

生根在中研院物理所的掃描探針顯微術

Development of Scanning Probe Microscopy at the Institute of Physics in Academia Sinica

黃英碩、張嘉升、洪紹剛、陳彥甫、胡恩德、楊志文、陳雅柔

Ing-Shouh Hwang, Chia-Seng Chang, Shao-Kang Hung, Yen-Fu Chen, Edwin Hu, Chih-Wen Yang, Ya-Rou Chen

中央研究院物理研究所經過多年的努力，已成功開發出掃描穿隧顯微術、原子力顯微術及其他相關奈米技術。本文將簡單回顧開發的歷史，並介紹這些儀器的主要架構與功能，此外，也提供圖像與敘述作印證。目前我們正積極開發第二代商品化掃描探針顯微儀，也期望藉著該技術之發展，能結合更多學界與業界之有志之士，將該顯微術之潛能發揮到極致，甚且衍生出嶄新的技術與產業。

After many years of effort at the Institute of Physics in Academia Sinica, we have successfully developed scanning tunneling microscopy, atomic force microscopy, and several other related nanotechnologies. In this article, our development history is briefly reviewed, and the functions and schematics of our instruments are presented. We also show several images taken by our microscopes and provide discussions on them. Now we are actively developing our second-generation commercial scanning probe microscopes. Through the development of these technologies, we hope to cooperate with other scientists and engineers to broaden the current technologies to an unexplored horizon, and to even bring forth new technologies and industries.

一、前言

掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy, SPM) 是奈米科技中的關鍵核心技術⁽¹⁾，能作奈米級成像及奈米級特性量測，甚至有人利用它進行奈米級操控⁽²⁾，及製作奈米結構或元件。另外，SPM 的技術也可延伸，與微機電 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 技術結合，製作超高密度、奈米級記憶體⁽³⁾，或高靈敏度生物、化學分子的感測 (sensing) 元件⁽⁴⁻⁷⁾。SPM 技術的研發及應用在科技

先進國家，如歐、美、日，甚至韓國，受到很大的重視；相對而言，台灣在 SPM 的應用及技術開發，比較缺乏及落後。

反觀電子顯微術，目前大家都很清楚它對研究及產業界的重要性，但台灣已落後半世紀之久，難以追上現有技術成熟的廠商。台灣希望奈米科技能在國內生根、發展，自然不能漏掉 SPM 這一重要技術。尤其 SPM 仍是發展中的技術，它所牽涉到的產業技術，如電子、機械及軟體，在台灣都已有良好的基礎，因此台灣仍有不錯的機會可以趕上這

一新奈米科技，並成為此關鍵技術的主宰者。

掃描穿隧顯微術 (scanning tunneling microscopy, STM) 與原子力顯微術 (atomic force microscopy, AFM) 是整個 SPM 技術的基礎，因此有必要先建立這兩者的完整技術。我們中央研究院物理所的研發團隊，首先在 1995 年成功自製超高真空掃描穿隧顯微儀 (scanning tunneling microscope, STM)，解析出表面原子影像。在 2002 年我們自製的原子力顯微儀 (atomic force microscope, AFM) 雛型機，成功地做到接觸式 (contact mode)、暫接觸式 (semi-contact mode 或 AC mode)、側向力模式 (lateral force mode)、及作用力－距離曲線 (force-distance curve) 等操作，與一家新成立的公司建立的團隊，從機構設計、電子電路開發、控制軟體、影像處理軟體及人機介面等開發，完全自己設計、製造、組裝，已推出第一代商品化機型。以下介紹我們所開發出來的 SPM 及相關奈米技術。

二、開發出來的 SPM 及相關奈米技術

中央研究院物理研究所的團隊在十年前即著手建立自主的 SPM 技術，於 1995 年成功自製完成超高真空中操作的 STM (圖 1)，成功取得表面原子解析影像 (圖 2)，此自製 STM 也可量取表面電子結構 (圖 3)，並發表多篇學術論文⁽⁸⁻¹⁰⁾。我們初期的團隊成員很少，沒幾年就面臨學生畢業、助理離職等

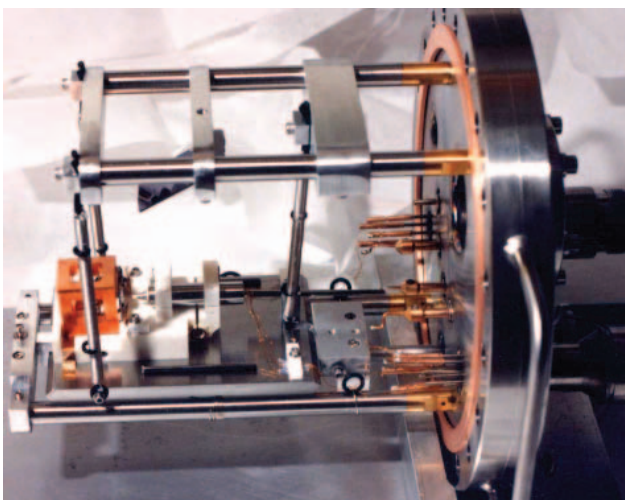


圖 1. 自製完成超高真空 STM。

問題，SPM 技術的生根及發展難以持續。2000 年張嘉升與黃英碩博士決定引進業界的參與，擴大研發團隊，希望讓 SPM 技術真正在台灣生根並蓬勃發展。終於在 2002 年春天，與安冠奈米科技公司⁽¹¹⁾成功開發出 AFM 的雛型機，2003 年春天推出第一代商品化機型，具備接觸式、暫接觸式、側向力模式、作用力－距離曲線等功能。該系統如圖 4，包含機構本體 (圖 5)、控制電路機箱、個人電腦及軟體 (控制與影像處理)，此機的型號訂為 A-100 原子力顯微儀。

