

原子力顯微儀的原理 (下)

An Introduction to the Principle of Atomic Force Microscope (II)

林明彥、張嘉升、黎文龍

Ming Yen Lin, Chia-Seng Chang, Wenlung Li

原子力顯微儀已被廣泛地應用於表面量測，對於大多數非原子力顯微鏡專業的使用者而言，深入了解原子力顯微儀的原理與特徵，有助於正確地操作儀器。本文主要是針對常用的輕敲模式，透過物理的等效運動模式，並配合實驗數據與實際量測之經驗，以說明輕敲模式下探針的運動特徵、探針與表面間的交互作用及輕敲模式的運作原理。

Atomic Force Microscope (AFM) has been widely used in the field of surface measurement. It is helpful for any of user, especially for most of users who are not familiar with the functions of AFM, to operate AFM properly if they understand more with the principle and characteristics of AFM. In this article, the principle of tapping mode, which is the most frequently used, is mainly introduced. An effective physic model of motion, experimental data and experiences on AFM measurement are used to describe the physic characteristics of cantilever tip motion, tip-sample interaction and the principle of tapping mode.

(3) 探針與樣品表面間的作用 (Tip-Sample Interaction)

前文已針對探針於自由振盪時的物理現象做一說明，即探針尚未下針至待測樣品表面前的物理狀態。在這個狀態下，使用者會操作一掃頻功能，先取得共振頻率 ω_r 及 Q 值後，原子力顯微儀機器才將探針的工作頻率設定在 ω_r 附近，然後由使用者設定一適當之探針振幅 (即透過激振電壓之設定) 後，才將探針下至待測樣品表面。當探針接近至樣品表面數 nm 至數十 nm 的距離時 (樣品表面所附著的水膜厚度)，首先會碰到的作用力是水膜的虹吸力 (如前文所述)，這個作用力會把探針尖迅速拉

至樣品表面，並讓探針進入樣品表面原子的斥力區 (事實上，就是探針尖原子的電子層與樣品表面原子的電子層已開始重疊，並產生斥力作用)。所以，一般於輕敲模式下，探針的振幅要大於水膜的厚度，並讓探針尖穿越水膜、再與表面原子做間歇式的接觸，才能克服水膜的影響。

(a) 外力作用下探針的運動方程式

為了理論性地探討探針與樣品表面間作用時所發生的複雜物理現象，我們利用了較簡單且合理的物理模型來說明：當自由振盪中的探針，如果受到外力的作用時，會有哪些基本的現象發生。

如圖 14 所示，為方便運動方程式的表述，將 z 軸的座標原點 ($z = 0$) 設定在探針不受外力時的自然平衡位置 (equilibrium position)，並將探針尖的運動位置以 z_T 來描述。當有外力 $F_{\text{ext}}(z)$ 作用時，於不激振探針的狀態下，探針與外力可達到另一新的平衡位置 z_0 ，即探針的受力為零，可得

$$k_e z_0 = F_{\text{ext}}(z_0) \quad (23)$$

所以，受外力作用後的運動方程式可寫成

$$m_e \ddot{z}_T = -b\dot{z}_T - k_e(z_T - z_d) + F_{\text{ext}}(z_T) \quad (24)$$

將式 (23) 除以 m_e 並重新整理後，可得

$$\ddot{z}_T + 2\beta\dot{z}_T + \omega_0'^2 z_T = A_d \cos \omega t + \frac{F_{\text{ext}}}{m_e} \quad (25)$$

由於外力 $F_{\text{ext}}(z)$ 是位置的函數，可用 Taylor 公式將外力 F_{ext} 對平衡位置 z_0 展開，可得

$$F_{\text{ext}}(z) \cong F_{\text{ext}}(z_0) + \frac{dF_{\text{ext}}}{dz}(z_0)(z_T - z_0) + o((z_T - z_0)^2) \quad (26)$$

另外，再作如下的座標變換，

$$\tilde{z}_T = z_T - z_0 \quad (27)$$

且假設探針運動的振幅很小，即可忽略式 (26) 中的二次項，則式 (25) 可改寫成

$$\ddot{\tilde{z}}_T + 2\beta\dot{\tilde{z}}_T + \omega_0'^2 \tilde{z}_T = A_d \cos \omega t \quad (28)$$

其中，

$$k'_e = k_e - F'_{\text{ext}} = k_e - \frac{dF_{\text{ext}}(z_0)}{dz} \quad (29)$$

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{k'_e}{m_e}} = \sqrt{\frac{k_e - F'_{\text{ext}}}{m_e}} = \omega_0 \sqrt{\left(1 - \frac{F'_{\text{ext}}}{k_e}\right)} \quad (30)$$

k'_e 為受外力後之等效彈性係數； ω'_0 為受外力後之自然共振頻率。所以，當有外力作用時，因等效彈性係數的改變，探針的自然共振頻率會偏移一個量，這個量與外力的位置變化有關。換言之，當外力是一個與位置有關的力場時，此外力對位置的變化量 (即 $F'_{\text{ext}} = dF_{\text{ext}}/dz$ ，物理上稱作 force gradient) 不為零時，才會改變探針的運動特徵。舉例說明，假設外力是一線性回復力 (即為一彈簧)，即 $F'_{\text{ext}} = -k_{\text{ext}}$ ，則 $k'_e = k_e + k_{\text{ext}}$ ，將此值帶入式 (30) 中，則可發現探針的自然共振頻率朝大的方向偏移，即 $\omega'_0 > \omega_0$ 。根據式 (10)、(11)、(15) 及 (16)，受外力作用後，探針的運動振幅、相位、共振頻率及共振振幅即成為

$$A(\omega, \beta) = \frac{A_d}{\sqrt{(\omega_0'^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2\beta^2}} \quad (31)$$

