

# 奈米表面檢測技術之回顧

## Review of Nanometer-Scale Surface Analysis Technology

蘇健穎、林宇軒

Chien-Ying Su, Yu-Hsuan Lin

掃描探針顯微術與近場光學顯微術於奈米表面檢測技術佔有重要的地位，是產業界與學術界頗受重視的檢測分析技術。掃描探針顯微術具備原子級解析度，同時可檢測材料表面電性、磁性與力學等多種微觀特性，而近場光學顯微術則突破傳統光學繞射極限的解析限制，無論在生物、材料及物理化學等領域都有廣泛的應用。本文將介紹這兩項技術的基本原理以及在國科會精密儀器發展中心長年來的研究發展與應用。

Scanning probe microscopy and near-field scanning optical microscopy are important technologies for nanometer-scale surface analysis, and are highly valued among industrial and academic research. The scanning probe microscopy provides atomic resolution, furthermore is applicable for analysis of properties such as electrical, magnetic, mechanical and many more. Near-field scanning optical microscopy overcomes the diffraction limit of the conventional optical resolution, and is extensively applied in the fields of biology, material science, physics and chemistry. These two technologies will be introduced in this article including basic principles, developments and applications in the years of research at Precision Instrument Development Center (PIDC).

### 一、掃描探針顯微術之原理與發展

自從掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy, SPM) 問世以來，探索原子尺度的微觀面貌不再需要經過繁瑣的程序而得。此外，SPM 更具備了對於奈米尺度之表面操縱與圖案成形的能力，其中以原子力顯微術 (atomic force microscopy, AFM) 與掃描穿隧顯微術 (scanning tunneling microscopy, STM) 為主。這項技術會引起注意的原

因，來自於 SPM 掃描探針針尖極細 (曲率半徑小於 10 nm)，並可相當準確地直接於樣品表面進行奈米刻痕或微影，而且對於探針的位移可得到良好的操控。這是除了電子束曝光與化學濕蝕刻以外，另一項有利的選擇工具。

SPM 是各種以探針方式研究樣品表面性質 (如表面形貌、電性、磁性、力學特性等) 的顯微術總稱。其中應用最廣泛的是 STM 與 AFM，其解析能力可達原子級。

STM 於 1981 年由 IBM 公司 Dr. Gerd Binnig 和 Dr. Heinrich Rohrer 共同發明。1986 年兩人與 Dr. Ernst Ruska 共同獲得諾貝爾物理獎。STM 的原理是藉由量測探針針尖與樣品表面的穿隧電流變化，所產生微小區域表面形貌的影像，其操作條件是必須在真空中，而且樣品必須是導體。

AFM 則是利用探針尖端與試片表面的作用力，即凡得瓦力相吸或相斥的作用力，使得探針懸臂產生彎曲偏移。藉由在試片表面掃描過程中，即時紀錄掃描裝置於懸臂上下偏移過程所進行的高度回饋量，進而產生樣品表面形貌的影像。AFM 幾乎不受成像環境的限制，不論是在大氣、真空或者是液面下皆能操作，且分析的樣品不限定是導體<sup>(1)</sup>。因此 AFM 為目前最方便、使用最廣泛的 SPM 之一，而且維護相當容易，在維護成本上遠低於其他檢測儀器。圖 1 為國科會精密儀器發展中心 (以下簡稱精儀中心) SPM 架設示意圖，除了原有的表面檢測技術，另外具備自行建立之壓電反應力顯微術、導電性原子力顯微術以及奈米級微影技術等。

## 二、奈米表面檢測技術之應用

### 1. 磁力顯微術

在材料表面磁性的研究上，特別是磁區分布 (磁化方向相同的區域) 的檢測技術，發展出許多相關的方法，常見的有電子全相術、磁光克爾效應、Lorentz 穿透電子顯微術、偏極分析掃描電子顯微術、磁光法拉第效應以及磁力顯微術 (magnetic force microscopy, MFM) 等。其中以 MFM 的發展最新，最晚發展出來，由於其同時具備約 50 nm 高解析度、無成像環境限制及操作容易等優點，已逐漸成為磁性材料研究領域中極為重要的工具之一。磁性物理一直是科學家非常感興趣的研究主題，而今對於磁性材料巨觀與原子尺度的微觀現象已經有相當的了解，不過對於這兩個尺度之間的介觀磁性行為，仍然在進行研究當中，其中磁性材料的表面介觀特性便是重要的研究領域之一。在實際應用上，磁性紀錄材料向來是資料儲存市場的主流，所涵蓋的範圍包括產業界、醫學界與學術研究等領域的應用。因此在高密度磁性材料資料儲存技術極具

應用價值，而高解析磁性檢測技術更是研究發展所必須具備的。

磁力顯微術是利用磁性探針與試片表面之間，藉由磁性交互作用所取得的表面磁化結構的一種顯微技術。MFM 為 SPM 的分項技術，共同特徵是使用一支特製的微小探針，來偵測探針與試片表面的某一種交互作用與物理特性。鍍上磁性薄膜的探針，會受到樣品磁場作用而產生偏移，掃描過程中維持探針與樣品表面固定的磁交互作用，即可取得磁力影像。

