

# 拆解掃描穿隧顯微鏡

## Disassembling Scanning Tunneling Microscope

簡紋濱、吳至原

Wen-Bin Jian, Chih-Yuan Wu

掃描穿隧顯微鏡是研究奈米科學的利器，本文詳述其工作原理與儀器架構，將儀器分為機械硬體系統、電子控制系統與電腦影像系統等三大系統，並細分每一系統為數個元件，詳述各元件的工作原理與相互連接操作方式；又舉幾個元件為例，詳述其製作的方式與製作流程之注意事項。自製儀器雖是繁複的學問，卻是解決龐大維修費與達到一流研究成果的唯一途徑。

Scanning tunneling microscope is the most powerful instrument to study science at the nano scale. We introduce the principle of operation and instrumentation of scanning tunneling microscope. Instrumentation is separated into three main parts, i. e. mechanical design, electronic controller, and computer programming. We describe the composing elements in detail and illustrate the fabrication technique for some components. Instrumentation is one way to save money as maintaining your machine, and it is the only way to initiate high level research work.

### 一、前言

1980 年代初期，Dr. G. Binnig、Dr. H. Rohrer 與 Dr. C. Gerber 在 IBM 公司位於瑞士的研究中心發展製造出掃描穿隧顯微鏡 (scanning tunneling microscope, STM)<sup>(1)</sup>。其主要的工作原理如圖 1 所示，是利用尖銳的探針 (其探針尖端可比擬為直徑約 10 nm 的球)，接近原子等級平整的表面，到約 1 nm 的距離下。由於探針與樣品之間偏壓產生穿隧電流，其電流值的大小約幾奈安培 (nA)，小於探針與樣品之間做點接觸<sup>(2)</sup> (電阻約 13 k $\Omega$ ，如偏壓為 0.1 V 則可估計電流約 10  $\mu$ A) 所產生的電流，更小於微米等級穿隧結 (tunneling junction) 的工作電

流。使用者設定一穿隧電流值與偏壓，在此條件下將探針與樣品保持固定的距離，藉由掃描器可以讓探針與樣品間產生位移，並藉回饋系統可以保持探針與樣品間固定距離，以取得樣品表面的地形圖。

STM 發展成功後，藉此掃描探針技術又研發出原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM)，更衍生出磁力顯微鏡 (magnetic force microscope, MFM)、掃描式近場光學顯微鏡 (scanning near-field optical microscope, SNOM) 等等，統稱為掃描探針顯微鏡 (scanning probe microscope, SPM) 技術。最近，因為半導體製程技術進入次微米 (幾百奈米)，甚至小於 90 nm 的微影、鍍膜與蝕刻技術，彰顯出奈米尺度科學與技術的重要性；化學與材料技術的

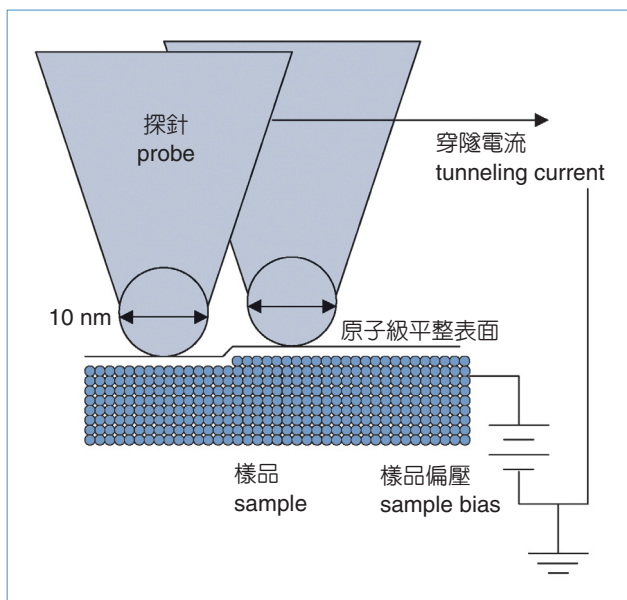


圖 1. STM 接近到奈安培等級穿隧電流時探針與樣品的側視圖。

突破，使得奈米線與奈米顆粒 (或量子點) 的製造能力大幅提升，進而掀起一場奈米科技的競賽。SPM 顯微鏡是看見與操縱奈米世界的兩大顯微術之一，另一脈顯微術為電子顯微鏡，包括掃描電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 與穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscope, TEM) 等。

