

# 离子液体图案化表面制备及胶体 探针法实验研究

莫宇飞

(乔治华盛顿大学 工程与应用科学学院, 美国 华盛顿特区 20052)

**摘要:** 介绍一种新型表面黏着力可控的表面的制备方法,通过局部阳极氧化结合离子液体离子交换技术,在纳米尺度下制备复合图案化织构表面以及测量其表面力学特征。采用基于导电原子力显微的局部阳极氧化技术制备出各种形状和尺寸的纳米二氧化硅图案阵列,利用自组装技术对织构化图案进行分子自组装。通过对表面离子液体分子自组装薄膜的表面阴离子进行离子交换就可以对表面黏着力进行控制。另外,采用新颖的胶体探针技术对实际的复合表面的黏着力学进行表征。表征参数数据表明该实验方法能普遍用于半导体基底表面改性。

**关键词:** 离子液体; 原子力显微镜; 纳米颗粒织构化表面; 纳米摩擦学

**中图分类号:** TB383-33 **文献标志码:** B **文章编号:** 1002-4956(2014)12-0041-05

## Experimental study on fabrication and colloidal probe method of a nanotextured surface with ionic liquid self-assembled monolayers

Mo Yufei

(School of Engineering & Applied Science, George Washington University,  
Washington, D. C. 20052, United States)

**Abstract:** This article introduces a novel method, which presents to fabricate a wetting and adhesion-controlled surface by means of local anodic oxide (LAO) lithography combined with ion exchange of ionic liquid. The nanometer-sized textures are fabricated using a conductive atomic force microscopy based LAO approach. The room temperature ionic liquid molecules are then self-assembled onto the matrix layer of silicon dioxide texture. The wetting and adhesive force of the surface is controlled by the formation of a self-assembled monolayer modified texture substrate and ion exchange on the surface. In addition, the adhesive characterization of ionic liquid and texture layers is investigated with a home-made colloidal probe. The characterization data parameters exhibit that the method can be potentially used in semiconductor substrate surface modification in MEMS application.

**Key words:** ionic liquid; atomic force microscopy; organization of nanoparticle surface; Nano Tribology

### 1 原子力显微技术与原子力局部氧化技术

由于在光刻和生物分析方面的潜在应用,功能化表面特别是具有纳米层次结构的功能表面已经成为材料科学家研究的热点<sup>[1]</sup>。这种结构的表面能在疏水<sup>[2]</sup>、病毒检测<sup>[3]</sup>、抗黏着<sup>[4]</sup>和微流体<sup>[5]</sup>等方面具有潜

在应用价值。微印刷、光刻、激光直写和微雕刻等方法已经可以制备 100 nm 以上的图案。但是这些方法对于 100 nm 以下的图案制备却无能为力。等离子束刻蚀技术可以制备 10 nm 级别的图案,但需要在超高真空环境下进行<sup>[6]</sup>。扫描隧道探针刻蚀、纳米颗粒掩板和纳米嫁接技术具备在自组装表面制备 5 nm 分辨率的纳米图案<sup>[7]</sup>。但是不论是纳米颗粒掩板法,还是扫描隧道探针刻蚀技术都是产生凹图形表面<sup>[8]</sup>。如何精确可控地制备分子尺度的纳米结构是材料科学研究者目前所面临的技术难题。

收稿日期:2014-03-31 修改日期:2014-05-06

作者简介:莫宇飞(1979—),男,广西桂林,博士,主要从事有机功能复合材料的制备和表面力学评价等研究工作。

E-mail: yufeimo@gxu.edu.cn

原子力显微技术(AFM)是纳米科学研究必不可少的利器,具有小于10 nm分辨率并能精确定位和成像。目前,原子力显微镜的最高分辨率为0.25 nm。在物理、化学和生物等方面研究中起到重大的作用。这项技术具有很好的环境适应性,不依赖于成像的介质。在真空、大气和液体环境中都具有极高的分辨率。该技术能很容易转换成测量极其微小力的工具,其精度可达纳米牛顿。这种力学测量方法是基于探针与界面之间力的矢量叠加。表面黏着力包含静电场力,化学结合力,机械力学的相互作用。目前拓展的原子力力学测量技术可以应用到各种微纳米力学的测量中,包括微静电力、微磁力以及微毛细管力等。迄今为止,原子力显微技术与浸蘸笔纳米平版印刷术(DPN)<sup>[9]</sup>、微局部氧化技术<sup>[10]</sup>以及一些其他的新技术<sup>[11]</sup>结合,发展成为一种在纳米尺度构筑表面复杂结构的新方法。

