

商用原子力顯微儀的評估方法

A Quick Method of Evaluation for Commercial Atomic Force Microscope

林明彥、洪紹剛、應雄、阮基晏、劉瑋哲、蘇揚智、陳雅柔、楊志文

Ming Yen Lin, Shao Kang Hung, Sean Ying, Chi-Yen Juan, Wei Che Liu, Yang Chih Su, Ya Rou Chen, Chin Wen Yang

原子力顯微儀 (AFM) 已被廣泛地應用於表面量測，對於大多數非 AFM 專業的使用者而言，在面對眾多不同國內外的品牌時，如何選購性能價格比高的商用機器，勢必成為採購前不可避免的課題。本文針對最常用的輕敲模式，以石墨原子台階為測試之標準樣品，提出 Z 軸最佳解析度、空間結構的重複度、石墨原子台階線的銳利度 (實際橫向解析度)、石墨原子台階線的扭曲度以及空間位置的飄移度 (長時間使用之穩定度) 等五項簡單的方法，可快速評估該機種的優劣。

Atomic force microscope (AFM) has been widely used in the field of surface measurement. Selection of a proper AFM with cost-effective performance from numerous domestic and overseas makers becomes an important purchasing issue for most of users, especially who are not familiar with the functions of AFM. In this article, five characteristics of AFM scanned images under the most frequently used tapping mode are thoroughly deliberated. They are the best image resolution of Z axis, the spatial repetitions of the images, the sharpness of single step line (the real image resolution of lateral axis), the distortion of a single step line and the spatial drift of the images (the long term of stability for continuous use) on HOPG. The outcome of these qualities can serve as a quick guide for evaluating an AFM.

一、前言

對於初次操作 AFM 的使用者而言，尤其是學生 (學理懂得不多、實務經驗不足)，可能會因為不了解 AFM 的基本原理，而對這一個「超級精密量測儀器」產生戒慎恐懼之感。當然，對於學生而言，另外一個壓力是來自指導教授。因為是指導教

授害怕學生的錯誤操作造成機器的損壞，或者弄壞樣品，或者是探針斷裂，甚至取得不正確的數據。就算是擁有長年操作 AFM 經驗的專家，當對於 AFM 量測結果有疑慮時，還會再使用電子顯微儀取像，透過交叉比對的方式，來確認 AFM 量測的正確性。所以，任何一台商用的 AFM 都必須具備操作容易、量測正確的基本功能。

一般商用的 AFM，因設計上使用相同之原理，在操作介面上，基本上也是大同小異。通常於使用「輕敲模式」時，需要使用者動手處理操作的，只有更換樣品、更換探針、對雷射光點等三項動作，其餘的都是電腦上操作。如本期另一篇文章「原子力顯微儀的原理」中所提，在操作「輕敲模式」時，使用者只需透過電腦，正確設定探針的三個工作參數，即共振頻率（這個值是電腦取的）、振幅及 set point，即可進行掃描取圖的作業（也是電腦幫你做事），所以操作的便易性，基本上不會因為廠牌的不同而有所差異。因此，量測的正確性勢必成為使用者最必須關注之事。本文根據筆者的開發、操作、與量測之經驗，歸納提供 Z 軸最佳解析度、空間結構的重複度、石墨原子台階線的銳利度（實際的橫向解析度）、石墨原子台階線的扭曲度（直線度）及空間位置的飄移度（長時間使用的穩定度）等五項量測方法，可簡單、快速了解任何商用 AFM 性能之優劣，及其可信賴之程度。

以下所提的量測數據，所使用的樣品是石墨，所使用的機器是安冠自製的 AFM，所使用掃描器的全行程為 $60 \times 60 \times 4 \mu\text{m}$ 及 $2 \times 2 \times 1 \mu\text{m}$ 兩種，量測地點為安冠之辦公室（位於台北世貿中心基隆路旁的 14 樓，事實上是一個震動、溫差皆大的環境），所使用的探針為一般商用探針（Budget Sensors: BS-Tap300Al），針尖半徑約 10 nm。

使用石墨來評估於「輕敲模式」下 AFM 的優劣，其理由是因石墨表面的結構為大家所熟悉，即存在有高度落差約 0.3 nm 的原子台階，這些台階常以直線狀存在於石墨表面上。當然，對於大多數