由於 STM 儀器為高科技產品且具有商業價值，絕大部分的技術資料都在儀器製造公司與實驗室裡，因此，自製 STM 儀器 (包括機械硬體系統、電子控制系統、電腦連結介面、電腦影像及資料處理軟體系統) 成為極困難的工作，而解決的方式則是用高價購買部分的元件組裝加上自行設計或改裝部分元件。目前國內真正達到完全自製 SPM 相關儀器的公司或實驗室，只有中央研究院物理所黃英碩博士與張嘉升博士等人所領導的安冠奈米科技公司<sup>(3)</sup>。國外主要的製造公司有德國 Omicron NanoTechnology、JPK Instruments、VTS Createc、attocube systems、Surface Imaging Systems、Triple-O、美國 Veeco Instruments (包括 Digital Instruments 系列的產品)、Molecular Imaging、RHK Technology、Asylum Research、Quesant、Pacific Nanotechnology、

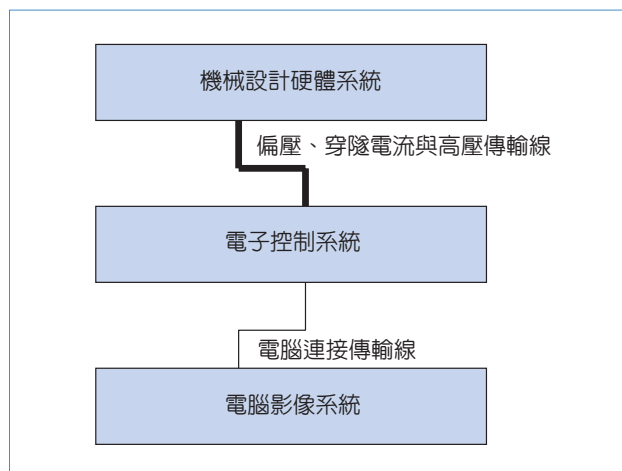


圖 2. STM 儀器架構簡圖。

日本 JEOL、SII Nano Technology、Unisoku、瑞士 Nanosurf AG、俄國 NT-MDT Co.、西班牙 Nanotec Electronica、以色列 Nanonics Imaging Ltd. 等。中國也有本原納米儀器、NanoFirst 等公司投入製造與發展 SPM 儀器。

要自製 STM 儀器，硬體設計部份可參考學術期刊 (Rev. Sci. Instrum.) 發表的文章，電子控制系統部份可參考 Discover Circuits<sup>(4)</sup>，整體設計可參考業餘 STM 儀器發展網頁<sup>(5,6)</sup> 與 Boston College 的 Undergraduate Honors Program<sup>(7)</sup> 等。本文簡介本實驗室兩年來在製造儀器方面的經驗，藉由拆解掃描穿隧顯微鏡，介紹部分 STM 儀器組成元件，除提供自製 STM 儀器的方法外，也提供專業研究人員解決實驗室儀器損壞之方案。

## 二、儀器架構

STM 儀器架構可分為三大系統，分別為機械硬體系統、電子控制系統 (包括與電腦連結介面) 與電腦影像系統 (包括資料處理軟體與影像分析)，如圖 2 所示。先排除真空系統、變溫裝置與其他特殊要求的設計，STM 機械硬體系統如圖 3 所示，可細分為探針與樣品座元件、掃描器元件、步進器元件、基台、彈簧避震元件、震盪阻尼元件、外框架與導電線路等部位。機械硬體系統連接到電子控制系統所使用的傳輸線，主要為提供高電壓 (約

