

新世代原子力顯微鏡成像技術－ PeakForce Tapping 模式與其衍生量 測模式

New Generation Imaging Technique of Atomic Force Microscope – PeakForce Tapping Mode and Relative Deviated Mode

林宏旻、陳彥甫、張家榮

Hung Min Lin, Yen Fu Chen, Mark Chang

PeakForce Tapping 透過探針量測行為的改變，改善了傳統 AFM 量測模式上的不足。本文將介紹其既可保有輕敲式低側向力的優勢，又可以實現如接觸式般直接以即時力量作為線性回饋控制，實現了快速高解析機械性質的分布量測，以及自動回饋優化之 AFM 量測，並可相容於傳統 C-AFM 電流量測與 KPFM 電位量測，使得高品質之形貌、電性與機械性質得以同一時間取得，開創了新的奈米科研與應用領域。

Using PeakForce Tapping could improve the drawback of the traditional AFM technique. In this article, we will explain how PeakForce tapping provides not only rapid quantitative nano-mechanics mapping but also automated feedback optimization of AFM imaging. This new technique is compatible with C-AFM and KPFM, and gains both of mechanics and electrical information in high spatial resolution simultaneously.

一、操作原子力顯微鏡不再是難事

典型的 AFM 量測是從樣品的製備和 AFM 模式的選擇開始。然而樣品一旦決定了，通常也伴隨著 AFM 模式的決定，也就是根據樣品特性間接地決定了合適的掃描模式與系統配置，例如：探針機械性質規格、量測環境與掃描模式。接著做力量偵測系統的校正，並進入回饋系統的調整階段。而為了確保正確的掃描操作，操作者必須依據過往經驗

與判斷，即時掃描狀態來持續調整回饋系統之參數，如此一來即可得到合理的 AFM 數據，最後進入圖像分析階段。站在使用者感受層面上來看，整個 AFM 量測的操作過程，最為關鍵的一步是回饋參數的調整，而這也是最耗費時間和需要豐富的原子力顯微鏡實務經驗。因此若能提供具有自動優化量測參數之操作模式，對使用者而言，將是一大福音。而這正是布魯克 (Bruker) 的新技術－ScanAsyst 的發展初衷。ScanAsyst 可自動動態調整

掃描參數，大大降低原子力顯微鏡操作經驗門檻，同時去除人為因素造成的量測差異，可以更客觀的角度來獲取形貌數據。

要體悟 PeakForce tapping mode 所帶來的好處與優勢前，我們有必要先審視現有原子力顯微鏡操作模式，圖 1 為接觸式掃描、輕敲式掃描以及恆定力輕敲式掃描等三種成像模式之比較示意圖。藉由理解操作模式背後所隱含的物理原理差異，可更深入地了解 ScanAsyst 與其衍生的相關 PeakForce 模式。

二、接觸式掃描模式

接觸式掃描是最早問世，也是最單純的原子力顯微鏡模式，它是掃描電容顯微鏡和掃描電流顯微鏡等衍生模式的基礎。其基本原理為：探針靠近樣品，尖端與樣品發生正向之相互作用力 F ，引起懸臂樑之自由端的微小偏轉 X ，導致雷射光反射角度發生變化，最後雷射光於光偵測器上的落點產生偏移量 B ，其中 F 、 X 與 B 皆成正比關係。掃描過程中，藉由即時監測光偵測器上的偏移量 B ，並以其作為回饋訊號源，藉由保持正向力固定，以回饋系統調變壓電陶瓷 z 軸位置，來調控探針與樣品之距離，然後保持雷射光點於光偵測器上的所在位置，使得偏移量 B 恆定，達到懸臂樑維持固定形變，正向力 F 也因此恆定。搭配壓電陶瓷規律地在 xy 軸向掃描，針尖因而在樣品表面逐點掃描，並勾勒出樣品表面三維形貌。接觸式掃描成像時，使用者須確保回饋迴路是足夠快的，以允許壓電陶瓷 z 軸響應足夠完整描繪樣品形貌的變化，但也須避免回饋迴路過快，以免導致系統不必要的振盪。

相較於其他的 AFM 成像模式，接觸式掃描成像運作與原理相對簡單，然而卻也存在著一個缺點：探針於樣品上掃描時會伴隨著可觀的側向力產生，而且此側向力於量測過程中並未受監控。這可能會導致樣品或探針的損害，或是探針與樣品相對運動時，造成樣品鬆散而隨探針發生附著拖曳現象。這個問題可藉由振盪的懸臂來克服，也因而導致輕敲式掃描模式 (tapping mode) 的誕生。

三、輕敲式掃描模式

因為接觸式掃描並不監控接觸掃描過程中所產生的橫向力，為了避免探針和表面之間產生過大的側向力，而造成探針與樣品損傷，同時又要保有高橫向空間解析力，根本解決方案為探針僅在很短暫的時間內垂直碰觸樣品，進而減輕側向力的問題，此模式因此稱之為輕敲式掃描。其以近似探針懸臂樑之自然共振頻率震盪，同時保持震盪方向垂直於樣品表面。典型的振盪振幅是在幾十奈米的範圍內，相較於數百微米的懸臂長度，可將此震盪視為垂直上下運動，當此震動中的探針接近，並輕敲於表面，也就達成探針尖端於極短暫之時間內垂直輕敲於樣品表面，因此可以有效地降低側向力的生成。由於探針不再是靜態的接觸於樣品上，取而代之的是以一固定且近似共振頻率之高頻動態接觸行為，作用力 F 或是偏移量 B 與 X 無法直接測得，需藉由鎖相放大器對偏移量 B 作解調，測得之振幅作為回饋訊號源，藉由回饋系統調控探針與樣品之 Z 距離，使得鎖相放大器所測得之探針振幅保持一定值，所調變之 Z 距離即是該樣品點的形貌高度。

然而輕敲式掃描在形貌量測過程中，我們沒有直接量測輕敲過程中的即時作用力，輕敲過程中實際上力量可分為短程排斥力和遠距離的吸引力。當

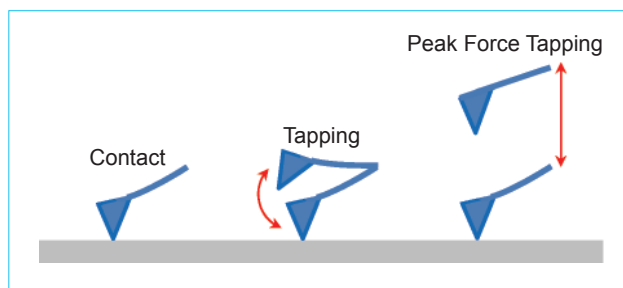


圖 1. 接觸式掃描、輕敲式掃描與恆定力輕敲式掃描之比較。接觸式掃描以一固定之縱向作用力作橫向掃描。輕敲式掃描於探針共振頻率下，固定共振振幅作橫向掃描。恆定力輕敲式掃描於一固定頻率下，固定最大之縱向作用力作橫向掃描。