使用者所量測的樣品而言，其表面結構的高度落差可能都遠大於 0.3 nm，也許不要求如此高的解析度。但在評估任何一台商用的 AFM 時，型錄表面上的規格數字只能參考，必須有客觀的量測方法，並由廠商提供量測之數據，才能直接窺探其實際量測能力之極限。利用上述所提之五種方法，任何人皆可清楚掌握任何一台 AFM 機器性能的好壞。在這五種評估的方法裡，Z 軸最佳解析度的量測可提供 AFM 可辨識的最小高度之落差，也就是該機器於垂直方向上實際的最佳解析能力。空間結構的重複度的量測可提供量測數據正確度的評判標準。石墨原子台階線的銳利度的量測可提供機器於橫方向上實際的最佳解析之能力，所以，亦可把石墨原子台階線的銳利度改稱作實際的橫向解析度。石墨原子台階線的扭曲度的量測可提供掃描器的線性度與穩定度之數據。對於實際的橫向解析度與石墨原子台階線的扭曲度兩項的量測，尤其是於「zoom in」時，更能看出機器在這兩項上的能力極限。所謂的「zoom in」，為縮小掃描範圍後，亦即把掃描影像放大後，這兩項性能的好壞也就一覽無遺。最後，當然不能放過的是長時間使用的穩定度。因此，透過對石墨表面已知的原子台階結構的量測，才有可信賴的依據來分析評估這五種方法所取得的數據。

二、Z 軸最佳解析度

對於商用 AFM 的評估，首先必須知道的是 Z 軸最佳解析度 (best image resolution of Z axis)。這個值代表著 AFM 可辨識的最小高度落差，也呈現出

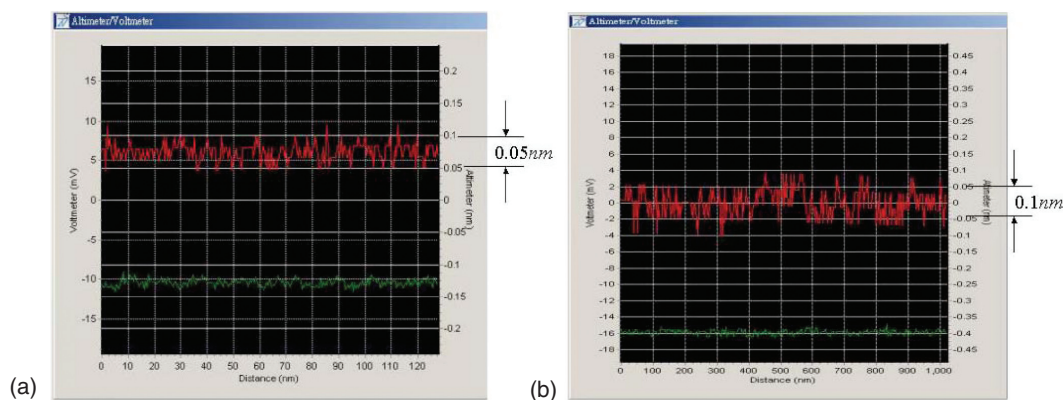


圖 1. Z 軸最佳解析度。
(a) 掃描器全行程 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ；(b) 掃描器全行程 $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ 。

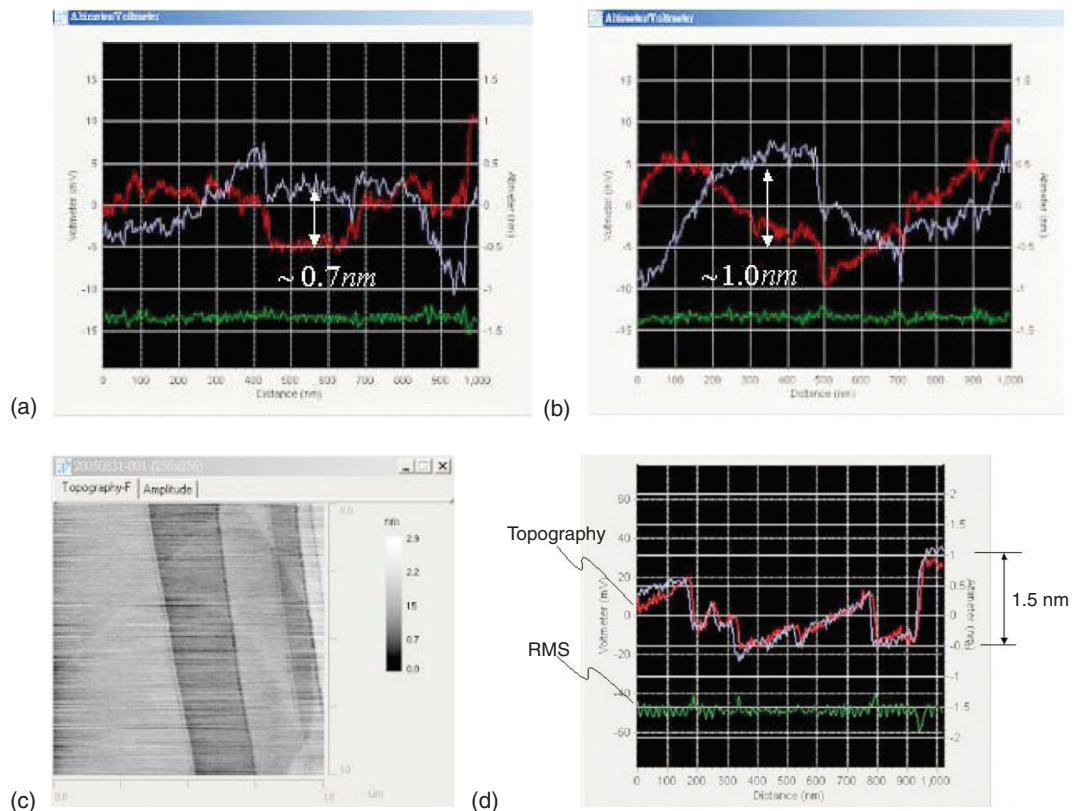
機器整體的雜訊大小。對於 0.3 nm 的石墨原子台階的辨識，若雜訊大於 0.3 nm，其結果顯而易見根本看不到石墨原子台階。在去除環境干擾的因素後，AFM 機器整體的雜訊是由「光」、「機」、「電」整體所整合後的雜訊。「光」的雜訊是來自於光槓桿所使用的雷射光源與 PSD，「機」主要是來自 Z 軸的壓電陶瓷致動器，「電」則來自電路板上所有元件的雜訊及電磁干擾。這些雜訊都會疊加一起，最後呈現在 Z 軸的解析度上。一般 AFM 都應該提供「dot scan」這項功能，即讓探針可在樣品表面之定點上，重複量測該定點的高度，然後將高度的分布顯現出來，即如圖 1 所示。圖 1(a) 為 Z 軸全行程為 1 μm 時的最佳解析度，即 $\sim 0.05 \text{ nm}$ ；圖 1(b) 為 Z 軸全行程為 4 μm 時的最佳解析度，即 $\sim 0.1 \text{ nm}$ 。兩種不同行程的壓電陶瓷掃描器，在安冠的 AFM 上，都可輕易辨識出高度落差為 0.3 nm 的石墨原子台階。(有些廠牌為了提供較佳的數字，不是以定點高度分布的值來表示，而是以 rms 值表示其雜訊之大小，rms 值的計算是將高度分布的平均值除以 $2\sqrt{2}$ ，兩者數字上的差異極大，不可忽略。)

