

# 原子力顯微儀輕敲模式操作最佳化之理論、方法、條件與實證 (上)

## A New Approach of Optimizing the Operation for Atomic Force Microscope in Tapping Mode (I)

林明彥、洪紹剛、阮基晏、劉璋哲、蘇揚智、應雄

Ming Yen Lin, Shao Kang Hung, Chi-Yen Juan, Wei Che Liu, Yang Chih Su, Sean Ying

原子力顯微儀所提供的「輕敲模式」，雖已被廣泛地應用於表面量測，但對於大多數非 AFM 專業的使用者而言，「輕敲模式」的操作與量測通常只是停留在試行錯誤的經驗法則，無法正確設定各掃描參數，達到正確取像之目的。本文根據探針尖與樣品表面原子間的作用，從探針之靈敏度及能量損耗之觀點，以數理解析之方式，詳盡說明探針尖振幅與 set point 值最佳化之理論與方法。另外，導入掃描中表面形貌變化與系統回授等兩個動態因素，建立了一新的原子力顯微儀「輕敲模式」之理論解析模式，並發展出掃描取像最佳化之條件。於實際的原子力顯微儀機器之上，則做了「雜訊最小化」及「回授增益最佳化」之處理後，利用四台不同之機器，透過對四種不同樣品之實際掃圖，證明本文所提論述的正確性。對於廣泛的使用者而言，提供了一「輕敲模式」正確的操作理論、方法及條件，以達到取得最清晰影像之目的。在此實證中，意外觀察到造成艾茲海默症結晶蛋白表面上的超細微結構，對於解開艾茲海默症結晶蛋白形成的機制，相信將會有所貢獻。

Tapping mode, one of the imaging methods in the atomic force microscope, has been widely used in surface measurement for decades. However, most operators who do not know the nature of the AFM may probably acquire a wrong image by try-and-error or improper setup of the AFM. In this article, according to the tip-sample interaction, a theory and method of optimizing the oscillating amplitude of the probe tip and the Set Point of the feedback system, is analytically developed from the tip sensitivity and the tip energy dissipation. A new approach of the Tapping mode, including both dynamic factors of the surface topography variation and the system feedback in scanning, is developed for the optimum criterion for AFM operation. Furthermore, the developed theory, method and rule were proved by the images scanned from four different samples. And each sample was scanned by one of four different AFMs with the process of the noise minimization and feedback gain optimization. Therefore, a theory, method and rule of optimizing the operation for AFM in tapping mode are provided and allow users to acquire images in best quality. Finally, an image with fine structures on the surface of amyloid fibrils that cause the Alzheimer's disease was first observed coincidentally during the experiments. We believe that the discovery will definitely contribute to reveal the forming process of the deposition of protein fibrils.

## 一、前言

相較於傳統的電子顯微鏡或者是 X 光顯微術<sup>(1,2)</sup>，可於大氣下操作的原子力顯微儀提供了一更經濟、更方便的表面量測方法，其應用已逐漸深入學術界及工業界等廣泛之領域，成為表面量測不可或缺的重要儀器。一般原子力顯微儀提供接觸式、輕敲式(附註 1)及非接觸式等三種基本表面量測之模式<sup>(3)</sup>，所取得量測之影像，不論是縱向或者是橫向之解析度，皆可達奈米之層級，甚至達原子層級。雖然接觸模式可取得解析度較佳之影像，但由於容易造成探針尖及樣品表面之損傷，同時對較軟與附著力較差的待測樣品(如生物樣品)容易產生形變、刮動的現象。另外，非接觸模式一般需操作於昂貴的超高真空(UHV)及非常穩定之環境中，以避開大氣中溼氣的影響、及其他的環境干擾，才能讓探針運作於凡得瓦吸力區。所以相較於「輕敲模式」，接觸模式與非接觸模式的應用頻度較低。因此，本文只對「輕敲模式」的使用，根據探針尖—樣品作用(tip-sample interaction)的物理行為，從探針之靈敏度及能量損耗之觀點，以數理解析之方式，詳盡說明探針尖振幅與 set point 值最佳化之理論與方法。另外，導入實際掃描中所發生之表面形貌變化與系統回授等兩個動態因素，建立了一新的原子力顯微儀「輕敲模式」之理論解析模式，並發展出掃描取像最佳化之條件。於安冠自製的原子力顯微儀之機器上，則做了「雜訊最小化」及「回授增益最佳化」之處理後，對奈米顆粒球(直徑 20–50 nm)、ZnO 顆粒(直徑 < 10 nm)、結晶蛋白(直徑 4–8 nm)及奈米碳管(直徑 ~2 nm)等四種不同樣品做實際之掃圖，以證明本文所提之理論、方法及條件的正確性。於本實驗中，無意中觀察到造成艾茲海默症的結晶蛋白(amyloid fibrils)表面上的超細微結構，對於解開艾茲海默症結晶蛋白的形成機制，相信將會有所貢獻。對於「輕敲模式」廣泛的使用者而言，也提供了一正確的物理觀念、掃描參數最佳化之方法及掃描取像最佳化之條件，以達到取得最清晰影像之目的。

## 二、探針尖—樣品作用

### 1. 固定點之探針尖與樣品表面之作用

一般於「輕敲模式」的操作中，對於探針尖與樣品表面原子間作用的物理現象，係透過對樣品表面某一固定點作「振幅—距離曲線(amplitude-distance curve, 簡稱 ADC 圖)」，即可清楚得知於該點上，探針尖振幅變化與表面高度的關係。一個理想的 ADC 圖如圖 1 所示，所謂理想之意，係指 ADC 之取得符合下列之條件(附註 2)：

- (1) 樣品表面相對乾燥與乾淨，即無水膜、或異物吸附於樣品表面。
- (2) 探針與表面間傳遞的能量可忽略，即探針與表面作用時，因探針振幅的變小所損失之運動能量，不致造成樣品表面的刮傷、形變、探針尖磨損、探針尖吸附樣品等現象。
- (3) 探針尖所敲擊樣品表面之點為固定，即探針尖可視為點狀之結構，且 X 與 Y 方向之壓電陶瓷掃描器不發生 creep 之現象。

通常 ADC 圖的取得，係對一具有激振頻率與振幅並做簡諧運動之探針，於表面某一 XY 處，逐步將該探針近接至樣品表面，並使探針尖進入作用力區(①→②→③)。是以，探針尖振幅由  $A_0$  (即於無表面作用力時之振幅) 隨著探針的近接表面，因表面斥力的增加，逐漸縮小至零(即探針的振盪

