

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
C23C 14/04 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200580016941.3

[43] 公开日 2007 年 5 月 2 日

[11] 公开号 CN 1957104A

[22] 申请日 2005.5.12

[21] 申请号 200580016941.3

[30] 优先权

[32] 2004.5.26 [33] US [31] 10/854,607

[86] 国际申请 PCT/US2005/016628 2005.5.12

[87] 国际公布 WO2005/118905 英 2005.12.15

[85] 进入国家阶段日期 2006.11.27

[71] 申请人 东京毅力科创株式会社

地址 日本东京都

[72] 发明人 乔则夫·布卡

[74] 专利代理机构 北京东方亿思知识产权代理有限公司
代理人 李 剑

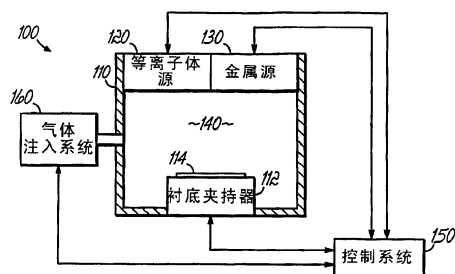
权利要求书 6 页 说明书 21 页 附图 14 页

[54] 发明名称

等离子体处理的方法和装置

[57] 摘要

描述了一种沉积系统(100)及其操作方法,该沉积系统和方法用于利用高密度等离子体在大高宽比特征结构中沉积保形金属或其他具有类似响应性的涂覆材料膜。沉积系统包括分别用于形成等离子体和将金属蒸气引入到沉积系统(100)的等离子体源(120)和分布式金属源(130)。沉积系统被配置为形成具有某一等离子体密度的等离子体并生成具有某一金属密度的金属蒸气,其中衬底附近的金属密度对等离子体密度的比值小于或等于1。该比值应当至少存在于距离衬底(114)的表面为大约20%的衬底直径的距离内。希望获得在所述衬底的整个表面基本具有 $\pm 25\%$ 的均匀性的比值。该比值对于超过 10^{12} cm^{-3} 的等离子体密度尤其有效,并且对于在具有纳米量级特征结构的衬底上沉积膜的应用尤其有效,其中最大膜厚小于特征结构宽度的一半,例如为特征结构宽度的20%。



1. 一种用于在衬底上的大高宽比特征结构中形成薄膜的沉积系统，包括：

5 处理室；

耦合到所述处理室并且被配置为支撑所述衬底的衬底夹持器；

耦合到所述处理室并且被配置为在所述处理室内形成等离子体的等离子体源；以及

耦合到所述处理室并且被配置为将金属引入到所述处理室的金属源，

10 其中所述等离子体源和所述金属源被配置为在所述衬底上方产生小于1的金属密度和等离子体密度之间的比值。

2. 如权利要求1所述的沉积系统，还包括：

耦合到所述处理室并且被配置为引入惰性气体的气体注入系统。

3. 如权利要求2所述的沉积系统，其中所述惰性气体包括稀有气体。

15 4. 如权利要求1所述的沉积系统，其中所述等离子体密度由电子密度或离子密度表征。

5. 如权利要求1所述的沉积系统，其中所述比值在所述衬底的整个所述表面上是基本均匀的。

20 6. 如权利要求1所述的沉积系统，其中所述比值作为时间的函数变化。

7. 如权利要求1所述的沉积系统，其中所述衬底上方的所述等离子体密度的空间分布由 $f(x,y)$ 表示，所述金属密度的空间分布由 $g(x,y)$ 表示，并且 x 和 y 表示与所述衬底的所述表面平行的两维直线坐标系统，其中所述函数 $g(x,y)$ 是与所述函数 $f(x,y)$ 基本相似的函数。

25 8. 如权利要求1所述的沉积系统，其中所述等离子体源包括一个或多个等离子体生成元件。

9. 如权利要求8所述的沉积系统，其中所述一个或多个等离子体生成元件选自由以下元件构成的组合：电容耦合等离子体生成元件、电感耦合等离子体生成元件、螺旋波等离子体生成元件、电子回旋共振等离子体生

成元件和表面波等离子体生成元件。

10. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述等离子体源包括电极或螺旋线圈中的至少一种或这两者。

11. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述等离子体源被配置为产生
5 高密度等离子体。

12. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述等离子体源被配置为产生超过 10^{12} cm^{-3} 的等离子体密度。

13. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述等离子体源包括第一等
10 离子体生成元件和第二等离子体生成元件，其中所述第一生成元件和所述
第二生成元件耦合到所述处理室以执行调节或控制所述衬底上方的所述等
离子体密度的空间分布中的至少一种操作。

14. 如权利要求 13 所述的沉积系统，其中所述第一等离子体生成元件
耦合到所述处理室的下部部分的外围，并且所述第二等离子体生成元件耦
合到所述处理室的上部部分的外围。

15 15. 如权利要求 13 所述的沉积系统，其中所述第一等离子体生成元件
耦合到所述处理室的下部部分的外围，并且所述第二等离子体生成元件耦
合到所述处理室的上表面。

16. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述金属源包括被配置为执
行调节或控制所述衬底上方的所述金属密度的空间分布中的至少一种操作
20 的分布式金属源。

17. 如权利要求 16 所述的沉积系统，其中所述分布式金属源包括围绕
所述处理室的外围布置的一个或多个金属标靶。

18. 如权利要求 16 所述的沉积系统，其中所述一个或多个金属标靶耦
合到直流（DC）电源。

25 19. 如权利要求 16 所述的沉积系统，其中所述一个或多个金属标靶包
括耦合到电源的多个标靶，所述电源被配置为交替地、顺序地给所述多个
标靶中的每一个加电。

20. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述金属源包括耦合到直流
（DC）电源的金属标靶。

21. 如权利要求 1 所述的沉积系统, 其中所述金属源包括铝、铜、钽或钛中的至少一种的源。

22. 如权利要求 1 所述的沉积系统, 还包括:

5 耦合到所述处理室并且被配置为调节所述处理室中的所述衬底上方的所述金属密度或所述等离子体密度中的至少一种的缓冲设备。

23. 如权利要求 22 所述的沉积系统, 其中所述缓冲设备耦合到所述处理室的上表面。

24. 如权利要求 22 所述的沉积系统, 其中所述缓冲设备包括扁平、凸起或凹进形状中的至少一种。

10 25. 如权利要求 22 所述的沉积系统, 其中所述缓冲设备利用直流(DC)或交流(AC)电源中的至少一种被电偏置。

26. 如权利要求 22 所述的沉积系统, 还包括:

耦合到所述缓冲设备并且被配置为调节所述处理室中的所述衬底上方的所述金属密度或所述等离子体密度中的至少一种的磁体系统。

15 27. 如权利要求 26 所述的沉积系统, 其中所述磁体系统包括永磁体阵列或电磁体中的至少一种。

28. 如权利要求 26 所述的沉积系统, 其中所述磁体系统包括旋转磁体系统或固定磁体系统中的至少一种。

29. 如权利要求 22 所述的沉积系统, 其中所述缓冲设备是可平移的。

20 30. 如权利要求 29 所述的沉积系统, 其中所述缓冲设备沿基本垂直于所述衬底的方向平移。

31. 如权利要求 22 所述的沉积系统, 其中所述缓冲设备耦合到冷却系统、加热系统或这两者。

32. 如权利要求 1 所述的沉积系统, 还包括:

25 耦合到所述处理室并且被配置为调节所述处理室中的所述衬底上方的所述金属密度或所述等离子体密度中的至少一种的磁体系统。

33. 如权利要求 32 所述的沉积系统, 其中所述磁体系统包括永磁体阵列或电磁体中的至少一种。

34. 如权利要求 32 所述的沉积系统, 其中所述磁体系统包括旋转磁体

系统或固定磁体系统中的至少一种。

35. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述衬底夹持器被配置为电偏置所述衬底。

36. 如权利要求 35 所述的沉积系统，其中所述衬底夹持器耦合到射频 (RF) 发生器。

37. 如权利要求 1 所述的沉积系统，还包括：

耦合到所述处理室、所述衬底夹持器、所述等离子体源和所述金属源的控制系统，其被配置为执行调节、监视或控制所述沉积系统中的至少一种操作。

38. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述处理室被配置为产生范围从约 1 mTorr 到 100 mTorr 的压强，所述等离子体源被配置为产生约等于或超过 10^{12} cm^{-3} 的所述等离子体密度，所述金属源耦合到直流 (DC) 电源并且被配置为利用约 1 到 4 kW 的 DC 功率产生约等于或小于 10^{12} cm^{-3} 的所述金属密度，所述衬底夹持器耦合到射频 (RF) 发生器并且被配置为利用约 0 到 1000 W 的 RF 功率偏置所述衬底。

39. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述处理室被配置为产生范围从约 1 mTorr 到 100 mTorr 的压强，所述金属源耦合到直流 (DC) 电源并且被配置为利用约 2 到 6 kW 的 DC 功率产生约等于由所述等离子体源产生的所述等离子体密度的所述金属密度，所述衬底夹持器耦合到射频 (RF) 发生器并且被配置为利用约 300 到 800 W 的 RF 功率偏置所述衬底。

40. 如权利要求 1 所述的沉积系统，其中所述处理室被配置为产生范围从约 1 mTorr 到 100 mTorr 的压强，所述金属源耦合到直流 (DC) 电源并且被配置为利用约 1 到 6 kW 的 DC 功率产生约等于由所述等离子体源产生的所述等离子体密度的所述金属密度，所述衬底夹持器耦合到射频 (RF) 发生器并且被配置为利用约 0 到 1000 W 的 RF 功率偏置所述衬底。

41. 一种在衬底上的大高宽比特征结构中沉积薄金属膜的方法，包括：

在沉积系统中的衬底夹持器上放置所述衬底；

利用等离子体源在所述沉积系统内形成具有某一等离子体密度的等离子体；

利用金属源在所述沉积系统内引入具有某一金属密度的金属；

5 在所述衬底上方建立所述金属密度对所述等离子体密度的比值，所述比值约等于或小于 1；以及

在所述衬底上的所述特征结构内执行具有 $\pm 25\%$ 的均匀性的保形沉积。

42. 如权利要求 41 所述的方法，其中所述建立所述比值包括利用所述
10 等离子体源调节所述等离子体密度。

43. 如权利要求 41 所述的方法，其中所述建立所述比值包括利用所述金属源调节所述金属密度。

44. 如权利要求 41 所述的方法，其中所述在所述衬底上方建立所述比值包括在所述衬底上方局部地建立所述比值。

15 45. 如权利要求 44 所述的方法，其中所述在所述衬底上方局部地建立所述比值包括以临时方式建立所述比值。

46. 如权利要求 41 所述的方法，其中所述在所述衬底上方建立所述比值包括以临时方式建立所述比值。

47. 如权利要求 41 所述的方法，其中所述保形沉积的沉积包括沉积在
20 所述衬底上的最大厚度小于所述特征结构的宽度的一半的膜。

48. 如权利要求 47 所述的方法，其中所述保形沉积的沉积包括沉积在所述衬底上的最大厚度小于约所述特征结构的宽度的 $1/10$ 的膜。

49. 一种在衬底上的大高宽比特征结构中沉积薄膜的方法，包括：

在沉积系统中的衬底夹持器上放置所述衬底；

25 向所述沉积系统提供具有涂覆材料电离电势的涂覆材料的涂覆材料源；

向所述沉积系统中引入具有大于所述涂覆材料电离电势的电离电势的处理气体；

利用等离子体源以所述处理气体在所述沉积系统内形成具有某一等离

子体密度的等离子体；

利用所述涂覆材料源在所述沉积系统内引入具有某一涂覆材料密度的涂覆材料；

在所述衬底上方建立所述涂覆材料密度对所述等离子体密度的比值，

5 所述比值不大于 1；以及

在所述衬底上的所述特征结构内执行具有 $\pm 25\%$ 的均匀性的所述涂覆材料的保形沉积。

50. 如权利要求 49 所述的方法，其中所述比值在所述衬底的整个所述表面上是基本均匀的。

10 51. 如权利要求 49 所述的方法，其中所述等离子体源被配置为产生超过 10^{12} cm^{-3} 的等离子体密度。

52. 如权利要求 49 所述的方法，其中所述保形沉积的沉积包括沉积在所述衬底上的最大厚度小于所述特征结构的宽度的一半的膜。

15 53. 如权利要求 49 所述的方法，其中所述保形沉积的沉积包括沉积在所述衬底上的最大厚度小于约所述特征结构的宽度的 $1/10$ 的膜。

54. 一种用于在衬底上的大高宽比特征结构中形成薄膜的沉积系统，包括：

用于执行权利要求 49 的方法的装置。

20 55. 如权利要求 54 所述的沉积系统，其中所述用于执行所述方法的装置包括：

处理室；

耦合到所述处理室并且被配置为支撑所述衬底的衬底夹持器；

耦合到所述处理室并且被配置为在所述处理室内形成等离子体的等离子体源；以及

25 耦合到所述处理室并且被配置为将所述涂覆材料引入到所述处理室的所述涂覆材料的源。

等离子体处理的方法和装置

5 技术领域

本发明涉及用于薄膜沉积的方法和装置，更具体而言，本发明涉及用于在衬底上的大高宽比特征结构中的保形薄膜沉积的方法和装置。

背景技术

- 10 在用于集成电路（IC）的层间和层内连线的半导体衬底上的大高宽比（HAR）过孔和接触以及沟槽的金属化中，阻挡层和晶种层的沉积一般要求具有足够的侧壁和底部覆盖度以产生所需的阻挡或晶种性质。例如，通常希望使阻挡层尽可能地薄，以便使其电阻最小化；然而，一定不能牺牲其阻挡性质。另外，例如，阻挡层必须是保形的和连续的而不能有空洞，
- 15 以便防止晶种层材料扩散到介电层和其他层中，以防止可靠性问题。当薄膜的最大和最小厚度之间的差在某个可接受的工艺限度内时，该薄膜是保形的。当最大和最小膜厚之间的比值较小时，保形性较好。

- 对于 HAR 特征结构的金属化，离子化物理气相沉积（iPVD）已用在半导体处理中，并且其已被考虑扩展到亚微米技术。离子化 PVD 提供了
- 20 在过孔和沟槽结构中良好的侧壁和底部覆盖度；然而，随着几何尺寸的收缩和过孔尺寸低于约 100 纳米，沉积需求变得更加严格。即使特征结构开口（或顶部）处的小悬臂（overhang）也被认为是对足够的特征结构覆盖度的严重威胁。此外，悬臂的产生也被认为对特征结构的形状敏感，并且该效应对工艺的总产率有影响。