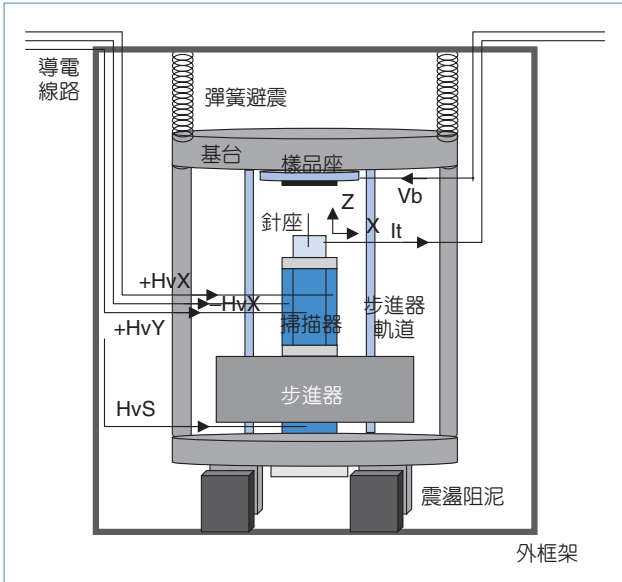


圖 3. STM 儀器機械硬體系統細部分解圖。

-200 到 +200 V) 給掃描器元件與步進器元件，與提供偏壓 (約 -10 到 10 V) 給樣品 (或探針)，並取得探針 (或樣品) 穿隧電流。

STM 機械硬體系統及其構成元件可參考 Dr. Chen 的書<sup>(8)</sup>。掃描器元件由壓電材料做成，提供探針相對於樣品的移動，通常定義探針接近樣品的方向為 Z 軸，在垂直於 Z 軸的平面定義 X 軸與 Y 軸。掃描器元件在 Z 軸方向的移動距離，通常只有幾百奈米到幾微米，因此必須借助於步進器，將探針與樣品由視力可觀察到的釐米距離，接近到幾百奈米的範圍，然後才使用掃描器取得樣品影像。圖 3 所示掃描器元件為管狀掃描器 (tube scanner)，步進器為單軸 (Z 軸) 步進器，亦可設計 X、Y 與 Z 三軸步進器，使得探針與樣品間有較大移動距離。探針與樣品間經過探針座、掃描器元件、步進器元件、步進器軌道、基座與樣品座連結，而 STM 儀器的最重要設計理念，即是使得探針與樣品間經過機械元件連結後，仍然能保持剛性，即使有外界震動的干擾，也僅是讓探針與樣品一起震動，如此才能達到奈米尺寸的穩定度。另外一個設計理念是對稱性，探針與樣品構成 Z 軸，連結探針與樣品之設計需注重圓柱狀對稱性，可減少因溫度變化，造成探針與樣品間的飄移 (drift) 問題。彈簧避震元件用途為隔絕震動進入基台，震盪阻尼元件為當震盪

