

# 掃描探針顯微鏡在環境控制下之應用

## Application of Scanning Probe Microscopy under Environmental Control

丁志強、周書燈

Chih-Chiang Ting, Shu-Teng Chou

掃描探針顯微鏡之相關應用近年來已累積相當可觀的數量，其中不乏光電、物理、材料、機械、生命科學及化學等領域，可說是進入奈米科技的主要入門工具之一，其可以得到樣品表面的微區不同材質的物理性質，如表面的軟硬、摩擦力差異、導電性分布、親疏水性、表面電位、靜電力及電容變化等。本文主要是著重在環境控制下表面物性量測之應用，以期在不同的溫度、濕度或真空中能夠得到額外的物性訊息 (如玻璃轉化溫度  $T_g$ ) 或是藉此提高量測之解析度 (如磁力、相位、形貌等)。

In recent years, there has been a great amount of published papers for the application of scanning probe microscopy (SPM). These contain the field of photoelectric, physical, material, mechanical, life science, chemical..., etc. Therefore SPM becomes one of the main tool to go into the world of nanotechnology. We can get some physical properties such as soft/hard distribution, friction force difference, distribution of conductivity, hydrophilic/hydrophobic property, surface potential, electrostatic force, gradient of capacitance..., etc. from the sample surface by using SPM. This paper emphasized the application of environmental control in order to enhance the resolution of magnetic force, phase, topography..., or get additional information of material characterization such as  $T_g$  point.

### 一、前言

掃描探針顯微鏡 (scanning probe microscope, SPM) 發展至今已超過十年的歷史，近年來由於奈米科技的蓬勃發展，不論是研究單位或是業界都需要掃描探針顯微鏡作微區微結構的解析。而掃描探針顯微鏡之所以廣泛應用在各個領域，主要是因為其樣品前處理簡單、可在不同環境下量測 (溫度／

濕度控制、真空中、液體中)、屬於非破壞性量測 (無電子顯微鏡般的高能電子束)、解析度高 (如圖 1) 等因素。概觀目前應用的產業與學界中，研究單位主要研究的方向為光、電、磁、生物、化學、機械性質、表面機械／氧化加工等研究性質，以期研發出獨特、效能更佳的奈米技術；而業界則較為單純，一般作為產品之品質控管，如半導體業界之晶圓故障分析、TFT-LCD 廠的 PI (polyimide) 膜品

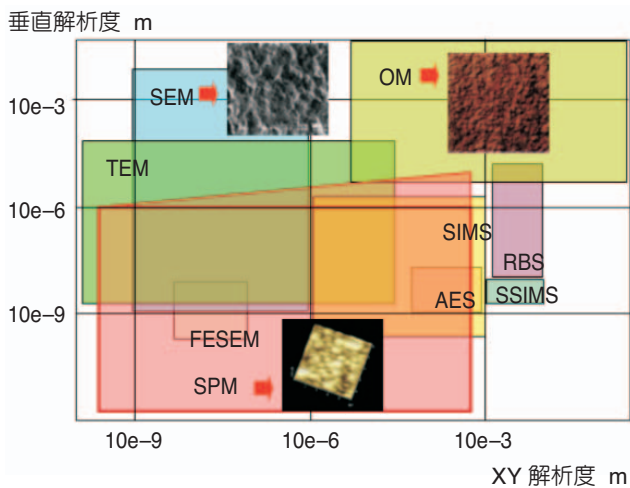


圖 1. 掃描探針顯微鏡 (SPM) 與其他顯微技術之解析度比較。

管／彩色濾光片製程品管／鍍膜表面觀察、光碟製造業中軌 (land) 與溝 (groove) 的高／寬／深度／角度之計算等，希望藉由 SPM 的高解析度分析來改善製程以提高產品良率。

而環境控制下的掃描探針顯微鏡量測一般應用在研究單位較多，如高分子在不同溫度下的物性變化、磁性樣品藉由真空環境提高探針的解析能力、探針奈米微影加工藉由濕度控制得到最佳的氧化線高寬比、電子元件藉由真空環境以得到高品質

電性量測等，在本篇文章中，著重於 SPM 在溫度控制下的應用，以及藉由環境控制達到比大氣下量測更高的解析度。

## 二、儀器架構

環境控制之系統是以真空系統為架構 (如圖 2 所示)，來作溫度變化的量測，以避免高溫或低溫時使整個腔體過熱或造成水氣凝集。

此環境控制系統可連續量測之溫度範圍為  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，另外可作 20%–80% 的濕度調整、真空度可達  $10^{-5}\text{ Pa}$ 、腔體可充填惰性氣體並作分壓控制等功能，比較特殊的是在作連續升／降溫並量測樣品表面物性時，探針往往因為溫度的大範圍連續變化 (如  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 而形成懸臂因受熱造成彎曲程度過大的現象，在探針接觸樣品表面時，這些懸臂之彎曲都會反應在掃描器伸縮上，所以當溫度差距過大時會使 PZT 掃描器 Z 軸部分伸縮達到極限，而無法進行樣品高度之掃描，因此有必須重新近針 (approach) 的缺點存在。此處藉由「Area in Feedback」迴路控制 (見圖 3) 在保持探針與樣品表面接觸情形下，即時調整掃描器與下方步進馬達之作動，讓掃描器之伸縮程度達到最適宜之位置，以利進行連續溫度量測<sup>(1)</sup>。