三、空間結構的重複度

對於身邊無電子顯微儀的使用者而言，於使用 AFM 以量測奈米層級的表面結構時，如何判斷所取得數據的正確性，是一件必要且重要的基本技能。一般而言，商用的 AFM 應提供一個可觀察來回掃描線上空間結構的功能。透過這樣的觀察，對於同一條掃描線，如果來回掃描的結果所呈現空間結構是不一致的話，就必須注意機器參數的設定(如前文所提的振幅、set point 值或者是掃描速度)。另外，最常見的不一致性還是環境的震動干擾，它會造成來回掃描線的上下分離。

如圖 2(a)、(b) 所示為震動對石墨表面量測所造成的影響。例如在安冠的環境，於白天上班時間，就算使用主動式的防震桌，還是可明顯觀察到 1 nm 以下的震動(在量測機器旁邊，人員不經意地大步走動時，會造成更大的震動)。如圖 2(a) 所示，當震動較小時，來回掃描線還大致保持著類似的空間結構，且多少還具有石墨表面實際的結構特徵。但如圖 2(b) 所示，當震動較大時，來回掃描

圖 2.
(a) 較小震動下空間結構的重複度。(b) 較大震動下空間結構的重複度。(c) 震動下所取得石墨之表面形貌。(d) 無震動時空間結構的重複度。其中紅線表示由左向右掃描，藍色表示由右向左掃描。



線的空間結構早已被震得不成樣子。所以當這些環境震動的干擾存在時，所取得的表面形貌即如 2(c) 所示，雖然還可看到實際石墨表面的線狀結構，但圖上會夾雜許多水平狀的細白線，這些白線就是振動所造成的結果。當這些不正確的因素不復存在時，才能得到如圖 2(d) 所示，即來回掃描的結構呈現一致的結果 (圖 2(d) 所掃描的位置與圖 2(a)–(c) 不同，所以呈現不同之結構)。

圖 2(d) 所示是掃描範圍為 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 的其中一條掃描線。從圖上可清楚看到整條掃描線的最大高度落差只有 1.5 nm，這也就是石墨表面常有的空間結構。所以當有 0.2 nm 以上的震動發生時，或者所設定的參數不恰當的話，都很容易破壞來回掃描結構的一致性，而取不到正確可靠的表面形貌 (有關環境、與機器參數設定的實際影響，將於未來撰文說明)。所以透過空間結構的重複度 (spatial repetition of images) 的檢驗，可立即判斷環境的影響程度以及機器參數設定的正確與否，也才能確定掃描數據的正確性。