原子力局部氧化技术(LAO)是在半导体基底表面运用负偏压探针诱导同步氧化生成纳米氧化物的方法。以AFM为基础的刻蚀技术由于技术的实用性和简便性而成为非常活跃的研究领域。AFM针尖也可以用来负载催化剂以选择性诱发表面反应,或者作为“笔”牵动DPN的表面分子以及派生技术。AFM针尖也可以用作电极以引导表面局域氧化反应。局部阳极氧化的机理和动力学与电场、表面张力、液体的表面的弯月面有关<sup>[12]</sup>。利用这种技术可以在半导体表面制备出厚度小于5.0 nm的图案<sup>[13]</sup>。实验中,可以调节针尖至表面的距离、偏电压或隧道电流。隧道电流依赖于分子间距,并遵循负指数关系。原则上单分子的处理最佳的方法是在针尖和表面之间利用原子间和分子间的力实现。利用隧道电流可以制作很好的纳米结构,其过程包括化学键的断裂和重构,并且被高度局域化。隧道电流可以用来引发局域化学反应,即引发化学键的断裂和形成。对于小分子,可以理解在反键轨道上放置一个原子或在成键轨道上移去一个原子的过程,引起化学键的断裂。少数局域化刻蚀技术通过运用AFM针尖作为电极诱发局域电化学反应,比如被吸附物的氧化或导电,或非导电材料中的基质本身的氧化。AFM除了被用于纳米图案化的制备之外,同时也是非常好的表面力测量工具。表面黏着力主要是由接触界面力和范德华力以及静电力等组成。在AFM测量中针尖和样品表面的提拉力即为实际的黏着力。由于LAO结构是由原子力针尖氧化产生,所以LAO纳米结构阵列的黏着力和摩擦力不能用普通的原子力探针来测定。原子力探针锥入度小,针尖顶端面积很小(通常曲率半径小于25 nm),因此探针与样品只能点接触,无法测得阵列的“宏观”信息。

Ducker小组<sup>[14]</sup>提出的用探针黏球制备胶体探针测定界面之间的作用力的方法为测量提供了可能。在本研究中,采用一种自制的球形胶体探针来测定LAO纳米阵列的黏着力和摩擦力。LAO纳米图案自身高度很低(低于12 nm),使得其表面粗糙度很低。而表面黏着力与表面粗糙度紧密相关,那么胶体球形探针表面粗糙度的确定就变得尤为重要。由于胶体探针的球形针尖表面面积很小,表面粗糙度的测定给研究带来新的挑战。在400倍长工作距离的光学显微镜的辅助下,采用一支尖锐且力常数较小的原子力探针对于自制球形胶体探针表面进行表面分析。如何测量胶体球形探针表面粗糙度成为新的问题。Neto小组首次提出了通过反转办法,并利用超精细针尖对粗糙度进行细致研究并得出了表面三维形貌<sup>[15]</sup>。

本文提出一种新型的纳米结构制备方法。这种方法结合了局部阳极氧化、自组装和表面离子交换技术,可以在半导体实现表面黏着力可控。在本课题组前期的研究工作中发现,纳米结构的高度是可以改变针尖与样品之间的脉冲电压、偏压宽度、环境湿度来控制的。针尖与样品之间较低的脉冲偏压和较短的脉冲宽度都将使得探针没有足够的电流和时间使得基底表面的氧化达到饱和高度<sup>[16]</sup>。这种方法可以通过组装薄膜与图案化表面的层与层的制备来控制表面黏着力。这种技术将辅助材料表面设计和对纳米器件常见的黏着失效的保护。

## 2 实验

氢钝化硅片(H-Passivated P-100,阻抗小于0.005  $\Omega$ )购于北京本原纳米仪器公司,切割成10 mm  $\times$  5 mm  $\times$  0.5 mm的薄片,丙酮清洗、氮气吹干后,在常温无尘环境下存放待用;再将硅片用丙酮和丙三醇轮流超声波清洗并氮气干燥,然后将硅片置于 $6.65 \times 10^{-9}$  Pa的高真空和1500  $^{\circ}\text{C}$ 条件下,氢气分子被分解成氢离子并注入硅基底。采用氢钝化处理硅片的主要目的是防止不均匀自氧化和方便对局部氧化均匀性的控制,从而提高纳米图案的分辨率。