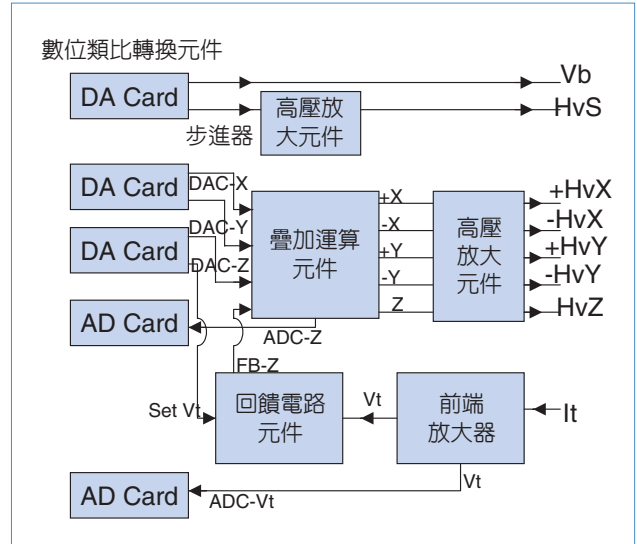


圖 4. STM 儀器電子控制系統細部分解圖。

發生後，減小與消除震動；外框架除支撐基台外，亦須考慮阻絕聲音所造成之探針與樣品間震動問題。

電子控制系統一般包含有數位訊號處理器或者是簡單的電腦系統，提供記憶體儲存數位數據與一維訊號處理。圖 4 為不含處理器的電子控制系統簡圖，可細分為數位類比轉換元件 (包括數位轉類比器與類比轉數位器)、高壓放大元件、疊加運算元件、回饋電路元件與前置放大器元件等。數位類比轉換元件為 16 位元以上解析度之數位訊號與類比訊號轉換電路，一般輸出入範圍在 -10 至 +10 V。高壓放大元件將類比電壓乘上 10 倍或 20 倍，成為直流高電壓 (-200 到 +200 V) 來驅動掃描器元件。疊加運算元件將 X 軸、Y 軸與 Z 軸座標，與回饋系統訊號，轉換成掃描器所接收的  $\pm X$ 、 $\pm Y$  與 Z 電壓輸出模式。回饋電路系統取得目前的穿隧電流值 ( $V_t$ ) 與設定值 (Set  $V_t$ ) 比較，並將差異反應回饋計算 Z 軸電壓，並送回疊加運算元件。當量測到的電流值比使用者設定的電流值小，掃描器的 Z 軸電壓會調整，使得探針更接近樣品；反之，則改變 Z 軸電壓，使探針離開樣品表面。前置放大器主要將奈安培的穿隧電流 ( $I_t$ )，經過運算放大器，做  $10^8$  以上倍率增大，並轉換為電壓訊號 ( $V_t$ )。為減小穿隧電流的雜訊，前端放大器元件需獨立出來，並置於最接近機械硬體系統處。

連接電子控制系統與電腦影像系統，一般如電子控制系統內有處理器與記憶體，會使用光纖或網路等方式，可減少將電腦雜訊傳入電子控制系統；亦可外加傳輸用介面卡，或使用傳輸速率較慢的電腦序列埠 (serial port, RS232) 與並列埠 (parallel port)，其主要為傳送掃描位置給電子控制系統，並將 Z 軸電壓與穿隧電流值讀入電腦。一般繪製 STM 影像需 500 乘 500 點，每一點為兩個位元組 (byte) 的資料，如要快速取得影像，需仔細選用電腦連接傳輸線。當探針與樣品進入穿隧效應範圍內，STM 的測量方法 (等電流 X 軸方向掃描模式) 為移動掃描器的 (X, Y) 座標位置，經由回饋系統保持探針與樣品間固定穿隧電流 (即固定距離)，由 Z 軸電壓取得現在的 Z 軸伸長量，成為影像中的一點數據 (包含 X, Y, Z)，然後往 X 方向增加到下一個 (X, Y) 座標位置，重複以上的步驟。在 X 方向取得 500 點或 512 點的數據為一維資料，再增加 Y 方向的量，取得二維數據資料，即可繪製 STM 影像。由此量測方式可知電腦需大量輸出與讀入數位訊號，如由電腦直接控制數位類比轉換元件，將因電腦連接傳輸線的頻寬限制掃描速度。

電腦影像系統可區分為繪製二維數據的即時影像處理系統與成像後影像處理系統。即時影像處理系統提供使用者控制樣品偏壓，設定穿隧電流、回饋電路元件、掃描中心位置、掃描範圍、旋轉角度與掃描速度等參數，將取得的點資料繪製成影像，並調整亮度與對比。成像後影像處理系統，具有綜合瀏覽影像、影像平面化計算、放大縮小、亮度對比調整、矩陣運算、濾波器、傅立葉轉換、高度分析、粗糙度分析、灰階亮度統計圖與三維成像等功能。目前國外開發成像後影像處理系統，以 Image Metrology 公司的 SPIP<sup>®</sup> 軟體功能最完整。