A-100 的架構如圖 6 所示，虛線部分是顯微儀機構本體，其餘為電子電路以及電腦軟體操控系統。在掃圖之前，必須小心地將樣品與探針帶到夠近的距離讓作用力發生。電腦下達命令驅動步進馬達 (stepping motor)，逐步將樣品帶近探針。掃圖時電腦主動下達 X、Y 座標的電壓訊號，由高壓放大器 (high voltage amplifier) 放大後驅動壓電掃描器

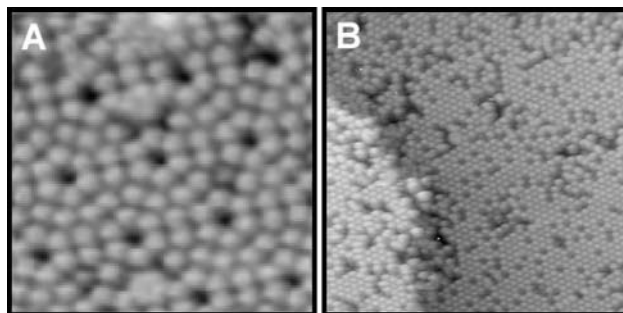


圖 2. (A) Si(111)- 7×7 表面原子解析影像，影像大小為 $9 \text{ nm} \times 9 \text{ nm}$ 。(B) Si(111)- $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ -Pb 表面原子解析影像，影像大小為 $28 \text{ nm} \times$

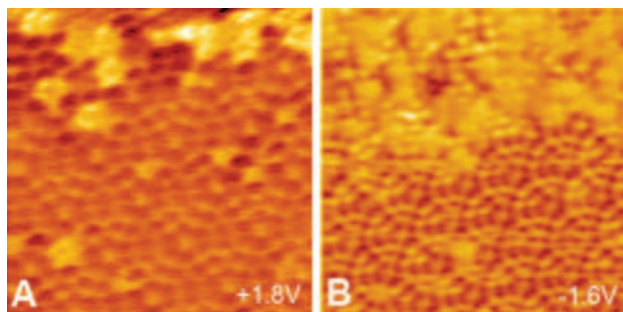


圖 3. Si(111)- 7×7 表面電子結構 (dI/dV) 影像，(A) 影像大小為 $10 \text{ nm} \times 10 \text{ nm}$ ，(B) 影像大小為 $18 \text{ nm} \times 18 \text{ nm}$ 。



圖 4. A-100 原子力顯微儀。

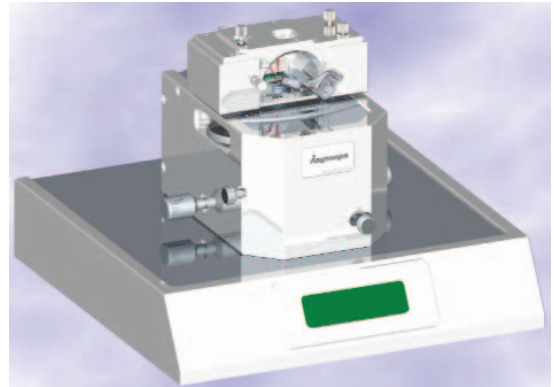


圖 5. A-100 原子力顯微儀的機構本體圖。

(PZT-scanner) 的 X 軸和 Y 軸 (附註)，帶動樣品來回掃描，讓探針探索此一區域。

雷射光源產生紅色可見光束，經過一反射鏡的微調，可將聚焦後的小光點照射在探針的懸臂 (cantilever) 末端。懸臂末端鍍有金屬膜以提高反射率，將入射的雷射光反射，再經過另一反射鏡微調而射入位置感測元件 (position sensitive detector, PSD) 的中央。這樣的安排形成一套非常靈敏的光槓桿機制，當樣品與探針間的作用力造成探針懸臂偏折 (deflection) 時，也會讓雷射光路產生偏折，

而被 PSD 感知⁽¹⁾。PSD 產生的微弱電流訊號，需要經過電流前級放大電路 (current pre-amplifier) 加以轉換，再經一系列的訊號處理，方能轉換為高訊噪比的電壓訊號來代表探針懸臂的偏折，以利後續訊號的傳輸與擷取。

1. 暫接觸式或 AC 模式原子力顯微術

操作於暫接觸式或 AC 模式時，訊號產生器 (function generator #1) 驅動壓電振動片 (bimorph)，提供探針懸臂共振所需的持續振動源。訊號產生器