本研究中所用的原子力显微系统平台是一个实验环境可控的多模块系统。导电的铂探针被用于局部氧化过程。探针的锥形曲率半径为25 nm。通过原子力的扩展软件,将预设图形转换成脚本程序,将刻蚀面分成 $512 \times 512$ 的点阵,来定位氧化的区域和描述预设图像。纳米结构的加工是由针尖尺寸、脉冲电压、脉冲宽度和相对湿度所控制的。图1为AFM电流诱导局部阳极氧化过程示意。当AFM针尖接近样品表面时,在高电场( $E > 10^7$  V/cm)作用下,样品和表面水层构成感应电流回路使得硅表面氧化成二氧化硅。反应方

程式如下:

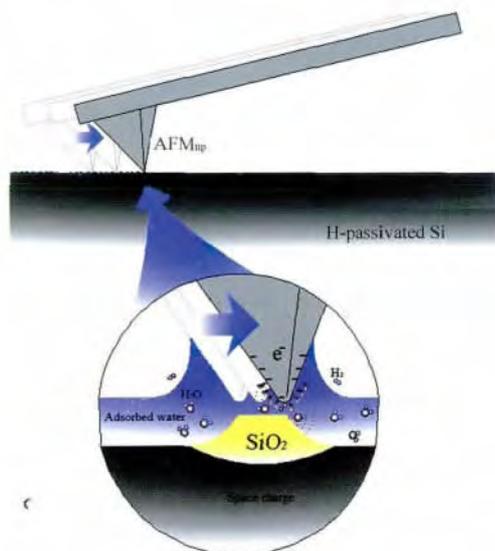
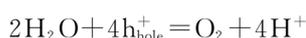


图1 AFM 电流诱导局部阳极氧化过程示意图

衰减全反射傅里叶红外谱(ATR-FTIR, Bruker IFS 66 V/S)在难以制备的样品无损检测及表面信息的获取等方面具有独特的优势。ATR-FTIR 使微区成分的分析变得方便而快捷,检测灵敏度可达  $10^{-9}$  g 数量级,测量显微区直径达数微米。ATR 附件基于光内反射原理而设计。从光源发出的红外光经过折射率大的晶体再投射到折射率小的试样表面上,当入射角大于临界角时,入射光线就会产生全反射。事实上红外光并不是全部被反射回来,而是穿透到试样表面内一定深度后再返回表面。在该过程中,试样在入射光频率区域内有选择吸收,反射光强度发生减弱,产生与透射吸收相类似的图像,从而获得样品表层化学成分的结构信息。实验中,样品水平放置在半导体锗晶体表面,入射角为  $65^\circ$ ,分辨率为  $4 \text{ cm}^{-1}$ ,扫描次数为 32,光学室和样品室保持负压为  $6 \times 10^{-4} \text{ MPa}$ 。

胶体球形探针是在 AFM 探针针尖除黏结一个直径为  $50 \mu\text{m}$  的玻璃球体用于测量表面黏着力,图 2 所示为胶体探针扫描电镜形貌图。实验前,胶体探针在高纯度乙醇中超声清洗 1 min,然后等离子清洗 30 s。使用前,每个胶体球形探针都经过黏着力和侧向力矫正。采用超细弹性模量为  $2 \text{ N/m}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  原子力探针球形探针表面进行测量,以确定球形探针自身的表面粗糙度。为避免在测量过程中表面分子的黏附或转移,在每次测量前都对新鲜解离的云母表面进行扫描