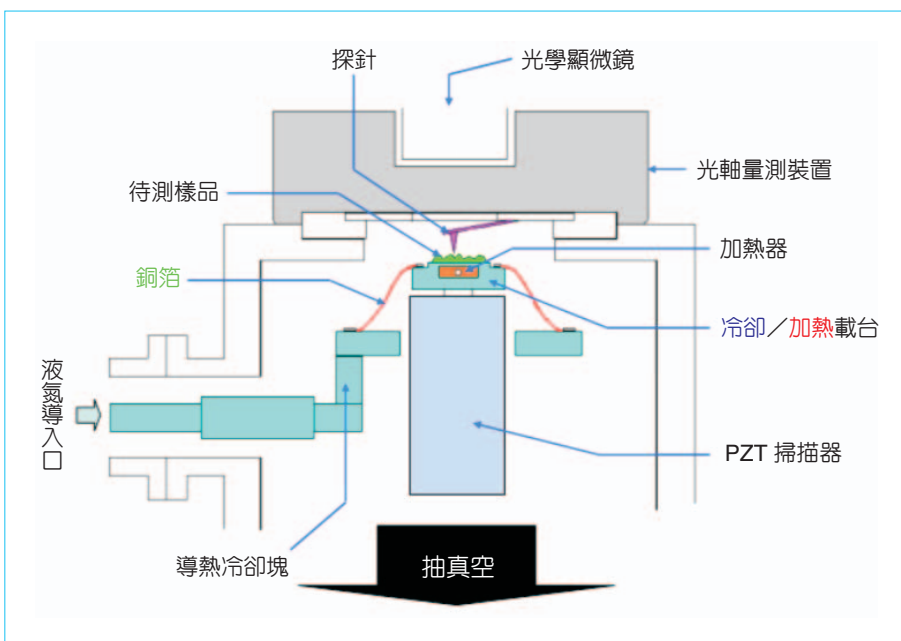


圖 2. 掃描探針顯微鏡之環境控制系統架構。

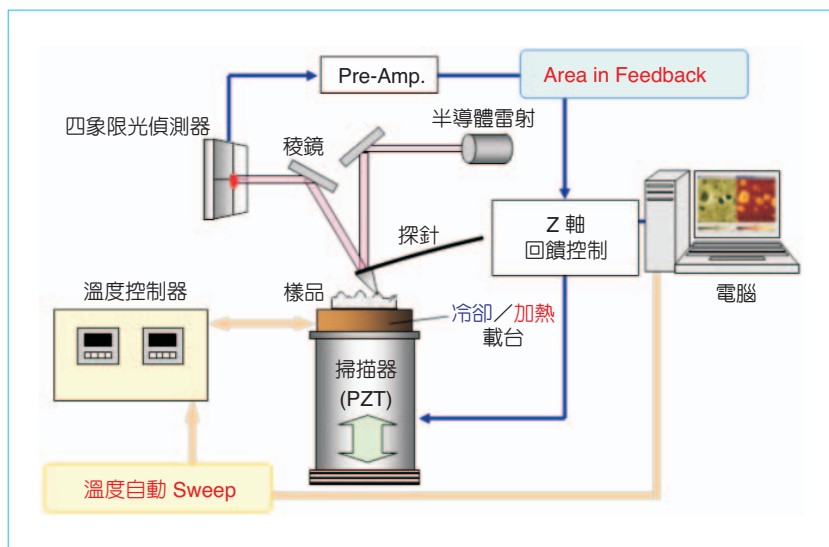


圖 3. 掃描探針顯微鏡之溫度連續量測控制迴路。

### 三、操作原理

一般而言材料的表面物性不外乎材質差異、軟硬、摩擦力分布、親疏水性、電性、磁性。此處之溫度控制應用主要針對在相位 (phase)、軟硬、形貌之量測，而藉由環境控制來提升解析度方面則針對磁性與電容梯度分布加以探討。

#### 1. 溫度控制方面之探討

##### (1) 相位偵測

當探針以懸臂共振頻率附近的頻率作 DFM (dynamic force mode) 模式進行樣品表面點接觸掃描時，如果比對探針驅動交流電壓 (輸入信號) 以及光偵測器所量測到的懸臂上下振動 (輸出信號) 兩者間的相位差，可以發現到當樣品表面具有不同的材質分布時，這些材質會因為物性上的差異 (如軟硬、親疏水性、靜電力等) 造成對探針之吸著力不同，而使得所偵測到之相位差有大小不同的差異，進而用以判斷樣品表面不同材質之分布，其原理如圖 4 所示。

##### (2) 表面軟硬分布

由於相位量測出來之結果為樣品表面綜合物性之表徵，為了將表面軟硬 (visco-elastic) 材質之訊息萃取出來，因此藉由樣品表面進行 XY 掃描取像的同時，再對掃描器作 Z 方向約 1-10 kHz 的振盪

(如圖 5 所示)，由於樣品表面有軟硬之差異，軟質材料會將這些施加的振幅吸收而使探針之相對振幅減少，藉此來得到樣品表面軟硬之分布情形。

#### (3) 摩擦力量測

表面微區之摩擦力 (friction force) 差異主要是根據探針在掃描時，由於材質差異造成表面摩擦係數不同，而讓探針懸臂在掃描時有不同程度之側傾，側傾程度越大則表示表面造成的摩擦力越大，如圖 6 所示，探針在不同的掃描方向下在四象限光偵測器上有著不同方向的側傾，因此在摩擦力曲線上會有如圖所示的上下分離之趨勢出現，而上下分離之差距越大，則表示該位置之摩擦係數越大，以此來區分出表面微區之摩擦力分布。

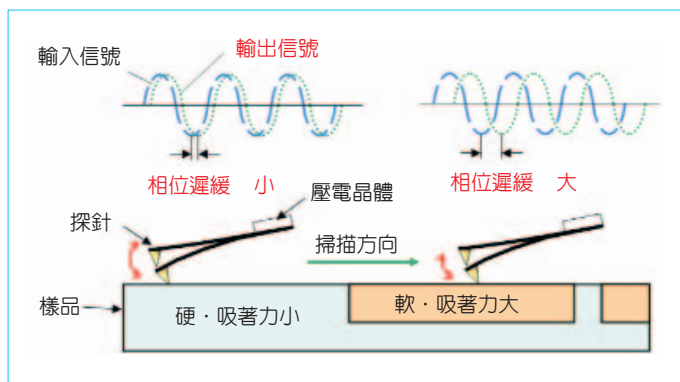


圖 4. 相位訊號之原理。

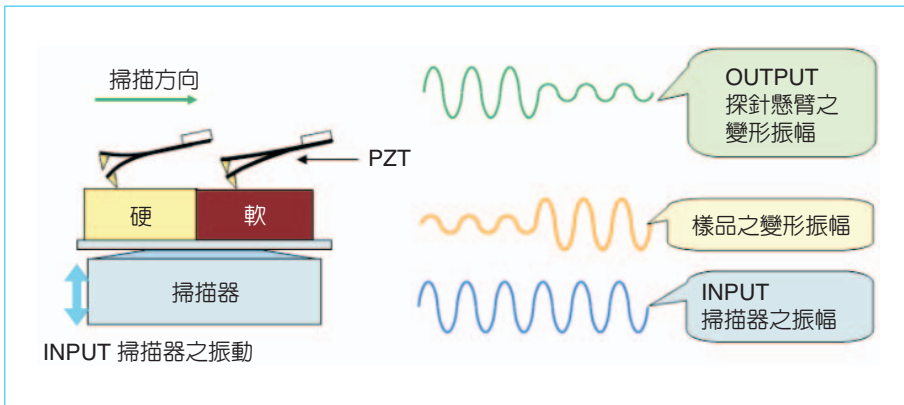


圖 5. VE-AFM (visco-elastic AFM) 之原理。

配合溫度控制系統，可以得到不同溫度下對表面摩擦力之作圖，在溫度行程較大時會使探針懸臂上下變化幅度增加，甚至造成掃描器上下壓縮／伸展到極限而無法正常作動，此處藉由「Area in Feedback」系統使探針維持在樣品表面接觸的狀態。在以往多用熱分析儀器如 DSC 或 DMA 對塊體材料作玻璃轉化溫度之量測，此處利用 SPM 亦能得到表面微區之玻璃轉化的觀察，其是利用樣品表面因溫度造成軟化而使摩擦係數改變，用以判斷出玻璃轉化溫度 ( $T_g$ ) 之範圍，以及在表面達到  $T_g$  點前後之實際樣品表面微結構變化。

