

# 像散式光學偵測系統：奈米量測新利器

## Astigmatic Detection System: New Tool for Precision Measurements

黃英碩、胡恩德、黃光裕、張嘉升、廖先順、王偉珉、陳彥宏、陳敬修、鄭仲翔、黃宣富

Ing-Shouh Hwang, En-Te Hwu, Kuang-Yuh Huang, Chia-Seng Chang, Hsien-Shun Liao, Wei-Min Wang, Yen-Hung Chen, Ching-Hsiu Chen, Chung-Hsiang Cheng, Hsuan-Fu Huang

像散式偵測已被廣泛應用在光碟機產業，用來判斷光碟片與光學讀取頭的離焦情況。中央研究院物理研究所與台灣大學機械系的團隊發現，DVD 光學讀取頭可以達到次原子級的位移解析度及奈米弧度級的表面傾角變化的精密量測。除此，光學讀取頭的偵測光點小於 1 微米，偵測頻率達 60 MHz 以上，可偵測很小元件的高頻運動，加上光學讀取頭取得容易、且價格低廉，所以能夠發展出很多不同的應用，包括科學教育的教具及訓練工具，甚至研究級的精密儀器設備。本文將介紹光學偵測系統的原理、技術的發展、在奈米級量測的應用、以及本團隊所開發的各種獨步全球的技術，也期望能結合更多學界與業界有志之士，一同推廣像散式光學偵測的量測技術，讓台灣在奈米精密量測能在國際上扮演重要角色，甚至讓台灣的精密量測產業更往前邁進一大步。

Astigmatic detection was originally developed in the optical disk recording technologies to detect the defocused condition of the disk away from the optical pickup head. Our team, comprising a group in the institute of Physics, Academia Sinica and a group in the Department of Mechanical Engineering of National Taiwan University, has discovered that the commercial DVD optical pickup head has a sensitivity to detect linear displacements of sub-angstrom scale and angular changes in nrad. In addition, the detection spot size is smaller than  $1\ \mu\text{m}$  and the detection bandwidth is higher than 60 MHz, thus the DVD optical pickup head can detect high-frequency movements of small objects. Furthermore, it can be purchased easily with a low cost. This opens up various applications from low-cost education and training tools to sophisticated research instruments or equipments. In this article, we will describe the principle of astigmatic detection system (ADS), development and applications of the technology in precision instrumentation, and world-leading ADS technologies developed in our team. We hope to cooperate with other scientists and experts in industry to broaden the application of ADS technologies, and to even bring forth new technologies and industries.

## 一、前言

奈米科技將為 21 世紀人類帶來革命性的產業技術發展，其範疇大致可分成三類：奈米材料與元件、奈米級量測和奈米級致動。台灣在奈米科技發展主要著重在奈米材料與元件，因為其具有優異甚至奇特的性質，且台灣產業多屬量產製造。然而若要建立完整的奈米科技產業，奈米級量測和奈米級致動兩類技術亦不可或缺，不但有助於建立自主的奈米級量測儀器和製程設備之技術，更可與奈米材料與元件之產業技術相輔相成。中研院物理所的「表面奈米實驗室」長期在奈米級量測、奈米級致動方面發展出很多技術，本文將介紹其中一項獨特的奈米級量測技術－像散式光學偵測系統。

市售光碟機內所使用之光學讀取頭，通常採用像散式偵測來判斷光碟片是否在雷射的焦平面或離焦程度，如果離焦超過某一程度，內建音圈馬達便會移動聚焦物鏡使得雷射光能在光碟片表面有最佳的聚焦位置。由於像散式光學偵測機制造就了光學讀取頭的優異特性，因此，只需要擁有後端相對應之控制電路、軟體與不同應用之機構，其解析度很容易超越百萬級的雷射干涉儀 (laser interferometer)。此項技術有多層面的意義：市售讀取頭有優異的特性，不僅取得容易且價格不貴，可以創造出性能優異的高階儀器及設備。尤其重要的是可以建構出精密的量測系統，取代昂貴的進口量測儀器，讓奈米科技的教育及人才訓練更容易普

及化，即使是不富裕的國家也負擔得起。再者，市售讀取頭體積小，重量輕，不難將此像散式量測系統整合到其他設備，讓設備有更好的性能及更多的功能，增加其附加價值。

## 二、原理

像散式偵測光路架構如圖 1(a) 所示，雷射光源產生之發散光束經透鏡組平行化，再經一物鏡 (objective lens) 聚焦於待測物表面上，反射光再經該透鏡組聚焦，通過一可產生像散之鏡片 (astigmatic lens)，射入置於適當距離之光感測器，並在其上形成光點。當雷射光在待測物表面投射點之高度產生變化或待測物表面傾角改變時，光感測器上之光點形狀與位置也發生變化。由光感測器產生之訊號運算後，可得到對焦誤差訊號 (focus error signal, FES)，

$$S_{FES} = (S_A + S_C) - (S_B + S_D)$$

其中  $S_A$ 、 $S_B$ 、 $S_C$  與  $S_D$  分別為光感測器之 A、B、C 與 D 所輸出之光電流訊號。FES 訊號可用於偵測待測物在雷射光軸方向的直線位移，當待測物表面位於焦點時，光點呈圓形對稱，此時  $S_{FES} = 0$ 。當待測物離焦時，光點呈現 AC 方向或者 BD 方向橢圓，端視離焦的距離  $\Delta Z$  為正或負，其對應之輸出訊號為  $S_{FES} > 0$  或  $S_{FES} < 0$ ，如圖 1(b) 所示。而

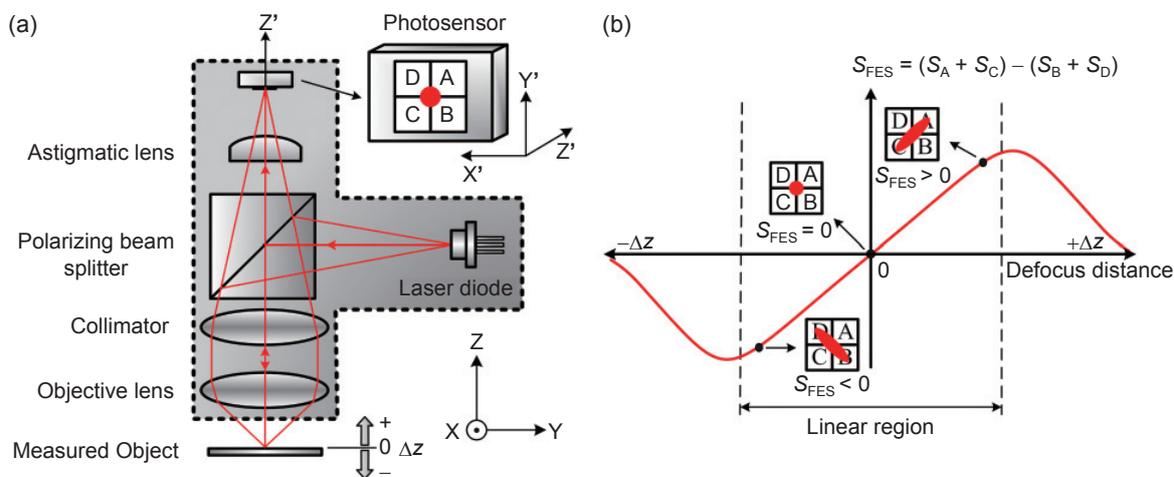


圖 1. 像散式量測機制之光路架構。(a) 像散式偵測光路原理圖，(b) 聚焦誤差訊號曲線圖 (S-curve)。

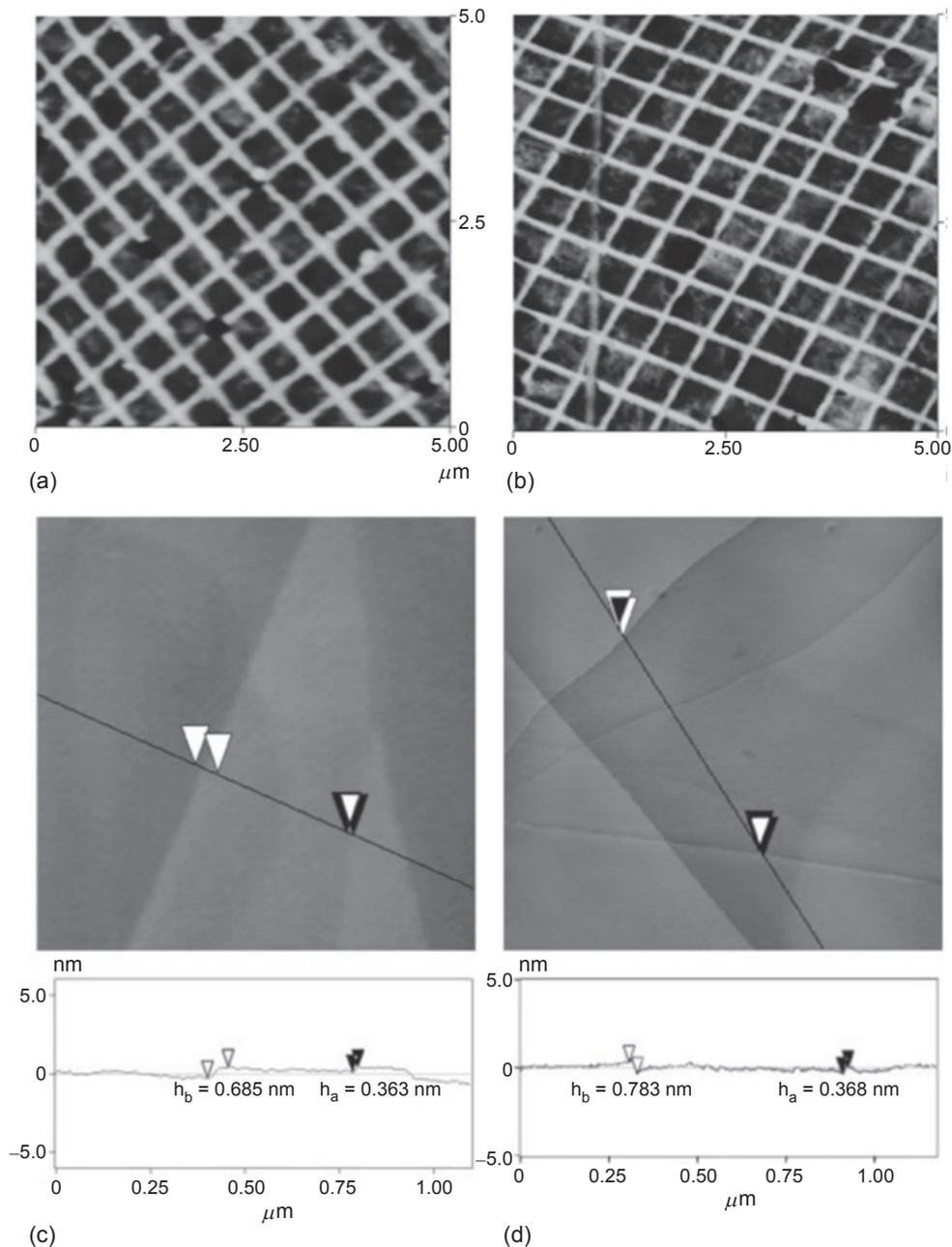


圖 2. (a) 使用像散式光路以半接觸模式掃描 AFM 標準樣品，掃描範圍  $5 \times 5 \mu\text{m}$ ，掃描速度 0.6 Hz。(b) 使用市售光槓桿式光路以半接觸模式掃描 AFM 標準樣品，掃描範圍  $5 \times 5 \mu\text{m}$ ，掃描速度 0.35 Hz。(c) 使用像散式光路以半接觸模式掃描石墨樣品，掃描範圍  $1 \times 1 \mu\text{m}$ ，掃描速度 0.5 Hz。(d) 使用市售光槓桿式光路以半接觸模式掃描石墨樣品，掃描範圍  $1 \times 1 \mu\text{m}$ ，掃描速度 0.5 Hz<sup>(5)</sup>。

$S_{\text{FES}}$  與  $\Delta Z$  之關係呈現 S 型，因此通稱為 S-curve。S-curve 中央的線性區域可用於垂直位移量測應用<sup>(1-5)</sup>，一般紅光 DVD 光學讀取頭的線性區約為 6—8 微米。