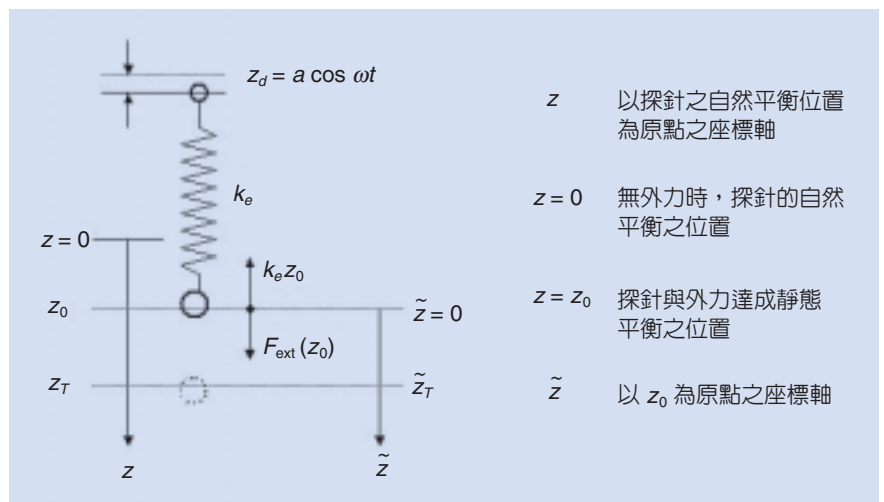


圖 14. 外力作用時的探針等效運動模型。

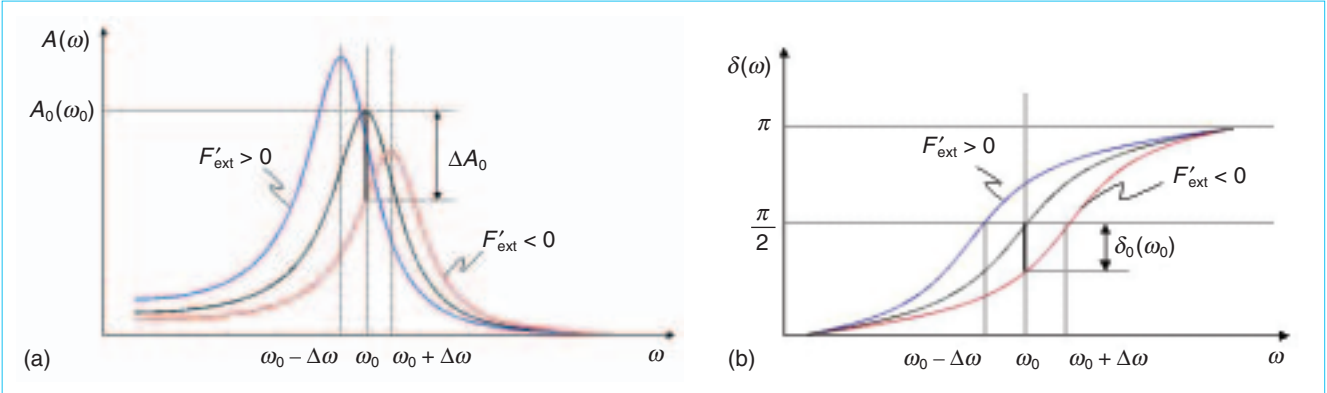


圖 15. (a) 受外力作用後，探針振幅與頻率之關係。(b) 受外力作用後，探針相位與頻率之關係變化，圖的顯示稍作誇大式的處理。

$$\delta'(\omega, \beta) = \tan^{-1}\left(\frac{2\omega\beta}{\omega_0'^2 - \omega^2}\right) \quad (32)$$

$$\omega_R' = \sqrt{\omega_0'^2 - 2\beta^2} \quad (33)$$

$$A_R' = \frac{A_d}{2\beta\sqrt{\omega_0'^2 - \beta^2}} \quad (34)$$

如果，根據式 (31) 與 (32) 將振幅 A 及相位 δ 對激振頻率 ω 作圖的話，可得圖 15(a) 與 (b)。此處，假設 $Q \gg 1$ ，所以 $\omega_R \cong \omega_0$ ；另外，為了定性呈現外力作用後之變化，圖的顯示稍作誇大式的處理。

(b) 各種物理量的位移現象

根據式 (31)–(34)，當外力作用後，探針的振幅、相位與共振頻率都會因自然共振頻率的改變而改變。針對這些改變量，以下的探討，都是基於 $Q \gg 1$ 、 $\omega_R \cong \omega_0$ ，且外力對位置的變化量遠小於探針的等效彈性係數（即 $k_{\text{ext}} \ll k_e$ ）等假設，所作的理論計算。

(c) 共振頻率的變化

將式 (33) 減式 (15)，可得共振頻率的偏移量 $\Delta\omega_R$ ，

$$\Delta\omega_R = \omega_R' - \omega_R = \omega_R \left(\sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_R^2} k_{\text{ext}}} - 1 \right) \quad (35)$$

假設 $\left| \frac{\omega_0^2}{\omega_R^2} k_{\text{ext}} \right| \ll 1$ ，則可以 Taylor 公式展開式 (35)，取得 $\Delta\omega_R$ 的近似值，

$$\Delta\omega_R \cong -\frac{\omega_0}{2k_e} k_{\text{ext}} = -\frac{\omega_0}{2k_e} F'_{\text{ext}} \quad (36)$$

另外，將式 (29) 減式 (4)，則可得自然共振頻率的偏移量 $\Delta\omega_0$ ，

$$\Delta\omega_0 = \omega_0' - \omega_0 = \omega_0 \left(\sqrt{1 - \frac{k_{\text{ext}}}{k_e}} - 1 \right) \quad (37)$$

如果， $\left| \frac{k_{\text{ext}}}{k_e} \right| \ll 1$ ，則可以 Taylor 公式展開式 (37)，取得 $\Delta\omega_0$ 的近似值，

$$\Delta\omega_0 \cong -\frac{\omega_0}{2k_e} F'_{\text{ext}} \quad (38)$$

根據式 (36) 與 (38)，當外力 $F'_{\text{ext}} < 0$ 時，共振頻率與自然共振頻率都向大的方向偏移；當外力 $F'_{\text{ext}} > 0$ 時，共振頻率與自然共振頻率都向小的方向偏移。