## 2. 解析度提升方面之探討

### (1) 磁力量測

MFM (magnetic force microscopy, MFM) 是鍍有磁性材料的探針先在樣品表面上進行表面形貌之 DFM 點接觸式掃描，由於磁力屬於遠場作用力，因此根據第一次形貌掃描之軌跡，將探針上抬一段距離 (trace distance)，再進行磁力之感應，而磁力之大小與方向性之不同會造成探針的振幅或相位產生變化，藉此來達到表面磁力分布之量測 (見圖 7)。此外，由於真空中量測時探針在 DFM 點接觸的模式下操作，此時探針的品質因子  $Q$  ( $Q$ -factor，見圖 8) 會比大氣中操作高出 50-100 倍，這是因為真空環境中探針振動的黏性係數比大氣下低了許

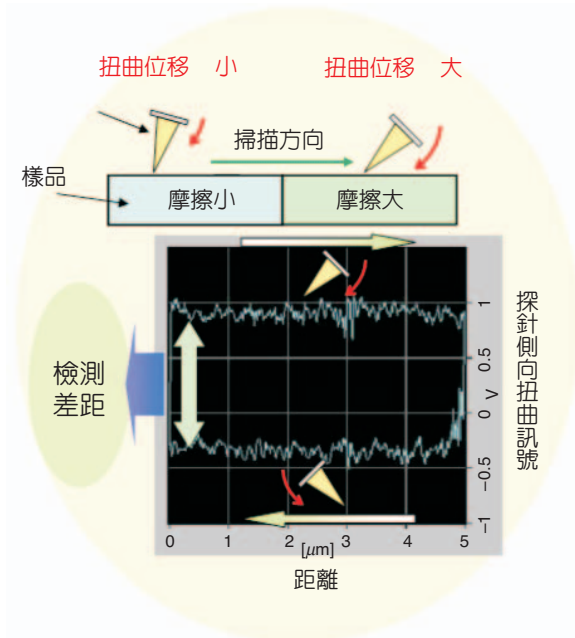


圖 6. 摩擦力曲線與動作原理。

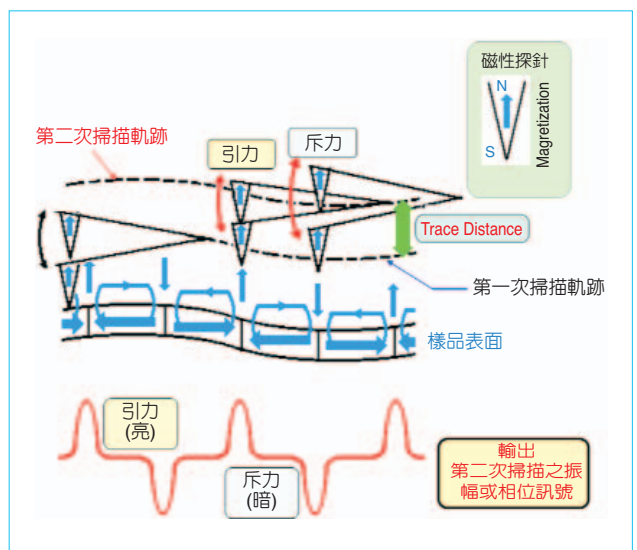


圖 7. 磁力顯微鏡 (MFM) 之原理。

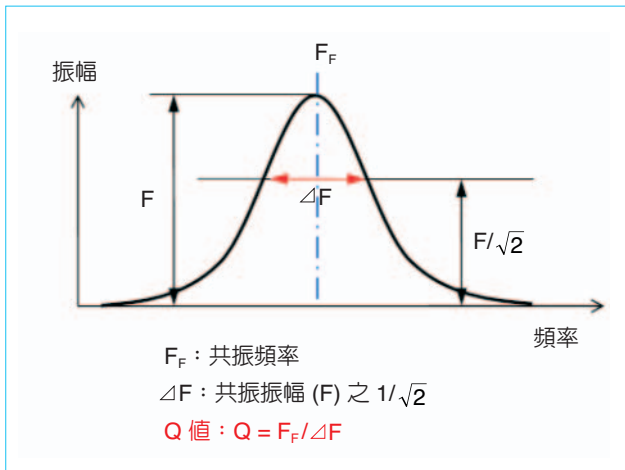


圖 8. 探針在 DFM 點接觸操作下之品質因子。

多所致。由於真空中  $Q$  值的大幅提昇，也使得探針的靈敏度要高出數倍，可以檢測出更細微之表面，或者是用來提升相位、磁力等的訊號比。

但是探針之品質因子提升到如此高的程度並非全然都是優點，在量測樣品起伏較大的樣品時，由於靈敏度的增加而使得探針在高度的回饋感應上較大氣中慢了許多，因此在有些狀況下需要用到  $Q$  值控制的機制來將探針之  $Q$  值由數萬控制到 2000–3000 左右(圖 9)，方可在這之間取得平衡。

## (2) 表面電容梯度量測

如圖 10 所示，在 AFM (atomic force microscopy, AFM) 的量測模式下，對樣品施加一 AC 交流電場，使得探針與樣品間之電容產生變化，而電容之變化量可由探針後端之微波振動器頻率的改變加以偵測，如此可與表面形貌同時量測並得到電容梯度之分布，其用途可用作二維摻雜物剖面的分布量測，另外也可進行感應電率分布量測。

透過鎖相放大器 (lock-in amplifier) 可以得到極性像 (Acos 訊號) 與濃度像 (amplitude 訊號)。極性像可區分出  $P$ -type 與  $N$ -type 之微區分布，在相同的摻雜濃度下， $P$ -type 比  $N$ -type 有著較亮之對比；而濃度像可區分出摻雜濃度的大小，摻雜濃度越高在影像上之對比越暗，這是因為電容—電壓曲線中摻雜濃度越高隨著電壓變化的幅度越小之故。

