

超精密量測與致動系統

Ultra-High Precision Measurement and Positioning System

胡恩德、鄭仲翔、陳敬修、王偉珉、陳皇翰

En-Te Hwu, Chung-Hsiang Cheng, Ching-Hsiu Chen, Wei-Min Wang, Huang-Hang Chen

中央研究院物理研究所耕耘掃描探針顯微術已近 20 年，其間產出高解析、高可靠度與穩定性之超精密奈米量測、致動核心技術。這些技術可針對不同應用，設計各種奈米級解析度之多軸線性、角度、旋轉量測與致動元件，應用於其他精密儀器系統之核心。本文將介紹奈米解析度之雷射干涉儀、皮米解析度之光譜儀與超精密摩擦驅動致動系統。

Institute of Physics, Academia Sinica develops scanning probe microscopy for 2 decades, which generates ultra-high precision measurement and positioning techniques. Those techniques can be custom designed for multi-axes linear, angular, rotational measurement and actuation as a core of precision instruments. In this article, we will introduce spectrometer, laser interferometer, laser auto-collimator systems for precision measurements and nano-scale positioning systems for precision positioning.

一、前言

掃描探針顯微術 (scanning probe microscopy, SPM) 必須整合雷射光學、超精密機械、低雜訊電子、即時控制軟體技術，才能夠進行奈米級甚至次原子級解析度之量測⁽¹⁻⁵⁾。中央研究院物理研究所表面與奈米科學實驗室基於研究需求，從無到有自行研發掃描探針顯微鏡已有 20 年之經驗⁽⁶⁻⁹⁾，除了開發出台灣第一台自有技術的原子力顯微鏡 (atomic force microscope, AFM) 外，更授權給國內廠商進行商品化銷售。而原子力顯微鏡包含了許多子系統，如低雜訊類比訊號運算、回饋控制、超精密量測、超精密定位等，皆為非常高單價的元件。

以掌上型原子力顯微鏡為例，如圖 1(b)、(c) 所示。為了將原子力顯微鏡之探針，以數奈米至數十奈米之解析度接近並接觸樣品表面並進行掃描，必須使用超精密致動系統帶動。當探針接觸樣品表面後，我們使用內藏像散式光路的光碟機讀取頭作為像散式量測系統 (astigmatic detection system, ADS) 量測探針懸臂樑奈米級至原子級的振動訊號⁽¹⁰⁻¹⁴⁾，將探針與樣品表面間的交互作用力轉換成電訊號，輸入電腦進行運算⁽¹⁵⁻¹⁷⁾。圖 1(c) 為此掌上型原子力顯微鏡之超精密量測與奈米致動元件。除了原子力顯微鏡，這些元件可單獨成為精密儀器如光學干涉儀、多軸致動系統，或組合成其他不同的精密儀器，如光學輪廓量測系統、微機電振動量測系統，以下將分別進行介紹。