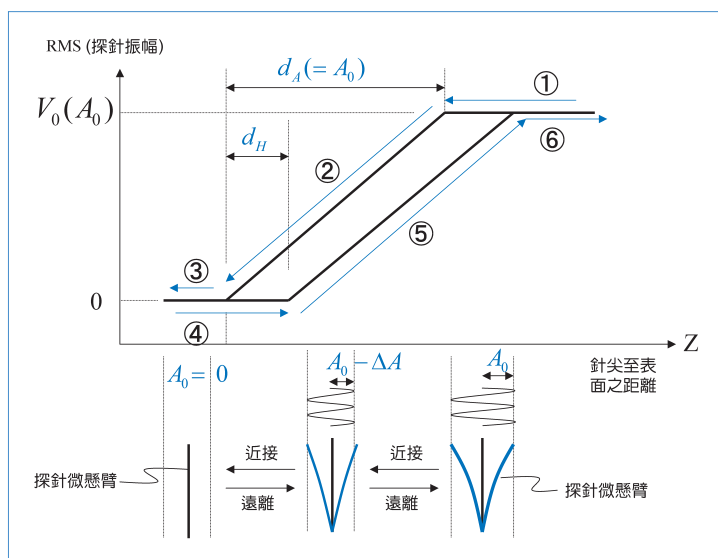


圖 1. 理想的 ADC 圖。

完全被表面斥力所壓制)。之後，再將探針逐步拉離樣品表面，最後使探針尖完全脫離表面作用力區(④→⑤→⑥)。是以，隨著探針的遠離表面，因表面斥力的減輕，探針尖振幅由零逐漸回復至  $A_0$ 。在這個近接與遠離樣品表面作用力區的過程中，同時紀錄探針尖的振幅(垂直軸所示之值為探針尖振幅，經 PSD 檢測並經 RMS 處理後，最終以電壓值呈現)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對距離，單位為 nm)，即可取得完整的 ADC 圖。其中， $d_A$  所示之距離為探針尖之振幅  $A_0$ ，而  $d_H$  則為 Z 軸方向上之壓電陶瓷掃描器之遲滯距離。

## 2. 掃描中之探針尖與樣品表面之作用

如圖 2(a) 所示，令探針以某一非常近接樣品表面之固定高度  $Z_{scan}$  (即探針尖可碰觸到表面作用力區) 及速度  $v$ ，於某一時間間隔內  $\Delta t_s$ ，由位置  $x_1$  向右做微量移動至  $x_2$ ，因樣品表面形貌高度的變化  $\Delta z$ ，探針尖所觸及表面的高度則由  $z_1$  微量變化至  $z_2$ 。是以，在前述之理想狀態 (即探針與表面間傳遞的能量可忽略，且探針尖可視為點狀之結構) 且無系統回授的狀態下，探針振幅由  $A_1$  變化至  $A_2$ 。其關係如下：

$$x_2 = x_1 + \Delta x_1 \quad (1)$$

$$z_2 = z_1 + \Delta z \quad (2)$$

$$A_2 = A_1 - \Delta A_1 \quad (3)$$

$$\Delta x_1 = v \times \Delta t_s \quad (4)$$

$$\Delta z = n_x(x_1) \times \Delta x_1 \quad (5)$$

其中， $n_x(x_1)$  即為樣品表面  $x_1$  處，於 X 方向上形貌高度變化的斜率。如果將式 (3) 對式 (2) 作圖，即可取得類似 ADC 曲線圖，如圖 2(b) 所示。此圖清楚表達，於掃描中，當探針碰到突起之結構物時，探針的振幅會變小 (因斥力變大)，而碰到陷下之結構物時，探針的振幅則變大 (因斥力變小)。探針尖振幅的變化量與形貌高度變化量有關，是由  $n_x(x_1)$  及  $v$  所決定。

## 三、輕敲模式的基本運作原理—等作用力回授掃描

一般於輕敲模式下，原子力顯微儀所操作的等作用力掃描的達成如圖 3(a) 所示。係對於表面形貌高度的變化  $\Delta z$  (可視為探針尖作用力之實際改變量，如前述，與貌高度變化的斜率及掃描速度有關)，所造成探針振幅的變化  $\Delta A_1$  (可視為探針尖振幅對作用力改變，所產生的等效改變量；而  $\Delta V_1$  即為  $\Delta A_1$  的 RMS 電壓值，為實際光槓桿所檢測之量測值)，是透過一電子系統之回授，於有限的時間內  $\Delta t_{FD}$ ，以改變探針基座的垂直高度  $\Delta z_{FD}$ ，可將探針的振幅拉回  $A_1$ ，最後使得  $\Delta A_1$  逼近零，並得到  $\Delta z_{FD} \approx \Delta z$  (如後續之理論證明)。所以， $\Delta z_{FD}$  即為樣品表面之相對高度， $\Delta t_{FD}$  即為該原子力顯微儀整體系統的反應時間，而  $V_1$  即可視為等作用的參考值 set point ( $V_1$  為  $A_1$  等效 RMS 電壓值)。理論上，一個完美的原子力顯微儀，對於作用力的改變，整體系統回授可於瞬間 (即  $\Delta t_{FD}$  趨近於零) 移動  $\Delta z_{FD}$ ，