## 四、應用實例

本文著重高分子材料隨著溫度變化而造成樣品表面物性的改變，並且即時將表面結構與物性同時影像化，或是溫度與物性變化之關連。而在提升解析度方面主要目的有二，一方面著重於藉由真空環境提高探針振動時之品質因子  $Q$ ，以期獲得訊號比更佳的效果，另一方面則希望藉由真空中水膜的減少而提升在電性量測上的解析度。茲介紹如下。

### 1. 溫度控制方面之探討

#### (1) 相位量測

嵌段共聚物 (block copolymer) 相分離構造的溫度依存性和它的功能有著深切的關係。因此，對這些材料之微觀相分離構造的溫度依存性以及與功能的關聯性進行解析，這對材料的設計、開發非常重要。此處對 SBS (styrene butadiene styrene) 嵌段共聚物的相分離構造因加熱產生的變化進行觀察的例子作介紹。此 SBS 嵌段共聚物 (JSR(株) 製，TR2250，styrene/butadiene 比 (52/48))，用 toluene 溶液鑄造法 (cast) 製成的矽基板上形成約 600 nm 厚的薄膜<sup>(2)</sup>。

先將 SBS 薄膜在室溫進行觀察後，再將樣品在加熱到 90 °C 的狀態下進行觀察，然後使樣品慢慢冷卻再度在室溫進行觀察，藉由此程序以相位變化訊號觀察樣品表面相分離之情形。

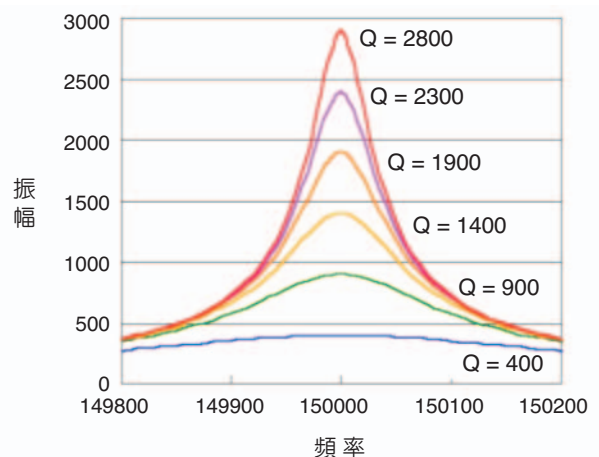


圖 9. 大氣下品質因子 (約 400) 及真空中  $Q$  值控制在 2000 至 3000。

如圖 11 所示，在室溫下可觀察到 polystyrene 相 (硬 segment，約 20 nm) 和 poly butadiene 相 (軟 segment，約 20 nm) 交互分布於數層，即微小的相分離構造。接著再加熱至 90 °C，與室溫下觀察結果比較，相分離構造消失且變得雜亂沒有秩序。然後，使其慢慢冷卻至室溫，在再次測定的圖像中，沒有發現加熱以前看到的微小相分離構造。這是因為，最初觀察的構造 (a) 是在非平衡的狀態下被凍結，因加熱後變成了無秩序的狀態 (c)。

## (2) 軟硬量測

polypropylene (PP) 嵌段共聚物，在連續相的基質 PP 中 ethylene propylene rubber (EPR) 的領域為分散，即為海島構造的 polymer alloy。此次用黏彈性測量模式 (VE-AFM) 進行各個溫度的形狀觀察和塊體樣品的動態黏彈性測量 (DMA)，對 PP 嵌段共聚物的鑑定量測實例進行介紹。

圖 12 為常溫下觀察的 PP 嵌段共聚物的構造、TEM 照片與黏彈性像。(a) 為其組成，而 (b) 為用 4 oxidation ruthenium 染色後的薄膜切片的 TEM 照片，EPR 被選擇性染色所以可觀測到黑色島狀的領域，而 EPR 領域的中心部分 PE 顏色較淡。(c) 為用低溫切薄片機 (cryo microtome) 得出的

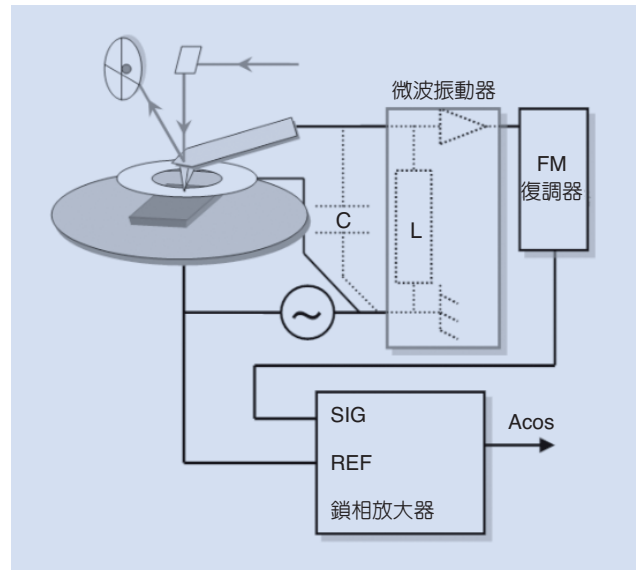


圖 10. SNDM (scanning non-linear dielectric microscopy) 之原理。

切面黏彈性像，越硬的部分越明亮而越軟的部分越暗，EPR 比基質 PP 軟所以對比較暗，而 EPR 領域的中心 PE 附近比較硬。

在圖 13 的黏彈性影像中，EPR 的玻璃轉移溫度 ( $T_g$ ) 以下的溫度範圍 (-60 °C 以下)，沒有明確的明暗差異，要確認島狀的 EPR 領域較困難。在這