早期就有研究學者使用光學讀取頭進行線性位移的量測，但是當時的量測訊號解析度只達數奈米至數十奈米<sup>(1)</sup>。義大利一研究團隊曾經使用 CD 光學讀取頭作為原子力顯微儀之光學偵測元件<sup>(2)</sup>，但

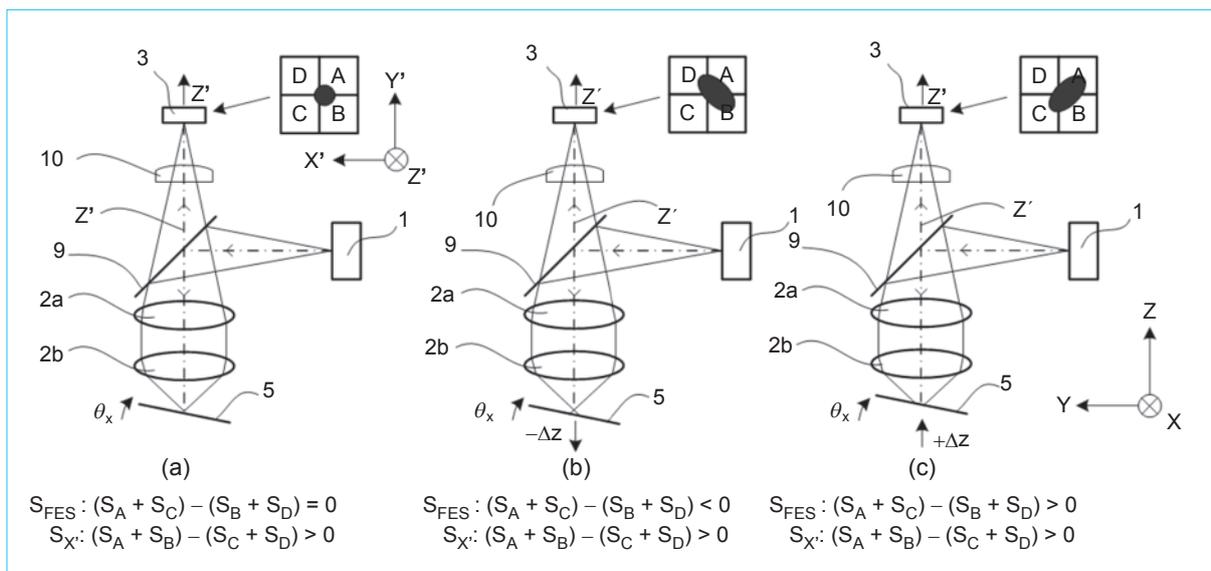


圖 3. 像散光路同時量測位移與角度之機制<sup>(8)</sup>。

是也只達到數十奈米之解析度，且機構龐大複雜又不太穩固，使用上不太便利，所以該架構未受重視。像散式偵測光路之使用雖然很早就有論文發表<sup>(3, 4)</sup>，這其中遇到一重大技術障礙讓此光路架構遲遲無法在奈米級量測廣泛應用或商品化，其主要是因為光學讀取頭的線性區很短，使用者需先將待測物精準地置於 6–8 微米線性區內，那就必須增加一微奈米級調整機構。然而此調整機構通常比 DVD 光學讀取頭龐大且昂貴，讓光學讀取頭之輕薄短小及低成本等優勢因此喪失。

### 三、像散式偵測光路之技術突破

中研院物理所的「表面奈米實驗室」長期致力於發展掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy, SPM)。2002 年開發出光槓桿式 (optical lever or beam deflection) 原子力顯微儀，2005 年團隊中以台大博士生胡恩德為主的幾個人，開始嘗試利用光學讀取頭取代光槓桿式光路以偵測懸臂樑 (cantilever) 的微小位移，當時修改市售 DI Multimode NanoScope IIIa 系統，搭配特製之光學讀取頭和探針夾持機構，成功取得清晰原子力顯微術影像 (圖 2(a))<sup>(5)</sup>。掃描石墨樣品所得影像，隱約可看到單層石墨台階 (約 0.35 奈米)，其高度解

析度達 0.2 奈米 (圖 2(c))。這已超越先前最佳解析度，也暗示市售 DVD 光學讀取頭於垂直位移量測可能達到次原子解析度，將與主流光槓桿式光路之位移解析度相抗衡。

其後改善電路及機構，並進行更精密的量測，確認垂直位移量測可達到次原子解析度，並發現像散式偵測光路也可同時量測待測物表面之兩軸傾斜角度 (tilt angle) 變化<sup>(6-8)</sup>，如圖 3 所示，假設待測物 5 以一垂直於 Z 方向為軸，旋轉一角度，將造成光感測器 PSD3 上光點的平移，原理與光槓桿相似。假設起始條件為穿過物鏡 2b 之雷射光軸垂直於待測物 5 之表面，當待測物 5 置於物鏡 2b 之焦點，且以 X 軸旋轉一傾角  $\theta_x$ ，於 PSD3 上之雷射光點將會沿 X' 軸偏離中央位置，可由  $S_{X'}$  訊號運算求出待測物 5 傾角變化幅度，如圖 3(a) 所示。此時訊號  $S_{X'} = (S_A + S_B) - (S_C + S_D)$  大於零，但由於待測物 5 置於聚焦透鏡 2b 之焦點，所以  $S_{FES} = (S_A + S_C) - (S_B + S_D)$  訊號依然為零。圖 3(b) 為待測物 5 置於聚焦透鏡 2b 焦點距離  $-\Delta z$  之處，且以 X 軸為軸心旋轉一角度  $\theta_x$ 。此時訊號  $S_{X'} = (S_A + S_B) - (S_C + S_D)$  大於零，但由於待測物 5 置於聚焦透鏡 2b 焦點距離  $-\Delta z$  之處，所以  $S_{FES}$  小於零。圖 3(c) 為待測物 5 置於聚焦透鏡 2b 焦點距離  $+\Delta z$  之處，且以 X 軸為軸心旋轉一角度  $\theta_x$ 。此時訊號  $S_{X'}$  大於零，

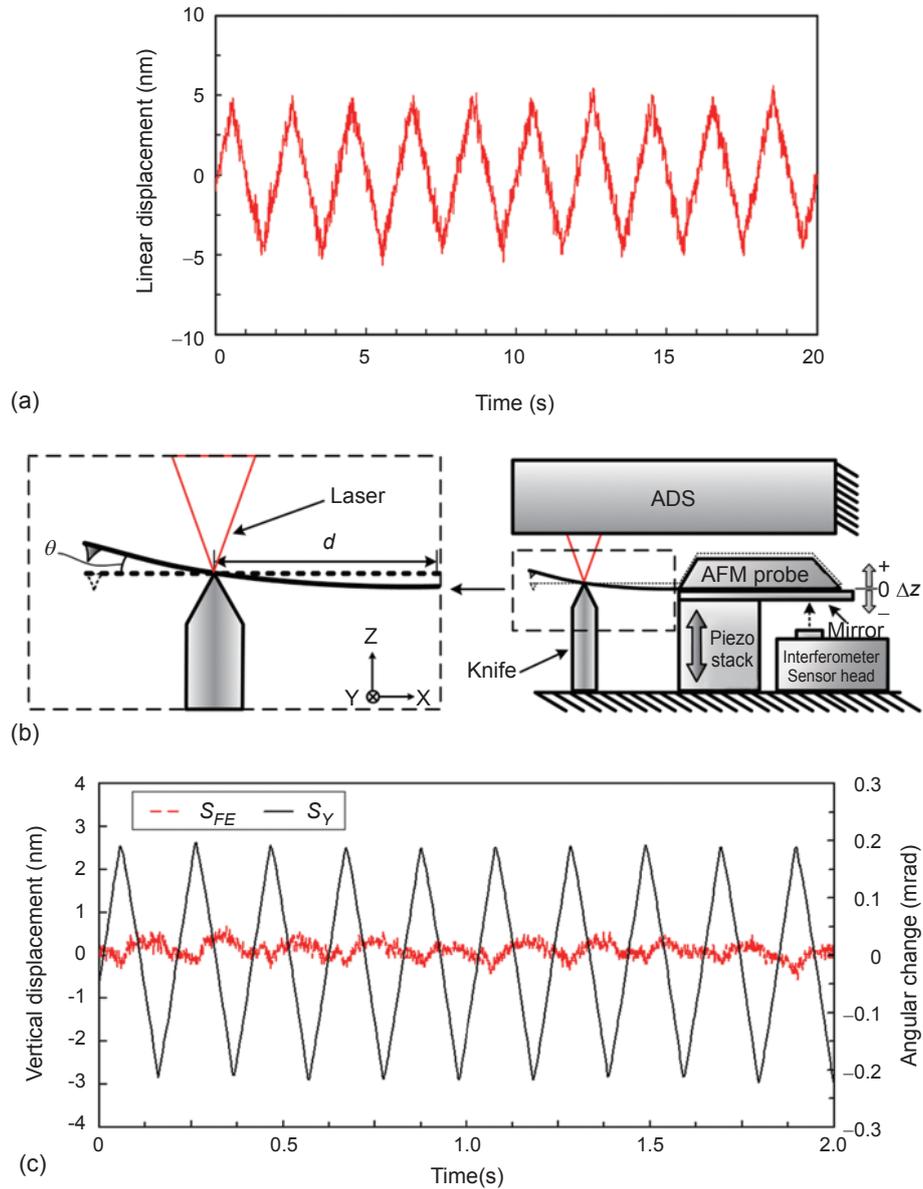


圖 4. DVD 光學讀取頭量測線性位移及角度變化。(a) 量測一鏡面之線性位移，鏡面是由一壓電片以三角波驅動。(b) 純角度變化之量測架構圖，待測物為原子力顯微儀的探針微懸臂，針座由一壓電片以三角波驅動上下位移 64 nm，微懸臂架在一尖銳刀片上，量測點為刀片上方之微懸臂表面，當針座上下位移時，刀片上方之微懸臂應幾乎無線性位移，但有明顯角度變化。 $d = 230 \text{ nm}$ 。(c) 同時測量垂直位移及角度變化之結果<sup>(6, 7)</sup>。

但由於待測物 5 置於聚焦透鏡 2b 焦點距離  $+\Delta z$  之處，所以  $S_{FE}$  大於零。同理，當待測物 5 以  $Y$  軸為軸心旋轉一角度  $\theta_y$  時亦可得到對應之訊號  $S_y$  變化。

位移與角度變化是兩個基礎物理量，隨著科技高度發展，各領域對於這兩物理量更精準、更高頻

寬之量測需求日益殷切。現有數種非接觸式精密量測機制中，都只能量測位移或角度變化之一，如光干涉 (optical interferometry) 只能偵測出物體線性位移的變化，無法同時量測待測物的傾斜角度變化；光槓桿能偵測傾斜角度變化，對於原子力顯微儀的微懸臂探針量測，可藉由懸臂樑偏折角度與垂直

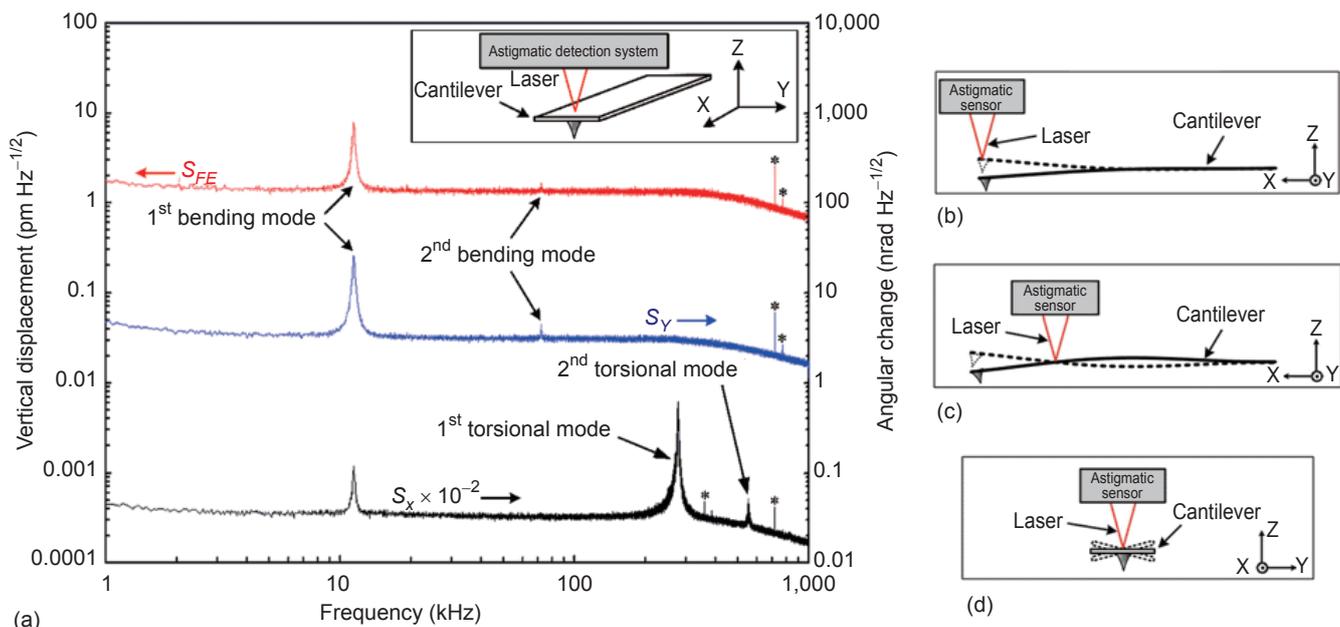


圖 5. (a) 像散式偵測系統量測探針微懸臂樑之熱雜訊圖<sup>(6, 7)</sup>，使用的運算放大器頻寬約在 800 kHz 處開始衰減。(b) 懸臂樑第一彎曲共振示意圖；(c) 懸臂樑第二彎曲共振示意圖；(d) 懸臂樑第一扭轉共振示意圖。