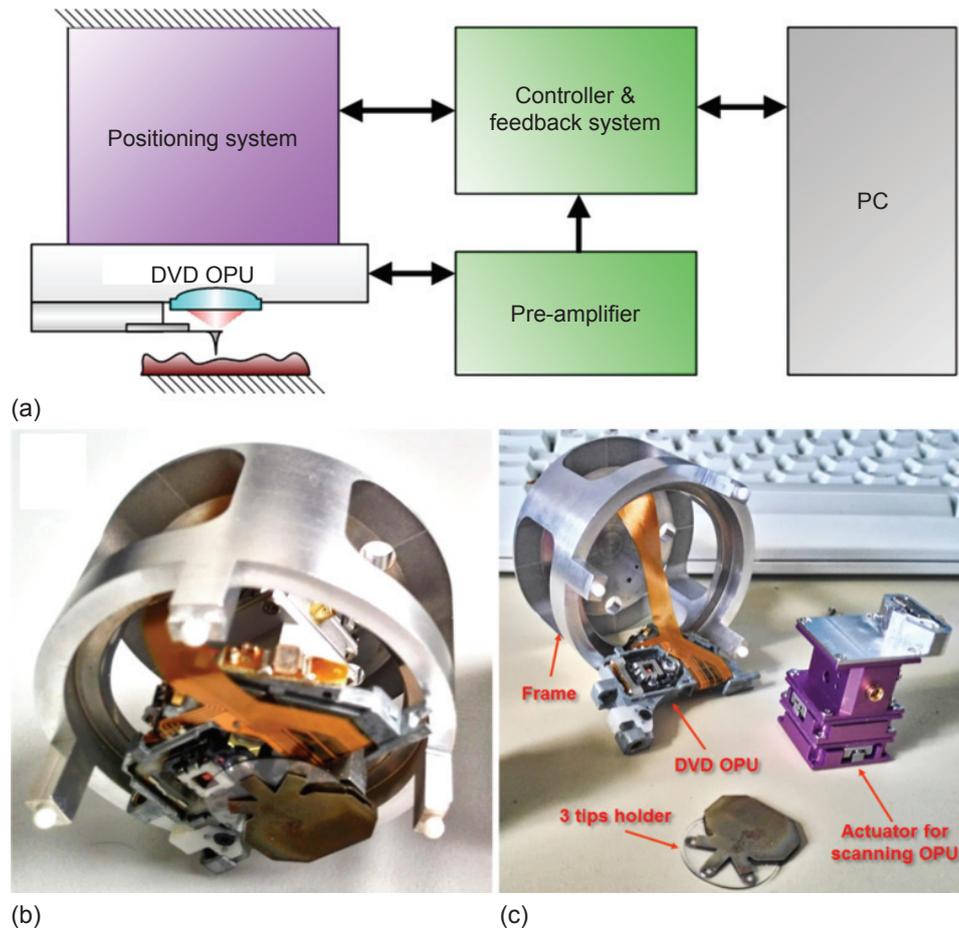


圖 1. 掌上型原子力顯微鏡之架構。(a) 掌上型原子力顯微鏡之系統架構。(b) 機構實體。(c) 機構分解圖。

二、多軸都普勒干涉視準量測系統

目前產業界常使用之超精密光學量測系統如：自動視準儀、雷射干涉儀、電容式位移計、光學尺等皆不難看出精密機械業對於定性且定量的量測需求。目前精密機械的工作平台，大多由單軸動件所組合而成，以達到多自由度運動，但機具中各軸運動元件的特性與誤差皆會相互疊加並嚴重影響整台機具的精密度與加工品質。以目前產業界機台的需求，不管是空載時的機台誤差量測或調校、精密元件的組裝或加工件的精密定位、控制與補償等都需要至少六個自由度的量測資訊。機台校正以雷射干涉儀為例，可利用同一雷射光源分別量測各運動軸線性位移，極少具有同時檢測線性位移外之角度、滾轉數據，且體積龐大難內藏於精密機械的緊緻系統中。自動視準儀亦是如此，只能量測兩旋轉軸的

角位移資訊卻缺乏線性位移量測數據，而兩者價位皆動輒上百萬，且僅能作為機台空載時的誤差量測或調校依據。目前使用上最為廣泛的光學尺，雖其可做為誤差檢測或回授的即時量測儀器，但僅能提供平面位移訊號。

我們長期使用像散式光學系統進行奈米級量測十多年的經驗累積後，在 2012 年開發出利用光碟機讀取頭光學系統為基礎的都普勒干涉視準量測系統。此系統可由單一光路同時進行單一線性軸的線性位移量 (displacement) 與三個角位移量，俯仰度 (pitch)、搖擺度 (yaw)、滾動度 (roll)。此系統可用於檢測目標物於空間中的相對位移量，且與一般型式雷射干涉儀具有相同解析能力，同時本系統具有體積小、系統簡單等優勢，大幅提升此技術的實用性。

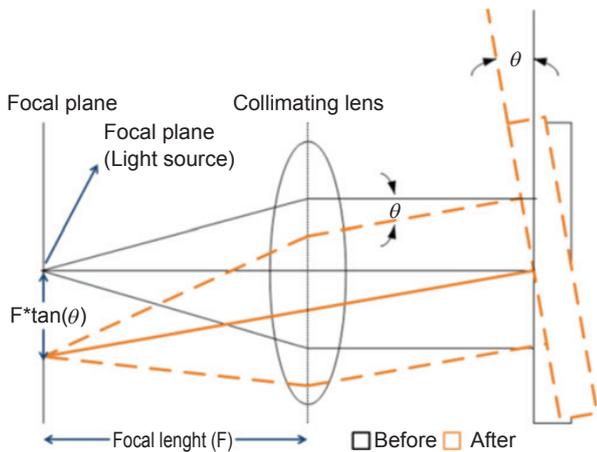


圖 2. 俯仰、搖擺角位移量測部原理圖。

1. 線性位移量測機制

本系統對於線性位移量測係利用雷射光學干涉法原理所達成⁽¹⁸⁻¹⁹⁾，搭配電路設計與軟體分析技術，可得到 30 nm 的解析能力。系統於量測上是由一雷射二極體發出一發散之量測光源，藉由準直透鏡 (collimator lens, CL)，將光束校準為準直光，再由反射鏡 (mirror, M) 將光束導往反射目標物 (target)。當待側端移動時，反射目標物也隨即將此帶有位移資訊的訊號光，沿原光路反射回本系統的雷射二極體共振腔內，此時兩光束將會產生自干涉現象，且該現象會於反射目標物每移動半波長之距離即會發生一個極值訊號，再藉由雷射二極體本身的功率監測裝置 (photo detector, PD) 來獲得干涉訊號。

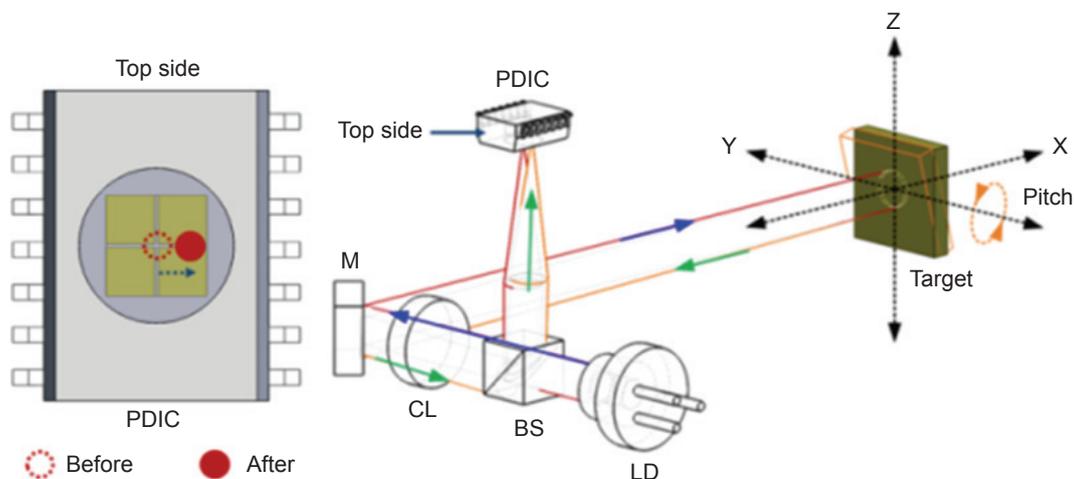


圖 3. 俯仰角位移量測。

2. 俯仰、搖擺角位移量測機制

如圖 2 所示，本系統之俯仰、搖擺角位移量測部係利用光學視準儀原理所達成⁽²⁰⁻²³⁾，其利用準直透鏡 (CL) 對於不同角度入射之平行光會於同一聚焦平面上產生位移之光學特性，可以量測出反射目標物的角度資訊，且不受反射目標物擺放位置所影響。本系統便利用光學讀取頭內部之 PDIC 進行俯仰度與搖擺度的二維角度檢測，如圖 3-6 所示即為本系統於俯仰、搖擺角位移量測時，反射目標物與 PDIC 上光點位置的對應關係圖。

