

掃描探針顯微鏡之影像處理與分析

Image Process and Analysis of Scanning Capacitance Microscopy

陳志遠、張茂男

Chih Yuan Chen, Mao-Nan Chang

隨著奈米世代的來臨，奈米區域的表面分析日益重要，掃描探針顯微鏡是奈米檢測的重要工具之一，可提供材料表面奈米層級的物理資訊，對於獲取真實且正確的影像數據而言，掃描探針顯微鏡的探針具有十分關鍵的影響。本文敘述探針對掃描影像的影響，並針對掃描探針影像處理的方法，如傅立葉分析以及探針模擬等特殊功能加以介紹。

With the coming of nano-generation, surface analysis for a nanometric area is more and more important. Scanning probe microscopy (SPM) is one of the important tools for nanocharacterization, providing physical information with nanometric resolution on sample surface. SPM tip is a key influencing the acquirement of real and accurate SPM images. In this article, we described the influence of SPM tip on SPM images. Moreover, we also introduced the special functions of scanning probe image processor, including Fourier analysis and tip characterization.

一、前言

隨著科技進入奈米時代，奈米層級的研究與日俱增，對檢測分析而言，極其敏銳的量測工具是絕對必要的，掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy, SPM) 為奈米檢測的主流技術之一，可提供高解析度的試片表面訊號，對奈米科技的發展有直接的助益。自 1982 年 Gerd Binnig 和 Heini Rohrer 發明掃描穿隧顯微鏡 (scanning tunneling microscope, STM) 觀測矽 (111) 面的表面形貌影像以來⁽¹⁾，短短二十二年之間，掃描探針顯微術已被發展並運用於量測分析電、光、力、磁等方面的微觀物性⁽²⁾，其中以表面形貌分析的原子力顯微鏡

(atomic force microscope, AFM) 最為人所熟知。原子力顯微鏡具有原子級的解像能力，可應用於多種材料表面檢測，並能在真空、大氣或液體環境中操作。目前全國各大專院校及業界所擁有的原子力顯微鏡機台有數百部之多，由此可見其在表面分析上受倚重的程度，至今，原子力顯微鏡已儼然成為掃描探針顯微鏡的入門技術。然而，在進行表面形貌掃描時，掃描影像常受到探針本身的狀況所影響，探針尖端的曲率半徑決定了影像解析度的好壞，探針不規則的尖端形貌更是導致掃描影像嚴重失真的主要原因。

原子力顯微鏡的成像原理乃是經由回饋電路控制掃描器 Z 軸移動，以達到探針及試片間的作用

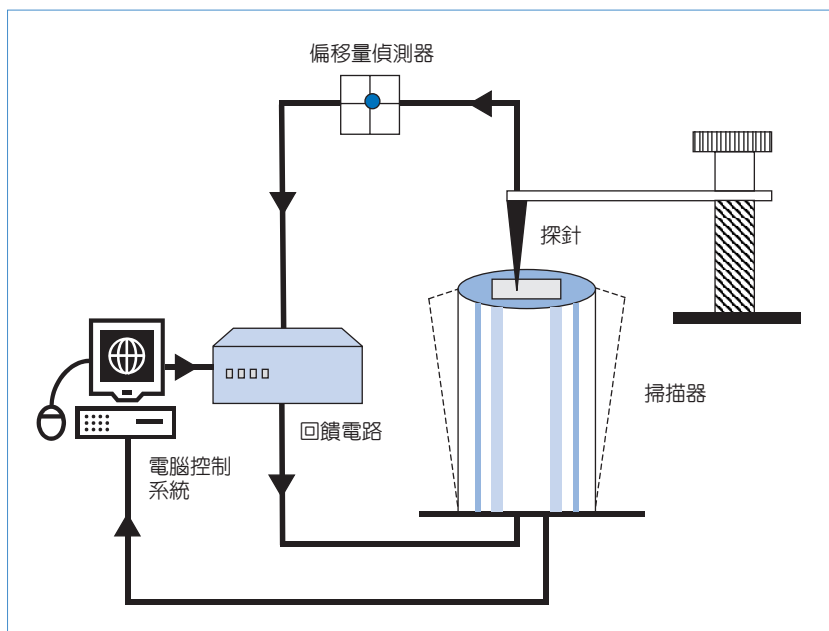


圖 1. 掃描探針顯微鏡主要構造示意圖。

力固定，並紀錄 X 、 Y 、 Z 三軸的壓電元件電壓值，而得到試片的表面三維影像圖；然而由於壓電陶瓷的電壓與形變並非成線性關係，因此原始影像需經過適當的影像處理才能顯示出試片的真實表面形貌。一般原子力顯微鏡的操作軟體皆配備基本的影像處理功能，而功能強大的影像處理工具則能提供更多元化的影像處理與先進的影像數據分析。