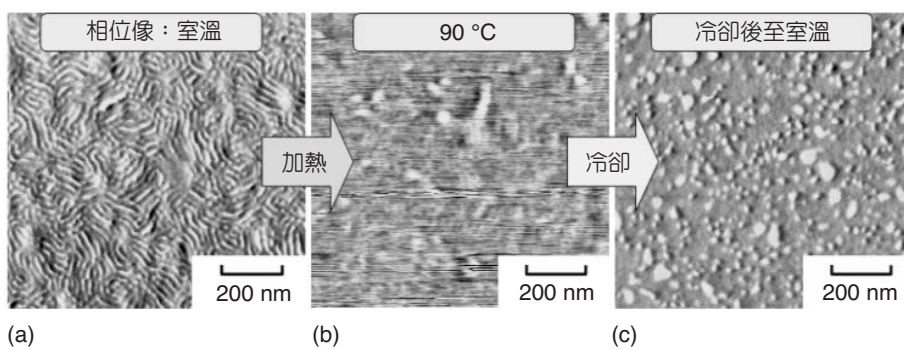


圖 11. SBS (styrene butadiene styrene) 嵌段共聚物的微觀相分離構造的相位模組觀察。

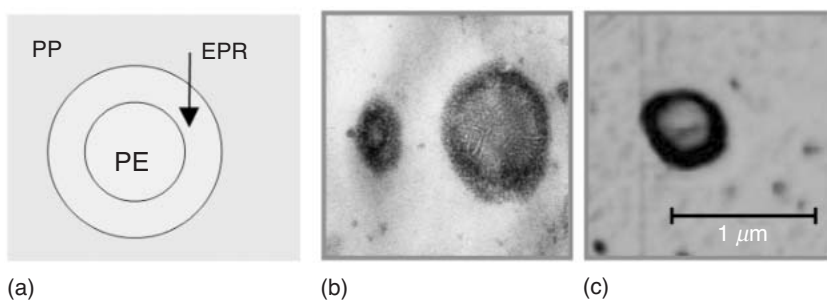


圖 12. (a) PP 嵌段共聚物之組成、(b) TEM 觀察與 (c) VE-AFM 黏彈性影像。

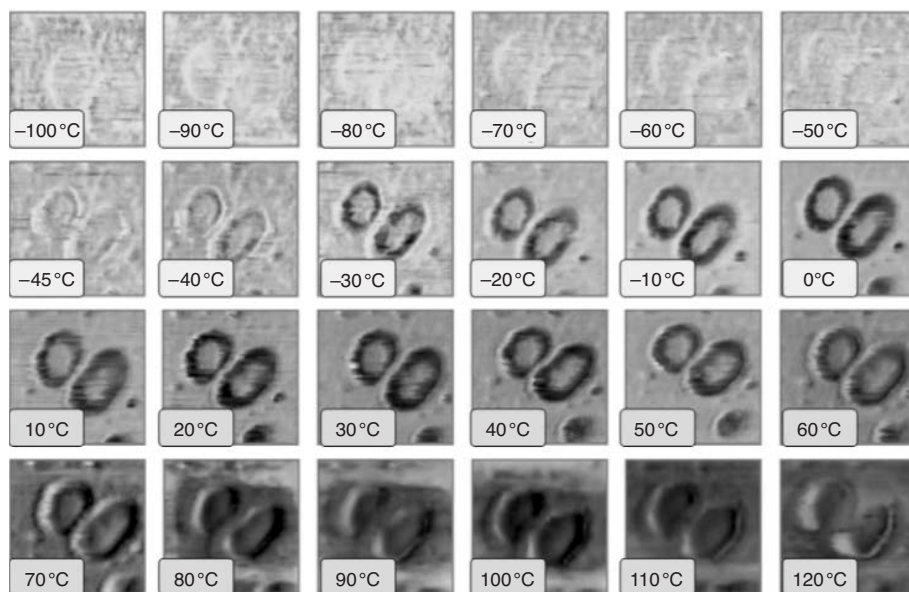


圖 13.  
-100~120 °C 的各溫度之 PP  
嵌段共聚物黏彈性影像。

個溫度範圍中 EPR、PE 與基質 PP 都呈硬質玻璃狀，硬度上的差異非常小。而隨著溫度的上升，EPR 領域的顏色開始比 -40 °C 附近暗濃，一直到 100 °C 附近 EPR 都比基質 PP 軟，這是 EPR 經過玻璃轉化變成橡膠狀態的表現。PP 嵌段共聚物在低溫領域耐脆性增加，是因為低溫範圍呈橡膠狀的 EPR 存在之故，也就是 EPR 領域在玻璃狀的基質 PP 中作為緩衝材料而發揮了作用。

圖 14 為 -100 至 120 °C 各溫度的 PP 嵌段共聚物以 DMA 測量的 PP 嵌段共聚物與 EPR 單體樣品 (都是塊體樣品) 的黏彈性能譜，並與 -100 °C、-70 °C、-10 °C、50 °C 及 120 °C 的黏彈性像一起表示的結果。在 EPR 黏彈性能譜中，從 -70 °C 附近到 -10 °C 附近，隨著 EPR 達到玻璃轉化溫度可觀測到  $G'$  曲線的下落和  $\tan\delta$  曲線，因此可看到的 PP 嵌段共聚物的  $\tan\delta$  曲線 -50 °C 附近的曲線，這是由基質 PP 中分散的 EPR 領域的玻璃轉化而產生的。

有些高分子樣品會摻入一些填充物如碳黑、奈米碳管、金屬等，以增加整體材料之機械性質或導電性，但是往往這些填充物易包埋在母體 (matrix) 中而不易以 SPM 觀察到，此處針對含銀填充物的 polyimide 薄膜複合材料作分析<sup>(2)</sup>。如圖 15 所示，在加熱至 230 °C 後可從形貌像觀察到比起室溫時有著許多數個  $\mu\text{m}$  的大小起伏，對應於軟硬像可以

發現到，在室溫下軟硬分布基本上都是相同的，而當溫度上升至 230 °C 時可以觀察到數個  $\mu\text{m}$  的明亮分佈，亦即硬的分布，此為銀填充物。因此，在室溫中薄膜表面被高分子材質所覆蓋，但在加熱後銀填充物逐漸浮現在表面上而可觀察其分布。

### (3) 摩擦力量測

此處針對 500  $\mu\text{m}$  厚的 PC (polycarbonate) 薄片作溫度變化之表面物性量測，以及玻璃轉化溫度 ( $T_g$ ) 之測量<sup>(3)</sup>。在過去多使用 DSC 或 DMA 作塊體  $T_g$  溫度的量測，此處亦可利用 SPM 來得到表面微