- 25 通常，互连制作中薄层的保形沉积利用当前的传统处理变得非常困难的，因而，产生了非常差的阶梯覆盖度，阶梯覆盖度有时被定量地定义为特征结构侧壁覆盖厚度对特征结构在其下延伸的衬底开阔区域或水平表面中的覆盖厚度的比值，该比值越高（接近 1），就越好。例如，金属层（用作粘附、阻挡和/或晶种层）的物理气相沉积（PVD）（如溅射）需要

在沟槽和/或接触过孔的所有表面上有至少约 5 nm（纳米）的覆盖，从而在大高宽比特征结构中进行的金属 PVD 需要更多的沉积在衬底顶面上，以产生过孔底部的充分覆盖。用于双镶嵌方案的典型的现有技术沟槽和接触结构需要在衬底 20 的水平平坦开阔区域 27 上有约 50 nm 的 PVD 金属膜 21，如图 12A 所示，以便使 5 nm 的金属 24 到达接触过孔 23 的底部和侧壁。由于 PVD 技术的方向性，沉积趋向于更快地积累在沟槽和/或过孔的上部拐角 25 处（与底部 26 相比）。作为沉积材料快速建立在结构的上表面上的结果（其占据了大部分的导线宽度），这些建立的拐角随后遮住了对特征结构的下部的沉积。

在采用 iPVD 的当前 IC 互连技术中（见 Rossnagel, “Directional and iPVD for microelectronics applications”, J. Vac. Sci. Technol. B16(5), 2585-2608, 1998），若干种方法已包括顺序或原位沉积和蚀刻工艺以消除悬臂（见美国专利 No. 6,100,200, 4,999,096, 和 6,274,008 以及美国专利申请 2003/0034244）。然而，发明人观察到，传统的工艺条件仍然导致了某些不希望出现的效果，其可以包括悬臂和过孔的封闭、金属层的不连续性、低沉积速率和产量限制。在某些方法中，可能需要独立的沉积和蚀刻系统，这涉及衬底转移问题，由于未受保护的内部线圈而可能发生污染，并且不均匀的等离子体生成和随之而来的不均匀的蚀刻仅仅只是当前实践所面临的一些额外问题。而且，发明人还观察到，只考虑衬底表面处的重溅射效应没有完全防止悬臂的建立。

用于过孔和沟槽的金属化的其他技术例如包括开发用于某些金属和金属氮化物的化学气相沉积（CVD）工艺，相比于 PVD 工艺，CVD 工艺可以表现出改进的阶梯覆盖度，然而，即使是 CVD 工艺也趋向于在双镶嵌接触过孔的底部沉积比结构的上表面和侧壁少得多的材料。因而，尽管在某种程度上相对于 PVD 有了改进，但是双镶嵌结构的 CVD 阶梯覆盖在大多数当前已知的低温 CVD 技术下仍然是不平坦的。提出用于金属互连的保形覆盖的更新的方法包括原子层沉积（ALD）（见美国专利 No. 6,699,783）。通常，ALD 包括交替的反应物阶段循环，其中每个阶段都有自限制效应。然而，ALD 工艺有前驱体在高压和室温下的可用性的问题。

总的来说，发明人观察到，当前的金属化技术不能消除特征结构的悬臂，因此，最终将不能提供足够的 HAR 特征结构的覆盖度以用于日益先进的 IC。

5 发明内容

本发明的一个目的是减少或消除上述问题中的任何一个或全部。本发明的另一个目的是提供一种沉积材料的方法以改进大高宽比（HAR）特征结构内的覆盖特性。

根据本发明的原理，描述了一种用于在衬底上的大高宽比特征结构中形成薄膜的沉积系统，包括：处理室；耦合到处理室并且被配置为支撑衬底的衬底夹持器；耦合到处理室并且被配置为在处理室内形成等离子体的等离子体源；以及耦合到处理室并且被配置为将金属引入到处理室的金属源，其中等离子体源和金属源被配置为在衬底上方产生小于 1 的金属密度和等离子体密度之间的比值。

根据本发明的另一个方面，一种在衬底上的大高宽比特征结构中沉积薄金属膜的方法包括：在沉积系统中的衬底夹持器上放置衬底；利用等离子体源在沉积系统内形成具有某一等离子体密度的等离子体；利用金属源在沉积系统内引入具有某一金属密度的金属；在衬底上方建立金属密度对等离子体密度的比值，所述比值约等于或小于 1；以及在衬底上的特征结构内执行保形沉积。

尽管本发明主要针对金属的沉积，但是应当预期到，其可以应用于其他涂覆材料的膜沉积，这些其他涂覆材料的性能有利地响应于本发明的原理。例如，可以相信，本发明尤其可用于金属的电离电势小于背景处理气体的电离电势的情况下的金属沉积。因此，电离电势小于背景气体的电离电势的涂覆材料应当受益于本发明的原理的应用。在处理气体例如是氩的情况下，可以预料到电离电势小于氩的电离电势的涂覆材料尤其将受益于本发明。利用具有较高电离电势的背景气体应当能够将本发明扩展到更多材料。本发明到其他材料的扩展可以分析地或经验地确定。

附图说明

在附图中：

图 1 示出了根据本发明实施例的沉积系统的示意图；

图 2 图示了与衬底的上表面平行的坐标系统；

5 图 3A 示出了根据本发明另一个实施例的沉积系统的示意图；

图 3B 图示了在图 3A 中所示的沉积系统的顶视图；

图 4 示出了根据本发明另一个实施例的沉积系统的示意图；

图 5 示出了根据本发明另一个实施例的沉积系统的示意图；

10 图 6 表示根据本发明实施例的用于在大高宽比特征结构中执行金属的保形沉积的方法；

图 7 表示在高密度等离子体中金属和背景气体离子的示例性离子化比例；

图 8A 图示了从特征结构的内部点处的视角；

15 图 8B 表示高宽比为 2.25 的三维特征结构内部的金属的归一化中性粒子通量的示例性表面图；

图 8C 表示高宽比为 8 的三维特征结构内部的金属的归一化中性粒子通量的示例性表面图；

图 9A 提供了在平面内的离子激励的纳米量级沉积中对沉积速率和覆盖度有贡献的沉积机制和工艺的示意性图示；

20 图 9B 提供了在特征结构内的离子激励的纳米量级沉积中对沉积速率和覆盖度有贡献的沉积机制和工艺的示意性图示；

图 10A 表示在第一工艺条件下特征结构的侧壁比底部的覆盖度和特征结构的底部比开阔区的覆盖度；

25 图 10B 表示在第二工艺条件下特征结构的侧壁比底部的覆盖度和特征结构的底部比开阔区的覆盖度；

图 10C 表示在第三工艺条件下特征结构的侧壁比底部的覆盖度和特征结构的底部比开阔区的覆盖度；

图 10D 表示在第四工艺条件下特征结构的侧壁比底部的覆盖度和特征结构的底部比开阔区的覆盖度；

图 10E 表示在第五工艺条件下特征结构的侧壁比底部的覆盖度和特征结构的底部比开阔区的覆盖度；

图 10F 表示在第六工艺条件下特征结构的侧壁比底部的覆盖度和特征结构的底部比开阔区的覆盖度；

5 图 10G 表示在第七工艺条件下特征结构的侧壁比底部的覆盖度和特征结构的底部比开阔区的覆盖度；

图 10H 表示在第八工艺条件下特征结构的侧壁比底部的覆盖度和特征结构的底部比开阔区的覆盖度；

图 11 图示了将覆盖度表示为金属密度的函数的示例性工艺窗口；

10 图 12A 是具有根据现有技术的方法沉积的阻挡层的接触过孔的截面图；以及

图 12B 是具有根据本发明的方法和装置的某些实施例沉积的阻挡层的接触过孔的截面图。

15 具体实施方式

在下面的描述中，为了帮助对本发明的完全理解和出于说明而非限制的目的，给出了特定细节，如沉积系统的具体几何形状以及等离子体源和分布式金属源的各种形状。然而，应当理解，本发明也可以在脱离这些特定细节的其他实施例中实现。

20 但是，应当意识到，在描述中除了说明了常用概念的创造性特征以外，还包含了作为创造性特征的特征。

例如，本公开文件的创造性方面包括提供一种用于在衬底上的大高宽比特征结构中形成薄膜的沉积系统和方法，其中等离子体源耦合到处理室，并且被配置为在处理室中形成大于 10^{12} e/cm^3 （每立方厘米的电子数）
25 的高密度等离子体，金属源耦合到处理室，并且被配置为将金属引入到处理室，其中金属原子和金属离子的总密度小于等离子体密度。

作为另一个示例，本公开文件的创造性方面包括提供一种用于在衬底上的大高宽比特征结构中形成薄膜的沉积系统和方法，其中等离子体源和金属源耦合到处理室，并且被配置为在处理室中形成等离子体，其中所述

处理室具有在整个衬底表面和衬底表面附近小于等离子体密度的金属密度。作为又一示例，创造性方面包括提供一种用于在衬底上的大高宽比特征结构中形成薄膜的沉积系统和方法，其中等离子体源和金属源耦合到处理室，并且被配置为在处理室中形成等离子体，其中所述处理室具有在整个衬底表面和衬底表面附近小于等离子体密度的金属密度，并且总金属密度对等离子体密度的比值在整个衬底表面相对均匀。

作为包含上述特征以及其他创造性方面的又一示例，可以提供一种用于在衬底上的大高宽比特征结构中形成薄膜的沉积系统和方法，其使用等离子体源和金属源，等离子体源耦合到处理室，并且被配置为形成大于 10^{12} e/cm^3 的高密度等离子体，金属源耦合到处理室，并且被配置为将金属引入到处理室，其中金属原子和金属离子的总密度对等离子体密度的比值在 0.1 和 1.0 之间，并且在整个衬底表面和衬底表面附近基本是均匀的。作为又一示例，还包括附加的创造性方面，即提供了一种用于在衬底上的大高宽比特征结构中形成薄膜的沉积系统和方法，其使用等离子体源和金属源，等离子体源耦合到处理室，并且被配置为形成大于 10^{12} e/cm^3 的高密度等离子体，金属源耦合到处理室，并且被配置为将金属引入到处理室，其中金属原子和金属离子的总密度对等离子体密度的比值在 0.1 和 1.0 之间，并且在贯穿从衬底表面向等离子体延伸（并且包括等离子体鞘、等离子体鞘和近鞘、等离子体鞘和近鞘以及至少某些近鞘内的等离子体，或者包括衬底直径的大约 1/4 的厚度）的空间中在整个衬底表面和衬底表面附近基本是均匀的。

在下面所述的各种实施例的描述中以及在所附权利要求中包含了其他示例。

利用本发明的某些实施例实现的优点的示例在图 12B 中示出，图 12B 示出了在具有大高宽比（例如 7: 1）特征结构（如 65 nm 宽的过孔 32）的衬底 30 上沉积膜 31 的结果。膜 31 可以例如在衬底的平坦开阔区 33 上以及在衬底 30 上的特征结构 32 的侧壁 34 和底部 35 上具有 $5 \text{ nm} \pm 1.25 \text{ nm}$ 的厚度。

为了改进尤其是在大高宽比特征结构中的沉积特性，本发明改进了一

种沉积系统和操作方法以实现暴露衬底表面本地的化学运输的改进。暴露的衬底表面被暴露于材料沉积步骤，这些步骤的组合用来改变暴露衬底表面的材料成分和/或地形。例如，沉积系统可被认为是采用了离子激励的保形纳米量级沉积。

- 5 根据本发明的实施例，描述了一种用于薄膜的保形沉积的系统。该沉积系统提供了用于大高宽比（HAR）特征结构中的高度均匀特征结构覆盖的条件。在沉积系统内，等离子体源产生高密度等离子体（即，其中电子密度， $n_e, > 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ）。另外，在沉积系统内，金属源产生金属吸附原子。等离子体的形成和金属吸附原子的生成以这样的方式执行：维持小于或等
- 10 于 1 的金属密度（包括中性金属原子的密度和金属离子的密度）对等离子体密度（或电子密度，或离子密度）的恒定比值（例如， $n_{\text{metal}}/n_e = \text{const} \leq 1$ ）。发明人观察到，满足该条件执行沉积以相同沉积速率提供了整个衬底上的平坦开阔区表面和特征结构内部表面的保形覆盖。另外，沉积例如在整个衬底表面上以表面动力学模式进行，并且对特征结构
- 15 侧壁处增加的速率有贡献。

- 现在参考图 1，图 1 示出了根据本发明实施例的沉积系统 100。沉积系统 100 包括处理室 110 和耦合到处理室 110 并被配置为支撑衬底 114 的衬底夹持器 112。另外，沉积系统 100 包括耦合到处理室 110 并被配置为在处理室 110 内的处理空间 140 中形成等离子体的等离子体源 120。另
- 20 外，沉积系统 100 包括耦合到处理室 110 并被配置为将金属吸附原子引入到处理室 110 内的处理空间 140 的金属源 130。沉积系统 100 还可以包括耦合到处理室 110 并被配置为将例如稀有气体的惰性气体引入到处理室 110 内的处理空间 140 的气体注入系统 160。可选地，沉积系统 100 还可以包括耦合到处理室 110、衬底夹持器 112、等离子体源 120 和金属源 130
- 25 的控制系统 150，其中其可被配置为根据例如处理工艺执行操作、调节、监视或控制沉积系统 100 中的至少一种操作。

等离子体的形成和金属吸附原子的生成以这样一种方式执行：金属密度对等离子体密度（或电子密度或离子密度）的比值维持小于或等于 1（例如， $n_{\text{metal}}/n_e \leq 1$ ）。例如，该比值可以针对空间中并且与衬底 114 的表

面间隔开的至少一点被维持小于或等于 1。满足这一条件将导致这样一种密度分布，该密度分布将允许实现本发明的至少某些优点。或者，可以维持在衬底 114 的整个表面上小于或等于 1 的比值的空间分布。或者，可以维持在衬底 114 的整个表面上小于或等于 1 的该比值的空间分布，并且其可以在衬底 114 的整个表面上维持基本均匀，或者在 $\pm 25\%$ 内。或者，可以维持在衬底 114 的整个表面上小于或等于 1 的该比值的空间分布，并且其可以在衬底 114 的整个上表面上维持基本恒定（例如， $n_{\text{metal}}/n_e \approx \text{const} \leq 1$ ）。例如，金属吸附原子密度的空间分布可由函数 $f(x,y)$ 表示，并且等离子体密度的空间分布可由函数 $g(x,y)$ 表示，其中 x 和 y 表示与衬底 114 的上表面平行的两维直线坐标系统（见图 2）。函数 $f(x,y)$ 可以在衬底 114 的整个上表面上是基本恒定的，并且函数 $g(x,y)$ 可以在衬底 114 的整个上表面上是基本恒定的，其中在空间中的任何点 (x,y) 处的 $f(x,y)$ 对 $g(x,y)$ 的比值小于或等于 1。或者，函数 $f(x,y)$ 在衬底 114 的整个上表面上不是均匀的，并且函数 $g(x,y)$ 在衬底 114 的整个上表面上不是均匀的；然而， $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 是类似的函数，并且在空间中的任何位置 (x,y) 处的 $f(x,y)$ 对 $g(x,y)$ 的比值小于或等于 1。例如，函数的相似性可以表征为函数 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 的数学相似性（即，形状、曲率等）。或者，作为时间的函数，该比值可以维持基本不变。