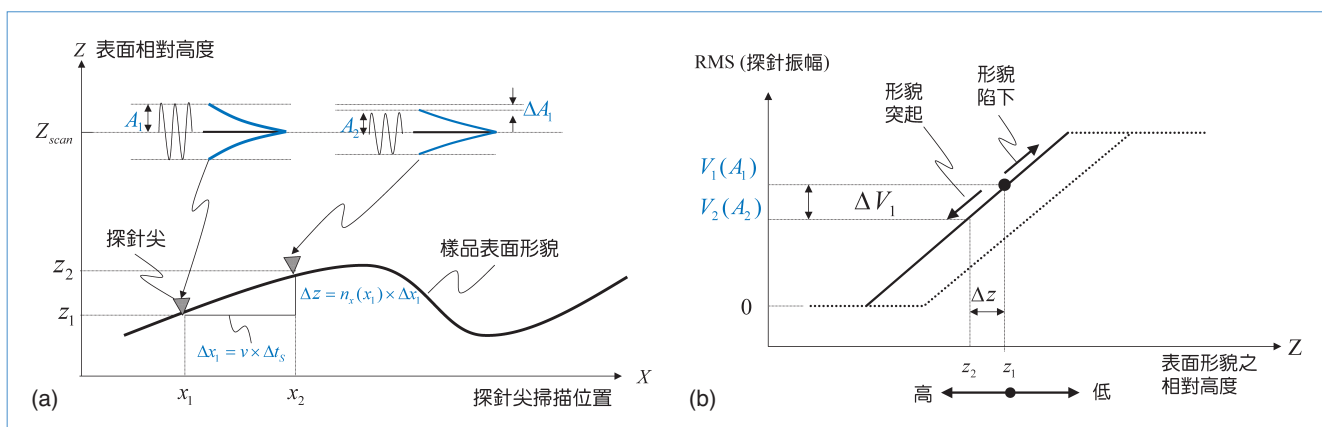


圖 2. (a) 探針尖振幅與掃描位置、表面形貌之關係，(b) 掃描中探針尖振幅與表面高度之關係。

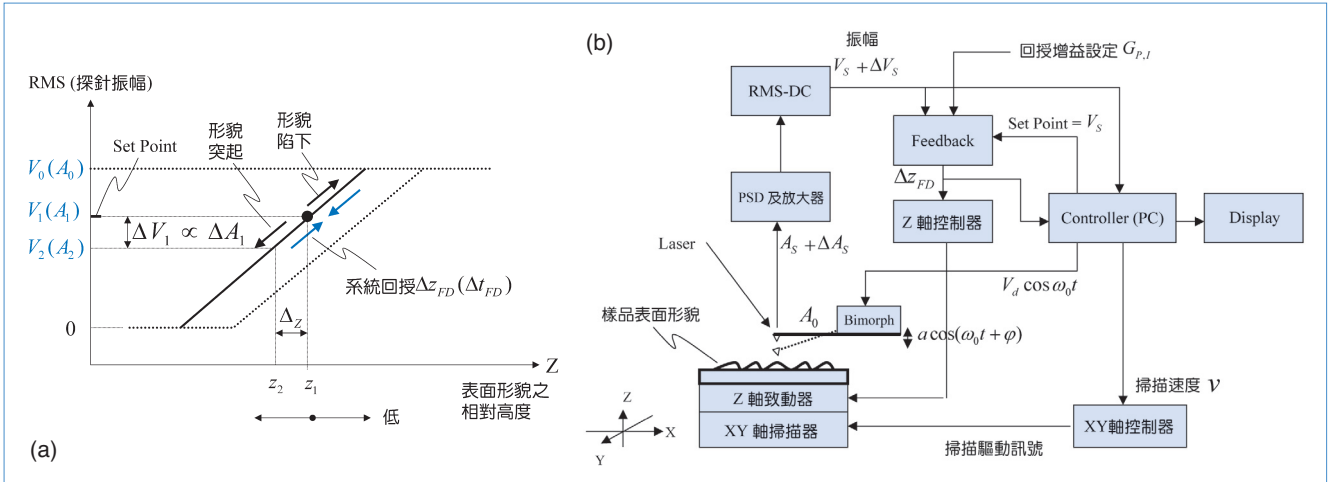


圖 3.(a) 掃描中探針尖振幅、表面高度與回授之關係，(b) AFM 系統方塊圖與掃描工作參數。

且讓  $\Delta A_1$  趨近於零，即達等作用力的目的。但是，由於原子力顯微儀中的機械（主要是 Z 軸的壓電陶瓷掃描器、探針）與電子（主要是 RMS-DC、回授電路中的 I-gain）的反應速度有限，通常系統整體的反應速度可長達數毫秒 (ms) 之程度。是以，根據等作用力回授掃描原理運作的「輕敲模式」，其系統方塊圖與必要之掃描工作參數如圖 3(b) 所示。

#### 四、輕敲模式的操作理論－掃描參數之最佳化

如前述及如圖 3(b) 所示，探針激振頻率  $\omega_0$ 、探針激振電壓振幅  $V_d$  (可產生一探針激振振幅  $a$ ，最後產生探針尖之實際振幅  $A_0$ ， $A_0$  即為無表面作用力時，探針尖自由運動之振幅)、探針尖與表面作用力 set point 值  $V_S$ 、系統回授增益值  $G_{P,I}$  及掃描速度  $v$  等，為操作「輕敲模式」時所必須設定的工作參數。其中，探針激振頻率  $\omega_0$ ，是透過電腦之控制軟體，為對探針作掃頻時，即可取得探針之共振頻率  $\omega_0$ ；另外，於原子力顯微儀上，對電子系統已作雜訊最小化及增益值  $G_{P,I}$  最佳化之處理 (附註 3)，無需使用者輸入設定值。是以，使用者所必須決定的工作參數只剩下：探針激振電壓振幅  $V_d$  (即探針尖振幅  $A_0$ )、探針尖與表面作用力 set point  $V_S$  及掃描速度  $v$  等三項。以下將在此雜訊最

小化及增益值  $G_{P,I}$  最佳化處理的條件下，說明探針尖振幅  $A_0$ 、探針尖與表面作用力 set point  $V_S$  及掃描速度  $v$  等三項參數最佳化的方法，以及理論上的根據與實驗證明。

為簡化理論之計算<sup>(4,7)</sup>，以下的理論探討，係將探針尖視為一做簡諧震盪運動之等效彈簧，並令其具有等效彈性係數  $k$ 、自然共振頻率  $\omega_0$ 、且  $Q \gg 1$ ；激振壓電陶瓷以  $a \cos(\omega_0 t + \varphi)$  驅動探針，其中  $a$  是壓電陶瓷的激振振幅，並令  $\varphi = 0$ ；空氣中的阻尼係數為  $b$ 。另外，探針尖的運動受下列條件之限制：