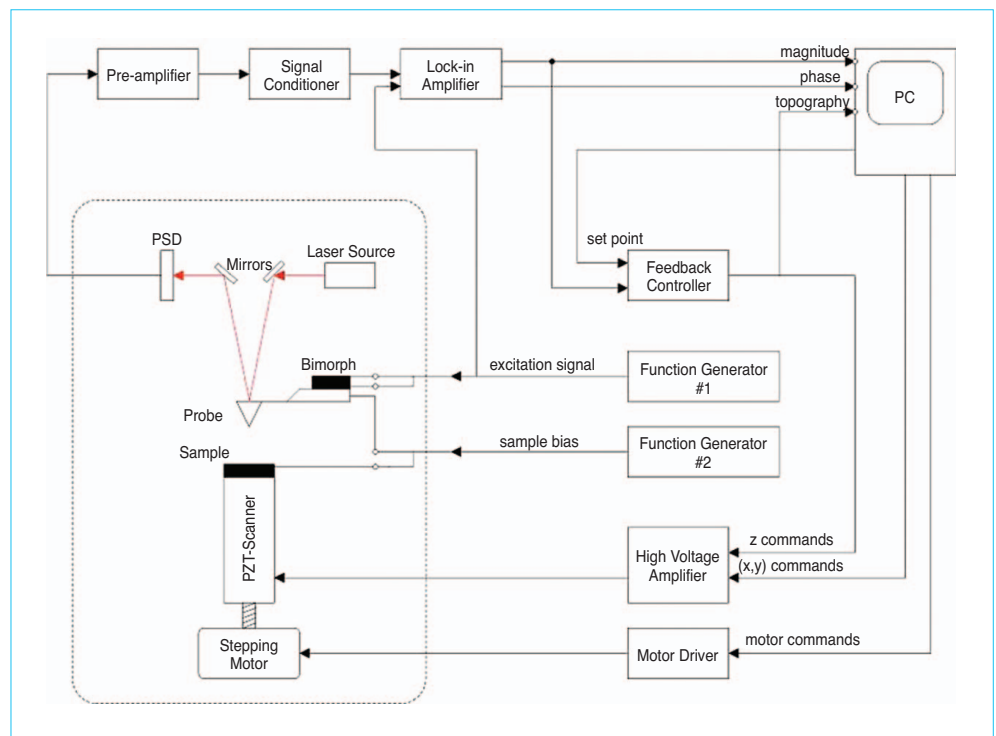


圖 6. A-100 原子力顯微儀的架構簡圖。

的交流訊號輸入鎖相放大器 (lock-in amplifier) 作為參考端，代表探針懸臂偏折的電壓訊號，也同時進入鎖相放大器的輸入端，則鎖相放大器可以產生兩項重要的輸出訊號：一是探針懸臂的振動振幅 (magnitude)，二是探針懸臂振動相對於驅動訊號的相位差 (phase)。這兩種訊號提供了充足的資訊來代表探針懸臂的動態特性，探針樣品間微小的作用力變化都可以藉此靈敏地被感測出來。

在成像之前，須先裝置一適合於暫接觸模式的 AFM 探針於針座上，然後對該探針懸臂做掃頻，以尋找其共振頻率 (resonance frequency)。圖 7 是 A100-AFM 的一掃頻圖，通常探針供應廠商會提供共振頻率的預估值，使用者可依據此值設定掃頻範圍。A100 會先在比較寬的頻率範圍做粗掃 (在此例為 250–350 kHz)，找到共振頻率後，再縮小範圍做更精細量測振幅及相位對頻率的關係圖，圖 7 顯示共振頻率前後各約 3 kHz 的掃頻曲線、振幅及相位分別以黃色及白色曲線繪出，由此圖可知該探針懸臂的共振頻率為 284.675 kHz。工作頻率 (working frequency) 通常稍微偏離共振頻率，其值可由程式自動選取，或由操作者設定。另外，還需設定回饋電路中的工作振幅 (feedback set point)，此設定值在將樣品「帶近 (approaching)」探針時，也可用來決定是否到達針尖的位置。當樣品與探針的距離超過壓電掃描器的 Z 軸全行程時，即使將樣品前伸 (靠近探針) 至 Z 軸最大值，懸臂振幅也無法減少至設定值。此時電腦會命令壓電掃描器的 Z 軸後縮 (遠離探針) 至極限，步進馬達再前進一段距離 (需小於壓電掃描器 Z 軸總行程)，之後電腦會啟動回饋系統，看看是否能藉由 Z 軸伸長而使振幅衰減至設定值。若能達到設定值，即可進行掃圖成像；否則探針與樣品間的距離仍太遠，必須重複上述步驟一步一步地將樣品小心地帶向探針，直到設定振幅能達到，則可停止上述「帶近」的程序，進行成像掃描。

在掃描成像時，回饋控制器 (feedback controller) 會將探針懸臂的振幅訊號與設定值作比較，經過伺服控制法則運算後將補償訊號輸出，此補償訊號經過放大後驅動壓電掃描器的 Z 軸，使得懸臂振幅訊號能維持於設定值。這意味著探針與樣品間維持固定的間距與作用力，而回饋控制器的

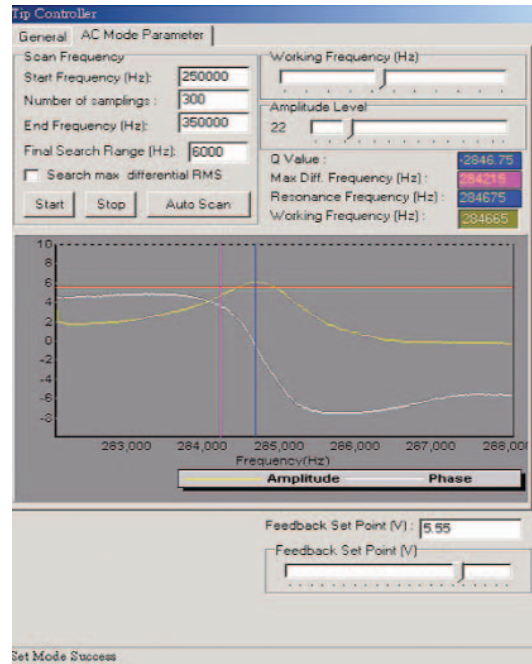


圖 7. A-100 原子力顯微儀的掃頻。

Z 軸輸出即為樣品的表面形貌 (topography)。探針懸臂的振幅、相位、以及 Z 軸高度三種重要的訊號，可以透過訊號擷取卡 (data acquisition card) 輸入電腦，加以成像與分析。

