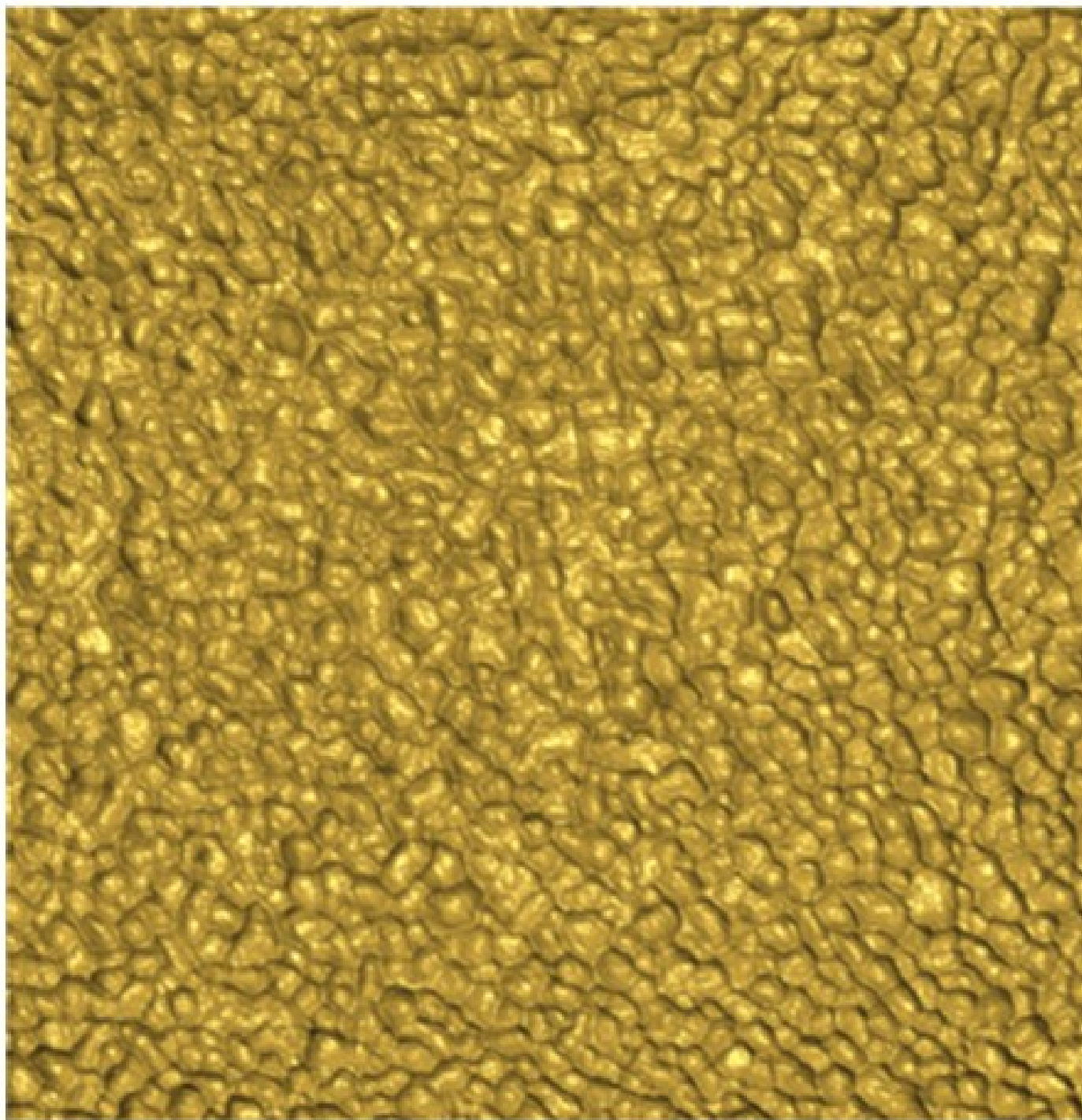


原子力显微镜 AFM



元析科技
AtomSolve.com



元析科技股份有限公司

AtomSolve Co., Ltd.