位移之關係間接推測得探針的垂直位移量，而非直接量到位移。像散式偵測系統，則可以同時測量待測物的垂直位移和角度變化，這是現有其他量測機制無法達到的，尤其 DVD 光學讀取頭可以量測待測物表面微米級局部區域的位移、傾角變化，還可應用到微小物體，如微機電元件之機械運動，偵測頻寬可達 60 MHz 以上，涵蓋絕大部分應用需求。

圖 4(a) 是以 DVD 光學讀取頭之對焦誤差訊號來量測一鏡面之線性位移，顯示次奈米之位移解析度；圖 4(b) 是以 DVD 光學讀取頭量測待測物表面之純角度變化的架構圖；圖 4(c) 是利用此架構同時測量垂直位移及角度變化之結果。

圖 4 顯示 DVD 光學讀取頭可以對線性位移和角度變化作精密量測，但靈敏度有多高則需藉由對原子力顯微儀的探針微懸臂之熱雜訊 (thermal noise) 進行量測，熱雜訊量測為探針在沒有外界激振下，量測微懸臂樑彈性結構的自然熱振動頻譜圖。圖 5 為使用 DVD 光學讀取頭量測共振頻率為 10 kHz 之微懸臂樑的熱雜訊圖，其中  $S_{FE}$ 、 $S_X$  和  $S_Y$  分別為像散式讀取頭所測得微懸臂 Z 軸位移、Y 軸偏折 (deflection) 與 X 軸扭轉 (torsion) 的訊號。由圖中得知，DVD 光學讀取頭可明確測得該懸臂

樑的第一、第二彎曲模態 (bending mode) 與第一、第二扭轉模態 (torsional mode) 之共振頻率<sup>(7-8)</sup>。此也顯示對焦誤差訊號之線性位移量測雜訊 (即靈敏度) 約為  $1 \text{ pm (Hz)}^{-1/2}$ ，較光纖干涉 (optical fiber interferometry) 之量測靈敏度 ( $10 - 100 \text{ fm Hz}^{-1/2}$ ) 略差；X、Y 軸角度量測雜訊 (即靈敏度) 約為  $3 \text{ nrad (Hz)}^{-1/2}$ ，與光槓桿量測之靈敏度 ( $0.5 - 5 \text{ nrad Hz}^{-1/2}$ ) 差不多。其實我們現有 DVD 光學讀取頭其後端放大電子電路仍有不小改善空間，若將電路最佳化之後，量測雜訊應還可再降一兩個數量級。

除了實驗證明像散式光路可接近其他精密量測之靈敏度，前面所述光學讀取頭使用上的重大技術障礙也得到妥善解決。胡恩德博士等人利用光學讀取頭之內建音圈馬達帶動物鏡，使待測物能被調整於偵測線性區內，此想法看似簡單，但音圈馬達不是堅固的結構，外界振動很容易傳入，造成物鏡振動及量測雜訊的大幅上升 (即靈敏度大幅下降)，胡博士想出一套機構以及電路減振的機制<sup>(9)</sup>，有效解決了光學讀取頭廣泛應用商品化的技術障礙，讓光學讀取頭之輕薄短小和低成本等優勢得以彰顯、利用。

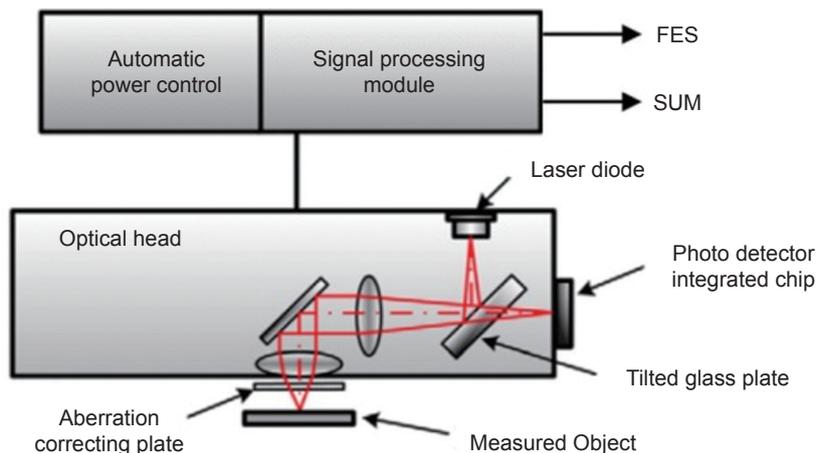


圖 6. 像散式表面輪廓儀光學系統架構。

#### 四、像散式奈米級偵測系統之應用

至今尚無任何國外公司，使用光學讀取頭作為線性位移和角度變化精密量測之元件，台灣在像散式奈米級偵測系統應用上，居於世界領先地位，在此介紹幾項應用之發展。

##### 1. 像散式光學表面輪廓儀

光學讀取頭之偵測光點小，若以聚焦光點直接對樣品表面進行非接觸式的高速水平方向掃描，各點以 FES 訊號成像即為像散式光學表面輪廓儀 (astigmatic optical surface profiler)。在水平方向可有微米解析度，與傳統光學顯微鏡相當，在垂直方向可輕易達到奈米級解析度，遠比傳統光學顯微鏡為佳。圖 6 為像散式光學表面輪廓儀的光路架構，

雷射經由像散式光路聚焦於樣品表面，並由 FES 訊號得知樣品表面的高度，待測物表面反射率變化也會影響 FES 訊號大小，可以用光感測器上之光訊號總和， $S_{SUM} = (S_A + S_C) + (S_B + S_D)$ ，校正。

圖 7(a) 為使用像散式光學表面輪廓儀量測一標準樣品之影像，此樣品有周期性線條結構，間隔為  $6 \mu\text{m}$ ，高度為  $500 \text{ nm}$ ，表面輪廓儀影像在高度的對比遠高過傳統光學顯微鏡。除了規則結構的掃描之外，光學表面輪廓儀也能清楚地量測出樣品表面的缺陷、蝕刻殘留物、污染物分佈，可做為廠商快速檢測的依據。如圖 7(b) 與 (c) 則是使用此輪廓儀分別掃描有直徑  $5 \mu\text{m}$  與  $3 \mu\text{m}$  結構的圖案化藍寶石基板 (pattern sapphire substrate, PSS) 之影像，掃描範圍皆為  $50 \times 50 \mu\text{m}$ ，可以發現某些區域有明顯的表面結構汗損。

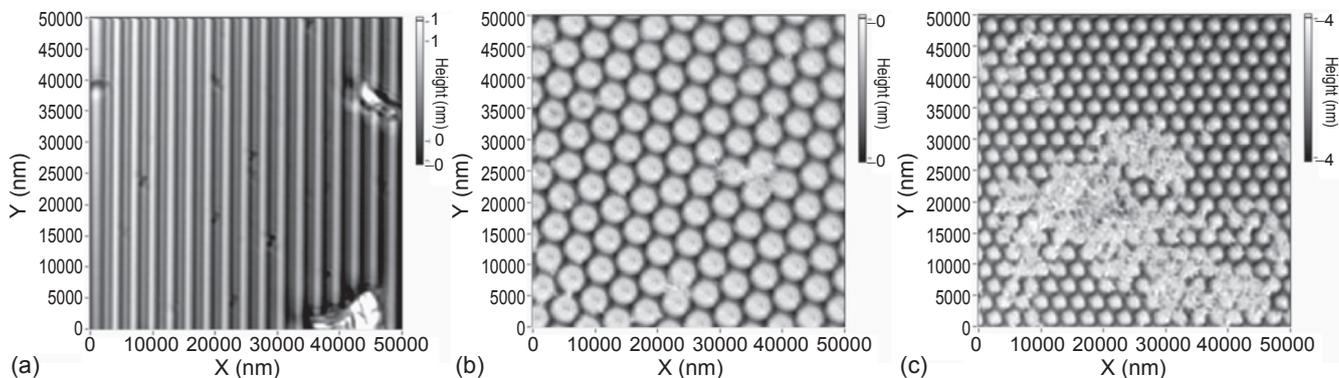


圖 7. 使用像散式光學表面輪廓儀檢測標準樣品與圖案化藍寶石基板結構。(a) 標準樣品 TGZ3，掃描範圍為  $100 \times 100 \mu\text{m}$ ；(b) 有直徑  $5 \mu\text{m}$  結構之圖案化藍寶石基板；(c) 有直徑  $3 \mu\text{m}$  結構之圖案化藍寶石基板。

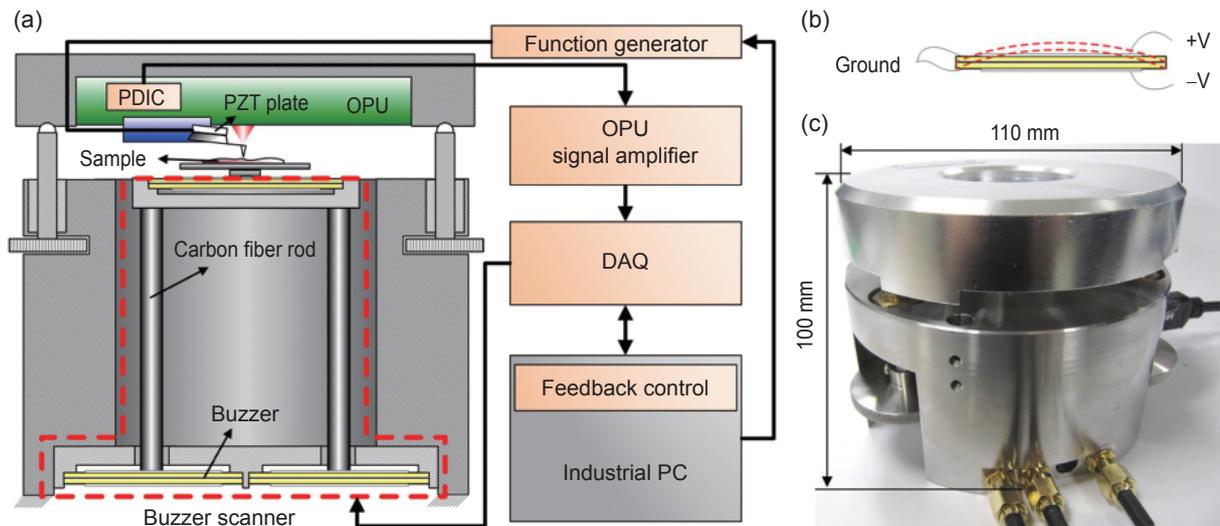


圖 8. 搭配低壓蜂鳴片三軸平台的像散式原子力顯微儀系統，(a) 系統架構圖，(b) 低壓蜂鳴片致動，(c) 機構實體照片<sup>(12)</sup>。

## 2. 自製像散式原子力顯微儀系統

掃描探針顯微術為現今奈米科技一關鍵核心技术，可對材料表面作奈米級成像、量測、甚至操控奈米級的世界<sup>(10)</sup>。從最初只應用於少數與物理研究相關的實驗室，到現在已被廣泛地應用於物理、材料、電機、機械、生化、醫學等領域。SPM 技術中的基礎為原子力顯微儀 (atomic force microscope, AFM)。中央研究院物理研究所的「表面奈米實驗室」團隊於 2002 年開發出光槓桿式原子力顯微儀<sup>(11)</sup>。目前光槓桿式光路已經成為市售原子力顯微儀偵測探針微懸臂偏折的主流機制。然而，光槓桿式原子力顯微儀的機械與光路結構複雜、體積較大，在成功驗證光學讀取頭具備原子級的解析能力後，本團隊著手以像散式偵測技術為核心，發展相關驅動軟體、精密機械結構、訊號處理電路系統，建構出數套完整的像散式原子力顯微儀。