圖 8 是自製 AFM 所取得的一積體電路 (IC) 內部的局部形貌影像，在 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 的區域內可以看出雙層的電路及導線上一些表面微結構，圖 8(a) 是一般的二維掃描影像，圖 8(b) 則是經由我們的影像處理軟體轉換成 3D 立體形貌影像，顏色、灰階及對比都可藉此軟體調整。圖 9(a) 與圖 9(b) 分別為 AFM 標準校正片及石墨表面的形貌影像，圖 9(b) 中單層原子台階 (高約 0.3 nm) 可清晰辨別，這顯示我們自製 AFM 的 Z 軸解析度高於石墨表面單層原子台階。

圖 10 為平坦石墨表面上塗佈奈米碳管的 AFM 影像，圖 10(a) 是表面形貌影像，其顯示的是成束的奈米碳管，而非單根；因凡得瓦爾力 (Van der Waals forces) 的關係，奈米碳管非常容易聚集成束，若無特殊化學處理，很難單獨將它們分開出來。圖 10(b) 為振幅影像，它容易在高度有變化的區域形成對比。若回饋電路的速度很快，而探針掃描的速度很慢，此類成像的對比會很小，因振幅都維持在設定值。反之，若掃描的速度快，只要遇到

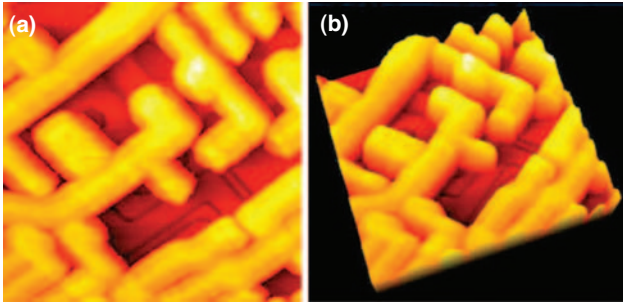


圖 8. A-100 原子力顯微儀所取得 IC 內部的局部形貌影像 (暫接觸式)。影像大小為 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 。

高度有變化，振幅會瞬間偏離回饋電路的設定值而形成對比，此種影像非常適合辨識原子台階或判定區域邊界，在平坦、均勻材質的表面幾乎無對比。圖 10(c) 為相位差影像，它明顯區別出乾淨的石墨表面區域與覆蓋奈米碳管及雜質的區域，此圖中大部分較亮區域在形貌影像 (圖 10(a)) 中對比不強，只是略高乾淨石墨表面約 $1\ \text{nm}$ ，它們不是奈米碳管，極可能是非晶碳 (amorphous carbon)，在塗佈奈米碳管到石墨表面的同時，一齊被塗佈到表面的雜質。值得注意的是這三個影像是在同一區域取得的，因為它們相對應的每一像素 (pixel)，A100 能同時取得高度 Z 值、振幅及相位差三個訊號來成像。圖 11 則為 A100 所取得石墨表面上 DNA 分子的形貌影像，每一條 DNA 有不同的捲曲；DNA 在石墨上的吸附力很弱，且其分子很柔軟，成像時極容易刮傷這些分子，或將它們掃到圖像外，此影像顯示我們自製 AFM 可以用來研究柔軟的生物分子。

2. 接觸式原子力顯微術

一般而言，接觸式 AFM 的解析度比暫接觸式稍好，其採用的探針懸臂的 k 值 (彈性係數) 要比暫接觸式的小。它的操作不需振盪懸臂，回饋電路中的設定值是 PSD 上所感知的懸臂在垂直方向的偏折⁽¹⁾。

圖 12 是利用一接觸模式對 GaN 薄膜成像，此薄膜大致平坦，但有一些奈米級孔洞。除了成像，我們所開發的影像處理程式還可對影像做各種數值分析與量測。在此圖中，我們可選要分析的水平與垂直方向的高度圖 (height profile)，圖右邊顯示的

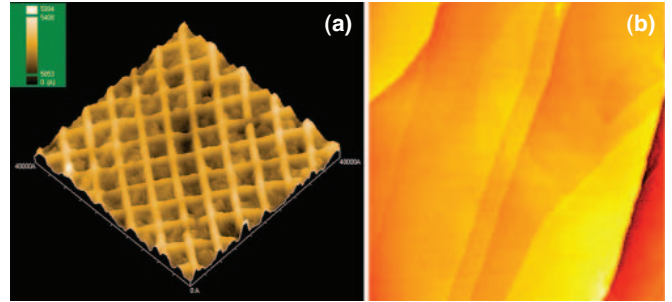


圖 9. A-100 原子力顯微儀所取得的形貌影像 (暫接觸式)。(a) 標準校正片，影像大小為 $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ ；(b) 石墨表面上原子台階影像，影像大小為 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 。

是垂直方向的高度曲線，圖下邊顯示的是水平掃描線的高度曲線。我們也可移動水平線上的兩個箭頭指標，右下角即顯示此兩點的高度差及水平距離，此量測顯示孔洞的深度為 $46.6\ \text{nm}$ ；孔洞的寬度量測則可將兩指標移到孔洞的兩側而得知 (未顯示此圖)。我們的影像處理程式還可以提供表面平坦度及粗糙度的量測，圖 13 的上半部是此 GaN 薄膜的高度分布圖，其下半部顯示一些統計數值，如平均高度、高度的均方根值、最大及最小高度 Z 值等。

接觸式 AFM 形貌成像的同時，也可以用側向力 (lateral force) 來成像。A100 使用的是四象限的 PSD，可以偵測到吸引力及斥力所造成的雷射光點在垂直方向的偏移⁽¹⁾，也可以量得雷射光點在水平方向的偏移 (如圖 14)，此水平方向的偏移主要是因探針接觸掃描時，表面摩擦力造成懸臂的側向扭曲所致；不同材質的表面摩擦力通常不一樣，因此側向力影像可以顯示出表面不同材質的區域 (圖