3. 滾動角位移量測機制

本系統於滾動角位移量測上是利用偏振光學之機制所達成。如圖 7、8 所示，其是於本系統之雷射量測光軸中加入兩片偏振片 (Polarizer 1 與 Polarizer 2)，其中 Polarizer 1 固定於本系統雷射出光處，而 Polarizer 2 則與反射目標物相互固定，當反射目標物產生滾動角位移時，兩偏振片會因為夾角不同產生不同的透光度，故可藉由檢測 PDIC 上的光能量強度變異反解出實際的滾動角位移量。

此都普勒干涉視準量測系統使用結構緊緻的光碟機讀取頭為系統核心，因此有利內藏於所有精密機械系統中。除了線性位移訊號外，可擴充至多自由度量測，如角度誤差訊號補償，有機會取代現有裝置如光學尺、雷射干涉儀、視準儀與電子水平儀等，提供給產業界誤差檢測一個新的選擇。

三、透鏡色差式光譜儀

干涉儀以雷射光波長為基準進行距離量測，然而若光波長本身受到溫度、濕度、壓力變化而改變時，將影響量測之準確性。為此，我們也開發出透鏡色差式光譜儀，此光譜儀利用一般透鏡本身對於入射光波長所產生之「色差現象」，搭配光學像散檢測法所構成，不必透過複雜電子處理與計算即可以 10^{-12} m 皮米 (Pico meter) 之解析度量測單色光波長之變化。

現有光譜儀或光譜量測技術皆屬「分光式」光譜式測量機制，主要概念是當光源透過色散元件後，不同波長的光源由於「色散元件」的光學特性，入射光線依序分光，最後藉由檢測分光出之光線位置來辨別該光源之波長。圖 9、10 為現有較為常見的光譜儀之檢測機制，分別為「稜鏡式光譜儀」以及「光柵式光譜儀」。隨現有製程技術的不斷提升，得以製造出超密像素與超高解析能力之光檢測元件，因此可提升光譜儀之量測解析度。但該色散元件之分光機制對於光譜檢測上還是存有一定極限，雖可藉由光導設計或成像位置拉遠等方式放大分光後之不同波長光線的相對位置，但同時也將引入複雜的光學雜訊以及龐大的體積；而另一種提升解析度之作法是藉由改變光柵線寬來達到更好的分色效果，但製程上卻也存有相當的困難處與極限，當然製造成本也是值得考量的因素之一。

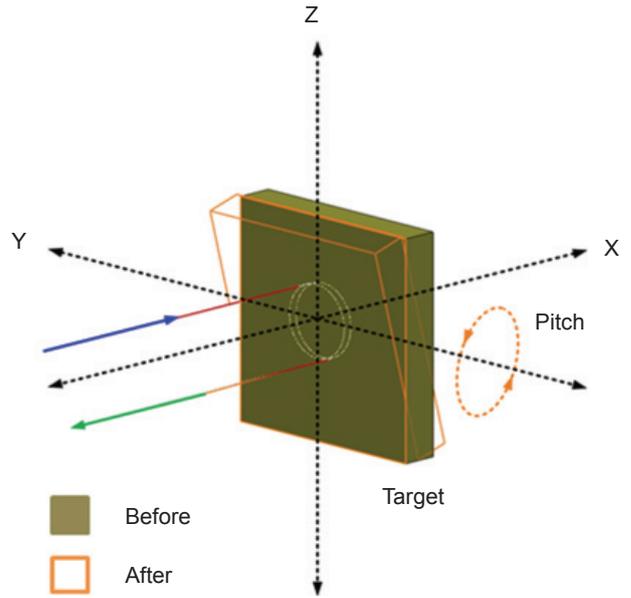


圖 4. 反射目標物俯仰角位移誤差示意圖。

基於稜鏡與光柵兩種色散元件的光學極限制，因此更發展出法布裡－珀羅干涉 (Fabry-Pérot) 式光譜儀，該光學機制對於量測之光源擁有極高的色散率，故也得到了極高的光譜分辨能力，但其卻需藉由較為複雜的光學系統與電子電路設備來實現其強大的光譜檢測能力，價位上更是高出許多。

