



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104105655 A

(43) 申请公布日 2014. 10. 15

(21) 申请号 201280068948. X

(22) 申请日 2012. 12. 17

(30) 优先权数据

61/576, 455 2011. 12. 16 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2014. 08. 04

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2012/070048 2012. 12. 17

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/090887 EN 2013. 06. 20

(71) 申请人 康奈尔大学

地址 美国纽约州

(72) 发明人 A·拉尔 K·阿姆庞萨

(74) 专利代理机构 北京万慧达知识产权代理有

限公司 11111

代理人 戈晓美 杨颖

(51) Int. Cl.

B81B 3/00 (2006. 01)

B81C 1/00 (2006. 01)

B81B 7/00 (2006. 01)

G01N 37/00 (2006. 01)

G01B 21/30 (2006. 01)

G01Q 70/00 (2006. 01)

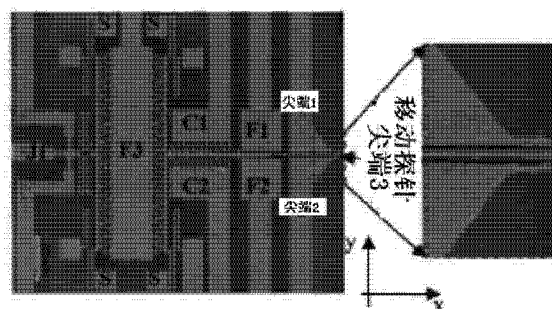
权利要求书3页 说明书12页 附图17页

(54) 发明名称

集成有运动传感器的纳米探针 N/MEMS 装置、
方法和应用

(57) 摘要

本申请公开了一种多尖端纳米探针装置, 和一种在使用多尖纳米探针装置的同时用于探测样品的方法, 其均使用位于衬底上的: (1) 相对于衬底的不可移动的探针尖端; (2) 相对于衬底的可移动的探针尖端; 以及 (3) 与可移动的探针尖端耦接的运动传感器。由于运动传感器与可移动的探针尖端的紧密耦接以及可移动探针尖端相对于不可移动探针尖端的可缩进性, 这种多尖端纳米探针装置和相关方法提供了改进的样品探测。



1. 一种探针装置,包括:

衬底;

位于所述衬底上方的至少一个可移动的探针尖端,所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于所述衬底移动;以及

位于所述衬底上方的至少一个运动传感器,所述至少一个运动传感器包括与至少一个弹簧可操作地耦接的至少一个压敏部件,所述至少一个运动传感器与所述至少一个可移动的探针尖端相耦接。

2. 根据权利要求1所述的探针装置,其特征在于,还包括也位于所述衬底上方的至少两个不可移动的探针尖端,所述至少两个不可移动的探针尖端不能够相对于所述衬底移动,并且与所述可移动的探针尖端相分离。

3. 根据权利要求1所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端:相对于所述衬底是能够自由移动的;以及

具有从约30到约500微米的长度,和从约300到约1000纳米的横向尺度,并且悬空在所述衬底上方。

4. 根据权利要求1所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端具有相对于所述衬底的从约30度到约60度的角度。

5. 根据权利要求1所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个运动传感器包括场效应器件和至少一个弹簧。

6. 根据权利要求5所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个运动传感器包括所述场效应器件的沟道区域和所述至少一个弹簧。

7. 根据权利要求1所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个运动传感器通过至少一个执行器与所述至少一个可移动的探针尖端相耦接。

8. 一种探针装置,包括:

衬底;

位于所述衬底上方的至少一个不可移动的探针尖端,所述至少一个不可移动的探针尖端不能够相对于所述衬底移动;以及

位于所述衬底上方的至少一个可移动的探针尖端,所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于所述衬底移动。

9. 根据权利要求8所述的探针装置,其特征在于:

所述至少一个不可移动的探针尖端和所述至少一个可移动的探针尖端指向同一个方向;以及

所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于所述至少一个不可移动的探针尖端缩进。

10. 根据权利要求8所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端可相对于所述至少一个不可移动的探针尖端偏移。

11. 根据权利要求8所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端:相对于所述衬底是能够自由移动的;以及

具有从约30到约500微米的长度和从约300到约1000纳米的横向尺度。

12. 根据权利要求8所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端具有相对于所述衬底的从约30度到约60度的角度。

13. 一种探针装置,包括:

衬底;

位于所述衬底上方的至少一个不可移动的探针尖端,所述至少一个不可移动的探针尖端不能够相对于所述衬底移动;

位于所述衬底上方的至少一个可移动的探针尖端,所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于所述衬底移动;以及

位于所述衬底上方的、并且与所述至少一个可移动的探针尖端相耦接的至少一个运动传感器。

14. 根据权利要求 13 所述的探针装置,其特征在于:

所述至少一个不可移动的探针尖端和所述至少一个可移动的探针尖端指向同一方向;以及

所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于所述至少一个不可移动的探针尖端缩进和伸长。

15. 根据权利要求 13 所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端可相对于所述至少一个不可移动的探针尖端偏移。

16. 根据权利要求 13 所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端:相对于所述衬底是可自由移动的;以及

具有从约 30 到约 500 微米的长度和从约 300 到约 1000 纳米的横向尺度,并且悬空在所述衬底上方。

17. 根据权利要求 13 所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端:具有相对于所述衬底的从 30 到约 60 度的角度;

所述至少一个可移动的探针尖端具有小于约 1 纳米的曲率半径;以及

所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于所述至少一个不可移动的探针尖端作椭圆运动。

18. 根据权利要求 13 所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个运动传感器包括场效应器件和至少一个弹簧。

19. 根据权利要求 18 所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个运动传感器包括所述场效应器件的沟道区域和所述至少一个弹簧。

20. 根据权利要求 13 所述的探针装置,其特征在于,所述至少一个运动传感器通过至少一个执行器与所述至少一个可移动的探针尖端相耦接。

21. 一种探测方法,包括:

将探针装置中的至少一个可移动的探针尖端相对于样品放置,所述探针装置包括:衬底;

位于所述衬底上方的至少一个可移动的探针尖端,所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于所述衬底移动;以及

位于所述衬底上方的至少一个运动传感器,所述至少一个运动传感器包括与至少一个弹簧可操作地耦接的至少一个压敏部件,所述至少一个运动传感器与所述至少一个可移动的探针尖端相耦接;以及

在测量所述至少一个运动传感器输出信号的同时,相对于所述样品移动所述至少一个

可移动的探针尖端。

22. 根据权利要求 21 所述的方法,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端:
相对于所述衬底是可自由移动的;以及

具有从约 30 到约 500 微米的长度,和从约 300 到约 1000 纳米的横向尺度,并且悬空在所述衬底上方。

23. 根据权利要求 21 所述的方法,其特征在于,所述至少一个运动传感器通过至少一个执行器与所述至少一个可移动的探针尖端相耦接。

24. 一种探测方法,包括:

将探针装置中的至少一个可移动的探针尖端相对于样品放置,所述探针装置包括:
衬底;

位于所述衬底上方的至少一个不可移动的探针尖端,所述至少一个不可移动的探针尖端不能够相对于所述衬底移动;

位于所述衬底上方的至少一个可移动的探针尖端,所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于所述衬底移动;以及

位于所述衬底上方的、并且与所述至少一个可移动的探针尖端相耦接的至少一个运动传感器;以及

在测量所述至少一个运动传感器输出信号的同时,相对于所述样品移动所述至少一个可移动的探针尖端。

25. 根据权利要求 24 所述的方法,其特征在于,所述至少一个可移动的探针尖端:
相对于所述衬底是可自由移动的;以及

具有从约 30 到约 500 微米的长度,和从约 300 到约 1000 纳米的横向尺度,并且悬空在所述衬底上方。

26. 根据权利要求 24 所述的方法,其特征在于,所述至少一个运动传感器通过至少一个执行器与所述至少一个可移动的探针尖端相耦接。

集成有运动传感器的纳米探针 N/MEMS 装置、方法和应用

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请涉及于 2011 年 12 月 16 日提交的、名称为“纳米探针执行器 (Nano Probe Actuator)”的序号为 61/576,455 的美国专利临时申请,并且要求该申请的优先权,该申请的内容被通过引用方式全部并入于本申请。

[0003] 政府权益陈述

[0004] 形成本申请所述实施例以及在本申请中要求保护的发明的研究是由美国国家科学基金会基于合作协议 DMR 1120296 进行资助的。美国政府对于在本申请中要求保护的发明具有权益。

技术领域

[0005] 本发明总体涉及纳米尺度的微机电系统 (N/MEMS) 装置和相关方法。更具体地,实施例涉及集成有运动驱动 (actuation) 和传感器的纳米尺度的微机电系统 (N/MEMS) 装置和相关方法。

背景技术

[0006] 基于纳米探针尖端的纳米制造工艺常常需要精确地放置多个纳米探针尖端。同样地,基于纳米探针尖端的纳米测量装置也可以通过原子力显微镜 (AFM) 传感方法或扫描隧道显微镜 (STM) 传感方法来感测被接触的实体表面。由于纳米制造工艺应用和纳米测量装置有可能继续增多,需要另外的基于纳米探针尖端的装置、相关方法和相关应用。

发明内容

[0007] 本申请的实施例包括具有集成 JFET (结型场效应晶体管) 作为预放大器的、用于基于探针尖端感测的多尖端纳米探针装置。由于电容性换能器被缩小到纳米尺度,因此它们的阻抗 ($1/j\omega C$) 大大地增加,这使得它们容易受到寄生电容、RF 噪声以及来源于局部静电场和 RF 电场的电荷耦合的影响。由于噪声耦合的问题,以往针对集成扫描系统所作的工作成果欠佳,这是因为需要连接到芯片外电子装置的连线增加了显著的 RF 耦合噪声。

[0008] 因此,本申请的实施例提供带有被紧凑地集成在纳米探针装置内 JFET 的、多尖端纳米探针装置,用来实现局部信号测量,包括差分测量。JFET 器件被单片集成在 N/MEMS 装置上,以减小寄生电路元件、信号和失配的影响。JFET 还针对低噪声操作提供了片上增益和阻抗变换。由于 JFET 的低 $1/f$ 噪声、高增益、制造中较少的掩模版数量、不存在寄生二极管、以及对于静电放电的不敏感性, JFET 是用于 N/MEMS 信号传导的理想候选。

[0009] 在一些实施例中,其位置可相对于衬底自由移动的纳米探针尖端 (即,纳米探针尖端不附着于衬底) 通过静电能量维持间隙 (electrostatic energy sustaining gap) 耦接到 JFET 电极,并可以两种方式被 JFET 感测。第一,在 JFET 上的静电力在沟道中引起应变,该应变趋向于改变 JFET 的沟道载流子迁移率。第二,纳米探针装置的探针臂上耦合的电荷在 JFET 的一个栅极上产生浮动电位,该浮动电位将晶体管沟道电流调制为可被测量

的信号。

[0010] 在一些实施例中,可自由移动的纳米探针还通过曲折弹簧(meander spring)耦接到 JFET 电极,从而相对于可自由移动的纳米探针尖端位置和运动而言,JFET 和曲折弹簧一起可被看作为运动传感器。

[0011] 如上所述,在一些实施例中,“可自由移动的”纳米探针尖端是指没有附着于衬底的探针尖端。

[0012] 在一些实施例中和在权利要求中,使用关于衬底上方的两层或两个结构的术语“上方”用于表示两层或两个结构重叠的空间和平面布置,但两层或两个结构不一定接触。相反地,使用关于衬底上方的两层或两个结构的术语“上面”是指这两层或两个结构重叠的空间和平面布置,并且这两层或两个结构相接触。

[0013] 在一些实施例中和在权利要求中,希望所有的层和结构位于并形成在单个衬底上方。

[0014] 在一些实施例中和在权利要求中,使用关于运动传感器的部件的术语“耦接”或“可操作地耦接”,或者关于运动传感器的可移动探针尖端的耦接,是指电的、机械的、机电的或其它类型的连接,这些连接采用了提供所需的并可操作的信号结果的方式。