来去除物理吸附在探针表面的分子。纳米摩擦学性能的测定分为黏着力和侧向力。黏着力为针尖脱离样品时所需要的提拉力,黏着力主要包括毛细管力、范德华力、静电力和化学键合力。原子力显微镜除了形貌测量之外,还能测量力对探针-样品间距离的关系曲线,即针尖和样品间的黏着力。当微悬臂固定端被垂直接近,然后离开样品表面时,微悬臂和样品间产生相对移动。而在这个过程中微悬臂自由端的探针也在接近、甚至压入样品表面,然后脱离,此时原子力显微镜测量并记录探针所感受的力,从而得到力-距离曲线。有  $F_{\text{ad}} = k_c \times \delta_{\text{max}}$ ,其中  $F_{\text{ad}}$  为黏着力,  $k_c$  是针尖微悬臂的弯曲刚度,  $\delta_{\text{max}}$  为针尖脱离样品瞬间微悬臂的最大弯曲变形量。由于微悬臂的弯曲刚度远小于样品的变形常数,所以针尖的弯曲变形量就等于针尖脱离样品过程中微悬臂在竖直方向上的位移  $Z_p$ ,即  $\delta_{\text{max}} = Z_p$ 。然而,加载时的  $k_1$  和卸载时的  $k_2$  并不一致。这是由于在卸载过程中压电晶体的滞后所致,这种滞后会影响到  $\delta_{\text{max}} = Z_p$  的准确性。校正的计算黏着力的公式:  $F_{\text{ad}} = k_c \times \delta_{\text{max}} \times a$ ,其中  $a$  为校正系数,  $a = k_2/k_1$ 。对每个样品表面进行 10 次测量,取其平均值。实验中,相对湿度保持在 20%RH,测量点大于 200,每个测量点测量次数大于 10 次。摩擦力即为针尖在样品表面扫描时所受到的侧向力。在接触模式 AFM 中,在扫描过程中,由于探针与样品表面存在横向的相互作用,探针悬臂会发生左右的扭曲。与接触模式类似,这个横向扭曲的大小可以通过光斑位置检测器的左右两部分的光强差反映。因此,可以根据纵向和横向的信号差来得到载荷和摩擦力的电学信号。通过对 AFM 悬臂的常数校正和对应关系算出具体的受力大小。

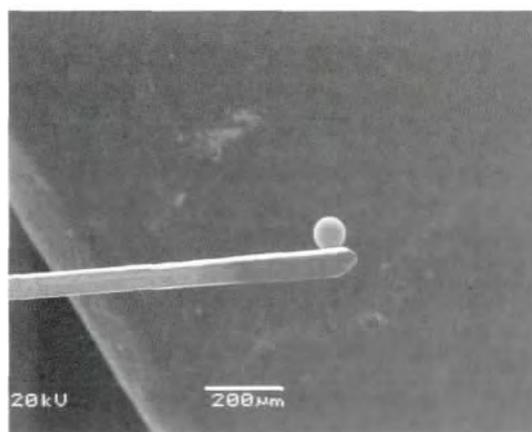


图2 自制胶体球形 AFM 探针 SEM 电镜照片

### 3 结果和讨论

#### 3.1 纳米织物的结构和形貌特性

纳米织物的制备以及对其独特的量子性能的研究

需要对该技术的每一个步骤进行可靠的控制。为了能制备出尺寸和高度精确可控的纳米结构,研究中首先对制备参数与结构尺寸和高度的对应关系进行细致研究。图 3(a)所示为  $\text{SiO}_2$  测试阵列制备的原子力图像。表面制备的纳米柱直径约为 700 nm,间距为 600 nm。纳米柱的生长高度随脉冲电压和脉冲宽度的增加而增加。从图中的界面图可以观察到, $\text{SiO}_2$  纳米柱高度从 0.8 nm 到 6.4 nm 精确可控。通过制备纳米矩阵的方法,可以得到纳米图案尺寸和高度与制备参数之间的关系,从而制备出预想的纳米结构。采用这种方法,不仅可以制备出正图案(凸图案),而且能制备出负图案(凹图案),如图 3 所示。在正图案制备后,只需要用 1% HF 溶液对样品进行一次选择性刻蚀就能将正图案转换成负图案。图 3(b)中制备出的纳米孔深度范围从 0.5~1.8 nm。结果表明该项技术可以在基底或者薄膜表面进行正、负两种图案化。

