

# 利用掃描式沾水筆探針微影技術研製 奈米級分子層薄膜結構

## Nanopatterning of Functional Groups Using Dip-Pen Nanolithography

吳家豪、許鈺宗

Chia Hao Wu, Jeng Tzong Sheu

奈米科技已然成為本世紀前期重要的主導核心技術，而在眾多先進研發技術中，掃描式探針微影術種類繁多且已成為發展奈米科技不可或缺的工具。本研究乃是利用掃描式沾水筆探針微影技術藉著空氣中水分子當媒介，直接在矽質晶片上進行奈米級分子層結構圖案的微影塗佈。在此種方式中探針就像一隻筆，而分子層溶液就如同墨水一般，除了傳統墨水圖形化之外，目前的研發技術已能將 3-胺基丙烷三甲氧基矽線寬精準地控制在 60–70 nm 之間，同時奈米金顆粒亦能選擇性沉積於該圖形上。

Nanopatterning using dip-pen nanolithography (DPN) has been demonstrated with MHA ink on gold substrates in a temperature-controlled and humidity-controlled environment. On the other hand, *N*-(2-aminoethyl)-3-amino-propyl-trimethoxysilane (AEAPTMS) is used as ink to deposit on the silicon dioxide surface as linker for charged nanoparticles. It is found that the feature size of AEAPTMS can be determined by the environment relative humidity. Patterns down to 60 nm are demonstrated. Also, gold nanoparticles with 15 nm in diameter are selectively deposited on the surfaces of the AEAPTMS DPN patterns.

### 一、前言

新興的奈米科技可說是二十一世紀產業革命的原動力，目前國內半導體廠商也積極將 IC 推進到奈米領域，希望藉由奈米技術的發展，將台灣半導體產業提昇至領先的地位。奈米技術主要目標即是想藉由掌控原子、分子或巨分子尺度結構裝置的特

性，並有效率的製造或使用這些結構裝置。隨著奈米技術與奈米細微化能力地不斷研發創新，可為人類的健康、電子、生物、化學診斷、製造和運輸、環境的控制…等方面帶來新的前景。

現今常見的奈米級圖案轉換技術大致上有下列幾種的方式：電子束微影術 (E-beam)<sup>(1)</sup>、深紫外光微影術 (EUV)<sup>(2)</sup>、離子束微影技術 (ion beam)<sup>(3,4)</sup>、

微接觸  $\mu$ -CP 微影術 (micro-contact printing)<sup>(5)</sup>、奈米印刷微影術 (nano-imprint lithography)<sup>(6)</sup>、分子自組裝單層膜技術 (self-assembled monolayer, SAM)<sup>(7,8)</sup> 以及掃描式探針微影術 (scanning probe lithography, SPL)<sup>(9-13)</sup> 等研發技術。依目前的發展進度來分析，以電子束微影術 (E-beam)、離子束微影技術 (ion beam) 和深紫外光微影術 (EUV) 雖較具競爭優勢，但這大部分微影方法的奈米圖案成像技術的光源設備均極為昂貴，而且運用這些高能電子束或離子束轟擊試片，將導致試片表面產生損壞缺陷或殘留的電子 (或離子) 在其微影局部的地方產生鄰近效應，進而影響到整個元件的可靠度。因此一個具高解析度之奈米級尺寸，又具有方便且不會昂貴的微影製程，乃為半導體前瞻性製程未來的重要技術。

在眾多先進研發技術中，利用原子或分子有規則性排列的製程方法，掃描式探針微影術 (SPL) 已成為發展奈米科技不可或缺的工具。掃描式探針微影技術是用來操控原子、分子最簡便的工具，是利用 STM/AFM 探針來操控奈米粒子至預先設定的位置，來精準控制原子與分子的一種方式。例如將 STM/AFM 探針由於局部電場電流的作用，使探針局部的表面物質產生化學的改質反應，當精準地移動探針可以使得具有導電性質的材料表面 (例如：矽質表面) 形成氧化的奈米圖案。也可利用易彎曲的懸臂探針與基材的表面接觸使探針上分子轉移到基材表面。