圖 2 為金屬薄膜數位錄影帶的影像<sup>(2)</sup>，取得之單一磁軌寬度約為 350 nm。圖 3 為磁性軟碟片經過格式化之後，尚未紀錄資料時的影像，左邊是樣品表面形貌的高度變化，可見磁粉的分布使得表面相當粗糙，右邊則是偵測相位變化所得的磁力影像，其中亮暗條紋出現的區域是訊號最強的地方，分別代表斥力與引力，紀錄軌跡呈現週期性排列。由於探針經過垂直磁化，因此訊號最強處是在兩個不同磁區交界處，而兩種不同磁化方向代表 0、1 兩種紀錄位元。由圖 2 與圖 3 比較可知，金屬薄膜數位錄影帶的磁軌寬度遠小於軟碟片，因此其紀錄密度遠高於軟碟片。另外，觀察本質磁區的大小約 100 nm，小於紀錄磁軌寬度，強度也弱很多。因此本質磁區並不會影響資料的儲存與讀取。若欲取得

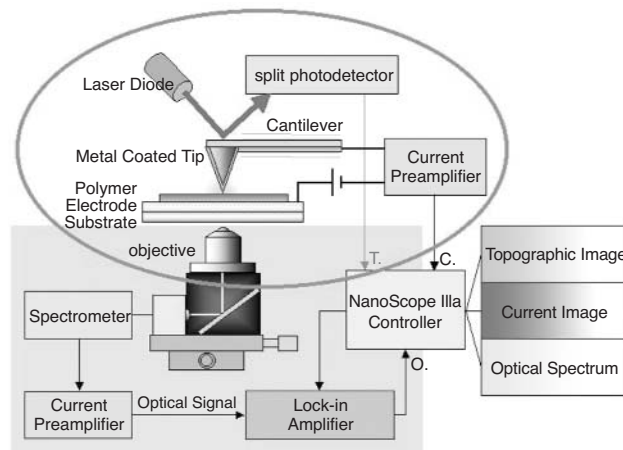


圖 1. 精儀中心的 SPM 架設示意圖，除了基本的奈米級表面形貌、表面粗糙度、截面分析、粒徑分析之外，亦可同時檢測材料電性、磁性與力學等特性。

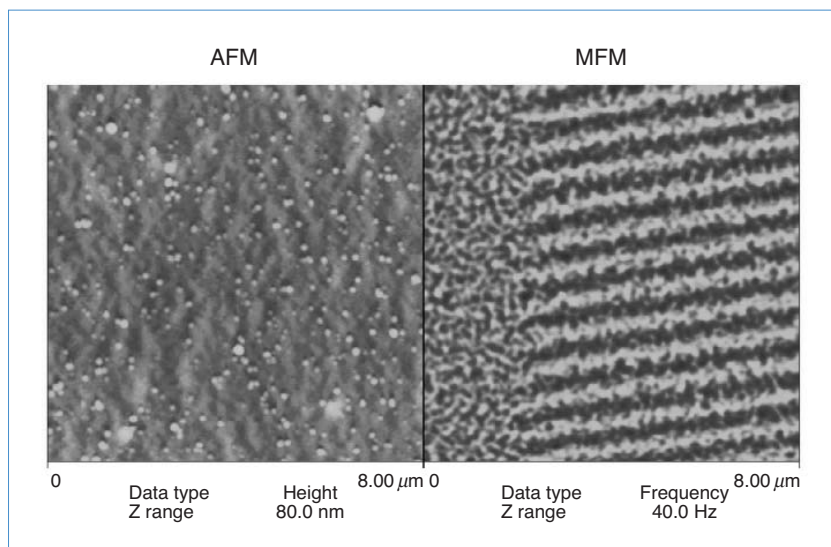


圖 2.

金屬薄膜數位影帶之影像，左邊為表面形貌高低分布，右邊則是偵測探針共振頻率變化量所對應之磁力分布影像<sup>(2)</sup>。

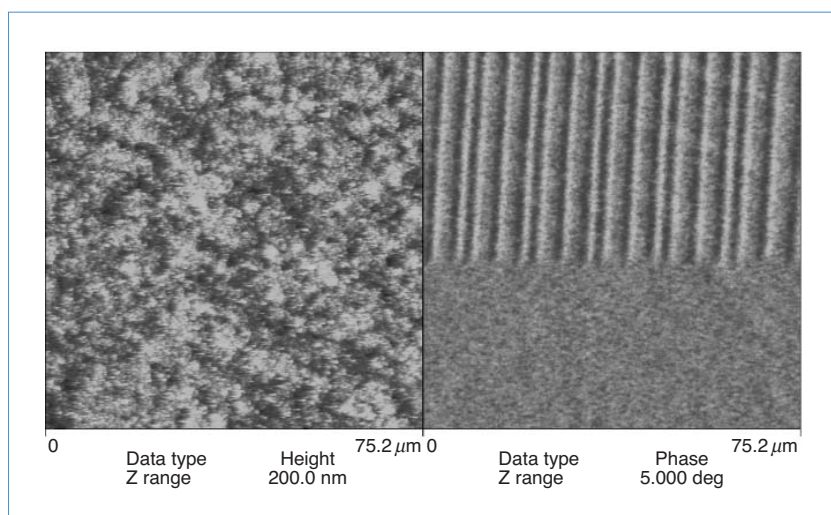


圖 3.