四、石墨原子台階線的銳利度

觀察石墨原子台階的銳利度 (sharpness of single step line)，即可評估出 AFM 於橫方向的靈敏度，這與雷射光源、PSD、電子訊號、回授系統、Z 軸壓電陶瓷致動器、XY 軸壓電陶瓷掃描器等機器整體的控制有關。所謂「銳利度」即是對於具有 0.3 nm 高度落差的原子台階，AFM 使用了多少橫向掃描距離，才將 0.3 nm 的高度分辨出來。當然，我們也可將其定義為實際橫向解析度。但通常商用 AFM 所提供的橫向解析度 (即 XY 解析度) 其實是 XY 掃描器可驅動的最小距離，該橫向解析度的計算，是把 XY 掃描器的全行程除以 DAC (digital to analog converter) 的可調階數，例如 XY 掃描器的全行程為 $60\ \mu\text{m}$ 、DAC 可調階數為 16 bit ($= 2^{16} = 65536$)，則 XY 掃描器可驅動的最小距離約為 1 nm (即 $60\ \mu\text{m} / 65536$)；若以行程為 $2\ \mu\text{m}$ 來計算，則該可驅動的最小距離約為 0.03 nm。所以橫向解析度與掃描器可驅動的最小距離是具有截然不同的物理意義。除

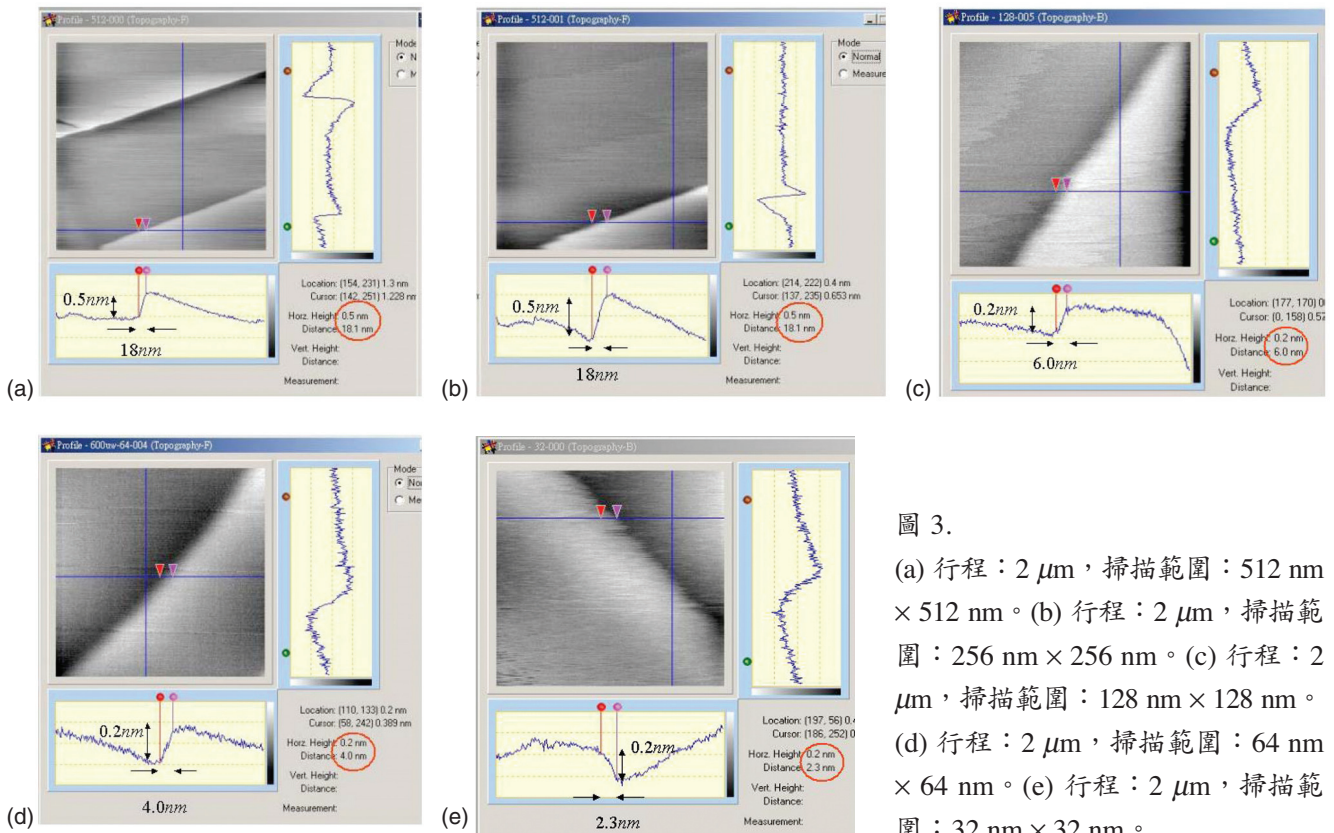


圖 3.