- (1) 對於可能加諸於探針尖上的作用力，只考慮懸臂之線性彈性力  $f_c$ 、環境阻尼之摩擦力  $f_v$  及探針尖一表面之作用力  $f_{ts}$ ，則探針尖運動方程式可為<sup>(4,5)</sup>：

$$m\ddot{z}_T = F_{tip} = f_c + f_v + f_{ts} \quad (6)$$

$$f_c = -k(z_T - z_d) \quad (7)$$

$$f_v = -b\dot{z}_T \quad (8)$$

其中，

$$z_d = a \cos \omega_0 t \quad (9)$$

$$b = \frac{k}{\omega_0 Q} \quad (10)$$

(2) 探針尖運動的起始狀態為空氣中的自由震盪 (即  $f_{is} = 0$ )，且已達穩定之狀態，其運動可由下式描述：

$$z_T = A_0 \cos(\omega_0 t + \pi/2) \quad (11)$$

且探針尖振幅  $A_0$  與壓電陶瓷的激振振幅  $a$  具有以下之關係，

$$A_0 \cong aQ \quad (12)$$

(3) 令探針尖一表面作用力之斜率  $|f'_{is}| = |df_{is}/dz_T| \ll k$ 。

(4) 探針尖與表面發生作用 (即  $f'_{is} \neq 0$ ) 後，探針的運動即進入一過渡態、並於約  $QT_0$  ( $T_0 = \omega_0/2\pi$ ) 的時間後進入一穩定態。此穩定態的共振頻率由  $\omega_0$  偏移至  $\omega'_0$ 、振幅由  $A_0$  偏移至  $A'_0$ 、相位由  $\pi/2$  偏移至  $\pi/2 + \delta$ 。其運動則可由下式描述：

$$z'_T = A'_0 \cos(\omega_0 t + \delta') \quad (13)$$

其中，

$$A'_0 = A_0 - \Delta A_0, \quad \Delta A_0 \cong \frac{f'^2_{is}}{2k^2} A_0 Q^2 \quad (14)$$

$$\delta' = \frac{\pi}{2} + \delta, \quad \delta \cong \frac{f'_{is}}{k} Q \quad (15)$$

$$\omega'_0 = \omega_0 + \Delta\omega, \quad \Delta\omega \cong -\frac{f'_{is}}{2k} \omega_0 \quad (16)$$

式 (14) 描述  $\Delta A_0$  與探針一表面作用力  $f'_{is}$ 、探針尖振幅  $A_0$  及探針  $Q$  值之關係。

### 1. 探針尖振幅的選擇 (振幅越小越好)

探針尖振幅的選擇，其原則是儘可能地降低探針的激振電壓  $V_d$ ，以取得較小的振幅  $A_0$ 。其理由是，探針尖振幅越小時，具有較大的  $Q$  值，對於外力作用的改變，可更靈敏反應外力作用的變化。其結果是，可讓回授系統更有效率的運作，可於更

短時間內達到等作用力回授掃描之目的，即可提高掃描速度及減少表面高度量測之誤差。首先，以理論證明探針的  $Q$  值越大，反應越靈敏；其次，以實驗證明探針尖振幅越小，可得較大的  $Q$  值。

根據前述之假設，於無外力作用之下  $f'_{is} = 0$ ，令於  $t = 0$  時，運動方程式 (6) 之解即已達穩定之狀態，且可表達如下：

$$z_T(t \leq 0) = A_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (17)$$

令於  $t = 0$  時，探針尖受到一外力  $f'_{is} \neq 0$  之作用後，探針尖的運動狀態，改變成為同時具有一新的穩定態與一新的過渡態：

$$z'_T(t \geq 0) = A'_0 \cos(\omega_0 t + \theta'_0) + A_t e^{-\omega_0 t/2Q} \cos(\omega_t t + \theta_t) \quad (18)$$

其中，新的過渡態中，則具有新的振幅  $A_t$ 、自由諧振頻率  $\omega_t$  及相位  $\theta_t$ 。

$$\omega_t = (\omega_0'^2 - \beta^2)^{1/2} \cong \omega_0 \left[ 1 - \frac{1}{2} \frac{f'^2_{is}}{k_e} \right] \cong \omega_0 - \Delta\omega_0 \quad (19)$$

若將受外力作用前之穩定態、受外力作用後之穩定態與過渡態之振幅，皆以複數向量方式表達，則可得

$$\tilde{A}_0 = A_0 e^{i\theta_0} \quad (20)$$

$$\tilde{A}'_0(t) = A'_0 e^{i(\omega_0 t + \theta'_0)} \quad (21)$$

$$\tilde{A}_t(t) = A_t e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} e^{i(\omega_t t + \theta_t)} \quad (22)$$

於  $t = 0$ ，令式 (20)、(21) 與 (22) 符合起始運動條件 (initial condition)，可得

$$\tilde{A}'_0(0) + \tilde{A}_t(0) = \tilde{A}_0 \quad (23)$$

式 (23) 中，過渡態向量  $\tilde{A}_t(0)$  與穩定態向量  $\tilde{A}'_0(0)$ 、外力作用前之穩定態向量  $\tilde{A}_0$ ，其向量長度與角度

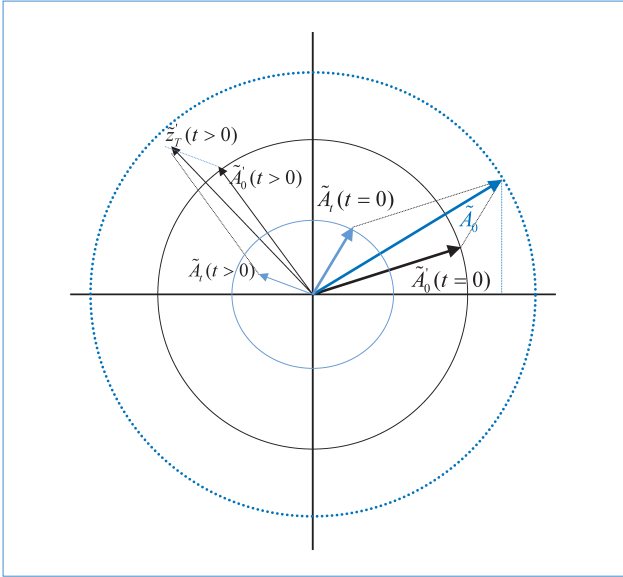


圖 4. 以複數向量方式表達探針尖之運動狀態。

的關係為

$$A_i^2 = A_0^2 - A_0'^2 - 2A_0'A_i \cos(\theta_i - \theta_0') \quad (24)$$

$$\tan \theta_i = \frac{A_0 \sin \theta_0 - A_0' \sin \theta_0'}{A_0 \cos \theta_0 - A_0' \cos \theta_0'} \quad (25)$$