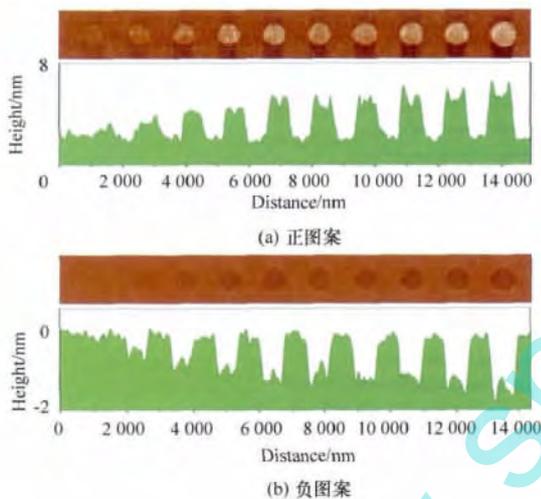


图 3 氢钝化硅表面纳米结构阵列

### 3.2 自组装薄膜的性质

氯化 1-烷基-3-(3-乙氧基-丙硅烷基)咪唑离子液体 ( $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{Cl}$ ) 参考文献[17]方法合成。 $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{Cl}$ ,  $n=1,8$  通过与  $\text{NaBF}_4$  或  $\text{NaPF}_6$  溶液离子交换制得  $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{BF}_4$  或  $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{PF}_6$ 。通过将新制备的织构化硅基底浸没在质量分数为 1% 的离子液体甲苯溶液中保持 120  $^\circ\text{C}$ 、回流 24 h, 制备得离子液体自组装薄膜。通过椭圆偏振光膜厚仪分别测得  $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{BF}_4$  离子液体自组装薄膜厚度为 0.5 nm 和  $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{PF}_6$  离子液体自组装薄膜厚度为 1.2 nm。研究表明,离子液体自组装薄膜表面可以通过离子交换制备出各种阴离子的表面。图 4 所示为离子液体自组装纳米结构表面的三维形貌。插图所示为不同纳米结构表面的局部扫描图。左插图所示为没有织构化的氢钝化硅表面局部,右插图所示为  $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{Cl}$  离子液体自组装表面形貌。结果表明通过浸涂自组

装过程, $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{Cl}$  离子液体分子对纳米织构化的二氧化硅表面具有选择性吸附。

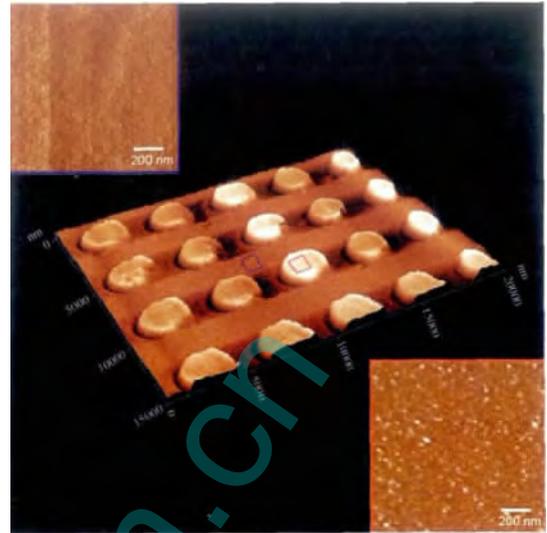


图 4 纳米结构复合离子液体分子自组装表面 AFM 照片

衰减全反射傅里叶红外 ATR-FTIR 谱学特征表明了离子液体在织构化硅表面的成功自组装。图 5 所示为  $[\text{C}_n\text{AIM}]\text{Cl}$  离子液体自组装表面的傅里叶红外吸收谱图。结果表明存在碳氢弯曲和伸缩振动峰, 2 850  $\text{cm}^{-1}$  和 2 922  $\text{cm}^{-1}$  分别归属于亚甲基对称和不对称振动。与此同时, 2 846~2 850  $\text{cm}^{-1}$  和 1 915~1 918  $\text{cm}^{-1}$  归属于碳氢  $\text{SP}^3$  振动类型。结合 AFM 形貌观察直接证明样品表面吸附的自组装离子液体分子。