二、探針對掃描影像的影響

掃描探針顯微鏡 (scanning probe microscope) 主要由探針、偏移量偵測器、掃描器、回饋電路及電腦控制系統五大部分組合而成，如圖 1 所示，其中探針影響掃描影像結果至為鉅大，它也是整個掃描探針顯微鏡系統中最不穩定的因子。一般原子力顯微鏡探針的主要材質為矽，可利用現今成熟的半導體製程大量製造，同一批次生產的探針，其尖端的形貌仍可能會有些微差異，圖 2 的掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscopy, SEM) 影像來自同一批次生產的四支探針，由圖中可明顯看出探針尖端形貌與曲率半徑皆有所不同，可以想像經由這些探針所得到的量測結果，很難有一致性。此外，雖然矽是硬度不錯的材料，但在掃描過程中，不論是敲觸式 (tapping mode) 或者接觸式 (contact mode) 的

掃描，探針皆無可避免的與試片產生摩擦，這將造成探針尖端形貌的改變，探針尖端形貌的些微改變對粗糙度較大的試片而言，可能不易察覺其掃描影像的差異性，但對於極為平坦的試片，探針的微小差異卻極可能影響到掃描影像的判別。

圖 3(a) 為使用磨耗過的探針所得到的影像，圖 3(b) 則為新探針掃描相同試片所得到的影像，其差異除了影像粗大化及模糊化之外，對於粗糙度分析常用的參考數值，如平均值 (average, Ra) 及均

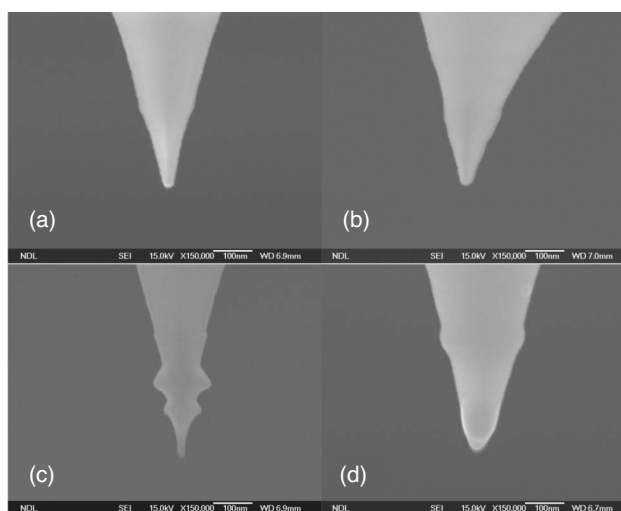


圖 2. 四支全新探針之掃描式電子顯微鏡影像。

方根值 (root mean square, RMS), 皆有將近一倍的差異, 影響掃描圖像品質甚鉅。為了增加探針的耐磨耗度, 可以在探針鍍上一層氮化矽或鑽石薄膜, 然而這又使得每支探針間的差異性更加明顯。當探針因不當操作或者過度使用導致探針受損, 則可能得到如圖 4 的掃描影像, 圖中的影像皆為大小相似、方向一致的三角形, 這是受損的探針與試片表面交互作用而成的影像。另外還可能得到如圖 5 的掃描影像, 圖形中的白色小點皆兩兩一組且方向一致, 其形成原因為探針有兩個針尖 (double peaks), 而導致掃描圖形產生雙重圖像 (double images) 的結果。以上在原子力顯微鏡影像所出現的問題, 其原因皆為探針的尖端形貌受損, 然而若沒有利用掃描式電子顯微鏡的影像加以佐證, 很難百分之百確定針尖形貌是否受損, 當然我們也可以更換一支新的探針重新掃描做確認。另一種可能是圖 4 與圖 5 的掃描影像皆為試片真實的表面形貌, 因此在操作原子力顯微鏡做表面形貌分析時, 最大的問題並不在於擷取圖像, 而在於判斷影像是否受到探針的尖端形貌影響。

三、掃描探針影像處理

原子力顯微鏡的掃描器是利用壓電陶瓷材料做成的壓電元件控制試片或者探針做 X、Y、Z 三軸的移動, 紀錄 X、Y、Z 三軸的壓電元件電壓而得到試片表面形貌。然而壓電陶瓷的電壓與形變並非成線性關係, 以致於所得到的原始影像會宛如弓形一般, 如圖 6(a) 所示。另外由於掃描區域未必在同一水平面上, 隨著 Y 軸的掃描, 會導致每一條 Y 軸的高度並不在同一個 Z 值準位, 圖 6(b) 為未經平坦化處理前 Y 軸的橫截面圖, 我們無法從圖形中得到有關表面形貌的訊號。因此在分析掃描圖像時我們必須先對原始圖像做一些影像處理, 其中最