1999 年美國西北大學奈米技術研究所所長查德莫津 (Chad Mirkin)<sup>(14)</sup> 於 Science 期刊上發表了掃描式沾水筆微影 (dip-pen Nanolithography, DPN) 應用技術專文後，藉由掃描式探針直接書寫 (direct-writing) 可以有效地製作出奈米級的圖案，查德莫津所發展出來的掃描式沾水筆奈米微影技術，可以將分子墨水直接寫入到任何基材試片表面，並可用於精確度非常高的線列 (alignment)，為奈米結構微影製程技術開闢了一條新路徑。圖 1 所示為掃描式沾水筆微影技術將分子自組裝單層膜轉移到基材試片表面示意圖。現今的研究利用 DPN 技術可以排列 2D 或 3D 的模板結構，目前已有 DNA 的自組裝排列應用研究。查德莫津所領導的研究團隊利用 DPN 奈米科技所建構出來的電子

式、掃描式及彩色 DNA 三種感應器，其敏感度不但優於以螢光為標識的 DNA 偵測技術，其專一性更遠超過現今任何一種 DNA 感應器，其敏感性及選擇性均有重大突破<sup>(15-17)</sup>。

由於奈米技術的發展，未來的元件技術如自旋電子元件 (spintronics)、分子電晶體、DNA 元件、生醫感測元件、量子點元件 (quantum dots devices) 及單電子電晶體 (single electron transistors, SET) 等元件研發技術均須利用奈米級分子線 (molecular wire) 或奈米線 (nanowire) 線路將奈米元件連接至系統上，而其中掃描式沾水筆探針微影技術提供了一個重要的整合平台關鍵技術，亦可做為各應用領域的基礎整合技術，而未來的世代將會是高密度、IC 及分子元件的高度整合時代，DPN 奈米級微影技術的發展將具關鍵的角色。因此，為因應發展國內未來所需要之前瞻性研發技術，本實驗室應用先進的掃描式沾水筆探針顯微技術設備，配合所研發出的特殊分子墨水，於不同的基材上直接局部沉積製作出特殊奈米級分子層薄膜的結構及元件，不但可以應用於奈米級生醫感測元件的製作技術，並且可以縮短電子元件的設計週期與製程時間。

## 二、DPN 單分子層薄膜自我組裝技術

DPN 微影單分子層薄膜中，所使用的掃描式沾水筆探針顯微系統需具備溫濕度控制，因為這兩項因素決定了探針上墨水擴散至基材的速度，因此也決定了圖形的大小。所用的探針為氮化矽材質，