(d) 振幅的變化

同樣的，當外力加諸於自由振盪運動中的探針後，探針的振幅及相位也會產生變化。為簡化計算，假設受外力前，探針是以自然共振 ω_0 作振盪運動，根據式 (10) 與 (11) 探針的振幅 A_0 、相位 δ_0 各為

$$A_0(\omega_0) = \frac{A_d}{2\omega_0\beta} \quad (39)$$

$$\delta_0(\omega_0) = \frac{\pi}{2} \quad (40)$$

根據式 (31)，以 ω_0 振動的探針，當外力作用後，且於 $|QF'_{\text{ext}}/k_e| \ll 1$ 之條件下，其振幅 A'_0 則變為，

$$A'_0(\omega_0) = \frac{A_d}{\sqrt{[(\omega_0 + \Delta\omega_0)^2 - \omega_0^2]^2 + 4\beta^2\omega_0^2}} \quad (41)$$

$$\cong A_0 \left(1 - \frac{F'_{\text{ext}}{}^2}{2k_e^2} Q^2 \right)$$

$$\therefore \Delta A_0(\omega_0) = A'_0(\omega_0) - A_0(\omega_0) = -\frac{F'_{\text{ext}}{}^2}{2k_e^2} Q^2 A_0 \quad (42)$$

因此，如圖 15(a) 所示，受外力後，不論外力的 F'_{ext} 的特徵 (即正負性)，自由振盪中探針的振幅 $A_0(\omega_0)$ 都將減少同樣的一個量，且這個量正比於 $(QF'_{\text{ext}}/k_e)^2$ 。

(c) 相位的變化

依據式 (32)，以 ω_0 振動的探針，當外力作用後，且於 $|QF'_{\text{ext}}/k_e| \ll 1$ 之條件下，其相位 δ'_0 則變為，

$$\delta'_0(\omega_0) = \tan^{-1} \left[\frac{2\omega_0\beta}{(\omega_0 + \Delta\omega_0)^2 - \omega_0^2} \right] \quad (43)$$

$$\cong \tan^{-1} \left[-\frac{k_e}{QF'_{\text{ext}}} \right] \cong \frac{\pi}{2} + \frac{QF'_{\text{ext}}}{k_e}$$

$$\therefore \Delta\delta_0(\omega_0) = \delta'_0(\omega_0) - \delta_0(\omega_0) = \frac{Q}{k_e} F'_{\text{ext}} \quad (44)$$

因此，如圖 15(b) 所示，受外力後，自由振盪中探針的相位 $\delta_0(\omega_0)$ 將增加或減少一個量，且這個量正比於 QF'_{ext}/k_e 。

事實上，外力的作用 (即探針—樣品間之作用力 F_{int}) 為一非常複雜之物理現象，並非可用上述簡單的物理公式即可完全描述探針受作用力後的運動行為。通常， F_{int} 與探針尖的位置、形狀、面積有關，也與樣品表面的形貌有關，且也絕非為連續的線性力。還有，樣品也可能具有黏滯之現象 (如較軟的生物樣本)，而產生黏滯力 F_v ，也會消耗探針的運動能量。這些外力的作用，不只會造成共振頻率的偏移、探針振幅及相位的變化，也會造成探針與樣品間能量的轉移，這些變化量都蘊含了樣品表面的物理特徵。另外，需注意的是環境的干擾，因

整個商用的原子力顯微儀一般是操作在大氣之下，環境的溼度可能使樣品表面附著一層水膜，會產生虹吸力 F_{att} ，也可能產生靜電力 F_e (空氣乾燥時)，這些環境因素的作用力也會改變探針的運動狀態 (註 8)。所以，整體探針的運動方程式即可如下描述，

$$m_e \ddot{z}_T = -b\dot{z}_T - k_e(z_T - z_d) + F_{\text{int}} + F_{\text{att}} + F_v + F_e \quad (45)$$

由於外力作用為一複雜的物理現象，很難用數學解析的方式取得正確的解，但還是可以將外力單純化、簡化成數學可以表達的函數，再利用數值分析的方法，基本上是可定性解析出探針運動的特徵，然後再與實際的實驗結果比較，才能更精確地掌握探針—樣品間的作用所造成之改變，並根據這些改變量，解析出樣品表面的物理特性。受限於篇幅的關係，本文不再繼續深入說明，更詳盡的討論，可參閱參考文獻 (15)、(17)、(18) 及 (19) 等論文及專利。

(4) 探針的靈敏度與反應速度

前文已針對探針運動作基本的理論介紹，最後再說明一重要的物理量，即探針的靈敏度與反應速度。

對於原子力顯微儀「輕敲模式」的使用，在掃描取表面形貌影像時，常有使用者會問：「為何不能掃快一點？」這是一個好問題，也是使用者必須了解的一個基本問題。首先，先給結論 (基本探針運動的物理特性)，再以理論驗證這個結論。這個物理特性就是：具有越大 Q 值的探針，其反應較靈敏 (sensitivity)，但反應速度 (response bandwidth) 卻較慢⁽¹⁶⁾。在參考文獻 (16) 中提及，當把原子力顯微儀裝置放入真空度為 10^{-3} torr 的真空環境時，探針的 Q 值會由數百躍升至 50000。此時的探針，對於外力的改變，變得非常敏銳；但探針的反應速度卻降至 1 Hz 以下，也就是當探針運動受到外力作用時，探針運動再達到新的穩定狀態時，其所需要的時間卻越長。所以，讀者馬上會問：那麼，大氣下使用原子力顯微儀，以目前 Q 值為 300 的探針來掃圖的話，其反應速度又應該是多少？

一般於考量原子力顯微儀輕敲模式系統整體的反應速度時，必須將 (1) 探針的機械反應速度、(2) Z 軸壓電陶瓷的反應速度、(3) 電子檢測及回授系統的反應速度等基本因素列入考量。因這三項因素裡，(1) 探針的機械反應速度為最慢，所以本文只針對這項問題作說明。