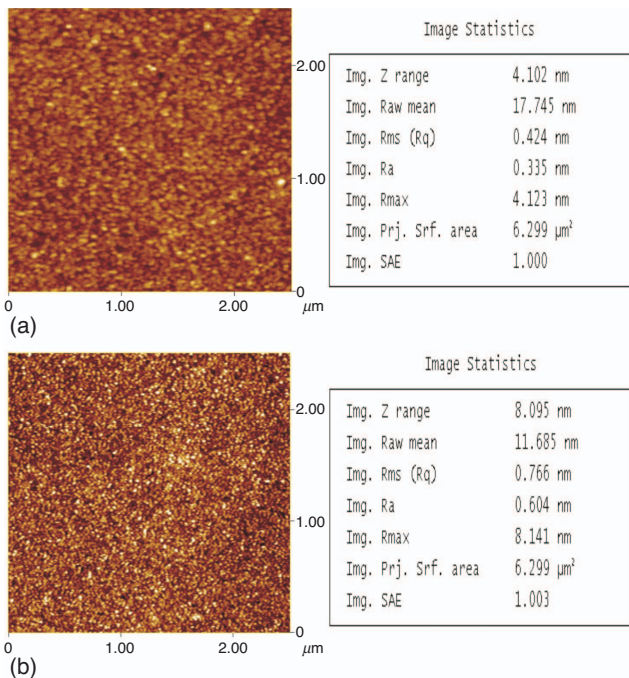


圖 3. 使用 (a) 磨耗過的探針與 (b) 新的探針所得到的掃描影像及粗糙度分析結果。

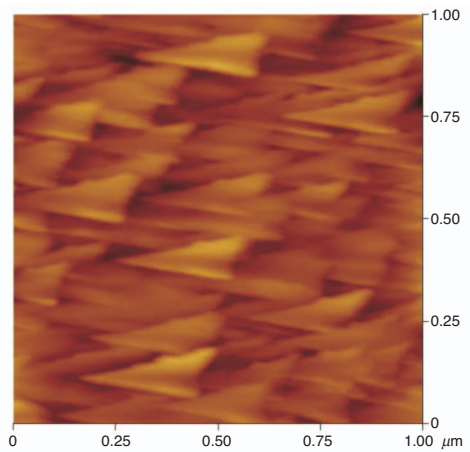


圖 4. 探針受損後, 其掃描影像已明顯失真。

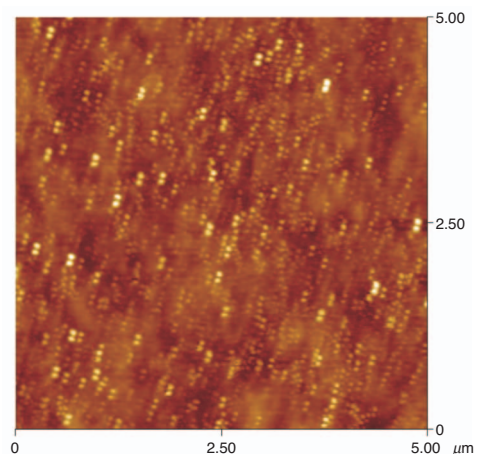


圖 5. 雙針尖的受損探針, 其掃描結果將呈現雙重影像, 圖中的白色小點皆兩兩一組且方向一致。

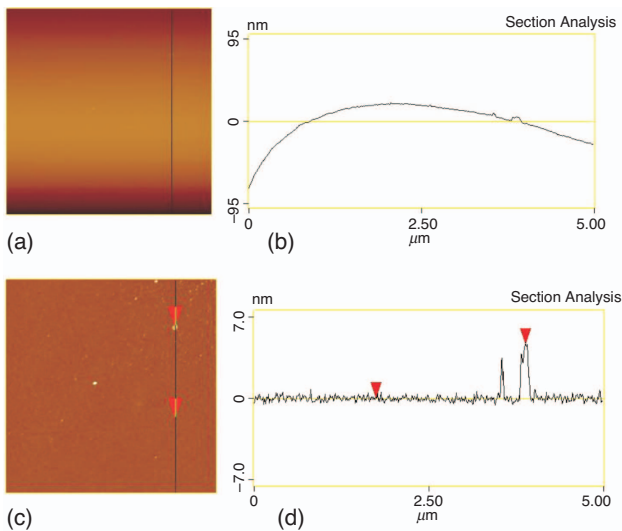


圖 6. (a) 未做影像處理前之掃描影像；(b) Y 方向的橫截面影像；(c) 平坦化處理後之影像以及 (d) 平坦化處理後的 Y 方向橫截面影像。

簡單的就是對影像做平坦化，處理結果如圖 6(c) 所示，圖 6(d) 則為經平坦化處理後之 Y 軸的橫截面圖，可以清楚的看出表面形貌的高低起伏變化。以上結果顯示掃描影像需經過適當的影像處理，才可能得到清楚且一目了然的表面形貌影像。因此在得到原子力顯微鏡的掃描圖像之後，適度的影像處理能有效的去除掃描器本身物理特性或試片傾斜放置所產生的問題，在除去這兩個問題後，才能有效分析試片的表面形貌。