[0015] 在一些实施例中和在权利要求中,关于运动传感器的术语“压敏部件”也意味着包括在单位面积情况下的力敏感部件,其操作因此通常源于压力灵敏度的操作。

[0016] 在一些实施例中和在权利要求中,关于至少一个可移动的探针尖端和至少一个不可移动的探针尖端的“指向相同的方向”是指名义上相同的方向,并且考虑到一组不可移动的探针尖端和可移动的探针尖端中任意一个尖端相对于其他尖端的偏移。

[0017] 根据这些实施例的具体纳米探针装置包括衬底。这个具体的纳米探针装置还包括位于衬底上方的至少一个可移动的探针尖端。所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于衬底移动。这个具体的纳米探针装置还包括位于衬底上方的至少一个运动传感器。所述至少一个运动传感器包括与至少一个弹簧可操作地耦接的至少一个压敏部件。所述至少一个运动传感器可以与所述至少一个可移动的探针尖端可操作地耦接。

[0018] 根据这些实施例的另一个具体的纳米探针装置包括衬底。这个另外的具体纳米探针装置还包括位于衬底上方的至少一个不可移动的探针尖端。所述至少一个不可移动的探针尖端不能够相对于衬底移动。这个另外的纳米探针装置还包括位于衬底上方的至少一个可移动的探针尖端。所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于衬底移动。

[0019] 根据这些实施例的再一个具体纳米探针装置包括衬底。这个另外的具体纳米探针装置还包括位于衬底上方的至少一个不可移动的探针尖端。所述至少一个不可移动的探针尖端不能够相对于衬底移动。这个另外的纳米探针装置还包括位于衬底上方的至少一个可移动的探针尖端。所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于衬底和相对于不可移动的探针尖端移动。这个具体的纳米探针装置还包括位于衬底上方的、并与所述至少一个可移动探针尖端相耦接的至少一个运动传感器。

[0020] 根据这些实施例的具体探测方法包括相对于样品放置探针装置中的至少一个可移动的探针尖端,所述探针装置包括:(1) 衬底;(2) 位于衬底上方的至少一个可移动的探针尖端,所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于衬底移动;以及(3) 位于衬底上方的至少一个运动传感器,所述至少一个运动传感器包括至少一个压敏部件和至少一个弹簧,

所述至少一个运动传感器与至少一个可移动的探针尖端可操作地耦接。这个具体探测方法还包括在测量所述至少一个运动传感器输出信号的同时,使得所述至少一个可移动的探针尖端相对于样品移动。

[0021] 根据这些实施例的另一个具体探测方法包括相对于样品放置探针装置中的至少一个可移动的探针尖端,所述探针装置包括:(1)衬底;(2)位于衬底上方的至少一个不可移动的探针尖端,所述至少一个不可移动的探针尖端不能够相对于衬底移动的;(3)位于衬底上方的至少一个可移动的探针尖端,所述至少一个可移动的探针尖端能够相对于衬底移动;以及(4)位于衬底上方的至少一个运动传感器,其与所述至少一个可移动的探针尖端可操作地耦接。这个另外的具体方法还包括在测量所述至少一个运动传感器输出信号的同时,使得所述至少一个可移动的探针尖端相对于样品移动。

附图说明

[0022] 实施例的目的、特征和优点可以在下述具体实施方式的内容中理解。具体实施方式可以在附图的内容中理解,附图构成了本公开的重要部分,其中:

[0023] 图1显示根据实施例的带有探针、JFET、曲折部和限位器(S)的多尖端纳米探针装置的平面视图,限位器限制了执行器F3的外部梳状部分的运动;

[0024] 图2显示:(A)带有曲折弹簧的JFET的SEM显微图;以及(B)按照本发明的多尖端纳米探针装置的侧视SEM显微图;

[0025] 图3显示根据实施例的多尖端纳米探针装置中JFET沟道的压电应变的驱动和感测的示意图,图3还显示了JFET的掺杂分布;

[0026] 图4显示根据实施例的多尖端纳米探针装置中探针尖端和JFET曲折弹簧(k2)位移的COMSOL仿真,探针尖端可以沿x和y轴移动;

[0027] 图5显示图4中模型的COMSOL仿真结果,在F3处18伏的驱动电压在可移动探针尖端处产生120nm的位移,而在晶体管曲折部处产生15.5nm的位移。曲折部和可移动探针尖端以相反的方向移动;

[0028] 图6显示在F3处施加的、呈斜坡形的扫描电压,由于ac运动造成的位移电流被在可移动探针尖端与F3之间进行测量;

[0029] 图7显示JFET的测量 I_{DS} 相对于 V_{DS} 的输出曲线, V_{gate2} 是浮动的,而 V_{gate1} 随 V_{G1} 变化而变化;

[0030] 图8显示在 $V_{DS} = 10V$ 的偏置下,根据实施例的JFET的转移曲线,其中 I_{on}/I_{off} 比值是126;

[0031] 图9显示在施加驱动电压时探针尖端与JFET晶体管的运动,JFET能够感测可移动的探针尖端的运动,在JFET上感应的浮动电位和应变调制了漏极电流,对于这些实验, V_{gate1} 被设置在0伏;

[0032] 图10显示在可移动探针尖端与钨样品之间所测量的接触电流是低的,它可能是由于在可移动探针尖端处形成了氧化物或者是由于可移动探针尖端的高串联电阻值;

[0033] 图11显示当用来自离子枪的固定离子束切割样品时,探针尖端样品相对于离子枪的位置是52度;

[0034] 图12显示在FIB切割之前的探针尖端,其中顶层是 $MoSi_2$;

- [0035] 图 13 显示被暴露于离子束的具有 MoSi_2 的探针尖端的 FIB 切割；
- [0036] 图 14 显示在被暴露于离子束的具有 MoSi_2 的探针尖端的 FIB 切割后,可移动探针尖端的侧视图,其中 MoSi_2 形成这个器件的隧道尖端。
- [0037] 图 15 显示在 FIB 切割后可移动探针尖端的侧视图,其中 MoSi_2 由 300nm 的 SiO_2 保护；
- [0038] 图 16 显示用于对根据实施例的多尖端纳米探针装置内的可移动探针尖端进行谐振频率测量的电装置；
- [0039] 图 17 显示在 $1.9\text{e-}3\text{mbar}$ 压力的真空下可移动探针尖的谐振频率测量结果；
- [0040] 图 18 显示 PCB 板上的、根据实施例所组装的 NEMS 探针,该 PCB 板最终被安装在 JEOL SPM 系统中,HOPG 样品放在 N/MEMS 探针下方；
- [0041] 图 19 显示 (A) 使用市场上销售的 Pt-Ir 尖端扫描 HOPG 样品 ;和 (B) 使用根据实施例的 N/MEMS 探针扫描 HOPG 样品；
- [0042] 图 20 显示 (A) 安装在 SEM 中的 N/MEMS 探针和 HOPG 样品,用于原位分析 HOPG 样品的电导 ;以及 (B) 使用 Zyvex 纳米定位器的 SEM 中的测试组件的示意图；
- [0043] 图 21 显示根据实施例的 N/MEMS 探针的探针尖端与 HOPG 样本软接触 (soft contact) 的 SEM 显微图；
- [0044] 图 22 显示通过使用根据实施例的多尖端纳米探针装置测量的 HOPG 样品的电导特性,虚线是可移动探针尖端电流的直线拟合,而 HOPG 样品的电阻由这条直线斜率的倒数确定；
- [0045] 图 23 显示关于根据实施例的多尖端纳米探针装置内 : (A) 所有的尖端被接地； (B) +3.5V 被施加到尖端 1； (C) +3.5V 被施加到尖端 2；
- [0046] 图 24A 到 24T 显示一组示意性透视图,其示出了在制造根据实施例的、集成有运动传感器的多尖端纳米探针 N/MEMS 装置时逐步处理阶段的结果；
- [0047] 图 24A 显示被用来制造根据实施例的纳米探针装置的 SOI 衬底,表面硅器件层是 $2\mu\text{m}$ 厚,埋层氧化层厚度范围为 $1\text{--}2\mu\text{m}$ ；
- [0048] 图 24B 显示 SiO_2 层和铬 (Cr) 被顺序地沉积在图 24A 的 SOI 结构上面,铬用作为用于 SiO_2 的刻蚀掩膜；
- [0049] 图 24C 显示旋涂了光刻胶层,并且使用深紫外 (DUV) 光刻来图形化 JFET 的源极和漏极端；
- [0050] 图 24D 显示源极和漏极端图形被反应离子刻蚀 (RIE) 成 Cr 和 SiO_2 掩膜；
- [0051] 图 24E 显示 Cr 被去除以及 SiO_2 被用作为扩散掩膜,PH-1025 固体源靶 (solid source target) 被用来将磷掺杂物扩散到源极和漏极端,并被退火以驱使掺杂物深入其中；
- [0052] 图 24F 显示通过使用氢氟酸 (HF) 来去除 SiO_2 扩散掩膜；
- [0053] 图 24G 显示重复进行步骤 24B 到 24D,但这时,源极、漏极和沟道区域用 SiO_2 保护；
- [0054] 图 24H 显示 BN-1025 固体源靶被用来将硼掺杂物扩散到 JFET 栅极区域以及梳状驱动、驱动电极和尖端区域；
- [0055] 图 24I 显示通过使用氢氟酸 (HF) 去除 SiO_2 扩散掩膜；
- [0056] 图 24J 显示溅射沉积覆盖的 MoSi_2 层,并且在覆盖的 MoSi_2 层上顶部旋涂光刻胶；

- [0057] 图 24K 显示沟道区域被图形化并被 RIE 刻蚀成 MoSi_2 , 在这时, JFET 沟道仅仅是 N 型硅;
- [0058] 图 24L 显示用氧等离子体剥离光刻胶, SiO_2 和 Cr 掩膜被沉积;
- [0059] 图 24M 显示旋涂负性光刻胶, 并且使用 DUV 光刻来图形化纳米探针装置;
- [0060] 图 24N 显示 Cr、 SiO_2 和 MoSi_2 叠层被 RIE 向下刻蚀, 直到硅器件层;
- [0061] 图 24O 显示在刻蚀硅器件层之前, 分别用 1165 溶剂和 Cr 刻蚀剂去除光刻胶和 Cr 层, SiO_2 掩膜被用来深度反应离子刻蚀 (DRIE) 硅器件层;
- [0062] 图 24P 显示为了露出尖端, 翻转晶圆, 沉积 SiO_2 并旋涂光刻胶。背面 SiO_2 被图形化并被 RIE 刻蚀;
- [0063] 图 24Q 显示用作为刻蚀掩膜的背面 SiO_2 , 用于刻蚀柄状晶圆, 直到埋层氧化层;
- [0064] 图 24R 显示在进行 MoSi_2 退火之前, RIE 刻蚀器件层上的 SiO_2 刻蚀掩膜;
- [0065] 图 24S 显示聚焦的离子束被用来使得尖端变尖;
- [0066] 图 24T 显示所述器件在 HF 气体中释放。

具体实施方式

[0067] 实施例提供多尖端纳米探针装置以及用于操作上述多尖端纳米探针装置的方法。由于将运动传感器与可移动探针尖紧密地耦接在多尖端纳米探针装置内, 多尖端纳米探针装置和相关方法提供了改进的性能。另外, 由于可移动探针尖端相对于多尖端纳米探针装置内的不可移动探针尖是可操作的, 因此多尖端纳米探针装置和相关方法提供了改进的性能和改进的能力。可移动探针尖端和不可移动探针尖端可以一起做到纳米级的尺度, 这对于纳米级空间距离下的测量特性是重要的。

[0068] 1. 总体考虑

[0069] 根据实施例的多尖端纳米探针装置包括衬底 (即, 优选地单个衬底), 它在第一个例子中包括位于并形成在衬底上方的至少一个 (和优选地至少两个、或两个以上) 可移动探针尖端和至少一个运动传感器。根据实施例的多尖端纳米探针装置还包括位于并形成在衬底上方的至少一个可移动探针尖端, 其与至少一个运动传感器可操作地耦接。在实施例中, 所述至少一个可移动探针尖端通常相对于至少一个不可移动探针尖端是可缩进的, 并且通过至少一个驱动器可操作地耦接于所述至少一个运动传感器。