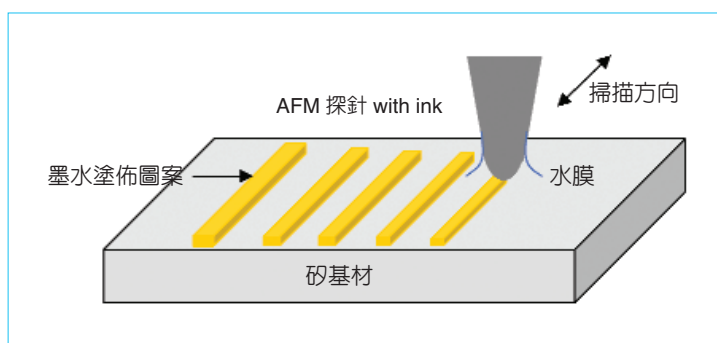


圖 1. 掃描式沾水筆微影技術將分子自組裝單層膜轉移到基材試片表面示意圖。

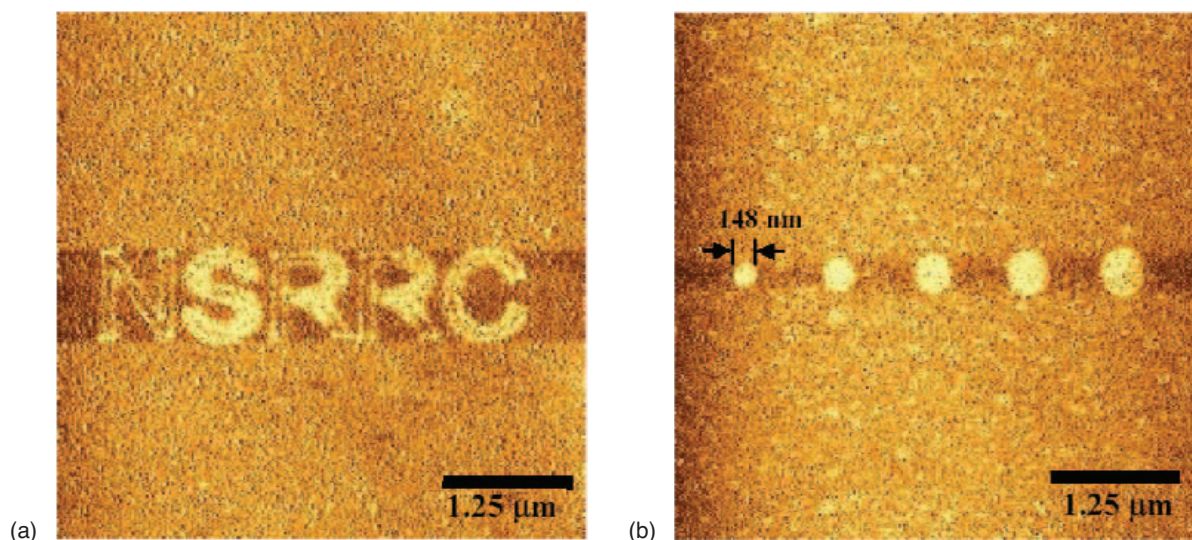


圖 2. DPN 探針浸泡塗佈含有硫醇分子 MHA 墨水 (濃度為 5 mM) 在金的試片表面所微影產生的 NSRRC 字樣與點圖案。環境溫度為  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，環境相對濕度控制在 55%，探針接觸力設定為 0.5 V，DPN 微影「NSRRC」字樣圖案時，將探針的掃描速度操作維持  $0.5\text{ }\mu\text{m/s}$ ，而微影點圖案時則藉由控制探針接觸的時間 5–25 s 來完成。

其直徑大約 15–20 nm，並且在探針針尖上浸泡塗佈了一層很薄的含硫原子化合物分子墨水 (例如：MHA、ODT 等)，此類分子墨水含硫官能基，可與金的表面產生鍵結反應，在適度的環境濕度下，藉由環境中的水汽 (凝態水膜) 當作擴散的橋樑，由探針針尖轉移至金的試片表面，而在金的試片表面形成一分子自組裝的單層膜。此外，利用 DPN 探針微影時，所使用的分子墨水尚須考量探針針間材質與試片表面材質間的分子墨水親和力，也就是單分子層墨水不能與探針的基材發生反應，不然單分子層墨水就無法順利地轉移到試片基材上。單分子層薄膜 DPN 微影製作在試片 (矽質試片、金試片) 上往往是利用其自發性化學鍵結的方式將其固定在基材上，有利用電荷效應、分子間暗碼或官能基鍵結等不同方法。而單分子層的構造主要有三個主體架構：首端官能基 (head group)、分子骨幹 (body)、尾端官能基 (tail group)。首端官能基之功能是与試片 (矽、金) 表面產生化學鍵結，並將整個分子固定在基材上。而分子骨幹，其功能在支撐整個分子層，通常為一長鏈烷基或芳香基團的組合。而尾端官能基則是連接分子骨幹暴露在基材的

表面上，由於此端具有多變的化學官能基，因此可以讓表面產生多變的性質，例如：疏水性或親水性、生物分子或化學分子上的感應性，以及保護基材表面性等等。而 DPN 微影方式則是利用接觸式掃描 (contact mode)，且相對溼度控制在 40%–75%，然後以 LFM 摩擦力 (側向力) 顯微影像來掃描表面輪廓，並藉以分析鑑別試片表面上不同物質材料的特性。圖 2 所示為 DPN 探針浸泡塗佈含有硫醇分子 MHA 墨水 (濃度為 5 mM) 在金的試片表面所微影產生的 NSRRC 字樣與點 (dots) 圖案。實驗參數設定如下：環境溫度為  $25 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，環境相對濕度控制在 55%，其掃描面積範圍設定為  $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ ，探針接觸力設定為 0.5 V，DPN 微影「NSRRC」字樣圖案時，將探針的掃描速度操作維持  $0.5\text{ }\mu\text{m/s}$ ，而微影點圖案時則藉由控制探針接觸的時間 5–25 s 來完成。簡單來講，探針就像一隻筆，而分子溶液就像墨水，其微影的方式就如一隻筆沾著墨水在紙 (如：金、矽基材) 上書寫圖案，經由適當的參數控制 (如：掃描速度、溫度、環境相對濕度…等)，其微影出的奈米級圖案，可控制範圍約為 20–150 nm 之間。