除了平面校正的功能外，通常原子力顯微鏡機台的操作軟體也配備基本的影像分析功能，較常用到的為二維影像 (圖 7(a))、三維影像 (圖 7(b))、粗糙度分析 (圖 7(c)) 以及橫截面分析 (圖 7(d))，利用這些功能我們可以輕易得到試片表面的最高與最低點落差、平均高度、高度均方根值，以及任意兩點間的距離與高低落差等分析數值，對不同試片提供

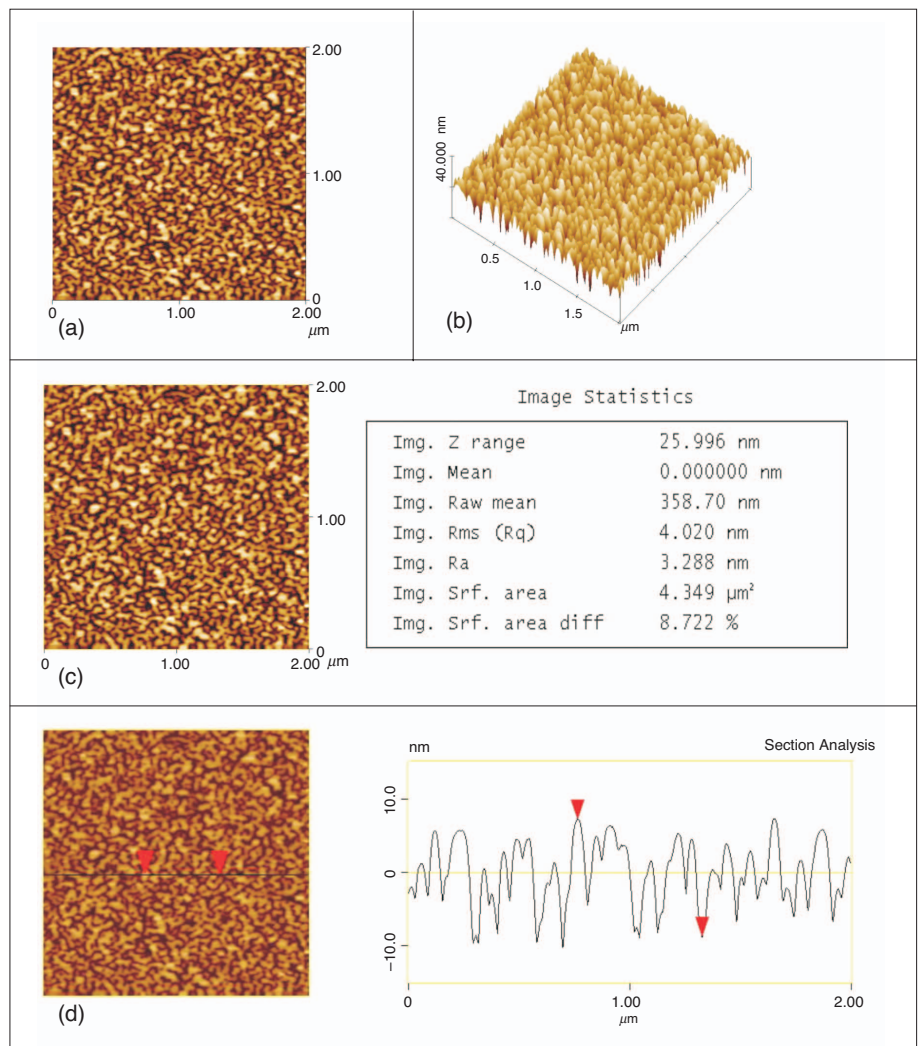


圖 7. 掃描探針影像分析的基本功能：(a) 二維影像；(b) 三維影像；(c) 粗糙度分析以及 (d) 橫截面分析。

定量比較的依據。除此之外，也可以利用影像處理軟體對掃描探針顯微鏡的掃描影像做更先進的處理分析⁽³⁾，其功能包括：(1) 傅立葉濾波器 (Fourier filter) 可以過濾非週期及週期性雜訊、分離不同週期的訊號；(2) 傅立葉量測 (Fourier measurement) 可用於分析週期性的影像，在一般的原子力顯微鏡影像中，週期性的圖像通常是試片表面的真實影像，使用傅立葉分析可以偵測及測量晶格結構；但週期性影像的來源也可能是在掃描時的震動問題或其他雜訊所引起，利用傅立葉分析可以釐清問題並定義雜訊在時間維度 (time domain) 的頻率；(3) 探針特性模擬 (tip characterization) 可以針對原子力顯微鏡掃描影像模擬出探針的可能形貌，或輸入探針形貌對掃描影像做回溯處理 (deconvolution) 而得到更正確的結果，也可以模擬不同探針形貌對試片表面形貌掃描影像的影響。