探針接近樣品的過程，先經歷一個由吸引力主導響應的過程並將探針拉向表面，直到接觸行為發生，轉而成為排斥力主導響應。而鎖相放大器所測得之振幅，可視為多次來回輕敲過程中，短程排斥力和遠距離的吸引力的平均力量響應，並非即時而直接的力量偵測。雖然並非直接的力量偵測與控制，但不會影響基本的成像量測，只是限制了輕敲式掃描無法獲取額外的材料信息，也就是不像力—距離曲線 (force-distance curves)⁽⁶⁾，可以經由計算來獲得樣品的材料特性。

相較於接觸掃描模式，輕敲式掃描由於力量控制本質上為一振盪系統，回饋系統本質上是處於非靜止狀態下來做回饋操作，複雜性與困難度因此增加。雖然過去曾嘗試在輕敲式掃描下自動調整成像參數，其複雜的懸臂動力學與樣品特性息息相關⁽⁷⁾，鎖相放大器所測得之探針振幅與遠程吸引力有關聯，並非單純的短程排斥力響應，使得自動化調整回饋參數之輕敲式掃描成效不彰。即便如此，輕敲式掃描因為提供低側向力的形貌量測，此一優勢也使得它在眾多 AFM 成像模式中，成為主流的 AFM 形貌量測模式。

四、恆定力輕敲式掃描模式

若要實現如接觸式掃描之即時力量控制做為回饋訊號來源，又要擁有如輕敲式掃描般的低側向力，我們必須要將兩模式整合，也就是說回饋訊號須為非經由頻率調制的偏折量，同時又要驅動探針快速地上下移動來減輕掃描時所造成的側向力，而這整個概念的實踐過程，猶如在平面上逐點執行快速的力—距離曲線量測，此一新掃描成像技術稱為恆定力輕敲式掃描模式。

圖 2 所示為驅動探針與樣品交互作用的恆定力輕敲式週期過程。當探針離樣品很遠 (A 點)，針尖幾乎沒有作用力，而當探針逐漸靠近樣品表面，探針被吸引力 (通常是凡得瓦力、靜電力或毛細力) 拉向樣品表面，可以視為負向的作用力 (低於作用力水平線)，在 B 點探針就被吸引力拉到樣品表面。接著針尖的作用力隨著 Z 軸到達底部最接近

樣品的位置 (C 點)，而到達最大斥力位置，亦即所謂的最大作用力 (peak force)，而系統就是用 C 點的最大作用力來作回饋控制。接著探針開始離開樣品表面，而作用力也持續下降到最低點 (D 點)，也就是最大黏滯力發生的位置。最後探針脫離最大黏滯力的束縛，離開樣品表面，作用力回歸最低數值。一般而言，探針離開表面後，只有長程作用力會影響探針，所以作用力趨近於零 (E 點)。

恆定力輕敲式掃描與輕敲式掃描兩者相比較，其探針運動過程十分類似，都是以一固定的頻率於樣品表面作周期性的輕敲過程，然而其運作方式是

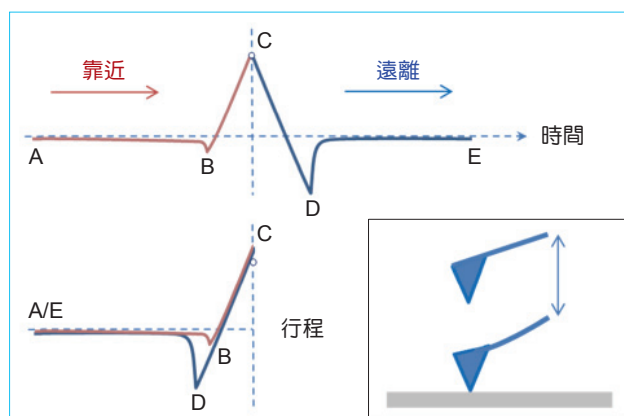


圖 2. 探針以一固定速率作垂直靠近以及垂直遠離樣品之力—時間與力—距離曲線示意圖。當探針離樣品很遠 (A 點)，針尖幾乎沒有作用力，而當探針逐漸靠近樣品表面，探針被吸引力拉向樣品表面，可以視為負向的作用力 (低於作用力水平線)，在 B 點處懸臂因吸引力而彎曲，使得探針碰觸到樣品表面。接著針尖的作用力隨著 z 軸到達底部最接近樣品的位置 (C 點) 而到達最大斥力，而系統就是以 C 點的最大斥力來作回饋控制。接著探針開始離開樣品表面，而作用力也持續下降到 D 點，也就是最大黏滯力發生的位置，最後探針脫離最大黏滯力的束縛，離開樣品表面，作用力趨近於零 (E 點)。因為探針速率為定值，將力—時間圖於 C 點對摺，即是一般常見之力—距離曲線 (force-distance curve)。

有所區別的。輕敲式掃描是將探針運作於共振頻率附近作上下輕敲震盪，而恆定力輕敲式掃描則是以遠低於探針共振之頻率作上下輕敲震盪，也就是工作於非共振模式下，所以其動力學本質上是非常不同的。也由於非共振模式下之固定頻率操作，使得恆定力輕敲式掃描簡化了液相 AFM 操作的難度，不須受流體所造成的共振頻率偏移現象所困擾，因此大大降低了液相 AFM 操作時選擇共振頻率的不確定性。從時間軸上看此兩種運動模式其探針 Z 軸向的驅動位置變化，輕敲式掃描呈現一個非線性之正弦波形式；而恆定力輕敲式掃描則是呈現兩線性斜率的三角波形，從而避免不必要的共振調制。如圖 3 所示，力量與距離之關係呈現線性，因此容易實現回饋控制自動化。輕敲式掃描的回饋訊號為懸臂振幅，其為長程作用力 (如黏滯力、毛細力或靜電力等) 和短程作用力交互影響而得，因此輕敲式掃描之回饋訊號容易受到材質特性 (如黏性) 而影響，相同的振幅控制作用於不同的樣品上，所施加於樣品上的作用力是不同的。此外輕敲式掃描由於振幅一般約為數十奈米，若樣品黏性很強或是很軟，會導致探針無法擺脫表面束縛，振幅回饋控制發生異常，因此輕敲式掃描對於軟性或是黏性樣品不易獲得清晰的影像。恆定力輕敲式掃描的回饋訊號只與短程作用力響應有關，長程作用力並不影響最大作用力，而短程作用力是高解析成像的關鍵，透過不斷監控短程作用力的最大作用力，可確保高度影像僅來自探針尖端與樣品表面的短程交互作用，因此有較佳的圖像解析力，同時對於軟而黏的樣品，恆定力輕敲式掃描更可以穩定地取得正確的表面影像。如圖 4 所示為非常窄的奈米溝槽結構或是黏性樣品，恆定力輕敲式掃描可以輕易地掃出真實而細微的結構，而不被長程作用力如黏滯力、毛細力等阻尼干擾。