- (a) 行程： $2\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $512\ \text{nm} \times 512\ \text{nm}$ 。
- (b) 行程： $2\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $256\ \text{nm} \times 256\ \text{nm}$ 。
- (c) 行程： $2\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $128\ \text{nm} \times 128\ \text{nm}$ 。
- (d) 行程： $2\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $64\ \text{nm} \times 64\ \text{nm}$ 。
- (e) 行程： $2\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $32\ \text{nm} \times 32\ \text{nm}$ 。

了與機器的性能好壞有關之外，橫向解析度與所使用探針尖的大小也有絕對的關係 (且探針尖還會因使用而變粗)，當然也與 XY 掃描器可驅動的最小距離有關。因此，一般 AFM 的廠商不敢將真正的橫向解析度寫在型錄上。然而於評估 AFM 的性能時，實際橫向解析度絕對是一項非常重要且不可遺漏的參考數據。以下以全行程為 $2\ \mu\text{m}$ 及 $60\ \mu\text{m}$ 兩種不同的 XY 掃描行程的掃描器、探針尖半徑約為 $10\ \text{nm}$ 的新探針，來分析安冠 AFM 的實際橫向解析度。

圖 3(a)–(e) 所示為 XY 掃描器全掃描行程為 $2\ \mu\text{m}$ 、影像的取像點數皆為 256×256 點之各種不同掃描範圍 ($512\ \text{nm} \times 512\ \text{nm} - 32\ \text{nm} \times 32\ \text{nm}$) 的高度剖析圖。如前文所述，當掃描範圍縮小時，即作「zoom in」之放大，才能將機器性能的極限一覽無遺地呈現出來，所以此處只對 $32\ \text{nm} \times 32\ \text{nm}$ 提出

說明。由圖 3(e) 的高度剖析圖中，可讀取橫向解析度為 $2.3\ \text{nm}$ ，但對呈約 45° 的原子台階線而言，探針並非以垂直方向掃過原子台階的線 (掃描方向為水平方向)，所以實際的橫向解析度低於 $2.3\ \text{nm}$ 。若以 45° 來換算的話 (台階線與掃描線的交角)，實際的橫向解析度約為 $1.7\ \text{nm}$ 。若以這個方法來計算的話，則 $512\ \text{nm} \times 512\ \text{nm}$ 時的橫向解析度也在 $10\ \text{nm}$ 的範圍內 (交角約為 20° ，則換算後的橫向解析度為 $18\ \text{nm} \times \sin 20^\circ = 6.4\ \text{nm}$)。

圖 4(a)–(d) 所示為 XY 掃描器全掃描行程為 $60\ \mu\text{m}$ 、影像的取像點數皆為 256×256 點之各種不同掃描範圍 ($5120\ \text{nm} \times 5120\ \text{nm} - 256\ \text{nm} \times 256\ \text{nm}$) 的高度剖析圖。同樣地，只對最小的掃描範圍 $256\ \text{nm} \times 256\ \text{nm}$ 提出說明。由圖 4(d) 的高度剖析圖中可讀取橫向解析度為 $6.0\ \text{nm}$ ，這數值大致與圖 3(b) 所得到的結果一致。對於掃描範圍為 $256\ \text{nm} \times 256\ \text{nm}$