軟碟片格式化後之影像，左邊為表面形貌高低分布，右邊則是偵測相位變化量所對應之磁力分布影像。

愈高的儲存密度，則本質磁區就需愈小。因此 MFM 的數據可供紀錄用磁性材料製程與處理過程的改良依據。MFM 已被應用在多項領域，有很大的潛力，相關技術革新仍不斷在進行中，MFM 將是未來研究磁性材料不可或缺的技術之一。

## 2. 壓電反應力顯微術

鐵電薄膜或壓電材料的壓電反應是相當重要的材料特性。使用 SPM 掃描樣品表面形貌的過程中，藉由波形產生器外加一 AC 電壓於樣品下電極與探針之間，使其產生反壓電效應，再利用鎖相放大器來擷取探針在此頻率的振幅訊號，即可取得樣

品表面的極化影像，此一技術稱之為壓電反應力顯微術 (piezoresponse force microscopy, PFM)。圖 4 為未外加直流電壓，僅施加一小的 AC 電壓於樣品與下電極間，使鐵電薄膜產生壓電效應所得到的殘留極化影像。圖 4 右邊的暗點為具有較大壓電反應的區域，其中上方有局部暗點較集中的地方可能為 180 度 domain，產生較強的訊號。極化區域的大小約為 50—150 nm，強度約為 2.4 pm/V。

精儀中心先前的研究群曾應用原子力顯微鏡掃描器上 Z 軸壓電陶瓷對高度變化的絕佳靈敏度以及鎖相放大器，擷取特定頻率下的交流電壓值的特性，量測 PZT 薄膜微觀的  $d_{33}$  壓電係數，並計算出

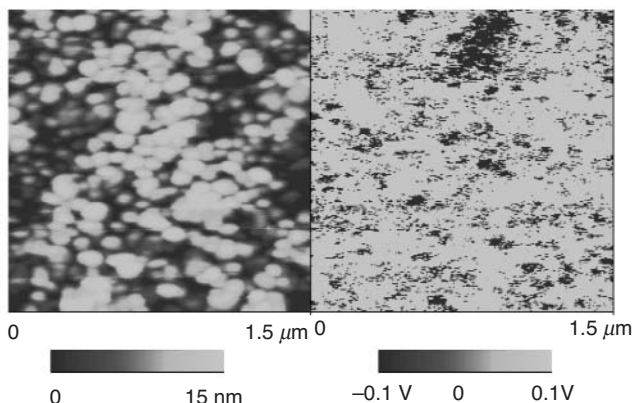


圖 4. 圖形左邊為 PZT 薄膜之表面形貌；右邊則為殘留極化影像。

$d_{33}$  壓電係數，此值接近其他論文所測量的數據。而小於使用雙干涉儀量測數據的原因，是因為雙干涉儀所量測的  $d_{33}$  壓電係數為巨觀上的結果。AFM 所量測的是奈米尺度下的區域，極化區的形變受鄰近未極化區域的壓縮應力影響程度大，以致降低  $d_{33}$  壓電係數。量測 PZT 薄膜微觀的壓電反應曲線，其微觀上的矯頑電場與巨觀上矯頑電場相當接近。極化 PZT 薄膜時，必須使用導電性良好的 AFM 探針，避免電壓損耗。當外加電場即為極化 PZT 薄膜的電場，才有辦法掌握實際極化 PZT 薄膜的程度，並確保量測  $d_{33}$  壓電係數的可靠性。

### 3. 導電性原子力顯微術

氧化銦錫 (indium tin oxide, ITO) 薄膜具有高透明度與高導電度的特性，是現代平面顯示器所不可或缺的电極材料。對於有機發光二極體 (organic light-emitting diodes, OLED) 或高分子發光二極體 (polymer light-emitting diodes, PLED) 而言，ITO 薄膜表面特性，諸如功函數與表面粗糙度等，是影響發光品質重要因素。經由不同的清洗方式可以改變這些表面特性，達到提高發光二極體的發光效率以及延長元件使用壽命。

精儀中心的研究群曾利用自行架設之導電性原子力顯微鏡 (conducting atomic force microscope, CAFM)，研究各種不同清洗方式之 ITO 薄膜表面的區域電學性質<sup>(4)</sup>，證實表面穩定的氧化物，可以使得 OLED 具有較高的發光效率以及穩定度。

圖 5 為針對 ITO 薄膜表面兩種清洗階段所做的 CAFM 檢測。存在於樣品 C 表面的氧化物，遠較樣品 A 與 B 來得穩定，亦即經由紫外光-臭氧處理的過程，會使得 ITO 薄膜表面產生徹底的氧化，同時也驗證了其 OLED 元件具有較穩定的發光效率。此處理方式，可以有效增加 ITO 的功函數，降低 ITO 與有機分子間的能障，達成電流傳導機制。

利用導電性原子力顯微術，可針對經由不同前置處理的 ITO 薄膜表面，進行區域電性分析與研究，這些研究成果可作為未來提昇 OLED 與 PLED 發光品質很重要的製程參考依據。此外，對於 PLED 奈米尺度之光電特性，也有進一步的研究<sup>(3)</sup>，國外尚無類似研究論文出現，結果顯示此項技術極具應用價值。

### 4. 掃描探針顯微術於奈米微影之應用

第一個使用掃描探針技術改變樣品表面形貌的實驗，是由 J. A. Dagata 等人所完成<sup>(7)</sup>。其利用掃描探針進行局部區域的氧化程序，並證實不論是在金屬或者是半導體材料表面皆可形成微小的氧化物線條或圖形<sup>(8)</sup>。後來許多研究團隊進一步利用這種技術於光電微結構、微電子元件、微機電系統與化學、生醫樣品自組用模板的製造。此技術是一種藉由導電探針與試片表面之間，電化學反應生成氧化物的效應。而氧化物成長速率與施予探針偏壓大小有極大的關係。過程中經由程式設定，可精準操控掃描探針位移，進行特定線條之氧化物成長，進而達成微區域圖案成形的目的，這是掃描探針顯微術應用於微影的雛形。