本光波長檢測機制係利用一般光學透鏡對於不同波長之入射光具有不同焦點之特性⁽²⁴⁻²⁵⁾，如圖 11 所示，再配合光學讀取頭像散檢測機制對於不

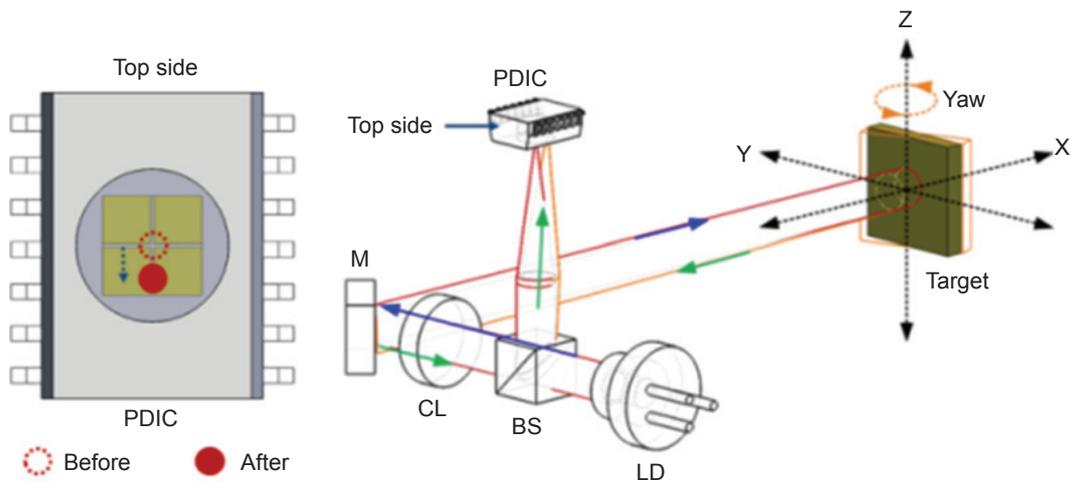


圖 5. 搖擺角位移量測。

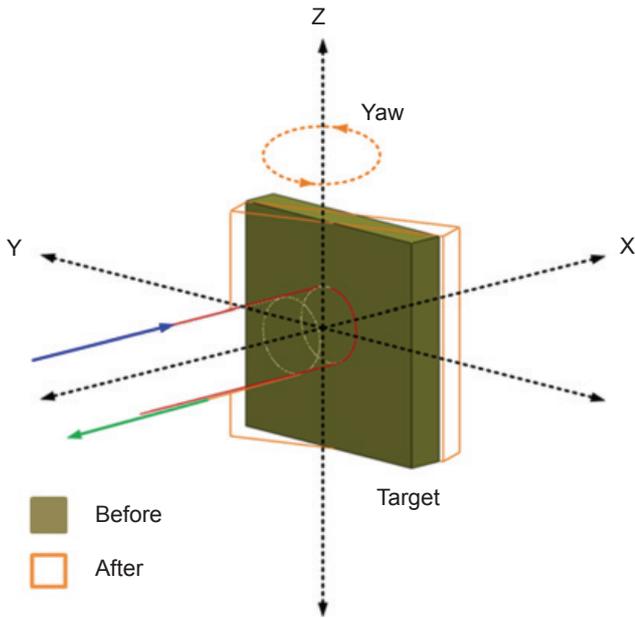


圖 6. 反射目標物搖擺角位移誤差示意圖。

同焦點的離焦訊號具有超高靈敏度的特點，成功提出透鏡色差式光譜儀之像散檢測法，可大幅度提升對於光譜的解析能力至皮米等級。該檢測機制具有高可靠度、體積微小、高準確度、即時檢測及系統簡單等優勢，具有商品化之潛力。

圖 12 為本系統之整體架構與光路圖，包含光學讀取頭像散檢測系統與收光系統兩大部分，收光系統是由一色差聚焦透鏡所構成；光學讀取頭像散檢測系統則包含聚焦透鏡、導光鏡組、像散透鏡與光檢測器 (PDIC) 所構成。

當待測光源發出光線，便可經由收光系統進行光線匯集，藉由色差聚焦透鏡將入射之光線依據波長的不同聚焦於不同焦點位置 (即光學色差原理)，而其焦點位置與波長之關係式如下：

$$\frac{1}{f} = \left[\left(B + \frac{C}{\lambda^2} \right) - 1 \right] \times P_{\text{Lens}}$$

其中 f 表示色差聚焦透鏡之焦距，可由此焦距得出實際光束焦點位置； B 與 C 為 Cauchy's equation 的透鏡材料係數； λ 代表入射光之波長； P_{Lens} 代表該色差聚焦透鏡之透鏡常數。圖 13 為波長變化對應焦點位置之關係曲線，入射波長的不同所造成的不同焦點位置，將經由聚焦透鏡與導光透鏡組將光線導往像散透鏡，由於像散透鏡具有不同的縱向及橫向放大曲率，因此對於不同聚焦位置時會有不同的成像光斑，造成像差，因此可利用此像散透鏡搭

