

掃描探針顯微術於光電檢測之機制

Mechanisms of Scanning Probe Microscopy in Electro-Optical Analysis

林宇軒、蘇健穎、潘漢昌、蕭銘華

Yu-Hsuan Lin, Chien-Ying Su, Han-Chang Pan, Ming-Hua Shiao

掃描探針顯微術於奈米表面檢測技術佔有關鍵性地位，是產業界與學術界頗受重視的檢測分析技術之一。掃描探針顯微術具備原子級解析度，同時可檢測材料表面光學、電學、磁學與力學等多種微觀特性。其中掃描近場光學顯微術突破了傳統光學繞射極限的解析限制，而導電性原子力顯微術則提供表面電性的統計分析，無論在物理、化學、材料科學與生物等領域都有廣泛的應用。本文將介紹由國家實驗研究院儀器科技研究中心自行改裝自一般原子力顯微儀的這兩項技術及其基本原理、系統架設與應用。

Scanning probe microscopy is a key technology of nanometer-scale surface analysis, and highly valued among industries and academia. Scanning probe microscopy with atomic resolution can be used to measure the optical, electrical, magnetic, mechanical and many more other properties of the material surface. Near-field scanning optical microscopy breaks through the diffraction limit of conventional optical resolution, and conducting atomic force microscopy provides statistical analysis of surface electrical properties. They are extensively applied in the fields of physics, chemistry, material science and biology. The basic principles, system setup and applications of these two technologies that are upgraded from ordinary atomic force microscopes at ITRC (Instrument Technology Research Center) are introduced in this article.

一、前言

隨著科技日益進步，光電、奈米及生物科技等尖端科學領域即將成為二十一世紀的主流。不管在探討其科學本質，亦或是在高科技工業的產品研發上，奈米尺度的微小製程及表面量測，皆是未來科技所著重的焦點。而掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy, SPM) 為近二十年來快速發展的

奈米等級表面檢測技術之一，其工作原理是利用一尖端極細的探針，將之貼近樣品表面於數奈米的高度，以與樣品間的作用力或電流等訊號變化作為回饋的控制依據，藉此取得樣品的表面細微結構影像，以及極侷域性的聲、光、電、熱、力、磁等訊息。而其中，利用光纖探針探測樣品表面的近場光學訊號的顯微技術，即稱為掃描近場光學顯微術 (near-field scanning optical microscopy, NSOM or

SNOM)。其非但具有突破光學繞射極限的高空間解析能力，亦保留非破壞性量測、局部光學特性量測的優點。而藉由製鍍金屬薄膜之導電探針，進行試片表面微區域電性分布的顯微檢測技術，則稱為導電性原子力顯微術 (conducting atomic force microscopy, CAFM)，不僅可以取得高解析之表面形貌、相對應的電流影像與電流分布統計圖，並且可進行定點 $I-V$ 曲線檢測，有助於材料介面電子傳遞之研究，作為進一步提高元件效率之依據。SPM 著實為奈米與光電科技領域研究發展之一大利器。

掃描近場光學顯微術為一種奈米等級的表面光學檢測技術，其基本原理乃是利用一遠小於光波長尺度的孔洞，與樣品表面維持在遠小於光波長的距離之下，進行非常局部的光學訊號量測及觀察。由此方法，可以避免由於光波動性質在遠場所造成的繞射現象，而對樣品表面擷取超越光學繞射極限的高空間解析度影像，以及極區域性的光學訊息。其實現方式為利用特殊方式製備出尖端具備極小孔穴的光纖探針，並藉由不同類型的回饋控制來維持該探針與樣品表面的距離，以此達成近場光學顯微的目的。本文首先將針對近場光纖探針的製作以及自行獨立開發出的非光學式回饋機制的系統設計，作一完整介紹。

自 1982 年 G. Binnig 及 H. Rohrer 發明掃描穿隧顯微術 (scanning tunneling microscope, STM)⁽¹⁾ 後，其技術解決了於近場高度的回饋控制問題，也因此掃描近場光學顯微技術迅速地開始發展。1989 年 R. C. Reddick 等人則利用全反射造成之消散場具有軸向指數型衰減的特性，首次製作了利用光學訊息作為回饋機制的近場光學顯微儀，稱為光子穿隧掃描顯微儀 (photon scanning tunneling microscope, PSTM)⁽²⁾。他們首先製作出高品質的光纖探針，由於光纖具有較佳之光波導性質，可以有效的擷取近場訊號而不至於耗損，因此成為利用光纖探針作為近場光學探測的開端。

經過多年來學界及業界的不斷改進，掃描近場光學顯微術演變至今，已是相當成熟而普遍的技術。以至今常見的商用或研究用儀器機台而言，探針多半是使用直式、彎式光纖探針或是特製的開孔原子力顯微矽針；回饋控制則多以光學式側向剪力

偵測⁽³⁾、探針正向力偵測，力學式石英音叉式感測為主。由於本刊已於先前介紹過彎式光纖探針應用於原子力顯微鏡 (atomic force microscopy, AFM) 正向力偵測回饋，及直針使用於光學式側向剪力系統回饋的技術。因此，下一節將對光纖探針的製備及力學式石英音叉回饋控制系統的製作，作一詳述。

另外，自從原子力顯微鏡發明以來，至今已發展出許多分支顯微技術，應用範圍遍佈各種物理、化學、材料與生醫等特性的檢測。根據量測的特性，選用特定功能性探針即可進行量測工作，也因此掃描探針顯微術具有非常廣泛的應用領域，可謂一機多功能。其中，導電性原子力顯微術不僅利用探針與試片表面之間的凡得瓦爾力 (Van der Waals force)，取得試片表面形貌之外，並於導電探針尖端施加一微小偏壓，然後經由探針與試片接觸後所產生的電流訊號，取得材料表面結構與相對應電性之關係。當待測物尺寸範圍或者粒徑大小落在奈米等級，如何檢測其電學特性成為一大挑戰。CAFM 於電性的量測範圍小於 nA 等級，可取得對應於表面形貌之高解析電流影像，同步擷取之表面形貌與電流影像具有點對點之間的對應關係，可輕易對照出待測物的電學特性。適用於奈米元件、記憶體單元、顯示器面板單元、材料製程等的電學特性檢測。以下將於第三節有詳細的原理介紹，以及在國家實驗研究院儀器科技研究中心 (以下簡稱儀科中心) 自行架設於一般原子力顯微儀的改裝技術、檢測機制以及應用實例。