1. 傅立葉濾波器

圖 8(a) 為一原子力顯微鏡掃描影像，可明顯觀察到圖中有雜訊存在，利用掃描探針影像處理軟體的傅立葉濾波功能處理，可將雜訊從掃描影像中分離出來，其方法如下：首先將掃描影像經傅立葉轉換 (Fourier transformation) 得到傅立葉影像，如圖 8(b) 所示；選擇特定週期雜訊在傅立葉空間的傅立葉點，利用傅立葉濾波器的功能將雜訊及試片表面訊號分離，再將傅立葉影像轉換成空間影像即得到試片表面影像，如圖 8(c)，而圖 8(d) 則是雜訊之空間影像，經傅立葉量測分析雜訊，得知其在時間維度的頻率約為 60 赫茲 (Hz)，由此可知其為雜訊。利用這樣的方法，可以將週期性的雜訊自掃描影像中分離出來。

2. 傅立葉量測

傅立葉轉換除了可以除去週期性的雜訊以外，也可以分析影像晶格常數、定義週期性影像的單位晶胞 (unit cell)。週期性影像也可能來自真實的試片表面，利用掃描探針影像處理軟體可以偵測並量測影像晶格結構，另外如果已知試片的週期，則可以利用此已知常數對掃描圖形進行校正。圖 9(a) 為原子力顯微鏡掃描到的格網影像，利用傅立葉轉

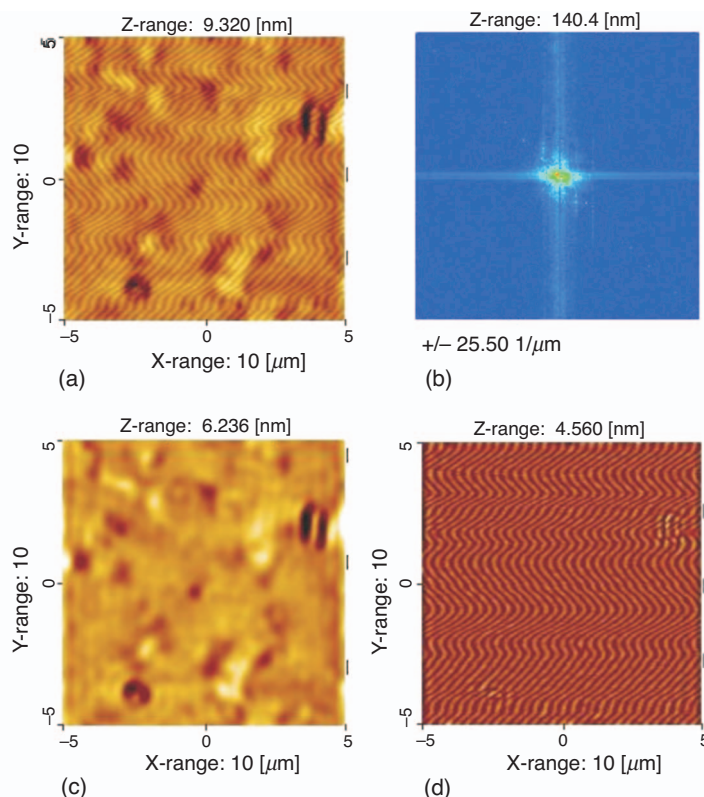
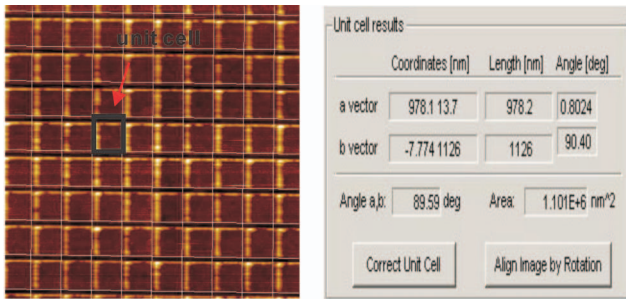
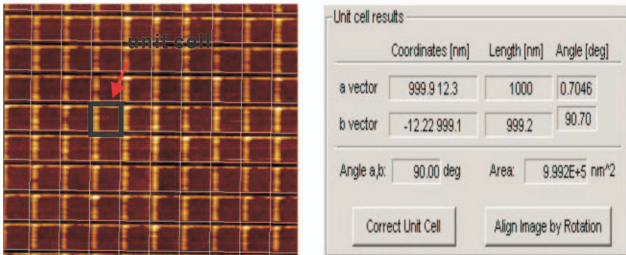


圖 8. (a) 掃描探針影像；(b) 掃描探針影像經傅立葉轉換後的傅立葉影像；使用傅立葉濾波器分離後的 (c) 試片表面空間影像及 (d) 雜訊訊號空間影像。

換及分析，可以定義其週期性的單位晶胞，圖中可明顯發現單位晶胞在 Y 軸有拉長的現象，輸入已知的影像單位晶格常數 (已知為 1 μm 之正方形格網試片)，可以得到誤差常數，並可對掃描影像做校正而得到更正確的影像，如圖 9(b) 所示。此外，也可以對未知的週期性影像做分析，如圖 10(a) 的週期性影像，可以利用自動偵測影像單位晶胞的功能而得到圖 10(b)，同時也可以得到影像的單位晶格向量及單位晶格常數，如圖 10(c)。除了自動偵測功能，也可以點選任兩個傅立葉點，如圖 11(a) 所示，它們和晶胞的倒晶胞 (reciprocal cell) 有關，我們可以利用這樣的方法定義出相對應的影像晶格及影像晶格向量，如圖 11(b) 及 (c) 所示。簡而言之，對影像作傅立葉轉換處理，不僅可以濾掉雜訊，也可以分析試片表面的週期性訊號，對於原子力顯微鏡影像而言，是一項很有用的分析功能。