對於軟性材料的圖形加工，一種方式是直接利用探針尖端進行刻劃，而另一種方式則是針對有機材料，由 AFM 或是 STM 探針針尖施予適當電壓，使得表面有機分子結構產生變化。最早使用的材料為沉積於各種基板的自組單分子層 (self-assembled monolayers)，這種材料適用於圖形加工後的顯影。無論是採用氧化或電子束的方式微影，都會受到特定因素的影響。例如作為微影用有機薄膜的膜厚，必須考量由 AFM 或 STM 探針尖端發射電子的穿透深度；不同自組單分子層化學成分的

差異性，對於氧化作用也會有不同的反應。

由實驗可證實 SPM 於奈米級微影的能力與可行性。以奈米碳管探針所具備的獨特機械特性與電性可以製作只有數個奈米線寬的圖形，而且幾乎不會造成任何探針尖端的損耗。在微影的速率方面，使用奈米碳管探針可達五倍快速。配合掃描探針陣列的運用，整體速率則會再以倍數成長。

藉由 SPM 進行奈米級區域氧化作用，可以製作超高密度的資料儲存媒體。應用直徑 2–5 nm 之單壁奈米碳管，拋光處理過的鈦金屬表面可製作達每平方英寸 1.6 Tbit 儲存量<sup>(9)</sup>。經由 SPM 探針直接進行表面刻痕，GaAs/AlGaAs 等異質結構的材料上可產生二維電子能障。透過 SPM 進行表面加工後的鋁和氧化鋁圖案，可作為蝕刻用的遮罩，適用於 CMOS 微電子元件與矽晶微結構的製程應用。各種奈米級元件陸陸續續推出，而微影線寬與元件尺寸不斷地大幅縮小，使得以 SPM 為基礎的奈米技術不論在微影精準度的改良與掃描探針操控穩定性的提昇皆有很大的進步。

### 三、近場光學之原理與發展

自傳統光學顯微術 (OM) 於十七世紀的蓬勃發展以降，因其具備解析樣品精細結構之能力，而對物理、化學及生物醫學等領域的發展有著莫大的貢獻。可惜隨著波動光學的出現，人們領悟到了傳統光學顯微術於遠場範圍 (遠大於一個光波長的距離) 外所無法排除的自然繞射限制，而使得光學顯微術對於其解析度提升的發展逐漸降緩，而趨於以應用為主。

西元 1873 年德國物理學家 Ernst Abbe 提出，光在遠場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，此謂之為繞射極限。其後 Lord Rayleigh 對此寫下了所謂的瑞利準則 (Rayleigh criterion)：

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

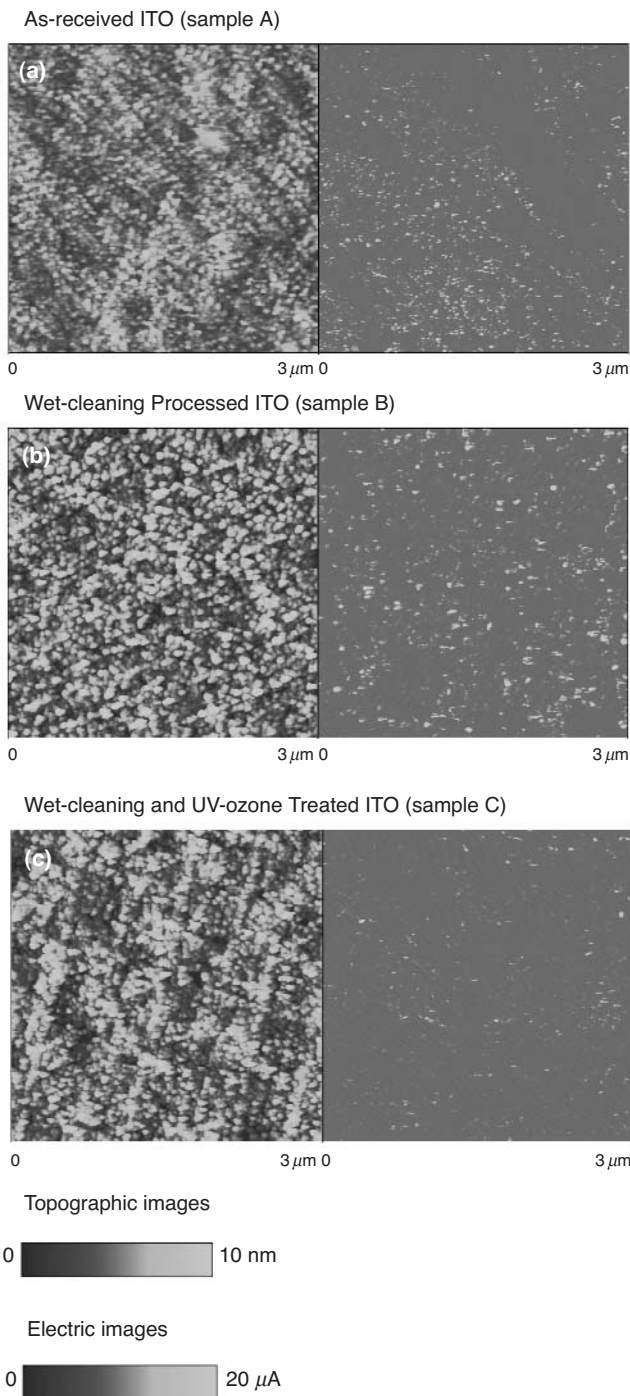


圖 5. (a) 標準樣品 A；(b) 樣品 B：經由異丙醇和二氯甲烷清洗 0.5 h 後，再以 1：1：5 比例之雙氧水、氨水與去離子水清洗 1 h (濕式處理)；(c) 樣品 C：同樣品 B 濕式處理後，置於臭氧環境下用紫外光照射 1 h。圖形左邊為表面形貌，右邊則為電流分布影像圖，探針施加偏壓  $-0.5 V^{(4)}$ 。