二、掃描近場光學顯微術之機制

西元 1873 年德國物理學家 Ernst Abbe 提出，光在遠場 (遠大於一個光波長距離) 的範圍中觀察物體時，必無法避免由光之波動性質造成的干涉與繞射效應，而僅能獲得約半個波長 ($\lambda/2$) 的空間解析度，此謂之繞射極限 (diffraction limit)，其後 Lord Rayleigh 對光學透鏡寫下了所謂的瑞利準則 (Rayleigh criterion)：

$$dL = \frac{1.22\lambda}{2NA}$$

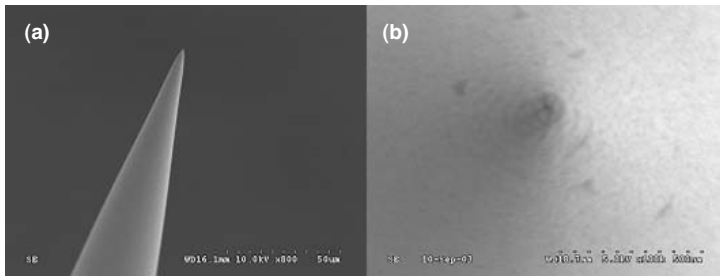


圖 1. 儀科中心製作之光纖探針的 SEM 影像。

dL 表示遠場外光學所能辨別之最小距離， λ 為所使用光之波長， NA 為透鏡之數值孔径 (numerical aperture)，其值為 $n\sin\theta$ ， n 為介質之折射係數，而 θ 為用來收集或聚光至感測器所用之物鏡的光孔穴半角。當兩個微小點光源靠近至 dL 之距離時，則觀測者將無法分辨出這兩個點光源，甚至誤以為是一個點光源，而使得解析度受限。

1982 年之後掃描穿隧顯微術及原子力顯微術出現，使人們可以擷取樣品表面的影像，而達至原子級的超高空間解析度。儘管如此，其影像卻非真正之光學成像，而只是樣品表面相對高度形成的形貌 (topography) 而已，光學影像之解析度依舊受限於繞射極限而無法突破。但是，該技術卻提供了一項重要的構想，即是以探針實行近場距離內的高度回饋控制。只要能以微小孔穴 (衍生出後來的光纖探針技術) 利用此方法貼近到樣品表面的近場距離，必然能獲得非常好的光學空間解析度。

1. 光纖探針之製作與音叉黏合方法

根據近場光學的理論原理，人們嘗試各種方式製作具有奈米孔穴的探針，並配合掃描探針顯微術的高度回饋控制，進行近場光學量測的實現。經過多年的演進，已有多種探針被開發出來，包含錐形玻璃管、次波長光柵、光纖探針、具孔洞之 AFM 探針、無孔穴金屬探針等，而其中最廣為人們使用的、也是效率最好的，即是光纖探針。由於光纖具備低損耗而良好之光波導特性，因而成為近場光學量測微小訊號的首選元件。其探針的製作品質好壞直接影響其空間解析度的高低，通常針尖之孔穴大小即為其空間解析上限，因此光纖探針製作的方式與過程顯得格外重要。

目前光纖探針的製作方式普遍分為兩種，即管蝕刻 (tube etching)⁽⁴⁾ 方式及熱熔拉方法。在本實驗中，我們採用後者。原因是考量前者其蝕刻方式所使用的溶液「氫氟酸 (HF)」具有高度的毒性，在綜合安全性的前提之下，決定使用雷射熱熔⁽⁵⁾ 的方式形成光纖探針，並仍能產生相當高良率的成品。該方法是 1991 年 Eric Betzig 所提出，是利用二氧化碳雷射聚焦於剝除外殼的裸光纖上，使之熱熔，接著於其兩端給予穩定的力量拉曳，藉此形成尖銳的光纖探針。我們使用商用機台 (Model P-2000, Sutter Instrument) 實行，經由調整雷射光源的作用時間、能量大小、兩端拉曳力量、延遲時間等等參數，經過多次的嘗試與實驗，即可製作出符合各種需求的高品質光纖探針。如圖 1(a) 所示，為製作出的光纖探針之電子顯微影像實體圖。

待光纖熔拉形成裸針之後，須於其尖端 (apex) 鍍上一層極薄之金屬薄膜於表面，其鍍膜時的遮蔽效應 (shadowing effect)，可以使探針尖端有一很小而不具膜層的微小孔穴形成，即為近場收送光訊號之孔穴。其尺度小於光波長，並可將光侷限於探針尖端，形成極區域的點光源。而金屬材料之選擇及其相對應之厚度，則必須取決於其電磁肌膚深度 (skin depth) 大小，以及該材質對不同光波波段的反射率和特性，通常材料為鋁、金、鉑等，厚度約為 20–50 nm 之間。而鍍膜方式可用離子濺鍍或是迴旋熱蒸鍍的方式達成。

採用獨特的「煎魚式」鍍針技術，將光纖探針分為正反面多次交互層鍍以形成奈米孔穴。而選用的材質為金 (Au)，厚度控制約在 40–50 nm 上下。經過實驗證實，可形成介於 20–80 nm 的孔穴，如圖 1(b) 所示，為該奈米孔穴的電子顯微影像。此方法的探針尖端孔穴亦具相當優異的品質，及高超的光學解析力。

石英音叉為一標準的振盪元件⁽⁶⁾，將石英晶片 (quartz wafer) 利用蝕刻的方式形成音叉形狀，並於其周圍鍍上金屬電極。其正負電極交錯包覆其振臂四周，正反兩面具有對稱性。當施以一交流電壓時，該正負電極會在音叉間產生交變的電場，使兩振臂 (prongs) 彼此作反向與互補的形變振盪，來維持音叉之質心位置不變。

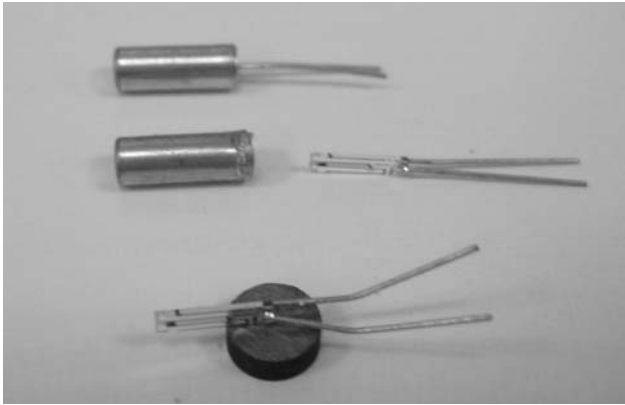


圖 2. 石英音叉振盪元件。

選擇自然共振頻率為 32.768 kHz (2^5 kHz)、長 0.6 mm、寬 0.3 mm、高 3.5 mm 的音叉來作為本設計的材料條件；可自電子材料行取得封裝完整的石英音叉振盪元件後，經過小心仔細的拆封，使之暴露出音叉的外形。接著，將其一振臂尾端，小心地利用強力黏膠黏著於一厚約 1.5 mm、半徑 2.5 mm 的小鐵片上，需靜置一段時間以確實固著。需特別注意的是，黏膠用量必須適中，否則有時會造成頻率嚴重偏移或無法振盪的問題。如圖 2 所示，上者為未拆封及剛拆封之石英音叉振盪元件，下者為拆封後石英音叉黏著於鐵片上的示意圖。