如前文所述，探針運動方程式的解含有一如穩定態之解 (式 (8)) 及另一過渡態 (式 (9))，過渡態所呈現的探針運動，因含有快速衰減項 $e^{-\beta t}$ ，所以當時間遞增時，過渡態的振幅就衰減為零，最後只剩穩定態的運動，並具有振幅 A_0 、激振頻率 ω_d 及相位 δ_0 。為簡化問題，假設 $t = 0$ 時探針已處於穩定態，即可如下描述，

$$z(t) = A_0 \cos(\omega_d t + \delta_0) \quad (46)$$

當 $t \leq 0$

其中， ω_d 是探針的激振頻率。

然而，如此進入穩定態的探針，假如於 $t = 0$ 時，再受到一個新的外力所作用的話，其新的運動方程式即改變成，

$$z'(t) = A'_0 \cos(\omega'_d t + \delta'_0) + e^{-\beta t} \left[A_1 e^{\sqrt{\beta^2 - \omega_0'^2} t} + A_2 e^{-\sqrt{\beta^2 - \omega_0'^2} t} \right] \quad (47)$$

當 $t \geq 0$

當式 (47) 的過渡態之 $\beta \ll \omega'_0$ 時，式 (47) 可改寫成爲，

$$z'(t) = A'_0 \cos(\omega'_d t + \delta'_0) + A_e e^{-\omega_0 t / 2Q} \cos(\omega_r t + \theta_r) \quad (48)$$

當 $t \geq 0$

其中， A'_0 、 ω'_0 、 δ'_0 為受外力作用後，振幅、自然共振頻率、相位的改變，且令

$$\omega_r^2 = \omega_0'^2 - \beta^2 \quad (49)$$

如果把式 (48) 中的實際振幅取出的話 (即把穩定態

與過渡態的振幅疊加，並取疊加後的振幅)，可得

$$|z'|^2 = A_0'^2 + A_r^2 e^{-\omega_0 t / Q} + 2A'_0 A_r e^{-\omega_0 t / 2Q} \times \cos[(\omega_r - \omega_d)t + (\theta_r - \delta'_0)] \quad (50)$$

式 (50) 即為受外力作用後，探針振幅與時間的關係式。是以，當 $\omega_0 t / 2Q \gg 1$ 時，式 (50) 中的第 2 與 3 項即可視為零。因此只剩下穩定態的振幅 A'_0 。所以定義一時間常數 τ ，使得當時間 $t > \tau$ 時，式 (50) 的第 2 與 3 項皆可小於某一適當之大小，例如，為 $t = 0$ 起始值的 1/100，也就是式 (50) 的第 2 與 3 項對實際振幅大小的貢獻，已微不足道，並可忽略。因式 (50) 第 3 項的衰減速度比第 2 項慢，所以只考慮第 3 項的效果，並求出第 3 項振幅強度衰減為百分之一時的時間，即可推出 τ 的大小約為 (在 $\omega'_0 \cong \omega_0$ 條件下)：

$$\tau \cong QT_0 \quad (51)$$

其中， $\omega_0 = 2\pi/T_0$ ， T_0 為自然共振頻率的週期。

τ 就是探針的機械反應時間，又是一個與 Q 值有關的物理量。所以， Q 也就代表探針受外力作用後，由舊的穩定態變遷至新的穩定態所需最小的時間，這個時間的長度由探針的 Q 值與自然共振頻率的週期 T_0 所決定。所以 Q 值越大的探針，其感受外力變化的靈敏度雖然提高，但相反的卻需更長的反應時間。所以，現在可以回答前文所提的問題，即目前商用輕敲模式用的探針，一般 Q 值約為 300、 T_0 約為 $3.3 \mu s$ (自然共振頻率約在 300 kHz)，其反應時間約為 1 ms。所以，這個探針的反應時間即限制了掃圖的速度。如果為了更正確操作輕敲模式，以確保取圖時數據的正確性，最好是以 2 倍 τ 的時間來取數據。即探針由舊的取樣點移到另一新的取樣點時，必須等待 2τ 的時間後，才讀取數據，這樣才不至於取到過渡態的數據 (註 9)。所以，對於一條掃描線而言，若取樣點是 250 點的話，來回掃描一條線所需要的時間就為 1 秒，也就是 1 Hz。提高探針的靈敏度與縮短反應時間，可讓電子系統達到更有效率的回授運作，才能達到縮短掃圖時間的目的。

3. 振幅－距離之曲線、水膜與設定值

如前文所提，於使用輕敲模式掃圖時，透過掃頻的動作，可取得探針的共振頻率；在不受水膜影響的條件下，並將探針的振幅盡量壓小，以取得較佳的靈敏度。這兩個動作其實就是決定探針的工作參數。當此工作參數設定之後，才將探針下至樣品表面，讓探針尖與樣品表面的原子發生作用。亦如前文所提，對於各種不同表面結構的樣品，且所使用的商用探針尖也各自具有不同的幾何結構與大小，再加上環境的影響，使得只用單純的理論來討論探針－樣品間的作用，可能與實際的物理現象會有嚴重的落差。

一般而言，探針與樣品表面的作用可透過所謂的「振幅－距離曲線 (amplitude-distance curve, ADC)」來一窺究竟，且藉由此曲線，不僅可了解樣品表面水膜對探針運動的影響，也可以決定掃圖時另一個探針的工作參數，即探針與表面作用力大小的設定值，通常稱為設定值 (set point)。也就是說，於輕敲模式中，必須正確決定共振頻率、振幅與設定值等三個探針的工作參數，才能掃到品質佳的影像。這雖然不是絕對的條件，但絕對是正確操作輕敲模式的前提。

如圖 16 所示 (註 10)，所謂的「振幅－距離曲線」，即是將探針以一定的激振頻率、振幅運作後，再將探針逐步來回接觸樣品表面，同時紀錄探針的振幅 (垂直軸所示之值，為探針振幅的 RMS (root mean square) 電壓值) 以及與表面的距離 (水平軸所示之值，為探針與樣品表面於垂直方向上的相