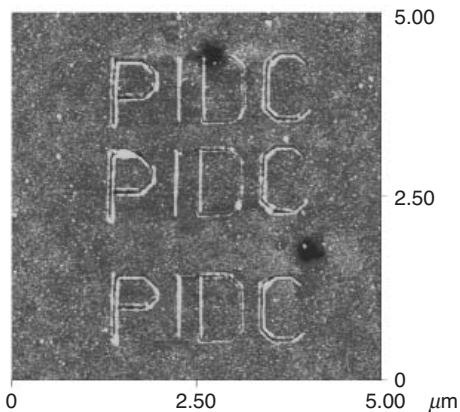


圖 6. 精儀中心 SPM 於 PMMA 光阻表面直接進行奈米刻痕。(線寬小於 45 nm)

$dL$  表示遠場光學所能辨別之最小距離， $\lambda$  為所使用光之波長，NA 為透鏡之數值孔徑 (numerical aperture)，其值為  $n\sin\theta$ ， $n$  為介質之折射係數，而  $\theta$  為用來收集或聚光至感測器所用之物鏡的光孔穴半角。如圖 7 所示，當兩個點光源靠近至  $dL$  之距離時，則觀測者將無法分辨出這兩個點光源，甚而誤以為是一個點光源，而使得解析度受限。

近年來隨著奈米、光電及生物科技等尖端科技領域的高度成長，不管在探討其自然科學的本質，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，皆已相當的進步；更因著各式掃描探針顯微術 (scanning probe microscope, SPM) 的迅速發展，奈米尺度的檢測開始完整而成熟地具備量測試片表面侷域 (localized) 的力、電、磁、熱、聲等特性的能力，而奈米等級之近場光學訊號的量測，更自然不落於話下。

掃描式近場光學顯微術 (scanning near-field optical microscope, SNOM 或 NSOM) 的基本概念最早是由 1928<sup>(10)</sup> 年及 1956<sup>(11)</sup> 年英國的 E. H. Synge 及美國的 O'Keefe 分別提出：若在近場範圍中 (遠小於一個波長的距離)，利用一小於光波波長之孔穴作光學偵測，即可避免因光的波動性質所造成的干擾，而得到超越繞射極限之空間解析度。

1972 年 E. A. Ash 及 G. Nichols<sup>(12)</sup> 以波長三公分的微波，證實可在近場中達到約 1/60 波長的空間解析度，是為近場光學顯微原理的首次實驗證明。後來他們想以可見光波長來進行近場顯微觀測

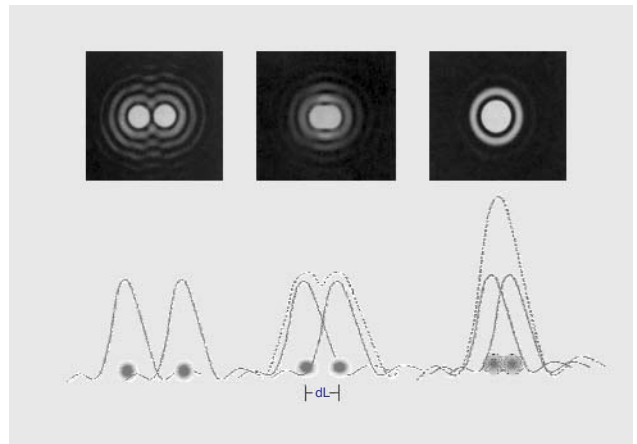


圖 7. 繞射極限示意圖。

的實驗，但卻受限於無法有效控制保持約 1/100 波長的近場距離，而未能實現。

1982 年掃描電子穿隧顯微術 (scanning tunneling microscope, STM) 的出現，為近場光學發展的重要轉捩點<sup>(13)</sup>。1982 至 1988 年之間，德國 MPI 中心的 Fisher 等人、瑞士 IBM 研究中心的 Pohl 等人及美國康乃爾大學的 Lewis 等人，分別以 STM 的探針距離控制技術進行近場光學顯微儀的製作，他們將玻璃細管 (micropipette) 熔拉成錐形，鍍上鋁膜以形成具有奈米尺度光學孔穴的探針，再配合壓電陶瓷管精確控制探針保持在數十奈米的高度，達成近場光學顯微術的雛形。

1989 年 R. C. Reddick 等人利用全反射造成之消散場 (evanescent field) 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鏡 (photon scanning tunneling microscope, PSTM)<sup>(14)</sup>。他們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，因此開啟了利用光纖探針作為近場光學探測的開端。以目前多數的商用近場光學顯微機台而言，已多是使用光纖探針來作為探測方式。

隨著原子力顯微鏡的發展，1992 年美國 AT&T 實驗室的 Eric Betzig<sup>(15)</sup> 及 Rochester Institute of Technology 的 Mehdi Vaez-Iravani<sup>(16)</sup> 分別提出以側向力式 (shear force mode) 作為近場光學探針之回饋控制的機制，並證實可獲得穩定且重複性頗佳的