圖 3 為設計的黏針系統的簡易圖解。在光學桌上，於左側組裝一單軸向的精密平移台，上面是光纖夾具 (fiber chuck) 與其固定座 (fiber holder)，是用來固定光纖探針的位置。而右側則架設一個四維度 (X, Y, Z, θ) 的精密平移台，於其上黏著一片標準的載玻片，並在該載玻片邊側黏著一個強力磁鐵，可透過玻璃吸附及固定鐵片與音叉。如圖 3 左下圖所示，可利用此方式實行輕敲模式用的音叉黏針動作 (因為音叉振盪方向將垂直於樣品表面)；或是如右下圖所示，在該載玻片旁再黏上一片載玻片 (小型)，於下方黏著強力磁鐵，藉其吸附固定來實行剪力式用的音叉黏針 (因為音叉振盪方向將平行於樣品表面)。圖 4 為實體圖。

由於石英音叉與光纖探針尖端相當微小，在黏針過程中需要倍率足夠的光學顯微鏡來幫助觀察，因此使用可變焦的光學顯微鏡 (ZK-200U，詠欣)，配合萬用支架平台，將之架設於該黏針系統之上。

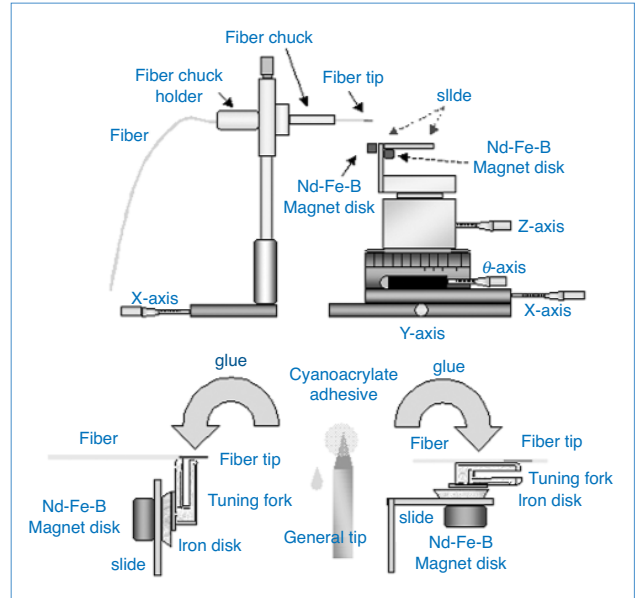


圖 3. 黏針系統的簡易圖解。

當藉由四維的精密平移台將光纖探針與石英音叉調整到確實位置之後，即可進行點膠。為了適度控制黏膠的量，使用一細針，於針尖沾上少量黏膠，再小心翼翼地將光纖探針與音叉振臂末端黏合。由於全程採用手工製作，並非機械化來完成，因此關於黏針動作這個部分，經驗成分將大過於技術描述。但不變的原則是，過多的黏膠會導致音叉的品質因數 (Q -factor) 降低，而影響到靈敏度；過少的黏膠易使光纖探針與音叉脫離，導致元件毀損。因此，如何在不使光纖探針脫離的情形下，使用最少的膠，而使音叉具有最高的靈敏度，這是黏針過程中

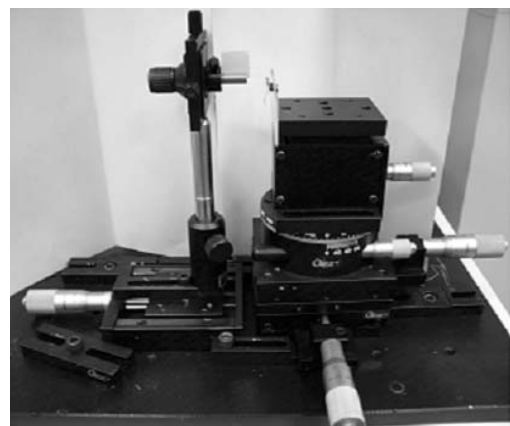


圖 4. 黏針系統的實體圖。

的關鍵之一。其次，黏膠的材質亦相當重要，部分品牌的黏膠乾燥後由於過於彈性或硬脆，容易導致音叉頻率偏移或黏膠的斷裂，甚至無法帶動光纖探針，所以必須選擇彈性與剛性皆適中的黏膠作為黏針材料。

完成黏針動作之後，尚需等待二至三天，使黏膠內部深層完全乾燥，才能將此元件取出使用。或是採用每次少量黏膠的方法，多次點黏，每次間隔數分鐘使之乾燥，等到確定探針與音叉的穩固後，即可提早取出使用。

這種方式完成的元件良率略低於精密機械手臂所製作之，畢竟是由人工完成，但是成本上卻遠遠較原廠提供的相同規格產品之價格低廉，可說相當具有商業優勢。

2. 力學式音叉回饋控制系統之架設

以目前較常見的掃描近場光學顯微儀回饋控制方法，有利用正向光槓桿原理 D 型彎式光纖探針(與 AFM 相同)、直接使用鑿洞穿孔的 AFM 探針，或是剪力光學偵測的技術等等。除了彎式光纖探針光衰減及 AFM 探針光學訊號易漏失的問題，由於近場光學訊號是極微小的光學訊息(約 $nW-pW$)，因此若使用如上述之光學式回饋控制時，聚焦於光纖探針針尖的雷射光功率與之相比下將會顯得過大(約 mW)，一旦與待測訊號耦合，將造成背景訊號過高的問題，以及熱效應的雜訊干擾。除此之外，光學式回饋控制亦會導致樣品的部分條件受限，比如螢光染料等感光樣品的漂白，液態環境導致的光學偏折問題等等。因此若能使用非光學式的回饋控制方式，將可避免上述問題，簡化系統及提升近場