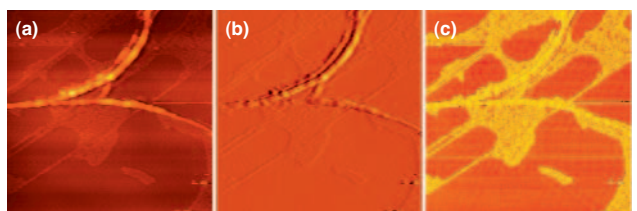


圖 10. A-100 原子力顯微儀所取得石墨表面上奈米碳管影像 (暫接觸式)。影像大小為 $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ 。(a) 表面形貌影像，(b) 振幅影像，(c) 相位差影像。

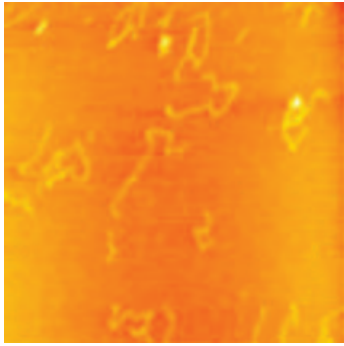


圖 11. A-100 原子力顯微儀所取得石墨表面上 5400 bps DNA 的掃描影像 (暫接觸式)。影像大小為 $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$ 。

15(a))。但如果表面高度變化的斜率太大，也會造成懸臂的側向扭曲；幸而可以結合形貌圖來判斷對比是來自高度變化或是材質的不同。圖 15(b) 顯示探針掃描一個高起的平台時側向力的變化，在平台兩端的高度變化的斜率方向剛好相反，側向力的方向也因此相反，所以在側向力影像中形成平台兩端亮及暗不同的對比。在不同材質的區域但高度變化不大的情形下，這種兩端亮暗對比是不會出現的。圖 16 是 A100 作接觸式掃描時，取得的形貌圖及兩個不同方向掃描所取得的側向力影像，樣品為聚苯乙烯顆粒球。

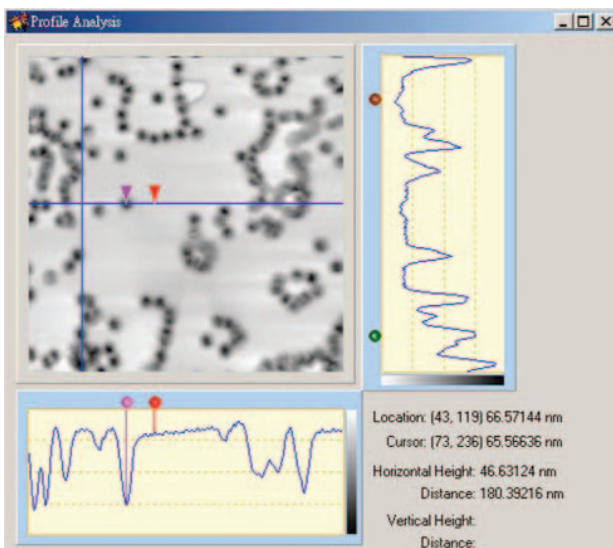


圖 12. Si 基板上長 GaN 薄膜的接觸式掃描影像。影像大小為 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 。

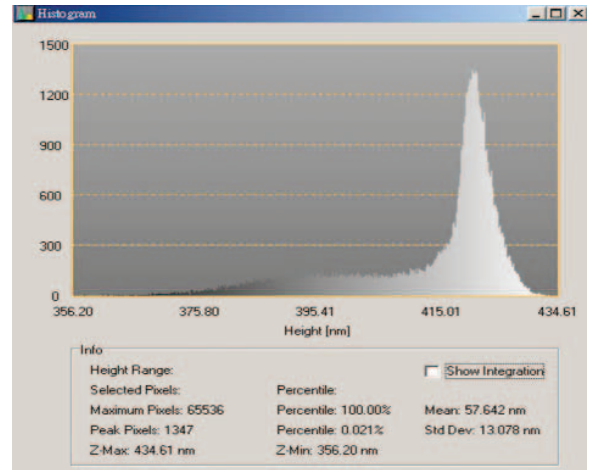


圖 13. 上圖中 GaN 薄膜的高度分布圖。

A100 的接觸模式還可以讓我們量測表面的機械特性，如對聚苯乙烯顆粒球執行作用力對距離變化的量測 (force-distance curve measurement)。在此模式需將探針移至待測點，然後關閉回饋電路，先驅動壓電掃描器的 Z 軸將樣品後退一設定距離，再驅動掃描器的 Z 軸前伸，以線性關係逐漸將樣品帶近探針，同時以 PSD 量測作用力的變化 (見圖 17 的黃色曲線)。當距離很遠時，作用力幾乎為零，但當探針跟樣品夠近時，吸引力就出現，此作用力為負值，但很快的就到達最大值，而後隨距離變短吸引力變小，並逐漸轉變為斥力 (作用力為正值)；此時探針已接觸到表面，並逐漸刺入顆粒球。斥力持續增加，但斥力隨刺入深度增加而增大的斜率並不高，因聚苯乙烯顆粒球是相當柔軟又有彈性。當探針進入顆粒球到一設定距離後，即驅動壓電掃描器的 Z 軸轉向後退，並量測探針退出過程中作用力的改變 (見藍色曲線)。當探針已抽出顆粒球後，作用力轉變成吸引力，而且吸引力持續增加，有趣的是直到探針離開顆粒球約 300 埃時，作用力才瞬間由很強的吸引力掉到零。這可能是顆粒球中的一根纖維黏到探針上，在後退的過程，此彈性纖維被拉長而施予探針一吸引力，直到此纖維被拉斷為止。由藍色曲線還可量測出此彈性纖維被拉長的機械特性，類似的力-距離曲線量測也被應用到 DNA 及蛋白質等生物分子，以量測生物分子摺疊等機械特性。