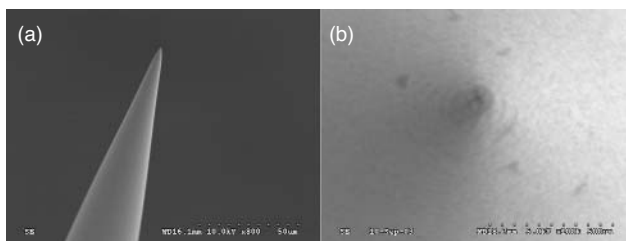


圖 8. 精儀中心製作之光纖探針的 SEM 影像：(a) 光纖探針的測試 SEM 圖，(b) 為鍍金針尖孔穴的 SEM 圖。

近場光學影像。可同步擷取相對應之樣品表面形貌 (topography)，作為實驗對照與研究參考之用。

經過多年不斷的改進與演變，目前近場光學顯微術已被普遍而廣泛地投入於各種相關研究的領域之中，包含近場光學微影 (near-field optical lithography)、近場光儲存技術 (near-field records)、奈米光子科學 (nano-photonics)、單一染料分子的近場螢光顯微術、半導體或高分子材料的光電性質研究、侷域光譜量測等，以近場光學顯微術的高超光學解析能力，相信對於未來科技的研究與發展，是具有十足潛力的利器。

精儀中心的奈米表面檢測實驗室極具先見之明，已於數年前開始獨立研製出高解析的近場光學顯微技術，包含直式及彎曲式光纖探針的製作及性質量測、側向力回饋控制方式及音叉式回饋控制方式的近場光學系統架設等。以下將逐一介紹。

#### 四、近場光學光纖探針研製

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。而其探針的製作品質好壞直接關乎其空間解析度的高低，通常針尖之出光孔大小即為其空間解析的極限，因此其製作的方式格外重要。

目前光纖探針的製作方式普遍分為兩種，即管腐蝕<sup>(17)</sup> (tube etching) 方式及熱熔拉<sup>(18)</sup> 方法。待光纖針形完成之後，須於其尖端表面鍍上一層極薄之金屬膜，以形成奈米尺度的微小孔穴，使光侷限於針尖。

#### 1. 管腐蝕法

1999 年位於瑞士 Zurich 的 ETH 研究中心的 Raoul Stockle 等人提出了利用化學腐蝕方式製作便宜而簡易光纖探針的方法，稱為「管腐蝕法」。其方式乃利用特定濃度的氫氟酸溶液 (HF) 浸泡平切割後的光纖，約 30 至 120 分鐘後泡以去離子水清洗，接著將之置入高溫的濃硫酸 ( $H_2SO_4$ ) 中去除光纖外圍塑膠殼層，最後再以去離子水清洗即可完成。

此方法之優點是可製作出較高錐角 (cone angle) 及高平整度的針尖，並且製作方式簡單而經濟，已普遍為各實驗室所使用。可惜氫氟酸溶液深具毒性，因此在使用的安全考量上尚待各界的自行斟酌。

#### 2. 熱熔拉法

1992 年 Eric Betzig 提出以雷射熱熔的方式來製作光纖探針，其方法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拽，藉此形成尖銳的光纖探針。

其關鍵技術在於雷射光源的作用時間、能量大小、兩端拉拽力量、延遲時間等等。目前已有商用的機台可供調整，經過許多實驗的嘗試，我們已可藉之輕易地製作符合各種需求的高品質光纖探針。

#### 3. 光纖探針的鍍膜

為了在光纖針尖 (apex) 形成一個遠小於光波長的奈米尺度孔穴，必須在完成針形的光纖上鍍上一層金屬薄膜，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孔穴形成，即為近場收送光訊號之孔穴。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)，通常為 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來達成。

精儀中心先前採用鉑 (Pt) 作為薄膜材質，如今已使用金 (Au) 及鋁 (Al) 作為光纖探針鍍膜的金屬。除了考慮到肌膚深度條件外，亦以其材質對不同光波段的反射率和特性、實驗需求為其優先考量。而我們鍍膜的方式採用獨特的「煎魚式」鍍法，將光纖探針分為正反面交互層鍍以形成奈米孔穴，經過實驗證實，此方法的探針尖端孔穴亦具有相當優異的品質及高超的光學解析力，如圖 8 所示。

#### 4. 彎曲式光纖探針的製作

精儀中心先前的研究群為了簡化近場光學的系統架構，而讓光纖探針能夠直接用於一般的原子力顯微儀 (atomic force microscope, AFM)，無需修改儀器本身的回饋機制，於是發展了彎曲式的光纖探針技術<sup>(19)</sup>。

由於目前 AFM 商用機台的正向力回饋機制已相當成熟，若能直接結合近場光纖在奈米尺度下的收送光訊號能力，除了儀器將具備近場光學及表面形貌的顯微能力外，必然更簡化於實驗上的步驟、儀器的設計及避免其他回饋方式所衍生出的多餘問題。

本實驗室開發的光纖拉引機，乃利用以電弧作為加熱源，配合驅動電路的設計及參數控制，來針對光纖做拉引及不同角度彎曲的加工。其主要元件包含高壓電源供應器、電弧鎢針、拉引裝置、步進馬達及其控制器等等。而利用該儀器形成光纖探針的製作過程中，參數的設定決定了其製作的成功與否，包括電弧持續時間、馬達加速度、轉輪速度及其步進數。也可直接利用商用 CO<sub>2</sub> 雷射熔拉機完成直式光纖探針，接著再透過鎢針電極來針對特定點加熱，光纖熔解時利用重力來彎曲光纖，藉著電弧時間的長短來達成所需的彎曲角度，即可完成製作。