(a)

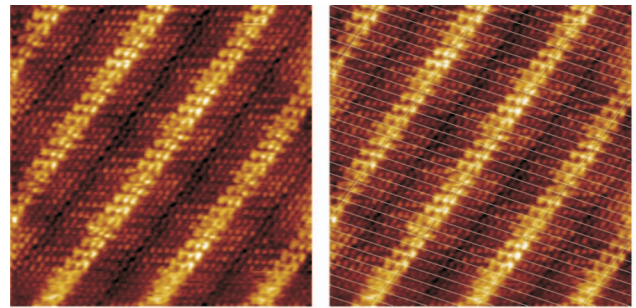


(b)

圖 9. (a) 掃描探針取得的格網影像及影像的單位晶格向量；(b) 校正過之格網影像及影像的單位晶格向量。

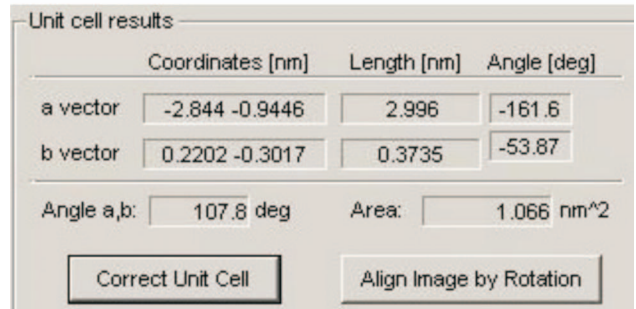
3. 探針特性模擬

探針的尖端形貌會影響原子力顯微鏡的掃描圖像，除了影響解析度的表現之外，嚴重的情況下將導致影像嚴重失真。然而，探針在掃描過程中無可避免的摩擦將導致探針劣化，尤其是掃描硬度特別高的試片，探針的損耗程度將會更為嚴重，進而導致掃描影像的粗大化及模糊化。我們可以利用掃描探針影像處理軟體模擬出探針的尖端形貌，探究不同的探針曲率半徑對原子力顯微鏡掃描圖像的影響。以圖 3 為例，我們可以利用掃描探針影像處理軟體的探針模擬功能，針對圖 3(a) 與 (b) 分別模擬出對應的探針形貌。圖 12(a) 為使用磨耗過的探針所得到的原子力顯微鏡掃描影像，圖 12(b)、(c) 及 (d) 分別為模擬探針的三維影像、 X 方向及 Y 方向的橫截面輪廓。圖 13(a) 為使用新探針掃描得到的原子力顯微鏡影像，圖 13(b)、(c) 及 (d) 分別為模擬探針的三維影像、 X 方向及 Y 方向的橫截面輪廓；由兩支探針 X 方向的橫截面輪廓可以明顯看出新針的曲率半徑較小，這樣的差異也導致掃描影像出現不同的結果，大曲率半徑的探針不僅造成類



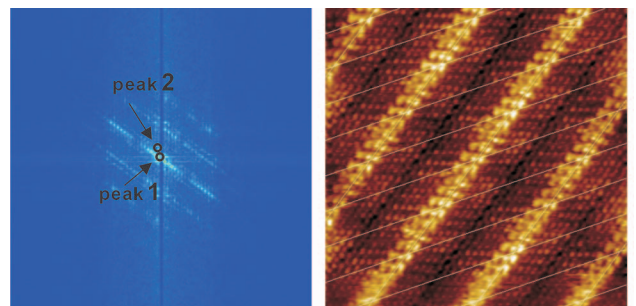
(a)

(b)



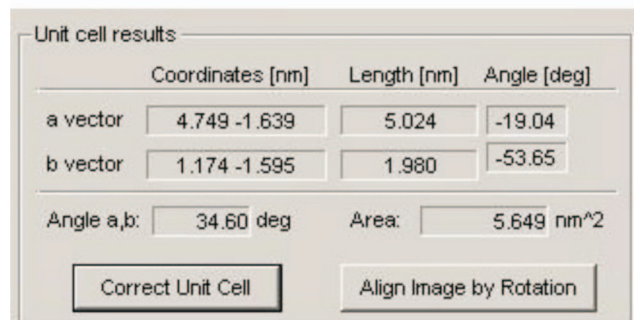
(c)

圖 10. (a) 週期性的掃描探針影像、(b) 單位晶胞影像及 (c) 向量分析結果。



(a)

(b)



(c)