[0070] 虽然一些实施例是在多尖端纳米探针装置的背景下进行说明的, 其中该多尖端纳米探针装置包括通过用于运动信号换能目的的曲折弹簧而静电地且机械地耦接于 JFET 器件沟道的可移动尖端, 但是这些实施例还可以预期, 与至少一个弹簧结合的有关压力敏感部件 (例如压电敏感的电路部件) 也可以被用于运动信号换能目的。这样的其它压敏部件可包括但不限于, 压阻式和压电式换能器, 其合在一起称为压电换能器, 用于在根据实施例的多尖端纳米探针装置内的运动信号换能的部件, 代替 JFET 沟道。这些其它的压电换能器部件可包括但不限于, 压电晶体压电换能器或部件和压阻部件。因此, 根据实施例的运动传感器可包括多物理运动传感器, 其包括由集成晶体管放大的光敏电阻或电容器, 但也能测量通过可移动探针尖端的电流。

[0071] 类似地, 虽然实施例是在多尖端纳米探针装置的背景下进行说明的, 其中多尖端纳米探针装置包括两个相对于衬底和运动传感器不可移动的探针尖端, 以及一个相对于衬

底和运动传感器可移动的探针尖端,但实施例也不打算限于此。而是,实施例还预期包括至少一个相对于衬底和运动传感器不可移动的探针尖端和至少一个相对于衬底和运动传感器可移动的探针尖端的多尖端纳米探针装置。

[0072] 在实施例中,对于所述至少一个不可移动的探针尖端和所述至少一个可移动的探针尖端,其中的每个具有从约 30 到约 500 微米的长度和从约 300 到约 1000 纳米的横向尺度(即,直径),并且还悬在衬底上方。另外,每个所述至少一个不可移动的探针尖端与每个所述至少一个可移动的探针尖端互相间隔开从约 100 到约 1200 纳米的距离。

[0073] 在实施例中,通过适当地选择不可移动的探针尖端和集成的执行器,可移动的探针尖端可以相对于衬底或至少一个不可移动的探针尖端作椭圆形 3D 轨迹运动。另外,在实施例内,不可移动探针尖端和可移动探针尖端可以按照下文进一步的讨论被削尖到原子尺度,曲率半径小于约 1 纳米。

[0074] 2. 操作原理

[0075] 多纳米探针系统的操作可以通过 JFET 来辅助,但也可以不用 JFET 晶体管而操作。根据实施例的多尖端纳米探针装置内的 JFET 的操作然而通常是常规的。实施例因此现在演示并描述 JFET 在根据实施例的多尖端纳米探针装置中的使用。按照实施例,上述的差分尖端结构由一个可移动的探针尖端(尖端 3)和两个静止的不可移动的探针尖端(尖端 1 和尖端 2)制成,如图 1 和图 2 所示。可移动的探针尖端可以通过使用静电板执行器 F1 和 F2 沿 y 轴驱动。将电压施加到尖端 1 和尖端 2,还可以使得可移动的尖端 3 横向偏移。可以通过使用在 F3 与尖端 3 之间的静电力来沿 X 方向移动可移动探针尖端。JFET(J1) 被悬挂,并通过曲折弹簧电容性地且机械地耦接到执行器 F3。

[0076] JFET 的沟道被轻度 n 型掺杂 ($3.11 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$),栅极被 p+ 型掺杂 (10^{20}cm^{-3}),源极和漏极被 n+ 型掺杂 (10^{20}cm^{-3})。图 3 是 JFET 的示意图,其不仅仅示出了 JFET,还示出了连接一个栅极的蜿蜒的曲折弹簧与静电执行器 F3 的连接。

[0077] a. 来自浮动电位的 JFET 电流贡献

[0078] JFET 的传感 I 部分通过反向偏置栅极 1 而被偏置到饱和。饱和电流是:

$$[0079] \quad I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \quad (1)$$

[0080] 其中 I_{DSS} 是当 $V_{GS} = 0$ 时的饱和电流,而 V_P 是夹断电压。当将负的直流电压施加到 F3 时, JFET 曲折部分延伸,而同时探针在 X 方向上凹进去。由于 JFET 曲折弹簧是电浮动的,因此在 F3 上施加的电压在曲折弹簧上产生负的浮动电位。

[0081] 该电位反向偏置 JFET 栅极 2,用来进一步夹断沟道。该浮动电位将调制沟道电导,在 JFET 中的新的饱和电流可被写为:

$$[0082] \quad \begin{aligned} I_{DD} &= I_{DSS} \left(1 - \frac{(V_{GS} + \Delta V_{FG})}{V_P}\right)^2 \\ &= I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \left[1 - \frac{\Delta V_{FG}}{V_P - V_{GS}}\right]^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$[0083] \quad I_{DD} = I_D \left[1 - \frac{\Delta V_{FG}}{V_P - V_{GS}}\right]^2 \quad (3)$$

[0084] 其中 ΔV_{FG} 是浮动电位。如果 $V_P - V_{GS} > \Delta V_{FG}$,当浮动电位增加时漏极电流将减小。

[0085] b. 来自应变的电流贡献

[0086] 当电压被施加到 F3 时, 曲折弹簧的延伸拉伸栅极, 并在沟道与曲折弹簧之间的 p+n- 结处产生应变。在耗尽区中的应变在 JFET 的沟道处产生张应力。张应力的效应是它增强了沟道迁移率。在饱和时, 漏极电流是:

$$[0087] \quad I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 \quad (4)$$

$$[0088] \quad I_{DSS} = \frac{\mu_n (qN_d)^2 tW^3}{6\epsilon_0 \epsilon_{si} L} \left\{ 1 - 3 \left(\frac{V_{bi}}{V_{PO}} \right) \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{bi}}{V_{PO}}} \right) \right\} \quad (5)$$

[0089] 其中 W 是宽度, t 是 JFET 厚度, 而 L 是长度。如果迁移率的小变化用 $\Delta \mu$ 代表, 则新的电流是:

[0090]

$$I'_{DD} = (\mu + \Delta \mu) \frac{(qN_d)^2 tW^3}{6\epsilon_0 \epsilon_{si} L} \left\{ 1 - 3 \left(\frac{V_{bi}}{V_{PO}} \right) \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{V_{bi}}{V_{PO}}} \right) \right\} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (6)$$

$$[0091] \quad I'_{DD} = I_D \left[1 + \frac{\Delta \mu}{\mu} \right] \quad (7)$$

[0092] 根据等式 7, 迁移率的改变增加了 JFET 中的漏极电流。这与增加的浮动电位效应相反, 后者试图截断沟道并减小电流。在这个器件中, 浮动电位效应是占优势的。

[0093] c. 作为传感器的电容值的测量

[0094] 如图 1 所示的梳状电极 C1 和 C2 可以测量包括可移动探针尖端的移动臂的相对位置。在该臂移动时, 移动臂与 C1 和 C2 梳状电极的两个固定梳指之间的电容值将改变。

[0095] d. 电-机械驱动仿真

[0096] 由于 JFET 响应于可移动探针尖端的运动, 因此漏极电流的改变可被用来表征该运动。图 4 示出器件的结构和静电行为的 COMSOL 仿真。

[0097] 被连接到 JFET 的曲折弹簧的有效弹性常数 ($2k_1+k_2$) 被设计成比被连接到可移动探针尖端的那些 ($2k_1$) 更硬。图 5 示出当电压被施加到 F3 时在可移动探针尖端的 x 方向运动与 JFET 曲折弹簧 (k_2) 之间的关系。限位器被用来阻止在拉入期间可移动探针尖端和 JFET 的过限度的粉碎。可移动探针尖端比不可移动探针尖端长 100nm。通过在电极驱动器 F3 上施加的电压, 可移动探针尖端和 JFET 曲折弹簧沿相反的方向移动。可移动探针尖端具有从缺省位置到 500 纳米的移动范围, 这使得可移动探针尖端相对于不可移动探针尖端是可缩进或可延伸的。

[0098] 3. 器件制作

[0099] 根据实施例的多尖纳米探针装置的制作是与在 Amponsah et al., "Monolithically integrated junction FETS and NEMS," Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011 IEEE 24th International Conference Proceedings, pp. 91-94, 23-27 Jan. 2011 中描述的方法平行的, 该论文以可允许的程度通过引用方式全部合并于本申请中。器件和相关的装置使用电阻率为 2ohm-cm、2 μ m 厚的 n- 型 SOI 晶圆制造。源极和漏极通过使用 PH-1025 固体源扩散靶掺杂, 而栅极用 BN-1250 固体源扩散靶掺杂。掺杂的晶圆在炉内退火以驱进掺杂剂。MoSi₂ 被用于金属化, 而器件通

过 DRIE 刻蚀。器件和相关装置的释放是在气态的氢氟酸 (HF) 中进行的。掩膜版组被设计和选择, 以提供如在图 3(b) 上显示的特定装置。

[0100] 在图 24A 到图 24T 示出了一组具体的透视图, 其说明了用于制作根据实施例的多尖端纳米探针装置的过程顺序。各个图的具体说明在上面的附图说明中给出。

[0101] 4. 操作结果和讨论

[0102] a. 可移动探针尖端的静电驱动

[0103] 通过在 F3 驱动器电极上施加斜坡电压 (ramp voltage) 而证实了可移动探针尖端的移动。图 6 示出了在 F3 与尖端 3 之间测量的位移电流。在施加不同峰值电压的斜坡电压 (图 6 上的 x 轴) 和 0.8V/sec 的斜坡率的情况下, 可以测量由于可移动探针尖端移动引起的位移电流。这个位移电流可被用来独立地测量可移动探针尖端的移动, 以便校准 JFET 换能器。

[0104] b. JFET 的 IV 特性

[0105] JFET 器件的 IV 测量是在空气中通过使用 Keithley 4200 参数分析仪进行的。图 7 示出 JFET 器件的漏极电流相对于漏源电压的图。测量得到跨导和跨导参数 (β) 分别为 0.2 μS 和 4.1 nA/V²。表 1 示出了器件参数。

[0106] 表 1 : 器件参数

[0107]

参数	符号	数值
尖端 3 的曲折弹簧的弹性常数	2k1	5.54N/m
JFET 的曲折弹簧的弹性常数	2k1+k2	22.66N/m
夹断电压	V _p	-25V

[0108]

在 V _{DS} = 10V 和 I _{DSS} 下的跨导	g _m	0.2 μS
跨导参数	β	4.1 nA/V ²
JFET 沟道宽度	W	2 μm
JFET 和探针厚度	t	2 μm

[0109] 由等式 8 给出的夹断电压测量为在 V_{DS} = 10V 下是 -25V, 如图 8 所示。

[0110] $V_p = V_{pi} - V_{po}$ (8)

[0111] $V_{po} = \frac{qW^2N_d}{2\epsilon_0\epsilon_{st}}$ (9)

[0112] 根据等式 8 和等式 9 可以看到, 夹断电压正比于 JFET 器件掺杂浓度。通过轻掺杂沟道来减小 JFET 器件的夹断电压, 这将减小 JFET 器件的驱动电流和跨导。在夹断电压与电流特性之间的折衷说明用于使得通过用高操作电压进行静电驱动的运行最佳化的设计问题。

[0113] c. 通过 JFET 感测可移动探针尖端的运动

[0114] 为了感测可移动探针尖端的运动,将不同的负电压加到 F3 上,监测了漏极电流调制,正如图 9 的输出曲线所示。

[0115] 施加的电压引起应变,并将浮动电位反映到 JFET 上,浮动电位将沟道电导调制到更高的程度。对于 $V_{F3} = -20V$,相比于 $V_{F3} = 0V$ 电流的改变 $0.4 \mu A$,这表示在 JFET 器件栅极 2 上的有效电位是 $-2.3V$ 。

[0116] d. 探针尖端隧道 / 接触电流测量

[0117] 根据实施例的多尖端纳米探针装置可以应用的领域包括但不限于,扫描探针显微技术、生物纳米探测、将纳米级应变施加到薄膜并且执行材料的纳米级电导测量。为了测量接触电流,将 Si 探针尖端与钨样品接触。所测量的接触电流是低的(在样品到尖端电压为 20V 时为 100fA),而典型的 STM 电流是在 nA 级的范围。