其中一款像散式原子力顯微儀具有低成本與高性能的雙重優勢，一般能達次奈米級解析的市售原子力顯微儀售價在新台幣一百萬到數百萬不等，較有知名度的廠牌通常在三百萬以上，如此價格昂貴的儀器只有經費充裕的實驗室和公司才負擔得起，也讓此儀器無法普及化。原子力顯微儀除了需要整合數種精密量測技術外，其中也包含幾個高成本之模組：微懸臂樑偏折之偵測光路、三軸壓電掃描器

與驅動壓電掃描器三軸位移之低雜訊高壓放大電路。偵測光路的部分，利用光學讀取頭取代傳統光槓桿式光路可以大幅省下昂貴的開發的成本，且整體機構尺寸以及重量皆可大幅縮小。至於後兩者，我們也有突破性的取代方案，胡恩德博士等人開發出低壓三軸壓電掃描器，一般 DAC 電路輸出之電壓 (-10 V 至 +10 V) 即可驅動三軸位移，而且使用的壓電元件是量產低價之壓電蜂鳴片 (piezo disk buzzer)，並非一般市售原子力顯微儀所使用之特製壓電管 (piezo tube)。三軸壓電掃描管價格昂貴且結構脆弱，組裝或使用不慎時，即有可能造成毀損，較知名廠牌的三軸掃描壓電管模組要價新台幣二十至六十萬，而且使用者常需要購買不同掃描行程之壓電管。此外，傳統掃描壓電管需要所費不貲的多組低雜訊高壓放大器分別驅動三軸掃描，同時也需要一低雜訊高壓電源，大幅增加電路機箱之成本、尺寸與重量。我們的新架構不但製作容易、成本低廉、體積小、重量輕，而且結構更穩固。

圖 8(a) 為整合像散式偵測技術與低壓蜂鳴片掃描平台的原子力顯微儀系統架構。以電腦經由資料擷取卡 (DAQ card) 輸出掃描訊號給低壓掃描平台的 X、Y 軸，同時由像散式光路量測探針微懸臂偏折的訊號，並傳回電腦進一步輸出回饋控制訊號趨動低壓掃描平台的 Z 軸位移，並進行樣品表面

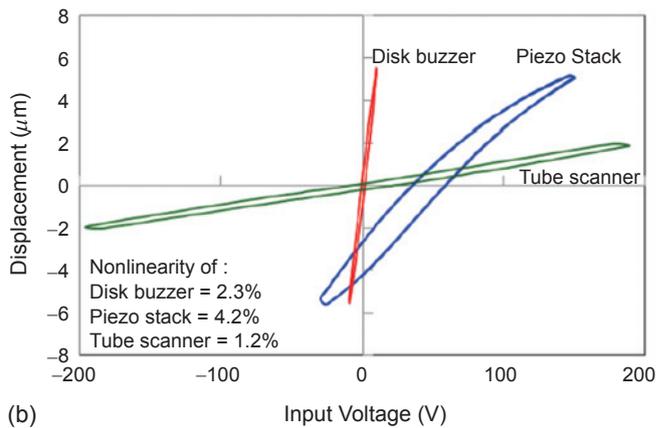
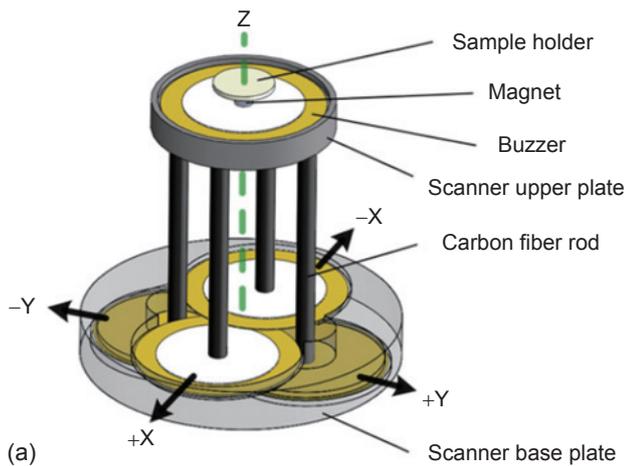


圖 9. (a) 低壓蜂鳴片三軸致動器架構圖。(b) 蜂鳴片與其他常用壓電致動器遲滯效應比較，蜂鳴片以低壓驅動即可達到其他壓電致動器用高壓驅動才能達到之行程<sup>(12)</sup>。

形貌的繪製。圖 8(b) 為施加一電壓於單一蜂鳴片所產生致動的情形，圖 8(c) 為機構實體照片。

圖 9(a) 為此低壓蜂鳴片三軸平台的設計架構<sup>(12)</sup>，在 X、Y 軸上各放置一對蜂鳴片，並相反方向動作，以碳纖維所形成的結構放大蜂鳴片的 XY 位移，結構頂部放置單片蜂鳴片產生 Z 軸位移。如圖 9(b) 量測所示，蜂鳴片的遲滯現象較傳統的壓電管或多層壓電疊塊 (piezo stack) 來得低，而且呈一簡單的二次曲線，相較之下容易補償。除了只要低壓便能驅動之外，透過修改相關的尺寸與蜂鳴片數量，便可得到不同掃描行程與剛性的致動器。

圖 10(a) 與 (b) 為使用低壓蜂鳴片三軸致動器的像散式原子力顯微儀，對標準樣品 607-AFM 與 TGQ1 掃描所得影像，由影像顯示，低壓蜂鳴片三軸致動平台在 X、Y 軸擁有優異的正交性。我們使用相同的三角波訊號放大後驅動市售壓電管掃描 TGQ1 標準樣品，所得影像如圖 10(c) 所示，發現市售壓電管造成影像嚴重扭曲，低壓蜂鳴片三軸掃描平台的 X、Y 軸正交性明顯優於壓電管。知名廠牌通常會使用複雜的位移補償訊號來趨動壓電管的掃描，以減低影像扭曲問題，其中會牽涉多個校正參數，需利用原子力顯微儀掃描標準樣品之影像以求得，且每隔一段時間就需校正一次；相較之下，我們開發之低壓蜂鳴片三軸掃描器，以三角波訊號輕易就得到一般可接受之影像品質，因 X、Y 軸

正交性良好，要修正影像扭曲也相對容易許多。圖 10(d) 為使用低壓蜂鳴片三軸掃描平台所測得的石墨形貌影像，能解析出單層石墨原子台階的高度 (0.35 nm)。量測結果證明，此低壓蜂鳴片三軸掃描平台結合 DVD 光學讀取頭，可達到相當於市售原子力顯微儀系統的解析度。

像散式原子力顯微儀，除可藉由探針量測樣品的原子力顯微術模式之外，也可以進行光學表面輪廓儀量測，此時將探針移除，利用聚焦的雷射偵測光點直接對樣品表面進行非接觸式的掃描量測，由 FES 訊號得知樣品表面的高度。因為沒有原子力顯微術迴饋系統之速度限制，此輪廓儀可獲得比原子力顯微儀更快的掃描速度、更大的掃描範圍，相較傳統光學顯微鏡具有更佳的高度解析能力；但受光學繞射之限制，水平解析度較原子力顯微儀差，約 1  $\mu\text{m}$ 。將光學輪廓儀用於快速判斷樣品表面狀態，有利於工業界產線上的快速篩檢，也可迅速判斷樣品是否需要進一步使用原子力顯微儀細掃。市售光槓桿式原子力顯微儀並不具備光學表面輪廓儀模式，這突顯出像散式原子力顯微儀系統架構的獨特優勢。根據我們的經驗，原子力顯微術所用之探針懸臂不需移除也可進行表面輪廓儀之量測，只需將雷射偵測光點之聚焦位置由探針背面移至樣品表面即可，因雷射光聚焦之 NA 值高，一旦離焦，探針對樣品表面的 FES 訊號影響不大。

原子力顯微術是極少數能在水溶液中達到奈米級解析度的顯微術，本團隊也開發像散式原子力顯微儀於水溶液中量測樣品。圖 11(a) 為一像散式水溶液原子力顯微儀的整體機構<sup>(13)</sup>，機構主要分成三個部分，像散式光學讀取頭、針夾簧 (cantilever holder) 與放置樣品的三軸掃描致動平台，圖 11(b) 為其像散式光路與針夾簧的細部結構圖，利用玻璃平板與液體的表面張力，將溶液侷限於特定區域，並以壓電片作為激振源，在溶液中驅動探針懸臂共振，再由圖 11(a) 中的 Z 軸步進馬達 (stepping motor) 帶動樣品接近探針，接著使用三軸致動器進行掃描。圖 11(c) 是此架構在水溶液中掃描石墨台階的表面結構影像，顯示此系統可成功掃描水溶液

中的單層石墨原子台階，圖 9(d) 則為利用表面輪廓儀模式所取得的生物細胞光學影像<sup>(13)</sup>，其對比優於一般光學影像。

圖 12 為使用此原子力顯微儀於水溶液中掃描雲母片上 DNA 樣品的量測結果，不但可解析 DNA 的輪廓高度約 1.5 nm，也驗證本儀器在水溶液中有足夠的穩定性與奈米級的解析能力。

### 3. 像散式量測專屬光學影像系統

像散式量測系統可以對樣品表面某微米級區域，量測其位移、角度變化及機械振動，應用層面相當廣，但操作像散式量測時，常需先得到大範圍的樣品影像，才能尋找有興趣的位置進行局部精細