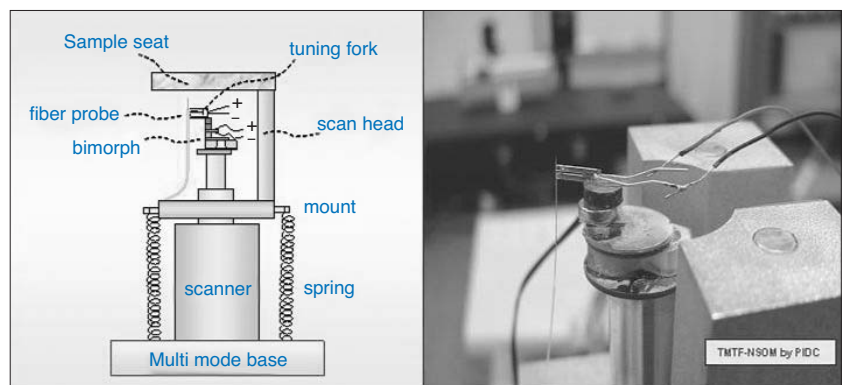
光學訊號的訊噪比。

如圖 5 左，我們設計了一個特殊的機械掃描頭(scan head)，可安裝並相容於原本 AFM 的掃描器(scanner)上，經由彈簧固定。掃描器上置放了設計完成的組件，分別由磁性緩衝單元、雙向壓電陶瓷材料、鈹鐵硼強磁片、鐵片等組成，最上方則是黏著了石英音叉的鐵片，經由磁性吸附於該組件之上，以便更換音叉及探針耗材時方便拆卸與移除。而最上方的樣品座(sample seat)為空心的，可拆卸並以強磁吸附於掃描頭上，且可於其間置入各式樣品；若為透明材質，則可於下方執行反射近場光學量測，上方外加透鏡後，亦可實現穿透光訊號的擷取。如圖 6 所示。

至於 AFM 的掃描器上的組件，如圖 7 所示，使用雙向壓電陶瓷材料(PZT-5A, Series Type Bimorph)做為振盪源，施加電壓後將帶動以上的組件一起振動，包含音叉及光纖探針，音叉因振盪而輸出的訊號則由單蕊的電線送至前置放大器，然後經過自製的回饋電路系統，傳回給 AFM 控制器，使之判別訊號並進行高度回饋控制。其中，玻璃、塑膠及鋁片等小元件都是為了隔離一些雜訊而置入的，非必要設計而可省略之。

而送至壓電陶瓷材料的電壓與送入控制器間必須要有一電路模組，為了使原本 AFM 系統的回饋機制與所設計的回饋控制方式相匹配，讓儀器能夠相容並穩定的工作，本實驗室亦設計了控制用的電路模組，做為一電子訊號的輸出、輸入與轉換的中繼單元。其電路設計在於以橫向力回饋控制時亦可使用，包含了提供半導體雷射的降壓電路、電流電壓間之轉換方法、訊號放大與匹配、濾除雜訊等

圖 5. 儀科中心製作之石英音叉距離感測模組示意圖及實體圖。



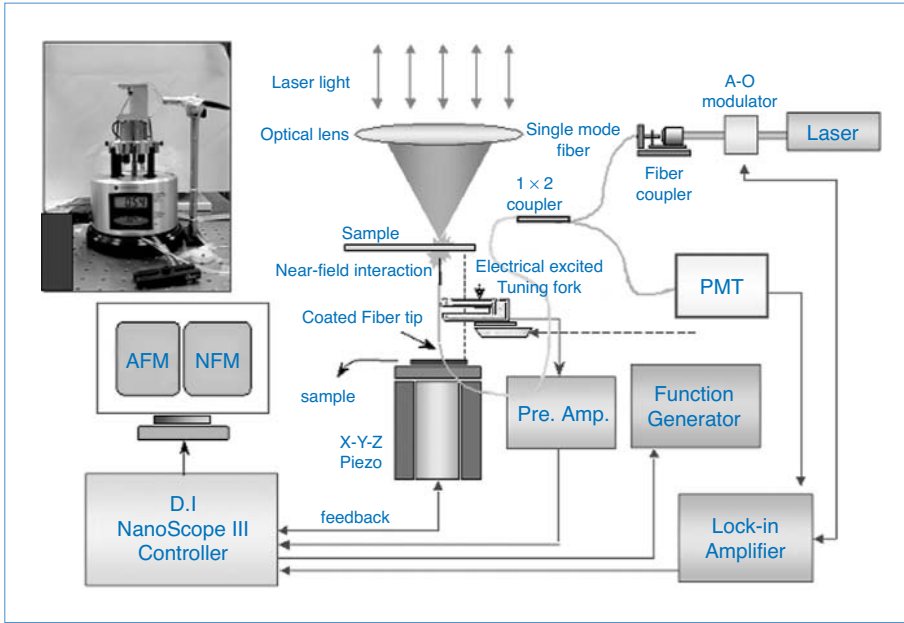


圖 6. 穿透式近場光學的實行辦法。

等，並以盒形封裝，與 AFM 的 15 pin 接頭連結使用，可以簡單並方便地安裝於機台，達成不同回饋控制的目的。電路細部內容如圖 8。

石英音叉用上述的黏膠技術黏著上光纖探針後，其功能為感測器 (sensor)。當提供雙向壓電陶瓷片 (bimorph) 適當電壓，並進行一區間的頻率掃描時，可以測得該音叉擁有最大輸出電壓時的共振頻率值，藉此定義其工作參數。而一旦提供工作電壓驅使雙向壓電陶瓷振動時，音叉與探針將隨之做連動。可藉由探測探針與樣品表面作用造成的音叉輸出訊號改變，而做為高度回饋控制的依據。如圖 9，黑色圖中，橫軸為頻率值，縱軸為電壓值，白線為振幅，黃線為相位。最上圖意指音叉輸出最大訊號時 (亦即有最大振幅) 定義其為工作參數，一旦如圖 9 中下面二圖般因為探針與樣品表面作用造

成的音叉輸出訊號改變時，控制器就會迫使掃描器升降，維持本來工作參數條件，達成高度回饋控制的目的。

最後，以輕敲模式 (tapping mode) 為例，對這種回饋方式進行測試。圖 10 顯示以這種方式進行鐵片表面的粗糙度量測，左圖以掃描範圍 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 量測之掃描圖，右側則為同一位置進行 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 之掃描圖。我們以白色虛線標明，表示左圖是被右圖包覆的，虛線內部重複影像，證明掃描取得的兩個相互對應之表面形貌為真實影像。

接著，換上 $1 \mu\text{m}$ 線寬的標準光柵樣品進行測試，如圖 11，音叉回饋控制的軸向解析度甚佳，小於 10 nm ，經過調整及雜訊抑制後可進一步提高解析度。而橫向解析度則取決於探針尖端曲率半徑，與音叉靈敏度無關，可經由針尖加工技術解決。