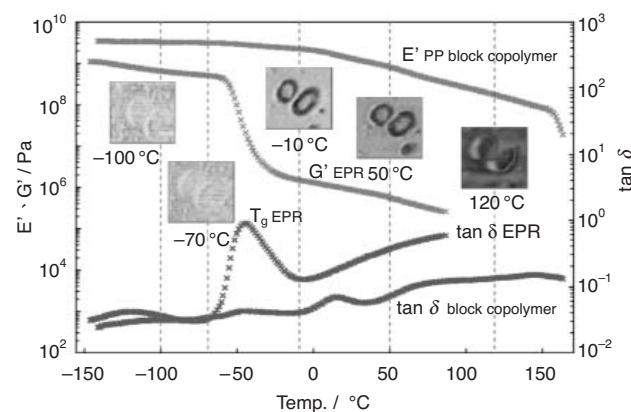


圖 14. 用 DMA 得出的 PP 嵌段共聚物和 EPR 的黏彈性能譜和用 VE-AFM 得出的 PP 嵌段共聚物黏彈性像。

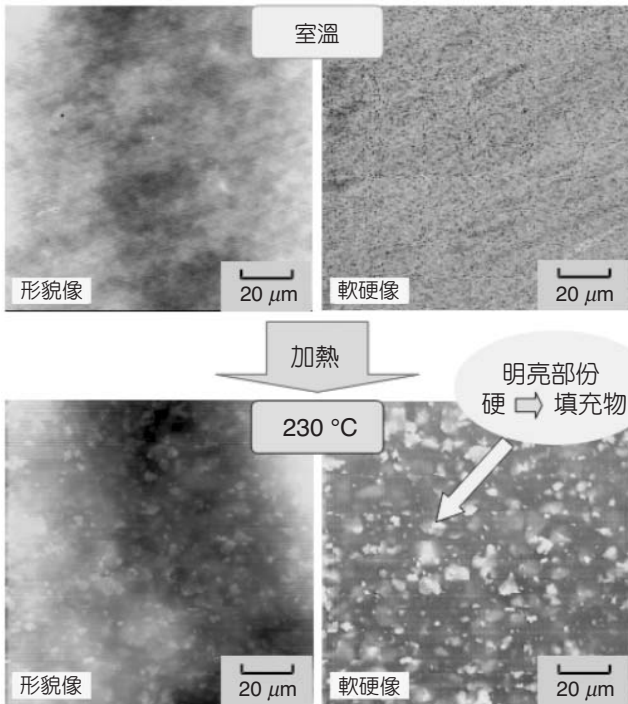


圖 15. 含有銀填充物的 polyimide 薄膜材料 VE-AFM 觀察。

區之  $T_g$  分析。在本文中藉由樣品表面達到  $T_g$  時所造成的摩擦力變化來加以判斷，根據圖 16 所示，溫度達到 85 °C 時開始有玻璃轉化之現象出現，而在 125 °C 達到最高，而在 50 °C 時額外得到一個小波峰出現，推斷有可能是某些雜質在 50 °C 時揮發消失所造成。

再針對圖 17 所做之結果逐一對不同溫度下作表面結構與相位之觀察，此處選擇 30 °C、60 °C、85 °C 與 125 °C。在 30 °C 下表面呈現出凹凸的結構，由相位影像看來顯現出一些不同材質的存在 (明亮的部分)；當溫度升至 60 °C 時，可以觀察到相位像中明亮的部分消失了，此推斷出 50 °C 出現的小波峰應是部分雜質揮發了；再將溫度升上 85 °C，此時玻璃轉化開始出現，形貌結構上出現許多明顯的小孔洞，其在相位影像上重新呈現出明亮對比的分布 (不同材質)，可能是在  $T_g$  時分子運動較為激烈，內部的一些雜質浮現至表面上所致；持續加溫至 125 °C，這些相位像上明亮的部分依舊存在並持續擴大，推論是表面之不純物變多所導致。

## 2. 解析度提升之探討方面

### (1) 磁力量測

一般來說探針感應磁力之靈敏度取決於探針懸臂之品質因子 ( $Q$ )，探針  $Q$  值越高則能夠顯現出之磁力感度越高。在大氣中，正常  $Q$  值約在 250–500 的範圍，在此情況下，若是樣品表面磁力較為微弱時幾乎無法感應，因此必須增加探針本身之磁化強度 (也就是增加磁性材料在探針上之鍍層厚度) 以提升感應度，也因此過厚的鍍層會讓表面形貌的解析度有所犧牲。而且探針磁化程度過高會對樣品表面本身之磁力分布有所干擾，所以要得到真實表面的空間解析與磁力分布，一方面必須使用低磁化探針減低對樣品之干擾及提高空間解析度，另一方面期望藉由高真空環境提升  $Q$  值來增加磁力感應度。然而有時也會利用  $Q$  值控制器，適度降低  $Q$  值，以提高掃描時之高度回饋性。

圖 18 為硬碟表面磁力量測分別在大氣中與真空環境中量測的結果。在大氣下探針品質因子  $Q$  為 400 所得到的磁力訊號強度較低，而在真空中  $Q$  值提升至 2000 後，探針靈敏度增加而使磁力訊號至少提升 6 倍以上。