圖 14.
側向力成像。

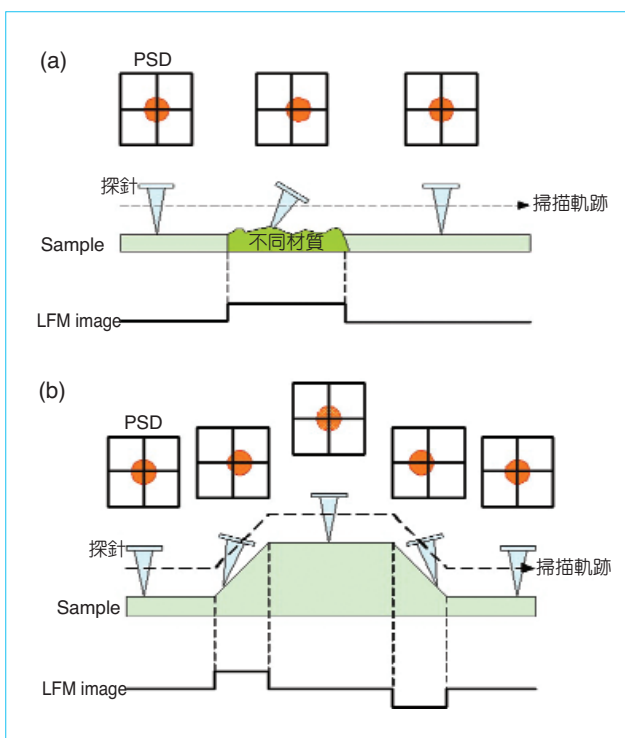
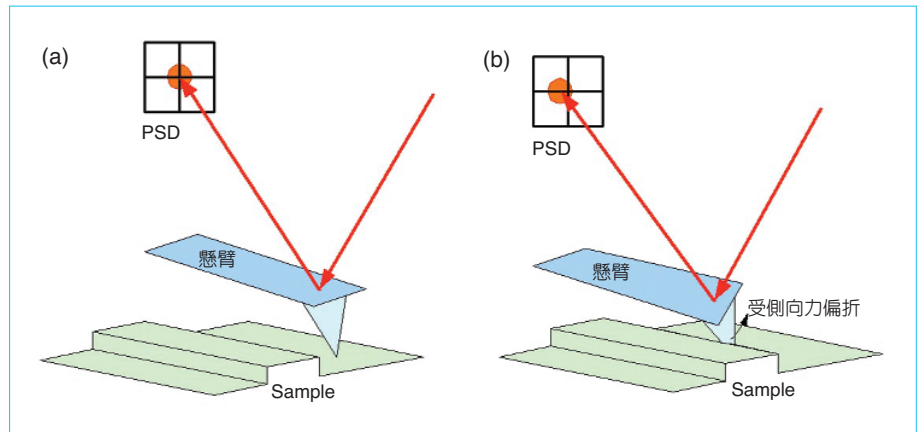
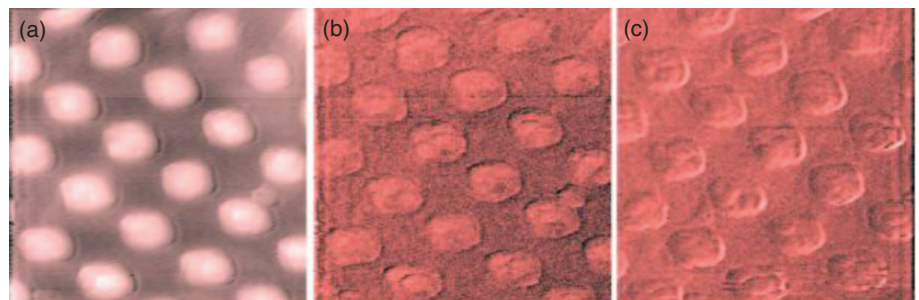


圖 15. 側向力成像的對比機制。(a) 不同材質形成的對比；(b) 高度變化形成的對比。

圖 16.
接觸式 AFM 掃描聚苯乙烯顆粒球時，同時取得的形貌圖 (a) 及兩個不同掃描方向取得的側向力影像。(b) 為從左掃描到右，(c) 為從右掃描到左；樣品大小為 $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ 。



3. 其他相關技術

STM 與 AFM 是整個 SPM 技術的基礎，我們已開發了此兩者的完整技術，並建立一個研發團隊能獨立發展各種 SPM 的技術。目前我們正積極往其他方面發展，如利用 SPM 作奈米操控、靜電力顯微術 (electrostatic force microscopy, EFM)、磁力顯微術 (magnetic force microscopy, MFM)、近場光學顯微術 (near-field scanning optical microscopy, NSOM 或 SNOM)，以及水溶液中操作的 AFM、電化學 STM 等，都已獲得初步的成果。這些技術對生物分子 (DNA、蛋白質) 在不同液態環境下所呈現的特性，以及它們與光的反應，提供即時與局部觀測的能力。如果結合光學顯微鏡，就能涵蓋從細胞到基因的研究。因此這項技術的成熟，將對生物樣品的成像與操控產生革命性的影響，進而加速生物科技的進展。