### 三、金選擇性沉積於 DPN 圖形上

由於元件的製作多在絕緣層之上，本節將探討如何利用掃描式沾水筆探針微影技術 (DPN) 在二氧化矽 ( $\text{SiO}_2$ ) 表面上來進行奈米結構圖形微影的線性控制，之後並將奈米金顆粒選擇性沉積於 DPN 圖形上。在實驗部分：我們選用了(100) 晶面方向  $p$  型的矽晶片，晶片表面的電阻率約為  $1-15 \Omega \cdot \text{cm}$ 。在進行掃描式沾水筆探針微影之前，由於矽晶片上通常都有一層約  $7 \text{ \AA}$  厚度的原生化層 (native oxide)，所以必須先將矽晶片以濃度 1% 氫氟酸 (HF) 溶劑浸泡 10–15 秒來去除該原生化層，再以前離子水 (DI water) 洗淨，然後再將矽晶片置入硫酸：雙氧水 = 3：1 的強氧化劑溶液，在溫度  $120^\circ\text{C}$  環境中煮 10 分鐘，去除表面的有機物粒子以及讓試片表面形成親水性的氧化層表面 (3–4 nm)，最後再以氮氣吹乾備用。利用原子力顯微鏡 (AFM) 掃描影像的功能，此一氫氧鍵 ( $-\text{OH}$ ) 披附的氧化層表面的粗糙度 ( $R_q$ ) 約為  $0.826 \text{ nm}$ 。實驗參數設定如下：環境溫度為  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ，探針接觸力設定為  $1.0 \text{ V}$ ，環境相對濕度控制在 60%–65% 之間。

為了在二氧化矽表面進行 DPN 奈米微影，DPN 掃描探針採用鍍上 PtIr 金屬膜材質的探針，其探針直徑約為 10 奈米，然後將 DPN 掃描式探針浸泡到特定的分子墨水中浸泡 30 秒，使探針針間能充分吸附上微影用的分子墨水。而分子墨水則採用常見分子層其尾端一胺基或硫基短鏈的官能基組合分子，本實驗採用了 2.2 mM 濃度的 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物 (*N*-(2-aminoethyl)-3-aminopropyl-trimethoxysilane, AEAPTMS) 分子墨水，此種分子層薄膜可用來當作連結生物分子或奈米金球與基材的一種分子，當中胺基的有機團修飾在基材表面上時，其分子末端會隨著在不同酸鹼的溶液中發生去質子化或質子化，進而讓基材表面產生正負離子的效果。

藉由 DPN 掃描式探針在二氧化矽試片表面微影塗佈 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物的分子層薄膜圖案，然後再將樣品試片用加熱器 (hot plate) 以  $120^\circ\text{C}$  的溫度將奈米分子層圖案烤乾，最後帶負

電的奈米金球將會選擇性的自我組裝鍵結在 DPN 微影的地方。經由實驗得知，在不同的相對濕度環境條件下，分子墨水的擴散係數 ( $D$ ) 與探針針尖接觸的面積大小 ( $C$ ) 對於微影分子層薄膜線寬的控制扮演著非常重要的影響地位。探針針尖接觸的面積大小乃是受控於環境的相對濕度多寡與探針針尖頂點大小，從針尖以放射狀的方式擴散到試片基材表面。分子墨水的擴散係數乃是與探針針尖及試片接觸的時間長短成正比關係，而與 DPN 探針掃描速率成反比關係。以 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物分子墨水為例，分子層薄膜線寬的大小直接受控於 DPN 探針掃描速率 ( $v$ ) 與探針針尖與試片接觸的時間的長短。在氫氧鍵終結的二氧化矽試片表面進行 DPN 奈米微影塗佈 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物分子層薄膜實驗中所獲得之探針掃描速率與環境相對濕度 (RH%) 關係圖，如圖 3 所示。從其關係中可以發現：樣品試片表面與 DPN 探針表面因為暴露於不同相對濕度的環境中，因而探針針尖與試片表面會附著一層水膜，當 DPN 探針與樣品試片表面非常接近時，因為毛細現象會形成一層水橋 (water bridge)，而提供了分子墨水擴散的路徑。因此環境的相對濕度將會直接影響到分子層薄膜線寬的解析度。分子層薄膜線寬的大小隨著探針針尖與