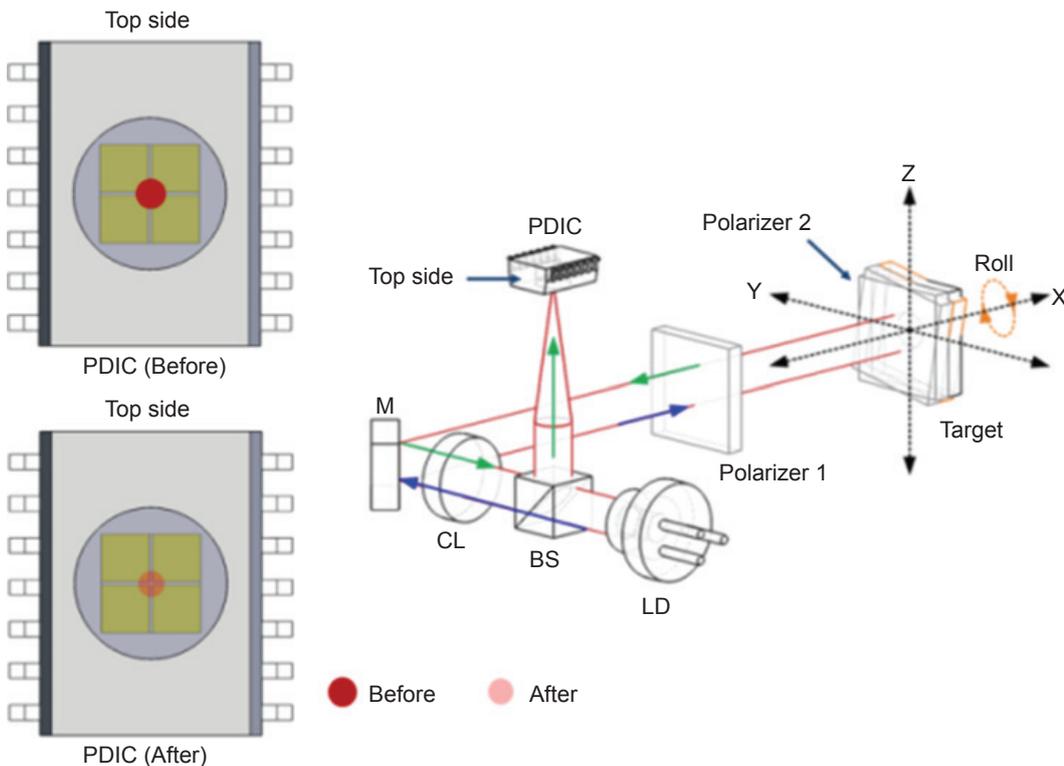


圖 7. 滾動角位移量測。

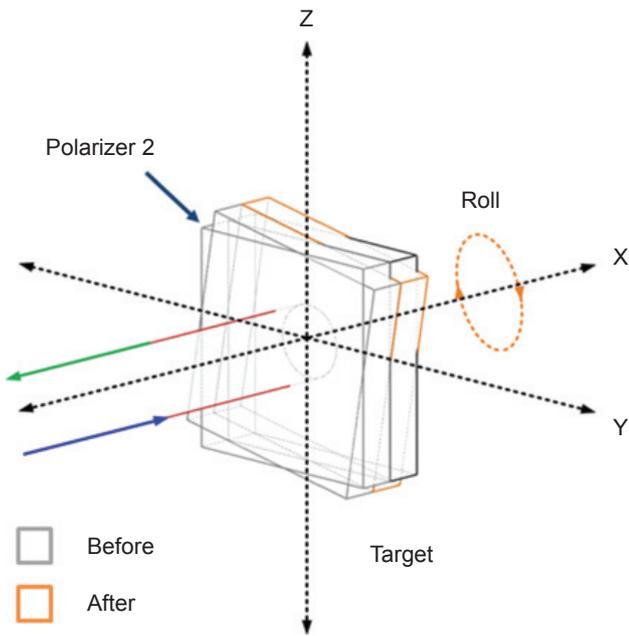


圖 8. 反射目標物滾動角位移誤差示意圖。

配光檢測器 PDIC 作為焦點位置的檢測方法，如圖 14 所示，為 PDIC 上所得焦點位置與電壓之關係曲線圖。

圖 15 為實際利用像散量測法由 PDIC 上所得到的 655 nm 與 790 nm 兩種波長所造成的焦距差 (Δf) 位移訊號。由上述可得知該技術的確可進行透鏡色差的焦點位置變動的檢測，間接得知入射光之波長訊息，且擁有極高的解析能力，而藉由圖 13、15 的關係，可確定該系統對於 1 奈米的波長變動即可獲得約 150 奈米以上的焦點位移，若要提

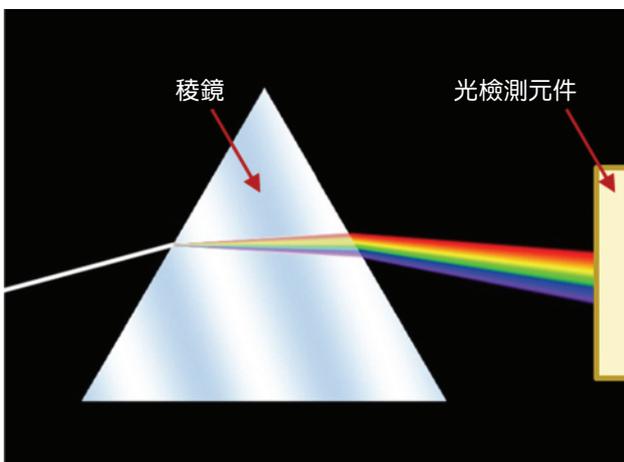


圖 9. 稜鏡式光譜儀檢測技術。

升解析能力，只需藉由改變或選擇合適之色差聚焦物鏡的 P_{Lens} 透鏡常數即可。

我們開發的透鏡色差式光譜儀雖然在波長範圍檢測有一定限制，但具有皮米級波長解析度，可應用於單一波長光之精準應用，如干涉儀、拉曼光譜系統之雷射輸出波長監控。此外透鏡色差式光譜儀使用光碟機讀取頭光路為核心，不必透過複雜的電子處理與計算即可獲得高解析波長，並同時具有微小化與符合經濟效益等優勢。

四、超精密摩擦驅動致動系統

在原子力顯微鏡開發過程中，為了將探針位移至樣品，解析度必須夠高 (單步移動數十奈米以下) 才不致撞毀脆弱的探針，為此我們開發出超精密摩擦驅動致動系統，如圖 16(a) 所示。此摩擦驅