参考图 1，等离子体源 120 可以包括耦合到电源（如射频（RF）发生器）的电极、或者耦合到电源的线圈天线，如螺旋线圈或耦合到 RF 发生器的其他天线。例如，等离子体源 120 可以包括电容耦合等离子体（CCP）源、或电感耦合等离子体（ICP）源、或其组合。另外，例如，子 ICP 源和大气 ICP 源生成电子密度约为 $n_e \approx (1-4) \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、电子温度从约 $\sim 0.2 \text{ eV}$ 到约 0.6 eV 且金属吸附原子 100% 离子化的等离子体。或者，等离子体源 120 可以包括能够产生大面积等离子体的源，如具有低电子温度和电子密度约为 $n_e \approx 1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 以及以上的电子束源，以及那些能够基于表面波、螺旋波产生高密度偏平等离子体的源，或者电子回旋共振（ECR）等离子体源。

金属源 130 可以例如围绕处理室 110 的周长分布，金属吸附原子从金

属源 130 进入处理空间 140。例如，金属标靶可用作金属源。标靶可以利用直流（DC）或交流（AC）偏置以通过溅射工艺生成金属吸附原子。或者，可以使用其他金属源，如磁电管。例如，可以采用脉冲激光沉积、高能脉冲磁控溅射、等离子体辅助溅射技术等。另外，例如，金属源 130 可以包括多个金属源。这多个金属源可以耦合到电源。或者，每个金属源可以独立耦合到单独的电源。或者，功率可以利用一个或多个电源交替地、顺序地耦合到这多个金属源。

衬底夹持器 112 可以包括电极，AC 功率（如 RF 功率）或 DC 功率通过该电极耦合到衬底 114。例如，衬底夹持器 112 可以经由从 RF 发生器通过阻抗匹配网络发送到衬底夹持器 112 的 RF 功率电偏置在某一 RF 电压。RF 偏置可用于加热电子以形成并维持等离子体。或者，RF 偏置可用于影响入射在衬底的上表面上的离子能量。RF 偏置的一般频率可以从 0.1 MHz 到 100 MHz。用于等离子体处理的 RF 系统是本领域技术人员公知的。或者，RF 功率以多个频率被施加到衬底夹持器的电极。此外，阻抗匹配网络可用于通过减少反射功率提高到处室中的等离子体的 RF 功率传输。匹配网络拓扑（例如，L 型、 π 型、T 型等）和自动控制方法是本领域技术人员公知的。

另外，衬底夹持器 112 可以包括静电夹紧系统（或机械夹紧系统）以将衬底 114 电（或机械）夹紧到衬底夹持器 112。此外，衬底夹持器 112 例如还可以包括具有再循环冷却剂流的冷却系统，该再循环冷却剂流接收来自衬底夹持器 112 的热，并将热传到热交换器系统（未示出），或者在加热时传送来自热交换器系统的热。而且，传热气体可以例如经由背面气体系统被传递到衬底 114 的背面，以提高衬底 114 和衬底夹持器 112 之间的气体间隙热导。例如，被提供到衬底 112 背面的传热气体可以包括惰性气体（如氦、氩、氙、氪）、处理气体或其他气体（如氧气、氮气或氢气）。该系统可用在当需要对衬底进行温度控制以升高或降低温度时。例如，背面气体系统可以包括多区气体分布系统，如两区（中心—边缘）系统，其中背面气体间隙压强可以在衬底 114 的中心和边缘之间独立变化。在其他实施例中，加热/冷却元件（如电阻加热元件）或热电加热器/冷却

器可被包括在衬底夹持器 112 以及处理室 110 的室壁内。

此外, 控制系统 150 可以包括微处理器、存储器和能够生成控制电压的数字 I/O 端口, 该控制电压足以与沉积系统 100 通信并激活到沉积系统 100 的输入, 以及监视来自沉积系统 100 的输出。而且, 控制系统 150 可以耦合到处理室 110、等离子体源 120、分布式金属源 130、气体注入系统 160 和真空泵系统 (未示出) 并可以与之交换信息。例如, 存储在存储器中的程序可用于根据处理工艺激活到沉积系统 100 的前述组件的输入以执行沉积工艺。控制系统 150 的一个示例包括可以从 Texas, Austin 的 Dell Corporation 得到的 DELL PRECISION WORKSTATION 610™。

现在参考图 3A 和 3B, 图 3A 和 3B 示出了根据本发明实施例的另一个沉积系统 200。沉积系统 200 包括与图 1 中描述的沉积系统 100 相似的元件。然而, 沉积系统 200 包括提供在两个或更多个位置处的两个或更多个等离子体源, 以提供均匀和可控的等离子体密度分布, 该分布足以使金属吸附原子均匀地离子化。例如, 沉积系统 200 包括第一等离子体源 220 和第二等离子体源 222, 第一等离子体源 220 耦合到处理室 210 的下部部分并包围该部分, 并被配置为在处理空间 240 中形成等离子体, 第二等离子体源 222 耦合到处理室 210 的上部部分并包围该部分, 并被配置为在处理空间 240 中形成等离子体。

另外, 沉积系统 200 包括耦合到处理室 210 并被配置为将金属吸附原子引入到处理室 210 内的处理空间 240 的分布式金属源 230。分布式金属源 230 的位置可以如图 3A 和图 3B 所示。

如图 3A 所示, 沉积系统 200 还可以包括缓冲设备 270。例如, 处理室 210 的一部分不包含分布式金属源或等离子体源, 但是其构成了缓冲表面以补偿衬底上的不同处理速率。缓冲表面 270 可以包括凸起、平面或凹进形状中的至少一种, 并且其可以由导电材料制作, 如铝、不锈钢等。缓冲设备 270 的目的可以例如是补充处理空间 240 中金属吸附原子的径向分布。由于表面反应对表面温度是敏感的, 因此缓冲表面 (缓冲设备 270) 可以包含温度控制元件, 如冷却和/或加热设备, 以控制其表面温度。另外, 例如, 缓冲设备 270 可以连接到 DC 或 AC 电源。另外, 缓冲设备 270

可以包含磁场结构，该磁场结构利用永磁体或电磁体生成静态或动态的磁场。另外，缓冲设备 270 可以是可平移的。例如，缓冲设备 270 可以沿垂直于衬底 214 的方向平移，以改变缓冲设备 270 和衬底 214 之间的间距。

5 衬底系统 200 还可以包括耦合到处理室 210 并被配置为将诸如稀有气体的惰性气体引入到处理室 210 内的处理空间 240 的气体注入系统 260。可选地，衬底系统 200 还可以包括耦合到处理室 210、衬底夹持器 212、第一等离子体源 220、第二等离子体源 222 和分布式金属源 230 的控制器 250，其中其可被配置为根据例如处理工艺执行操作、调节、监视或控制沉积系统 200 中的至少一种操作。

10 现在参考图 4，图 4 示出了对应于本发明另一个实施例的另一个沉积系统 300。沉积系统 300 包括提供在两个或更多个位置处的两个或更多个等离子体源，以提供均匀和可控的等离子体密度分布，该分布足以使金属吸附原子均匀地离子化。例如，沉积系统 300 包括第一等离子体源 320 和第二等离子体源 322，第一等离子体源 320 耦合到处理室 310 的下部部分并包围该部分，并被配置为在处理空间 340 中形成等离子体，第二等离子体源 322 耦合到处理室 310 并定位在处理室 310 上方，并被配置为在处理空间 340 中形成等离子体。另外，沉积系统 300 包括耦合到处理室 310 并被配置为将金属吸附原子引入到处理室 310 内的处理空间 340 的分布式金属源 330。沉积系统 300 还可以包括耦合到处理室 310 并被配置为将诸如稀有气体的惰性气体引入到处理室 310 内的处理空间 340 的气体注入系统 360。可选地，衬底系统 300 还可以包括耦合到处理室 310、衬底夹持器 312、等离子体源 320 和 322 以及分布式金属源 330 的控制器 350，其中其可被配置为根据例如处理工艺执行操作、调节、监视或控制沉积系统 300 中的至少一种操作。沉积系统 300 还可以包括如上所述的缓冲设备 370。

25 另外，例如，图 5 图示了具有用于控制沉积系统 400 的控制系统 410 的沉积系统 400 的布局。控制系统 410 包括用于设置工艺参数和硬件参数的用户界面 420 和被配置为根据设置参数操作沉积系统的主控制器 422。控制系统 410 还包括被配置为操作压强控制系统 432、气体流量控制系统 434 和气体供应系统 438 以及泵系统 436 的第一子控制器 430。另外，控制

系统 410 包括被配置为操作等离子体源功率发生器和控制系统 442 和沉积系统冷却和加热系统 444 的第二子控制器 440，以及被配置为操作分布式金属源 DC 功率发生器和控制系统 448 的第三子控制器 446。等离子体源功率发生器和控制系统 442 和分布式金属源 DC 功率发生器和控制系统 448 耦合到处理室 465，并被配置为分别操作具有一个或多个等离子体生成元件 471、472 的等离子体源 470 和具有一个或多个金属源 481、482、483 的分布式金属源 480。第四子控制器 450 被配置为操作衬底处置系统 452，第五子控制器 454 被配置为操作夹持和解夹持系统 456，第六子控制器 458 被配置为操作衬底夹持器功率发生器和控制系统 460。此外，具有一个或多个传感器和仪器的诊断系统 490 可以耦合到处理室 465、等离子体源 470 和分布式金属源 480，并被配置为向用户界面 420 提供操作数据。

如图 5 所示，主控制器 422 可以相对于沉积系统 400 位于本地，或者其可以远离沉积系统 400。例如，控制器 422 可以利用直接连接、内联网和互联网中的至少一种与沉积系统 400 交换数据。控制器 422 可以耦合到例如在客户位置（即，器件制造商等）处的内联网，或者其可以耦合到例如在供应商位置（即，设备制造商）处的内联网。另外，例如，控制器 422 可以耦合到互联网。此外，另一个计算机（即，控制器、服务器等）可以例如访问控制器 422 以经由直接连接、内联网和互联网中的至少一种交换数据。

在图 1 到 5 所述的沉积系统中，分布式金属源可以从标靶产生金属蒸气通量，标靶被在高于典型的溅射压强的气体压强（一般 >30 mTorr）下加热。本发明的创造性实施例在离子激励纳米量级沉积中采用了所述的金属对等离子体比值，其中，该沉积在真空处理室中使用了热化的等离子体或金属蒸气。合适的 ICP 源在大体积中产生高密度等离子体和有效的金属离子化。金属离子向衬底表面扩散，并且通过鞘前和鞘中的电压梯度（等离子体电势和晶片电势之间的电势差）被加速。在高金属离子通量比例但是相对较低的总金属密度的条件下，表面覆盖可以在表面动力学模式进行。由于平坦开阔区（flat field）处的表面碰撞，重新组合后的金属离子

返回到本体等离子体。在特征结构内，侧壁对由于背景气体（如氩）的彭宁（Penning）激发和金属离子与背景气体的电荷交换而逃离特征结构的底部的金属提供了捕捉效应。在这些条件下，从本体等离子体基于离子的沉积速率大于在特征结构的底部处的中性粒子生成速率，并且中性粒子生成速率大于从本体等离子体通过中性粒子的沉积速率；即，保形性大于 $C^{B/FF} \geq 1$ （B=特征结构底部，FF=平坦开阔区；即， $C^{B/FF}$ 表示在特征结构底部处的沉积速率对平坦开阔区处的沉积速率的比值）。当从底部反射和重新溅射出的金属小于通过表面反应在壁处消耗的金属量时， $C^{SW/B} \geq 1$ （SW=特征结构侧壁）。

10 现在参考图 6，图 6 描述了在大高宽比特征结构中沉积薄膜的方法。该方法包括流程图 500，流程图 500 开始于 510，在 510 中，在沉积系统中沉积衬底。例如，该沉积系统可以包括上述图 1 至 5 中的任何一种沉积系统。

在 520 中，利用一个或多个等离子体源在沉积系统中形成等离子体。可以通过引入背景气体（如惰性气体）并将足以进行电离的功率耦合到气体来形成等离子体。

在 530 中，金属被从一个或多个金属源引入到沉积系统。

在 540 中，建立用于在衬底上沉积金属的工艺，其中金属密度对等离子体密度的比值基本等于或小于 1。例如，用于实现该比值的工艺条件在下面更详细地描述。

在 550 中，利用在沉积系统中形成的工艺条件执行衬底上金属的保形沉积。

25 在一个示例中，确定用于实现保形覆盖的工艺界限或工艺窗口（更具体而言，特定的金属对等离子体密度比和其分布）的方法可以产生于初始的原理仿真，或者实验，或这两者。如上所述，在衬底上沉积金属膜，其中在存在背景气体（如稀有气体）的条件下形成金属蒸气，如铜、铝、钽、钛等，在这期间多次的碰撞通过基元反应产生了能量上的多组分等离子体环境。在金属—气体等离子体（如金属—氩等离子体）中，可以存在五种原子组分，其包括不同的能量状态并且性质不同。例如，产生这些粒

子的主要碰撞是：

电子与本体等离子体中的母体气体原子碰撞：

- (1) (电子撞击激发) $Ar(g) + e^- \rightarrow Ar^*(g) + e^-$
- (2) (电子撞击离子化) $Ar(g) + e^- \rightarrow Ar^+(g) + 2e^-$

5 电子与本体等离子体中的金属原子碰撞：

- (3) (电子撞击激发) $M(g) + e^- \rightarrow M^*(g) + e^-$
- (4) (电子撞击离子化) $M(g) + e^- \rightarrow M^+(g) + 2e^-$

金属与本体等离子体中的母体气体原子碰撞：

- (5) (氩的彭宁激发) $M^+(g) + Ar^0(g) \rightarrow M^+(g) + Ar^*(g)$
- 10 (6) (电荷交换) $M^+(g) + Ar^*(g) \xrightarrow{bulk} M^0(g) + Ar^+(g)$
- (7) (金属的彭宁离子化) $M^0(g) + Ar^*(g) \xrightarrow{bulk} M^+(g) + Ar^0(g) + e^-$