### 3.3 黏着力测量

温度和相对湿度对黏着有影响,为此测量是在温度和湿度可控的环境中进行的。环境湿度是通过向原子力显微镜工作腔体内通入混合水蒸气的干燥氮气来进行控制。为了最小化加热器对原子力显微镜的悬臂和扫描器的压电陶瓷的热影响,实验采用点加热的方法来进行局部加热。光源射出的平行光通过凸透镜汇聚在局部区域,可以通过调整焦距和光源功率来达到调整加热区域的大小和加热温度。原子力显微镜腔内放置湿度探头和热电偶来测定加热区域的温湿度。图 6 所示为黏着力与纳米结构以及表面化学修饰之间对应关系,不经任何处理的氢钝化硅片黏着力高达  $278 \pm 20$  nN;当表面织构化之后,表面黏着力显著降低为  $162 \pm 18$  nN;经过离子液体分子自组装后,表面黏着力进一步降低为  $132 \pm 12$  nN。进行表面离子交换后,黏着力可随着表面阴离子的变化而变化,实现表面黏着力可控。当织构表面为  $\text{Cl}^-$  离子时,黏着力为  $139 \pm 10$  nN;当阴离子交换成  $\text{PF}_6^-$  后黏着力降低为  $56 \pm 10$  nN;当阴离子交换成  $\text{BF}_4^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{SO}_3^{2-}$  后黏

着力即随之升高。结果表明,表面黏着力与表面阴离子的表面能直接相关。不同低表面能的阴离子使得表面形成的水弯月面能力强弱发生改变,从而改变黏着

力。同时,通过这种纳米复合技术实现在纳米牛顿尺度对表面力的精确控制。

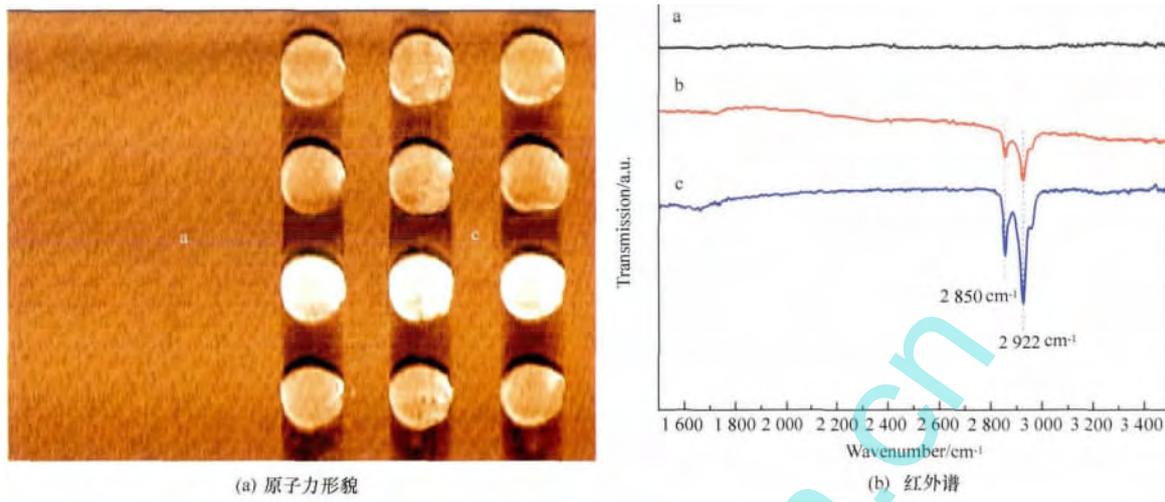


图5 纳米织构表面衰减全反射傅里叶红外谱图分析

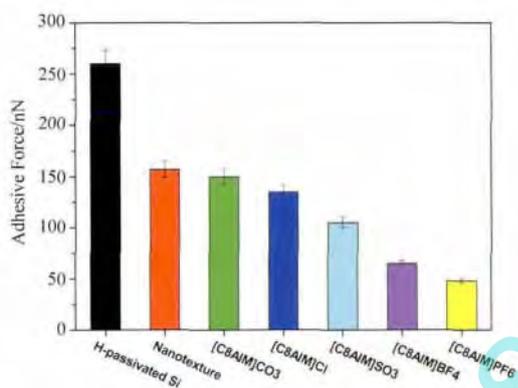


图6 各种离子交换后的纳米织构表面黏着力柱状图

#### 4 结论

本文提出了一种新颖的制备表面黏着力可控的表面的方法。结合局部阳极氧化、分子自组装和离子液体离子交换技术,在纳米尺度下制备复合图案化织构表面以及测量其表面力学特征。研究表明,通过对表面离子液体自组装分子薄膜的表面阴离子进行离子交换就可以对表面黏着力进行控制。不仅如此,研究中还提出了新颖的胶体探针技术对实际的复合表面的黏着力学进行表征。与以前的探针研究实验方法相比<sup>[14,18]</sup>,在胶体探针弹性常数的测量、校正以及曲率调整都进行了改进,误差范围收窄,精度大幅度提高。通过采用温度和湿度控制腔体对力测量环境进行控制,在纳米牛顿尺度获得更为稳定的黏着力测量结果。该实验研究方法能普遍用于半