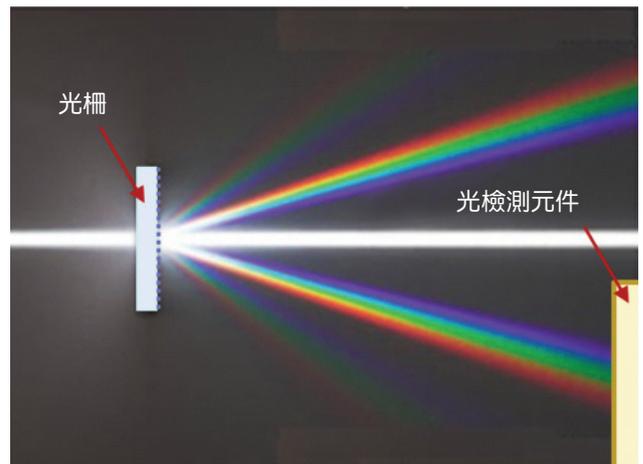


圖 10. 光柵式光譜儀檢測技術。

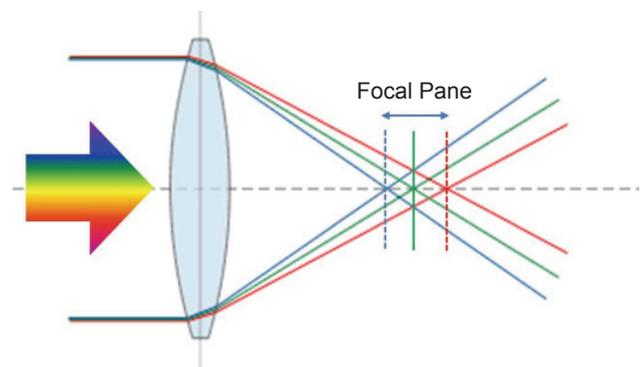


圖 11. 透鏡之色差現象。

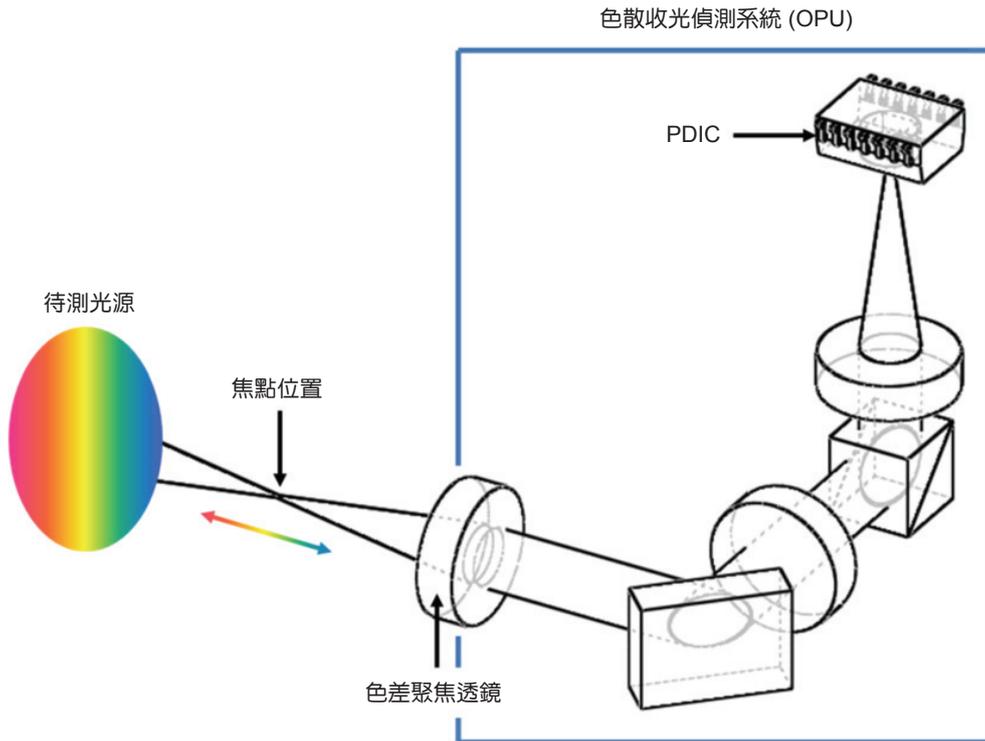


圖 12. 透鏡色差式光譜儀之像散檢測法示意圖。

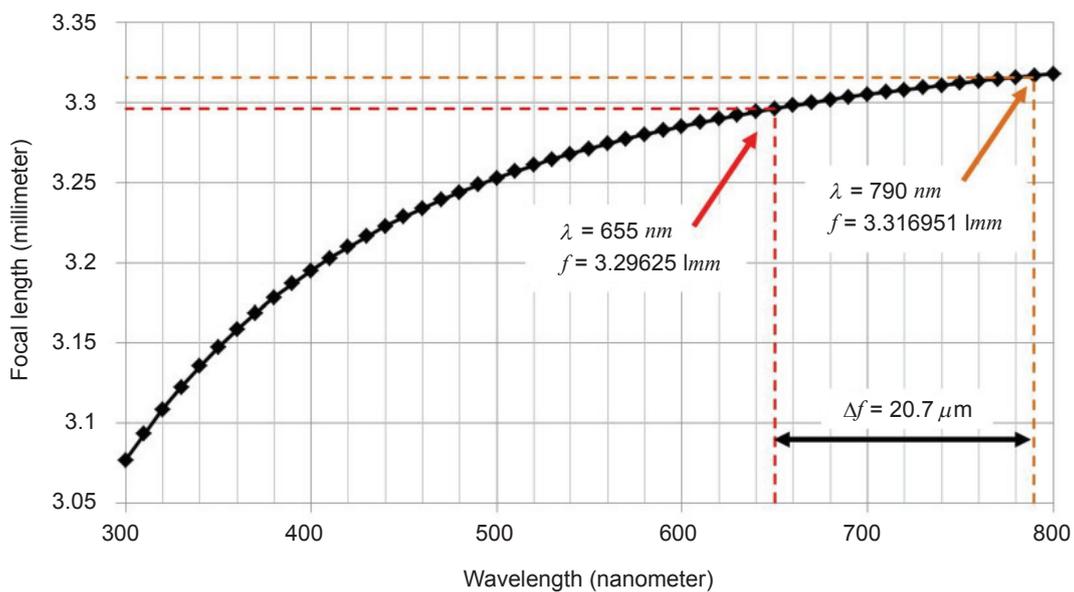


圖 13. 波長變化對應焦點位置之關係曲線。

動致動系統亦可在水平方向調整探針與樣品的相對位置，配合光學顯微鏡的輔助，可讓使用者找尋感興趣的地點下針掃描。我們開發的摩擦驅動系統可達到數公尺之超長位移行程與至少 6 公斤以上的載重。摩擦驅動致動系統的挑戰在於位移時能順暢運