在低密度等离子体($n_e < 10^{10} \text{ cm}^{-3}$)中，彭宁离子化（见公式 7）负责大多数金属一离子化碰撞。在高密度等离子体($n_e > 10^{11} \text{ cm}^{-3}$)中，主要的金属离子化途径是电子撞击离子化（见公式 3）。本体等离子体中的带电粒子的主要损耗途径是向壁的双极扩散和由此导致的在壁表面处的重组。离子化的金属构成了氩等离子体中的全部离子密度的一定的比例。当金属蒸气密度可与母体氩密度相当时，该比例由电子温度和这两种组分的电离电势（例如， $E_i(\text{Cu}) \approx 7.724 \text{ eV}$ ， $E_i(\text{Ar}) \approx 15.755 \text{ eV}$ ）确定。由于对于金属密度 $n_M < n_e$ ，在给定电子温度下，金属的电离电势小于氩的电离电势（其他用于互连的实用金属与铜相比具有相当的电离电势，例如， $E_i(\text{Ta}) \approx 7.88 \text{ eV}$ ， $E_i(\text{Al}) \approx 5.984 \text{ eV}$ ， $E_i(\text{Ti}) \approx 6.82 \text{ eV}$ 等），因此相比于 $n_M > n_e$ 的情形，可以离子化更大比例

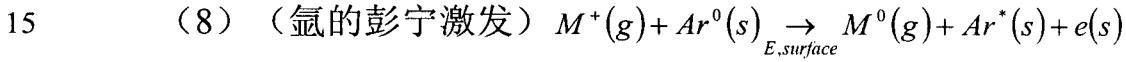
15 的金属。

例如，图 7 表示对于铜—氩等离子体由全局动力学模型得到的结果。例如，图 7 中表示的结果反映了本体高密度等离子体中金属和氩离子的离子化比例（ $p \sim 65 \text{ mTorr}$ ， $n_e \sim 1.6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ， $T_e \sim 1.75 \text{ eV}$ ）以及对于浮动衬底处的体金属密度到表面的金属离子通量比例。虚线（1）示出了当超过等离子体密度（2）时金属（Cu）离子密度的减少。模型输出是基于上述的动力学过程（公式（1）至（7））以及关于等离子体密度和电子温度测量的实验数据的。为了将金属离子密度转换为表面处的金属离子通量，考虑通

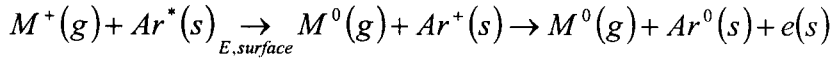
25

过等离子体鞘前和鞘电势差 $V_{plasma} - V_{bias}$ 引起的对 Bohm 速度的离子加速的情形。例如，偏置的增大可以增加到达表面的金属离子通量。中性金属的通量不受加速电压梯度的影响。该结果导致到达衬底的离子化金属通量的比例 (3) 大于等离子体中离子化金属 (4) 的比例。

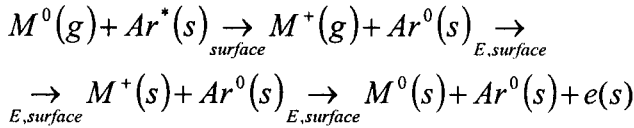
5 金属沉积发生在衬底表面（或任何其他表面）处的等离子体鞘内，其中发生电子密度的耗尽 ($n_e \rightarrow 0$)。另外，在鞘内没有电子撞击碰撞发生，这是因为例如在 30 到 100 mTorr 的压强下，离子—中性粒子平均自由程 (1 - 3 mm) 大于鞘的宽度 ($\langle L_{i-n} \rangle \geq 1 \text{ mm} \gg d_{sheath} \approx 30 - 100 \mu\text{m}$)，从而鞘可被认为是无碰撞的。而且，特征结构内的中性粒子通量明显减小，这是由于从特征结构表面上的某点看非常小的视角造成的（见图 8）。在这些条件下，在表面处的离子激励碰撞在金属运输中扮演了重要角色。表面的存在在碰撞中扮演了第三主体的角色，并且为表面处的碰撞粒子之间的能量传送提供了有利的条件。在动力学模型中，假定下面的表面碰撞可以对沉积速率有贡献：



(9) (电荷交换)

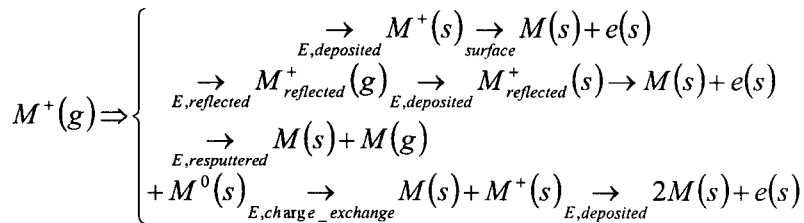


(10) (金属的彭宁离子化)



20 另外，还考虑到中性金属原子的直接沉积、加速的金属离子、来自表面的反射金属离子和衬底表面的重溅射。

(11) (离子沉积机制)



25 在动力学模型中考虑的全部机制在图 9A 和 9B 中示意性地示出。动力学模型的解提供了涉及金属密度 (n_M)、等离子体密度 (n_e) 和上述表面碰撞的特定速率常数的平坦开阔区表面 ($D.R.^{FF}$)、底部 ($D.R.^B$) 和侧壁

($D.R.^{SW}$) 表面上的沉积速率:

(12)

$$D.R.^{FF}(n_e, n_M) \approx B_1 n_M + K_1 n_e n_M - Y(\varphi, E) n_e + B_3 n_e n_M n_{Ar} - K_2 n_e n_M n_{Ar} - K_3 n_e^2 n_M n_{Ar}$$

(13)

$$5 \quad D.R.^B(n_e, n_M) \approx \Theta(H) B_1 n_M + K_1 n_e n_M [1 - R(\varphi_B)] - Y(\varphi, E) n_e + \\ + \Theta(H)^2 B_3 n_e n_M n_{Ar} - \Theta(H) K_2 n_e n_M n_{Ar} - \Theta(H) K_3 n_e^2 n_M n_{Ar}$$

(14)

$$D.R.^{SW}(n_e, n_M) \approx \Theta(z) B_1 n_M + \left(1 + \frac{R(\varphi_B)}{4A_R}\right) K_1 n_e n_M + \frac{1}{4A_R} Y(\varphi_B, E) n_e + \\ + \left(1 + \frac{1}{4A_R}\right) \Theta(z)^2 B_3 n_e n_M n_{Ar} + \frac{1}{4A_R} \Theta(z) K_2 n_e n_M n_{Ar} + \frac{1}{4A_R} \Theta(z) K_3 n_e^2 n_M n_{Ar}$$

其中右手侧的第一项 (具有 B_1) 描述了由于中性金属引起的沉积速率, 第二项 (具有 K_1) 描述了由于离子化金属引起的沉积速率, 第三项 (具有 $Y(\varphi, E)$) 描述了由于重溅射率引起的沉积速率, 第四项 (具有 B_3) 描述了由于金属的彭宁离子化引起的沉积速率, 第五项 (具有 K_2) 描述了氙的彭宁激发, 第六项 (具有 K_3) 描述了金属和氙之间的电荷交换, $R(\varphi_B)$ 表示反射系数, n_{Ar} 表示背景气体本体密度, $\Theta(H)$ 表示特征结构底部处的中性粒子通量比例, $\Theta(z)$ 表示过孔侧壁处的中性粒子通量比例, A_R 是特征结构的高宽比。

另外, 特征结构内部的主要金属运输是具有高表面碰撞频率的分子模式。在使用条件下, 表面碰撞频率可与本体等离子体碰撞频率相当。此外, 特征结构内部的中性金属的直接沉积可以取决于特征结构内部的位置。

底部比平坦开阔区的覆盖度 $C^{B/FF} = D^B(n_e, n_M)/D^{FF}(n_e, n_M)$ 和侧壁比底部的覆盖度 $C^{SW/B} = D^{SW}(n_e, n_M)/D^B(n_e, n_M)$ 的分析在表 1 和表 2 中示出。在金属密度减小 ($n_M < n_e$) 的情况下, 表面反应预示了特征结构的保形覆盖 $C^{SW/B}(n_e, n_M) \approx 1$, 而不会有悬臂产生。保形覆盖可以在金属密度 n_M 满足条件 $n_M^{critical} < n_M < n_e$, 并且等离子体密度 n_e 满足关系 $n_{e(1)} \leq n_e \leq n_{e(2)}$ 时实现。这里, $n_M^{critical}(U_b, n_e, n_{Ar}, B_1, B_3, K_1, K_2, K_3, R(\varphi_B))$ 是表面速率常数、反射系数、等离子体密度和氙背景压强的复合函数, 并且其可以取决于沉积的实际金属

的物理性质。具体而言，其可以对工艺参数（如衬底处的偏置）是敏感的，作为结果，其使得 $n_M^{critical} \rightarrow n_e$ 。等离子体密度可以由类似的参数以复合的方式确定，包括以特征结构的高宽比作为参数。该模型的最重要结论是对于金属密度和等离子体密度存在间隔或工艺窗口，其中 $C^{B/FF} \approx 1$ 并且

5 $C^{SW/B} \approx 1$ 。

从基于等离子体中的金属比例和向衬底施加的偏置电压的工艺角度看，对于大高宽比特征结构的保形覆盖可以确定出若干工艺窗口（见图 10A 至 10H）。例如，图 10A 至 10H 表示如下的在不同工艺参数下特征结构的侧壁比底部的覆盖度（图示了没有表面碰撞的动力学模型，还图示了

10 具有表面碰撞的动力学模型）和特征结构的底部比平坦开阔区的覆盖度（图示了没有表面碰撞的动力学模型，还图示了具有表面碰撞的动力学模型），即：（10A）没有衬底偏置，低金属密度；（10B）衬底偏置对应于 5% 的重溅射率，低金属密度；（10C）衬底偏置对应于 10% 的重溅射率（相对于沉积速率），低金属密度；（10D）衬底偏置对应于 15% 的重溅

15 射率，低金属密度；（10E）衬底偏置对应于 25% 的重溅射率，金属密度可与等离子体密度相当；（10F）衬底偏置对应于 50% 的重溅射率，金属密度可与等离子体密度相当；（10G）衬底偏置对应于 75% 的重溅射率，金属密度可与等离子体密度相当；和（10H）衬底偏置对应于 100% 的重溅射率，金属密度可与等离子体密度相当。

20 根据一个实施例，用于保形覆盖的工艺窗口包括低偏置功率（对衬底）和 $n_M < 0.1n_e$ 或优选地 $n_M \leq n_{M,critical} < n_e$ （以各种偏置条件在图 10A、B、C、D 中示出）。在该工艺窗口内， $C^{SW/B} \rightarrow 1$ ，并且即使当 $C^{SW/B} \geq 1$ 时，偏置功率的适度增加（重溅射率的增加）也可以增大从保形到过保形的侧壁比底部的覆盖度。总的说来，沉积速率是相对较低的，并且其可以通过增

25 大本体等离子体中的等离子体密度来增大，即， $n_e \rightarrow 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 以及更高。底部比平坦开阔区的覆盖度很低， $C^{B/FF} < 0.2$ ，并且不产生悬臂。

覆盖度 底部/平坦开阔区			
		无表面反应	表面反应
低	C=0	直接离子通量与重 溅射率平衡(悬臂) $n_M \approx \frac{Y(\varphi, E)n_e}{K_1 n_e (1 - R(\varphi))}$	直接离子通量与重溅射率平衡(悬臂) $n_M \approx \frac{Y(\varphi, E)n_e}{K_1 n_e (1 - R(\varphi))}$
保 形	C=1	没有物理解 (悬 臂) $n_M = 0$ $n_e = 0$ $R(\varphi) = 0$	由于到达中性粒子、彭宁离子化和反 射离子通量而引起的金属与彭宁激发 和电荷交换通量平衡 (悬臂) 独立于金属密度而满足条件
		到达离子通量必须 远大于重溅射率 (悬臂) $n_M \gg \frac{Y(\varphi, E)}{K_1 (1 - R(\varphi))}$	到达离子通量必须远大于重溅射率 (悬臂) $n_M \gg \frac{Y(\varphi, E)}{K_1 (1 - R(\varphi))}$
半 保 形	0<C<1	为了满足, 应当产 生基于离子的净沉 积速率 $n_M \geq \frac{Y(\varphi, E)}{K_1 (1 - R(\varphi))}$	基于到达离子的贡献必须大于表面中 性金属生成 (悬臂) $n_M \geq \frac{Y(\varphi, E)}{K_1 (1 - R(\varphi)) - (K_2 + K_3 n_e) n_{Ar}}$
过 保 形	C>1	为了满足, 应当产 生基于离子的净沉 积速率 $n_M \geq \frac{Y(\varphi, E)}{K_1 (1 - R(\varphi))}$	基于到达离子的贡献必须大于表面中 性金属生成, 这是最后一个大于到达 中性粒子通量的项 $n_M > \frac{Y(\varphi, E)n_e}{B_1 + K_1 n_e + B_3 n_e n_{Ar} - [K_2 n_e n_{Ar} + K_3 n_e^2 n_{Ar}]}$
侵 蚀	C<0	相比于重溅射, 耗 尽离子到达通量 (穿透) $n_M < \frac{Y(\varphi, E)}{K_1 (1 - R(\varphi))}$	相比于重溅射, 耗尽离子到达通量 $n_M < \frac{Y(\varphi, E)}{K_1 (1 - R(\varphi))}$

表 1

根据另一个实施例, 用于保形覆盖的工艺窗口包括中等偏置功率 (对

衬底) 和 $0.1 \leq \left| \frac{n_M - n_e}{n_e} \right| \leq 1$ 或优选地 $\frac{n_{M,critical}}{n_e} \leq \left| \frac{n_M - n_e}{n_e} \right| \leq 1$ (以各种偏置条件在图 10E、F、G 中示出)。在该工艺窗口内, $C^{SW/B} \leq 1$, 并且其相当于 $C^{SW/B} \approx C^{B/FF}$ 。沉积速率是合理的。 $C^{SW/B}$ 和 $C^{B/FF}$ 都可由金属源生成速率控制。工艺窗口对于较低偏置较大, 而在较高偏置条件下收缩。悬臂形成速率仍然相对较低。

根据另一个实施例, 用于保形覆盖的工艺窗口包括高偏置功率 (对衬底) 和 $n_M \geq n_e$ (以各种偏置条件在图 10G、H 中示出)。在所述金属密度量级上, 该工艺窗口类似于低偏置功率的第一工艺窗口。

覆盖度 侧壁/底部			
		无表面反应	表面反应
低	$C=0$	没有物理解 $n_M < 0$	没有物理解 $n_M < 0$
保形	$C=1$	没有物理解 $n_M < 0$ 限制解 (有条件的收敛) $n_M \gg n_M^{critical} \left(\frac{flux}{bulk} \right)$ $n_e \gg n_e^{critical} \left(\frac{flux}{bulk} \right)$ $A_R > A_R^{critical} (R(\phi))$	来自底部的反射和重溅射的金属 与通过表面反应在壁处消耗的金属相 同量的金属平衡 $n_M \gg n_M^{critical} \left(\frac{flux_from_bulk}{surf_reactions} \right)$ $n_e \in \langle n_e(1), n_e(2) \rangle$
半保形	$0 < C < 1$	没有物理解 $n_M < 0$	来自底部的反射和重溅射的金属大于 通过表面反应在壁处消耗的金属量 $n_M \gg n_M^{critical} \left(\frac{flux_from_bulk}{surf_reactions} \right)$ $n_e \in \langle n_e(1), n_e(2) \rangle$
过保形	$C > 1$	没有物理解 $n_M < 0$	来自底部的反射和重溅射的金属小于 通过表面反应在壁处消耗的金属量 $n_M > n_M^{critical} \left(\frac{flux_from_bulk}{surf_reactions} \right)$ $n_e \in \langle n_e(1), n_e(2) \rangle$

侵蚀	$C < 0$	没有物理解 $n_M < 0$	没有物理解 $n_M < 0$
----	---------	--------------------	--------------------

表 2

该区域可应用于增强底部覆盖而不影响侧壁覆盖的应用。其还可以与操作在低偏置功率工艺窗口下的工艺相继使用，以便在不产生悬臂结构情况下将优化的侧壁比底部的覆盖度与增强的底部比平坦开阔区的覆盖度相结合。在该工艺窗口中保形性 $C^{SW/B} \rightarrow 0$ 。

根据另一个实施例，用于保形覆盖的工艺窗口包括 $n_M > n_e$ （或者在 $n_M \gg n_e$ 时更为有效），其特征在于由于增加的沉积速率而引起的悬臂形成。该工艺窗口由当前的 PVD 和 iPVD 工艺所使用；然而，由于悬臂，其没有为大高宽比特征结构提供好的覆盖度。

在另一个实施例中，选择工艺条件，使得等离子体密度足够高以允许合理的沉积速率，并且满足条件 $n_e > n_M$ ，例如， $n_e \approx 10^{12} \rightarrow 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 甚至更高。例如，大约 $n_e \rightarrow 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 的等离子体密度可以为纳米量级沉积提供足够的沉积速率 $\sim 10 - 100 \text{ nm/min}$ 。

另外，分布式金属源可以传递满足条件 $n_M < n_e$ 的优化的金属量，该金属在衬底上方的任意位置处被高度离子化，并且减少甚至消除了零星撞击和悬臂的形成。分布式金属源可以提供更高的离子化，因而，通过几何尺寸和操作提供更高的均匀性（小的金属源较少地耦合到等离子体源）。

另外，另一种工艺条件包括 $n_{\text{metal}}/n_e = \text{const} \leq 1$ 和 $n_M \geq n_M^{\text{critical}}$ 。维持整个衬底上方金属密度对等离子体密度的恒定比值可以提供用于保形覆盖模式内的表面反应的条件，从而可以实现整个衬底上的特征结构或结构的均匀覆盖。

根据上述动力学模型的结果，一种用于最优特征结构覆盖的工艺方案可以包括从第一（低偏置功率）和第三工艺窗口中提取的条件。例如，可以通过低金属源生成，并将衬底偏置从无偏置状况改变为中等偏置状况（例如，使偏置功率脉冲化）来提供该工艺方案。对于密度为若干 10^{12} cm^{-3} 、压强从 30 到 100 mTorr 的典型的 ICP 等离子体（使用离子化金属

进行 300 mm 晶片的金属化)， $\leq 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 的金属密度（例如，这可以通过从 DC 电源传送到标靶的 1-4 kW 来实现）可被认为是足够低的以操作在表面碰撞模式中，例如在第一或第三工艺窗口内。在这些条件下，衬底偏置在工艺期间可以具有两个水平，这两个水平都落在从无偏置衬底夹持器到其水平对应于在小于无偏置沉积速率的 20% 的平坦开阔区处的净沉积速率的偏置衬底夹持器的范围内。例如，衬底偏置功率的范围可以从 0 W 到几百 W。

另一种工艺方案包括操作在中等偏置条件下（即，第二工艺窗口，中等偏置功率），并且金属源生成被预设遵守条件 $\frac{n_{M, \text{critical}}}{n_e} \leq \left| \frac{n_M - n_e}{n_e} \right| \leq 1$ ，或者换句话说，金属密度接近于等离子体密度的范围。例如，平坦开阔区处的净沉积速率处于无偏置条件下的沉积速率的 50% 到 80% 的范围内（例如，衬底偏置功率范围从约 300 W 到 800 W）。另外，例如，提供给标靶的 DC 功率可以范围从约 2 到 6 kW，以便生成可与等离子体密度相当的总金属密度。

尽管上面只详细描述了本发明的某些示例性实施例，但是本领域技术人员将会容易地意识到，可以在示例性实施例中进行许多修改，而不实质上脱离本发明的新颖教导和优点。因此，所有这些修改都应当被包括在本发明的范围内。

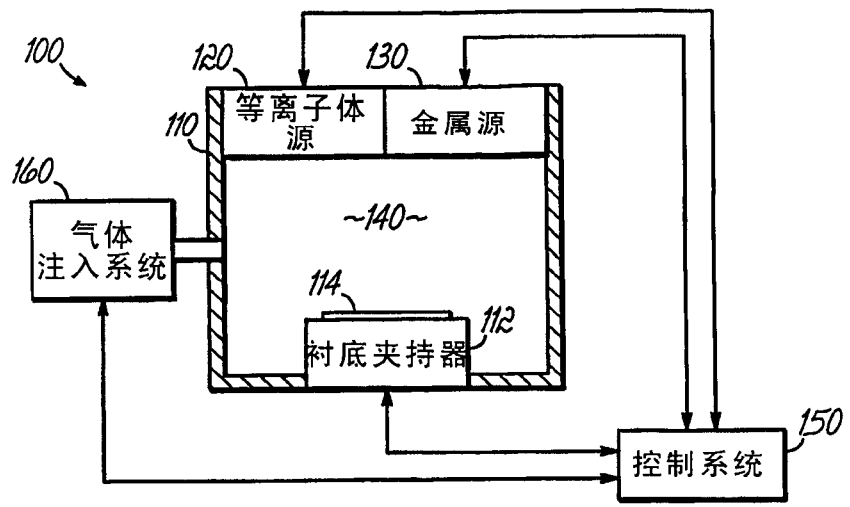


图1

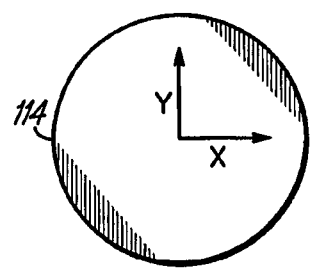


图2

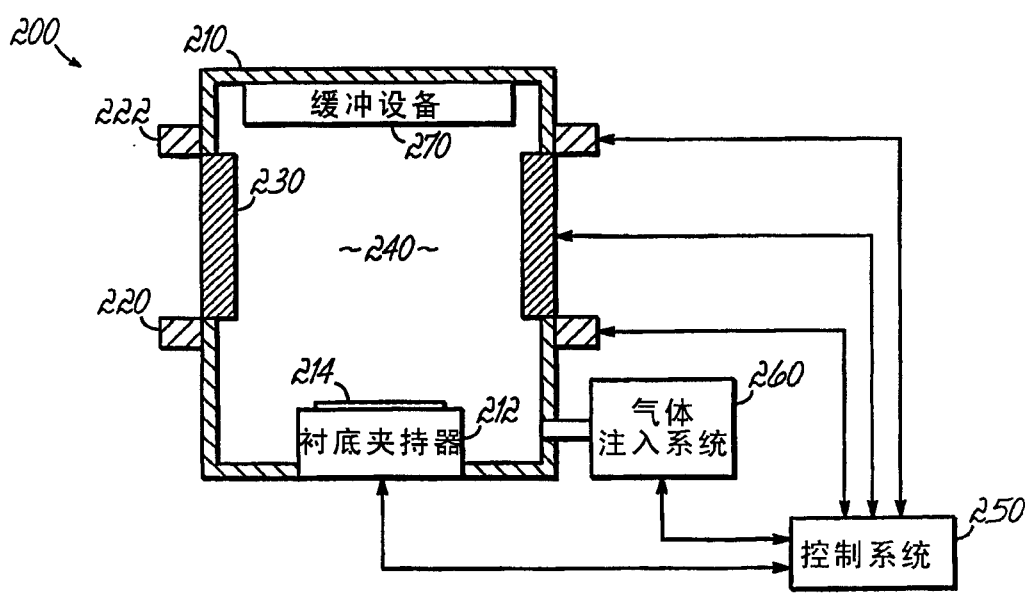


图3A

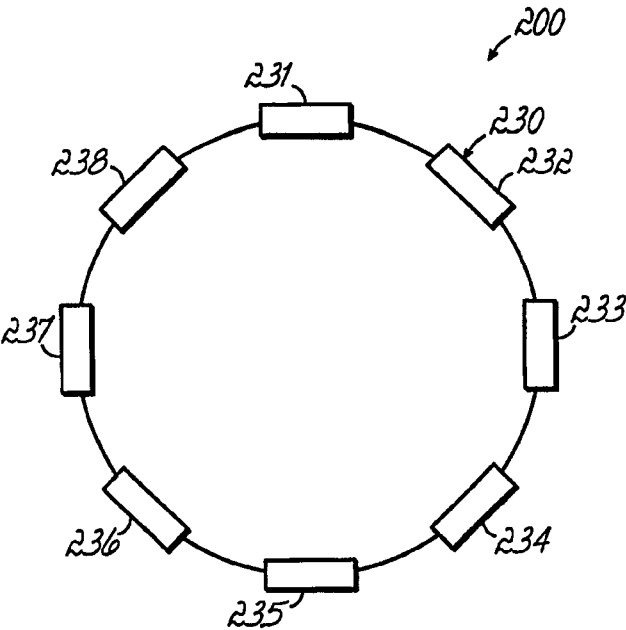


图3B

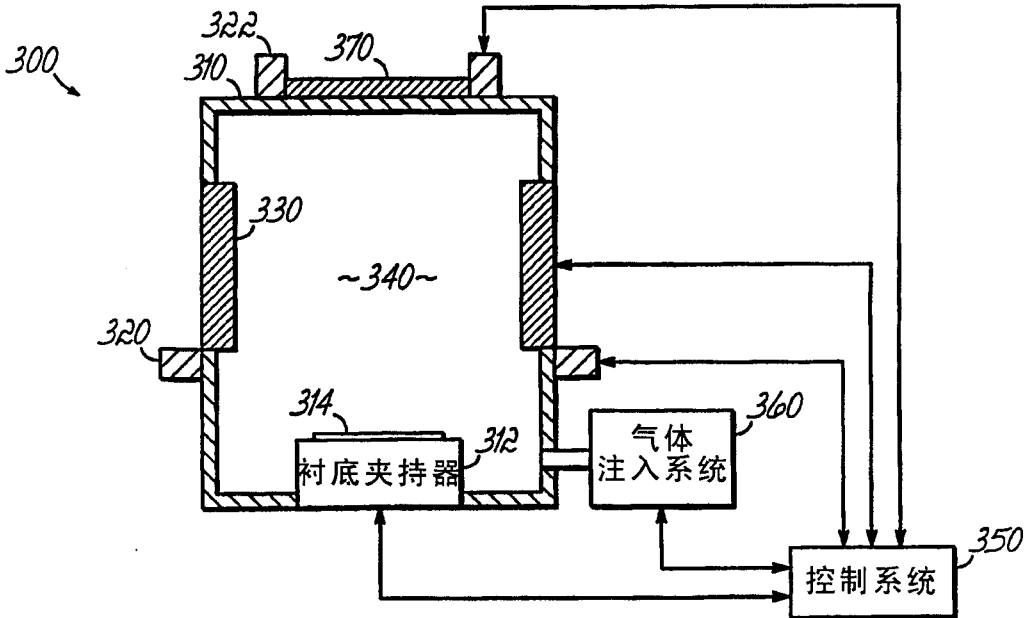


图4

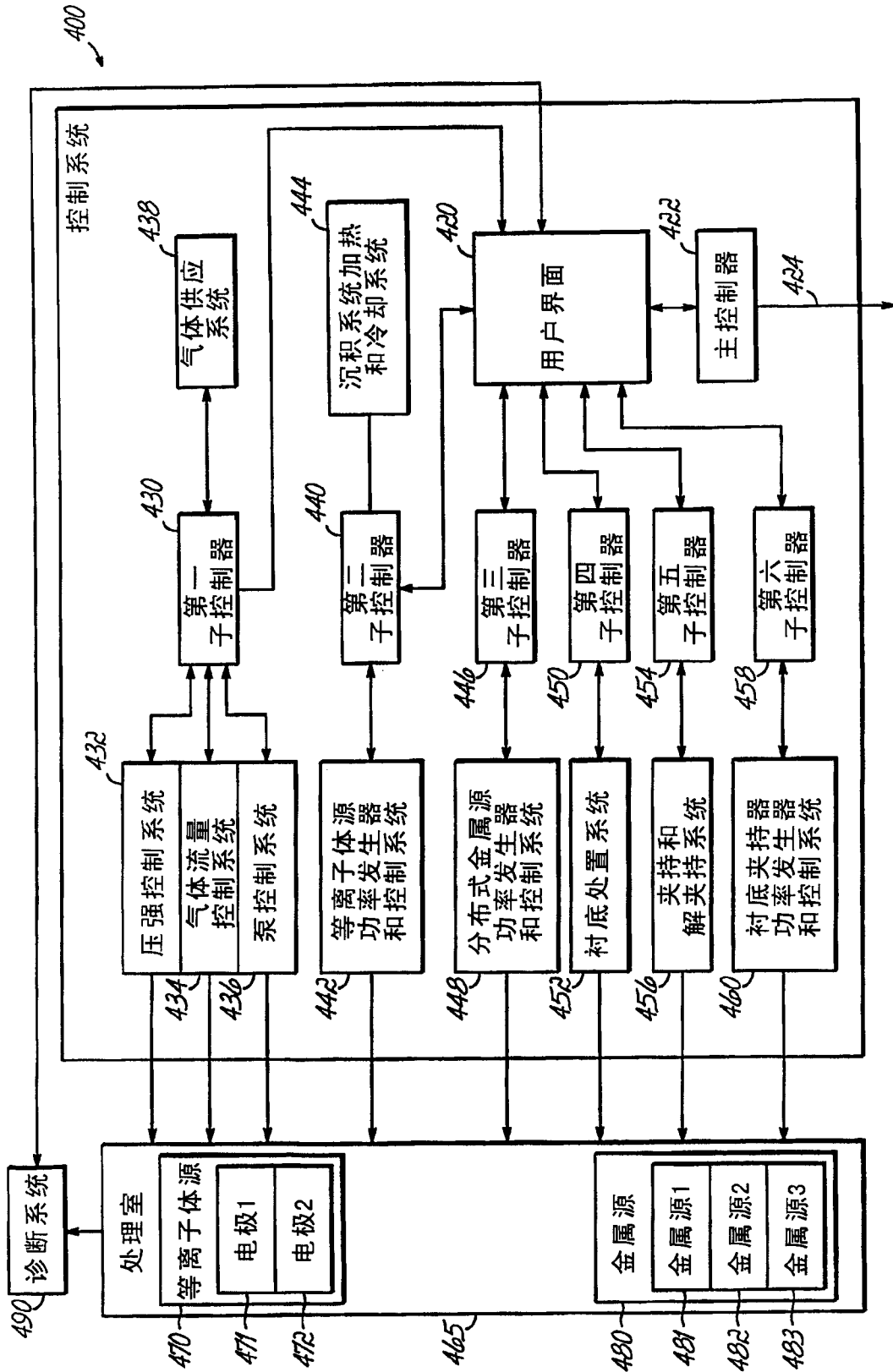


图5

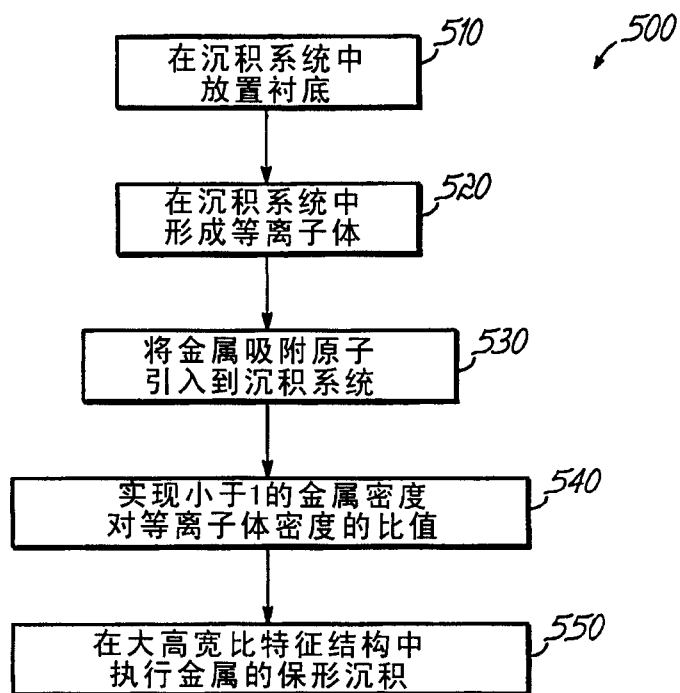


图6

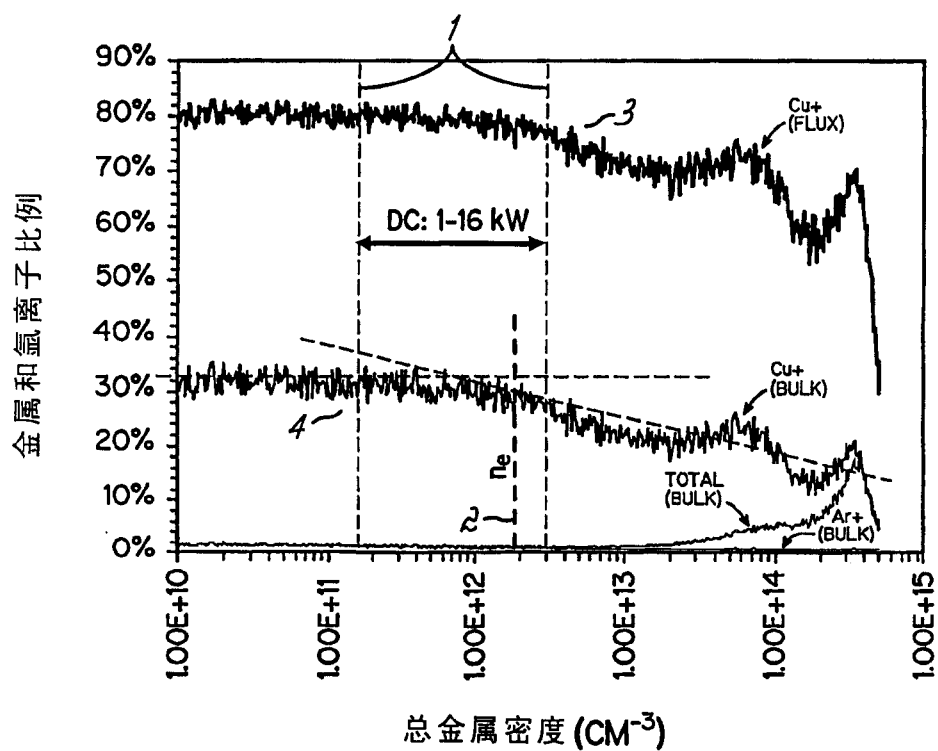


图7