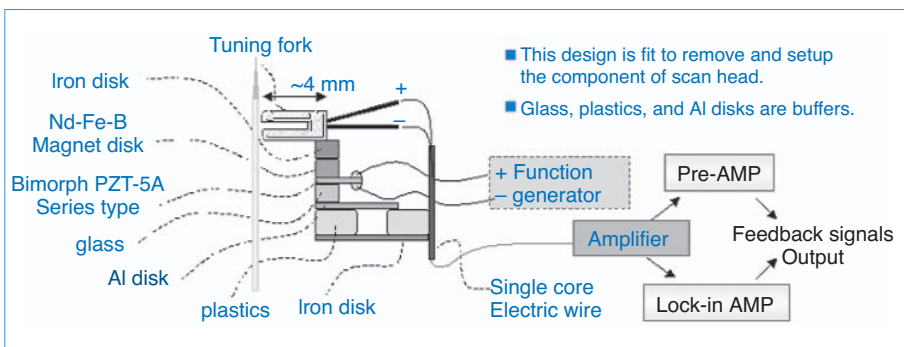


圖 7. 自製力學式回饋控制組件。

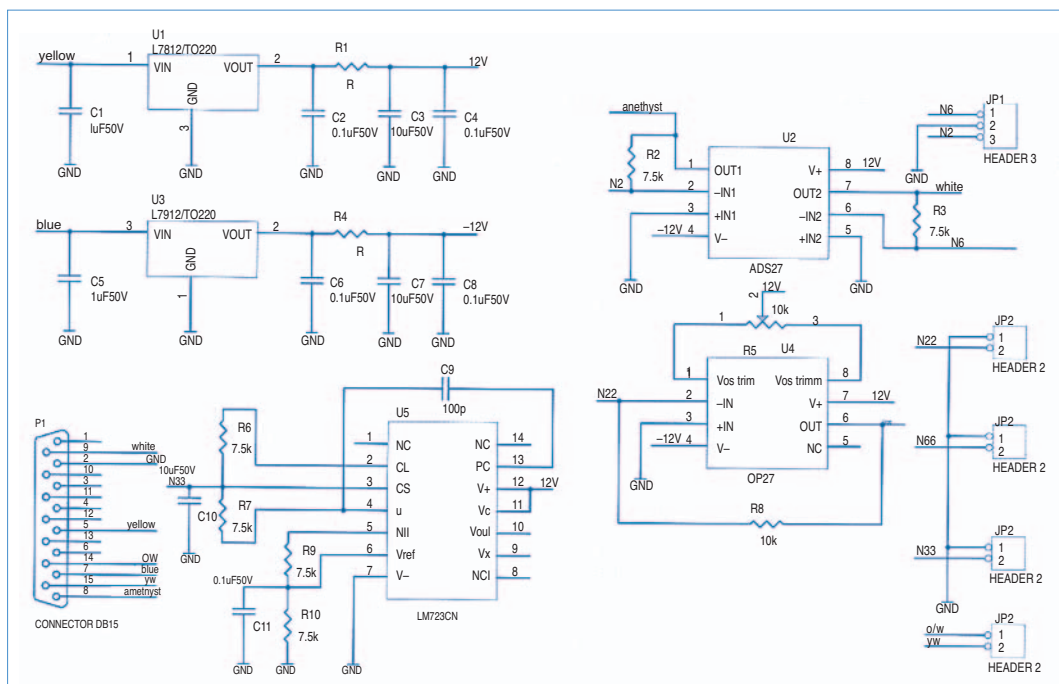


圖 8. 系統控制電路模組。

三、導電性原子力顯微術之電性檢測機制

透明導電薄膜 (transparent conductive oxide thin film, TCO) 具有高可見光穿透率、極佳導電特性，被廣泛應用於各種光電元件，是重要的透明導電電極 (如圖 12)。應用領域涵蓋太陽能吸收面板、觸控式面板、光電偵測器到日常生活中大家熟知的大小平面顯示面板 (電視、電腦、行動電話、個人數位助理、衛星導航等)，在未來的應用上，更可朝

向超薄顯示器、大面積電視牆，可撓可摺疊式顯示幕發展。由於顯示器市場需求日益增加，對於如何提昇品質、效率、穩定性與延長使用壽命成為非常熱門的研究課題。

近年來小分子有機發光元件 (organic light-emitting devices, OLEDs) 與高分子發光元件 (polymer light-emitting devices, PLEDs) 引起很大的興趣。研究指出，OLEDs 元件特性與載子遷移率、電荷平衡有直接關聯性。根據 Schottky-Mott 原理，正電極和有機膜層之間的界面，其電洞注入的能障約為兩者間功函數的差別，因此降低此一能障，即可提高元件發光效率。據文獻報導指出，於 TCO 與有機發光層間製鍍一層緩衝層，即超薄 (~0.5 nm) 無機薄膜可有效提高元件性能以及使用壽命，應用材料包括 SiO_2 、 CuO_x 、 LiF 、 SiO_xN_y 等⁽⁷⁻⁹⁾。此外，特定 TCO 表面處理技術可以獲得改質的效果，包含某些表面清洗程序、 O_2 電漿表面處理等。

由於 OLEDs 發光層的膜厚一般小於 100 nm 的範圍，導電性原子力顯微術於進行 TCO 薄膜表面電性變化相關研究上，不僅可以提供奈米等級表面形貌變化，而且從電流影像可以獲知導電性區域分