距)。

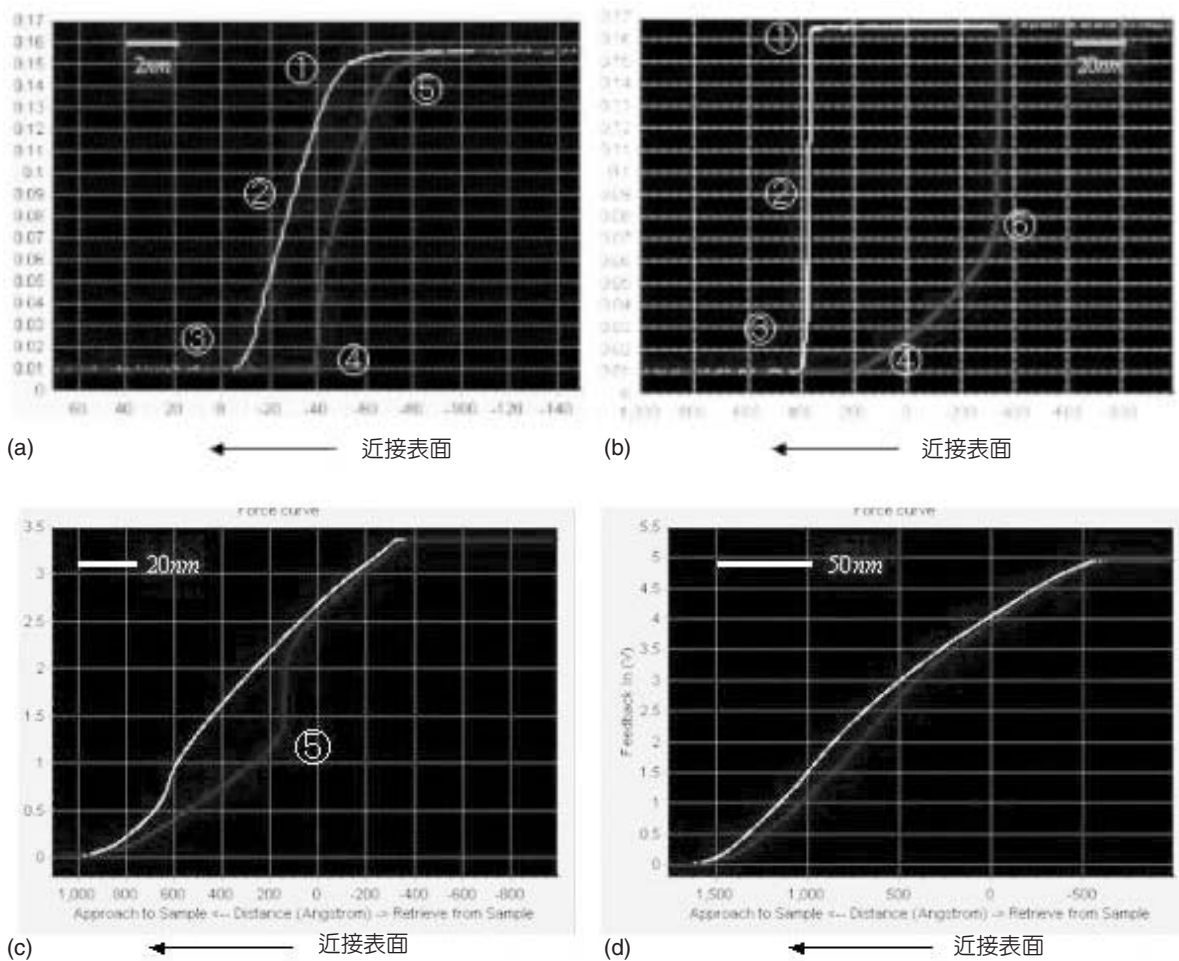


圖 16. (a) 石墨表面的 ADC (振幅 4-6 nm /無水膜)；(b) 石墨表面的 ADC (振幅 4-6 nm /有水膜)；(c) 石墨表面的 ADC (振幅 130 nm /有水膜)；(d) 石墨表面的 ADC (振幅 200 nm /有水膜)。

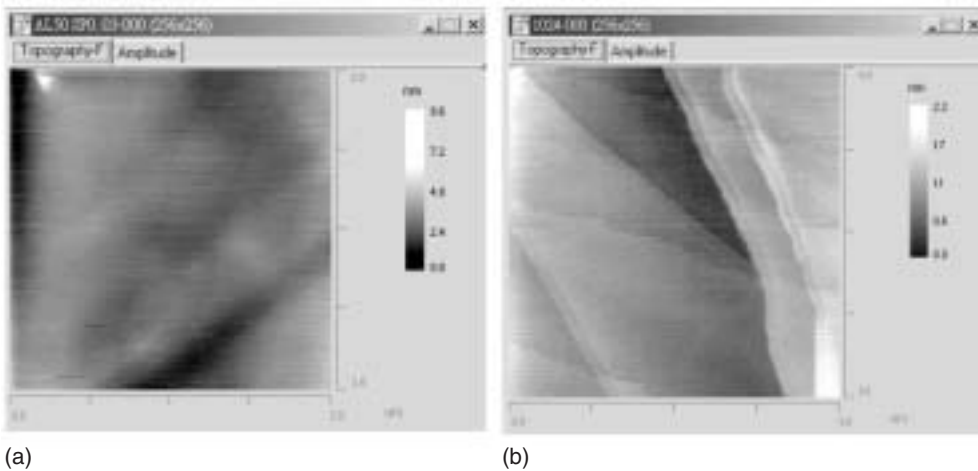


圖 17.
(a) 石墨表面形貌之影像 (有水膜)；(b) 石墨表面形貌之影像 (無水膜)。

對距離，單位為 nm)。

圖 16(a) 與 (b) 的量測是使用同樣的石墨樣品，並以非常小的振幅 (約 4—6 nm) 運作，(a) 與 (b) 的差異只在於水膜附著的有無。圖 16(a) 所示為樣品表面相對乾燥時的 ADC 圖。可清楚看到，① 當探針逐漸靠近表面並讓探針針尖碰觸到表面的斥力區時，探針的振幅即開始變小。② 如果讓探針繼續往表面接近的話，由於樣品表面的斥力越來越強，所以探針的振幅也隨之縮小，且該振幅—距離的變化具有近似線性的特徵。③ 當探針近接到相當的程度後，整個探針的 RMS 變成零 (即探針的振盪完全被表面斥力所壓制)。從 ① 到 ③ 探針移動距離，即可算出探針的振幅為 4—6 nm，這也是量測探針振幅的一種方法。④ 當探針往回拉至某一距離時，探針的振幅開始回復 (因為壓電陶瓷具有遲滯之特性，推斷 ③ 到 ④ 所移動的 4 nm 距離為遲滯現象所造成)。若讓探針繼續遠離表面，因表面斥力強度減弱，探針的振幅逐漸變大。當探針遠離至 ⑤ 處，因探針完全脫離樣品表面的斥力作用，探針的振幅則回復到近接前之起始狀態 (註 11)。