將式 (20)、(21) 及 (22) 之向量以極座標作圖，即可得圖 4 之關係。是以，對於  $t \geq 0$  後之任意時間，受外力作用後探針之運動狀態的向量即為

$$\tilde{z}_r(t) = \tilde{A}_0'(t) + \tilde{A}_i(t) \quad (26)$$

對式 (26) 做  $\tilde{z}_r \times (\tilde{z}_r)^*$  運算，即可取得受外力作用後探針尖運動狀態之振幅平方值，

$$\|\tilde{z}_r'(t)\|^2 = A_0'^2 + A_i^2 e^{-\omega_0 t/Q} + 2A_0'A_i e^{-\omega_0 t/2Q} \times \cos[(\omega_i - \omega_0)t + (\theta_i - \vartheta_0')] \quad (27)$$

式 (27) 描述了探針的機械反應時間與靈敏度等兩個物理特性。當  $t \gg 2Q/\omega_0$  ( $\cong Q/\pi\omega_0 \propto QT_0$ ) 時，過渡態的振幅  $A_i$  衰減至零，最後只剩穩定態之振幅  $A_0'$ 。是以，一般將  $QT_0$  定義為探針的機械反應

時間。因此，受外力作用後探針尖運動的行為， $Q$  值越大，達到穩定態所需的時間則越長。探針的另一個特性是， $Q$  值越大、反應越靈敏。其物理意義為，當探針尖受到外力作用後之瞬間，於某一固定之短時間內，探針尖振幅的變化量越大，其反應就越靈敏。對於反應越靈敏的探針，回授系統才能更有效率的運作，可於更短時間內達到等作用力回授掃描之目的，即可提高掃描速度及減少表面高度量測誤差。對於  $Q$  值越大反應越靈敏，其理論證明如下。

由式 (27)，於時間  $t=0$ ，探針尖振幅平方值為

$$\|\tilde{Z}(0)\|^2 = A_0'^2 + A_i^2 + 2A_0'A_i \times \cos(\theta_i - \vartheta_0') \quad (28)$$

於時間  $t = \Delta t \ll 1$  時，探針尖振幅平方值為

$$\|\tilde{Z}(\Delta t)\|^2 = A_0'^2 + A_i^2 e^{-\frac{\omega_0 \Delta t}{Q}} + 2A_0'A_i e^{-\frac{\omega_0 \Delta t}{2Q}} \times \cos[(\omega_i - \omega_0)\Delta t + (\theta_i - \vartheta_0')] \quad (29)$$

對式 (29) 做泰勒級數展開，並忽略  $\Delta t$  二次方以上之項，可得

$$\|\tilde{Z}'(\Delta t)\|^2 = A_0'^2 + A_i^2 + 2A_0'A_i \cos(\theta_i - \vartheta_0') - \left\{ \frac{\omega_0'}{Q} A_i^2 - 2A_0'A_i \cos(\theta_i - \vartheta_0') \frac{\omega_0'}{2Q} - 2A_0'A_i (\omega_i - \omega_0) \sin(\theta_i - \vartheta_0') \right\} \Delta t \quad (30)$$

將式 (30) 減式 (28)，可得探針尖受到外力作用後之瞬間，於某一固定之  $\Delta t$  時間內，探針尖振幅平方值的變化量

$$\|\tilde{Z}'(\Delta t)\|^2 - \|\tilde{Z}'(0)\|^2 = - \left\{ \frac{\omega_0'}{Q} A_i^2 - 2A_0'A_i \cos(\theta_i - \vartheta_0') \frac{\omega_0'}{2Q} - 2A_0'A_i (\omega_i - \omega_0) \sin(\theta_i - \vartheta_0') \right\} \Delta t \quad (31)$$

式 (31) 的值主要受  $A_0'$  與  $A_i$  兩項值的影響，於表

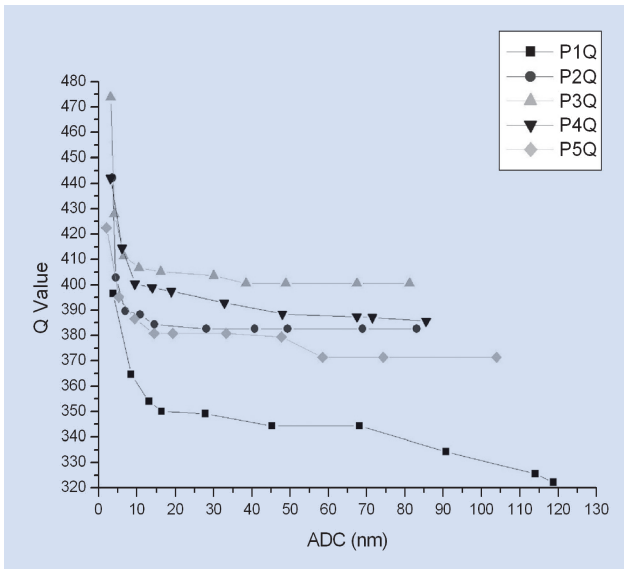


圖 5. 探針之  $Q$  值與振幅之關係。

面作用力  $|f'_{is}| \ll k \cdot Q \gg 1$  的條件下，可做  $A_t \cong \Delta A_0$ 、 $A'_0 \cong A_0 - \Delta A_0$ 、 $\omega'_0 \cong \omega_0 + \Delta\omega_0$ 、 $\omega_t \cong \omega_0 - \Delta\omega_0$  之近似，並代入式 (31)，將  $\Delta^2$  之項捨去後，則式 (31) 只剩第二項，且根據式 (12) 及 (14)，並將式 (31) 除以時間  $\Delta t$  及受力前狀態之振幅平方值  $A_0^2$ ，則於  $t = 0$  時，單位時間探針振幅平方值的相對變化量可近似成為

$$\frac{\|\tilde{Z}'(0)\|^2 - \|\tilde{Z}'(\Delta t)\|^2}{A_0^2 \Delta t} \cong \left\{ \frac{\omega_0}{Q} \cos(\theta_t - \vartheta'_0) \right\} \frac{A_0 \Delta A_0}{A_0^2} \quad (32)$$

$$\propto \frac{\Delta A_0}{Q A_0} \propto \frac{f_{is}^2}{k^2} Q$$

式 (32) 描述了探針的探針受外力作用後，對於固定之  $f'_{is}$  及  $k$ ，該單位時間探針振幅平方值的相對變化量是正比於探針  $Q$  值，亦即符合  $Q$  值越大、反應越靈敏的論述。