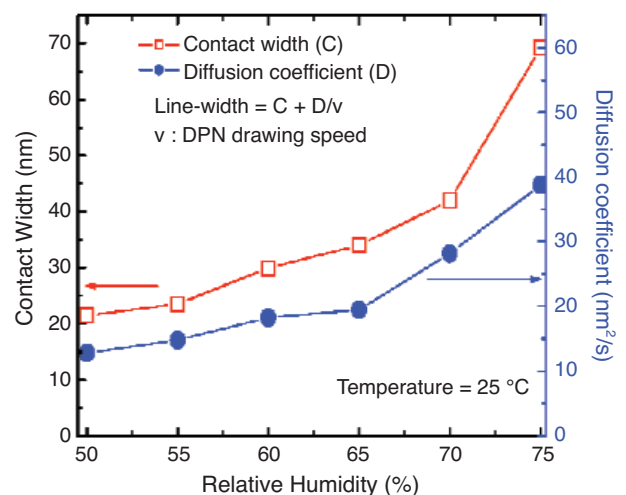


圖 3. 在氫氧鍵終結的二氧化矽試片表面進行 DPN 奈米微影塗佈 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物 (AEAPTMS) 分子層薄膜實驗所獲得之探針掃描速率與環境相對濕度 (RH%) 關係圖。

試片接觸時間的增加而遞增，隨著 DPN 探針掃描速率增加而遞減。這個實驗結果顯示：藉由適當地控制 DPN 奈米微影的參數，我們可以直接將奈米級尺寸的分層薄膜圖案塗佈沉積在二氧化矽試片表面。

我們利用圖 3 的關係圖，將實驗的環境溫度控制在  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相對濕度控制在 65%，DPN 探針接觸力控制維持在 1.0 V。DPN 微影直線圖案時藉由控制不同的 DPN 探針掃描的速率  $0.1\text{--}0.6\text{ }\mu\text{m/s}$ ，來進行奈米分子層薄膜的線性控制。DPN 探針浸泡 2.2 mM 濃度 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物 (AEAPTMS) 分子墨水在二氧化矽的試片表面所微影產生的直線 (grid lines) 分子層薄膜圖案，LFM 摩擦力影像實驗結果如圖 4 所示。藉由摩擦力 (側向力) 掃描影像以 6 Hz 的掃描速率來分析 DPN 之

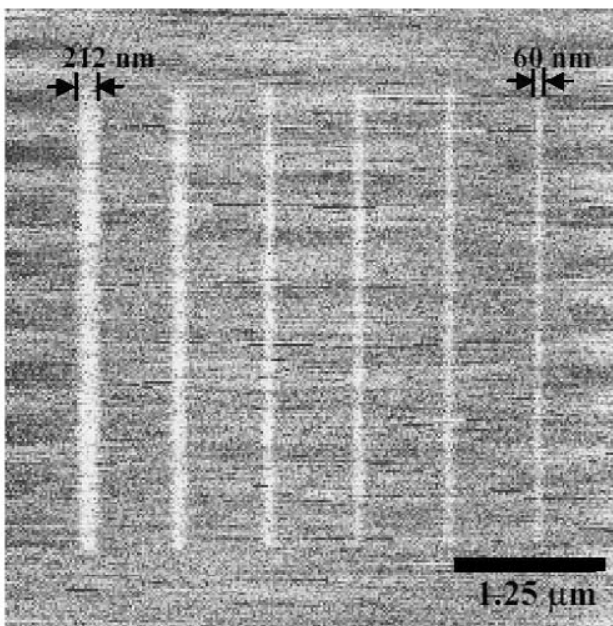


圖 4. DPN 探針浸泡 2.2 mM 濃度 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物 (AEAPTMS) 分子墨水在二氧化矽的試片表面所微影產生的直線分子層薄膜圖案摩擦力影像。環境溫度為  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，環境相對濕度控制在 65%，探針接觸力設定為 1.0 V，DPN 微影直線圖案時藉由控制不同的 DPN 探針掃描的速率  $0.1\text{--}0.6\text{ }\mu\text{m/s}$  來完成奈米分子層薄膜的線性控制。(LFM 掃描速率：6 Hz)