导体基底表面改性。

#### 参考文献(References)

- [1] Kobayashi K, Tonegawa N, Fuji S, et al. Fabrication of DNA Nanowires by Orthogonal Self-Assembly and DNA Intercalation on a Au Patterned Si/SiO<sub>2</sub> Surface[J]. Langmuir, 2008, 24(22): 13203-13211.
- [2] Aulin C, Yun S W, Gberg L, et al. Design of Highly Oleophobic Cellulose Surfaces from Structured Silicon Templates[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2009, 1(11): 2443-2452.
- [3] Alsteens D, Pesavento E, Cheuvart Gilles, et al. Controlled Manipulation of Bacteriophages Using Single-Virus Force Spectroscopy [J]. ACS Nano, 2009, 3: 3063-3068.
- [4] Mo Y, Wang Y, Pu J, et al. Precise positioning of lubricant on surface using local anodic oxide method[J]. Langmuir, 2009, 25(1): 40-42.
- [5] Ell J, Crosby T A, Peterson J J, et al. Formation of SiO<sub>2</sub> Air-Gap Patterns Through scCO<sub>2</sub> Infusion of NIL Patterned PHEMA[J]. Chem Mater, 2010, 22(4): 1445-1451.
- [6] Berggren K K, Bard A, Wilbur J L, et al. Microlithography by using natural metastable atoms and self-assembled monolayers[J]. Science, 1995, 269(5228): 1255-1257.
- [7] Mo Y F, Bai M W. Preparation and Adhesion of a Dual-Component Self-Assembled Dual-Layer Film on Silicon by a Dip-Coating Nanoparticles Method[J]. J Phys Chem C, 2008, 112(30): 11257-11264.
- [8] Xiao D, Liu G Y, Charych D H, et al. Preparation, Structure, and Mechanical Stability of Alkylsilane Monolayers on Mica[J]. Langmuir, 1995, 11(5): 1600-1604.
- [9] Hong S, Zhu J, Mirkin C A. Multiple Ink Nanolithography: Toward a Multiple-Pen Nano-Plotter[J]. Science, 1999, 286(5439): 523-525.

(下转第 49 页)

### 3.1 分支数对产能的影响

异侧3个分支比异侧4个分支产能大,2个分支的产能最小。分支越多,井间干扰增大;分支数少,控制的面积也少。分支数量并非越多越好,存在一个最优值。

### 3.2 分支间距对产能的影响

同为异侧2个分支(分支间距为80 mm和分支间距为240 mm),最初并筒液面变化差别不大,但120 s之后,分支间距为240 mm的产能明显增大,因此适当加大分支间距可以增大分支井的控制面积,减少井间干扰。分支间距的最优值与油藏的压力关系密切。

### 3.3 分支长度对产能的影响

异侧四个分支,分别将同侧的2个分支长度缩短35 mm和65 mm,缩短35 mm的产能较大,且是所有形态中产能最大的。这说明分支数相同时,可对分支长度进行优化获得最大产能。

### 3.4 分支的排列方式对产能的影响

当分支数均为2个时,异侧2个分支比同侧2个分支产能大,因此尽量将分支井异侧布置,可以增大分支井的控制面积,减少分支井之间的干扰。

## 4 结论

多分支水平井产能模拟实验装置可以进行不同分支形态下产能模拟实验,可为多分支井的优化设计提供实验依据。实验结果表明:分支井的数量、间距、长度和布置方式对产能均有影响。为了提高多分支水平井的产能,可适当增加分支井的数量和增大分支井间距,将各分支长度设计为不均等,尽量将分支井沿主井眼异侧布置。

### 参考文献(References)

[1] 沈忠厚,黄洪春,高德利. 世界钻井技术新进展及发展趋势分析

(上接第45页)