由於探針在真空中的靈敏度增加，因此不再需要一般大氣下所使用的高磁化探針而可使用低磁化探針，也就是說探針的磁性金屬材料鍍層厚度可以

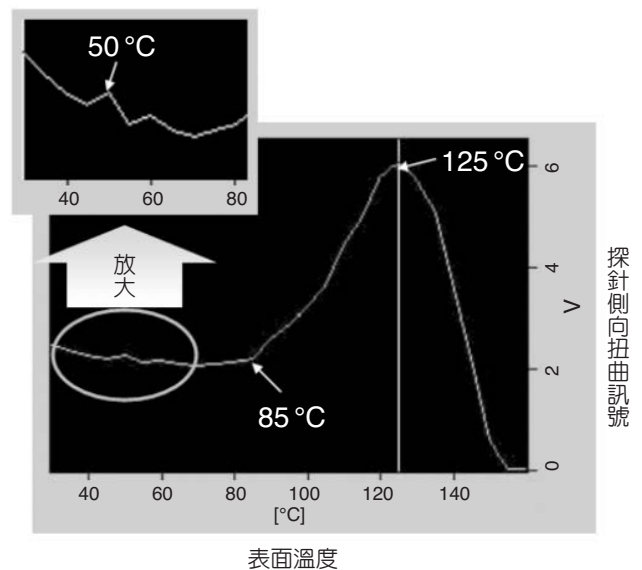


圖 16. 摩擦力與溫度之作圖。

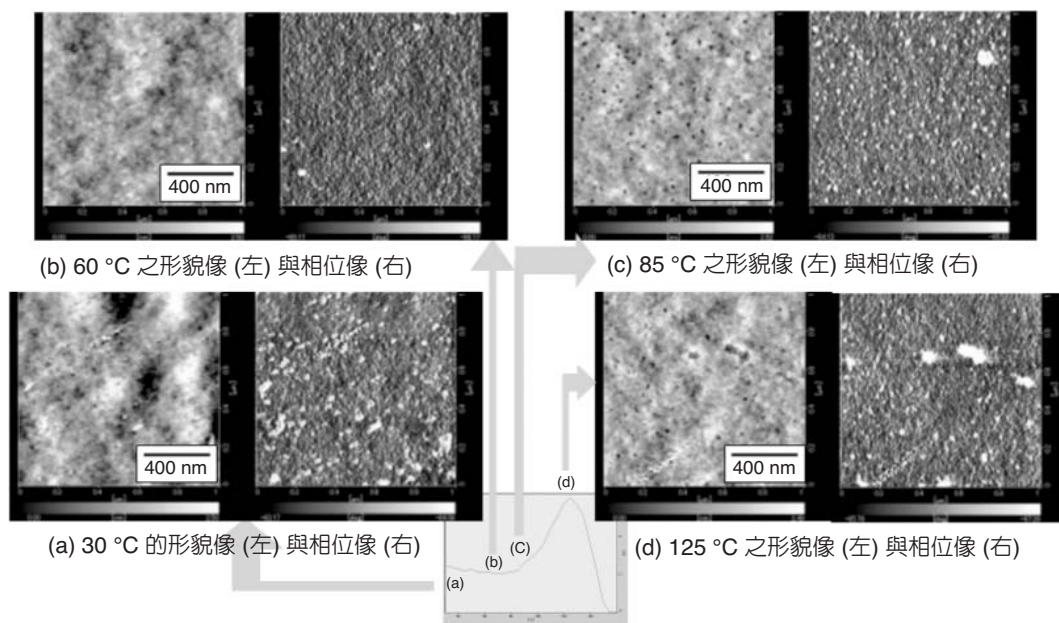


圖 17.  
不同溫度下之 polycarbonate 表面的結構變化觀察。

降低，也使得探針針尖半徑可以縮小，進而提升 XY 的解析度。以圖 19 為例，為高密度磁性記錄媒體 (800 kFCI，記錄點間距 32 nm) 的 MFM 量測結果<sup>(4)</sup>，明顯地觀察到藉由真空中  $Q$  值的提升 (300 – 3000) 讓磁性探針在 Z 方向的靈敏度 (相位訊號) 增加，由於 Z 方向靈敏度增加，進而嘗試將探針上磁性鍍層厚度由原本的針尖直徑 72 nm 減低為 12 nm。雖然在大氣下因為低磁化探針之磁性鍍層較薄而降低磁感應度，所以比起高磁化探針的量測影像要模糊許多，但是一旦藉由真空中  $Q$  值的提升，配合針尖半徑更小的探針，使得除了在 Z 方向磁力感應度增加，XY 方向也因為探針針尖半徑變小而有著更佳的空間解析度，這點可由真空影像

中磁力變化的邊緣部分變得更清楚而證實之。

此外，使用低磁化探針，除了因為探針針尖半徑變小而提升 XY 解析度之外，一般所使用的高磁化探針由於本身磁力較大，有時會對樣品表面之磁區分布產生干擾，而無法獲得真實且穩定的磁力影像，目前已有一些報導在探討以低磁化探針改善磁力干擾的現象，已有顯著之成效<sup>(5)</sup>。

## (2) 表面電容梯度量測

在作電性量測時，樣品的表面在大氣下存在著一層薄的水膜，往往因為如此會使得電性量測時的感應度減少，此處藉由表面電容梯度之量測來說明真空中感度提升之實例<sup>(6)</sup>。

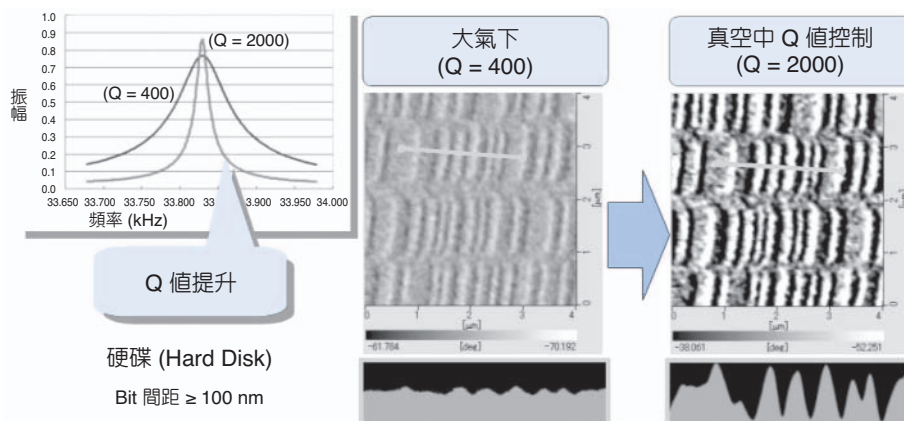


圖 18.  
大氣與真空中硬碟磁區分布的 MFM 觀察。

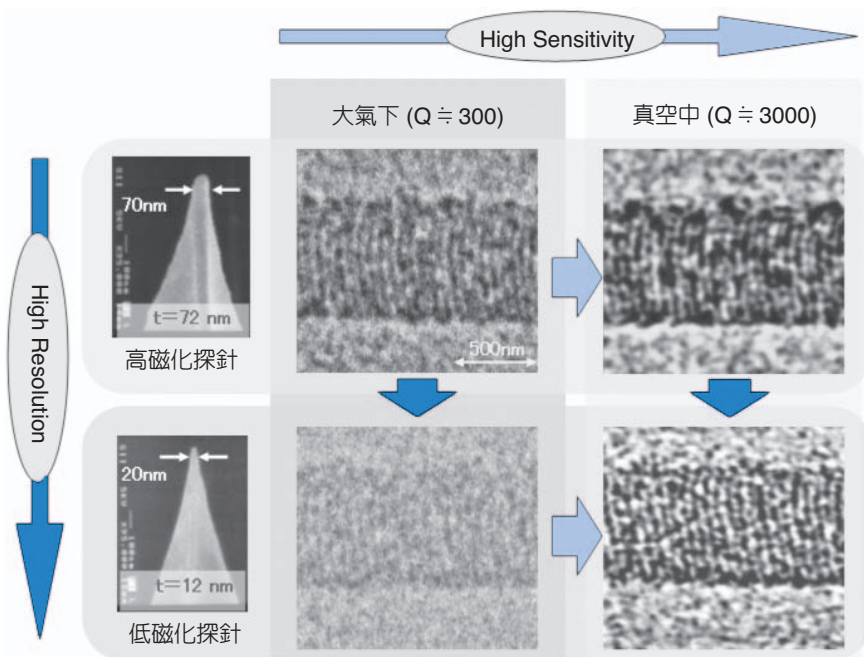


圖 19. 高密度磁性記錄媒體在真空環境中與使用低磁化探針以提升 XY 解析度之量測結果。

圖 20 為此次測試之樣品構造。九宮格中各有不同摻雜濃度的 *P*-type 與 *N*-type 圖樣，其餘部分則為 *N*+ 領域，藉由 SNDM 來區分出 *P*-type、*N*-type 與 *N*+ domain 之二維分布以及摻雜濃度對比。