然而由於彎曲及熔拉的光纖探針已經破壞其原本元件設計的波導結構，因此在該處的光通量將迅速耗減，導致探針收送光訊號的效率將變得相當的差。不過在某些特定的實驗需求下，其效率仍是足夠的，因此若欲量測近場光學訊號，彎曲式光纖探針仍是一種不錯的方法與選擇。而經過實驗後的經驗告訴我們，約略在七十幾度的彎曲角度時，光纖

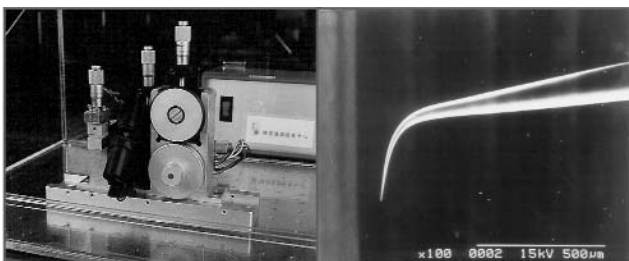


圖 9. 光纖拉引電弧機的結構實體圖及彎曲式光纖探針的實體圖。

探針將會有最大的收光效率。

在完成彎曲式光纖探針的製備後，需於針背上鍍上高反射率金屬薄膜，使其藉光槓桿變化而反應回饋的光偵測器獲得足夠光強度，以增加 AFM 的正向力回饋的敏感度。圖 9 為本實驗室開發的彎曲式光纖探針的實體圖及電弧機的結構實體圖。

精儀中心除了成功地製作出彎曲式光纖探針、量測其光通量及彎曲角度的關係外，亦對其彈性係數做一完整的量測。其方式乃利用不需具備均勻形狀及密度的微小附著物，使彎曲式光纖探針的共振頻率產生變化，再配合理論計算來得到彈性係數的量測。

### 五、近場光學回饋系統開發

光纖探針的製作乃近場光學領域中相當重要的課題之一，而另外一個亦十分重要的部分便是探針與樣品表面間的距離維持在奈米尺度。若不選擇使用彎曲式光纖探針搭配 AFM 回饋系統，而以收光效益較佳之直式光纖探針作為量測光訊號元件時，其搭配的閉迴路系統便需要另行設計。

本實驗室自行設計了使用光學及非光學式回饋控制的系統，配合自製的近場光纖探針，來實現近場光學顯微術。

#### 1. 光學式側向力回饋控制

側向力 (又稱剪力) 式的探針高度回饋控制方法乃利用一雙向壓電振盪片 (bimorph)，使近場光纖探針沿樣品表面作水平方向的振動，而於其側邊使用一雷射光聚焦於其針尖，量測因探針與樣品間側向力作用而導致的光繞射變化，以作為探針高度的回饋依據。由於其方式仍為光學式回饋，與 AFM 相同，皆是利用四相偵測器測量，所以可以直接將 AFM 機台本身設計的正向力偵測光學頭及光源移除，以另行設計的模組取代，而將原本的 AFM 系統直接改良成近場光學的顯微儀。

圖 10 為精儀中心設計之側向力偵測模組的示意圖及實體圖<sup>(20)</sup>，其光纖探針黏著於一雙向壓電振盪片上，可用丙酮溶解黏膠而更換探針；模組左側為半導體雷射 (laser diode)，其前端有一微小透鏡

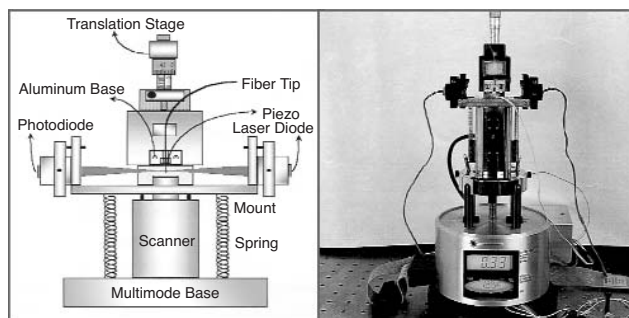


圖 10. 精儀中心製作之側向力偵測模組示意圖及架構實體圖。

聚焦雷射光於探針針尖；右側則為四相光學偵測器，可偵測透過針尖後的變化情況。由於探針是橫向振動，因此四相光學偵測器僅輸出兩相，電流經過差分放大後，正比於探針振動之振幅，亦即探針與樣品距離的回饋訊號依據。

## 2. 非光學式音叉式回饋控制

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，將造成背景值過高的問題，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。因此若能使用非光學式的回饋控制方式，將可避免這些問題，簡化系統及提升近場光學訊號的訊噪比。

石英音叉器 (tuning fork) 為一種標準的壓電振盪元件<sup>(21)</sup>，乃蝕刻石英晶片形成音叉形狀，而在其周圍鍍上金屬電極。目前商用的近場光學機台，多是使用此元件來作為近場距離的感測及回饋控制。由於其方法是屬於非光學式的力學感測，所以可以避開光學式側向力回饋控制所可能造成的問題<sup>(22)</sup>，本實驗室於此理念下亦自行開發此型的近場光學技術。

如圖 11 (左) 所示，我們設計了一個特殊的機械掃描頭 (scanning head)，可相容並安裝於原本 AFM 的掃描器 (scanner) 上，並經由彈簧固定。掃描器上置放了設計好的組件，分別由磁性緩衝單

元、雙向壓電陶瓷材料、鈦鐵硼強磁片、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。

石英音叉用特別的黏膠技術黏著上光纖探針，做為感測器 (sensor)，如圖 11 (右) 所示。當提供雙向壓電陶瓷片電壓並進行一區間的掃描頻率時，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。而一旦我們提供工作電壓驅使雙向壓電陶瓷振動時，音叉與探針將隨之作連動，可藉由探針與樣品表面作用造成的音叉輸出訊號改變，而作為高度迴饋控制的依據。