TN00251202T0001



目录

1 AFM 的發明	2
2 裝置設定	3
3 測量模式	4
3.1 接觸模式 Contact Mode	4
3.2 敲擊模式 Tapping Mode	5
3.3 峰值力輕敲 PeakForce Tapping Mode	6
4 數據分析	7

1 AFM 的發明

原子力顯微鏡 (AFM) 是由 IBM 瑞士蘇黎世研究所的科學家 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 所發明，如圖1。

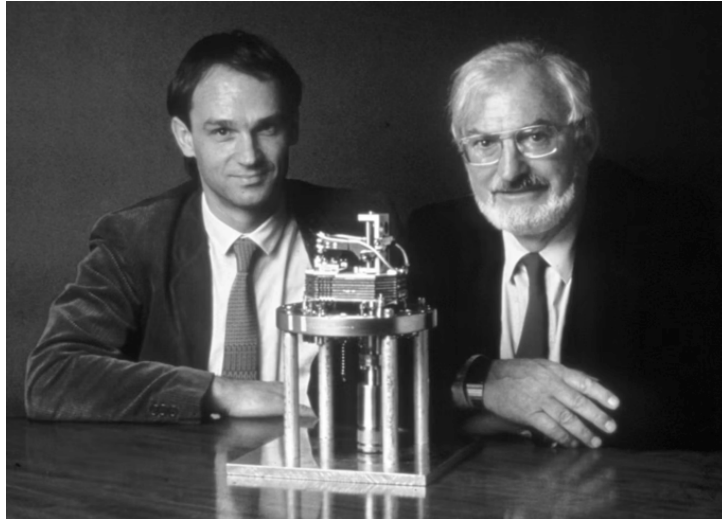


图 1: AFM 的發明人 Binnig(左) 和 Rohrer (右)，圖源：IBM [1].

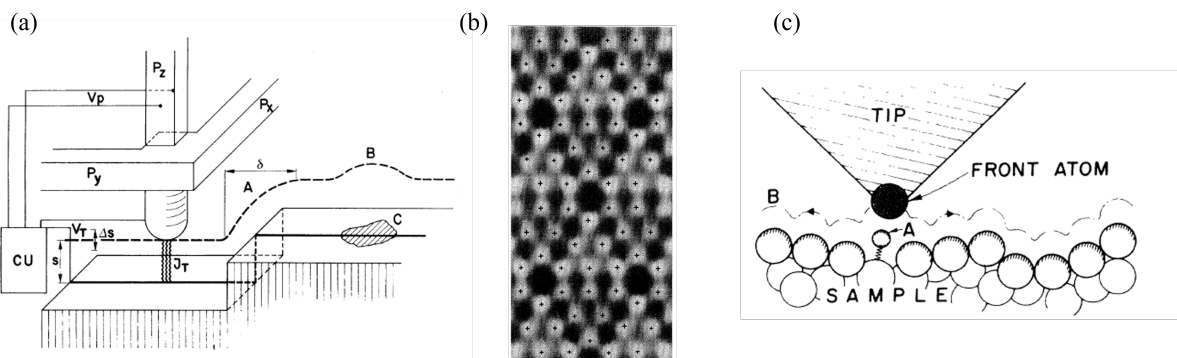


图 2: (a)STM 的工作原理 [2, 3] (b) Si(111) 表面的 7×7 重構原子結構 [4], (c) AFM 探針與樣品表面的相互作用 [5].

他們早在 1981 年便成功建造了第一台掃描穿隧顯微鏡 (STM) [2, 3]，開創了利用尖端探針觀察原子級表面結構的新技術；並在 1982 年首次成像 Si (111)-(7 \times 7) 表面的原子排列 [4]，證明了 STM 的革命性的解析能力。基於這些研究成果，Binnig 與同事於 1985 年進一步開發出原子力顯微鏡 [5]，可用於測量原子級別的表面形貌，如圖2。

在 STM 和 AFM 的基礎上，基於探針和樣品表明的不同的相互作用，又誕生了整個掃描探針顯微鏡 (scanning probe microscope) 體系，包括 SCM、SSRM、KPFM、cAFM 等，使探針顯微技術不再受限於導電材料，而能在絕緣體、聚合物、生物材料等多種樣品上取得奈米尺度的形貌資訊和電學、磁學等資訊，從而大幅拓展了奈米科技與表面科學的研究範圍。