同樣的石墨樣品，經特意地將表面作濕潤處理後，再作一次 ADC，即可得到圖 16(b) 的結果。① 到 ③ 的過程大致與無水膜時的情況一致，且也可看出探針的振幅約在 5 nm 的範圍，這個數字與圖 16(a) 的結果一致。然而，於遠離樣品表面的過程中，需拉探針離表面約 80 nm 的距離，至 ⑤ 處，才能讓探針脫離水膜虹吸力的作用。所以當樣品表面存在水膜時，於探針的近接與遠離樣品表面的過

程所取得的 ADC 圖中，如果出現如圖 16(b) 般的大迴路，稱此現象為「水膜遲滯」現象。若水膜遲滯現象存在時，容易造成掃圖影像的惡化，原因是當探針於橫向的掃描過程中，因樣品表面形貌的起起落落，探針尖總有機會撞擊到表面，造成探針的振幅瞬間降為零。

此時，若設定值比 ⑤ 處的值還大的話，回授系統根據所設定的設定值，努力地將探針拉離表面，但因有遲滯的迴路，使得回授系統需將探針遠遠拉離表面後，才能克服水膜的吸力，然後再將探針送回表面。因此回授系統變得極不穩定，根本無法成像。若設定值比 ⑤ 處的值還小的話，回授系統會讓探針一直在水膜虹吸力區運作，所取得的像，其影像品質模糊，如圖 17(a) 所示。所以要取得好圖，如圖 17(b) 所示，使用者平常必須注意，應將待測樣品置放於防潮箱保存，以避免被濕氣附著，且量測環境應有適度的空調、除濕，才不致被水膜所困擾，但卻勿因此造成另一環境之干擾，即震動 (機械震動及噪音)、溫度不穩 (通常空調維持溫度能力不足，易造成室溫起落不定)。有關於環境干擾對原子力顯微儀量測的影響，將另外撰文說明。

如前文所述，克服水膜的唯一辦法就是加大探針的振幅。圖 16(c) 及 (d) 即於加大探針的振幅下，所取得的 ADC。如圖 16(c) 所示，雖然探針振幅已加大至 ~130 nm，但探針需遠離約 80 nm 的距離後 (與前面振幅為 4—6 nm 時的數據一致)，至 ⑤ 處，才能脫離水膜的虹吸力。如圖 16(d) 所示，

再把探針的振幅加大至 200 nm，則可完全脫離水膜虹吸力束縛。然而，不論是用 130 nm，或用 200 nm 的振幅掃圖，如前文所述，探針振幅加大時， Q 值會下降，並導致靈敏度降低；且因振幅加大，探針的運動能量增加，由探針轉移至樣品的能量也相對地提高，容易造成樣品表面的破壞與探針尖的磨損，對表面量測造成負面的結果。事實上，根據筆者的量測經驗，如此大的振幅是無法對如石墨般具有細微的表面結構進行量測。就算使用較大之振幅以克服水膜的影響，通常也取不到清晰的圖像。

若透過 ADC 的量測，不僅可先了解水膜干擾的程度，也可用來決定探針第三個工作參數，即探針與表面作用力的設定值。此處先說明如何根據 ADC 來選定適當的設定值，再說明設定值在原子力顯微儀回授系統中的物理意義。

在選定值設定時，只有一個原則，即在 ADC 圖中找出斜率變化最大的振幅值。其實，換一個角度來看 ADC 時，ADC 是描述在樣品表面之固定點上，探針與表面間作用力與高度的關係。根據式 (29) 及 (42) 之理論解析，作用於探針外力的 $F'_{ext} = dF_{ext}/dz$ 越大時，探針振幅的變化量 ΔA_0 即越大。 ΔA_0 越大也就代表探針可更靈敏地反映出作用力的變化，使得原子力顯微儀的回授系統可更有效率的運作 (註 12)。以石墨表面量測為例 (探針振幅為 4–6 nm、石墨表面為無水膜的狀態)，如圖 18 所示，① 處的斜率變化緩慢，將設定值設在此區域時，容易造成回授的不穩定，較難取得可靠的影像。③ 處的斜率變化雖然不錯，但如之前所述，由於表面作用力太強，探針的振幅被壓縮至一半以下，有相當多的探針運動能量被轉移至表面，可能會造成樣品表面的破壞與加速針尖的磨損。所以最適當的區域為 ② 處，也就是兼顧了較佳的靈敏度與較少的能量轉移。

4. 維持等作用力的回授掃描

於前文第四章之第 2 節，主要介紹在無外力作用下探針的運動理論，藉此讓讀者可深入了解探針運動的物理特徵，並針對使用輕敲模式時所需設定的探針工作參數 (即共振頻率、與振幅大小) 作詳盡之說明。於前文中透過探針與樣品表面作用之實

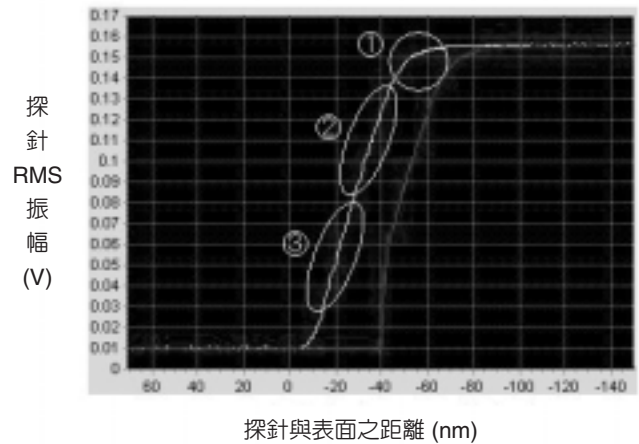


圖 18. 石墨表面的 ADC (振幅 4–6 nm / 無水膜)。

際量測，即 ADC 圖，說明了如何設定另一個探針工作參數 (即設定值)。對於原子力顯微儀輕敲模式的操作，只要掌握這三項值，任何人皆可輕鬆地取得品質好且正確的影像。