### 三、分解 STM 儀器組成元件

如前文所述，STM 儀器組成元件非常多，且製造各元件的技術與背景知識都不盡相同。下列筆者以幾個組成元件為例，詳述其製作方法。

機械硬體系統之步進器元件負責大範圍移動，主要將探針由距離樣品幾釐米，前進到微米以下的

接近程度，達到奈安培穿隧電流範圍。步進器元件的設計非常多樣，包括最早期的 louse、步進馬達 (stepping motor)、利用兩彈簧不同彈性係數或槓桿原理的步進器、尺蠖式步進器 (inchworm)、甲蟲步進器 (beetle type) 與慣性運動步進器 (inertial steppers)，每一種型態的步進器各有其優缺點。圖 5 為垂直方向慣性運動步進器元件，能克服重力向上移動，其工作原理乃利用擊槌 (counter weight) 與壓電管的不對稱性運動，使得步進器在藍寶石柱狀軌道上移動。步進器使用兩片不鏽鋼方形塊材，並在不鏽鋼材上加工凹槽，使其能固定在藍寶石柱上滑動，兩片不鏽鋼塊材間使用磁力或彈簧力量，可調整正向力大小來控制摩擦力。當壓電管迅速收縮，擊槌施予步進器的力克服靜摩擦力、動摩擦力與重力，使得步進器在軌道上滑動一步；當壓電管慢慢伸長，步進器受靜摩擦力阻止移動，如此循環動作可讓步進器向上移動。如相反操作壓電管的伸長與收縮運動，可使步進器向下移動。製作慣性運動步進器，需考慮擊槌施力是否與軌道上之接觸線在同一平面上、在不鏽鋼材上加工的兩軌道是否平行，並選用極硬的兩種材質 (如不鏽鋼與藍寶石柱) 來製作滑動的接觸面，以減少因滑動產生之細微粉末阻止步進器的移動。圖 5 所示的步進器，經過適

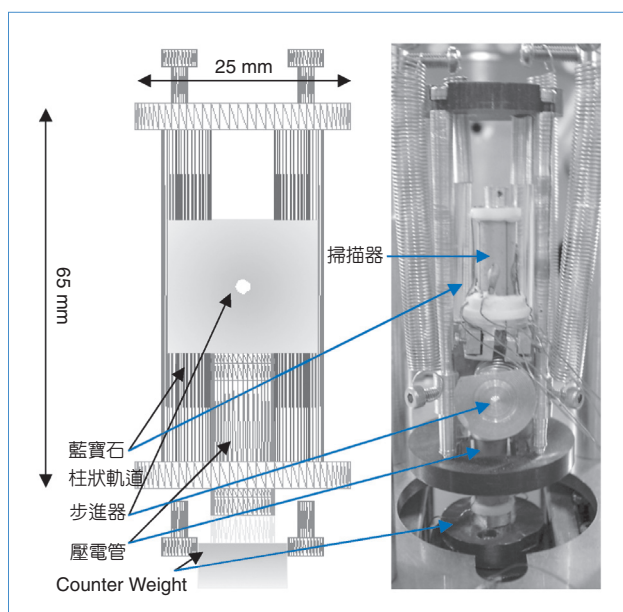


圖 5. 步進器元件設計圖與實際製作圖。

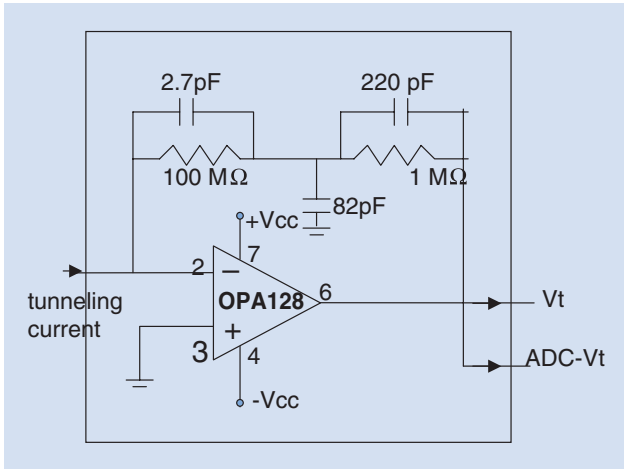


圖 6. 前置放大器元件電路圖。

當的調整彈簧正向力與擊槌重量，使用  $\pm 20$  V 的電壓即可驅動，因步進器能克服重力垂直向上運動，其造成探針與樣品間的剛性較強。

圖 6 為電子控制系統之前置放大器<sup>(10)</sup>，放大倍率為  $10^8$ 。其電路圖非常簡單，首先需製作低雜訊的直流電壓源 ( $\pm 15$  V)，提供給運算放大器 OPA128，穿隧電流經過  $100$  M $\Omega$  電阻，轉換成電壓訊

號輸出，其所配合的電容與  $1$  M $\Omega$  電阻為濾波減小雜訊之用途。本實驗室製作之前置放大器 (未使用印刷電路板)，可取代本實驗室購置的高真空變溫 SPM 儀器 (SPA-300HV, SII NanoTechnology Inc.) 之前置放大器，未調整前雜訊在  $0.05$  nA，即  $5$  mV 左右。一般向原廠購買此前置放大器，需數萬至十萬元台幣不等，自製儀器只需幾千元台幣的材料費，即可解決儀器老舊或損壞的問題。