2 裝置設定

如圖3所示，在原子力顯微鏡 (AFM) 中，探針與樣品表面相互作用所造成的撓曲量 (Deflection) 會被光學槓桿偵測系統量測，並轉換成探測器訊號 (detector signal)。這個訊號經過訊號處理 (signal processing) 後，與系統所設定的設定值 (setpoint) 比較，形成一個誤差信號 (error)。

為了維持探針與樣品間的作用力恆定，AFM 會利用 PI 增益控制 (PI gain control) 來調整誤差，並輸出一個控制訊號到高電壓放大器 (high voltage amplifier)。放大後的電壓會驅動 XYZ 執行器 (XYZ actuator)，以精準移動樣品或探針，使誤差最小化。

在掃描過程中，執行器在 XYZ 三軸方向的調整量即可重建樣品表面的高度與形貌，最終形成 AFM 的三維地形影像。

當然，不同操作模式下的 setpoint 是不同的，這部分我們下一節介紹。

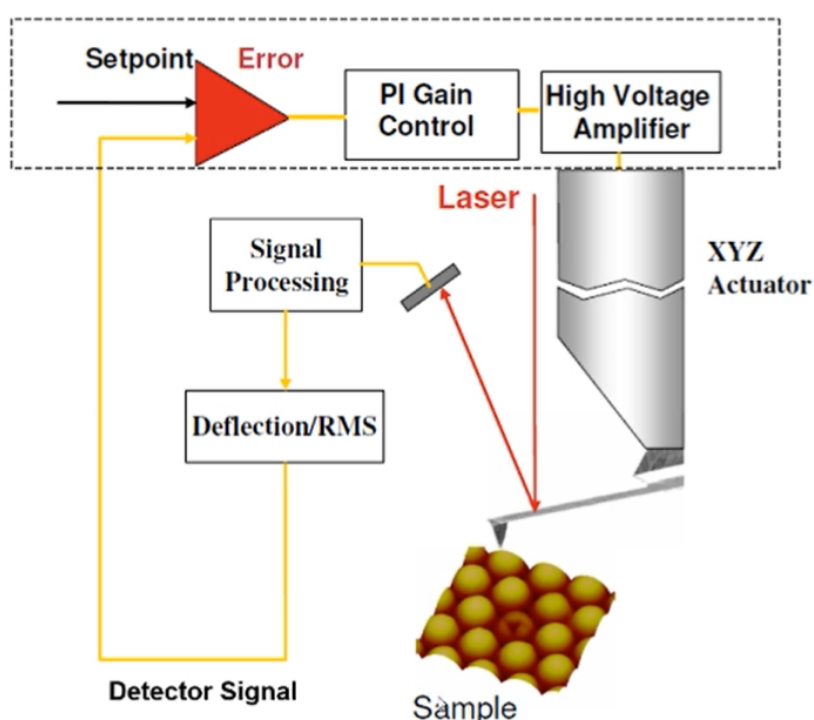


图 3: AFM 裝置設定與反饋示意圖。來源: Bruker [6].