[0118] 观察到的低电流可能是由于在纳米探针装置的 Si 尖端或钨样品处形成了氧化物。另外,由于纳米探针的纳米级尺寸,串联电阻可能对测量的电流有影响。为此目的,和如下面所讨论的,将 $MoSi_2$ 金属层引入到多尖端纳米探针臂的顶端,以减小串联电阻。图 10 示出了不带有 $MoSi_2$ 的测量的接触电流。

[0119] e. 探针尖端材料和尺度

[0120] 如上所述,为了减小多尖端纳米探针的串联电阻,可以考虑在探针尖端的顶部硅化 $MoSi_2$ 金属。 $MoSi_2$ 被退火(在 Ar/H_2 中在 $750^\circ C$ 下 3 分钟),从而形成与探针尖端交界面的牢固的电接触和物理接触。如果没有这样的退火处理步骤,则在 BOE 或气体 HF 释放期间, $MoSi_2$ 会由于应力梯度而从探针尖端剥离。代替使用 Si 用于表面扫描, $MoSi_2$ 将是用于表面扫描的金属。

[0121] 传统的金属 STM 尖端通常由钨或 Pt/Ir 制成。为了由钨线形成原子级的尖锐尖端,使用电化学处理来刻蚀钨线金属。在化学刻蚀期间,在金属-溶液交界面处产生收缩,以及浸入刻蚀剂中的金属部分远离线溶解,并且该线形成原子级尖端。在 Pt/Ir 线的情形下,可以使用钳子来施加应变,以切割 Pt/Ir 线。

[0122] 这些技术对于纳米探针并不是理想的。可以考虑不用电化学刻蚀或应变应用而形成具有小于 50nm 尖端直径的金属 STM 尖端的新方法。采用镱源的聚焦离子束(FIB)被用来以 52 度的角度切割探针的尖端。图 11 显示 JFET 器件和装置相对于离子束的安装取向。

[0123] 在离子磨削期间,离子枪将探针尖端削尖。图 12 是 FIB 切割之前的情形,图 13 和图 14 是在 FIB 切割之后探针的 SEM 图像。应当说明,这样的削尖探针尖端仅仅在 $MoSi_2$ 材料层被暴露于离子束时才发生。

[0124] 通过制造包括有用 300nm SiO_2 保护的 $MoSi_2$ 层的聚焦离子束器件,可以证实上述的观察结果。尖端以 52 度被切割。图 15 示出 52 度切割的 SEM 侧视图。可以看到,探针尖端一直用 SiO_2 保护,它具有更大的尖端直径。所使用的 FIB 束电压在 0.28nA 的离子束电流下是 30KeV。虽然对于所示出的器件达到 52 度角度,但可以理解,通过选择镱离子束与探针臂之间的角度,其它角度,具体地在约 30 度到约 60 度的范围内,也是可行的。

[0125] 5. 应用示例

[0126] a. 谐振频率测量

[0127] 包括根据实施例的 JFET 器件的多尖端纳米探针装置可以被用于 AFM 和 STM 应用。

在这些应用中,可移动探针尖端可以被激励成谐振,并沿样品表面扫描。通过使用与如图 16 所示的装置相同的装置,可移动探针尖端的谐振频率可以在 1.9×10^{-3} mbar 的真空中进行测量。

[0128] SOI 衬底被接地,并且通过使用来自 Zurich Instruments 的锁定放大器 (HF2LI),通过偏置电源,AC 扫描通过偏置电源 (bias-tee) 与 DC 电压组合,并在电极 F3 上启动。流过可移动探针尖端的位移电流被馈送到灵敏度被设置为 5nA/V 的低噪声跨阻抗放大器 (TIA)。TIA 的输出被馈送到锁定放大器,用于频域分析。图 17 示出所测得的可移动探针尖端的基波谐振频率。

[0129] 可移动探针尖端的谐振频率被测量为 239.7KHz,如图 17 所示。图 17 中的插图是谐振频率的光学测量结果,其为 291.5KHz。可移动探针尖端的弹性常数是 5.54N/m,这表明对于精确放置和接触力但不用压紧可移动探针尖端所需要的足够的刚度。布朗噪声位移通过使用等式 10 被评估。

$$[0130] \quad \bar{x} = \sqrt{\frac{4k_B T b}{k^2} \left\{ \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \frac{\omega^2}{(Q\omega_0)^2}} \right\}} \quad m/\sqrt{Hz} \quad (10)$$

[0131] 其中 k_B 是波茨曼常数 (1.38066×10^{-23} J/K), T 是温度 (300K), b 是衰减系数 (0.37×10^{-6} N s/m), k 是弹性常数 (5.54N/m), ω_0 是所测量的谐振频率 (1.5×10^6 rad/s), 以及 Q 是品质因数 (~ 10)。在谐振时,布朗噪声力预期为 78×10^{-15} N/sqrt(Hz), 平均噪声位移是 0.14×10^{-12} N/sqrt(Hz)。在尖端上的噪声位移比起提供用于横向测量的足够 SNR 的大多数 2D 薄膜的原子间距离低两个数量级。

[0132] b. 高序热解石墨 (HOPG) 的扫描隧道显微镜

[0133] 为了研究 HOPG 的原子排列,制造了不带有两个静止尖端的多尖端纳米探针装置。可移动探针尖端被用 FIB 削尖,并被引线键合到 PCB 板,如图 18 所示。PCB 板连同 NEMS 探针一起被插入到 JEOL 4210 SPM 系统中。通过将可移动探针尖端接地并将在 HOPG 样品上施加 350mV,样品被放置在靠近可移动探针尖的位置,直至感测到 500pA 的电流为止,然后在环境空气中启动 $5\text{nm} \times 5\text{nm}$ 的样品扫描。图 19A 和 19B 分别示出用商用 Pt/Ir 尖端和根据实施例的 N/MEMS 探针得到的扫描结果。

[0134] c. 电导测量

[0135] 根据实施例的 N/MEMS 探针和 HOPG 样品被安装在 Zyvex® SEM 操纵器 (manipulator),如图 20 所示。在 SEM 中实时地观察探针朝样品方向的移动,以避免探针过分前进而进到样品中,这会有可能打碎尖端。一旦软接触 (soft contact),电压斜坡就被加到可移动探针尖端,并且从侧面尖端记录电流,这提供了不同的电导测量结果。

[0136] 图 21 和图 22 分别示出样本的软接触和电流-电压特性。在可移动探针尖端与右面的不可移动探针尖端之间精确的电阻是 $0.4 \Omega/\text{nm}^2$ 。还观察到,在硬接触期间,当可移动探针尖端缩进时,最外面的两个不可移动探针尖端能够弯曲 30 度而不断裂。

[0137] d. 尖端间隔调制

[0138] 可以通过将斜坡电压施加到任一个电极 F1 或 F2 上来减小可移动探针尖端与任一个不可移动探针尖端之间的间隙间隔。另外,将电压施加到尖端 1 和尖端 2 可以横向地偏移

可移动探针尖端。图 23 显示了可移动探针尖端的现场 SEM 图像,其中中间的可移动探针尖端接地,而侧面的不可移动探针尖端被加上电压。通过调制所述间隔,可以研究输送现象,诸如局部的、扩散的和弹道的输送的转移。

[0139] 6. 多尖端纳米探针装置操作模式的概要

[0140] 下面列出根据实施例的多尖端纳米探针装置的各种应用的操作特性。

[0141] I. STM 模式

[0142] a. 在中间尖端与薄膜之间加上电压。

[0143] b. 感测隧道电流。

[0144] c. 扫描薄膜,以研究原子排列和其它特性。

[0145] II. AFM 模式

[0146] a. 通过将组合的 AC 和 DC 电压施加到电极 F3 上,激励中间尖端谐振。

[0147] b. 跟踪尖端振动幅度的改变。

[0148] c. PZT 扫描器的 z 信号被用来反映薄膜的原子排列。

[0149] III. 跨导模式 A

[0150] a. 将中间尖端缩进。

[0151] b. 将最外面的尖端放置在紧靠或者完全接触薄膜。

[0152] c. 在最外面的尖端之间进行电流 - 电压测量。

[0153] IV. 跨导模式 B

[0154] a. 将中间尖端缩进。

[0155] b. 将最外面的尖端紧靠或者完全接触薄膜。

[0156] c. 中间尖端现在放置成紧靠或者完全接触薄膜。

[0157] d. 在中间尖端与最外面的尖端之间进行电流 - 电压测量。(通过过最外面电极驱动电流,以生成跨过薄膜的电压。内侧电极被用来测量高输入阻抗下的电压。在这种方法中,电极的接触电阻并不影响薄膜电阻率。)

[0158] V. 隧道间隙调制

[0159] a. 将中间尖端缩进。

[0160] b. 最外面的尖端被用来将探头对准薄膜。

[0161] c. 中间尖端作为栅极,而最外面的尖端作为源极和漏极。

[0162] d. 通过把斜坡电压施加到 F3,可以改变隧道间隙(在中间尖端与样品之间的间隙)。

[0163] e. 施加到中间尖端上的电压可以调制源极端与漏极端之间的沟道电导。

[0164] VI. 施加应变

[0165] a. 中间尖端可以被用来对薄膜施加应变。

[0166] b. 可以在中间尖端与最外面的尖端之间同时进行电流 - 电压测量。

[0167] VII. 尖端间隔调制

[0168] a. 将斜坡电压施加到 F1 和 F2 上将改变中间尖端与最外面尖端之间的间隔。

[0169] b. 还将斜坡电压施加到最外面尖端上会使得中间尖端横向偏移,从而改变尖端间隔。

[0170] VIII. 局部扫描

[0171] a. 将中间尖端放置在紧靠样品的位置。

[0172] b. 将斜坡电压施加到 F1 和 F2 上,中间尖端可被用来局部地扫描最外面尖端之间的区域。

[0173] 7. 结论

[0174] 有源 JFET、静电传感器和执行器被集成到具有两个不可移动探针尖端和第三个可移动探针尖端的三探针尖端扫描探针尖装置和器件中。当可移动探针尖端移动时,JFET 获得的浮动电位进一步反向偏置 JFET。耗尽宽度的改变调制 JFET 的沟道电导,这使得能够直接预放大可移动探针尖端的运动。另外,曲折弹簧的拉伸引起耦接到曲折弹簧的 JFET 沟道中产生应变。应变和浮动电位效应起相反的作用,但浮动电位是本装置和相关器件的主要机理。

[0175] 所有的参考资料,包括本申请引用的出版物、专利申请和专利,以能够允许的程度通过引用方式全部并入本申请,就如同每个参考资料被单独并特别说明为通过引用方式并入本申请并在本申请中全部阐述一样。

[0176] 在描述本发明的语境中,术语“a”和“an”和“the”以及类似指示词的使用(特别是在权利要求书的语境中)被理解为覆盖单数形式和多数形式,除非在本申请中另外指出或与上下文明显矛盾。术语“包括”、“具有”和“包含”应当被看作为开放性术语(即,是指“包括,但不限于”),除非另外指出。术语“被连接”应当被理解为部分或完全被包含在内,被连接于,或联合在一起,即使有些介于中间的东西。

[0177] 在本申请中数值范围的列举仅仅期望用作为单独引用在该范围内的每个单个数值的快捷方法,除非在本文中另外指出,并且每个单个数值被如同其独立地被引用在本文中那样包含在说明书中。

[0178] 本文描述的所有方法可以以任何适当的次序执行,除非在本文中另外指出或以其他方式与上下文明显矛盾。任何或所有示例的使用,或本文中提供的示例性语言(例如,“诸如”)的使用,仅仅期望更好地说明本发明的实施例,而不是对于本发明的范围施加限制,除非另外声明的。