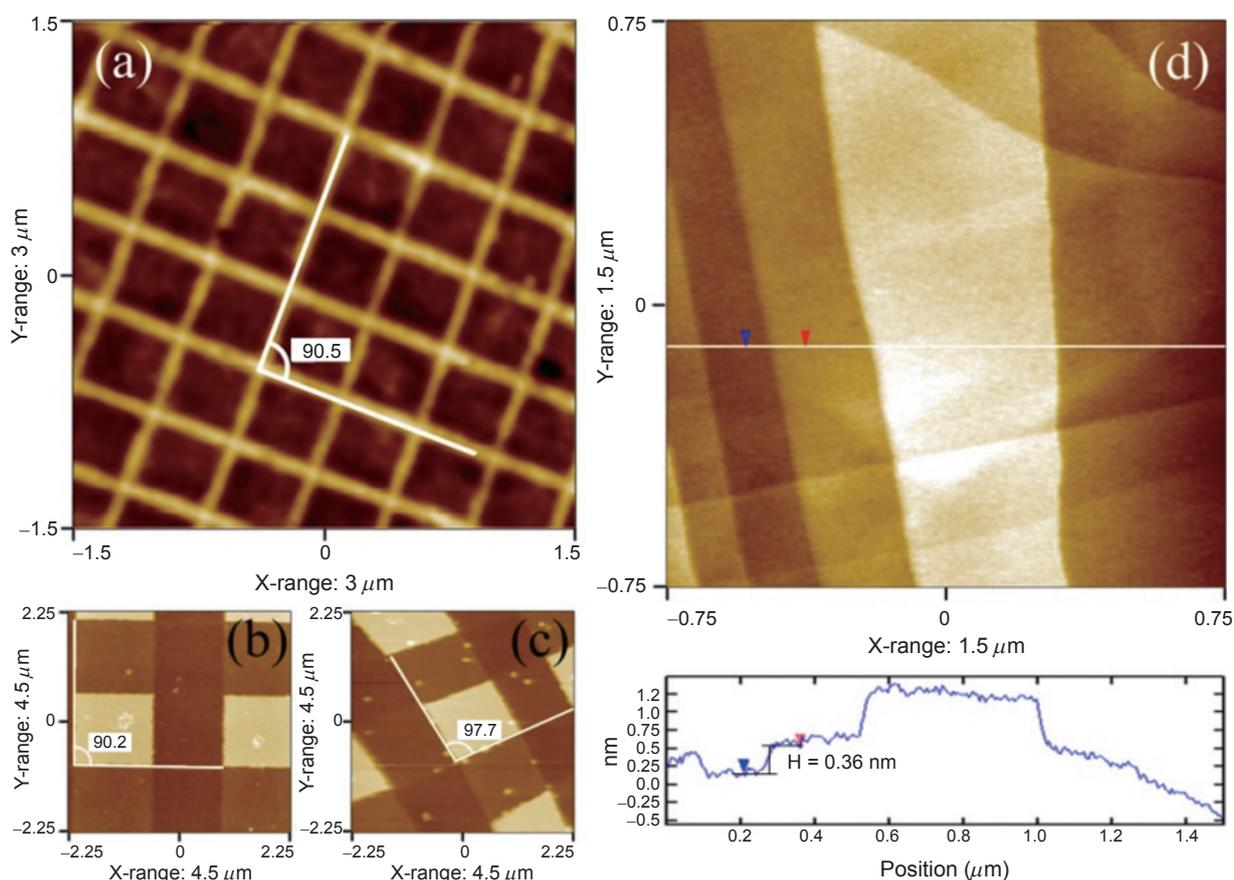


圖 10. 使用低壓蜂鳴片三軸掃描平台之像散式原子力顯微儀性能驗證。(a) 標準樣品 607-AFM 的形貌影像，掃描範圍  $3 \times 3 \mu\text{m}$ ，掃描速度 1 Hz。(b) 標準樣品 TGQ1 的形貌影像，掃描範圍  $4.5 \times 4.5 \mu\text{m}$ ，掃描速度 1 Hz。(c) 使用市售壓電管掃描標準樣品 TGQ1 的形貌影像， $4.5 \times 4.5 \mu\text{m}$ ，掃描速度 1 Hz。(d) 石墨的形貌影像，單層石墨台階可以清楚解析，掃描範圍  $1.5 \times 1.5 \mu\text{m}$ ，掃描速度 0.8 Hz<sup>(12)</sup>。

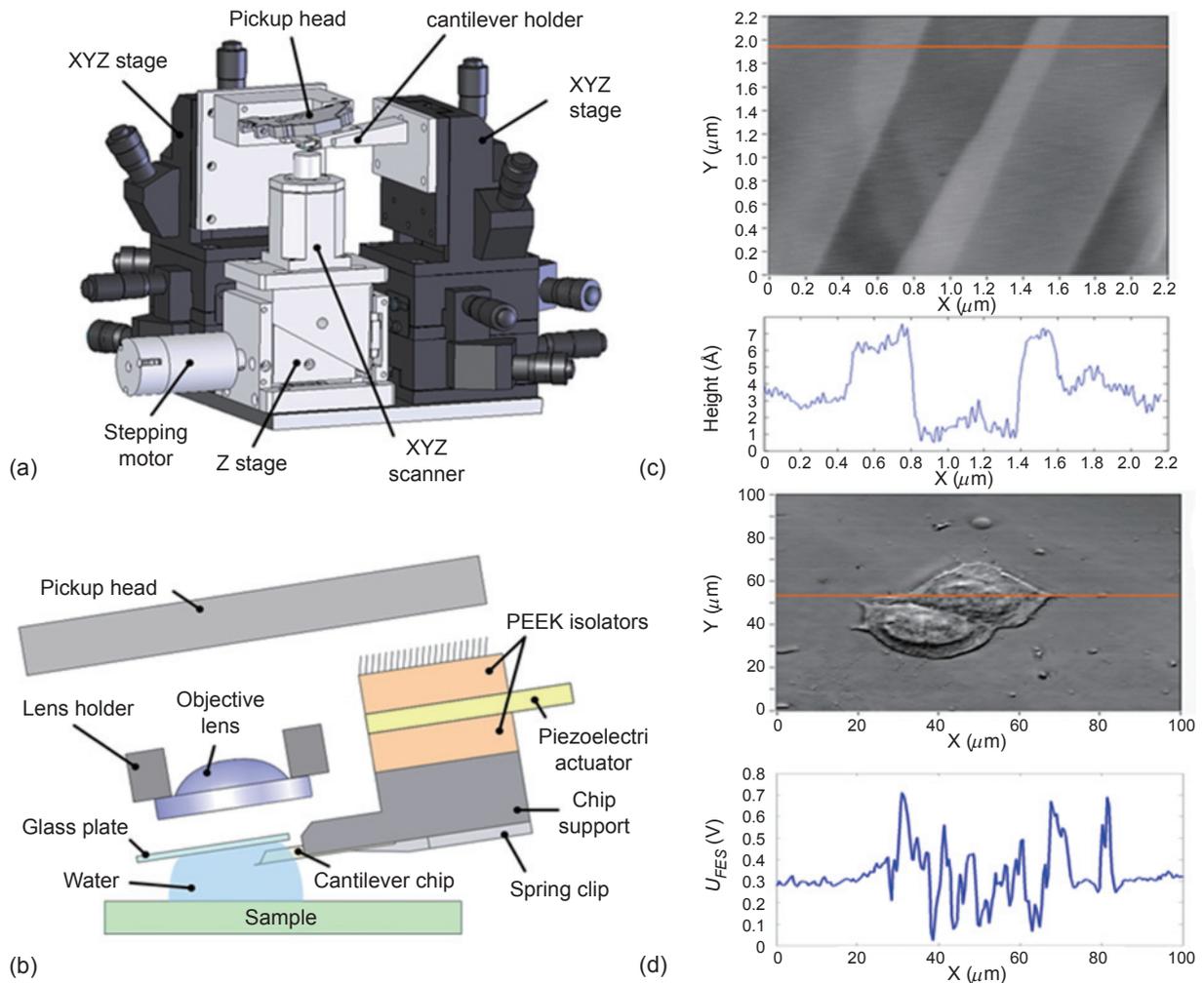


圖 11. 像散式水溶液原子力顯微儀架構與實驗結果。(a) 系統架構圖，(b) 像散式元件與探針夾持元件細部架構，(c) 原子力顯微儀水溶液中掃描石墨台階的形貌影像，(d) 使用光學表面輪廓儀水溶液中掃描細胞樣品的影像<sup>(13)</sup>。

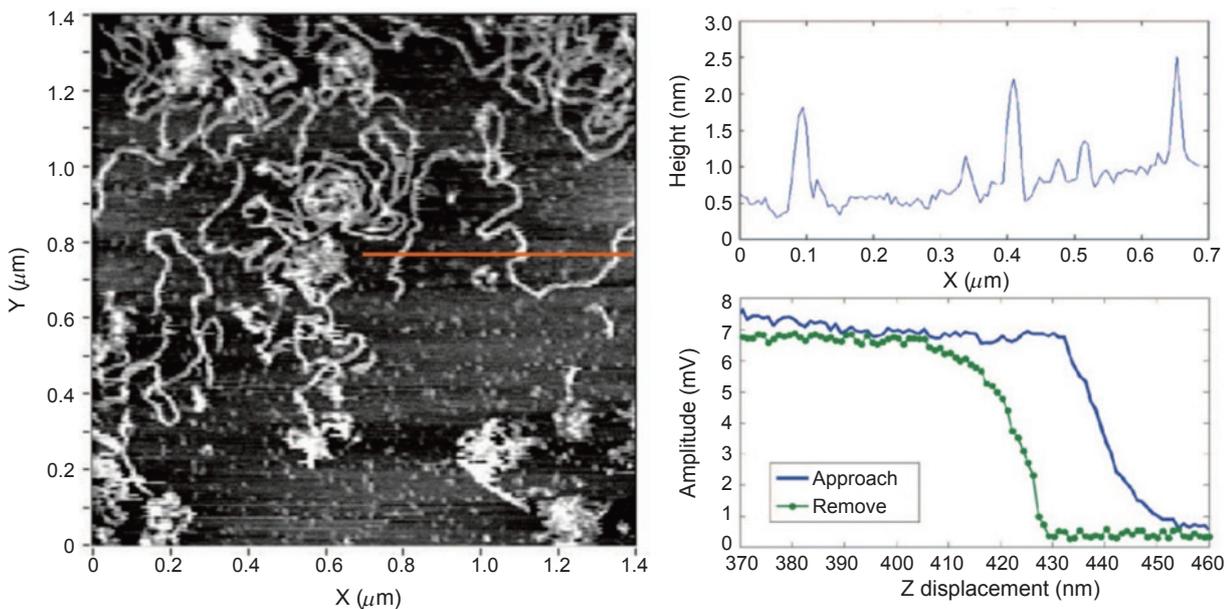


圖 12. 像散式原子力顯微儀於水溶液中掃描雲母片上 DNA 樣品的量測結果<sup>(13)</sup>。

量測。因此，有必要開發搭配像散式量測的光學影像系統，藉由光學影像直接看到偵測雷射光點在樣品上的位置，如此一來，給予使用者很大的便利，藉由位移致動平台將雷射光點調至想要量測的位置，亦可將之應用於微機電 (MEMS) 元件的機械特性量測及原子力顯微術。本團隊已為 DVD 光學讀取頭開發一套搭配的光學影像光路，外型如圖 13(a) 所示，其與光學讀取頭共用部分光路，包括物鏡。圖 13(b) 與 (c) 為本光學影像系統透過 DVD 讀取頭觀測樣品表面以及 AFM 探針，樣品分別為 TGQ1 與石墨表面。透過此光學系統能夠避開樣品的缺陷區域，以及協助操作者快速找到想細掃的區域，搭配光學影像之像散式原子力顯微儀，可大幅提升系統操作的便利性。另一方面，此光學系統也能應用於像散式水溶液原子力顯微儀，在水中得到清晰樣品表面及探針微懸臂的光學影像。

#### 4. 像散式振動量測系統

微機電系統 (microelectromechanical systems, MEMS) 所建構的傳感器至今已大量使用，然而目前多以干涉式光路進行量測。由於像散式光路擁有 MHz 級高運作頻寬、次微米級光點，因此可對微機電元件直接進行振動特性量測<sup>(14)</sup>。圖 14 為光學影像結合像散式振動量測系統的架構圖<sup>(15)</sup>。我們將像散式光路核心置於光學顯微鏡平台，並結合光學影像功能，由光學顯微鏡的 CMOS 攝影機透過像散式光路之物鏡觀察待測物。此系統具備一機械振動源 (PZT actuator) 激振待測物 (微機電系統之傳感器)，或者直接量測待測物的熱雜訊 (thermal noise)，並透過高速訊號擷取卡 (DAQ)，將像散式光路所量測之的訊號進行傅立葉轉換，轉為頻率與振幅資訊。

圖 15 為像散式量測系統對懸臂樑 (寬 100 微米，長 500 微米) 的振動量測結果，此系統可量測具有反射面及透明之樣品。圖 15(a) 為在具有反射面之區域的量測結果。我們可以看到此系統在激振樣品情況下 (綠線)，可量測多個共振模態；在不激振情況下，可量測樣品第一共振模態 (藍線)。圖 15(b) 為相同懸臂樑，但量測其不具反射面之位置，在激振情況下仍可偵測懸臂樑之第一共振頻率

(綠線)。像散式振動量測系統不只可應用於微機電系統之機械特性量測，也可量測一般較大物體，有希望開發出工廠生產線上品管的設備，作為產品機械振動 (如低振動之風扇或馬達) 之非接觸量測。

#### 5. 可攜式之高性能免標示生化檢測系統

本團隊自 2009 年由胡恩德與陳敬修等人開始進行懸臂樑生化感測器的研發，並與歐洲丹麥理工學院 (Technical University of Denmark, DTU) 進行跨國合作，利用像散式光學偵測技術，開發出高性能 (high throughput) 免標示生化檢測系統<sup>(15, 16)</sup>，而此系統使用微米級懸臂樑作為傳感器用以檢測生化分子反應。高性能指的是，可以在一秒的時間內，量測並分析數百根甚至數千根懸臂樑的訊號，其方式是將數以百計的懸臂樑，固定於圓形碟片的同心