3 測量模式

3.1 接觸模式 Contact Mode

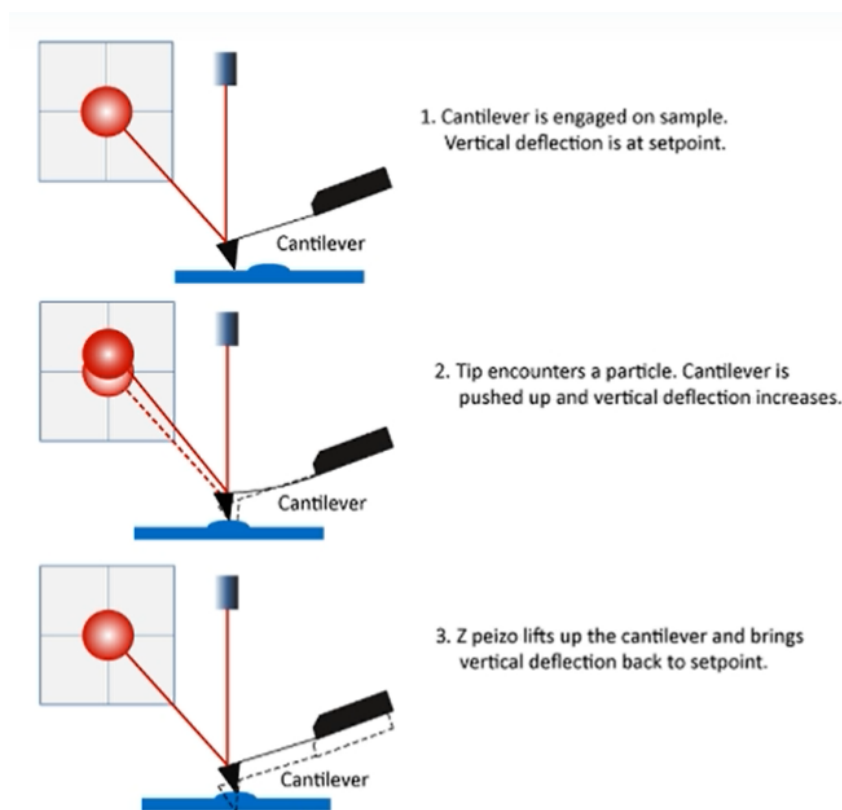


图 4: 接觸模式示意圖。來源: Bruker [6].

懸臂梁可以認為是一個彈簧，可以拉伸和壓縮，也可以振動。在接觸模式下，AFM 懸臂梁與樣品表面之間的作用力可由虎克定律（Hooke's Law）描述：

$$F = -kx$$

其中：F 是探針與樣品之間的作用力，k 是懸臂梁的彈簧常數，x 是懸臂梁的撓曲量（位移）。

接觸模式 AFM 可在大氣環境液體環境下操作。反饋系統原理：

1. 接觸（Engagement）：懸臂梁被緩慢下降至與樣品表面接觸。系統將懸臂梁的垂直撓曲量設定為一個預先定義的設定值 setpoint。
2. 探針遇到表面凸起（encounters a particle）：當探針掃描到表面凸起、顆粒或其他地形變化時，懸臂梁會被向上推，使撓曲量增加。
3. 回授反應（Feedback response）：Z 向壓電致動器（Z-piezo）會調整其位置（通常為上移），以將撓曲量重新拉回設定值。

透過這樣的閉迴路回授系統，AFM 能夠持續**維持懸臂梁的撓曲量恆定**，也就是保持探針—樣品之間的作用力不變。Z 向壓電致動器在掃描過程中的位移變化，即對應樣品表面的高度資訊，從而重建表面形貌。