## 3. 系統控制電路模組

為了使原本 AFM 系統的回饋機制與我們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，本實驗室亦自行設計了控制用的電路模組，作為一電子訊號提供、輸出入與轉換的中繼單元。

其設計觀念在於提供上述兩種回饋方式皆可使用的電路，包含了提供半導體雷射的降壓電路、電流與電壓間之轉換電路、訊號放大與匹配、濾除雜訊等，並以盒形封裝，與 AFM 的 15 pin 接頭可直接相容及使用。目前已製作出第二代電路盒，可以簡單並方便地使用於機台上，達成不同回饋控制的目的。

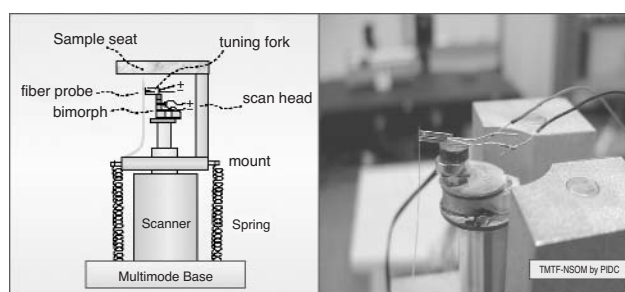


圖 11. 精儀中心製作之石英音叉距離感測模組示意圖及實體圖。

## 六、結語

奈米檢測實為未來科技著重的焦點之一，精儀中心長年於此領域投入相當多的人力進行研究，並有許多具體的技術發展及成果，相關研究包括原子力顯微術及其在半導體研究上的應用、磁力顯微術及其在磁性薄膜檢測的應用、氧化銦錫薄膜的奈米表面電性研究、電致發光高分子之奈米尺度光電特性研究、近場光學顯微系統研製、彎式近場光學探針彈性係數量測等，研究成果並發表於國內外期刊與研討會議上。在儀器研製方面，有自行架設之近場光學顯微系統、導電性原子力顯微鏡、光纖拉引電弧機(圖 9)、側向力偵測模組(圖 10)以及石英音叉距離感測模組(圖 11)。

對於此一領域，精儀中心可以提供技術諮詢與技術移轉，歡迎有興趣從事儀器開發或材料特性研究的產業界或學術界洽詢。此外，精儀中心每年提供數十項奈米表面檢測之技術服務，協助產學界在材料表面特性分析與製程條件之改善。

## 參考文獻

1. 林鶴南, 李龍正, 劉克迅, 科儀新知, **17** (3), 29 (1996).
2. 邱裕煌, 林鶴南, 科儀新知, **19** (3), 41 (1997).
3. 王申申, 林鶴南, 陳思翰, 科儀新知, **23** (2), 4 (2001).
4. 陳思翰, 科儀新知, **23** (2), 22 (2001).
5. 陳思翰, 李龍正, 林鶴南, 科儀新知, **20** (3), 33 (1998).
6. 陳思翰, 林鶴南, 科儀新知, **21** (6), 56 (2000).
7. J. A. Dagata, W. Tseng, J. Bennet, C. J. Evans, J. Schneir, and H. H. Harary, *Appl. Phys. Lett.*, **57** (23), 2437. (1990).
8. R. Nemetudi, N. J. Curson, N. J. Appleyard, D. A. Ritchie, and G. A. C. Jones, *Microelectronic Engineering*, **57**, 967 (2001).
9. E. B. Cooper, S. R. Manalis, H. Fang, H. Dai, K. Matsumoto, S. C. Minne, T. Hunt, and C. F. Quate, *Appl. Phys. Lett.*, **75** (22), 3566 (1999).
10. E. H. Synge, *Philos. Mag.*, **6**, 356 (1928).
11. J. A. O'Keffe, *J. Opt. Soc. Am.*, 46 (1956).
12. E. A. Ash and G. Nichols, *Nature*, **237**, 510 (1972).
13. D. W. Pohl, *Advances in Optical and Electron Microscopy*, edited by C. J. R. Sheppard and T. Mulvey, London:Academic, 243 (1990).
14. R. Reddick, R. J. Warmack, and T. L. Feerrell, *Phys. Rev. B*, **39**, 767 (1989).
15. E. Betzig, P. L. Finn, and J. S. Weiner, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2484 (1992).
16. R. Toledo-Crow, P. C. Yang, and M. Vaze-iravani, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2957 (1992).
17. R. Stockle et al., *Appl. Phys. Lett.*, 75, 160 (1999).
18. B. Hecht, *Forbidden Light Scanning Near-field Optical Microscope*, Ph.D. Thesis, University of Basel, Hartung-Gorre, Konstanz (1996).
19. H.-N. Lin, U. Lewlomphaisarl, S. H. Chen, L. J. Lee, and Din Ping Tasi, *Review of Scientific Instruments*, **69**, 3843 (1998).
20. H.-N. Lin, U. Lewlomphaisarl, S. H. Chen, L. J. Lee, and Din Ping Tasi, *Review of Scientific Instruments*, **69**, 3840 (1998).
21. K. Karrai and R. D. Grober, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 1842 (1995).
22. D. P. Tsai and Y. Y. Lu, *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 2724 (1998).

- 蘇健穎先生為國立中正大學物理碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
- 林宇軒先生為國立台灣大學物理碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
- Chien-Ying Su received his M.S. in physics at National Chung Cheng University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Yu-Hsuan Lin received his M.S. in physics at National Taiwan University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.