圖 7 為簡單的數位轉類比電路，經由平行埠 (印表機連接埠) 的  $8$  位元平行資料輸出與  $4$  個控制位元，我們可以操控 DAC712 這類數位轉類比晶片，達到  $16$  位元的解析度，輸出  $\pm 10$  V 的電壓，即解析度可達  $20 / 2^{16} = 0.0003$  V ( $0.3$  mV)，目前測試雜訊小於  $10$  mV，每次需輸出四個指令給平行埠來改變電壓，粗略估計平行埠的頻寬為  $100$  kHz，則此數位轉類比裝置的頻寬約為  $25$  kHz。由於平行埠一次只能輸出  $8$  位元資料，如要擴增為  $16$  位元，需使用兩顆八位元正反器 74374，用平行埠的兩個控制位元 (C0, C1) 控制 74374，並利用一個 NAND 邏輯閘運算後，控制 DAC712。此設計可以同時用一個平行埠，控制兩個  $16$  位元解析度的類

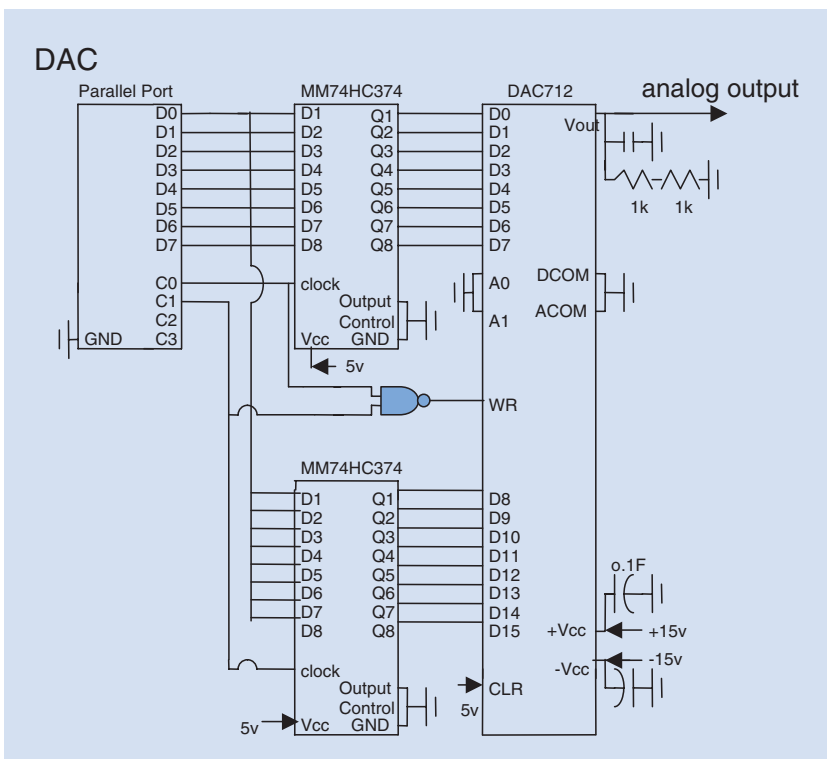


圖 7. 數位轉類比電路圖。

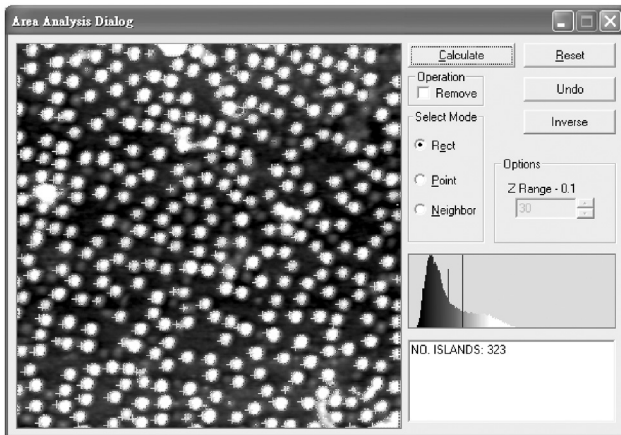


圖 8. 成像後影像處理系統特殊功能之一：計算影像中奈米顆粒的數目。

比電壓。這個電路的材料費主要花費在購買 DAC712，價格約 2000 元台幣以上。

圖 8 為筆者所開發的 NIP (nano image processor) 成像後影像處理系統，圖示為特殊之計算功能，可計算奈米顆粒的數目、面積、平均粒徑、粒徑分布與周長等，影像數據使用 SII NanoTechnology 的 SPA300-HV 之原子力顯微鏡掃描取得。此影像數據為  $512 \times 512 \times 2$  位元組的資料，2 位元組表示高度並轉為顏色深度繪製影像。首先取得此影像的灰階統計圖 (如圖中右下綠色區塊所示)，藉由灰階圖上，移動一垂直黑線，決定選取比黑線所指示高度低的圖點 (像素)，圖中會選擇到非奈米顆粒與基板所在區域圖點，使用反相選取方式，則可以圈選到奈米顆粒。一般在處理這種辨識計算時，除了本來的影像資料外，必須另外有每一像素的狀態位元，即  $512 \times 512$  位元資料來代表該像素是否被圈選，而移動綠色區塊內垂直黑線的位置後，可計算出影像數據中高度低於黑色線所示高度的像素，並將狀態位元設定為 1，否則設定為 0。計算奈米顆粒數目時，須從左上圖素開始，一列一列確定像素狀態，如狀態為 1，則代表有一個顆粒，並開始搜尋與此像素相鄰且為 1 的像素，將它們的狀態都設為 0，如此可計算出影像中的所有奈米顆粒數目。筆者當初開發這套系統，是為了解決只能在連接儀器的一台電腦分析數據的困擾，而現在卻能更進一步撰寫特殊的分析程式，如此才具有其他研究人員用商業軟體亦無法處理的數據分析能力。

## 四、結論

自製 STM 儀器是一門非常複雜的學問，必須懂得儀器工作之物理機制、機械設計、加工、電子電路、電腦介面、電腦軟體與影像處理等非常繁雜的學問。自製儀器的好處，初期可以節省經費，自行維修儀器，後期可以製造儀器，更進一步開發新的量測儀器。如能擁有一台世界上獨一無二的量測系統，當可做獨一無二的研究題目。台灣在近十幾年來，靠著經濟實力大量採購高科技儀器，使得研究成果迅速提升，若要再提升研究能力，唯一途徑只有靠自製高科技儀器。