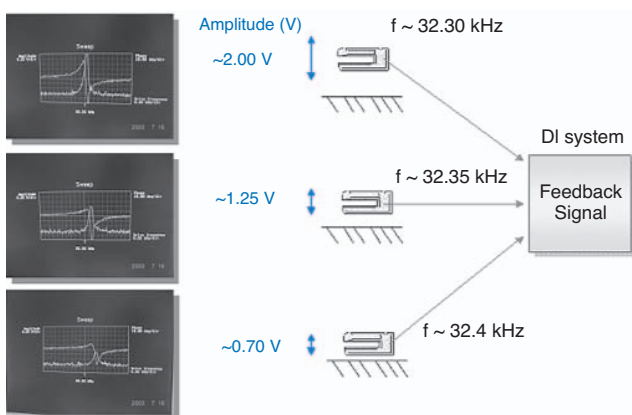


圖 9. 音叉力學式回饋控制示意圖。

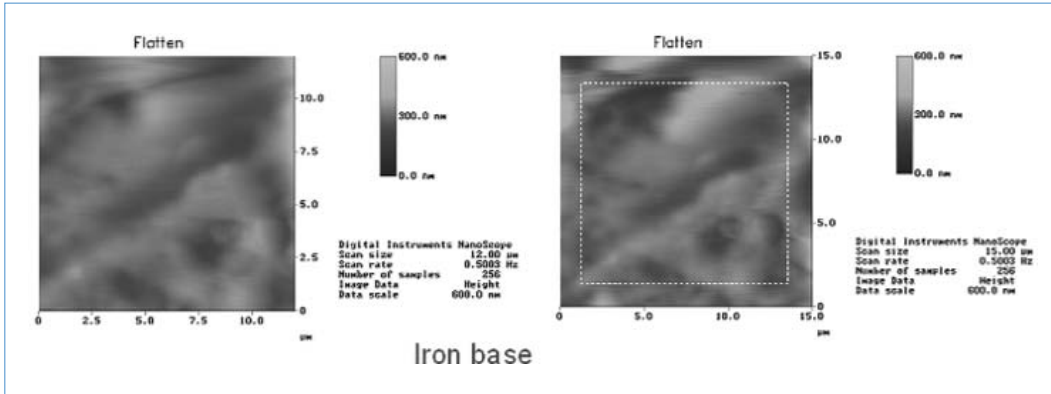


圖 10. 鐵樣品之不同尺度掃描影像。

布的情形，並進一步從電流分布統計圖得到特性分布。在各個不同的表面處理程序，具有相當高的辨識能力。

CAFM 電流檢測範圍小於 nA 等級，縱向空間解析度則小於 1 Å。研究所使用的儀器為儀科中心自行架設於一般原子力顯微儀，並使用自行製鍍金屬薄膜之導電性探針，此處所使用的鍍鉻矽質探針 (CSC17/Cr, NT-MDT)，彈力係數為 0.15 N/m，於探針所屬面濺鍍一層約 15 nm 金薄膜，使其具有導電性，並於掃描過程中保持探針與試片表面接觸力的一致性，以降低探針本身導電層的磨耗，進一步延長探針的使用壽命。如圖 13 所示為本系統架設示意圖，於進行掃描試片之表面形貌的同時，於導電探針尖端施予一微小的偏壓，並於訊號線端引出通過試片之電流訊號，經由前置電流放大器轉換為電壓訊號之後，傳送至原子力顯微儀的控制器 NanoScope IIIa，進行同步電流 (電壓) 訊號記錄。

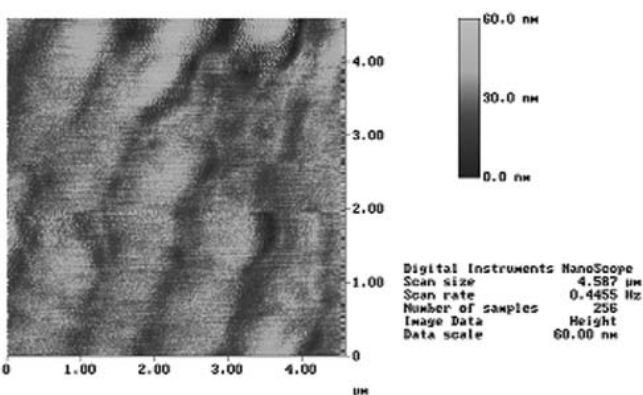


圖 11. 針對 1 微米寬光柵標準樣品量測。

而前置放大器的反應時間必須非常短，以快速轉換導電探針所掃描到的每一個點的電流值，因此 CAFM 檢測會同時取得試片的表面形貌以及相對應 (點對點, pixel to pixel) 的電流影像。藉由電流影像的資訊，影像中每一點畫素的色階代表相對應的電流值，可轉換為矩陣 (256 × 256; 512 × 512) 的資料型態之後，進行電流值資料區間個數統計工作，此為相對應於此一掃描區域的電流分布統計圖。

本文將藉由 IZO 透明導電薄膜的後處理程序，討論如何經由不同的表面處理過程來提昇表面電性。由此驗證本中心自行架設之導電性原子力顯微術於不同試片之間，於極區域表面電性的檢測機

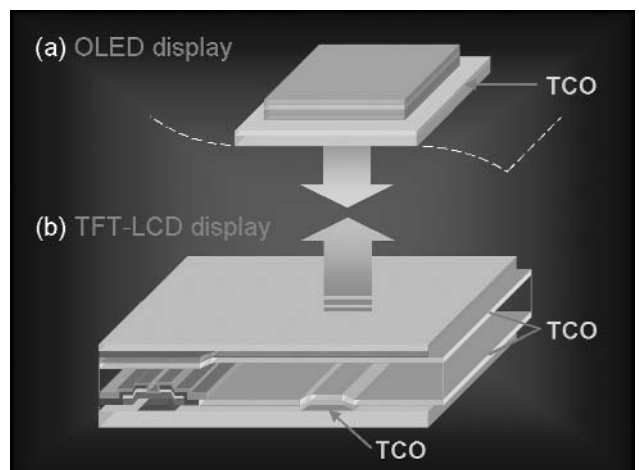


圖 12. TCO 透明導電薄膜被廣泛應用於光電元件，其中包括：(a) OLEDs 有機發光二極體顯示面板單元，(b) TFT-LCD 薄膜電晶液晶顯示器單元。

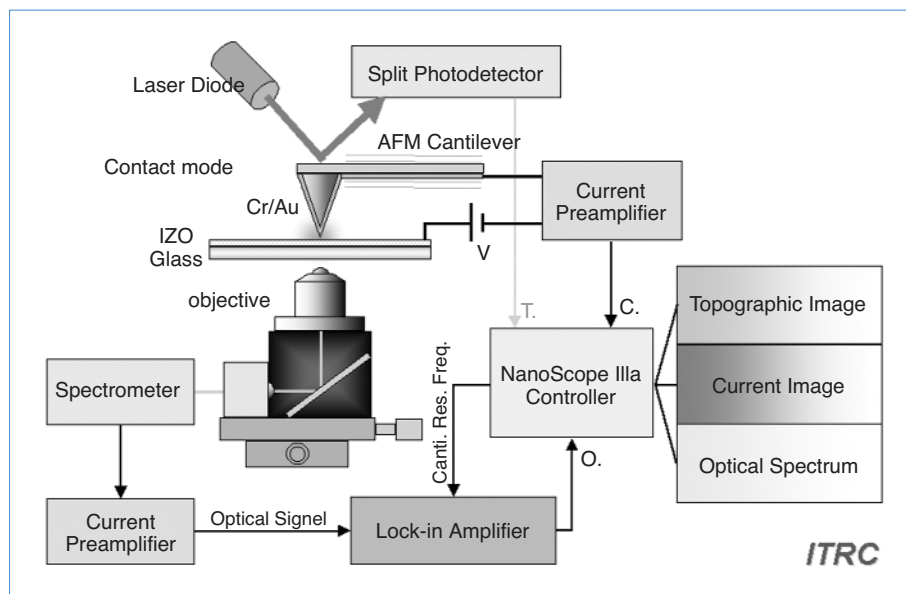


圖 13. 儀科中心自行架設於一般原子力顯微儀之 CAFM 系統架構示意圖。

制，所具備的高度分辨能力。

如圖 14 所示，(a) 是未經表面處理的 ITO (indium tin oxide) 透明導電薄膜之 AFM 掃描影像 (影像尺寸皆固定為 $3\ \mu\text{m}$ 見方)，表面粗糙度 $\text{RMS} = 1.96\ \text{nm}$ ；(b) 是 AFM 掃描過程導電探針施加 $-0.1\ \text{V}$ 偏壓所取得的相對應電流影像，色階愈亮代表相對導電性愈高；(c) 是透明導電薄膜經過特定清洗步驟與電漿處理後的 AFM 掃描影像，表面粗糙度 $\text{RMS} = 2.06\ \text{nm}$ ；(d) 是對應於 AFM 掃描影像 (c) 的電流影像，掃描過程同樣施加偏壓 $-0.1\ \text{V}$ 。電流