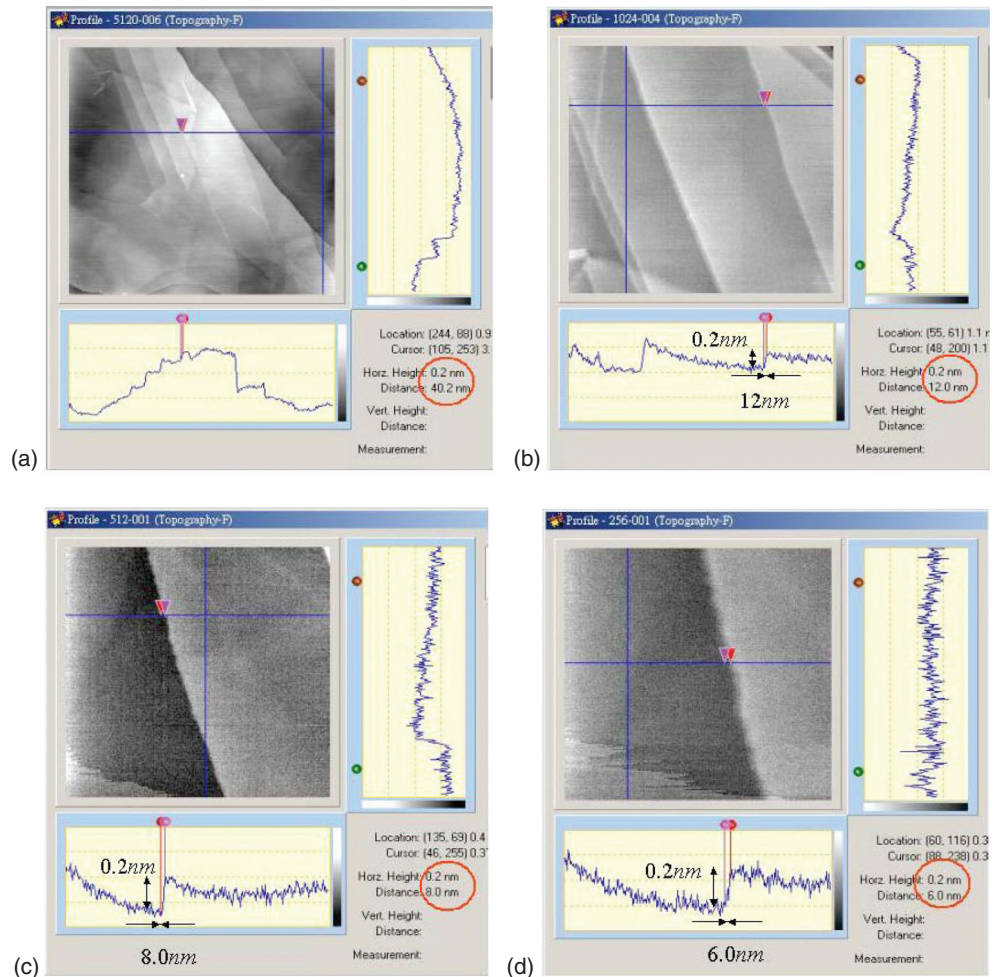


圖 4.

- (a) 行程： $60\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $5120\ \text{nm} \times 5120\ \text{nm}$ 。
- (b) 行程： $60\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $1024\ \text{nm} \times 1024\ \text{nm}$ 。
- (c) 行程： $60\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $512\ \text{nm} \times 512\ \text{nm}$ 。
- (d) 行程： $60\ \mu\text{m}$ ，掃描範圍： $256\ \text{nm} \times 256\ \text{nm}$ 。

以下的量測，掃描器掃描移動的距離已低於可驅動的最小距離，所以低於掃描範圍 $256 \text{ nm} \times 256 \text{ nm}$ 的量測已無意義。

因此，對於 0.3 nm 高度的石墨原子台階，在使用探針尖半徑為 10 nm 、DAC 為 16 bit 的條件下，安冠自製 AFM 的最佳橫向解析度：於 XY 全行程為 $60 \mu\text{m}$ 的掃描器上，於 $256 \times 256 \text{ nm}$ 掃描範圍下，可達約 6 nm ；而於 XY 全行程為 $2 \mu\text{m}$ 的掃描器上，於 $32 \times 32 \text{ nm}$ 掃描範圍下，可達約 2 nm 。

五、石墨原子台階線的扭曲度

前面三項的評估，主要是針對縱方向及橫方向上機器整體性能的一個總評估。由於 AFM 核心，即光槓桿及壓電陶瓷掃描器，主要是裝置於金屬的機械結構下，假如這些機械結構設計不佳的話，這些金屬的機械結構對於溫差會產生可觀的機械長度的變化（金屬熱膨脹係數通常約為十萬分之一，對 10 公分 長度的金屬而言，溫度 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的變化會造成約 $1 \mu\text{m}$ 的長度伸縮），以致造成量測上的誤差。

一般而言，溫度變化對縱向（Z 軸）的影響雖然會造成機械飄移的現象，但多少可藉由回授系統來克服。由於 Z 方向壓電陶瓷致動器的全行程通常只有數微米（ μm ）的長度，如果短時間內溫度變化過大，使得機械飄移嚴重，常會造成縱向 Z 軸壓電陶瓷致動器的無法工作，也就是機械飄移的長度超過了壓電陶瓷致動器的全行程，所以無法進行量測。

另外，由於機械結構的關係，溫度變化對橫向

（XY 軸）的影響會造成橫向上掃描器位置的扭曲，透過從石墨原子台階線的扭曲度（distortion of single step line）的量測，很容易觀察到這個干擾的現象，如圖 5 所示。換言之，若在環境溫度穩定的情況下，所量測取得的石墨原子台階的結構若不呈現直線狀，該 AFM 機器的機械設計就值得懷疑。至於安冠自製的 AFM，當使用兩種不同全行程的掃描器時，在環境溫度相對穩定的條件下（所謂溫度相對穩定是指溫度對時間的變化率小，且溫度不於短時間內上下飄動），所取得石墨原子台階的結構如圖 3(a)–(e)、4(a)–(d) 所示，皆具有良好的直線構造。

六、空間位置的飄移度

任何一部商業用的量測儀器，除了必須具備量測的正確性之外，也不能不作「長時間使用的穩定度」之測試。因為對使用環境的溫度無法掌握，一般商用的 AFM 根本不敢碰觸這個問題。然而，對於任何 AFM 的使用者而言，長時間使用機器來量測樣品或作實驗，幾乎是無可避免之事實。在環境干擾受到適當的控制下，尤其是室溫可幾近為恆溫的狀態下，任何商用的 AFM 就必須如圖 6 所示，即可長時間讓探針一直維持在樣品表面，供使用者連續操作。圖 6 所示，是對石墨表面的同一區塊、以 $5120 \text{ nm} \times 5120 \text{ nm}$ 掃描範圍（使用 $60 \times 60 \times 4 \mu\text{m}$ 之掃描器）、放慢掃描速度，並以每張約 30 分鐘 的掃描速度讓電腦自動連續掃描 8 小時 後，所得 16 張 掃描的縮圖。