3.2 敲擊模式 Tapping Mode

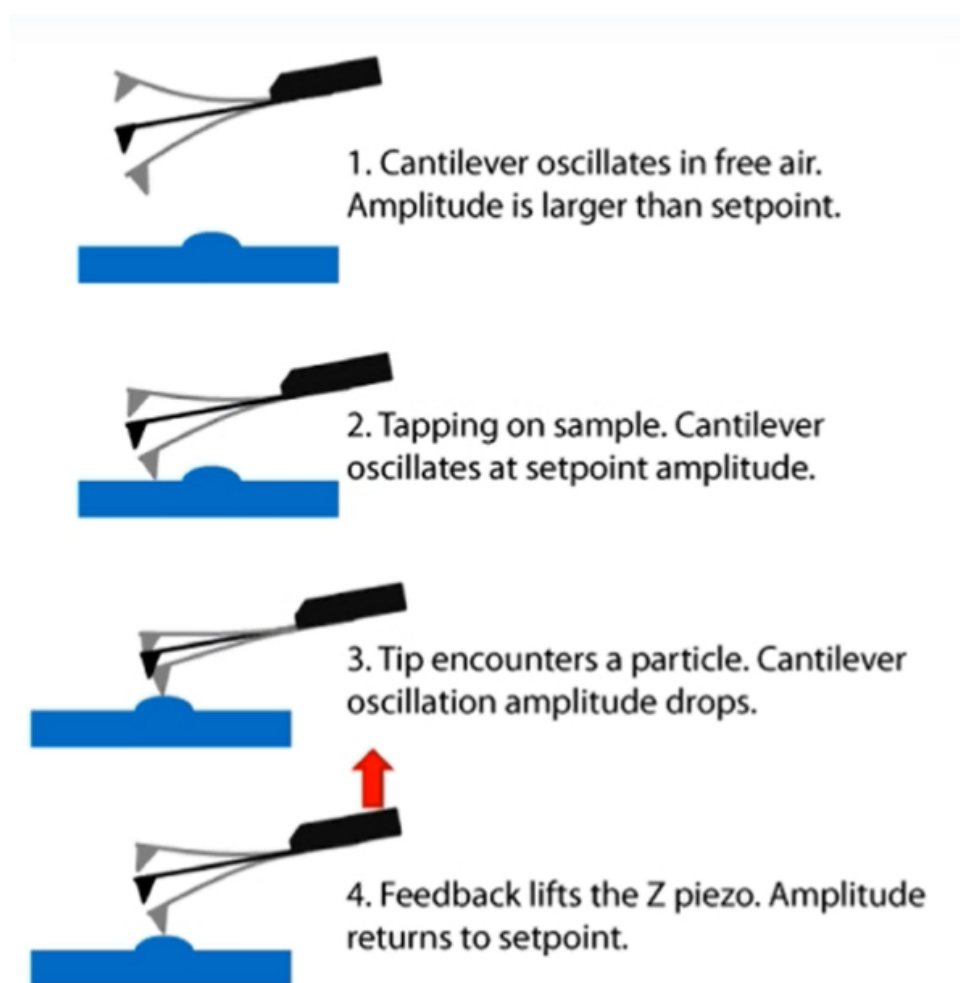


图 5: 輕敲模式示意圖。來源: Bruker [6].

在輕敲模式中，可以把懸臂樑當做一個振盪器 oscillator，可以在外部恆定頻率驅動下實現特定頻率的振盪。以下是輕敲模式下探針和樣品表面相互作用的過程：

1. 自由振盪 (Free oscillation)：懸臂樑在空氣中以一個大於設定值 (setpoint) 的振幅自由振盪。
2. 輕敲樣品 (Tapping on the sample)：當探針逐漸接近樣品表面時，由於間歇性的探針-樣品相互作用，懸臂樑的振盪振幅會逐漸減小，直到與設定值相符合。
3. 探針遇到顆粒或突起特徵 (Tip encounters a particle or elevated feature)：當探針輕敲到較高的表面結構時，振幅會進一步下降。
4. 回授反應 (Feedback response)：回授控制器會提高 Z 向壓電致動器 (Z-piezo) 的位置，使振盪振幅回復到設定值。

透過這套閉迴路回授系統，AFM 能夠**維持一個恆定的振盪振幅 Amplitude**，確保成像時探針與樣品之間的相互作用穩定且可重複。輕敲模式可在大氣、真空環境與液體環境下操作；在液體中，振盪頻率不需要與懸臂樑的共振頻率完全一致。

3.3 峰值力輕敲 PeakForce Tapping Mode

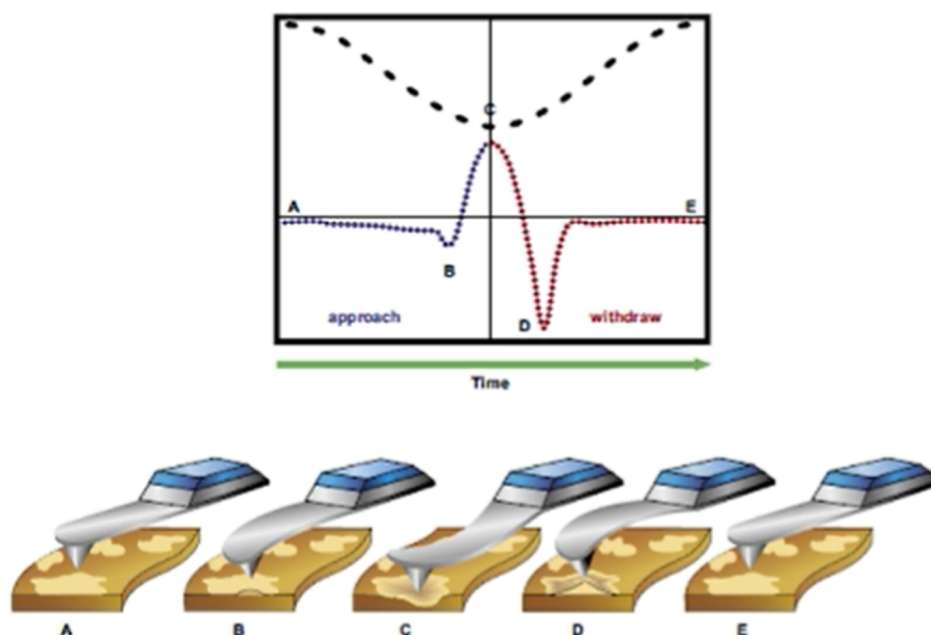


图 6: 峰值力輕敲模式示意圖。來源: Bruker [6].