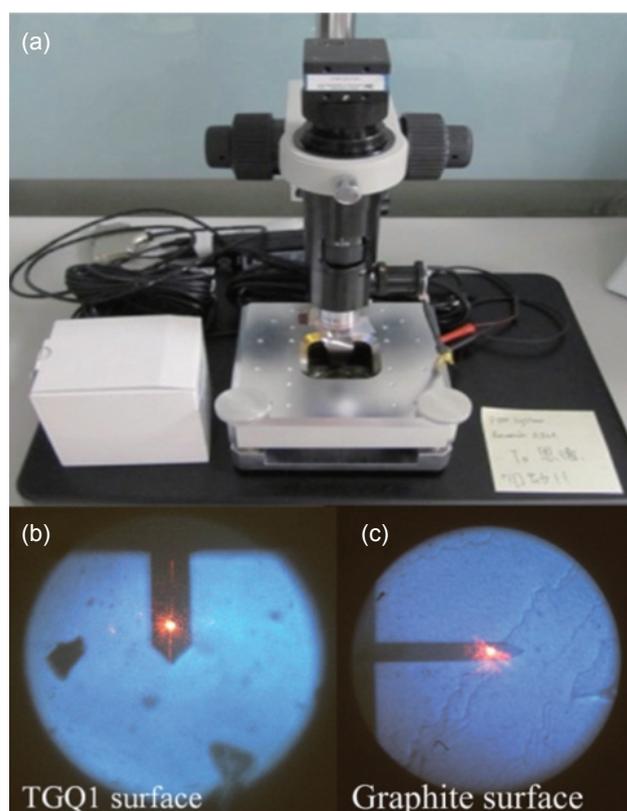


圖 13. (a) 搭配專屬光學影像之像散式原子力顯微儀實體照片；(b) 觀測標準樣品 TGQ1 表面之光學影像，探針微懸臂 (寬度約 30  $\mu\text{m}$ ) 以及聚焦雷射光點都可看到；(c) 觀測石墨表面之光學影像。

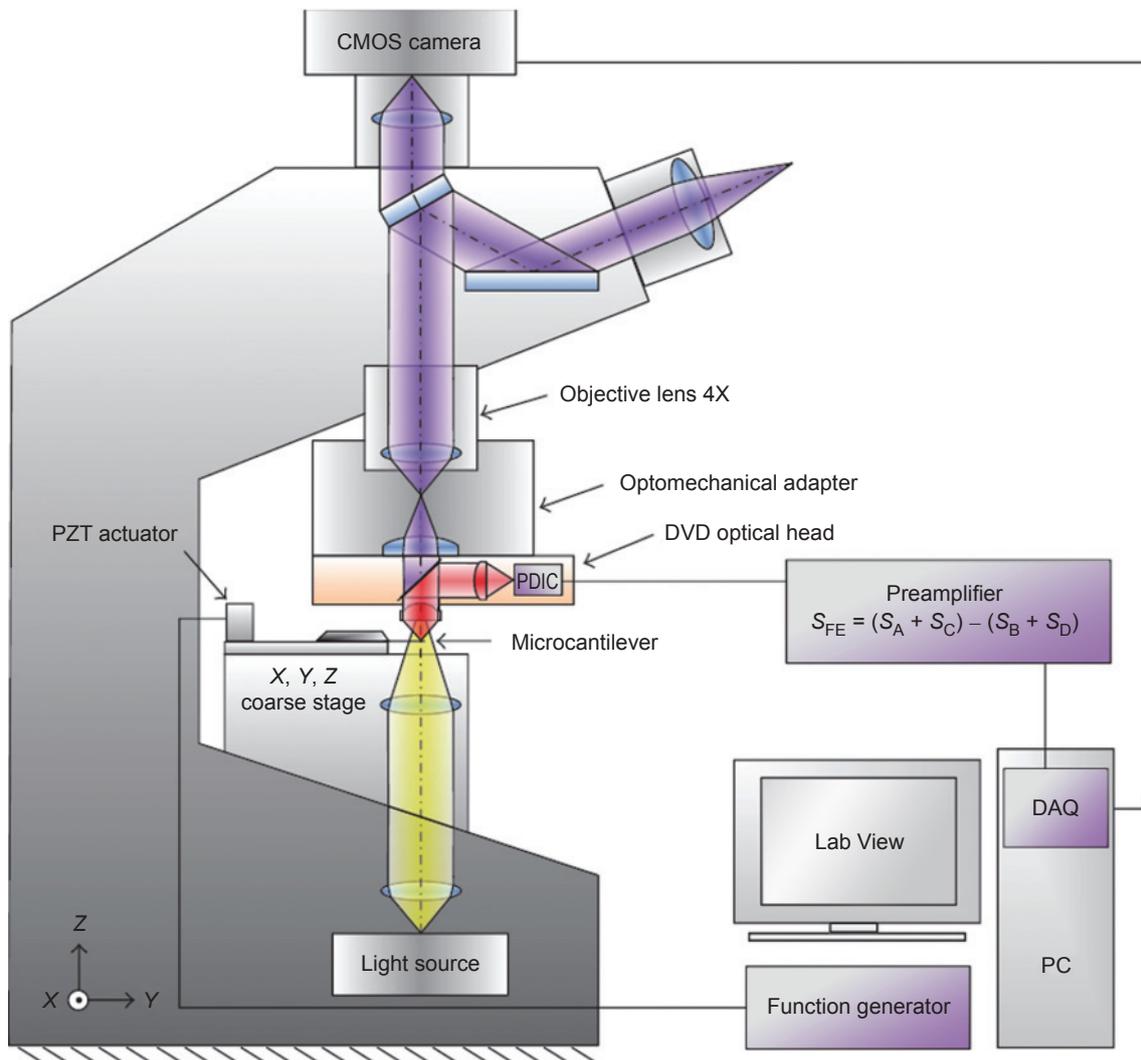


圖 14. 光學顯微鏡與像散式振動量測系統架構圖。

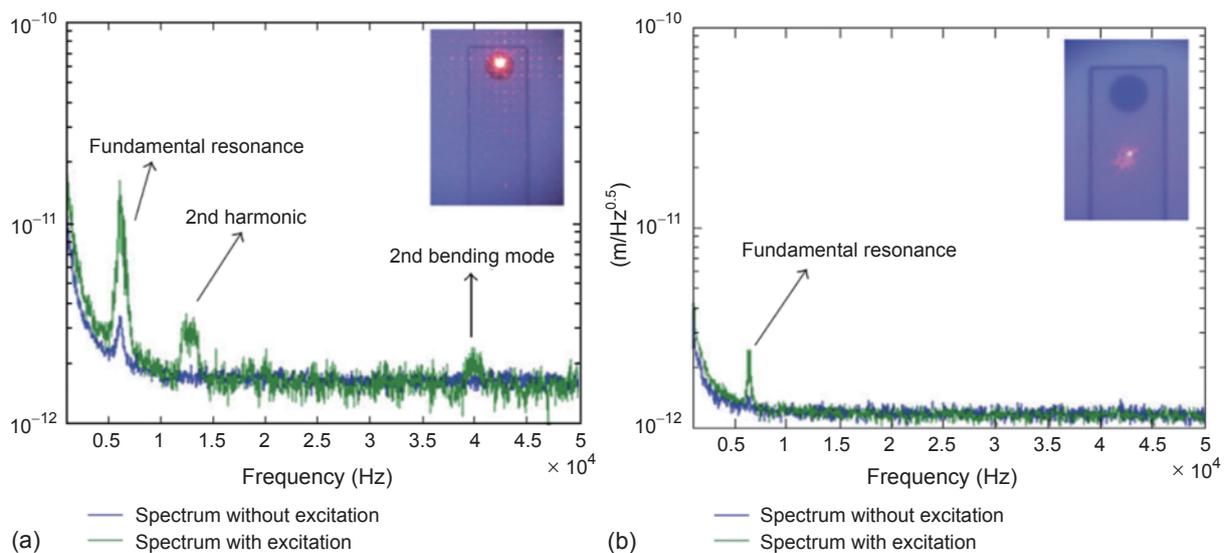


圖 15. 像散式量測系統之共振頻率量測結果。

圓軌跡上，並使用馬達帶動碟片高速旋轉，並以光學讀取頭讀取旋轉中的懸臂樑訊號，其偵測性能達到千倍於傳統量測速度 (如圖 16)。由於懸臂樑表面已經過化學修飾，某些特定生化分子會與其鍵結而改變懸臂樑表面應力，進而造成其偏折，而由此量測便可進行特定之生化檢測。相較於此，過去傳統的方法，主要以光槓桿式系統進行懸臂樑彎曲偏折之量測<sup>(17, 18)</sup>，然而每一懸臂樑的初始偏折，常因製程技術及材質因素，有幾度不等的差異，偵測雷射光路必須逐一調整對正 (alignment)，非常麻煩且費時，即使是熟悉操作的使用者，平均也要耗費一分鐘才能完成一根懸臂樑之光路調整。因此傳統光槓桿式檢測難以應用於高速自動化生化檢測系統，而利用光學讀取頭來進行量測，則克服了傳統方式所遭遇的困難。

胡恩德博士設計並製作一類似光碟機的機構，用以帶動並旋轉圓形檢測碟片，如圖 17(a) 所示，再利用像散式光學量測系統進行懸臂樑偏折之高速偵測，其效能可達到每秒量測 500 根以上之懸臂樑訊號。除了懸臂樑彎曲程度與角度，此系統還可量測表面形貌變化，藉由將掃描懸臂樑之訊號擷取輸入電腦分析，可以得知懸臂樑表面二維形貌情形。像散式量測系統相較於傳統光槓桿式技術具有多種優點：(1) 像散式量測系統對懸臂樑之偏折角度有正負 5 度的容忍度，光路調整容易很多；(2) 100 MHz 的超高頻寬，具有每秒一萬根以上懸臂

樑之量測潛力；(3) DVD 光學讀取頭雷射光點非常小 (直徑約為 560 nm)，遠小於光槓桿式雷射光點 (直徑約為 10  $\mu\text{m}$ )，因此未來可進行更高靈敏度、更小尺寸懸臂樑之量測；(4) 由於 IT 產業大量使用 DVD 光學讀取頭，其性能與特性已通過長時間大量驗證，因此讀取頭取得容易且購買成本低廉。

此系統可高速量測：懸臂樑彎曲偏折、表面粗糙度、以及每一根懸臂之自然共振頻率等資訊。像散式光學量測系統極具潛力作為快速生醫檢測、機場爆裂物分子偵測、環境賀爾蒙污染研究等用途。

## 6. 高速高力靈敏度像散式原子力顯微儀

原子力顯微術能在水溶液中對生物樣品作奈米級成像，且能進行機械性質的量測。但傳統 AFM 技術在水溶液中力靈敏度不佳，柔軟的生物分子常被破壞，因此必須提升對力的靈敏度，才有希望以更小的作用力對生物分子作高解析成像。此外，生物系統的功能需透過一些動態過程才能產生，但一般 AFM 掃描速度太慢，每秒掃描約 0.1–10 條線，通常一張影像由 256 條掃描線所構成，大約需半分鐘至數十分鐘才能取得一張，若要清楚觀察動態過程演變，最好能達到一秒一張以上之取像速率 (frame rate)。目前市售高速 AFM，如最新的 Bruker FastScan，號稱 20 Hz 掃描頻率能達到接近先前 1 Hz 的影像品質，在 100 Hz 掃描頻率仍有不差的影像品質，一張影像只需一至數秒；Asylum