以下利用原子力顯微儀，針對 5 支一般商用輕敲模式用探針（廠牌：BudgetSensors、型號：BS-Tap300-A1，其物理特性：等效彈性係數  $k \sim 40$  N/m、共振頻率  $\omega_0/2\pi$  介於 200–300 kHz、 $Q$  值約介於 300–500 之間、探針尖半徑  $> 10$  nm），做掃頻及 ADC 之量測，以取得  $Q$  值對探針尖振幅之分

布圖，如圖 5 所示。所有的量測皆以示波器確認 PSD 電氣訊號在時間上及振幅上的對稱性，以確保探針尖受激振後，是以近似理想的簡諧運動做震盪。圖 5 所示之數據，皆為取樣 5 次之平均值。由於偏差值太小，無法於圖上顯示。由圖 5 可觀察到探針的物理特徵，即當 BudgetSensors 探針尖的振幅降至約 10 nm 以下時，探針的  $Q$  值即急劇上升。所以本實驗證明：於使用輕敲模式時，將探針尖操作於較小之振幅下可得較大之  $Q$  值。

## 2. 探針尖與表面之作用力 (Set Point 值越大越好)

探針尖與表面作用時，於過渡態下，因探針振幅的變小，會損失部分的運動能量；且於穩定態時，因探針尖與樣品表面的持續作用，也會釋放出一固定且具週期性之能量。當探針比表面硬時，該能量可由探針尖轉移至樣品表面之原子或分子；反之，該能量則可由探針表面原子所吸收。這些損耗的能量：(1) 假如超過樣品表面原子或分子間的鍵結能，可能會造成樣品表面的刮傷，對於如有機物、生物等較軟的樣品，也可能造成形變；(2) 假如超過探針尖上矽原子間的鍵結能，也可能造成探針尖磨損；(3) 假如超過樣品表面原子或分子與探針尖上矽原子間的鍵結能，也可能造成探針尖吸附樣品現象。因此，減少探針損耗的能量，即可避免上述樣品表面刮傷、形變、探針尖磨損及探針尖吸附樣品等現象，最終可取得更正確且清晰之影像。一般藉由適當地降低探針尖振幅及提高 set point 值，也就是降低探針尖與表面間之作用力，即可達到減少探針能量損耗之目的。

探針尖因受樣品表面作用後，其能量的損失可分成於過渡態中的能量損失  $\Delta E_{\text{tran}}$  與進入穩定態後的能量損失  $\Delta E_{\text{steady}}$ 。於過渡態中的能量損失  $\Delta E_{\text{tran}}$ ，可簡單視為探針運動能量的損耗，即探針尖振幅由  $A_0$  縮減至  $A'_0$  時所減少的運動能量。將式 (11)、(13) 對時間微分、平方、乘上 1/2 m 後，對時間積分並計算一週期之平均能量差異，可得

$$\Delta E_{\text{tran}} = \frac{1}{4} k (A_0'^2 - A_0^2) \approx -\frac{1}{2} k A_0 \Delta A_0 \quad (33)$$

若以實際探針之物理量： $k \sim 40 \text{ N/m}$ 、 $A_0 \sim 10 \text{ nm}$ 、 $\Delta A_0 = 1 \text{ nm}$  代入式 (33)，可得  $\Delta E_{\text{tran}} \approx -2 \times 10^{-16} \text{ J} = -1280 \text{ eV}$ ，負號代表由探針所釋放出之能量。是以，由式 (33) 可知，當探針的振幅  $A_0$  越大且  $\Delta A_0$  越大 (因作用力越大) 時，所釋放的動能  $\Delta E_{\text{tran}}$  就越多。 $\Delta E_{\text{tran}}$  動能的釋放通常發生於探針下到樣品表面之瞬間，所以，探針由遠離樣品表面下至樣品表面時，除了盡量降低  $A_0$  與  $\Delta A_0$  之外，也需降低探針的接近速度 (附註 4)，才能減少  $\Delta E_{\text{tran}}$ ，並減輕瞬間撞擊時，探針移動能量之轉移。另外，探針處於表面時，常有開關系統回授功能的操作，使用較低的  $A_0$  與  $\Delta A_0$ ，才能達到減少  $\Delta E_{\text{tran}}$  之目的。

一般於穩定態時，將加諸於探針尖上的作用力對探針尖的位移做積分，即可求得各外力對探針所提供的能量。因於穩定時，探針尖是以固定之週期做簡諧震盪之運動，所以只需考慮一週期內外力對探針所做的功，即可算出各外力的總能量為

$$E_{\text{tip}} = E_c + E_v + E_{is} \quad (34)$$

其中，

$$E_{\text{tip}} = \oint F_{\text{tip}} dz_T \quad (35)$$

$$E_c = \oint f_c dz_T \quad (\text{由探針懸臂所輸入之能量}) \quad (36)$$

$$E_v = \oint f_v dz_T \quad (\text{探針尖與環境作用所消耗之能量}) \quad (37)$$

$$E_{is} = \oint f_{is} dz_T \quad (\text{探針尖與表面作用所消耗之能量}) \quad (38)$$

利用式 (6)–(13)，將式 (35)、(36) 及 (37) 積分後，可得

$$E_{\text{tip}} = m \oint \ddot{z}'_T dz_T = 0 \quad (39)$$

$$E_c = \oint k(z'_T - z_d) dz_T = \frac{1}{2} k A_0^2 \omega_0 T_0 \sin \delta' \quad (40)$$

$$E_v = \oint -b \dot{z}'_T dz_T = -\frac{1}{2} b A_0^2 \omega_0^2 T_0 \quad (41)$$

式 (34) 及 (39) 描述，於穩定態時，由探針懸臂所輸入之能量  $E_c$ ，等於探針尖與環境作用所消耗之能量  $E_v$  及探針尖與表面作用所消耗之能量  $E_{is}$  之和，即於穩定態時，輸入探針的能量等於探針所消耗的能量。其中，正值代表輸入探針之能量，負值代表探針輸出之能量。若探針與表面之作用為  $f_{is} = 0$  時，則  $A'_0 = A_0$ 、 $\delta' = \pi/2$ 、 $E_{is} = 0$ ；且將式 (10)、(12) 個別代入式 (41)、(40)，並令  $E_{c0} \equiv E_c (f_{is} = 0)$ 、 $E_{v0} \equiv E_v (f_{is} = 0)$ ，則可得