## 參考文獻

1. G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 57 (1982).
2. L. Olesen, E. Lagsgaard, I. Stensgaard, F. Besenbacher, J. Schio.tz, P. Stoltze, K. W. Jacobsen, and J. K. No.rskov, *Phys. Rev. Lett.*, **72**, 2251 (1994); 74, 2147 (1995).
3. 黃英碩、張嘉升、洪紹剛、陳彥甫、胡恩德、楊志文、陳雅柔, *科儀新知*, **26** (4), 18 (2005).
4. Discover Circuits, <http://www.discovercircuits.com>.
5. J. Muller, STM Project Homepage, <http://www.e-basteln.de>.
6. J. D. Alexander, *Simple STM Project*, [http://www.geocities.com/spm\\_stm/index.html](http://www.geocities.com/spm_stm/index.html).
7. P. W. Oakes, 2004 Undergraduate Honors Program at Boston College, <http://dissertations.bc.edu/ashonors/200437>.
8. C. J. Chen, *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*, New York: Oxford Univ. Press (1993).
9. 參考網頁 <http://www.imagemet.com>.
10. L. Libioulle, A. Radenovic, E. Bystrenova, and G. Dietler, *Rev. Sci. Instrum.*, **74**, 1016 (2003).

- 簡紋濱為國立台灣大學物理博士，現任國立交通大學電子物理系助理教授。
- 吳至原為國立台灣大學物理博士，現任工業技術研究院光電研究所工程師。
- Wen-Bin Jian received his Ph.D. in physics from National Taiwan University. He is currently an assistant professor at the Department of Electrophysics, National Chiao Tung University.
- Chih-Yuan Wu received his Ph.D. in physics from National Taiwan University. He is currently an engineer at Opto-Electronics and Systems Laboratories, Industrial Technology Research Institute.