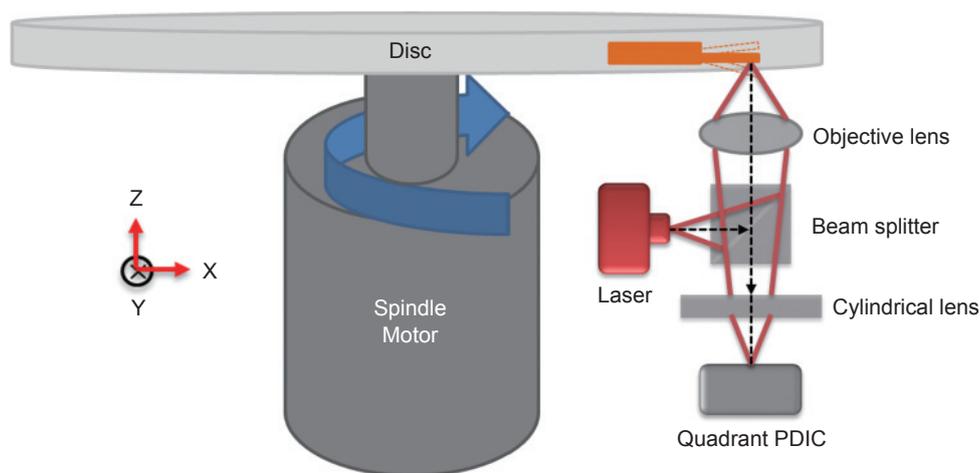


圖 16. 高性能免標示生化檢測系統示意圖。

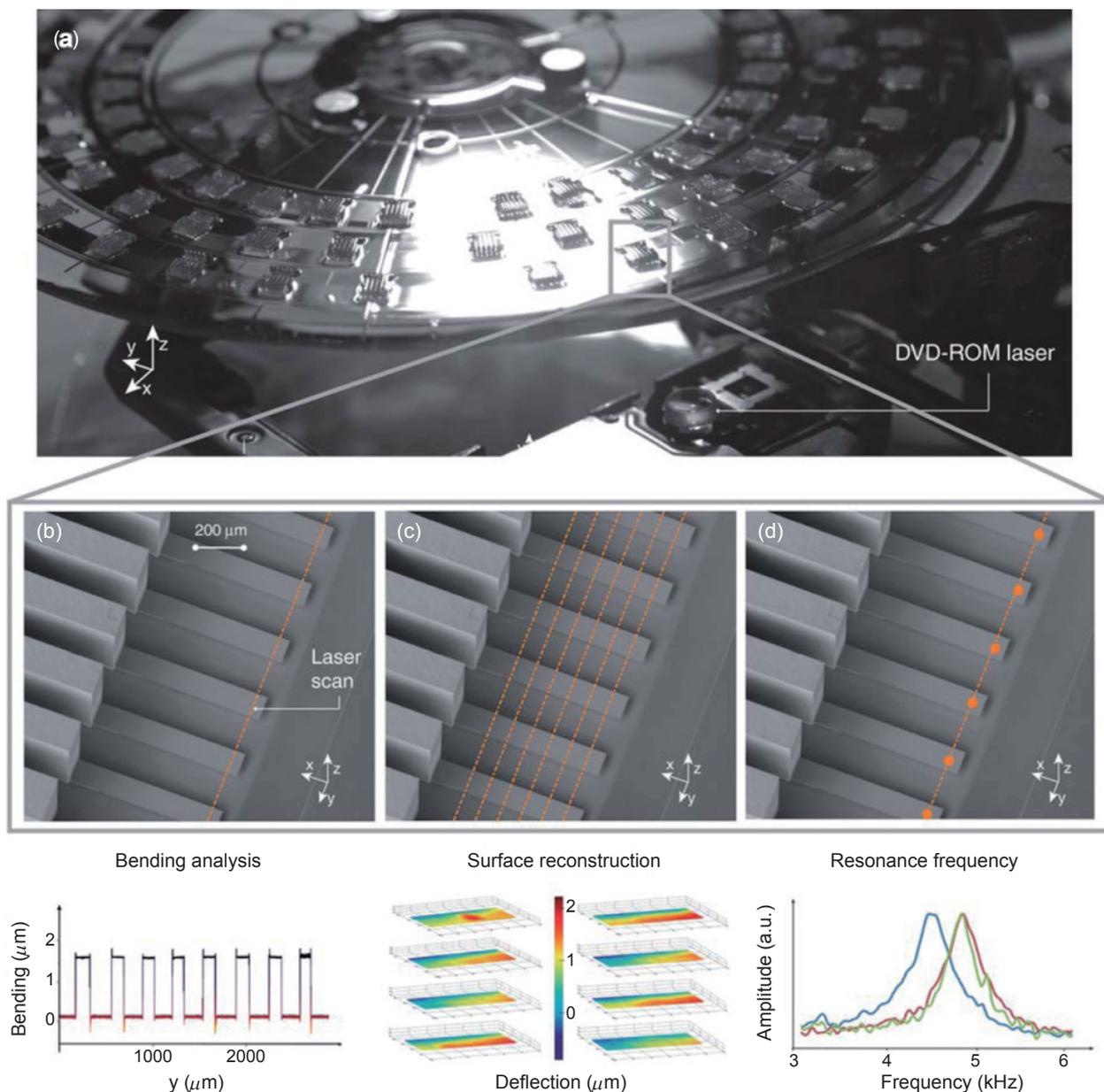


圖 17. (a) 高速像散式生化檢測碟片實體圖<sup>(15)</sup>。(b) 旋轉生化檢測碟片時，量測多根懸臂樑末端奈米級彎曲偏折。(c) 多次量測懸臂樑輪廓，組合起來可如下圖重建出懸臂樑之表面形貌圖。(d) 量測每一根懸臂樑之共振頻率，當懸臂樑上之質量增加時，會造成自然共振頻率之降低。

Research 的旗艦機型 Cypher 也達到類似掃描頻率及影像品質。日本有一家新廠商 RIBM 技轉自金澤大學 Toshio Ando 教授實驗室的高速 AFM，有目前全世界最快的取像速率，在 200 nm 掃描範圍及每張圖只有 100 掃描線的條件下，一秒中可取得 25 張影像<sup>(19)</sup>，讓 AFM 時間解析進入毫秒 (ms) 等級，這些機型售價新台幣一千萬左右。

高速高力靈敏度 AFM 的一個關鍵就是採用更小的微懸臂樑探針，因為其有更高的共振頻率，由於共振特性 (如振幅、頻率、相位) 的量測時間與共振的周期成正比，量測也會比較快；力靈敏度也隨共振頻率變高而提升。一般 AFM 使用的微懸臂樑寬度約 30 μm，共振頻率都在 350 kHz 以下；而高速 AFM 使用之微懸臂樑寬度僅 2 至 3 μm，

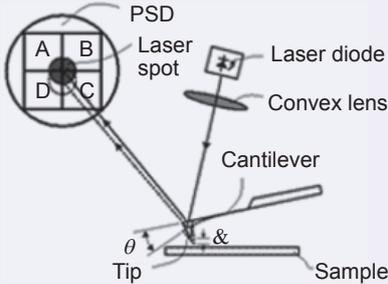
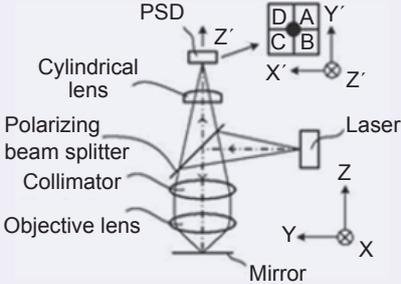
共振頻率達到 1–5 MHz。市售高速 AFM 仍是採用傳統光槓桿架構，因此都需要一特殊的光路將偵測光點縮小至約 3  $\mu\text{m}$ ，以偵測微小懸臂樑的共振，此特殊光路是高速 AFM 昂貴的因素之一。偵測小懸臂樑的高頻共振也是個麻煩點，一般 AFM 使用之四象限光偵測器只能偵測到 1 MHz 以下，高速 AFM 使用之光偵測器可達 5 MHz，光偵測器越小，可偵測的頻率越高，但光路的設計與調整 (alignment) 也愈困難，這是高速 AFM 昂貴的另一項因素。

以上兩項因素已顯示出傳統光槓桿架構的限制，卻正好突顯出光學讀取頭的獨特優勢，其光點約 560 奈米及可達 60 MHz 甚至 100 MHz 偵測頻

率 (請參考表 1 所示)，遠遠超越現今高速 AFM 所採用之光槓桿偵測系統，而且不需費時去設計及架設光路，直接購買市售光碟機讀取頭，只需美金 10–20 元。採用市售光學讀取頭有希望使用更小懸臂樑、更高共振頻率，這不僅有利於 AFM 的高速運作，也將使懸臂樑探針有更佳的力靈敏度，有希望帶來高速 AFM 下一階段的突破，我們所發展之光碟機讀取頭量測技術，已可對焦至 125 nm 寬之懸臂樑，並量測其機械共振，這是現今光槓桿架構所無法達到的。因此光學讀取頭極有潛力為高速生化顯微、檢測提供一個創新的量測利器。

從 2013 年本團隊開始以光學讀取頭為核心開發高速原子力顯微儀，圖 18(a) 為像散式專屬影

表 1. 像散式偵測光路與傳統光槓桿偵測光路的比較。

	傳統光路 (Conventional optical detection)	像散式光路 (DVD-OPU)
光路實體照片 (Photo of the detection module)		
原理圖 (Schematic)		
量測原理 (Principle)	光槓桿 (Beam deflection)	光像散 (Astigmatic detection system)
雷射光點直徑 (Detection spot size)	10–30 $\mu\text{m}$	0.5 $\mu\text{m}$
製造成本 (Cost)	USD 10,000	USD 10
垂直解析度 (Detection sensitivity)	0.03 nm	0.03 nm
訊號頻寬 (Detection bandwidth)	1–5 MHz	100 MHz

像光路所呈現的高頻探針 (Nanoworld 提供, 長  $7\ \mu\text{m}$ 、寬  $2\ \mu\text{m}$  與厚  $0.1\ \mu\text{m}$ ) 之光學影像, 並可清楚地觀察到雷射光點的聚焦位置, 如圖 18(b)。圖 18(c) 則顯示, 像散式偵測系統可成功測得此探針高達  $1.8\ \text{MHz}$  的第一共振頻率, 我們也曾測得某些探針高達  $5.5\ \text{MHz}$  的第一共振頻率。

圖 19(a)–(f) 則為搭配高速掃描平台的像散式原子力顯微儀系統, 掃描標準樣品的表面形貌圖, 我們比較一般半接觸模式探針 (共振頻率約  $300\ \text{kHz}$ ) 與共振頻率高達  $5.5\ \text{MHz}$  之高頻探針在不同掃描速度的掃圖結果, 一般半接觸模式探針在掃描速度為  $10\ \text{Hz}$  (即每秒 10 條掃描線) 時, 掃圖品質已下降, 但仍在可接受程度 (圖 19(a)); 掃描速度為  $25\ \text{Hz}$  時, 掃圖品質顯示迴饋系統已跟不上表面形貌的變化 (圖 19(b)); 掃描速度為  $50\ \text{Hz}$  時, 則影像模糊 (圖 19(c))。當我們使用  $5.5\ \text{MHz}$  之高頻探針掃圖, 掃描速度為  $10\ \text{Hz}$  (圖 19(d)) 及  $100\ \text{Hz}$  (圖 19(e)) 時, 掃圖影像清晰; 掃描速度增快至  $200$

$\text{Hz}$  (圖 19(f)), 掃圖品質下降但仍不差。上述結果顯示, 高頻探針確實可有效提升掃描速度及掃圖品質, 讓迴饋系統能快速跟上表面形貌的變化, 此實驗是在空氣中進行, 已替高速像散式原子力顯微儀奠定了重要的基礎, 未來希望能發展出水溶液中奈米級高速掃描技術。

## 五、像散式奈米級偵測系統之未來展望

很多精密量測都建構在精密位移與角度量測上, 如: 力的量測可藉由虎克定律,  $F = k\Delta z$ , 變成位移的量測, 對於基本物理學的實驗教學, 很多教具及科學量測儀器也就能由像散式偵測系統建構出來。兩物體接近時的原子、分子交互作用, 如: 靜電力、磁力、或凡得瓦力都可由光學讀取頭量測一彈性結構位移而得到, 像 AFM 的光學量測架構就是一個例子。任何物理量只要能轉變成位移, 就

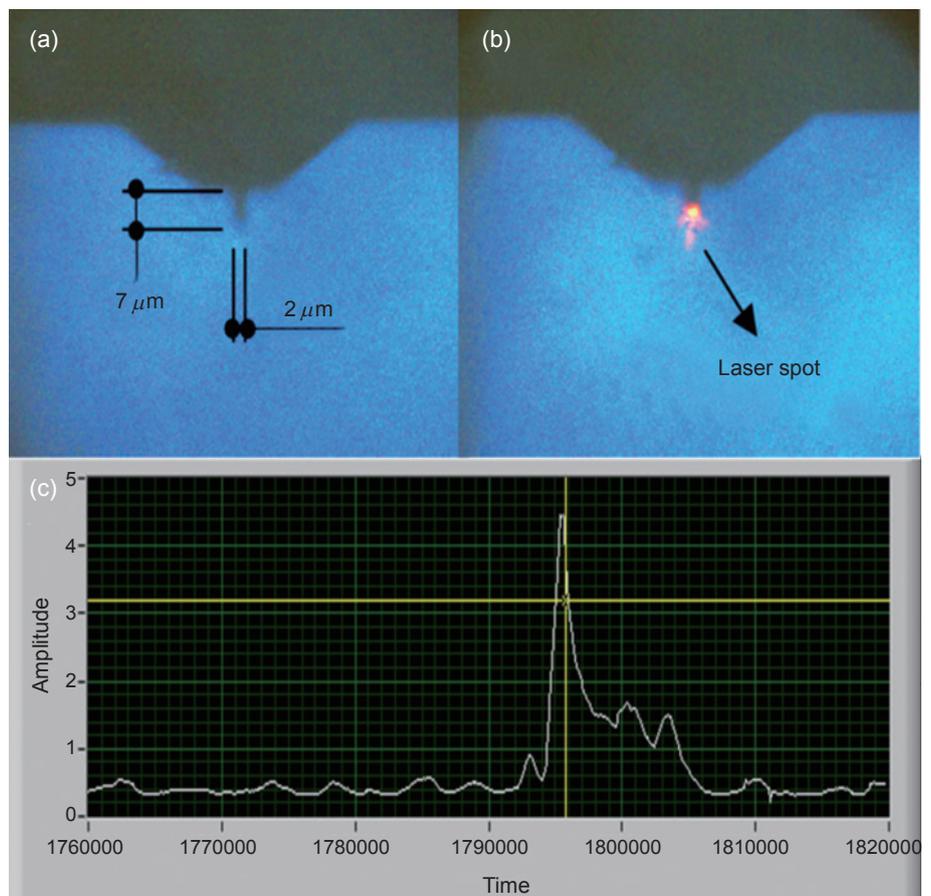


圖 18.