若比較恆定力輕敲式掃描與力—距離曲線量測過程，兩者都是以一固定的行程線性地上下調變探針與樣品間之位置，並作即時力量監測，控制針尖的最大作用力恆定，而兩者最大不同點在於量測頻率。一般力—距離曲線量測頻率約為每秒數個量測；而恆定力輕敲式掃描，則是以每秒 2000 次高

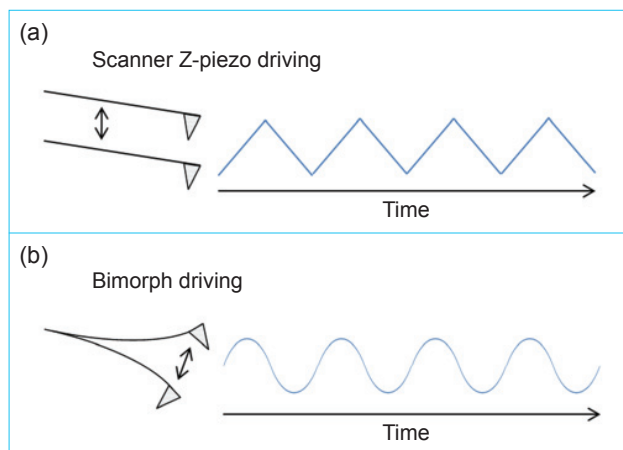


圖 3. (a) 恆定力輕敲式掃描中，探針驅動行程對時間之變化圖，Z-piezo 以三角波式電壓等速驅動探針作垂直上下的移動。(b) 輕敲式掃描中，探針驅動行程對時間之變化圖，bimorph (tapping-piezo) 以弦波式電壓驅動探針作垂直上下的共振行為。

速運作，透過獨特之演算法來作即時力量監測，控制針尖最大作用力恆定，也就是說整個輕敲的過程歷時 0.5 毫秒，此意味著探針實際與樣品接觸時間十分短暫 (一般而言 $< 25 \mu\text{s}$)，此一特點對於極端軟性或剛性樣品尤其重要。因為接觸過程中，橫向掃描會造成側向力的產生，對於軟性樣品容易造成損傷，而剛性樣品則容易造成探針受損，因此恆定力輕敲式掃描藉由縮短探針與樣品接觸時間，大幅減低了橫向掃描過程中所產生的側向力，進而保護針尖不受樣品的沾黏或損傷，同時也不容易造成樣品損傷。如圖 5 示為曲率半徑相近的兩探針，分別使用恆定力輕敲式掃描與輕敲式掃描，於 TipCheck 樣品 (多晶鈦薄膜) 上連續量測多張影像，並經由反捲積 (deconvolution) 演算出探針的曲率半徑變化圖。相較於輕敲式掃描，可以明顯發現恆定力輕敲式掃描擁有極佳的探針磨耗表現。

恆定力輕敲式掃描藉由改變探針與樣品的輕敲行為，既可以保有輕敲式低側向力的優勢，又可以實現如接觸式般直接以即時力量作為線性回饋控制，因此成為近年來新發展的 AFM 量測核心技術，而恆定力輕敲式掃描有機會成為繼輕敲式掃描後之 AFM 重大技術演進。

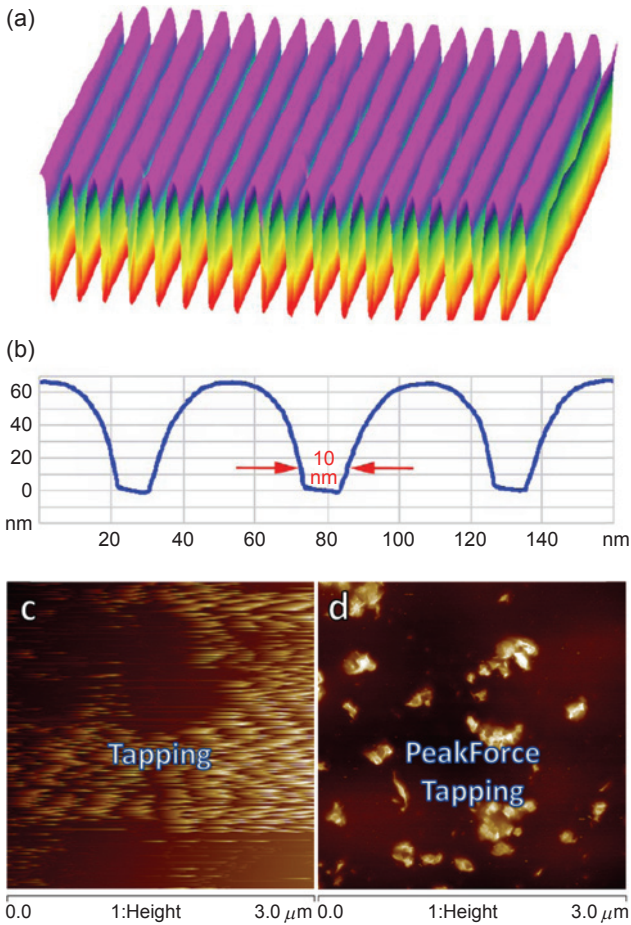


圖 4. (a) 與 (b) 深 65 nm，底寬 10 nm 的奈米溝渠結構，輕敲式掃描因為阻尼增加，探針無法觸及底部，無法量測溝渠形貌。若是以恆定力輕敲式掃描作為量測模式，則可以輕易地探觸溝渠底部並量測得正確的溝渠深度 (scan size: 1 μm)。 (c) 輕敲式掃描量測黏性之膠帶樣品，探針因沾黏使振幅縮小，導致回饋系統急速將探針遠離表面，形成異常之表面形貌。 (d) 恆定力輕敲式掃描可不受黏性而影響回饋系統，正確地量測出膠帶樣品的表面形貌。