在發展 SPM 技術中，奈米步進系統是很關鍵的，SPM 的探針在操作時與表面僅相距數埃至數十奈米，但不操作時探針 (或樣品) 需退離數公釐

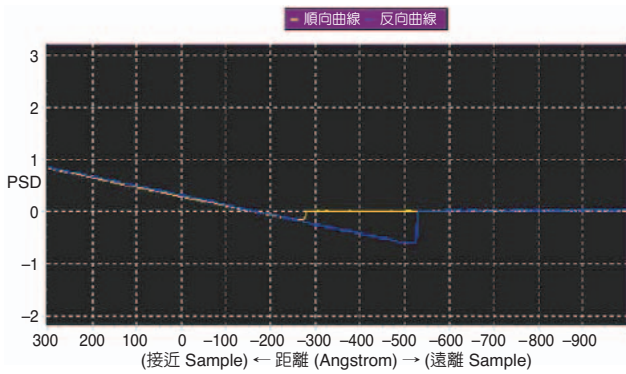


圖 17. A100 對聚苯乙烯顆粒球執行作用力對距離變化的量測。

(mm) 或更遠，如何將探針 (或樣品) 從數公釐外帶至僅有奈米尺寸的距離，而不致於撞針是一件相當有挑戰性的工作。我們已發展出兩型奈米步進系統，都是結合壓電陶瓷、機構設計及適當的電路控制，這類型步進系統相較於傳統步進馬達，在結構上更堅固小巧，對外來震動的屏蔽也較容易做到；因此，架構在這類型奈米步進系統的 SPM，解析度會比架構於傳統步進馬達的 SPM 有更好的表現。它們不僅可以應用在一般大氣環境中，更適合在真空環境中操作。現在有越來越多的需求是可控

制環境(如：控制溫度、溼度、通入某種氣體，或控制在某種程度的真空等等)的 SPM，此類型奈米步進系統就比步進馬達更合適。

圖 18(a) 是兩款步進系統中的一種，它為尺蠖式 (inchworm) 步進系統；其步進的方式如圖 18(b) 所示，類似尺蠖蟲的行進。我們藉著驅動適當的壓電元件，控制此步進系統的前進或後退，每一步的大小都可以視需要調整，圖 1 中的自製超高真空 STM 就是使用類似的尺蠖式步進系統。這些步進系統除可用在 SPM 中承載針 (或樣品) 前進或後退，它們也可以應用到其他奈米定位、奈米操控的系統上，在這方面還需整合奈米測距的技術，才可達到重複精準定位。目前我們已掌握光干涉儀 (optical interferometry) 的技術，可以用它來量測我們自製奈米步進系統每一步的位移大小。圖 19 是用我們自己組裝的光干涉儀來量測另一型步進系統 (專利申請中) 每一步的行程，量到行程約為 47 nm。

未來我們將整合光干涉儀與 SPM 系統，希望建造有可追溯性的 SPM。目前我們設計的步進系統仍是一維的，但未來可以發展出更多維度的奈米定位系統，這些雖然都是關鍵的奈米技術，但國內甚少發展。

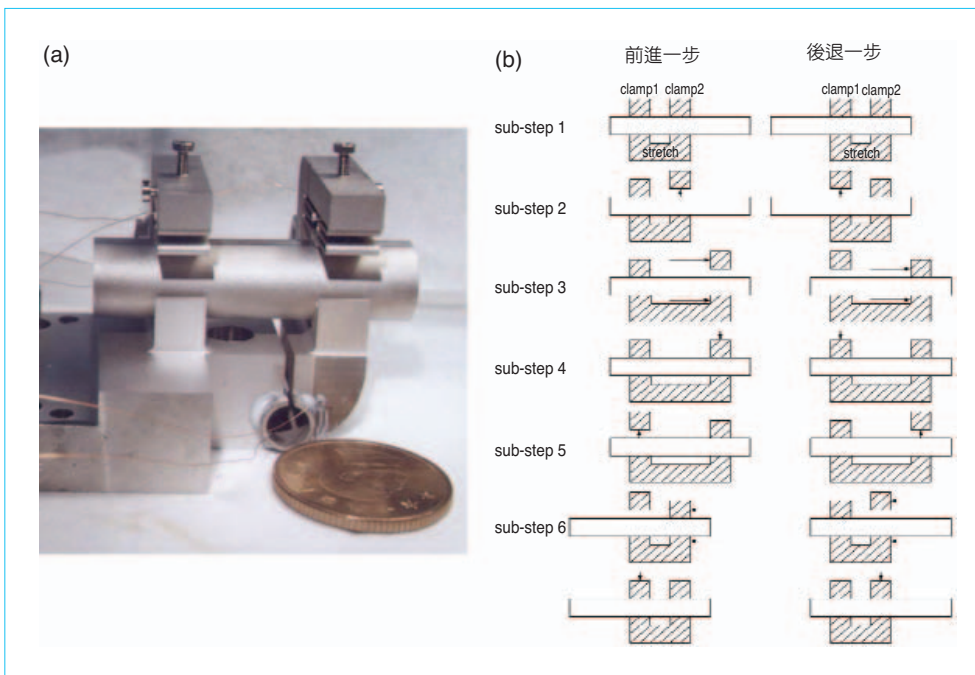


圖 18.

(a) 自製尺蠖式步進系統，(b) 其步進的方式。每一步前進或後退都是由六小步 (sub-steps) 來達成。

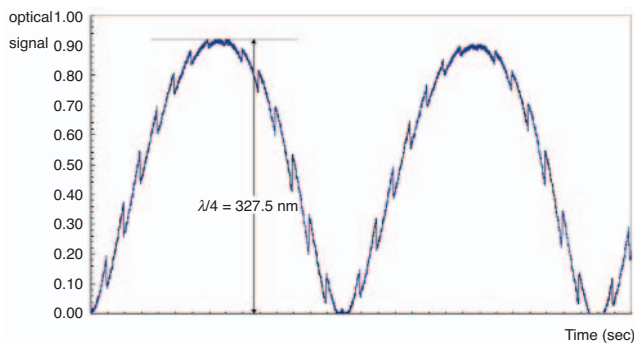


圖 19. 中央研究院物理研究所利用自己組裝的光干涉儀來量測一自製步進系統每一步的行程。在建設性干涉時，光學訊號強度達到最大值；在破壞性干涉時，訊號強度達到最小值。相鄰最大值與最小值的間距（光程差）為光波長的四分之一，在此段距離中可算出步進系統走了約七步，因此每一步的行程約為 47 nm。