PeakForce Tapping 則是更深入探索探針和樣品表面相互作用曲線的成果。許多使用者認為傳統的 AFM 操作具有挑戰性, 即使是基礎成像, 也需要很長時間才能熟練。PeakForce Tapping 的易用性則改變了這種印象。

受控峰值力回授 (Controlled Peak Force Feedback) ——核心原理與傳統的輕敲模式不同: 輕敲控制的是振盪振幅, 而峰值力輕敲控制的是**每一次探針—樣品相互作用週期中施加的最大力 (Peak Force)**。以下是探針每一次從遠處靠近樣品表面並“接觸”, 然後逐漸遠離樣品表面都過程:

- 探針離樣品很遠, 二者之間作用力很小, 為吸引力。
- 探針逐漸靠近樣品, 二者間吸引力逐步增強。
- 過了某一臨界點後, 吸引力減少, 而且轉變為排斥力, 且排斥力逐漸增加到最高點。所謂的“接觸”都強弱, 就取決於這個最高點都排斥力峰值。
- 然後探針逐漸遠離樣品, 排斥力逐漸減少, 轉為吸引力而且吸引力逐步增大。
- 過了某一臨界點後, 吸引力又逐步減小至微弱。

在每次輕敲週期中, 系統會量測探針與樣品接觸時的瞬時最大作用力。一個高速的閉迴路回授系統會立即調整 Z 壓電致動器的位置, 以使峰值力維持在設定值。因此, 探針—樣品之間的作用力始終穩定、可控, 並且大幅降低對樣品與探針造成損傷的風險。這項控制方式使 PeakForce Tapping 能在遠低於傳統 tapping 或 contact mode 的力下進行高解析度成像。

PeakForce Tapping 模式能夠大幅簡化 AFM 操作, 降低學習門檻, 使用者不需要對震盪頻率、參考振幅等多個參數進行細緻調校; 能夠提升成像的穩定性與可重複性: 力的控制精準且一致, 使不同樣品與不同環境下都能維持穩定成像; 能夠提供更好的材料對比與量測能力, 在每一次輕敲循環中可同步取得材料機械性質 (如黏彈性、模量、黏著力等), 可進行定量材料特性映射 (Quantitative Nanomechanical Mapping, QNM)。

4 數據分析

AFM 最常用的功能之一是進行樣品表面形貌 (topography) 的量測。圖 7 展示了使用 AFM 量測晶圓在 PVD 鍍銅後的表面形貌，可以觀察到明顯的顆粒狀結構。此類形貌可以以二維 (2D) 或三維 (3D) 形式呈現。此外，在整個測量區域內還可計算平均粗糙度。