本文的最後，再針對輕敲模式運作的基本原理，也就是維持等作用力的回授掃描作一說明。並繼前文的說明，設定值是代表一個探針振幅大小的值，這個值的物理意義是呈現探針與表面間所發生作用力大小。使用者透過 ADC 的量測，決定最佳的設定值後，如圖 6 所示，透過原子力顯微儀的控制器 (如個人用電腦)，將這個值提供給回授系統。另外，如圖 19 所示，當原子力顯微儀的控制器送出掃描驅動訊號，開始驅動 XY 軸掃描器後 (由壓電陶瓷致動器所構成)，讓樣品可在 X 及 Y 方向上移動 (註 13)。於是，因為樣品表面形貌起伏的關係，探針與表面間所發生的作用力也不斷地變化，使得探針的振幅也因此變大 (碰到低窪地區) 或變小 (撞到突起物)。

透過光槓桿 PSD 的偵測，可將探針振幅的大小轉換成一電壓訊號 ΔV (紅色曲線)。該電壓訊號 ΔV 再經過一 RMS 的平均處理後，可輸出一直流 DC 訊號 A_{rms} ， A_{rms} 即代表探針與表面作用後振幅之大小，這個值也呈現出表面作用力之大小。將 A_{rms} 與設定值 A_{ref} 經一比較器處理後，輸出一差值 ΔA ，回授系統即根據這個 ΔA 值，不斷地調整探針與表面的距離 ΔZ ，使得探針的振幅 A_{rms} 能於掃描過程中都維持在設定值 A_{ref} 附近，也就是於掃描過

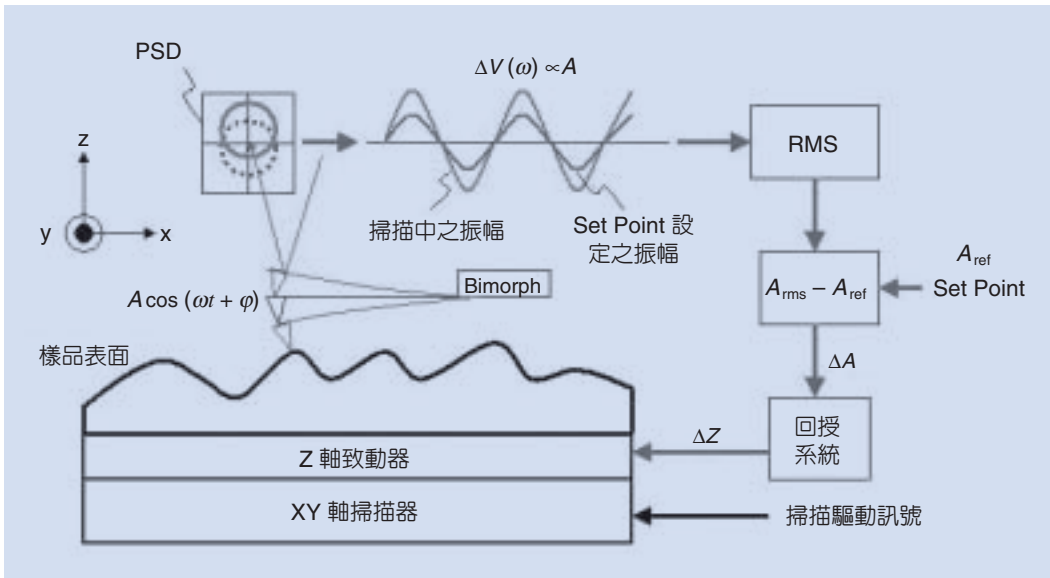


圖 19. 維持等作用力的回授掃描。

程中，讓 ΔA 一直維持在幾乎為零的狀態。另外，回授所送出的 ΔZ 就成為表面的相對高度，經電腦軟體重組、分析計算後，即可繪出表面形貌，如圖 20(a)–(g) 所示 (註 14)。所以輕敲模式的精髓，即是將探針與表面的作用力，於掃描過程中，透過適當的回授，將探針的振幅一直維持在設定值，達到維持等作用力掃描的目的 (註 15)。最後，僅以一張筆者最得意之影像，如圖 20(h) 所示，奈米中的山水畫與讀者共享。

五、結論

原子力顯微儀是由光學、機械、電子、控制、軟體與物理等領域技術所構成的整合體，屬於一種超級精密的量測儀器，可以奈米層級的解析度來觀測樣品表面的結構。雖然並非所有的使用者都有機會接觸這些技術的細節，但只要了解基本的物理原則，即可駕馭機器，並取得可靠的數據。對於輕敲模式的操作，使用者只要掌握解探針的激振頻率、振幅大小及設定值等三個物理量，且注意並避開溫度、溼度、震動等環境的干擾，即可輕鬆取得正確可信且清晰的圖像。

誌謝

特別感謝中央研究院物理研究所黃英碩先生的校稿、安冠奈米科技股份有限公司阮基晏先生、陳雅柔小姐所提供的實驗數據、劉璋哲先與何宗憲先生所提供的繪圖，以及安冠所有同仁的校稿。

附註

8. 環境的溫度與震動也是干擾量測結果的另一重要因素，此處不另加說明。
9. 安冠的原子力顯微儀可設定 τ 的時間，但一般商用的原子力顯微儀，並未預留可由使用者設定 τ 的功能。
10. 此圖為使用安冠自製原子力顯微儀所實測之圖。
11. 筆者常在如圖 16(a) 的狀態下，使用安冠自製的原子力顯微儀，以 4–6 nm 振幅掃取石墨原子台階的影像，所得結果足以媲美一流品牌的量測結果。
12. 回授的目的是於橫向掃描過程中，將探針與樣品表面間的作用力，一直維持在設定值，亦即維持等作用力之掃描，這也就是原子力顯微儀的最根本原理與精神所在。