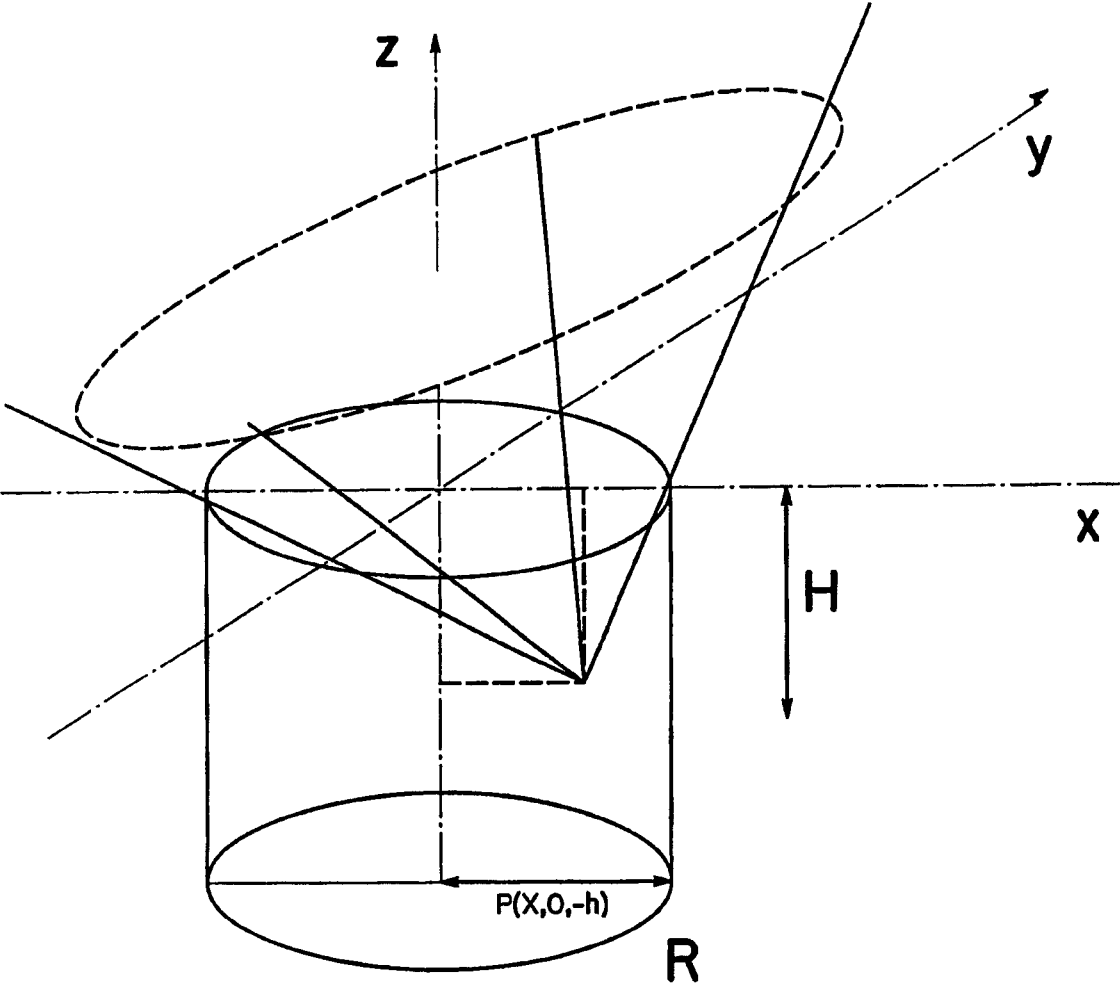


图8A

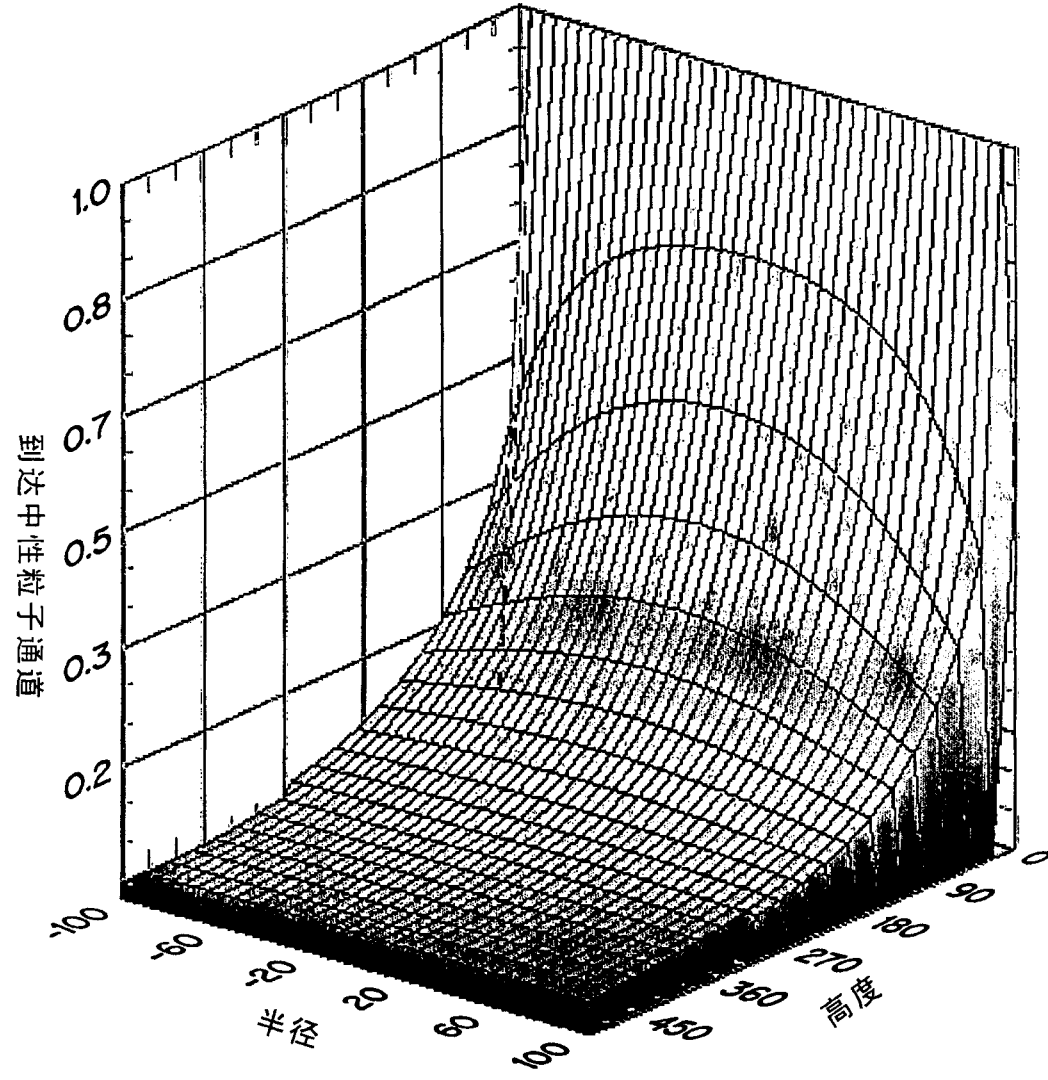


图8B

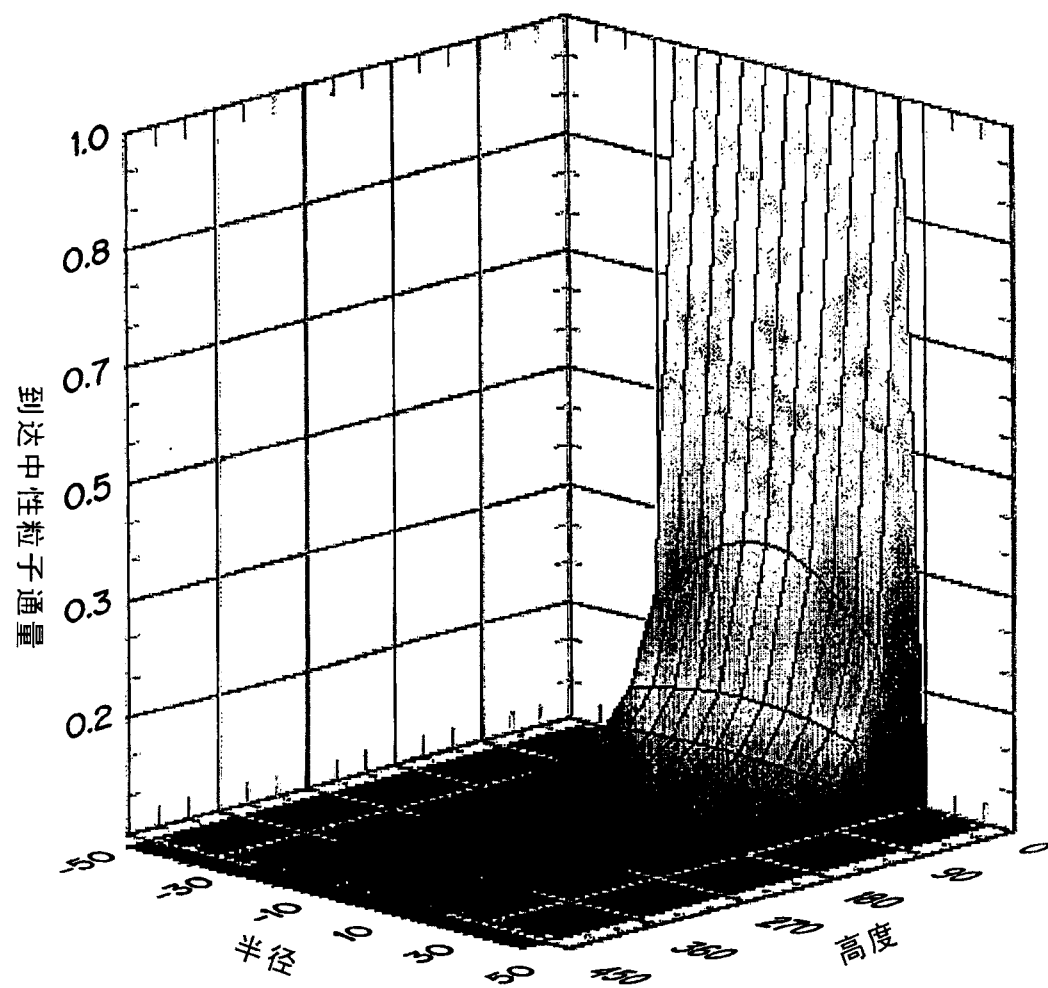


图8C

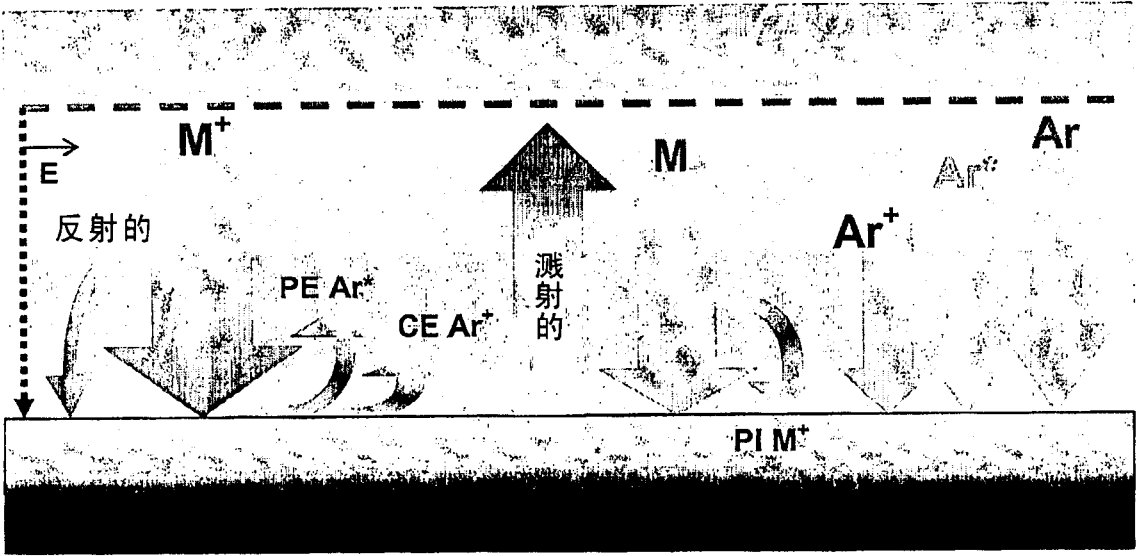


图9A

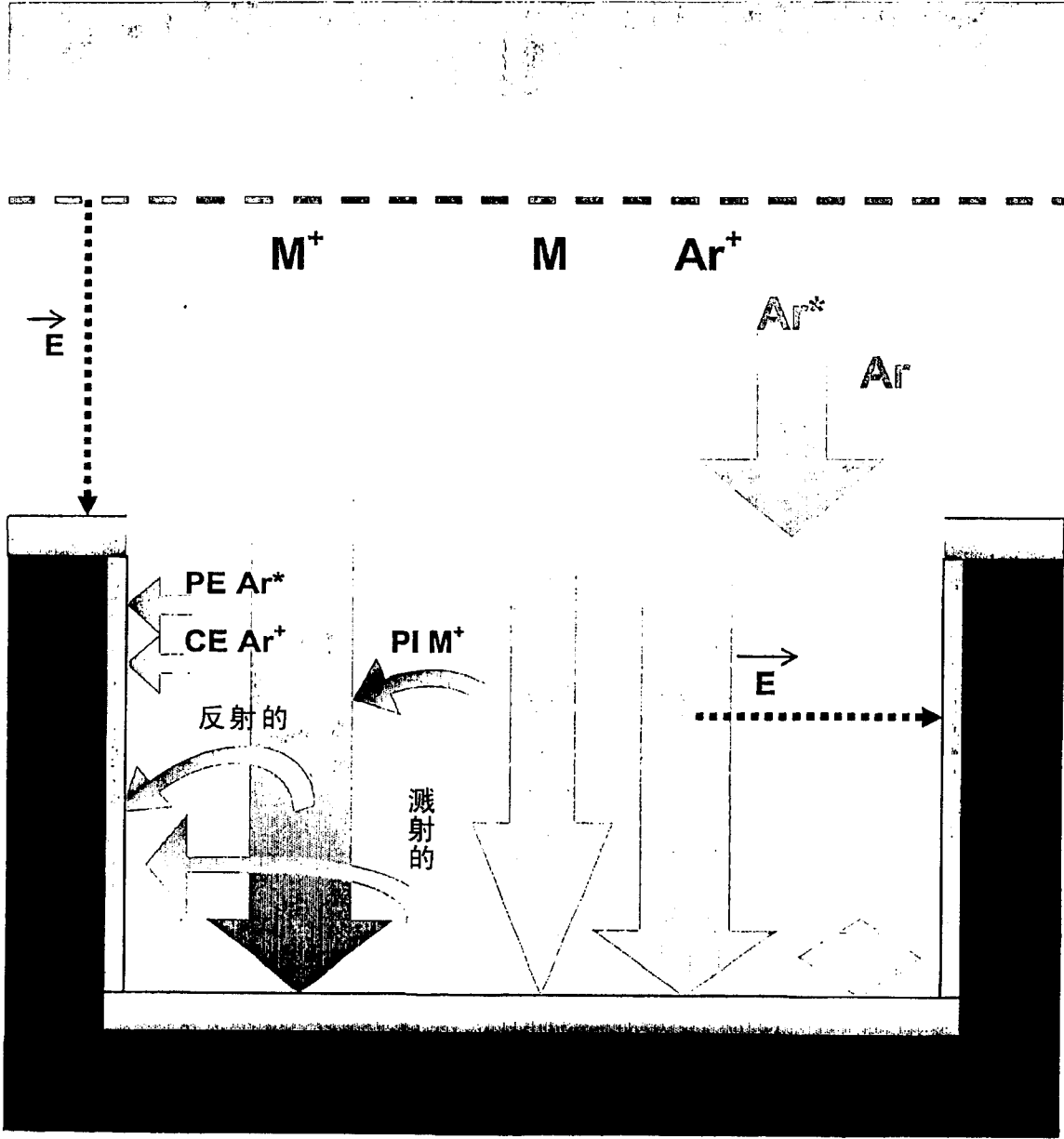


图9B

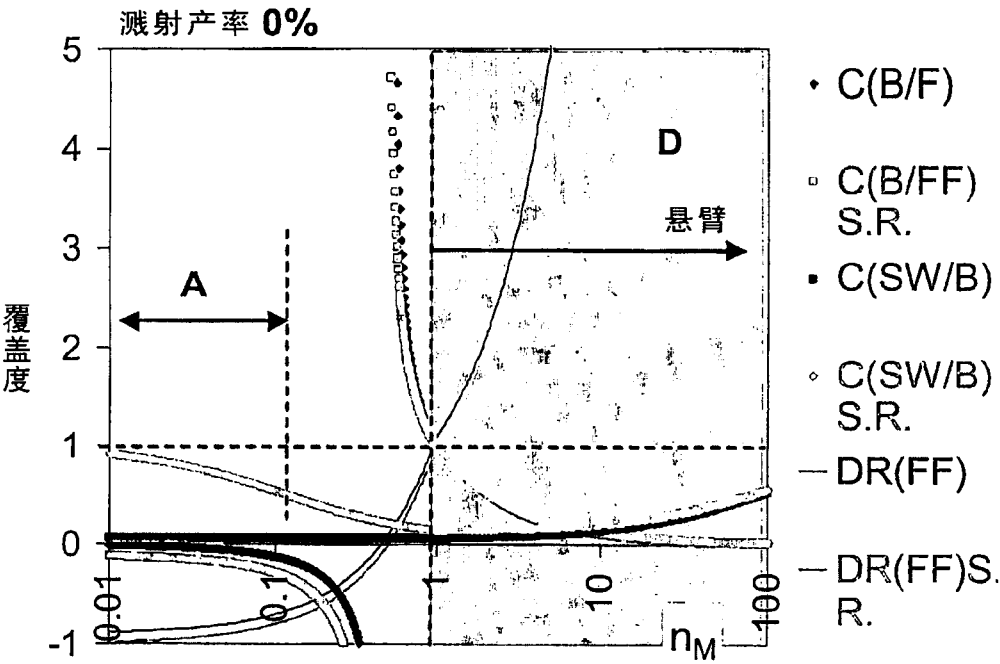


图10A

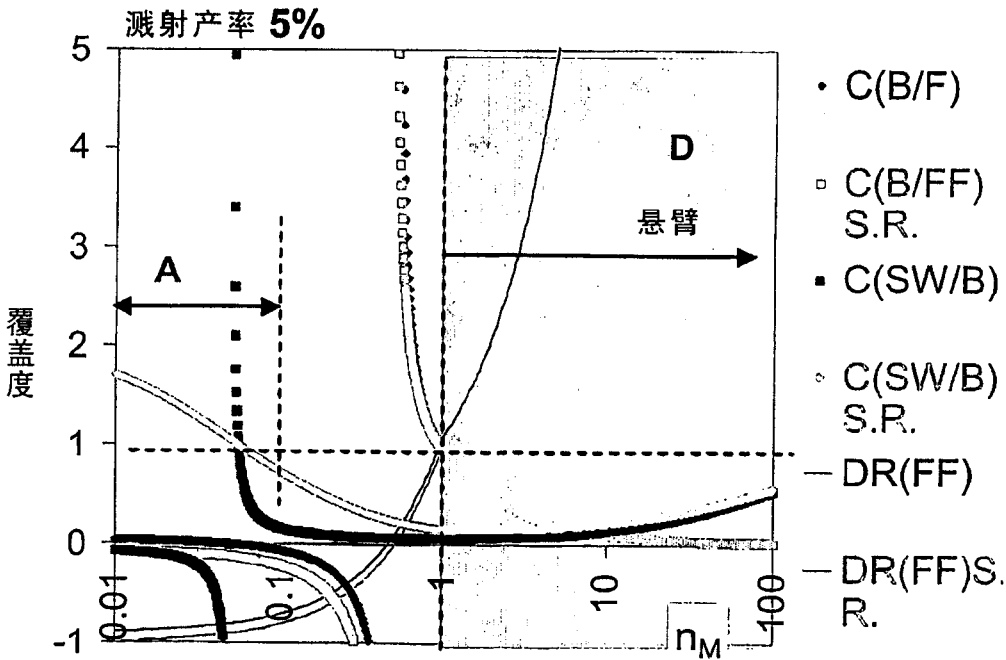


图10B

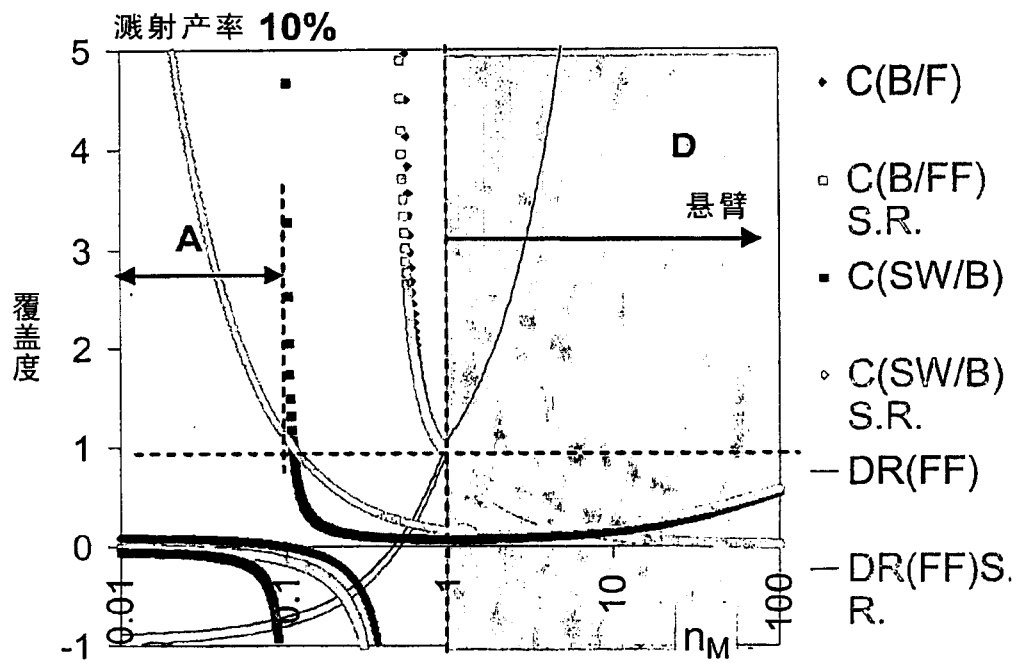


图10C