動，靜止時必須維持探針與樣品間之結構剛性。機構的晃動會劣化原子力顯微鏡的解析度，熱膨脹將造成描影像飄移。

超精密摩擦驅動機制如圖 16(b) 所示，主要為導引機構 (linear stage) 與壓電致動機構 (PZT

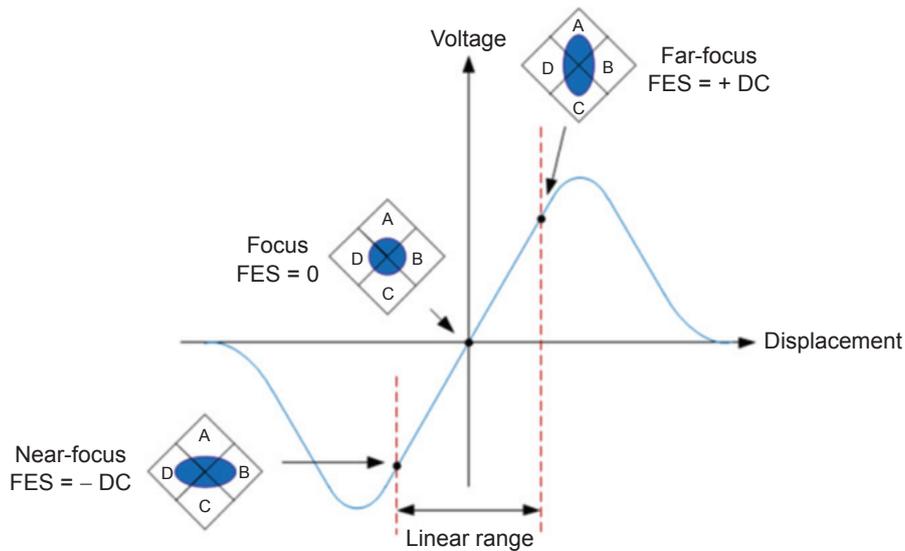


圖 14. 像散法 PDIC 上所得焦點位置與電壓之關係曲線。

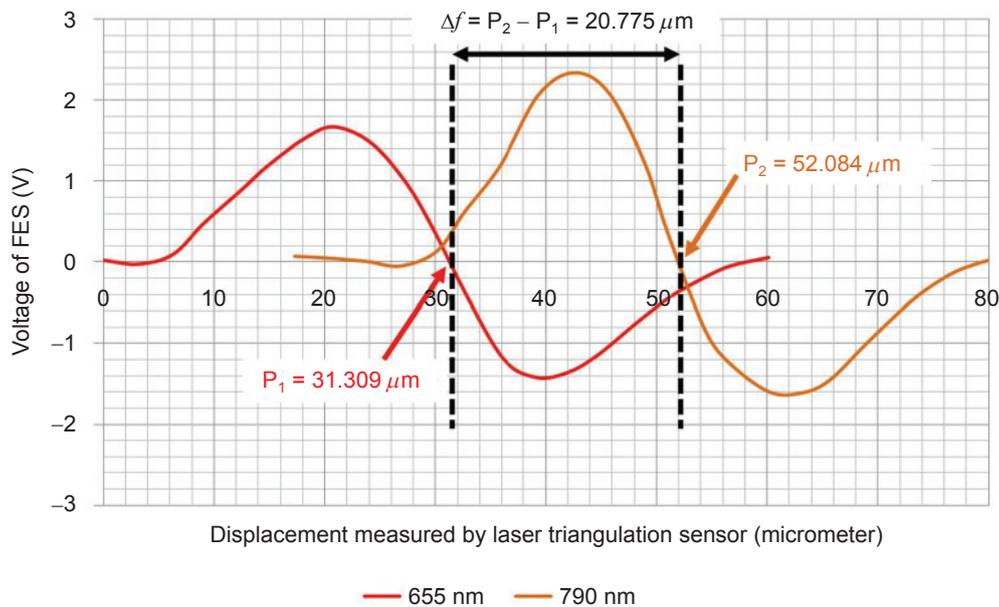


圖 15. 655 nm 與 790 nm 兩種波長所造成的焦距差 (Δf) 位移訊號。

driving unit) 組成，壓電致動機構與導引機構接觸時產生摩擦力。當壓電致動機構緩緩伸長 (中央圖)，由於導引機構之慣性力小於與壓電致動機構間的靜摩擦力，因此導引機構朝右方位移。當壓電致動機構高速縮回時 (下圖) 此時導引機構由於本身慣性大於與壓電致動機構間之摩擦力，因此與最上圖之導引機構間產生一 ΔX 之相對位移。此 ΔX 位移量取決於驅動電壓大小，由數微米至數奈米不等。