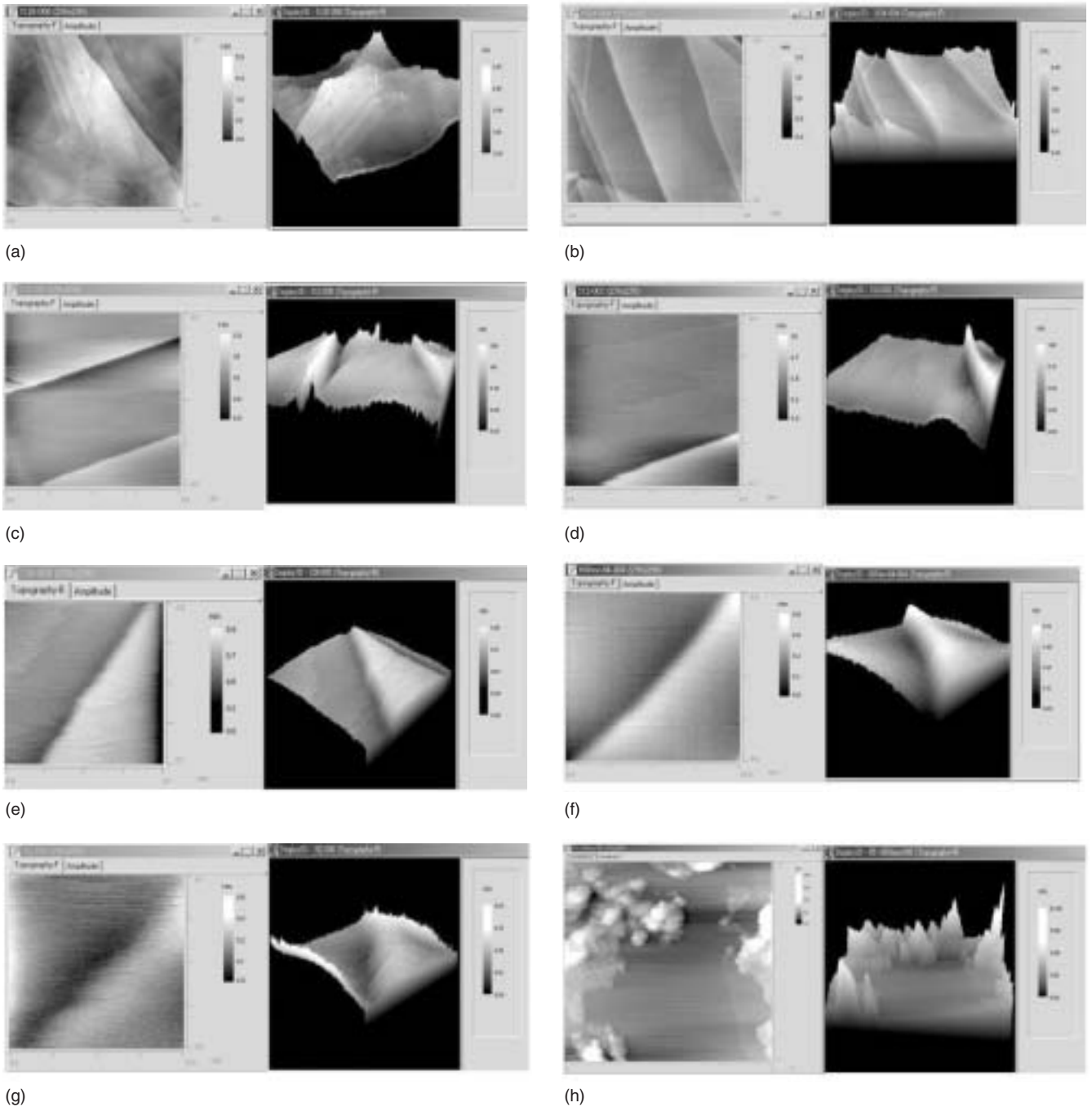


圖 20. (a) 掃描範圍 5120×5120 nm / 掃描器全行程 $60 \times 60 \times 4$ μm ; (b) 掃描範圍 1024×1024 nm / 掃描器全行程 $60 \times 60 \times 4$ μm ; (c) 掃描範圍 512×512 nm / 掃描器全行程 $2 \times 2 \times 1$ μm ; (d) 掃描範圍 256×256 nm / 掃描器全行程 $2 \times 2 \times 1$ μm ; (e) 掃描範圍 128×128 nm / 掃描器全行程 $2 \times 2 \times 1$ μm ; (f) 掃描範圍 64×64 nm / 掃描器全行程 $2 \times 2 \times 1$ μm ; (g) 掃描範圍 32×32 nm / 掃描器全行程 $2 \times 2 \times 1$ μm ; (h) 掃描範圍 1024×1024 nm / 掃描器全行程 $60 \times 60 \times 4$ μm 。

13. 此處所舉之例為掃樣品式之掃描，即移動樣品、但探針不動；另外，也有掃針式之掃描，即將探針裝置在掃描器上，掃描移動探針、但樣品不動
14. 取圖所用的機器為安冠自製之原子力顯微儀，使用輕敲模式及一般商業用探針，量測環境為安冠辦公室；圖左邊為表面形貌，右邊為 3D，使用樣品為石墨，圖上之大部分的線狀結構物為原子台階，高度只有 ~ 0.3 nm。
15. 回授是原子力顯微儀的核心技術之一，對取圖品質的優劣有絕對的影響，礙於篇幅之限制，需另撰文說明。

參考文獻

16. T. R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, and D. Rugar, *J. Appl. Phys.* **69** (2), (1991).
17. J. P. Cleveland and B. Anczykowski, *USA Patent Number: 6,038,916*.
18. R. G. Winkler *et al.*, *Physical Review B*, **54** (12), (1996).
19. J. Tamayo and R. Garcia, *Appl. Phys. Lett.*, **71** (16), 2394 (1997).

-
- 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。
 - 張嘉升先生為美國亞利桑那州立大學物理博士，現任中央研究院物理研究所研究員。
 - 黎文龍先生為美國德州科技大學機械工程博士，現任國立台北科技大學機械系教授。
 - Ming Yen Lin received his M.S. in physics from Tokyo University, Japan. He is currently the general manager of Angsnanotek Co., Ltd.
 - 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.
 - Wenlung Li received his Ph.D. in mechanical engineering from Texas Tech University, USA. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taipei University of Technology.