[0179] 说明书中的语言不应当被看作为将任何非权利要求的特征指明为对于实施本发明是必要的。

[0180] 本领域技术人员可以理解可以对本文实施例作出各种修改和变化,而不背离本发明的精神和范围。本申请不期望将实施例或本发明限于所公开的特定形式,而是相反地,期望覆盖如所附权利要求中所限定所有修改方案、替换结构和等同方案。因此,本文实施例和发明期望覆盖本发明的修改方案 and 变化,只要它们属于所附权利要求和它们等同方案的范围内。

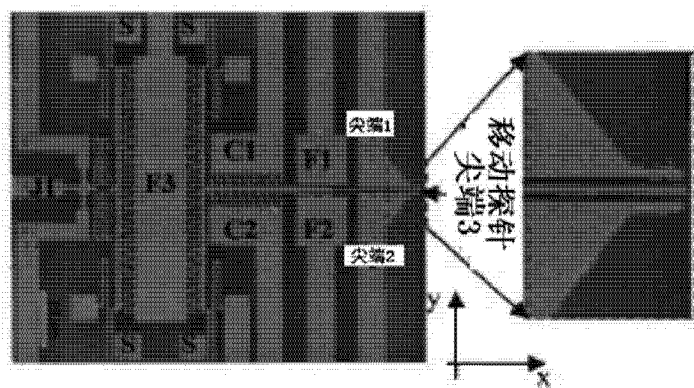


图 1

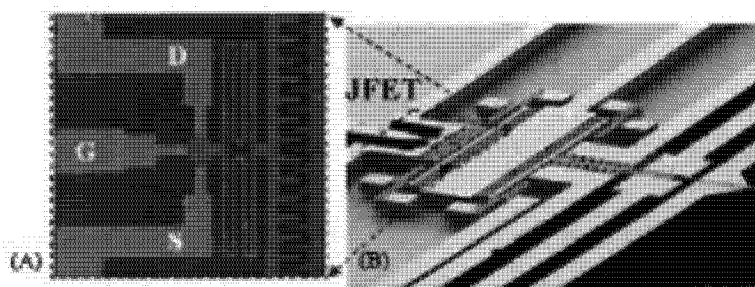


图 2

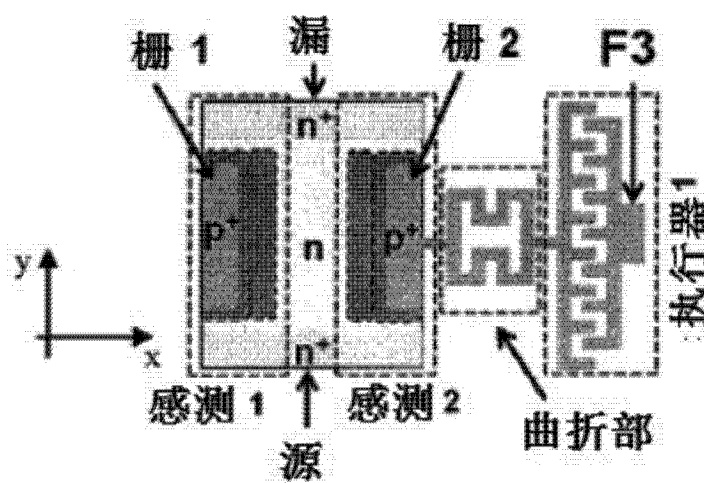


图 3

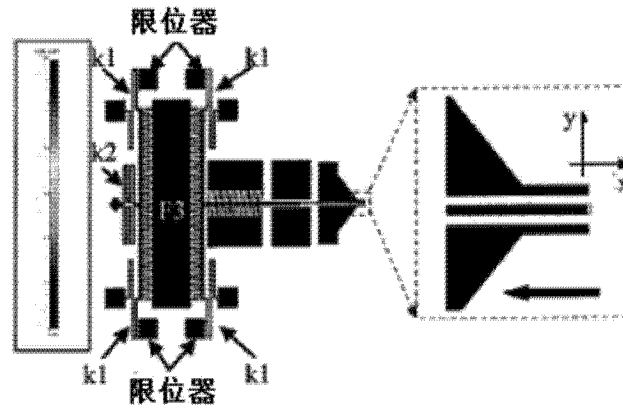


图 4

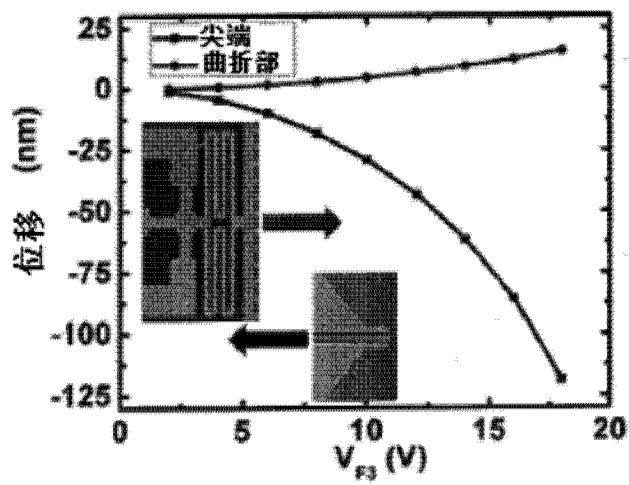


图 5

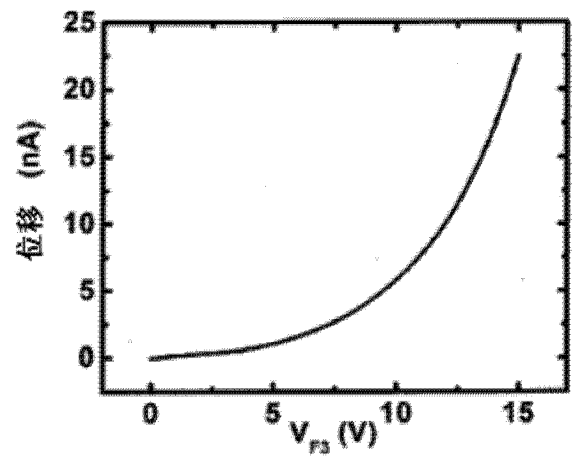


图 6

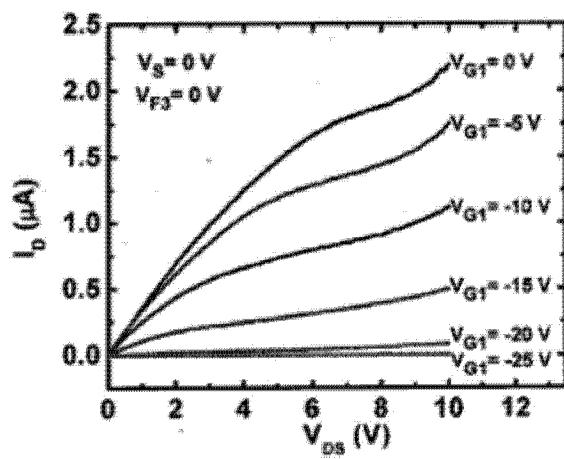


图 7