(a) 與 (b) 使用本實驗室開發之光學影像系統透過讀取頭觀察高頻探針, 探針最下方之微懸臂尺寸只有  $7 \times 2\ \mu\text{m}$ 。圖 (b) 為雷射開啟後之影像, 可以清楚看見雷射光點。(c) 高頻探針掃頻結果。

可由像散偵測系統達到高精量的量測，因此我們所架構出來光學讀取頭量測技術可廣泛應用到很多教育、訓練及高階的儀器設備，也有希望開發出工廠生產線上品管的檢測設備。

台灣與國外很多國家都希望將奈米教育及訓練向下延伸至大學生，甚至高中生，但一般奈米級位移量測儀器售價動輒數十萬元以上，造成奈米教育與訓練的成本昂貴，難以普及化。以像散式光學偵測機制為核心的光學讀取頭，提供了高性價比的解決方案，讓學生更早接觸到奈米世界中的很多現象。例如，奈米世界常見的熱脹冷縮及振動，便是精密奈米儀器設備常遇到的問題，熱脹冷縮是列入小學教材的基本物理現象，但大部份的大學生，甚至部份的研究生都沒看過熱脹冷縮造成的現象，缺乏真實感(註 1)。對奈米世界的瞭解可以幫助我們發展奈米科技，去克服環境中的干擾，從而培養出新一代奈米科技人才。

## 誌謝

特別感謝奈米國家型科技計畫、國科會、中央研究院與中央研究院物理研究所多年來補助，尤其是中央研究院物理所的長期技術支援(機械工廠及電子工作室)，以及過去多年曾參與 SPM 技術開發的所有同仁。

## 附註

註 1. 熱脹冷縮在奈米世界幾乎無所不在，一般實驗室的溫度在一天當中通常會有攝氏一兩度的變化，儀器、設備都由不同材料、不同結構的眾多零件組合，當環境的溫度緩慢變化時，各個零件的溫度也會變化，但是不同部份溫度變化速率不一致，造成不同零件的熱脹冷縮程度不同，且隨時間改變，儀器中

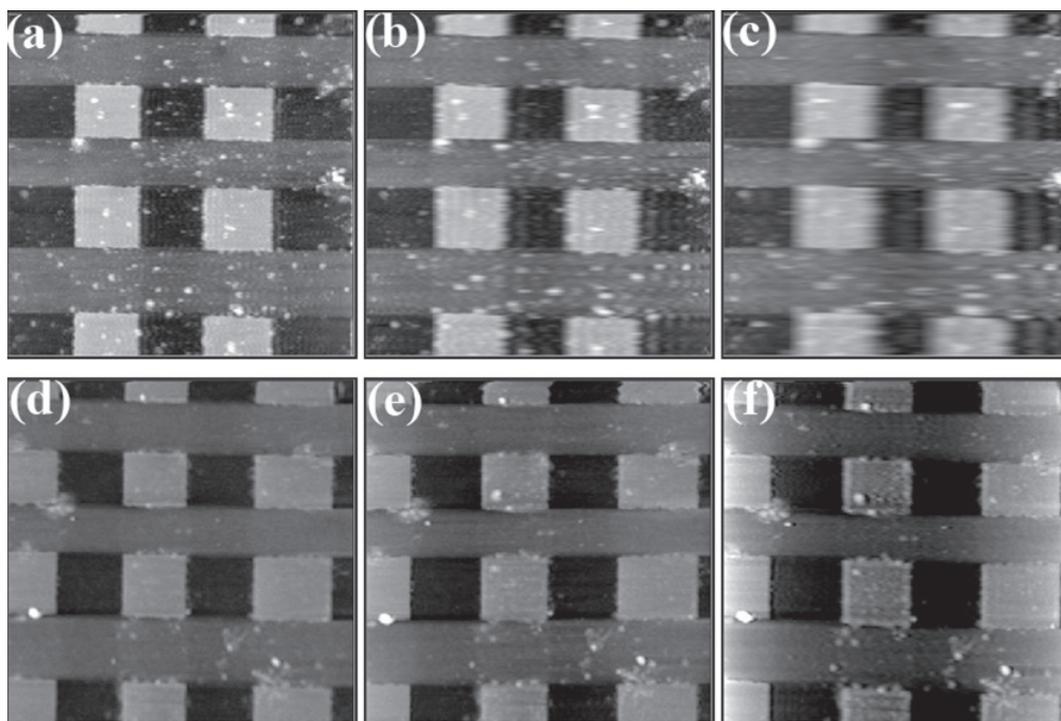


圖 19. 高速像散式原子力顯微儀在空氣中以半接觸模式掃描標準樣品之表面形貌圖，影像寬度為  $7.2 \mu\text{m}$ 。(a)–(c) 為使用一般探針(共振頻率約 300 kHz)，(a) 以 10 Hz 掃描，(b) 以 25 Hz 速度掃描，(c) 以 50 Hz 速度掃描；(d)–(f) 為使用共振頻率高達 5.5 MHz 之高頻探針，(d) 以 10 Hz 掃描標準樣品，(e) 以 100 Hz 速度掃描，(f) 以 200 Hz 速度掃描。由橫向掃描影像之清晰度，可判斷掃圖時迴饋系統是否能快速跟上表面形貌的變化。

任何兩物體的間距也就隨時間而不斷地在變動。這種變動在奈米級尺度相當明顯，幾乎任何間距都以每分鐘幾奈米以上的速率在變動，有時變大、有時縮小，對奈米級精密定位構成一大挑戰，這就是所謂的熱飄移 (thermal drift) 現象。即使所有物體都固定住，沒有刻意去移動位置，奈米級顯微術也常常看到待測物影像隨時間而移動。奈米級精密定位另一挑戰是環境的振動，一般實驗室的地面在靜止時，通常還會有微米級的振動，如果附近有物體在地面移動，如人走動、搬運東西、馬達轉動、或大型汽車在附近馬路經過等，帶來的振動更大，奈米級精密定位也會因振動傳入而失效。除非刻意加上減振系統，否則振動現象在奈米世界中到處存在，要達到奈米精密定位必須將振動減到一奈米甚至原子級以下，精密位移量測可以幫我們判斷系統中振動的程度。

## 參考文獻

1. K. C. Fan, C. Y. Lin, and L. H. Shyu, *Meas. Sci. Technol.*, **11**, N1(2000).
2. F. Quercioli, B. Tiribilli, C. Ascoli, P. Baschieri, and C. Frediani, *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 3620 (1999).
3. B. Jos and R. v. Gerard, *Appl. Optics*, **30**, 1179 (1991).
4. T. R. Armstrong and M. P. Fitzgerald, *Meas. Sci. Technol.*, **3**, 1072 (1992).
5. E. T. Hwu, S. K. Hung, I. S. Hwang, and K. Y. Huang, *Jap. J. Appl. Phys.*, **45**, 3B, 2368 (2006).
6. E. T. Hwu, S. K. Hung, C. W. Yang, and I. S. Hwang, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 221908 (2007).
7. E. T. Hwu, S. K. Hung, C. W. Yang, and I. S. Hwang, *Nanotechnology*, **19**, 115501 (2008).
8. I. S. Hwang, E. T. Hwu, and K. Y. Huang, US Patent 7,247,827 B1; Taiwan patent I264520.
9. E. T. Hwu, H. Illers, L. Jusko and H-U Danzebrink, *Meas. Sci. Technol.*, **20**, 084005 (2009).
10. 黃英碩, 科儀新知, **144**, 7 (2005).
11. 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, **144**, 18 (2005).
12. W. M. Wang, K. Y. Huang, H. F. Huang, I. S. Huang, and E. T. Hwu, *Nanotechnology*, **24**, 455503 (2013).
13. H. S. Liao, K. Y. Huang, I. S. Hwang, T. J. Chang, W. W. Hsiao, H. H. Lin, E. T. Hwu, and C. S. Chang, *Rev. Sci. Instrum.*, **84**, 103709 (2013).
14. E. T. Hwu, H. S. Liao, F. G. Bosco, C. H. Chen, S. Keller, A. Boisen, and K. Y. Huang, *J. Sensors*, **2012**, 580939 (2011).
15. F. G. Bosco, E. T. Hwu, C. H. Chen, S. Keller, M. Bache, M. H. Jakobsen, I.-S. Hwang, and A. Boisen, *Lab on a Chip*, **11**, 2411 (2011).
16. F. G. Bosco, M. Bache, E.-T. Hwu, C. H. Chen, S. S. Andersen, K. A. Nielsen, S. S. Keller, J. O. Jeppesen, I.-S. Hwang, and A. Boisen, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 170 (2012).
17. H. P. Lang, M. Hegner, and C. Gerber, *Materialstoday*, **8**, 30 (2005).
18. 吳志偉, 科儀新知, **198**, 10 (2014).
19. T. Uchihashi, R. Iino, T. Ando, and H. Noji, *Science*, **333**, 755 (2011).



黃英碩先生為美國哈佛大學應用物理博士，現任中央研究院物理研究所研究員。

Ing-Shouh Hwang received his Ph.D. in applied physics from Harvard University, U.S.A. He is currently a research fellow at the Institute of Physics, Academia Sinica.



胡恩德先生為國立台灣大學機械工程博士，現任中央研究院物理研究所研究助技師。

En-Te Hwu received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an assistant research scientist at the Institute of Physics, Academia Sinica.



黃光裕先生為德國柏林工業大學工程博士，現任國立台灣大學機械工程研究所教授。

Kuang-Yuh Huang received his Ph.D. in Institut fuer Feinwerktechnik und Biomedizinische Technik from Technische Universitaet Berlin University, Germany. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.



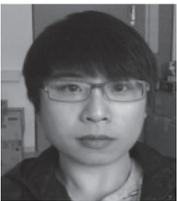
張嘉升先生為美國亞利桑納州立大學物理博士，現任中央研究院物理研究所研究員。

Chia-Seng Chang received his Ph.D. in physics from Arizona State University, U.S.A. He is currently a research fellow at the Institute of Physics, Academia Sinica.



廖先順先生為國立台灣大學機械工程博士，現任美國國家衛生研究院 (NIH) 博士後研究員。

Hsien-Shun Liao received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently a post-doctoral research fellow in National Institutes of Health (NIH), USA.



王偉珉先生現為國立台灣大學機械工程博士班學生，現任中央研究院物理研究所研究助理。

Wei-Min Wang is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University. He is currently a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica.



陳彥宏先生為國立台灣大學機械工程碩士，曾擔任中央研究院物理研究所研究助理。

Yen-Hung Chen received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University. He has served as a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica.



陳敬修先生現為國立台灣大學機械工程博士班學生，現任中央研究院物理研究所研究助理。

Ching-Hsiu Chen is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University. He is currently a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica.



鄭仲翔先生現為國立台灣大學機械工程博士班學生，現任中央研究院物理研究所研究助理。

Chung-Hsiang Cheng is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University. He is currently a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica .



黃宣富先生現為國立台灣大學機械工程博士班學生，現任中央研究院物理研究所研究助理。

Hsuan-Fu Huang is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University. He is currently a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica .