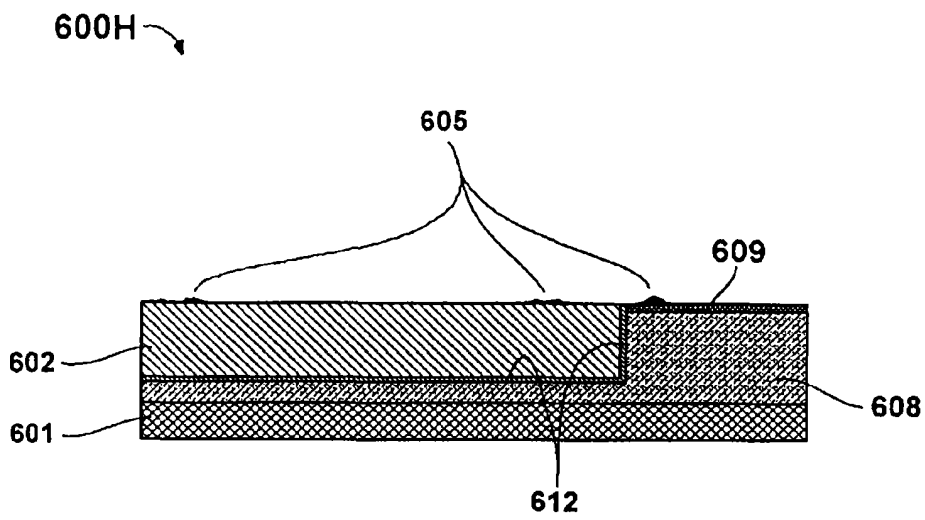


图5H

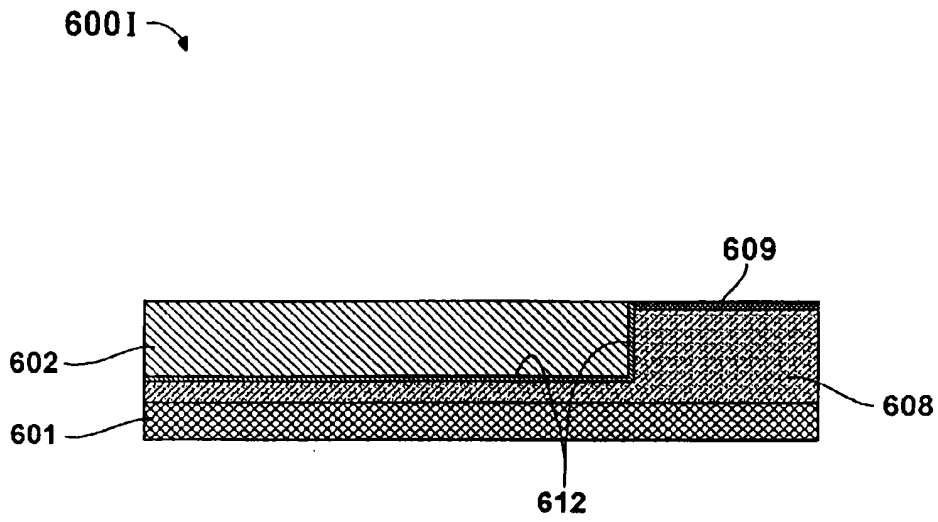


图5 I

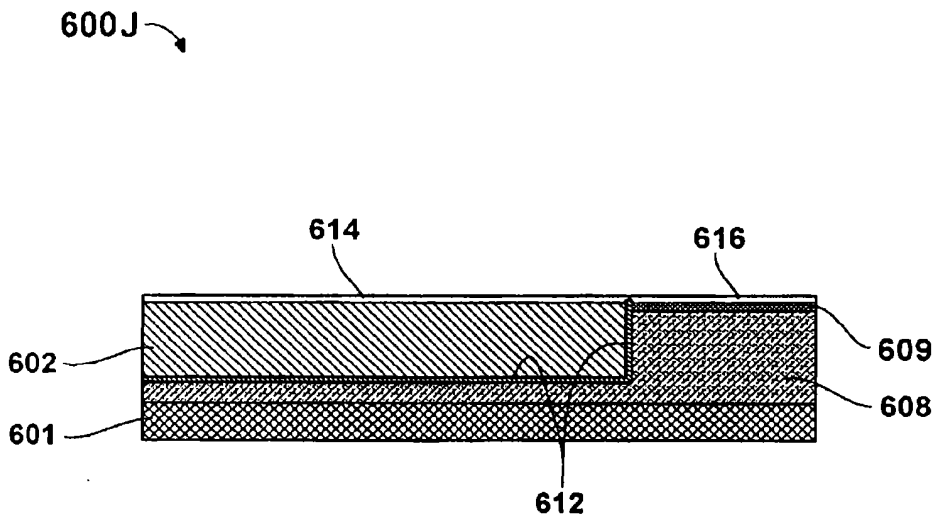


图5 J

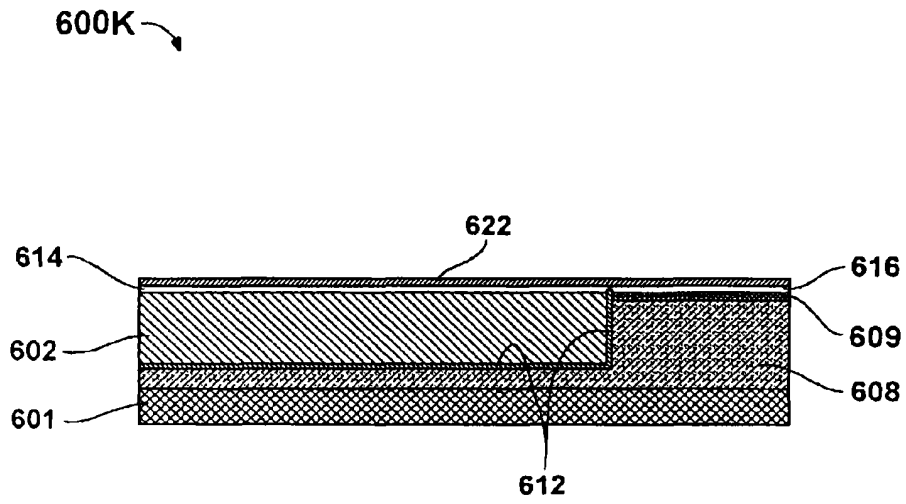


图5K

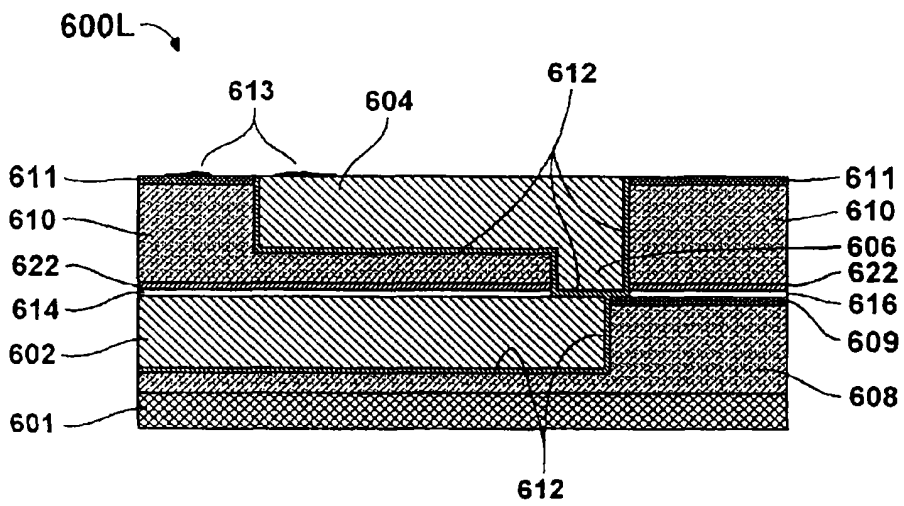


图5L



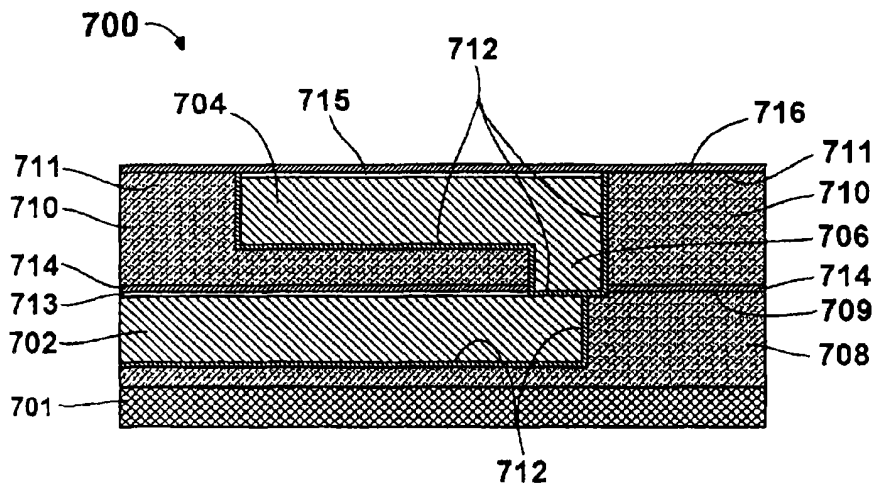


图6A

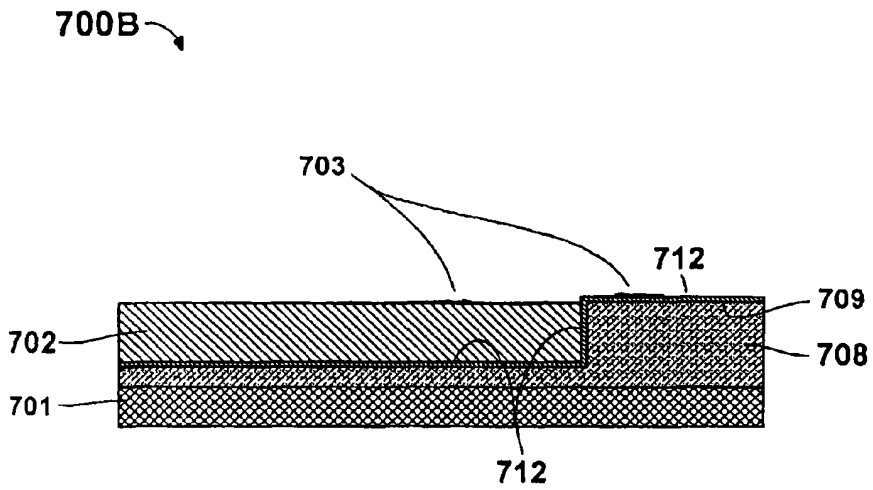


图6B

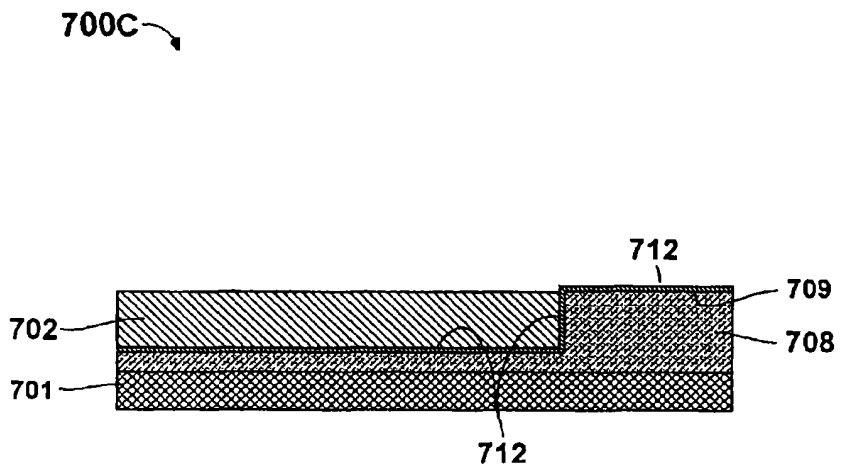


图6C

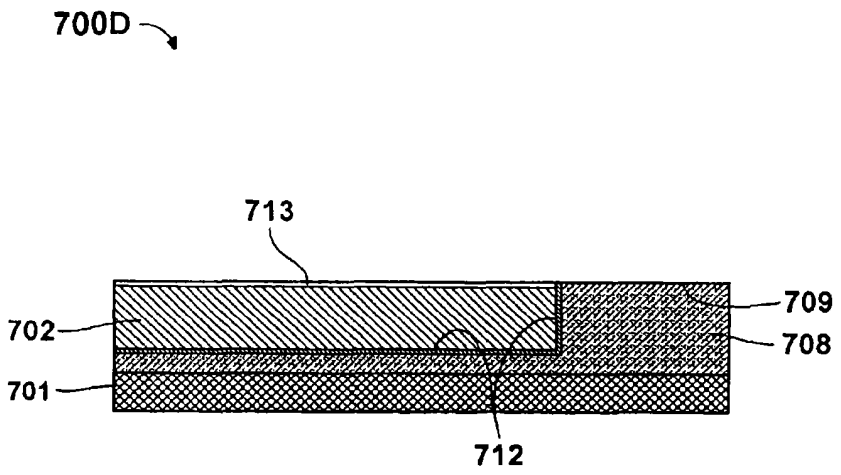