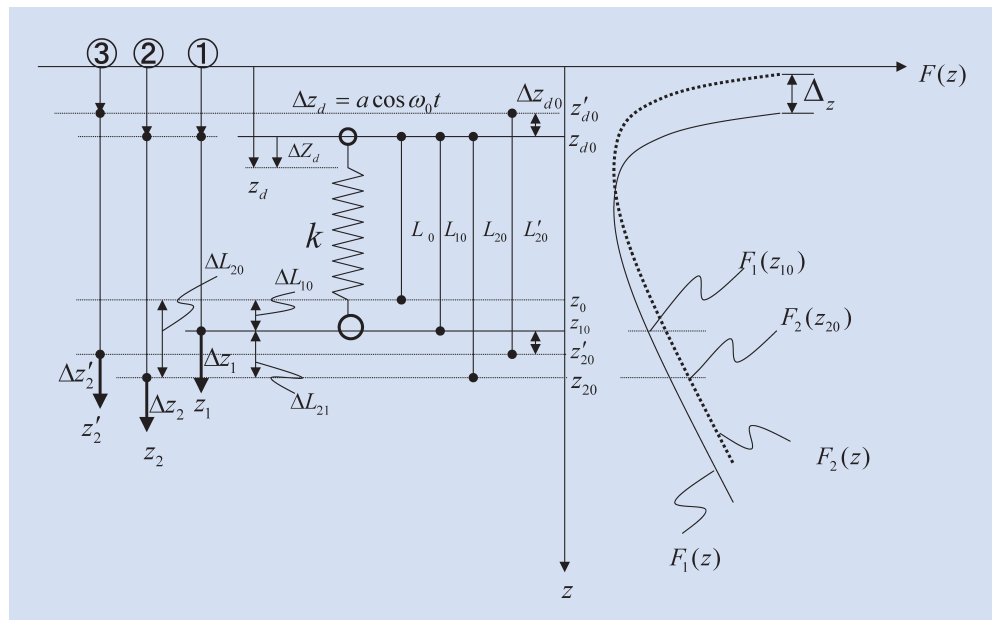


圖 6. 掃描過程中探針尖的三个狀態。

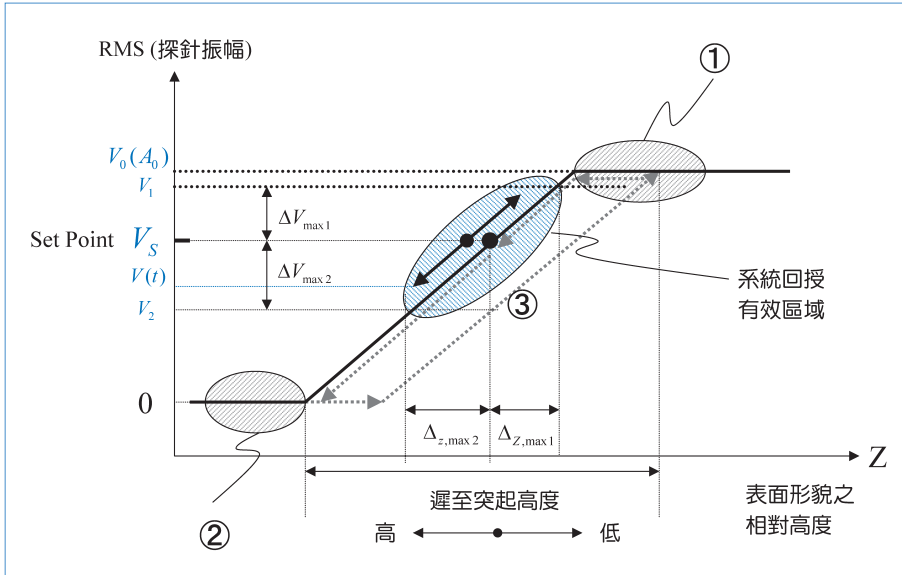


圖 7. 掃描取像最佳化與系統回授有效區域。

$$E_{c0} = -E_{v0} = \frac{1}{2} k a A_0 \omega_0 T_0 = \frac{1}{2} k A_0^2 \left( \frac{\omega_0}{Q} \right) T_0 \quad (42)$$

若以實際探針之物理量： $k \sim 40 \text{ N/m}$ 、 $Q \sim 400$ 、 $A_0 \sim 10 \text{ nm}$ 、 $\omega_0 = 2\pi \times 300 \text{ kHz}$ 、 $T_0 = 3.3 \times 10^{-6} \text{ s}$  代入式 (42)，可得  $E_{c0} = E_{v0} \approx 3 \times 10^{-17} \text{ J} = 187 \text{ eV}$ 。另外，將式 (39)、(40) 與 (41) 代入式 (34)，可得探針尖與樣品作用時所消耗之能量，

$$E_{is} = -\frac{1}{2} \frac{k A_0'^2 \omega_0}{Q} T_0 \left[ \frac{A_0}{A_0'} \sin \delta' - 1 \right] \quad (43)$$

將式 (43) 中之  $A_0'$  對  $A_0$ 、 $\delta'$  對  $\pi/2$  做泰勒級數展開，並將式 (14) 及 (15) 代入，可近似取得

$$\begin{aligned} E_{is} &\cong -\frac{1}{2} k \frac{\omega_0}{Q} T_0 (\Delta A_0)^2 = -\frac{1}{2} k A_0^2 \frac{\omega_0}{Q} T_0 \left[ 1 - \frac{A_0'}{A_0} \right]^2 \\ &\cong -E_{c0} \left[ 1 - \frac{A_0'}{A_0} \right]^2 \end{aligned} \quad (44)$$

式 (44) 即描述了探針尖與表面發生作用時，由探針傳遞至樣品表面的能量大小。當探針尖與表面間發生作用且進入穩定態後，探針尖—表面間的作用力越小時 (即  $A_0'$  越大)，探針所釋放的能量  $E_{is}$  就