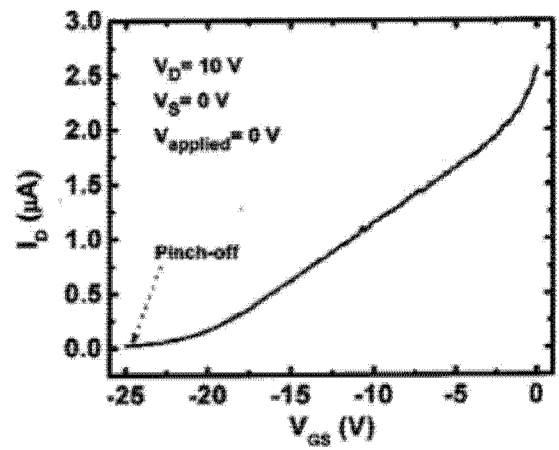


图 8

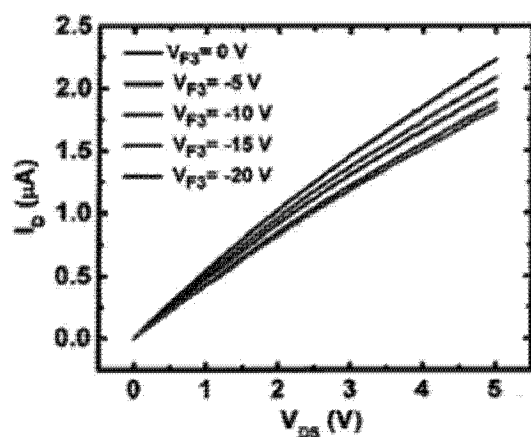


图 9

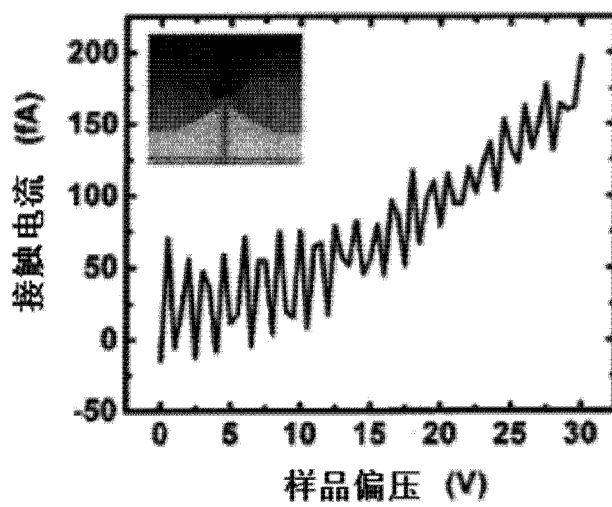


图 10

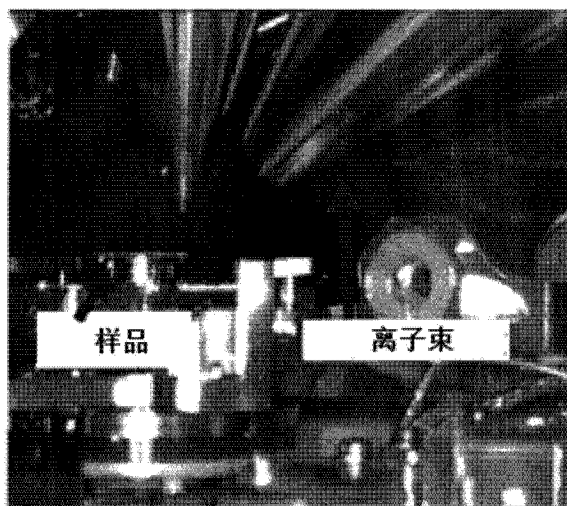


图 11

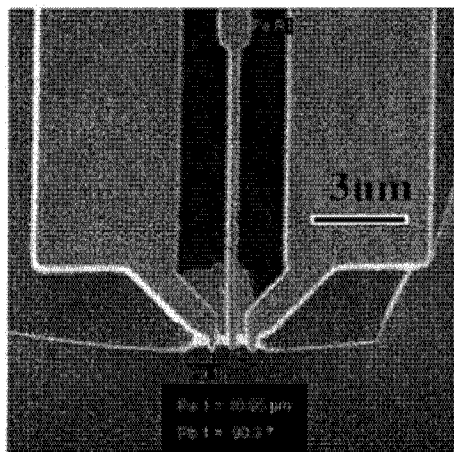


图 12

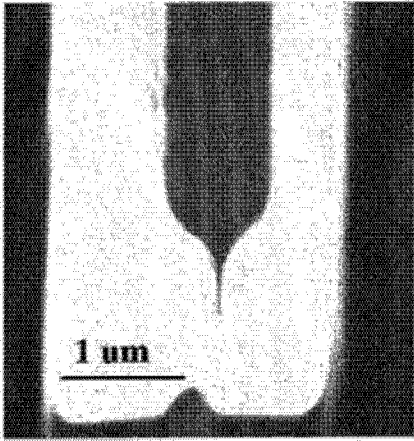


图 13

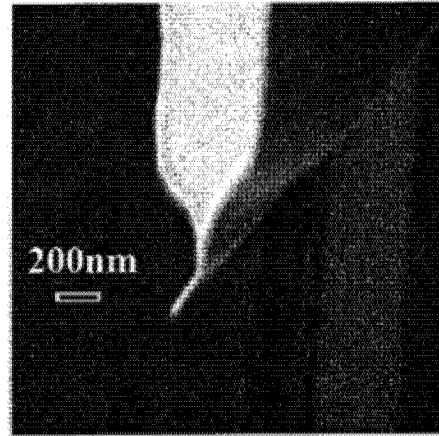


图 14

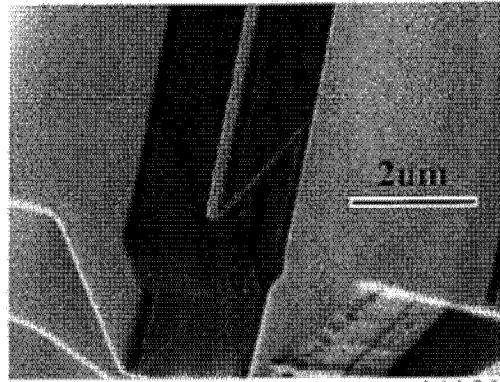


图 15

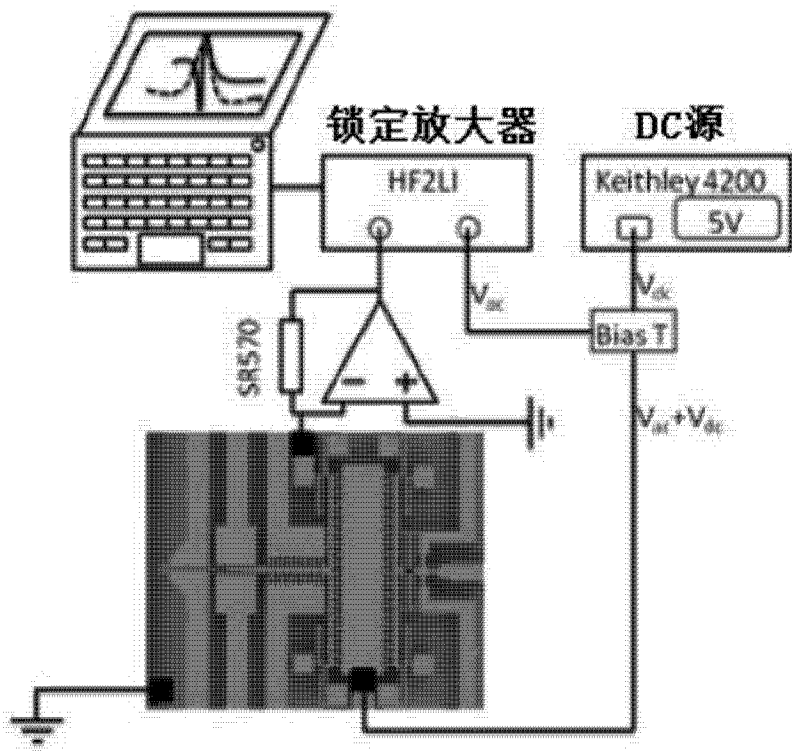


图 16

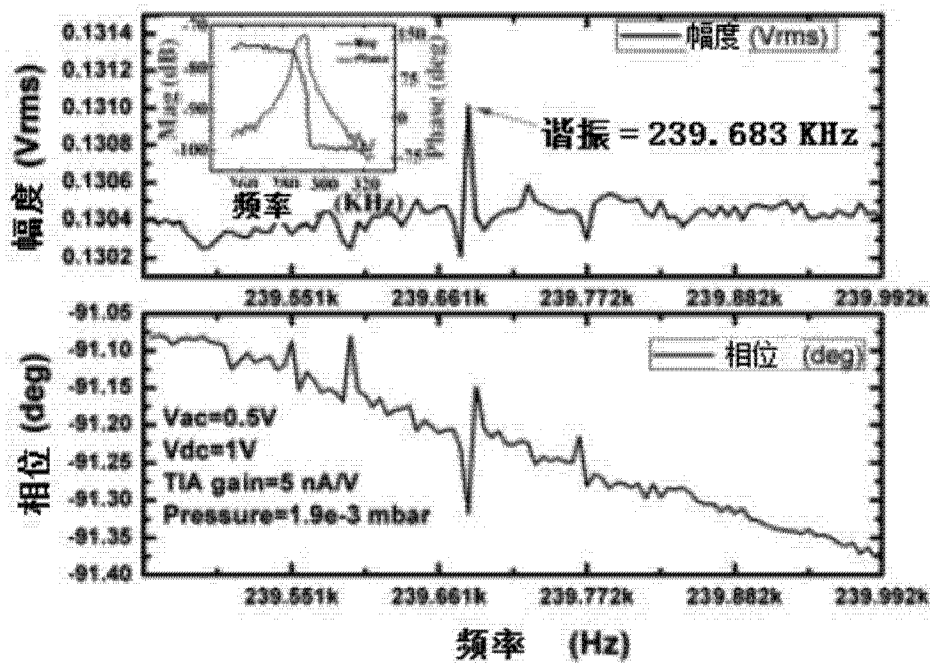


图 17

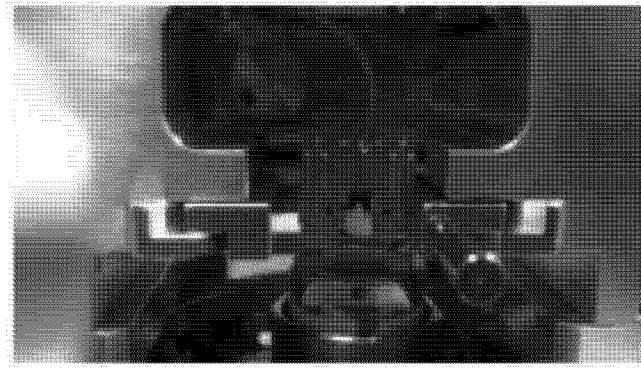


图 18

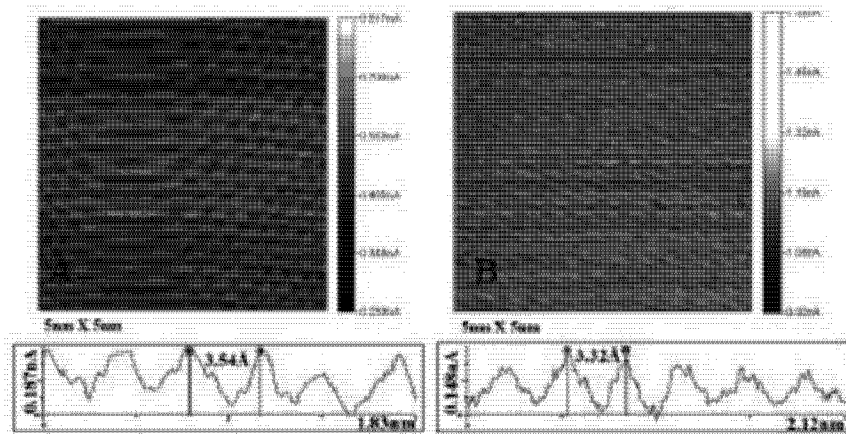