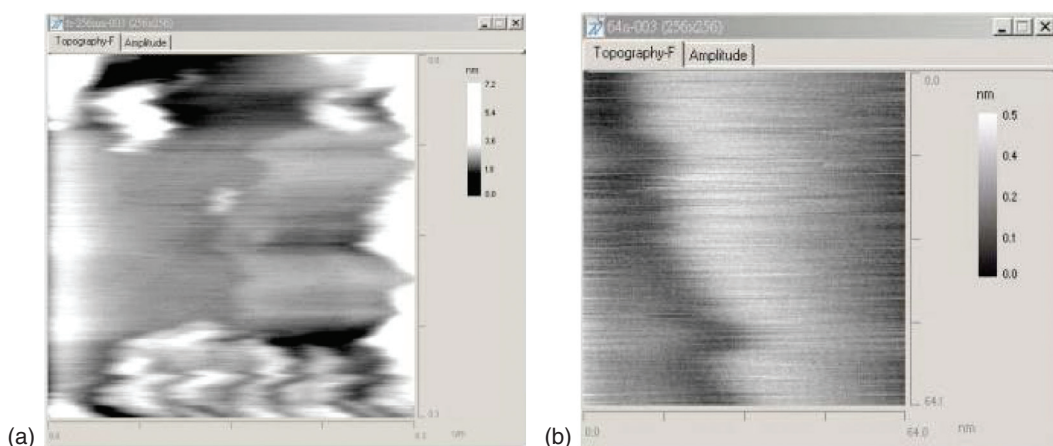


圖 5. 溫度對橫向位置的影響（機械結構不良）。(a) $256 \text{ nm} \times 256 \text{ nm}$ ；(b) $64 \text{ nm} \times 64 \text{ nm}$ 。

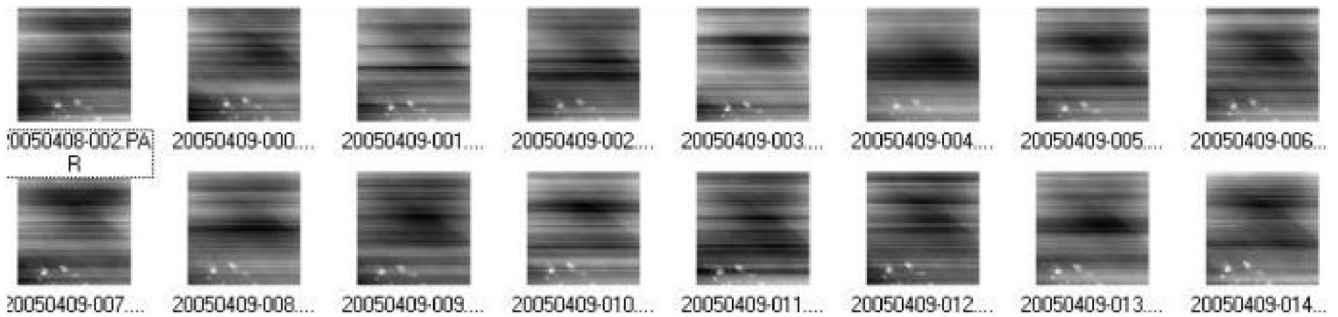


圖 6. 長時間使用的穩定度測試，每張 30 分鐘，連續重複掃同樣位置 16 張，共計 8 小時。

如果將第 1 張圖與第 16 張圖作比對的話，如圖 7 所示，在 8 小時內， X 及 Y 橫向的飄移距離分別為 $0.67\ \mu\text{m}$ 及 $0.03\ \mu\text{m}$ (因白點的高度太大，造成細結構高度的對比下降，以至細結構無法清楚顯現)。因此，假如用實際數字來評估「長時間使用的穩定度」的話，可將飄移的距離除以測試時間，即可得到空間位置的飄移度 (spatial drift of images)。因此，對於空間位置的飄移度，安冠 AFM 的最佳紀錄為 (使用 $60 \times 60 \times 4\ \mu\text{m}$ 之掃描器)： X 方向為 $0.084\ \mu\text{m}/\text{h}$ ， Y 方向則為 $0.004\ \mu\text{m}/\text{h}$ 。(很可惜的是，本量測未記錄溫度的變化，量測的日期是在今年四月初，時間是從午夜到隔日的早晨，其溫室是相對穩定。有關溫度對 AFM 量測的影響，也將會另外撰文說明。)

根據筆者量測的經驗，溫度對 AFM 的影響是使用者不可忽視的一項環境干擾，對於機械結構設計不良的 AFM，溫度的變化會造成機器的無法操

作 (Z 軸飄移過渡之現象)，尤其是對細微結構的量測，需將掃描範圍縮小至 $100\ \text{nm}$ 時，溫度變化的威力即顯現出來 (橫向扭曲的現象)。當然了，一部夠資格的商用 AFM，在溫度為穩定的狀態下，除了需顯現石墨原子台階的線性結構外，也必須能具備長時間連續操作的能力。