五、恆定力輕敲式掃描衍生之模式—ScanAsyst

ScanAsyst 使用前面描述的恆定力輕敲式掃描機制，加入了自動調整回饋參數的功能，所有關鍵的掃描成像參數皆可以自動優化。因為恆定力輕敲

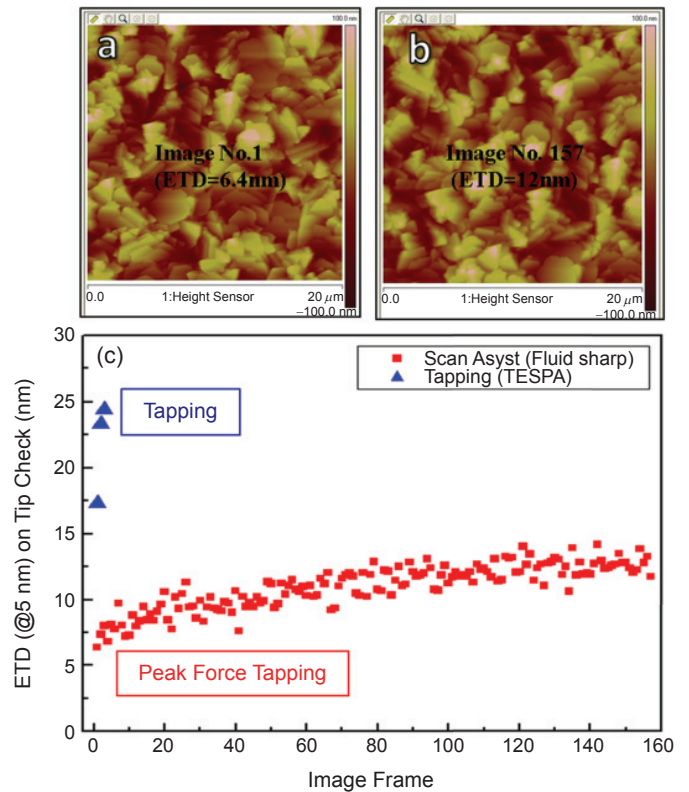


圖 5. 利用恆定力輕敲式掃描連續量測「TipCheck」樣品 (多晶鈦薄膜) 157 張影像。(a)、(b) 分別為第 1 張與第 157 張影像，可以看出影像品質仍十分銳利且相似，代表探針沒有發生明顯鈍化之情形，經反捲積計算而得知探針尖端直徑分別為 6.4 nm 與 12 nm (ETD @ 5 nm 高度)。(c) 相較於輕敲式掃描，探針於前三張影像已鈍化至 25 nm；反觀恆定力輕敲式掃描，經由反捲積演算出探針的曲率半徑變化圖，可以明顯發現恆定力輕敲式掃描擁有極佳的探針磨耗表現。

式掃描是以即時的短程作用力作為回饋訊號來源，因此樣品材質對於恆定力輕敲式掃描並沒有什麼區別，距離對作用力仍舊呈現線性行為，此一特性使得自動化回饋參數得以實現。同時採用專利的演算法，根據一個給定的雜訊水平，在幾毫秒內檢測和消除背景振盪，系統不斷地監測作用力響應和即時調整增益，以保持一定的數據品質。ScanAsyst 的演算法也會根據不同位置的樣本條件，動態最佳化跟蹤樣品表面所需最低限度的最大作用力與控制

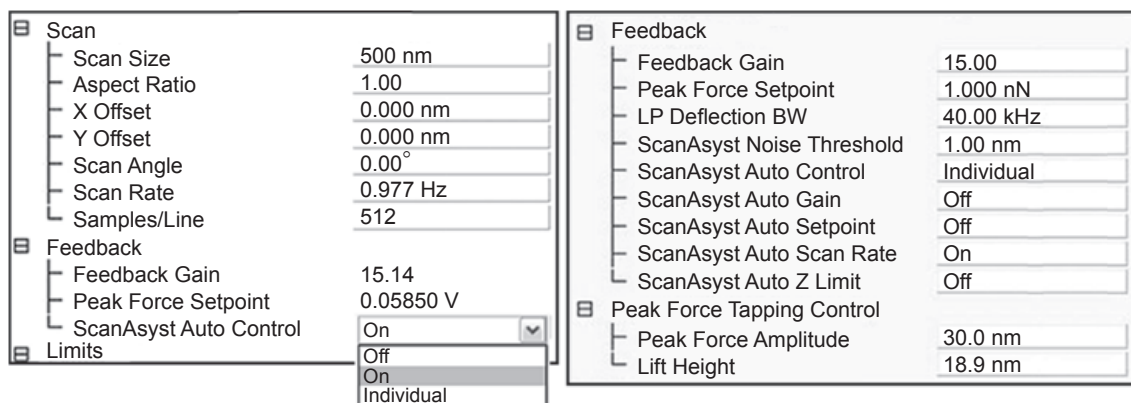


圖 6. ScanAsyst 操作介面圖。使用者可選擇個別的成像參數，切換於全自動或是手動模式。當選擇於全自動模式，使用者僅需決定掃描範圍與取樣點數，即可取得一專業品質的影像。

掃描速度，並於必要時能自動降低 Z 軸最大範圍來提高 Z 軸解析度。此一動態自動化調整過程大幅改變了傳統 AFM 操作模式，如圖 6 所示，使用者不需再被眾多的回饋參數所困擾，大大降低了 AFM 操作門檻，影像品質不再與使用者經驗與技術呈重度相關，初階使用者也可以輕易得到如同專業使用者般的影像品質。

圖 7 所示為利用 ScanAsyst 自動回饋控制，可以獲得優異的 $C_{18}H_{38}$ 與 Epi-GaN image 影像。同時，相較於一般手動回饋參數控制，ScanAsyst 採用了更積極的回饋控制成像—即時動態自動回饋控制。快速地調整眾多回饋參數來適應掃描範圍內的各個量測點，而不再是如以往以單一組回饋參數來獲取影像，此一特點特別是對於形貌差異極大的樣品尤為關鍵，因此得到的整個影像能更貼近真實形貌。同時樣品間的數據比較，透過一固定水平的自

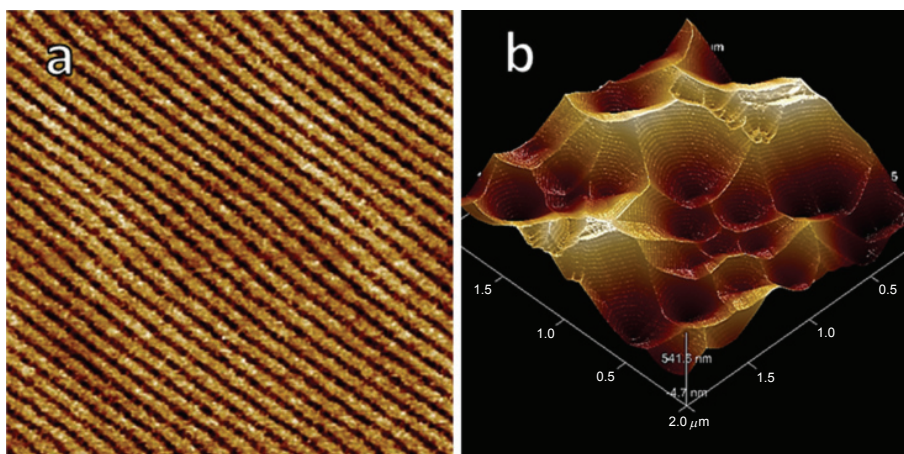
動最佳化過程，將使得數據變得更可靠，不會受到人為因素的干擾。如果實驗需要的話，ScanAsyst 仍然保有回饋控制的靈活性，操作人員可於影像擷取過程中，即時地切換回饋參數於完全自動、部分自動或是完全手動操作的狀態。