图 19

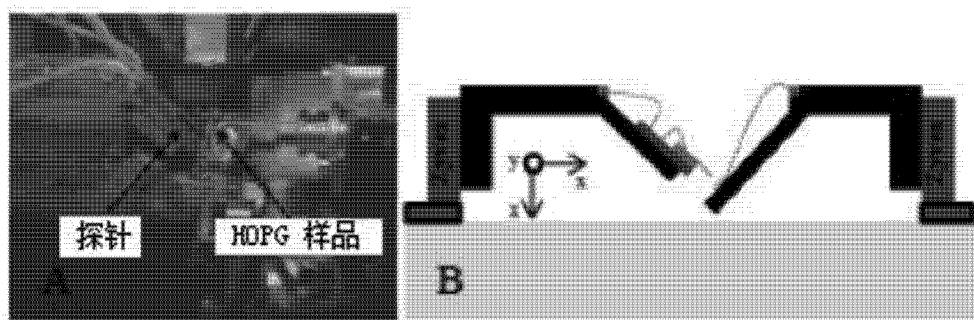


图 20

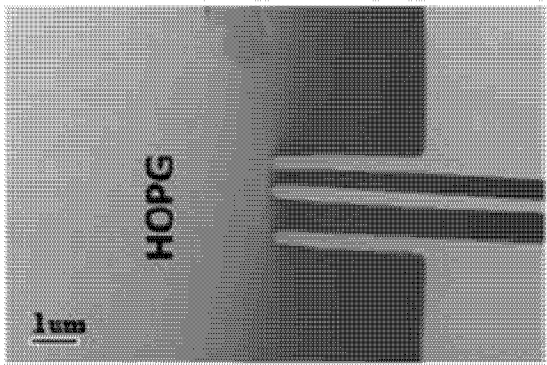


图 21

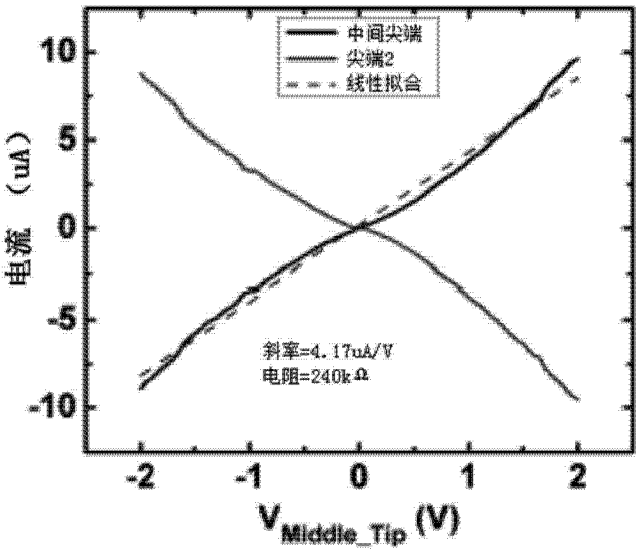


图 22

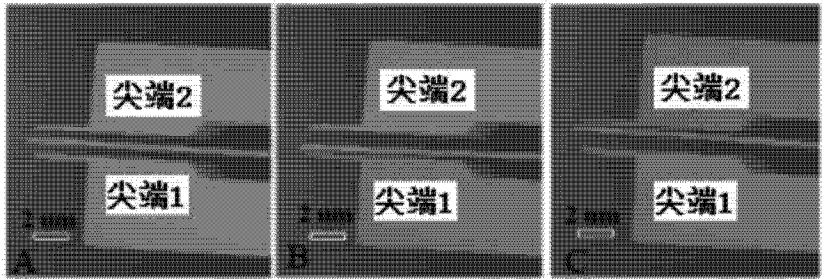


图 23

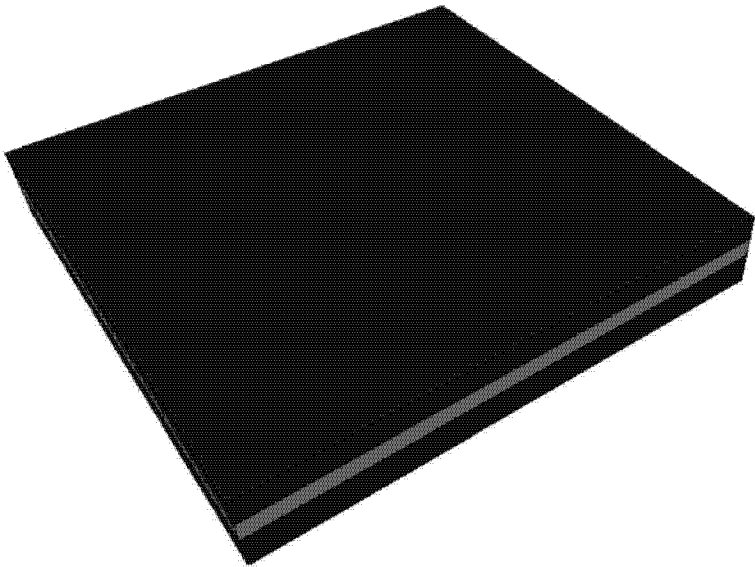


图 24A

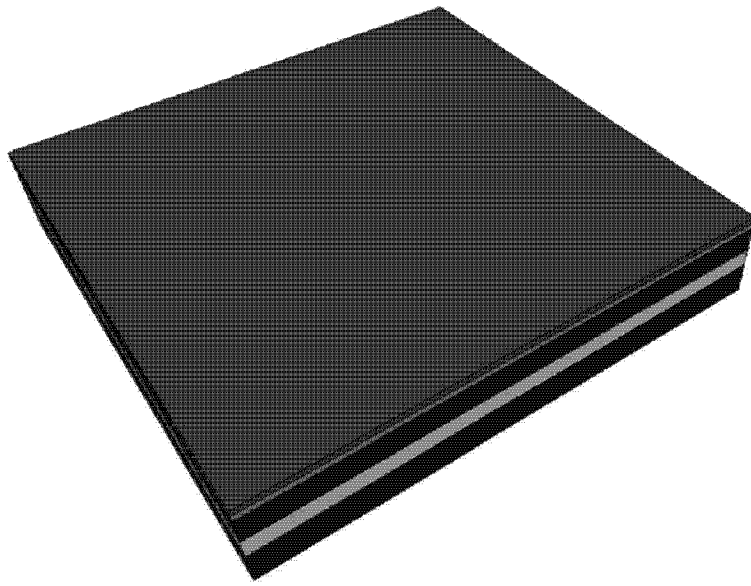


图 24B

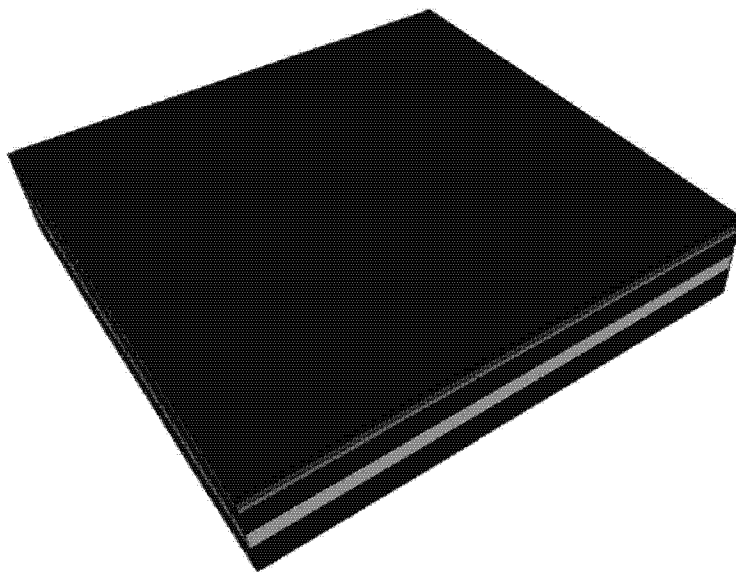


图 24C

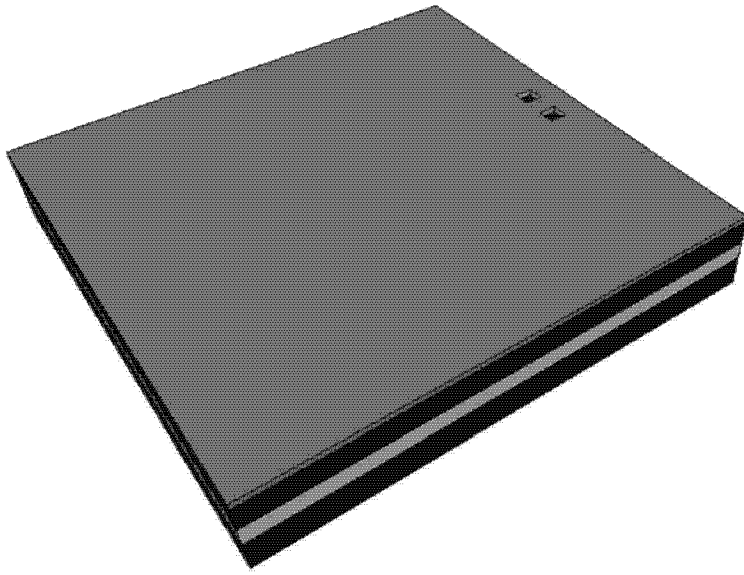


图 24D

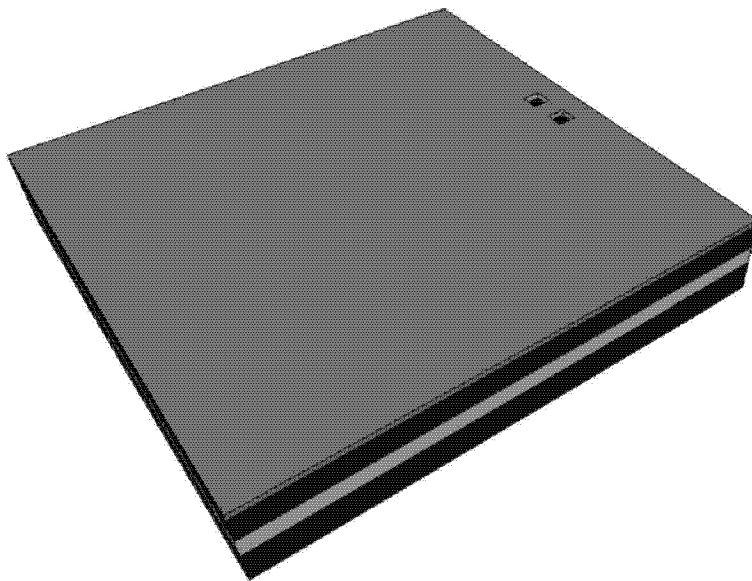


图 24E

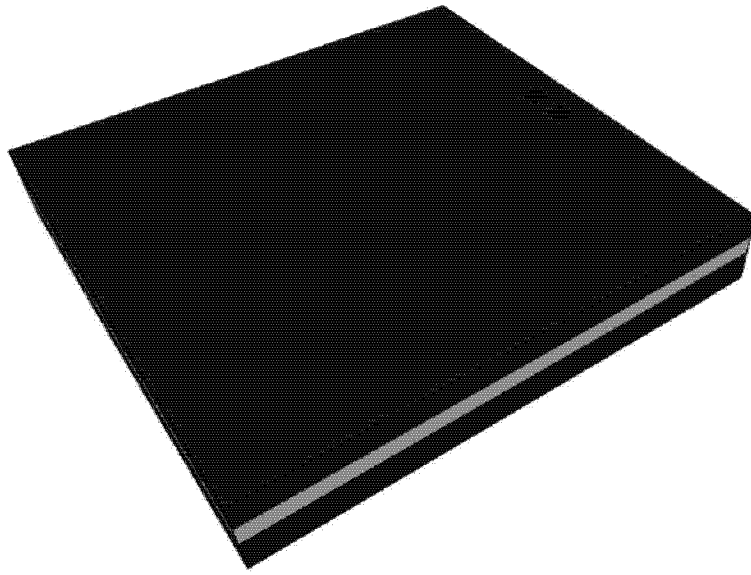


图 24F

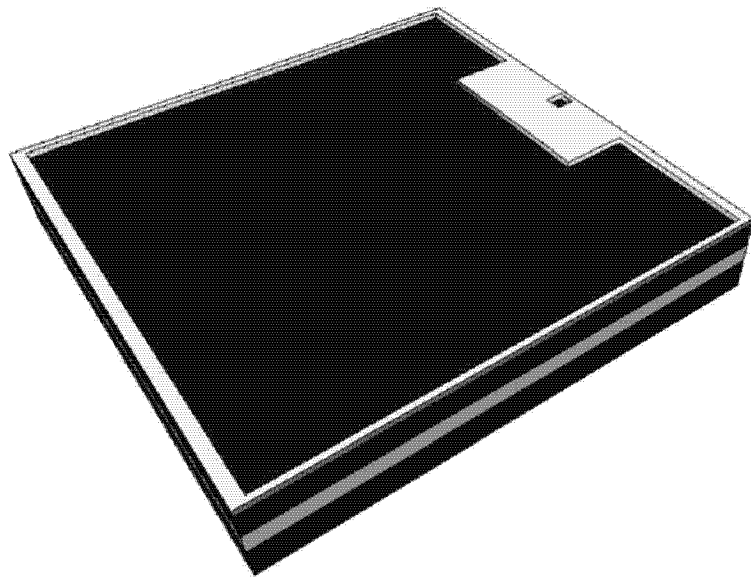


图 24G