圖 21 為大氣下與真空中所量測而得之極性像與濃度像，由於真空環境中 ( $8 \times 10^{-4}$  Pa) 表面水膜厚度減低許多，而使得水膜對探針與樣品間電容感應造成的干擾減低，進而提升解析度。大氣下量測的結果可以發現到極性像中 *P*-type 的輪廓 (明亮處) 比起真空中的影像來得大，特別在中心格部分的兩個 *P*-type 連接之處，可以觀察到兩個 *P*-type 連接處，因為靈敏度之提升而讓 *P*-type 輪廓更接近圖

21 的原始圖案設計。而在濃度像方面，理論上摻雜濃度越低影像上的對比越高，而真空中所得之結果完全符合原始圖樣之理論，也就是摻雜濃度低的 *P*-type 與 *N*-type 呈現出較高的對比，相較於在大氣下，由於水膜造成的感度降低，而無法正確的區分出 *N*-type 與 *N*+ 領域在摻雜濃度上的差異。此外，甚至可在濃度像中觀察到 *P*-*N* 接面的存在。

## 五、結論

本文中利用 SPM 結合溫控系統，以探討材料微區表面之物性變化。有別於一般塊體熱分析裝置，此處運用 SPM 結合獨特的「Area in Feedback」系統也能夠得到表面微區玻璃轉化溫度  $T_g$  之資訊，亦能探討玻璃轉化狀態前後的表面形貌與物性變化。

除此之外，藉由真空環境下提升磁力與電性量測時之解析度也有顯著之效果。在磁力量測方面因為探針品質因子的提升而增加了磁力感度，再藉由磁力感度的提升因而採用低磁化探針來減少磁性探針之針尖半徑，進而提升 XY 解析度 (可至 20 nm 以下) 以及避免探針磁力過大造成對樣品干擾的問題。而在表面電容梯度量測部分，真空環境下表面

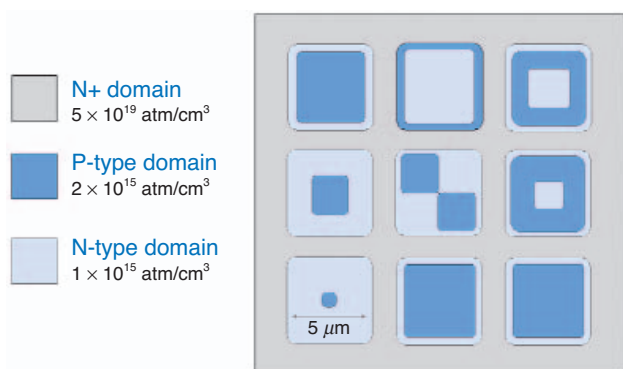


圖 20. 表面電容梯度量測之測試樣品。

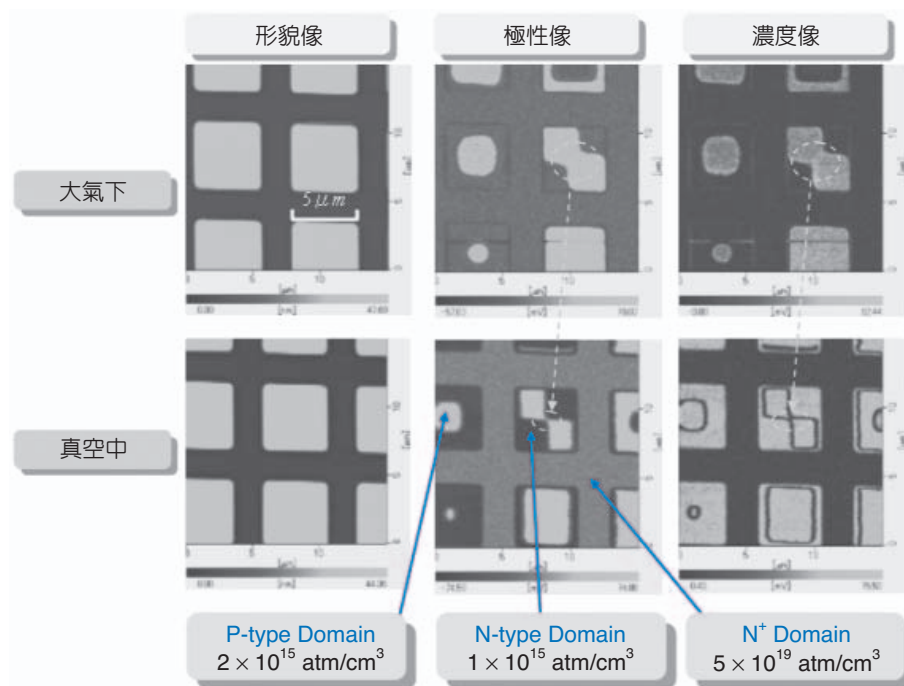


圖 21.  
SNDM 在大氣下 (上) 與真空中 (下) 量測靈敏度的比較。

水膜的減少，對於半導體表面微區之電容梯度分布有著更高的分辨率。

SPM 發展至今已有一年以上的歷史，其在顯微技術上特有的高解析度、樣品處理的便利性、可獲得多樣化的表面微區物性分析、多種環境下量測等的優點，也因此成為進入奈米科技領域中的主要量測技術之一。目前發展成熟的 SPM 技術功能約有十多種，除了拓展新技術之外，如何提升現有技術的解析度與應用延伸性也是另一個重要的課題，相信往後也會有更多相關的文獻被發表出來。

## 參考文獻

1. *Operation Manual of E-sweep*, SEIKO Nanotechnology, Inc..
  2. 日立化成技術報告, **36**, 7 (2001).
  3. *Application Note of Scanning Probe Microscopy*, Seiko Nanotechnology, Inc. (2004).
  4. T. Yamaoka, 日本應用磁氣學會誌, **27** (4), 429 (2003).
  5. E. Saitoh, *J. Applied Physics*, **93** (10), 7444 (2003).
  6. S. Hasumura, *Surface Science*, **25** (5), 429 (2004).
- 
- 丁志強先生為日本橫濱大學化工博士，現任日本精工電子股份有限公司大中華地區總代表。
  - 周書燈先生為國立中央大學化工碩士，現任富智科技股份有限公司資深應用工程師。
  - Chih-Chiang Ting received his Ph.D. in chemical engineering from Yokohama University, Japan. He is currently a Chinese market general manager in SII NanoTechnology, Inc. Japan.
  - Shu-Teng Chou received his M.S. in chemical engineering from National Central University. He is currently a senior application engineer in Advantage Scientific, Inc.