六、恆定力輕敲式掃描衍生之模式—PeakForce-QNM

PeakForce-QNM 材料性質成像的基本原理，是基於系統能在成像過程中，以恆定力輕敲式掃描作為基礎，得到表面影像的同時，也可以取得每次輕敲過程的力—距離曲線，而這個力—距離曲線能直接套用在數十年來廣泛使用的定點力—距離曲線分析上，也就是一般研究者會用 SPM 來定量奈米材料之機械性質的應用。只要針對每一次輕敲過程

圖 7.

利用 ScanAsyst 全自動調整回饋參數而得之 (a) $C_{18}H_{38}$ 長鏈烷類於 HOPG 上自組裝形成的一維週期結構 (scan size 80 nm^2)，其週期為 2 nm 。(b) Epi-GaN 三維影像，可以清晰看見原子級層狀結構。



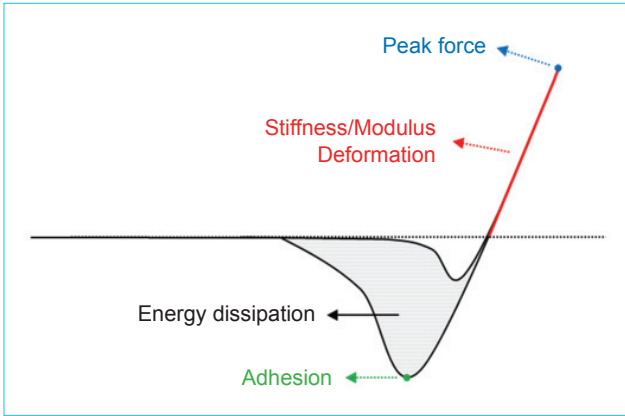


圖 8. PeakForce-QNM 工作原理，基於力—距離曲線，藉由分析此曲線之最大吸力、斥力斜率以及來回過程的曲線積分面積差，並套用 DMT 模型來作數值擬合分析，可以獲得定量的機械性質。透過選用適當力常數之懸臂樑，能定量分析多數材料的彈性模數、探針樣品間的黏滯力、能量損失與最大應變等機械性質。

的力—距離曲線作分析來擷取對應量測點的機械性質。圖 8 就是得到的力—距離曲線，藉由分析此曲線之最大吸力、斥力斜率以及來回過程的曲線積分面積差，並套用 DMT 模型⁽⁸⁾ 來作數值擬合分析，可以獲得定量的機械性質，如彈性模數、探針樣品間的黏性、能量損失與最大應變。

相較於傳統力—距離曲線量測，速度快了好幾個數量級。這使得以往得耗費數小時方可取得力—距離曲線分布影像 (force volume)，若應用 PeakForce-QNM 技術，機械性質影像與表面影像同時取得，只需花費數分鐘即可完成，也因為優異的量測速度，使得高解析度的機械性質影像得以實現。同時力曲線數據的擬合分析不再是取得整體數據後才進行分析，透過 PeakForce-QNM 作即時機械性質分析，表面形貌資訊與機械性質資訊同步即時顯示，不再需要花費額外的時間與人力來處理大量數據。如圖 9 為 PeakForce-QNM 量測自組裝於雲母基板上之 poly (butyl acrylate) 高分

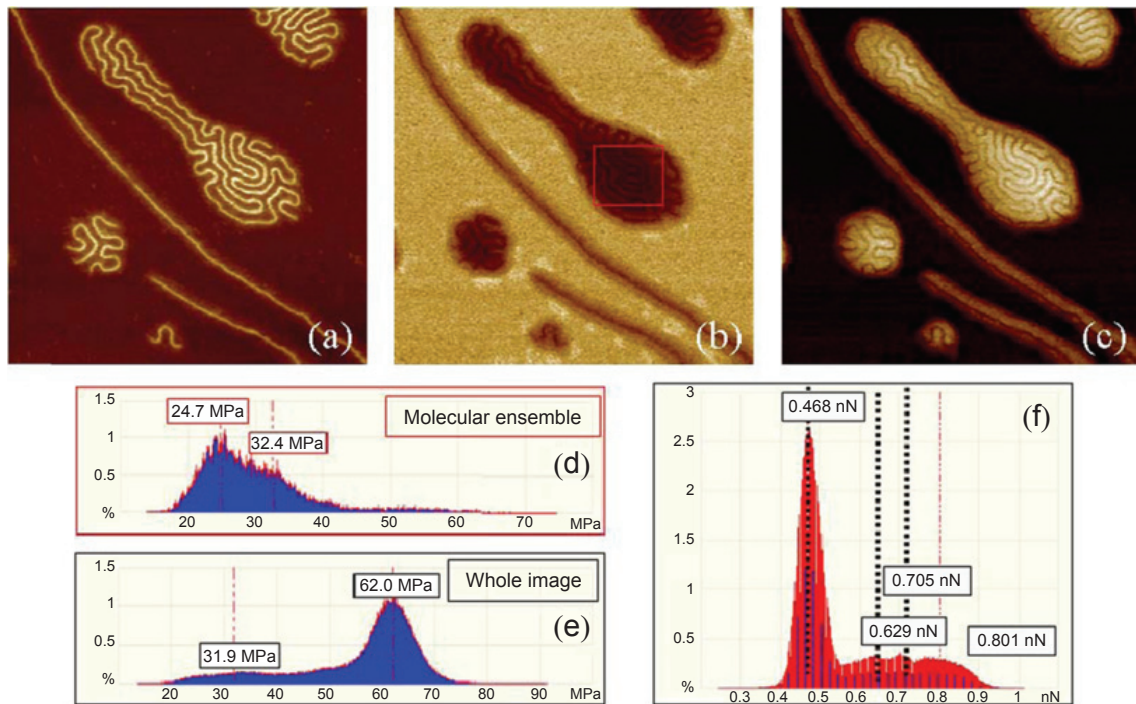
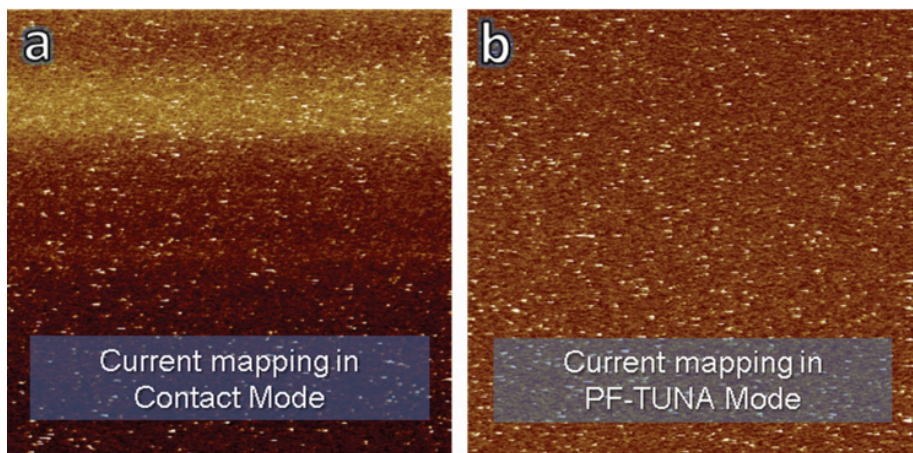