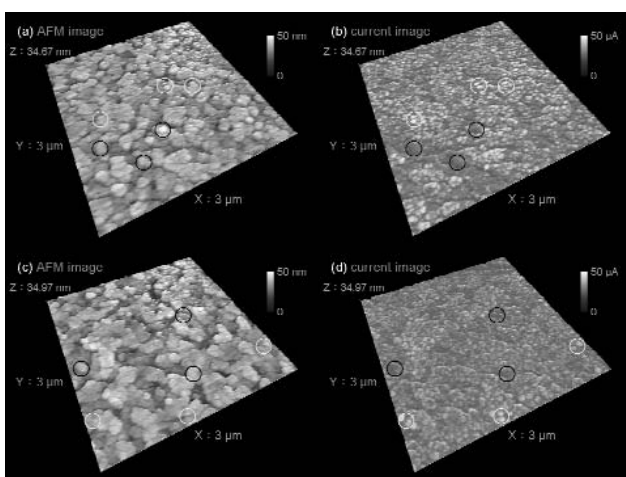


圖 14. (a)、(c) 是 ITO 透明導電薄膜的 AFM 掃描影像，(b)、(d) 是相對應的電流影像。

影像中，淺色圓圈內的區域代表相對導電性較高，深色圓圈內的區域則代表相對導電性較低，導電區域的尺寸分布範圍為 $5\text{--}90\ \text{nm}$ 。由 CAFM 電流影像，可清楚辨識導電區域的分布情形。電流統計結果顯示，經過清洗步驟與電漿處理的透明導電薄膜，具有較佳的導電性均勻度，以及佔有較大比例的導電區域。

近年來，IZO (indium zinc oxide) 透明導電薄膜諸多材料特性的優點被發現，包括導電率高 ($> 10^3\ \Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)、穿透率高 (可見光 $> 85\%$)、平整度佳、無毒性、化學穩定性高、非晶結構蝕刻速率快及低溫沉積製程⁽¹⁰⁻¹¹⁾ 等特性，使得 IZO 透明導電薄膜比現有沉積溫度較高的 ITO 薄膜，更適合應用於新世代可撓式平面顯示面板。使用 IZO 透明導電薄膜於 OLED 元件的製作，得到更高的發光效率曾被報導⁽¹²⁾，可預期 IZO 透明導電薄膜未來廣大的應用潛力。

圖 15 為 IZO 透明導電薄膜經過數種清洗步驟與電漿處理後所得到的微區域表面形貌以及相對應的電流影像，「I, A」表示分別經過異丙醇與丙酮溶液清洗 15 分鐘 (如圖 15(a) (b))；「N, I, A」表示經過調配溶液 ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{NH}_4\text{OH}/\text{de-ionized H}_2\text{O}$) 以 1 : 1 : 5 比例清洗 30 分鐘，以便處理殘留於表面的有機分子，再分別經過異丙醇與丙酮溶液清洗 15 分鐘 (如圖 15(c) (d))；「I, A, P」表示分別經過異丙醇

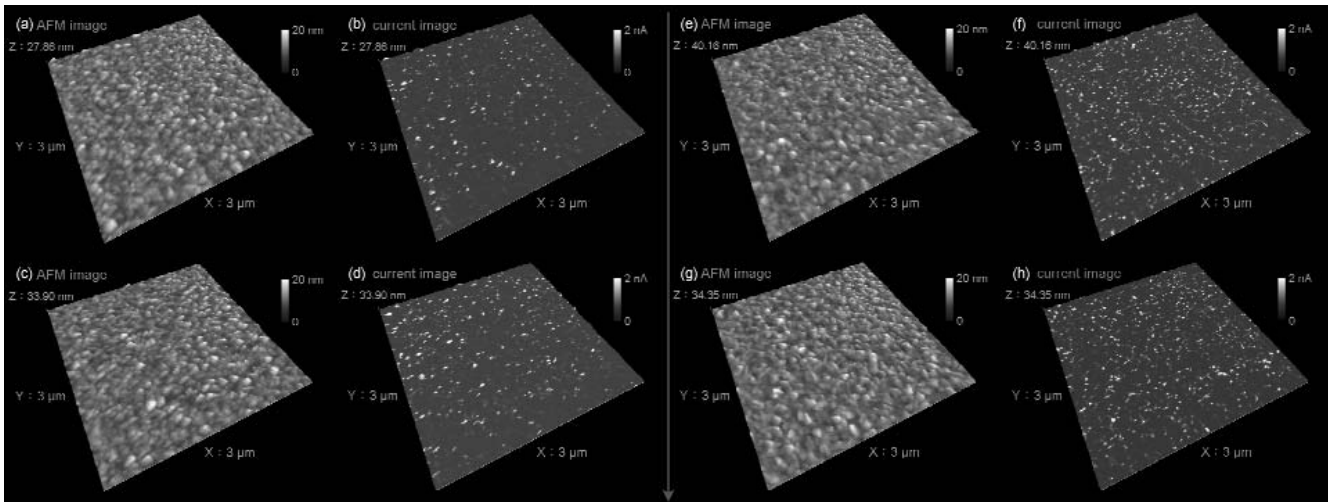


圖 15. (a)、(c)、(e)、(g) 為 IZO 透明導電薄膜經過不同程序 (內文詳) 的表面處理，其 AFM 掃描影像，(b) (d)、(f)、(h) 為相對應的電流影像。

與丙酮溶液清洗 15 分鐘後，再進行 30 W 電漿處理 5 分鐘 (如圖 15 (e) (f))；「N, I, A, P」則表示經過上述「N, I, A」清洗步驟後，另外再進行 30 W 電漿處理 5 分鐘 (如圖 15 (g) (h))。