图6D

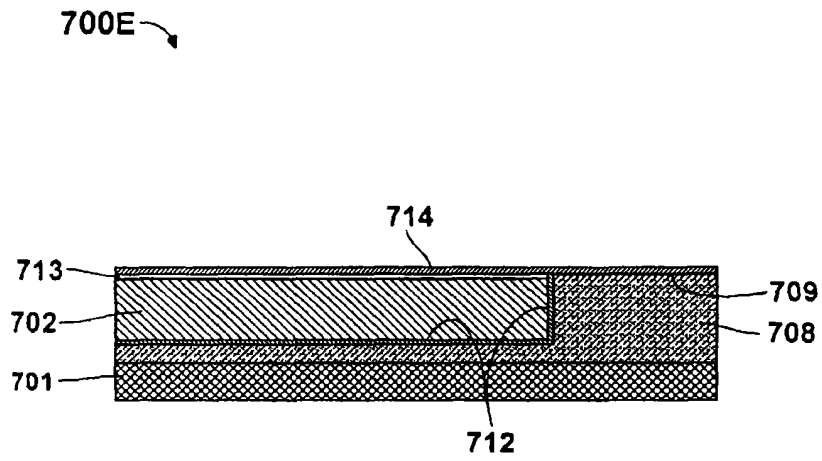


图6E

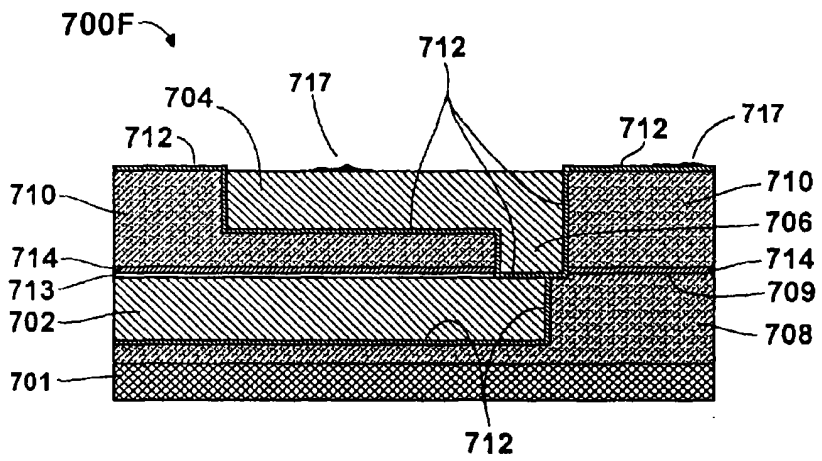


图6F

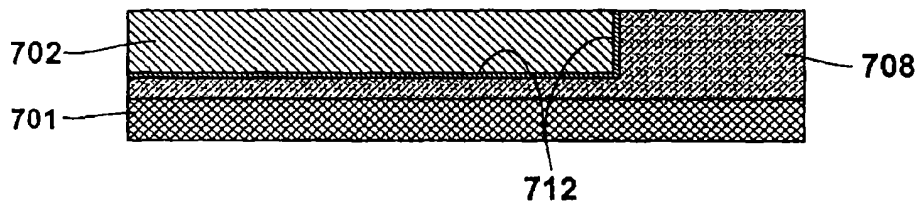


图6G