越少。於實際原子力顯微儀的電子線路上，探針的振幅  $A_0$ 、 $A_0'$  是透過光槓桿的方式，由 PSD 檢測光訊號並將其轉換成電氣之訊號。之後，再經一 RMS 電路處理，以取得 RMS 值之電壓  $V_0$ 、 $V_0'$ 。其中，可視  $V_0'$  為回授系統所用之 set point 值  $V_s$ 。是以，振幅  $A_0$ 、 $A_0'$  與 RMS 電壓  $V_0$ 、 $V_s$  之關係為

$$V_0 \propto A_0 / \sqrt{2}, \quad V_s \propto A_0' / \sqrt{2} \quad (45)$$

因此，將式 (45) 代入式 (44)，可得

$$E_{is} \cong -E_{c0} \left[ 1 - \frac{V_s}{V_0} \right]^2 \quad (46)$$

式 (46) 描述的物理現象為：當探針尖與表面間發生作用時，set point 值  $V_s$  越大，探針尖—表面間作用力所釋放的能量  $E_{is}$  就越少。表 1 係使用一般商用矽質探針，對於不同的探針尖振幅  $A_0$  及  $V_s/V_0$  所計算出之  $E_{is}$  (附註 5)。表 2 係列舉三種具不同鍵結特性材料之鍵結能。根據表 2，鍵結能的分布一般是在 3–5 eV 之間，較硬的材料如鑽石可達 8 eV，較軟的金屬 Hg 只有 0.7 eV。是以，將探針尖振幅操作在 10 nm 以上時，對於比矽質探針軟的材料，探針傳遞至樣品表面的能量就可能超過樣品的鍵結能量，造成表面的刮傷；反之，則造成探針磨損。

表 1. 探針尖與樣品表面作用之能量損耗。

$k$ (N/m)	$\omega_0/2\pi$ (kHz)	$Q$	$A_0$ (nm)	$E_{c0}$ (eV)	$V_s/V_0$	$E_{ts}$ (eV)
40	300	400	30	1683.0	0.9	16.83
			20	748.0	0.9	7.38
			10	187.0	0.9	1.87
					0.8	7.48
			5	46.8	0.9	0.47
					0.8	1.87
					0.7	4.21
			3	16.8	0.9	0.17
					0.8	0.67
					0.7	1.51
					0.5	4.2
			2	7.48	0.9	0.07
					0.8	0.3
					0.7	0.67
0.6	1.2					
			0.5	1.87		

當然，於實際的情況下，探針與表面的接觸不會侷限於單一原子，但由於探針是以將近 300 kHz 與表面接觸，所累積的能量極為可觀。是以，儘可能地降低探針的振幅、及提高 set point 值，才能確保最高品質的量測。

(待續)

## 附註

1. 輕敲模式的用語，本為 DI (Digital Instruments) 公司提出專利中所使用之名詞，後來成為 Veeco Instruments, Inc. 的註冊商標。
2. 若不符合這些條件時，則 ADC 圖會發生各種不同之變化，請參考圖 8(g)、8(h)、9(a)、9(b) 及圖 14(a) 至 (d)。
3. 一般的原子力顯微儀，係藉由調整電子回授線路中所使用的 OP 放大器之放大倍率，以達到改變系統回授增益值  $G_{P,I}$  之目的。但 OP 放大器的放大作用 (當倍率超過 1 時) 會同時將實際的電子訊號及雜訊一起放大。對於只具奈米層

表 2. 各式物質之鍵結能。

鍵結種類	材料	鍵結能 (eV)
離子鍵	NaCl	3.3
	MgO	5.2
共價鍵	Si	4.7
	C (鑽石)	7.4
金屬鍵	Hg	0.7
	Al	3.4
	Fe	4.2
	W	8.8

級高度落差的表面結構，或者是具次奈米層級更細微的表面形貌，雜訊的增加是造成影像模糊的最大原因之一。原子力顯微儀透過所謂的「雜訊最小化」及「回授增益最佳化」之處理，即於系統處於最小雜訊之狀態下，將系統回授增益  $G_{P,I}$  值調至最高。因此，回授增益值  $G_{P,I}$  即被最佳化，使用者再也無需煩惱系統回授增益值  $G_{P,I}$  之設定。此項「雜訊最小化」與「回授增益值  $G_{P,I}$  最佳化」之技術，為安冠之專利 (申請中)。

4. 式 (33) 只描述探針整體是處於靜止狀態時 ( $z$  軸方向)，突然受力後，於過渡態中探針尖所損失的總能量。通常，將探針下至樣品表面是透過一步進馬達，以適當之速度，將探針整體近接至樣品表面。所以探針尖所具有的動能，除了週期性震盪的動能之外，也有一垂直方向移動之能量，這移動之能量通常遠大於探針尖震盪所具有之運動能量。
5. 式 (46) 成立的近似條件是在  $A'_0 \approx A_0$ ，所以不適合表 1 中計算所得之數值，因  $V_s$  並非近似於  $V_0$ 。然而，式 (46) 所陳述的一個重要且定性的物理現象：探針尖與表面之作用力越大，所消耗的能量就越大。表 1 中的數值並非正確值，只提供使用者較實際的參考數字，因本文的公式推導都是使用近似的解析，目的只是為了讓讀者具有正確且定性的物理觀念。正確的數值，需對  $A'_0$ 、 $\delta'$  做確實的數值計算後才能求得。

## 參考文獻

1. 胡宇光, 科儀新知, **27** (3), 7 (2005).
  2. 湯茂竹, 科儀新知, **27** (3), 44 (2005).
  3. 黃英碩, 科儀新知, **26** (4), 7 (2005).
  4. 林明彥, 科儀新知, **27** (2), 46 (2005).
  5. 林明彥, 科儀新知, **27** (3), 67 (2005).
  6. T. R. Albrecht, P. Grtitter, D. Horne, and D. Rugar, *J. Appl. Phys.*, **69** (2), 15 (1991).
  7. J. P. Cleveland and B. Anczykowski, *USA Patent Number: 6,038,916*.
- 
- 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。
  - 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。
  - 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。
  - 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。
- Ming Yen Lin received his M.S. in physics from Tokyo University. He is currently the general manager of Angsnanotek Co., Ltd.
  - Shao Kang Hung is a Ph.D. candidate in electrical engineering at National Taiwan University. He is currently an 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 of Angsnanotek Co., Ltd.
  - Wei Che Liu received his B.S. in industrial management from Oriental Institute of Technology, He is currently an R&D engineer of Angsnanotek Co., Ltd.
  - Yang Chih Su received his B.M. in information management from Taiwan Shih Chien University. He is currently an R&D engineer of Angsnanotek Co., Ltd.
  - Sean Ying received his M.S. in electrical engineering from the University of Hawaii, USA. He is currently an R&D manager of Angsnanotek Co., Ltd.