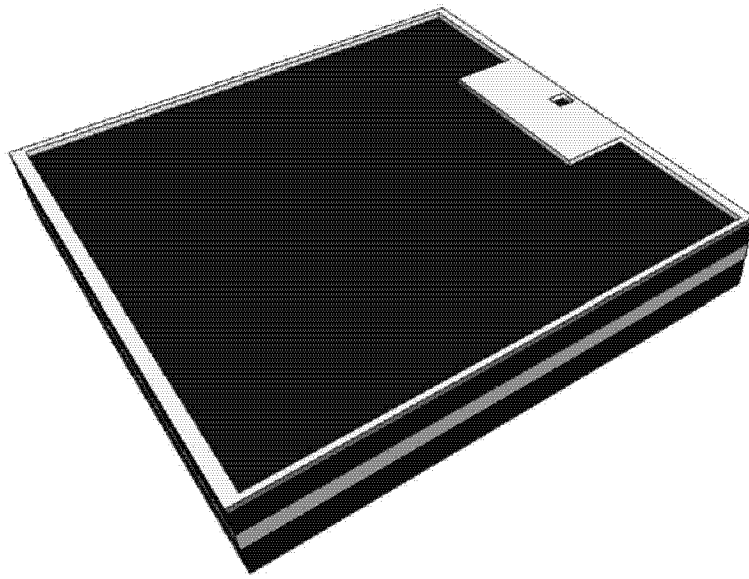


图 24H

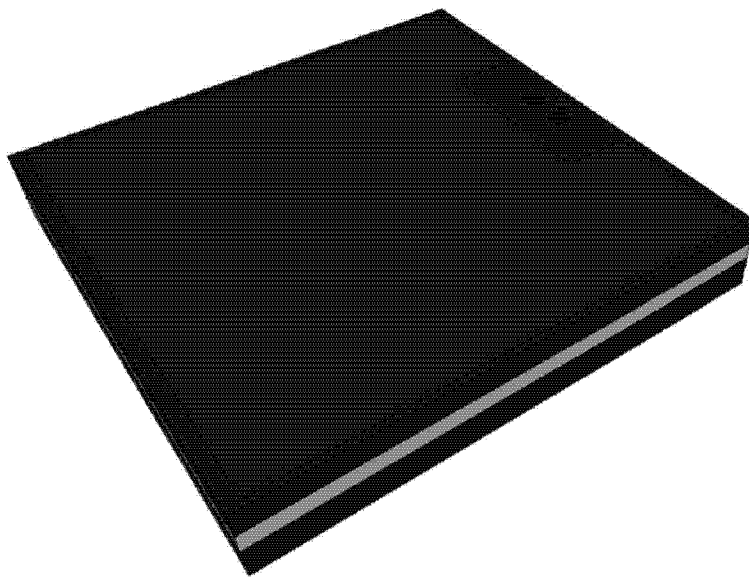


图 24I



图 24J



图 24K

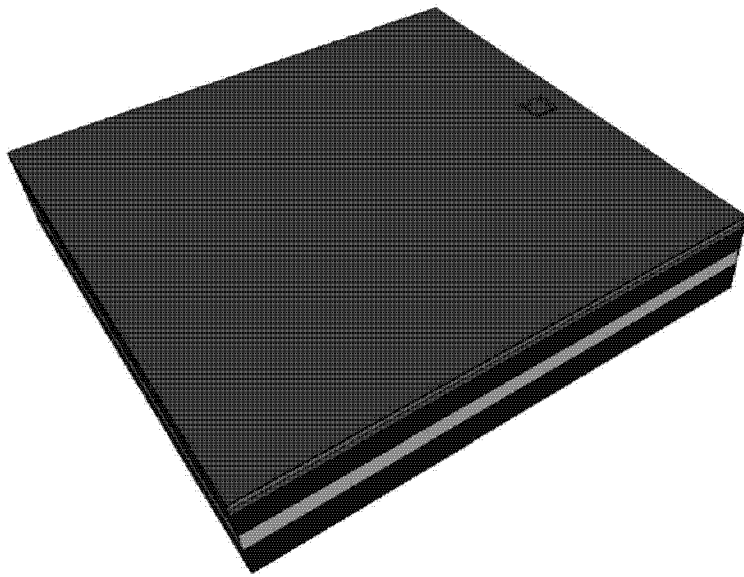


图 24L

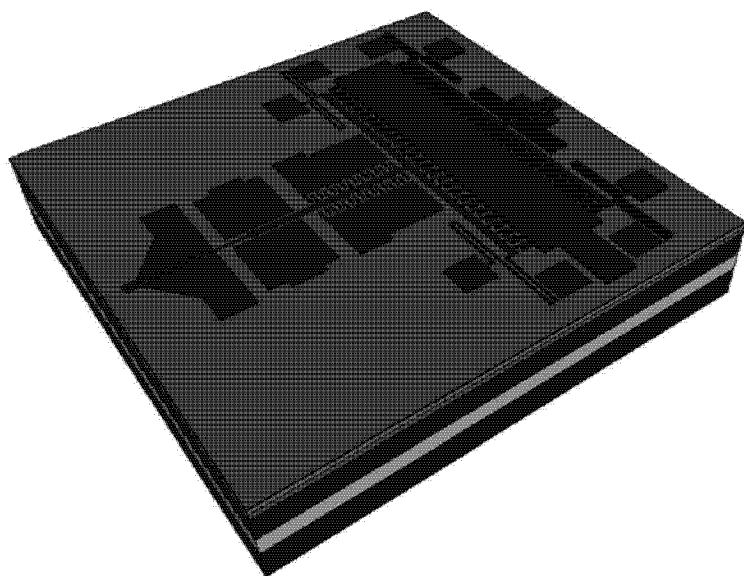


图 24M

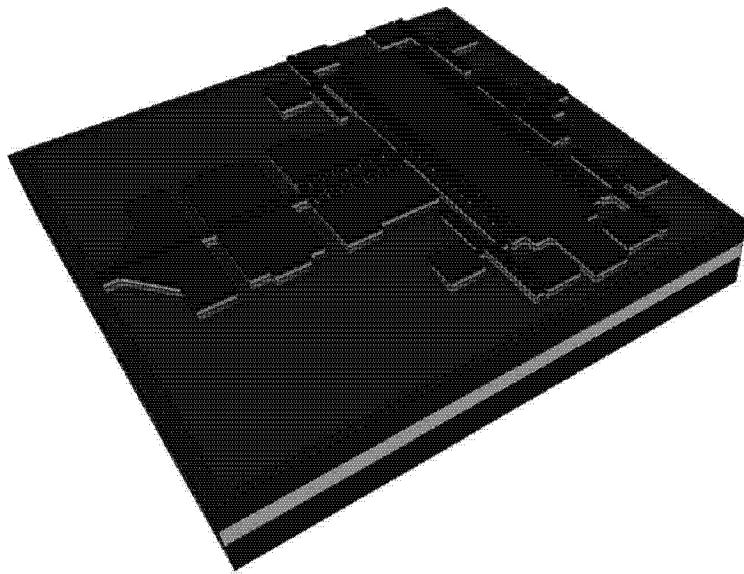


图 24N

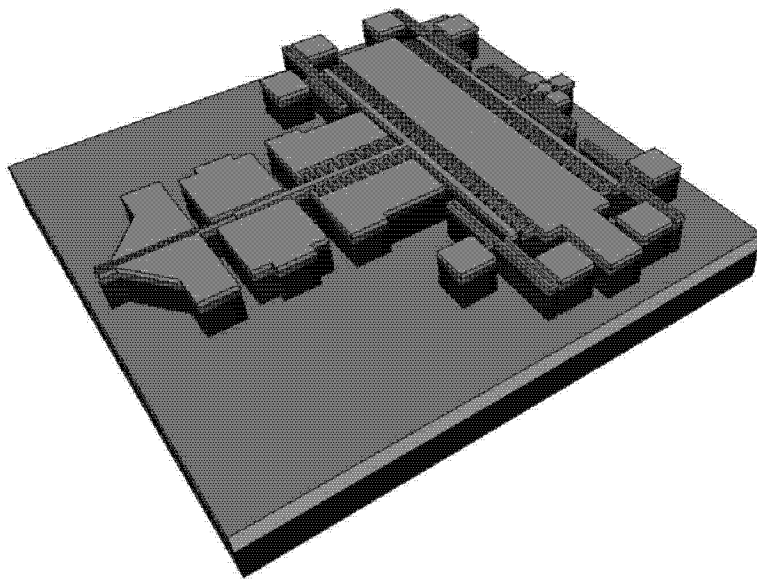


图 24O

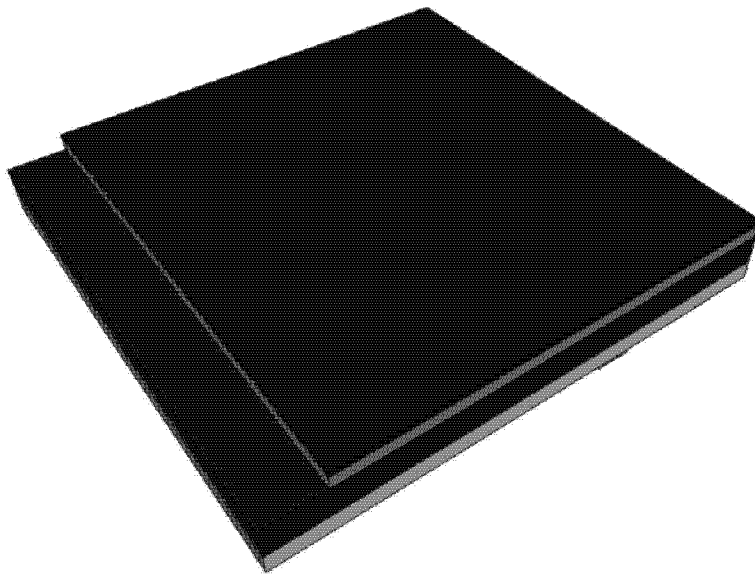


图 24P

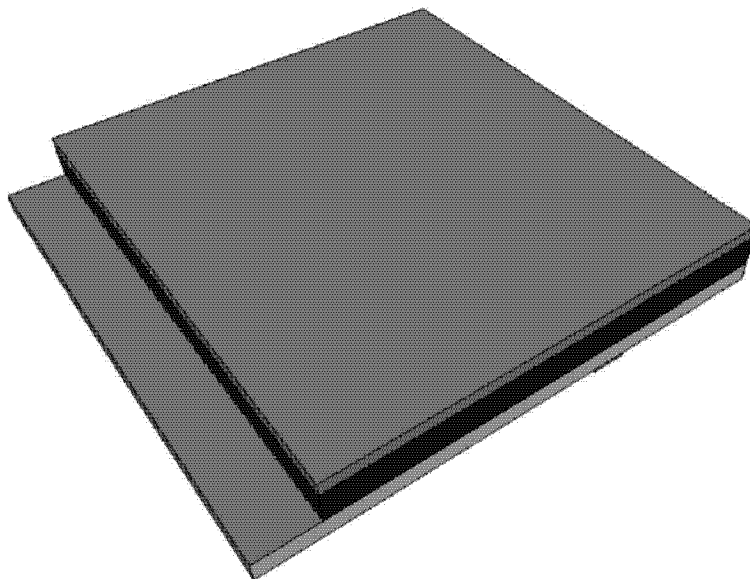


图 24Q

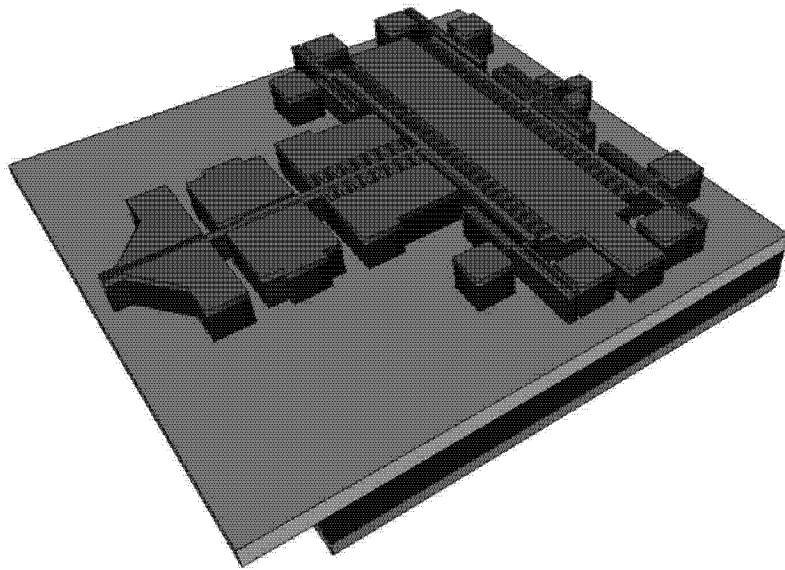


图 24R

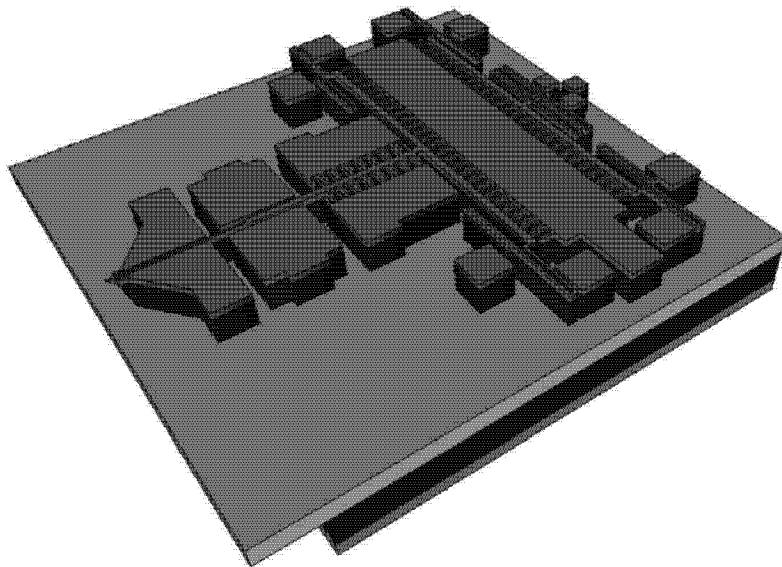


图 24S

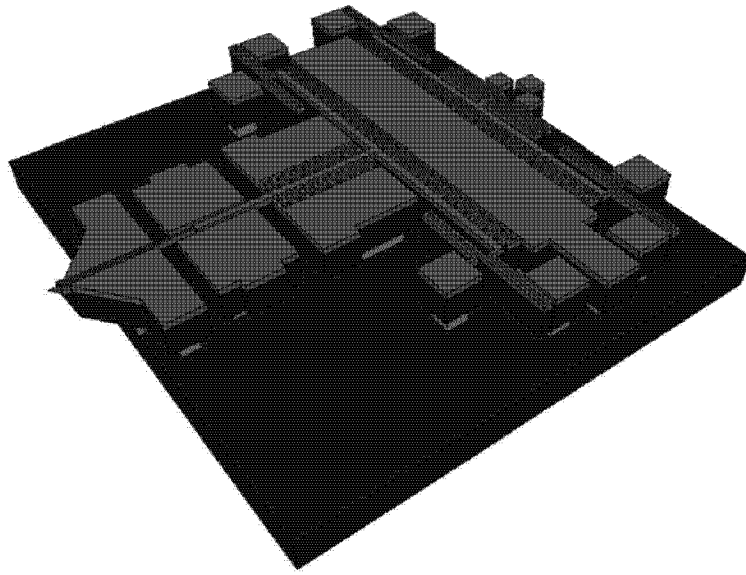


图 24T