後的二氧化矽試片表面的不同物質型態，實驗結果發現藉由操控 DPN 掃描速率的增加，我們可以成功地微影製造出良好線性關係的分層薄膜結構圖案，利用此一技巧將可製造出不同線寬要求的奈米級結構圖案。此六個不同線寬奈米分子層薄膜結構圖形其長度皆為  $4\text{ }\mu\text{m}$ ，而六個不同線寬分別為 212 nm、140 nm、96 nm、78 nm、72 nm 以及 60 nm。利用此技巧，藉由適當的控制相關參數，我們相信可以精準地控制及定義出奈米級 (小於 60 nm) 的直線分子層薄膜結構的線寬。藉由此種先進的掃描式沾水筆奈米微影技術可研發製作出特殊奈米級 (nano-scale) 的結構及元件，此一技術不但可以應用於未來奈米級電子元件的製作技術 (如：單電子電晶體、奈米導線、量子點結構等的製作)，並可應用於生物科技 (biotechnology) 及生醫感測 (biosensors) 等元件的研發應用。

由於單分子層薄膜製作在試片基材上往往是利用其自發性化學鍵結的方式將其固定在基材上。因此，本實驗室藉由單分子層自我組裝 (SAMs) 技術來進行 15 奈米尺寸金粒子的選擇性沉積實驗。首先取用濃度 2.2 mM 檸檬酸鈉鹽 ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{Na}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 溶液 100 毫升當作化學還原劑並且加熱到沸騰，然後加入濃度 0.815 mM 四氯金酸 [ $\text{HAuCl}_4 (\text{HAuCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O})$ ] 溶液 40 毫升並迅速地混合。然後將混合後的溶液加熱 15 分鐘直到沸騰，溶液加熱後最初呈現淡黃色，溶液緊接著轉變成灰色，然後在再轉換成淡紫色，經過 1–3 分鐘的化學反應時間，溶液最後轉變成酒紅色。此時溶液中的四氯金酸已還原成 15 奈米尺寸且外圍帶負電的奈米金粒子溶液。

我們將實驗的環境溫度控制在  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相對濕度控制在 65%，DPN 探針接觸力控制維持在 1.0 V。DPN 探針掃描的速率則控制在 375 nm/s (1 Hz)，來進行奈米分子層薄膜方形結構圖案的實驗。DPN 探針浸泡 2.2 mM 濃度 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物分子墨水在二氧化矽的試片表面所微影產生的正方形 ( $375\text{ nm} \times 375\text{ nm}$ ) 分子層薄膜圖案摩擦力影像如圖 5 所示。藉由摩擦力 (側向力) 掃描影像以 6 Hz 的掃描速率來分析 DPN 之後的二氧化矽試片表面的型態，實驗結果發現：對比較為明亮的區域 (白色區域) 乃是藉由 DPN 微影所擴散沉

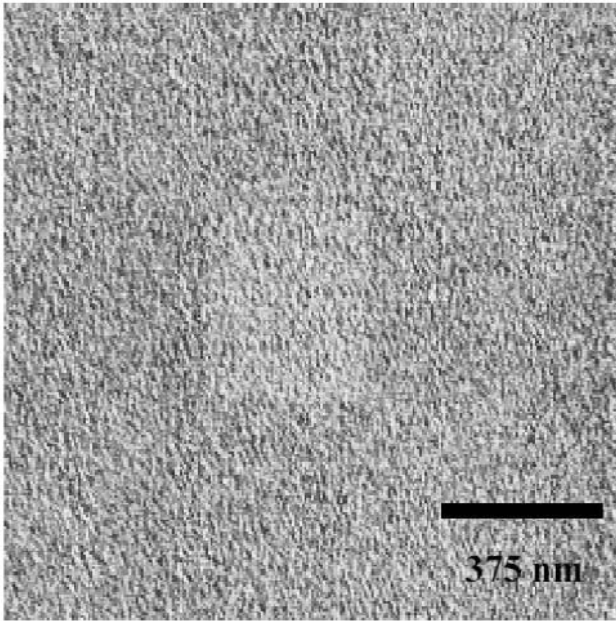


圖 5. DPN 探針浸泡 2.2 mM 濃度 3-胺基丙烷三甲氧基矽化合物 (AEAPTMS) 分子墨水在二氧化矽的試片表面所微影產生的正方形 (375 nm × 375 nm) 分子層薄膜圖案摩擦力量影像。環境溫度為 25 °C ± 0.5 °C，環境相對濕度控制在 65 %，探針接觸力設定為 1.0 V，探針掃描的速率 375 nm/s (1 Hz)。(LFM 掃描速率：6 Hz)