- [10] Mo Y F, Wang Y, Bai M W. Fabrication of nanopatterns on H-passivated Si surface by AFM local anodic oxidation[J]. *Physica E*, 2008, 41: 146-149.
- [11] Wacaser B A, Maughan M J, Mowat I A, et al. Chemomechanical surface patterning and functionalization of silicon surfaces using an atomic force microscope[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(5): 808.
- [12] Lazzarino M, Mori G, Sorba L, et al. Chemistry and formation process of Ga(Al)As oxide during local anodic oxidation nanolithography[J]. *Surface Science*, 2006, 600: 3739-3743.
- [13] Dagata J A, Perez-Murano F, Abadal G, et al. Predictive model for scanned probe oxidation kinetics[J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(19): 2710.
- [14] Ducker W A, Senden T J, Pashley R M. Direct measurement of

[J]. *中国石油大学学报:自然科学版*, 2009, 33(4): 64-70.

- [2] 沈忠厚,王瑞和. 现代石油钻井技术50年进展和发展趋势[J]. *石油钻采工艺*, 2003, 25(5): 1-6.
- [3] 高德利,鲜保安. 煤层气多分支井身结构设计模型研究[J]. *石油学报*, 2007, 28(6): 113-117.
- [4] 鲜保安,陈彩红,王宪花,等. 多分支水平井在煤层气开发中的控制因素及增产机理分析[C]//第四届国际煤层气论坛,北京,2004: 88-92.
- [5] 程林松,李春兰,郎兆新,等. 分支水平井产能的研究[J]. *石油学报*, 1995, 16(2): 49-55.
- [6] 李曩,王卫红,苏彦春. 分支水平井产能的计算[J]. *石油学报*, 1998, 19(3): 7, 89-92.
- [7] 蒋廷学. 多分支水平井稳态产能研究[J]. *特种油气藏*, 2000, 7(3): 14-17.
- [8] 陈卫东, Hill A D. 多分支井产能预测方法[J]. *中国海上油气*, 2006, 18(6): 394-398.
- [9] 汪志明,张磊敏,魏建光,等. 分支参数对多分支井入流及产能的影响规律研究[J]. *实验钻探技术*, 2009, 37(3): 83-87.
- [10] 张辉,于洋,高德利,等. 煤层气多分支井形态分析[J]. *西南石油大学学报:自然科学版*, 2011, 33(4): 101-106.
- [11] 姚志良,曹飞,丁士东,等. 分支井产能预测模型及分支形态优化[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(3): 56-59.
- [12] 陈长春,魏俊之. 水平井产能公式精度电模拟实验评价[J]. *石油勘探与开发*, 1998, 25(5): 62-64.
- [13] 韩国庆,李相方,吴晓东. 多分支井电模拟实验研究[J]. *天然气工业*, 2004, 24(10): 99-101.
- [14] 曲占庆. 辐射状分支井产能电模拟实验研究[J]. *西安石油大学学报:自然科学版*, 2007, 22(4): 65-68, 71.
- [15] 郭迎春,黄世军. 多分支井近井油藏地带渗流的电模拟实验研究[J]. *油气地质与采收率*, 2009, 16(5): 95-96, 99.
- [16] 朱明,吴晓东,韩国庆,等. 多分支井电模拟试验研究[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(4): 110-113.
- [17] 曲占庆,杨阳,许霞,等. 基于电模拟实验的分支水平井产能公式精度评价[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(11): 3078-3081.

colloidal forces using an atomic force microscope[J]. *Nature* 1991, 353: 239-241.

- [15] Neto C, Craig V S J. Colloid Probe Characterization: Radius and Roughness Determination[J]. *Langmuir*, 2001, 17(7): 2097-2099.
- [16] Mo Y, Zhao W, Wang Y, et al. Nanotribological properties of precision-controlled regular nanotexture on H-passivated Si surface by current-induced local anodic oxidation[J]. *Ultramicroscopy*, 2009(109): 247-252.
- [17] Mehnert C P, Cook R A, Dispenziere N C, et al. Supported Ionic Liquid Catalysis-A New Concept for Homogeneous Hydroformylation Catalysis[J]. *J Am Chem Soc*, 2002, 124(44): 12932-12933.
- [18] Mo Y, Huang F, Pan S. Fabrication and Adhesion Measurement of a Nanotextured Surface with Ionic Liquid Monolayers[J]. *J Phys Chem C*, 2011, 115: 10125-10130.