圖 9. PeakForce-QNM 量測自組裝於雲母基板上之 poly (butyl acrylate) 高分子 (a) 高度圖，(b) 彈性模數圖，(c) 黏滯力圖，(d) 彈性模數統計直方圖，(e) 矩形區域之彈性模數統計直方圖，(f) 黏滯力統計直方圖 (scan size 500 nm)。(sample courtesy of Sergei Sheiko, University of North Carolina, Chapel Hill)

圖 10.

HfO₂ 之漏電流分布圖。(a) 傳統 C-AFM (TUNA) 掃描過程中，背景偏折量飄移作用力非恆定，導致接觸點界面電性不穩定，造成電流量測值不穩定之現象。(b) PeakForce-TUNA 則可以有效改善此現象，使得掃描過程更趨近完美的等力掃描，因此可以取得較佳之電流影像品質與穩定的電流數值。



子機械性質的實例，透過選用適當力常數之懸臂樑，PeakForce-QNM 能定量測量廣泛材料的彈性模數、黏滯力與應變等機械性質。

七、恆定力輕敲式掃描衍生之模式－PeakForce-TUNA

以恆定力輕敲式掃描作為基礎，可將傳統接觸式衍生模式與恆定力輕敲式掃描結合，並保有恆定力輕敲式掃描所帶來的優勢－去除背景偏折量飄移與低成像作用力。傳統接觸式掃描以一固定偏折量作為回饋控制設定點，量測時之作用力正比於偏折量起始點與設定點之間的差異。然而量測過程中系統飄移將會導致偏折量起始點發生變動，因此量測過程中作用力會有不穩定現象，造成等力掃描有動態誤差產生。此作用力誤差對於電性量測技術影響尤其重要，因為這將導致探針接觸樣品時之界面電性發生不可控制的波動，進而影響量測數據之準確性。反觀恆定力輕敲式掃描，系統會自動將每一次輕敲循環中力－距離曲線之背景值歸零後，再施加作用力至設定之最大作用力，因此可以有效抑制背景偏折量飄移所造成的成像作用力不穩定的問題，並於到達最大作用力瞬間擷取電性訊號。我們將此特性應用於電性量測上，可以有效改善作用力不穩定導致接觸點界面電性不穩定的現象，進而增進電性量測之穩定度。

圖 10 為一實例，我們將恆定力輕敲式掃描與

電流量測模組整合而成 PeakForce-TUNA，由圖可以看出傳統 C-AFM (TUNA) 電流訊號隨著掃描過程中背景偏折量飄移，造成電流量測值不穩定之現象；而 PeakForce-TUNA 則可以有效抑制此一現象，取得較佳之電流影像品質與數值。

此外，恆定力輕敲式掃描因其優異的力量控制，可將最大作用力控制於 pico-Newton (pN) 等級，並且抑制側向力的產生，因此 PeakForce-TUNA 能廣泛地應用在各種材料上，特別是針對奈米材料、質地堅硬之陶瓷材料，以及軟性有機材料等物質之掃描電流顯微成像。傳統接觸式 C-AFM 量測過程，因為伴隨側向力形成，因此掃描軟性物質容易造成樣品刮動，抑或是掃描堅硬物質容易造成探針導電鍍膜剝離，因此無法穩定獲取電性量測數據。反觀 PeakForce-TUNA 能有效改善傳統接觸式 C-AFM 量測的缺點，同時因為週期輕敲方式取代接觸掃描方式，使得探針與樣品接觸時間變短，減少因電流流動導致的探針尖端氧化效應或是熱效應，增加探針使用壽命。圖 11 為一利用 PeakForce-TUNA 量測附著於奈米碳管的網狀導電高分子之電流分布的實例，圖中可以看出電流分布與導電高分子表面形貌十分一致，這對於傳統 C-AFM 而言是相當有挑戰性的樣品。相較於傳統接觸式 C-AFM，PeakForce-TUNA 可以成功獲取穩定的電流影像。同時 PeakForce-TUNA 也具備 PeakForce-QNM 的功能，因此可以同一時間測量表面形貌、電流分布與機械性質的分布情形。

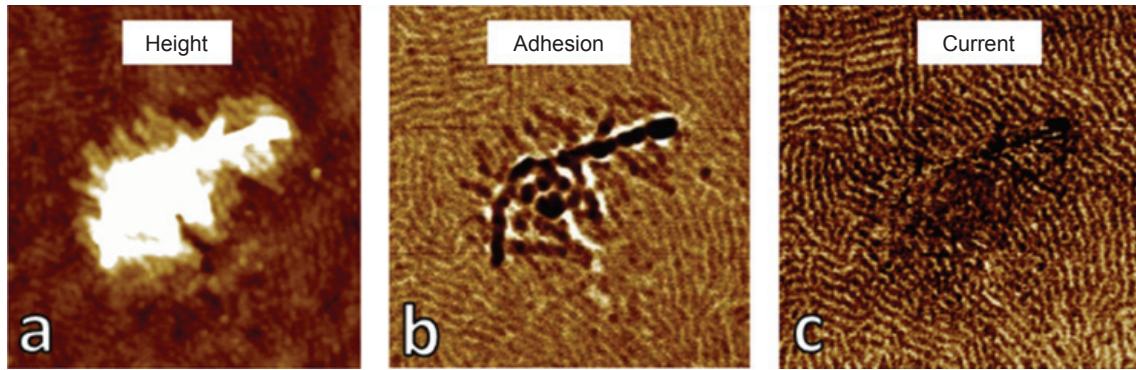


圖 11. 圍繞奈米碳管之導電高分子，利用 PeakForce-TUNA 可同步取得其 (a) 表面形貌、(b) 電流分布與 (c) 黏滯力等機械性質分布圖。傳統接觸式電性量測無法量測的軟性物質，如今可藉由此新技術克服而測得電流等相關電特性。相對於傳統接觸式電性量測，新技術因作用力更小，使得空間解析度大幅提升，同時電流訊號更穩定，具有絕佳的再現性，也大大減少探針的損耗 (scan size: 700 nm²)。