積的 AEAPTMS 分子層薄膜結構，此結構圖案區域會矽烷化的表面，而對比較暗的區域則是氫氧鍵終結 (-OH group rich) 的二氧化矽表面結構。

然後將掃描式沾水筆微影所產生之 AEAPTMS 方形分子層薄膜結構圖案 (375 nm × 375 nm) 的試片利用氮氣將試片表面吹乾，然後再將試片置放於溫度 120 °C 的加熱器上 30 分鐘，將奈米級 AEAPTMS 分子層薄膜圖案烤乾。然後再將試片浸泡入檸檬酸鈉鹽還原的 15 奈米金粒子的溶液中 12 小時，此一浸泡程序，將使得帶負電的奈米金粒子經由靜電力的吸附會選擇性的自我組裝鍵結在 DPN 微影矽烷化的區塊上。此外，奈米金粒子由於外圍帶負電檸檬酸離子的緣故，粒子間彼此會相互排斥，因此，以靜電力吸附在矽烷化表面上的奈米金粒子必須利用 AC-模式 (非接觸式) 原子力顯微影像方能加以分析。

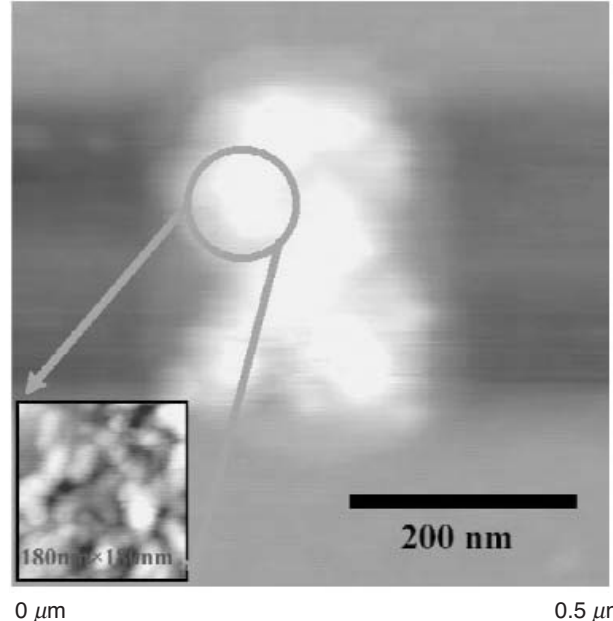


圖 6. 將掃描式沾水筆微影所產生之 AEAPTMS 方形分子層薄膜結構 (375 nm × 375 nm) 浸泡入含有 15 奈米金粒的溶液中 12 小時，經 DPN 微影的區域矽烷化表面在溶液中會呈現帶正電，而與帶負電的奈米金粒產生靜電吸附而沉積鍵結在方形 AEAPTMS 分子層薄膜結構區域上的 AC 模式原子力顯微影像。左下角插圖為 15 奈米金粒選擇性沉積鍵結在方形 AEAPTMS 奈米級分子層薄膜結構區域上的 AC 模式 (180 nm × 180 nm) 原子力顯微影像。(AC 模式 AFM 掃描速率：1 Hz)。

經 DPN 微影的 AEAPTMS 分子層薄膜區域，當中胺基的有機團修飾在基材試片表面上時，其分子末端會隨著在酸性奈米金粒子溶液中發生去質子化，進而讓基材試片表面產生正離子 ( $-NH_3^+$ ) 的效果。實驗結果如圖 6 所示。實驗結果發現：矽烷化表面在溶液中會呈現帶正電 ( $-NH_3^+$ )，而與帶負電的奈米金粒產生靜電吸附而沉積鍵結在方形 AEAPTMS 分子層薄膜結構區域上。而帶負電的奈米金粒靜電吸附而沉積鍵結在方形 AEAPTMS 分子層薄膜結構圖案有明顯的變寬，我們認為這是由於在 DPN 微影時，探針針尖與試片表面間的 AEAPTMS 分子墨水橫向擴散效應所導致的。圖 6

左下角插圖為 15 奈米金粒選擇性沉積鍵結在方形 AEAPTMS 奈米級分子層薄膜結構區域上的 AC 模式 (180 nm × 180 nm) 原子力顯微影像。(AC-mode AFM 掃描速率：1 Hz)