圖 11. (a) 在傅立葉影像圖中點選兩個傅立葉點，將其轉換至空間維度所得的 (b) 影像晶格及 (c) 向量分析結果。

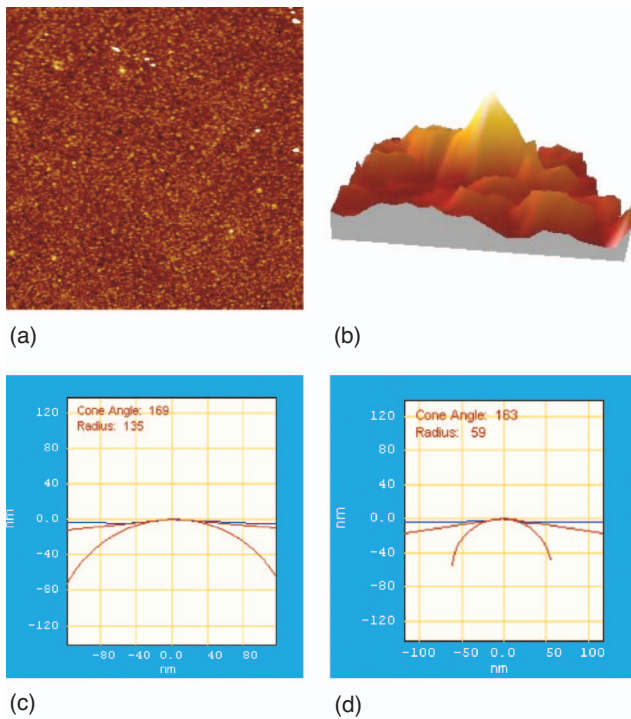


圖 12. (a) 磨耗過的探針所取得的掃描影像，(b)、(c) 及 (d) 分別為模擬探針的三維影像、X 方向及 Y 方向的橫截面影像。

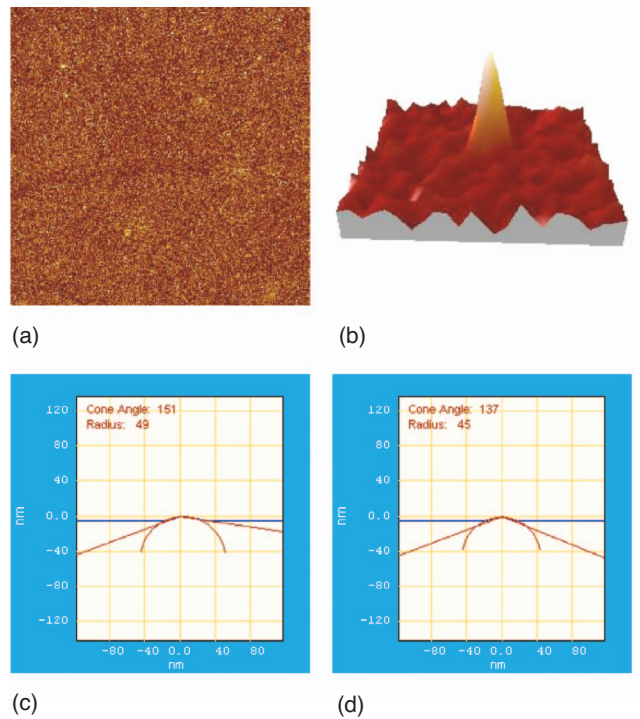


圖 13. (a) 新探針所取得的掃描影像，(b)、(c) 及 (d) 分別為模擬探針的三維影像、X 方向及 Y 方向的橫截面影像。

粒影像的粗大化，也使得影像模糊。

探針除了因為自然磨耗而導致曲率半徑變大之外，也可能因為使用不當而導致探針形貌的改變。圖 14(a) 為一掃描影像，利用探針模擬我們可以得到如圖 14(b) 的三維影像，圖 14(c) 為 X 方向的橫截面輪廓，圖 14(d) 為 Y 方向的橫截面輪廓，模擬出來的探針影像顯示探針已呈現不規則的形貌，此亦導致原子力顯微鏡影像中的三角形圖像，造成影像嚴重失真。掃描探針影像處理軟體除了模擬探針形貌之外，還可以對掃描影像做回溯處理而去除不規則探針形貌的影響。圖 15(a) 為掃描影像，影像中的顆粒有雙重圖像 (double images)，經由探針模擬顯示探針具有雙針尖，如圖 15(b) 所示，執行回溯功能可以得到圖 15(c)，圖中已看不到顆粒的雙重圖像。簡而言之，利用探針模擬功能，不僅可以模擬出探針的形貌，也可以比較不同探針曲率半徑對掃描影像的影響，更可利用回溯功能去除探針不規則形貌影響而產生的影像，得到更正確的試片表面形貌影像。