由圖 16 電流統計結果顯示，經「N, I, A, P」處理過後電流分布範圍變小，而導電性均勻度明顯提高，從電流分布統計圖與電流影像 (圖 15 (b)(d)(f)(h)) 變化可清楚地進行比對。使用四點探針檢測，電阻率小於 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ，符合元件應用規格。由於大尺寸與可撓曲性顯示面板多使用塑膠基板 (例如環烯烴共聚物 metallocene based cyclic olefin copolymer (mCOC)、polyether-polysulfones (PES)、polyethylene terephthalate (PET)、polyimide (PI)、polyether-polyimide (PP) 及 polycarbonates (PC) 等材質)，具備極優異的光學特性、高穿透率、質量輕、低吸溼性及耐酸鹼溶劑等特性，而為了解決塑膠基板耐熱溫度的限制，因此使用 IZO 薄膜於低溫沉積製程的特性。而較佳的結晶性可以提高薄膜內部載子移動速度，並且減少晶界的散射，具有較高的薄膜導電特性。雖然本文所呈現的非晶質 IZO 薄膜在導電性方面，與經過退火處理成相的 ITO 薄膜仍有落差，不過在表面粗糙度較低的非晶型態與導電性較高的結晶型態之間的取捨，如何取得最佳化的關係，仍有進一步的研究空間與改良空間。表面特性諸如粗糙度、電性與功函

數，是影響發光品質的主要因素⁽¹³⁻¹⁴⁾，導電性均勻度與功函數的提昇，可有效增加元件發光效率與元件長時間使用下的穩定性。

CAFM 檢測的優點是非破壞性、試片不需特別的準備工作即可進行量測。CAFM 檢測技術不僅可以同步取得極區域的立體表面形貌分布情形與相對應電流影像，而且經由數據處理結果可獲得表面粗糙度統計、截面高度分析、截面橫向距離分析、粒徑分析、特定高度之分布比例統計 (橫向切

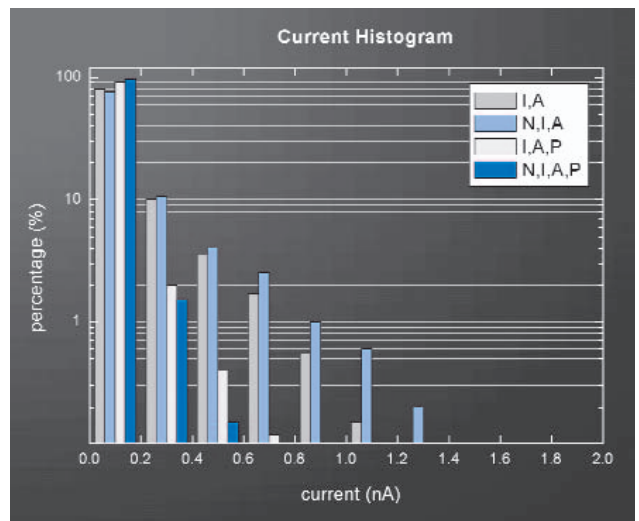


圖 16. IZO 透明導電薄膜經由數種不同的表面處理過程之電流值統計分布圖。

面統計) 以及電流統計分布圖、定點 $I-V$ 曲線等資訊, 符合透明導電薄膜與發光元件相關研究開發的需求, 為製程參數建立、功能性驗證、故障分析比對不可或缺的參考依據。

四、結語

奈米表面形貌檢測及光電檢測勢必成為未來科技投入的重點之一, 目前市場的掃描探針顯微儀的操作模式大同小異。有鑑於科技先期研究, 往往針對不同實驗設計而加以改良儀器運作模式, 以符合實驗需求, 是以推廣如此系統原理設計的用意。

研究領域包含近場光學、奈米光子學、高解析光顯微、儲存或顯影技術、生物基因染色體定序、發光材料之光電特性等都經過許多驗證, 而輕敲模式音叉回饋控制亦可於液體中進行較高靈敏度的實驗⁽¹⁵⁾。此外, 目前儀器市場上尚未有輕敲式設計之音叉回饋控制的標準商用機台。本文自行設計及開發之改機技術, 提供了更多樣性及低成本的研究考量。

儀科中心長年致力於奈米表面檢測技術的開發以及應用, 除了 LFM (側向力顯微術、摩擦力顯微術)、MFM (磁力顯微術)、EFM (靜電力顯微術)、FMM (力調變顯微術)、NSOM (掃描近場光學顯微術)、force imaging (力曲線) 與 phase imaging (相變化) 等檢測技術以外, 目前 CAFM 檢測技術已提供相關學術界與產業界技術諮詢與資料分析的服務, 作為材料開發、表面性質研究與元件效率提昇等研發工作的重要依據。

參考文獻

1. G. Binnig and H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta*, **55**, 726 (1982).
2. R. Reddick, R. J. Warmack, and T. L. Feerrell, *Phys. Rev. B*, **39**, 767 (1989).
3. R. Toledo-Crow, P. C. Yang, and M. Vaze-iravani, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2957 (1992).
4. R. Stockle, C. Fokas, V. Deckert, and R. Zenobi, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 160 (1999).
5. B. Hecht, B. Sick, and U. P. Wild *et al*, *J. Chem. Phys.*, **112** (18), 7761 (2000).
6. K. Karrai and R. D. Grober, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1842 (1995).
7. C. O. Poon, F. L. Wong, S. W. Tong, and R. Q. Zhang *et al*,

Appl. Phys. Lett., **83** (5), 1038 (2003).

8. J. X. Tang, Y. Q. Li, L. S. Hung, and C. S. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **84** (1), 74 (2004).
9. S. W. Tonga, M. K. Funga, C. S. Leea, Y. Lifshitz, S. T. Leea, and A. Hoffman, *Appl. Surf. Sci.*, **220**, 19 (2003).
10. T. Sasabayash, N. Ito, E. Nishimura, and M. Kon *et al*, *Thin Solid Films*, **445**, 219 (2003).
11. Y. S. Jung, J. Y. Seo, D. W. Lee, and D. Y. Jeon, *Thin Solid Films*, **445**, 63 (2003).
12. W. J. Lee a, Y. K. Fang, J. J. Ho, and C. Y. Chen *et al*, *Solid-State Electronics*, **46**, 477 (2002).
13. J. S. Kim, M. Granstrom, R. H. Friend, N. Johansson, W. R. Salaneck, R. Daik, and W. J. Feast, *J. Appl. Phys.*, **84**, 6859 (1998).
14. K. Sugiyama, H. Ishii, Y. Ouchi, and K. Seki, *J. Appl. Phys.*, **87**, 295 (2000).
15. D. P. Tsai and Y. Y. Lu, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2724 (1998).

-
- 林宇軒先生為國立台灣大學物理碩士, 現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 蘇健穎先生為國立中正大學物理碩士, 現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。
 - 潘漢昌先生為國立台灣科技大學機械博士, 現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
 - 蕭銘華先生為國立中興大學材料博士, 現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。
 - Yu-Hsuan Lin received his M.S. in physics from National Taiwan University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Chien-Ying Su received his M.S. in physics from National Chung Cheng University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Han-Chang Pan received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.
 - Ming-Hua Shiao received his Ph.D. in materials engineering from National Chung Hsing University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.