八、輕敲式衍生模式與恆定力輕敲式結合—PeakForce-KPFM

以恆定力輕敲式掃描作為基礎，我們可將傳統 KPFM 與恆定力輕敲式掃描結合，使得傳統 lift mode 得以在恆定力輕敲式掃描上運作，此即為 Bruker 發展出的 PeakForce-KPFM。此模式結合了 PeakForce-QNM，使得機械性質與 KPFM 電位可以同時量測，也因為不再以輕敲模式運作，因此可以調校探針幾何參數來實現最佳化 KPFM 量測。

就理論而言，KPFM 靈敏度與 quality factor 以及懸臂力常數的關係如下⁽⁹⁾：

$$\text{KPFM sensitivity} \propto \frac{Q}{k}$$

要使 KPFM 有最佳靈敏度， k 必須變小，使探針對力量有較大的響應，而 Q 必須增加以放大此響應，然而事實上，對於傳統 KPFM 並不容易實現。這是因為傳統 KPFM 是以輕敲式為量測基礎，為了避免輕敲過程探針因表面吸附力或是水膜而將探針「黏」住探針，需要一足夠剛性之懸臂， k 無法降低太多；而為了有足夠的頻寬， Q 不可過高。因此以輕敲模式為根基之 KPFM，侷限了調變探針幾何與機械性質的空間，最佳化 KPFM 靈敏度變得十分有限。再者，傳統 KPFM 會受探針與樣品作用而發生共振偏移現象，間接影響了 lift mode 電位量測，此種與機械性質的 cross-talk 也

導致了傳統 KPFM 的再現性不佳的問題。若是改以恆定力輕敲式掃描為基礎搭配 lift mode 來實現 PeakForce-KPFM， Q 與 k 不再受到侷限，透過探針材料與幾何重新設計，KPFM 靈敏度得以大幅提升，同時也抑制了機械性質 cross-talk 的問題，間接地改善了電位量測的穩定度與再現性。

圖 12 為 9 支 ScanAsyst-Air-HR 探針量測 Au-Al 之電位差的再現性數據，其標準差約為 10 mV，其中可以看出電位量測之優異的穩定性與再現性，有效抑制傳統 KPFM 量測中常見的電位飄移問題。圖 13 則是 PeakForce-KPFM 結合 PeakForce-QNM 的實例，同時取得電性與機械性質分布圖，利用 PeakForce-KPFM 量測 Sn₆₀-Pb₄₀ 合金，可以得到不同的相分布所對應的功函數分布圖，以及其對應的清晰黏性分布等機械性質。

此外，傳統振幅調制的 KPFM，其電位量測來自探針錐體與懸臂量的電容共振響應，因而無法達到高空間解析度的量測。PeakForce-KPFM 藉由頻率調致的過程，使探針尖端主導了整個電容共振響應，因此大大增進了電位量測的空間解析力。圖 14 為高解析 PeakForce-KPFM 影像的實例，可以看出單根奈米碳管的電位分布圖。相較於傳統 KPFM，PeakForce-KPFM 擁有更高的空間與電位解析度，同時也擁有更精準的電位表現，改善了傳統 KPFM 所為人詬病的再現性問題，並且實現了同時取得機械性質與電位勢分布圖。

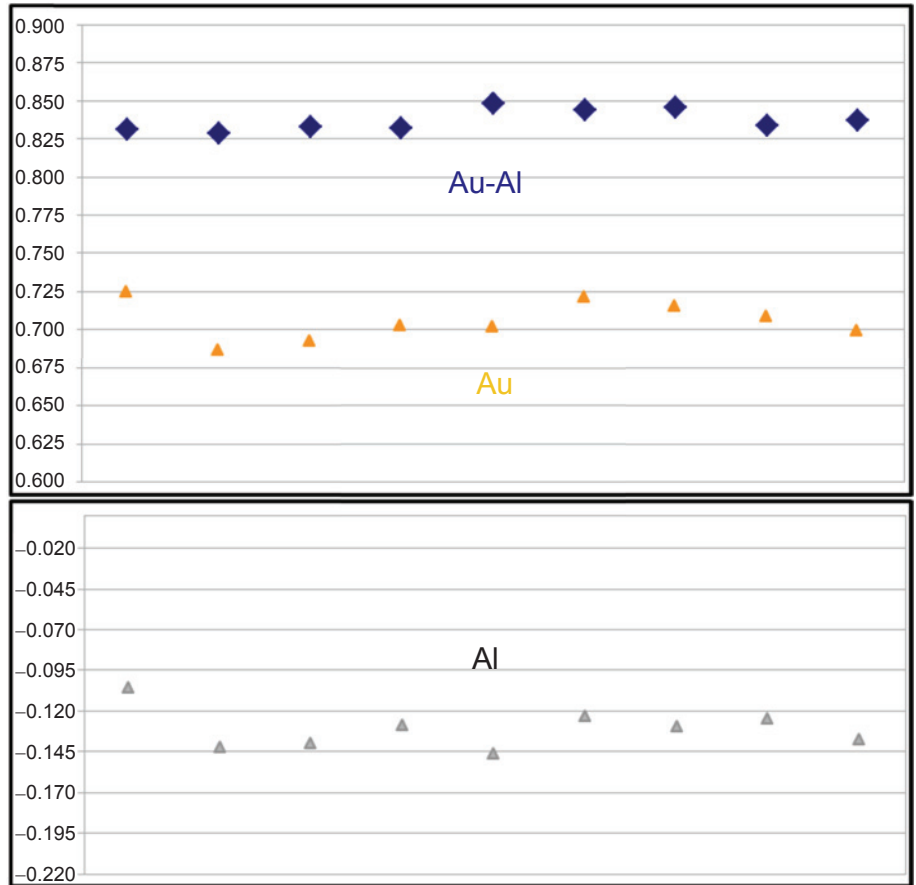


圖 12.