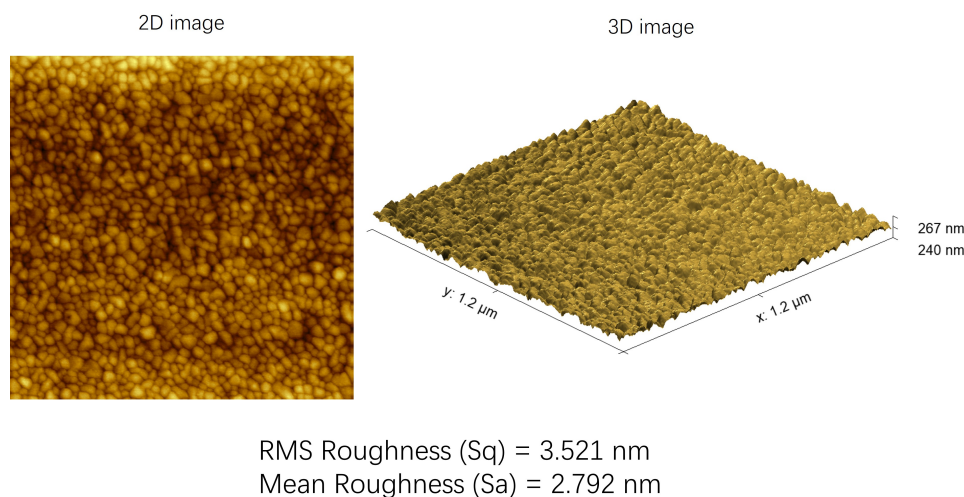


图 7: AFM 分析晶圓表面 PVD 鍍銅形貌，並分析粗糙度。

平均粗糙度 $Sa = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i - \bar{z}|$ ，均方根粗糙度 $Sq = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \bar{z})^2}$ 。其中， N 為量測點的總數， z_i 為第 i 個量測點的高度， \bar{z} 為平均高度。

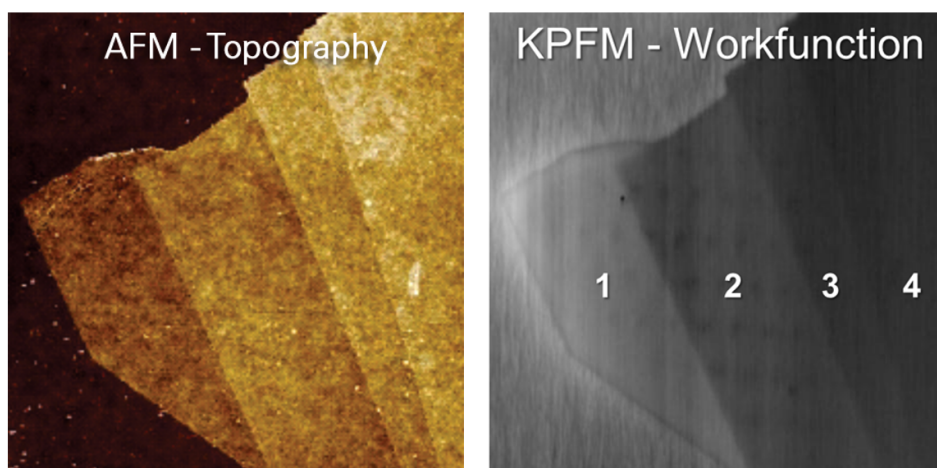


图 8: AFM 和 KPFM 用於石墨烯的研究。來源: Bruker [7].

如圖 8 所示，AFM 在二維材料研究中具有獨特的優勢。除了能夠清楚量測並區分不同層數之二維材料的厚度外，還可以結合多種操作模式，分析不同厚度材料的其他物理性質，例如功函數等參數。



參考資料

- [1] Heinrich Rohrer | IBM. URL: <https://www.ibm.com/history/heinrich-rohrer>.
- [2] Gerd Binnig et al. "Surface studies by scanning tunneling microscopy". In: *Physical review letters* 49.1 (1982), p. 57.
- [3] Gerd Binnig et al. "Tunneling through a controllable vacuum gap". In: *Applied Physics Letters* 40.2 (1982), p. 178.
- [4] Gerd Binnig et al. " 7×7 reconstruction on Si (111) resolved in real space". In: *Physical review letters* 50.2 (1983), p. 120.
- [5] CF Quate, Ch Gerber, and C Binnig. "Atomic force microscope". In: *Phys. Rev. Lett* 56.9 (1986), pp. 930–933.
- [6] Hao Sun. *History, Principle and Basic Application of Scanning Probe Microscope - Bruker*. 2018.
- [7] *AFM for Graphene and 2D Materials | Bruker*. URL: <https://www.bruker.com/it/products-and-solutions/microscopes/materials-afm/afm-for-graphene.html>.

聯繫作者

T.J. Fang, 業務經理
Email: tjfang@gsrccg.com
元析科技股份有限公司
地址：台南市仁德區義林路 256 巷 168 號
Web: <https://www.atomsolve.com>

關於元析

現代科技如人工智慧、半導體、綠色能源和先進製造等，皆建立在材料之上。材料的性能由其結構與成分決定，材料分析是理解這些參數並推動創新的關鍵步驟。元析科技是一個開放且中立的材料分析平台，提供高品質、具成本效益的分析服務，加速客戶的研發進程。我們的業務範圍除材料與元件分析外，也包含資料分析與可視化、行業分析等。我們視客戶為合作夥伴——您的成功就是我們的成功。

聲明

此報告內容為公開資訊。