七、總結

針對商用 AFM 的選購，不能夠只參考廠商所提型錄之規格，使用者可根據對石墨表面原子台階的實際量測，於「輕敲模式」下，針對 Z 軸最佳解析度、空間結構的重複度、石墨原子台階線的銳利度 (實際橫向解析度)、石墨原子台階線的扭曲度及空間位置的飄移度 (長時間使用之穩定度) 等五項量測進行評估，才能分辨各種不同廠牌、機種的優劣，也才能正確選購一台性能價格比高的商用 AFM。

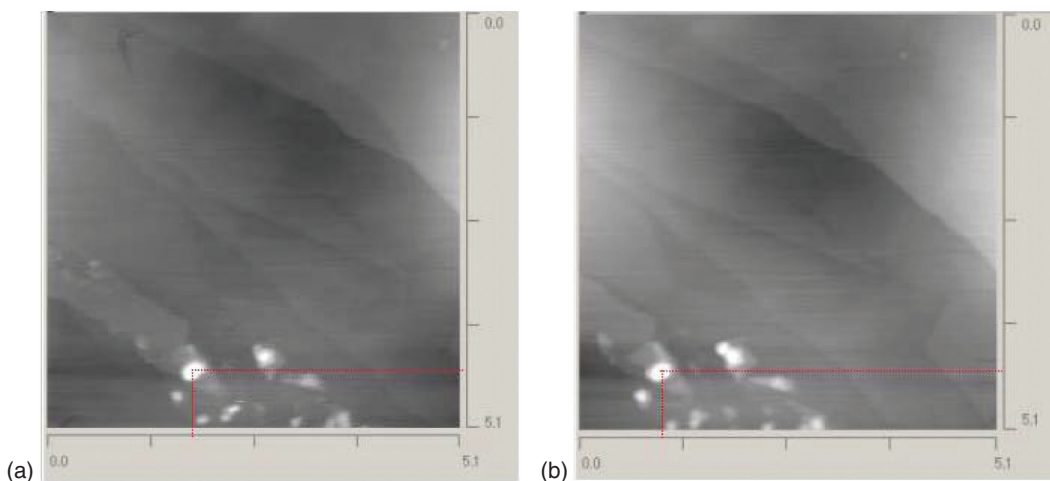


圖 7. 空間位置之飄移。 X 方向飄移約 $0.67\ \mu\text{m}$ ； Y 方向飄移約 $0.03\ \mu\text{m}$ 。(a) 第 1 張圖；(b) 第 16 張圖 (8 小時後)。

誌謝

特別感謝中央研究院物理所胡恩德、陳彥甫、黃仰山、陳彥廷、何宗憲、黃英碩、張嘉升先生與國立台北科技大學機械系黎文龍先生等長期參與安冠原子力顯微儀的開發，並感謝過去曾參與安冠原子力顯微儀開發所有離職員工的貢獻，以及安冠所有股東長期資金的支援，才得以讓 AFM 的技術在安冠生根、成長及茁壯。

-
- 林明彥先生為日本東京大學物理碩士，現任安冠奈米科技股份有限公司總經理。
 - 洪紹剛先生為國立台灣大學機械碩士，國立台灣大學電機博士候選人，現任安冠奈米科技股份有限公司研發經理。
 - 應雄先生為夏威夷州立大學電子工程碩士，現任安冠奈米科技股份有限公司研發經理。
 - 阮基晏先生為龍華科技大學資訊網路工程學士，現任安冠奈米科技股份有限公司研發工程師
 - 劉璋哲先生為亞東技術學院工業管理學士，現任安冠奈米科技股份有限公司研發工程師
 - 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。
 - 蘇揚智先生為實踐大學資訊管理學士，現任安冠奈米科技股份有限公司研發工程師。
 - 楊志文先生為國立中正大學物理碩士，國立台灣大學物理博士候選人，現任安冠奈米科技股份有限公司研發工程師。

- Ming Yen Lin received his M.S. in physics from Tokyo University, Japan. He is currently the general manager of Angsnanotek Co., Ltd.
- Shao Kang Hung received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Electrical Engineering at National Taiwan University. Meanwhile, he is the R&D manager of Angsnanotek Co., Ltd.
- Sean Ying received his M.S. in electrical engineering from University of Hawaii, USA. He is the R&D manager of Angsnanotek Co., Ltd.
- Chi-Yen Juan received his B.S. in Computer Information and Network Engineering from Lunghwa University of Science and Technology. He is currently an R&D engineer at Angsnanotek Co., Ltd.
- Wei Che Liu received his B.S. in industrial management from Oriental Institute of Technology, He is an R&D engineer of Angsnanotek Co., Ltd.
- Yang Chih Su received his management bachelor in information management from Taiwan Shih Chien University. He is currently an R&D engineer of Angsnanotek Co., Ltd.
- Ya Rou Chen received her M.S. in physics from Fu-Jen Catholic University. She is currently an R&D engineer of Angsnanotek Co., Ltd.
- Chin Wen Yang received his M.S. in physics from Nation Chung Cheng University. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Physics at National Taiwan University. Meanwhile, he is an R&D engineer of Angsnanotek Co., Ltd.