利用 9 支 ScanAsyst-Air-HR 探針所量測之 PeakForce-KPFM 統計圖，樣品為 Au-Al 界面。電位標準差分別為：Au 13 mV、Al 12 mV、Au-Al 7 mV。

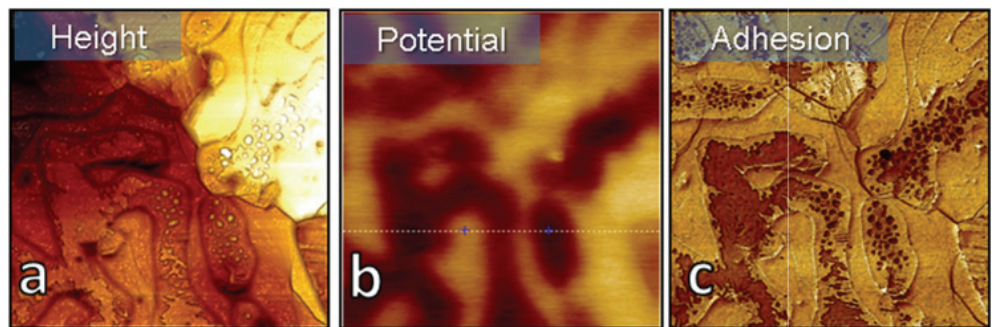
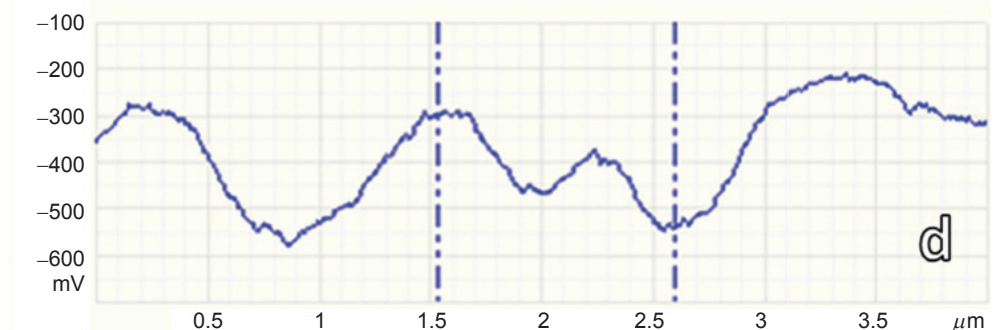


圖 13.

利用 PeakForce-KPFM 量測 $\text{Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$ 合金的電位分布與黏滯力分布圖。兩金相之電位差約為 240 mV，其電位分佈與黏滯力分布一致。Work functions: Sn (4.42 eV)、Pb (4.25 eV)。



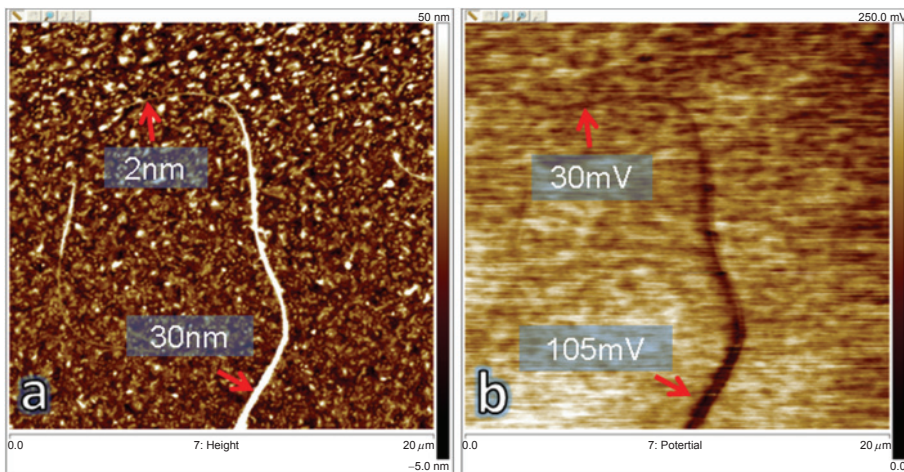


圖 14.

PeakForce-KPFM 可解析單股奈米碳管 (CNT bundles) 之電位分布圖，隨著奈米碳管變細，所量測到之電位從 105 mV 下降至 30 mV。相較於傳統 KPFM，PeakForce-KPFM 擁有更高的空間與電位解析度。

九、總結

恆定力輕敲式掃描透過探針量測行為的改變，改善了傳統 AFM 量測模式的不足，既可以保有輕敲式低側向力的優勢，又可以實現如接觸式般直接以即時力量作為線性回饋控制，為 AFM 帶來了許多的優勢與契機。如實現了 PeakForce-QNM 快速地高解析機械性質分量測，以及 ScanAsyst 自動回饋優化之 AFM 量測。此種新的基本 AFM 模式演進，可相容於傳統量測模式，不僅將傳統既有的衍生模式 C-AFM 電流量測與 KPFM 電位量測融合其中，更將恆定力輕敲式掃描優勢導入，使得高品質之形貌、電性與機械性質得以同一時間取得，開創了新的奈米科研與應用領域，因此成為近年來新發展的 AFM 量測核心技術，而恆定力輕敲式掃描有機會成為繼輕敲式掃描後之 AFM 重大技術演進。

參考文獻

1. F. J. Giessibl, *Reviews of Modern Physics*, **75**, 949 (2003).
2. Q. Zhong, D. Inniss, K. Kjoller, and V. B. Elings, *Surf. Sci.*, **290**, 688 (1993).
3. Zhang, L.; T. Sakai, N. Sakuma, T. Ono, and K. Nakayama, *Applied Physics Letters*, **75**, 3527 (1999).
4. C. C. Williams, *Annual Review of Materials Research*, **29**, 471 (1999).
5. O. Kolosov, A. Gruverman, J. Hatano, K. Takahashi, and H. Tokumoto, *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 4309 (1995).
6. B. Cappella and G. Dietler, *Force-Distance Curves by Atomic Force Microscopy* (1999).
7. R. Garcia and A. San Paulo, *Phys. Rev.*, **60**, 4961 (1999).

8. B. V. Derjaguin, V. M. Muller, and Yu. P. Toropov, *J. Colloid. Interface Sci.*, **53**, 314 (1975).
9. W. Melitz, J. Shen, A. C. Kummel, and S. Lee, *Surface Science Reports*, **66**, 1 (2011).
10. R. Garía and R. Pérez, *Surface Science Reports*, **47**, 179 (2002).



林宏旻先生為國立台灣師範大學化學碩士，現任台灣布魯克生命科學股份有限公司 BNS 應用專員。

Hung Min Lin received his M.S. in chemistry from Nation Taiwan Normal University. He is currently an application specialist of BNS at Bruker Taiwan.



陳彥甫先生為國立台灣大學機械工程碩士，現任台灣布魯克生命科學股份有限公司 BNS 銷售專員。

Yen Fu Chen received his M.S. in mechanical engineering from Nation Taiwan University. He is currently a sales specialist of BNS at Bruker Taiwan.



張家榮先生為國立台灣大學材料科學與工程碩士，現任台灣布魯克生命科學股份有限公司 BNS 業務經理。

Mark Chang received his M.S. in material science and engineering from Nation Taiwan University. He is currently an operational manager of BNS at Bruker Taiwan.