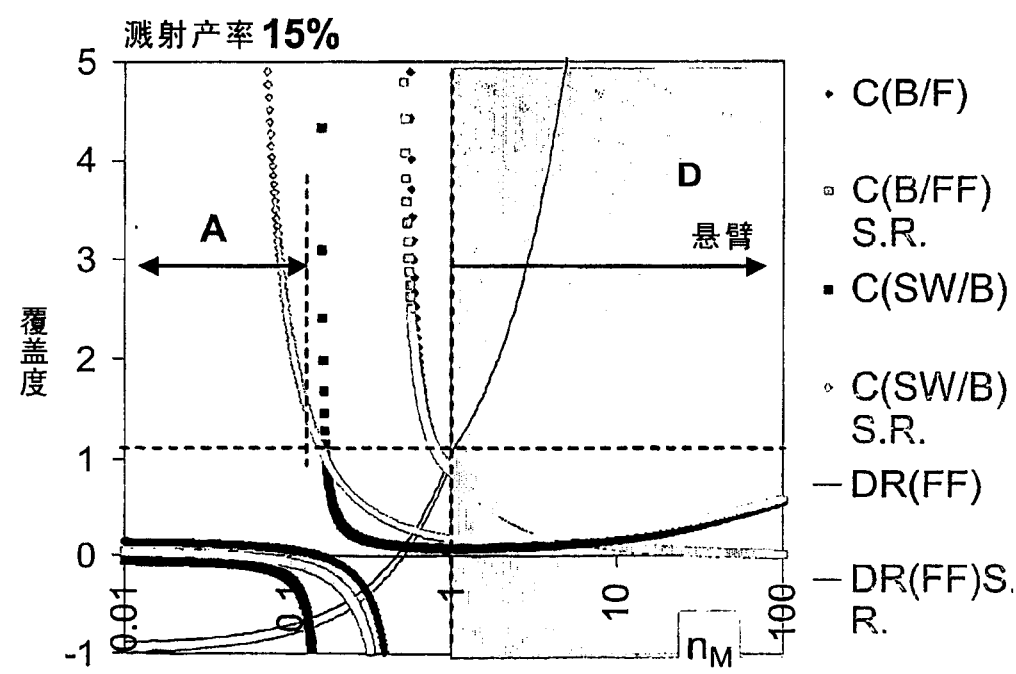


图10D

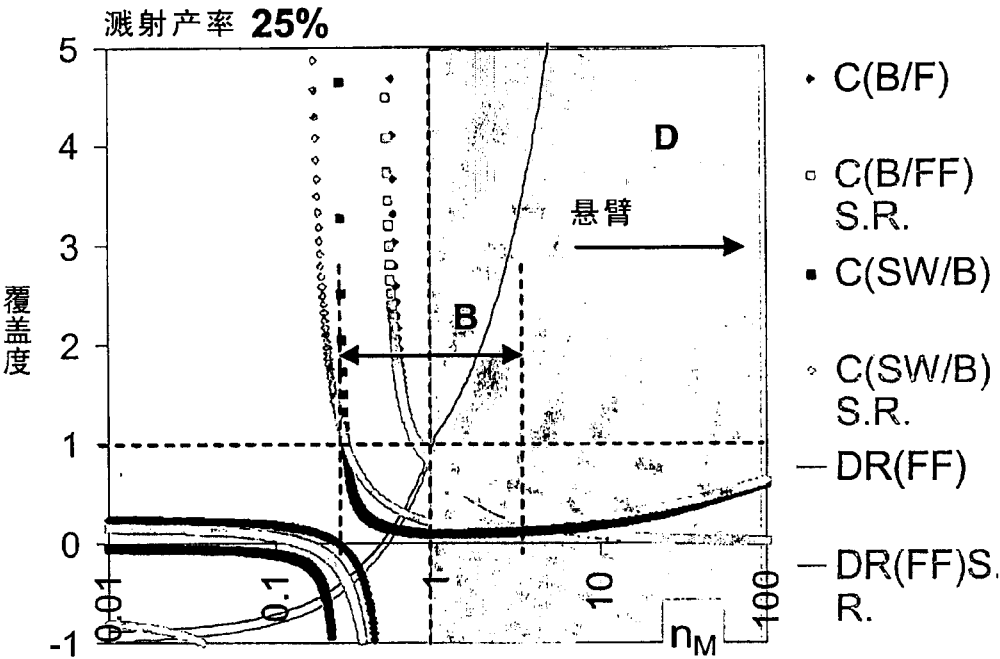


图10E

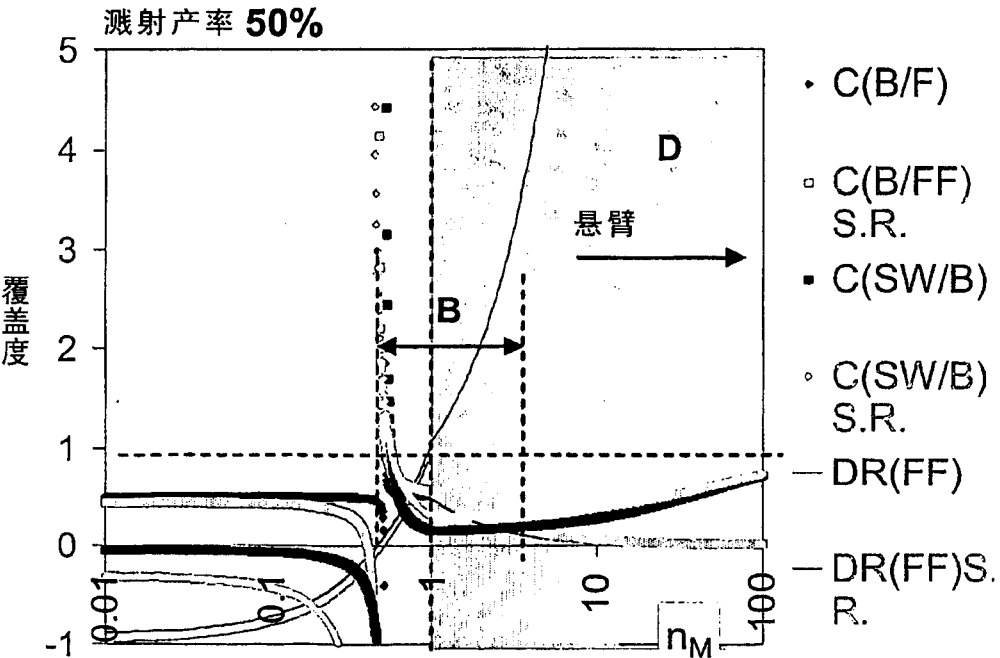


图10F

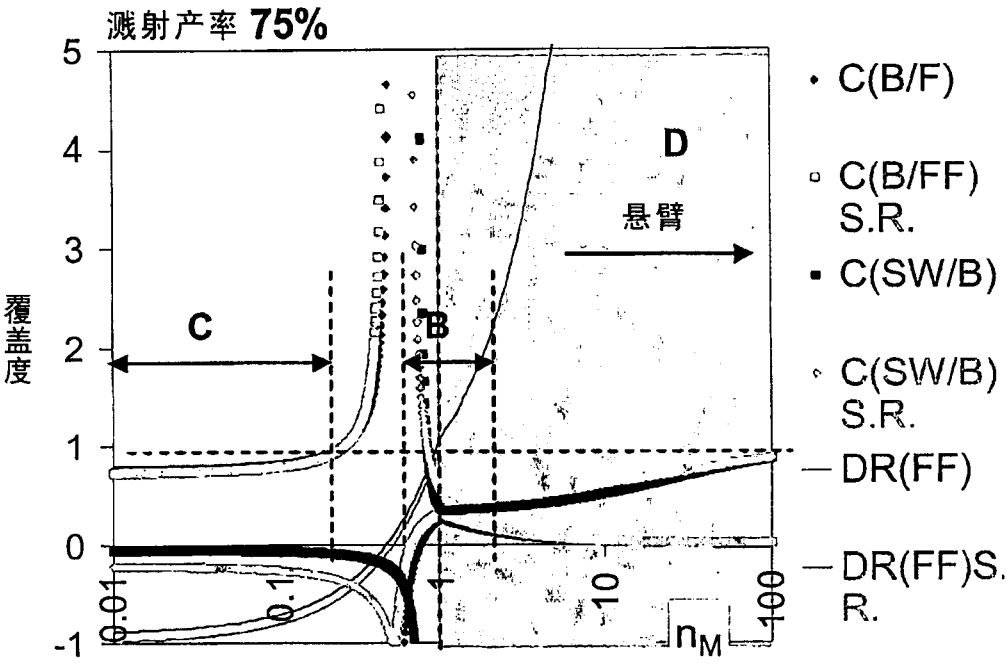


图10G

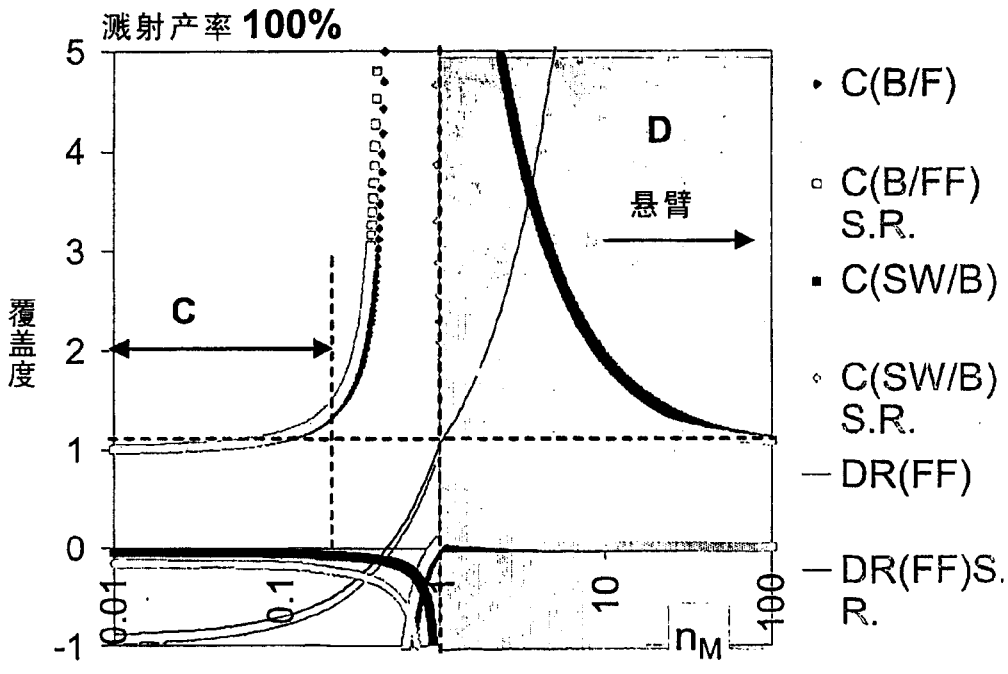


图10H

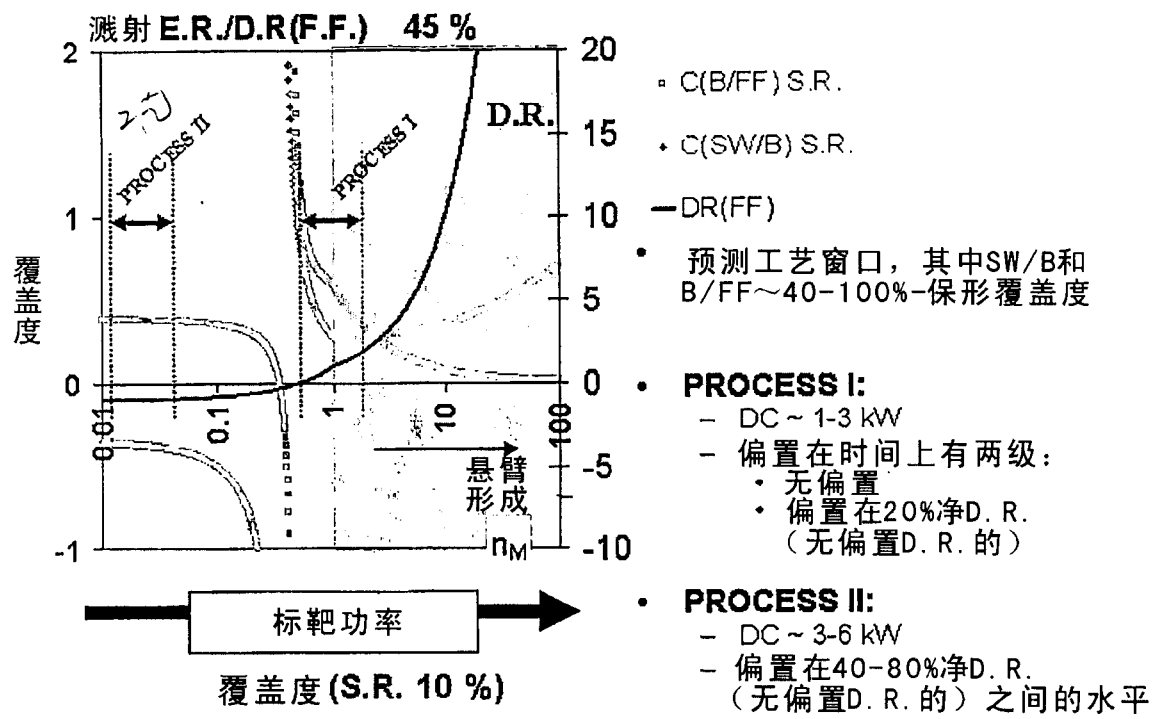


图11

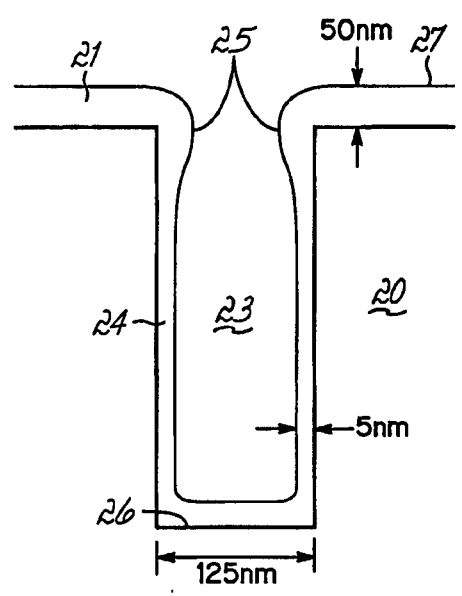


图12A
(现有技术)

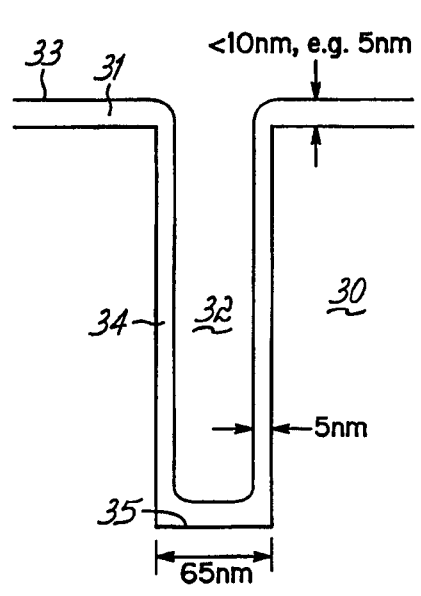


图12B