#### 四、結語

本文主要討論 DPN 的工作原理，同時藉由操控 DPN 掃描速率的增加，我們可以成功地微影製造出良好線性關係的分子層薄膜結構圖案，利用此一技巧成功地在二氧化矽表面上製造出奈米分子層薄膜結構圖案，其長度為 4 μm，而最小線寬為 60 nm。筆者相信藉由適當的控制相關參數，將可精準地控制及定義出小於 60 nm 的直線分子層薄膜結構。此外，我們也成功地利用掃描式沾水筆探針微影技術在氫氧鍵終結的二氧化矽表面上沉積 AEAPTMS 奈米級分子層薄膜圖案，並利用單分子層自我組裝 (SAMs) 技術成功地實現 15 奈米尺寸金粒子的選擇性沉積於 DPN 微影的矽烷化表面區塊上。由於在自然界中奈米金粒子可廣泛地應用於生物醫學工程研究上，相信在不久的將來，此一先進的奈米製造微影研發技術將可廣泛地應用於奈米電子元件的製作技術 (如：單電子電晶體、奈米導線、量子點結構等的製作)、奈米生物晶片、分子元件以及奈米生醫感測元件的研發與應用。

#### 參考文獻

1. C. K. Harrett, K. M. Satyalakshmi, and H. G. Craighead, *Langmuir*, 178 (2001).
  2. H. Sugimura and N. Nakagiri, *Appl. Phys.*, **A66**, S427 (1998).
  3. R. Younkin, K. K. Berggren, K. S. Johnson, M. Prentiss, D. C. Ralph, and G. M. Whitesides, *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 1261 (1997).
  4. M. Albrecht, C. T. Rettner, A. Moser, M. E. Best, and B. D. Terris, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2875 (2002).
  5. Y. Xia, J. A. Rogers, K. E. Paul, and G. M. Whitesides, *Chem. Rev.*, **99**, 1823 (1999).
  6. M. T. Li, L. Chen, and S. Y. Chou, *Appl. Phys. Lett.*, **78** (21), 3322 (2001).
  7. C. Zhou, M. R. Deshpande, M. A. Reed, L. Jones II, and J. M. Tour, *Appl. Phys. Lett.*, **71** (5), 611 (1997).
  8. H. Imai, N. Iwata, and H. Yamamoto, *Nanotechnology*, **13**, 768 (2002).
  9. E. S. Snow, D. Park, and P. M. Campbell, *Appl. Phys. Lett.*, **69** (2), 269 (1996).
  10. C. F. Quate, *Surface Science*, **386**, 259 (1997).
  11. S. Gwo, C. -L. Yeh, P. -F. Chen, Y. -C. Chou, T. T. Chen, T. S. Chao, S. -F. Hu, and T. -Y. Huang, *Appl. Phys. Lett.*, **74** (8), 1090 (1999).
  12. F. S. -S. Chien, J. -W. Chang, S. -W. Lin, Y. -C. Chou, T. T. Chen, S. Gwo, T. -S. Chao, and W.-F. Hsieh, *Appl. Phys. Lett.*, **76** (3), 1 (2000).
  13. J. T. Sheu, K. S. You, C. H. Wu, and K. M. Chang, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **20** (6), 2824 (2002).
  14. R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. Hong, and C. A. Mirkin, *Science*, **283**, 661 (1999).
  15. H. Zhang, K.-B. Lee, Z. Li, and C. A. Mirkin, *Nanotechnology*, **14**, 1113 (2003).
  16. A. Ivanisevic and C. A. Mirkin, *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 7887 (2001).
  17. H. Jung, R. Kulkarni, and C. P. Collier, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 12096 (2003).
- 
- 吳家豪先生為國立交通大學電子物理研究所博士班學生，現任國家同步輻射研究中心專案助研究員。
  - 許鈺宗先生為美國密西根州州立大學電機工程學博士，現任國立交通大學奈米科技研究所副教授、國家同步輻射研究中心特聘副研究員。
  - Chia Hao Wu is a Ph.D. student in the Institute of Electrophysics at National Chiao Tung University, also currently an assistant researcher at National Synchrotron Radiation Research Center.
  - Jeng Tzong Sheu received his Ph.D. in electrical engineering at Michigan State University, USA. He is currently an associate professor in the Institute of Nanotechnology at National Chiao Tung University.