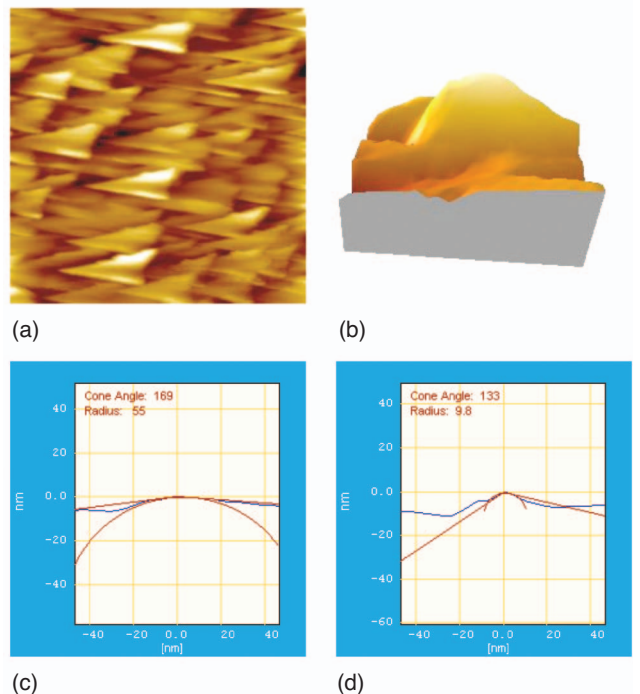


圖 14. 利用探針模擬由 (a) 掃描探針影像得到 (b) 三維探針影像、(c) 探針 X 方向的橫截面影像與 (d) 探針 Y 方向的橫截面影像。

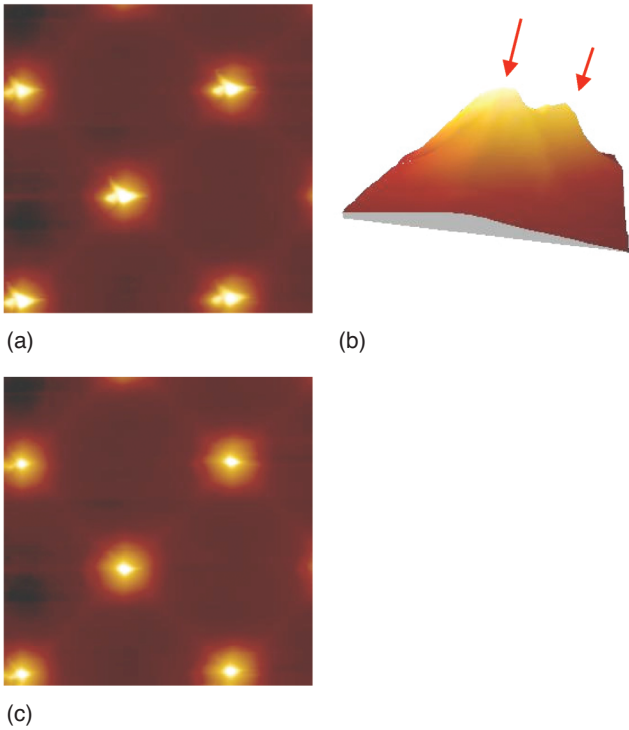


圖 15. 由 (a) 掃描探針影像可模擬出 (b) 雙針尖的探針影像，再利用掃描探針影像處理軟體的回溯功能可得到 (c) 修正的掃描探針影像。

四、結論

掃描探針顯微鏡技術可以進行奈米等級的表面形貌分析，隨著奈米世代的來臨，其受到重視的程度將與日俱增。然而，要得到一張真實且正確可靠的表面影像並非易事，在掃描過程中，影像除了受到環境震動及雜訊干擾的影響外，探針尖端形貌及掃描器壓電元件物理特性的變化也都可能導致影像

的失真與誤判。利用影像處理軟體解析週期性的形貌訊號，可透過傅立葉轉換分析，定義出週期性影像的二維單位晶胞、求出影像晶格常數以及影像晶格向量，對影像晶格常數已知的週期性影像，更可以經由軟體校正以消除壓電元件之壓電陶瓷特性所引起的影像拖曳現象，而得到更正確的表面影像。除此之外，也可以利用探針模擬的功能，解析探針尖端形貌對表面影像的影響，對原子力顯微鏡掃描影像的處理及分析具有很大的幫助。

參考文獻

1. G. Binnig and H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta*, **55**, 726 (1982).
2. 楊長謀, 中國材料科學學會材料科學叢書 2, 材料分析, 259 (1998).
3. The Scanning Probe Image Processor (SPIP) User's and Reference Guide Version 3.0.

- 陳志遠先生為國立交通大學電子工程碩士，現任國家奈米元件實驗室助理研究員。
- 張茂男先生為國立中央大學電機工程博士，現任國家奈米元件實驗室副研究員。
- Chih Yuan Chen received his M.S. in electronic engineering from National Chiao Tung University. He is currently an assistant researcher at National Nano Device Laboratories.
- Mao-Nan Chang received his Ph.D. in electrical engineering from National Central University. He is currently an associate researcher at National Nano Device Laboratories.