三、結論

我們在中央研究院物理研究所的研發團隊，已成功展示設計及製作 SPM、奈米步進系統及奈米量測等關鍵技術的能力，這對台灣要發展自主的奈米技術是具有相當重要的意義。首先，很多創新的奈米技術難以由現有商品化儀器改裝達成，有可能需要利用到上述的基礎技術，以重新設計特殊的儀器設備。因此我們期望所發展出來的基礎技術，能協助國內學術界及業界開發出領先世界的奈米技術（包括特殊奈米量測、奈米操控等），讓台灣能在全球奈米科技的競爭中佔一席之地。其次，由於我們也具備完整操作 SPM 的經驗及技術，可以協助國內學界及業界有效地使用 SPM，解決他們所面臨的問題。再者，很多人正在思索如何將奈米教育往下紮根，讓大學生甚至中學生就能及早接觸到奈米世界。廉價的教育版 SPM 的開發有助於奈米教育的普及，我們具備完整的設計能力，在這方面也可以有所貢獻。

掃描探針顯微術的發展與應用，對奈米科學的研究與技術的拓展都將產生深遠的影響。中央研究院物理研究所經過多年努力，已掌握 SPM 的完整技術，並已成功開發第一代的原子力顯微儀，這對

國內推展奈米科技之研究與產業化都具有指標性的意義。我們目前在既有的技術基礎與人力資源上，正繼續開發第二代之商品化掃描探針顯微儀，使該儀器更穩定並具備更多的功能。相信在開發完成後，將更能滿足國內學術界、產業界及教育界之需求。我們也期望藉著該技術之發展，能結合更多學界與業界的有志之士，將該顯微術之潛能發揮到極致，甚且衍生出嶄新的技術與產業。

誌謝

特別感謝中央研究院、國科會及中央研究院物理研究所多年來的補助，鄭天佐及吳茂昆兩位院士的支持，尤其是中央研究院物理所的長期技術支援（機械工廠及電子工作室），以及過去十年曾參與 SPM 技術開發的所有同仁和安冠奈米科技公司的研發團隊。

附註

A100 使用的是管狀壓電掃描器 (tube scanner)，在其上有特殊的電極畫分，給予適當的高壓控制，可以產生 X、Y 及 Z 三軸的致動。三軸最大的致動行程會因選取的壓電掃描器而不同，目前有 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ 及 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 三種掃描器。

參考文獻

1. 黃英碩, 科儀新知, **26** (4), 5 (2005).
2. 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**, 360 (2000).
3. P. Vettiger and G. Binnig, *Scientific American*, **35**, Jan. (2003).
4. J. Fritz, M. K. Baller, H. P. Lang, H. Rothuizen, P. Vettiger, E. Meyer, H.-J. Guntherodt, Ch. Gerber, and J. K. Gimzewski, *Science*, **288**, 316 (2000).
5. A. Gupta, D. Akin, and R. Bashir, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 1976 (2004).
6. B. Ilic, Y. Yang, and H. G. Craighead, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2604 (2004).
7. N.V. Lavrik, M.J. Sepaniak, and P.G. Datskos, *Rev. Sci. Instr.* **75**, 2229 (2004).

8. I.-S. Hwang, T.-C. Chang, and T.T. Tsong, *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 4229 (1998).
9. T.-C. Chang, I.-S. Hwang, and T.T. Tsong, *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 1191 (1999).
10. I.-S. Hwang, T.-C. Chang, and T. T. Tsong, *Jap. J. Appl. Phys.*, **39**, Part 1, No. 7A, 4100 (2000).
11. 安冠奈米科技公司的網站為 <http://www.angsnanotek.com.tw/>

-
- 黃英碩先生為美國哈佛大學應用物理博士，現任中央研究院物理研究所研究員。
 - 張嘉升先生為美國亞利桑納州立大學物理博士，現任中央研究院物理研究所研究員。
 - 洪紹剛先生為國立台灣大學機械工程碩士，現為國立台灣大學電機工程博士班學生，並擔任中央研究院物理研究所研究助理。
 - 陳彥甫先生為國立台灣大學機械工程碩士，現任中央研究院物理研究所研究助理。
 - 胡恩德先生為國立中山大學機械與機電工程碩士，現為國立台灣大學博士班學生，並擔任中央研究院物理研究所研究助理。
 - 楊志文先生為國立中正大學物理學碩士，現為國立台灣大學物理研究所博士班學生。
 - 陳雅柔小姐為輔仁大學物理碩士，現任安冠奈米科技股份有限公司研發工程師。

- Ing-Shouh Hwang received his Ph.D. in applied physics from Harvard University, USA. He is currently a research fellow at the Institute of Physics, Academia Sinica.
- Chia-Seng Chang received his Ph.D. in physics from Arizona State University, USA. He is currently a research fellow at the Institute of Physics, Academia Sinica.
- Shao-Kang Hung received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a Ph.D. student in the Department of Electrical Engineering at National Taiwan University. Meanwhile, he is a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica.
- Yen-Fu Chen received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica.
- Edwin Hu received his M.S. in mechanical and electro-mechanical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently a Ph.D. student at National Taiwan University. Meanwhile, he is a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica.
- Chih-Wen Yang received his M.S. in physics from National Chung Cheng University. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Physics at National Taiwan University.
- Ya-Rou Chen received her M.S. in physics from Fu-Jen Catholic University. She is currently a R&D engineer at Angsnanotek Co., Ltd.