圖 17 為此摩擦驅動致動系統之相關衍生應用，經過驅動機制設計修改，除了可成為高解析旋轉平台 (六百萬步旋轉一圈) 外，更可外加高解析光學傳感器成為閉迴路致動系統。圖 18 為三軸閉迴路摩擦驅動致動系統之定位解析度實驗，其中光學傳感器 (encoder) 與雷射干涉儀 (interferometer) 進行位移解析度之比對。圖 18(a)、(b)、(c) 分別為 X、Y、Z 軸之位移，每軸皆以最高解析度往前與往後 5 步，從數據中可知平均位移解析度為 3 奈米。

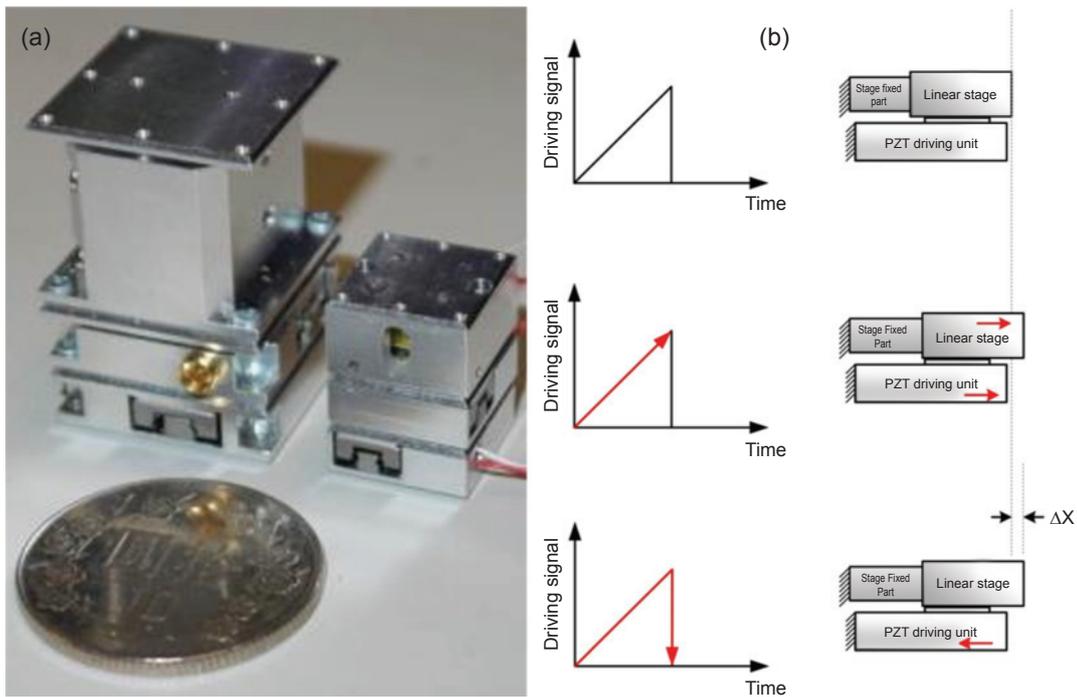


圖 16. XYZ 三軸超精密摩擦驅動致動系統。(a) 實體照片。(b) 驅動機制。

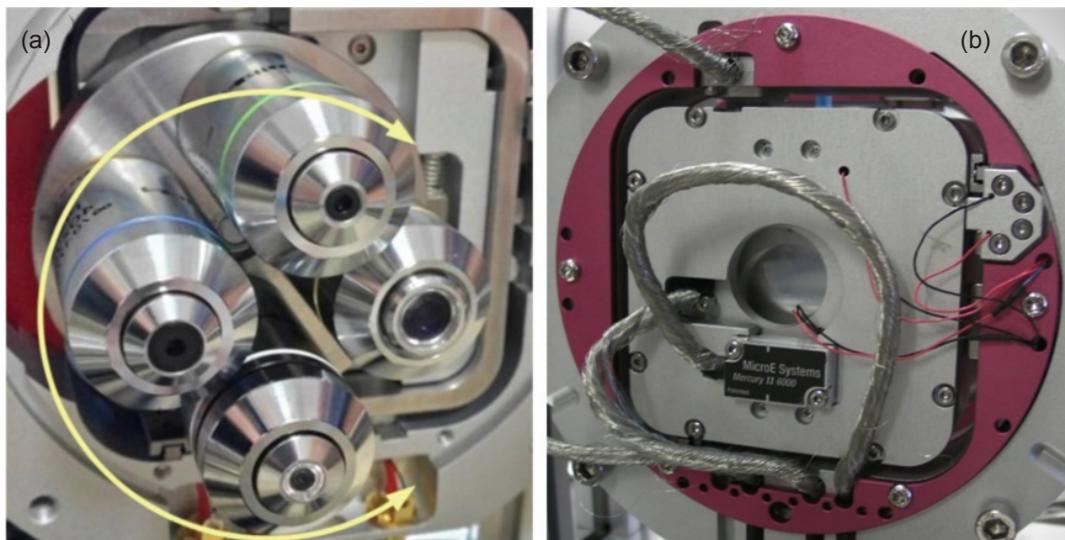


圖 17. 超精密摩擦驅動致動系統之應用。(a) 高解析旋轉系統。(b) 三軸閉迴路系統。

我們也針對此閉迴路系統進行長距離重複定位精度測試，圖 19(a)、(b)、(c) 分別為 X、Y、Z 軸之位移，每軸皆往前與往後位移一百萬步，可發現重複定位誤差分別為 10.8, 7.4 與 20.3 奈米 (干涉儀量測數據)，由此可知超精密摩擦驅動致動系統之重複定位精度極高。若直接使用干涉儀作為迴授系

統，將可達到更高之定位解析度與精度。

目前已經實驗證明我們開發的摩擦驅動致動系統具有高線性度、高荷重與高位移解析度之優點，除了作為原子力顯微鏡樣品定位、掃描、大範圍位移之外，已實際應用於多種精密儀器之中。

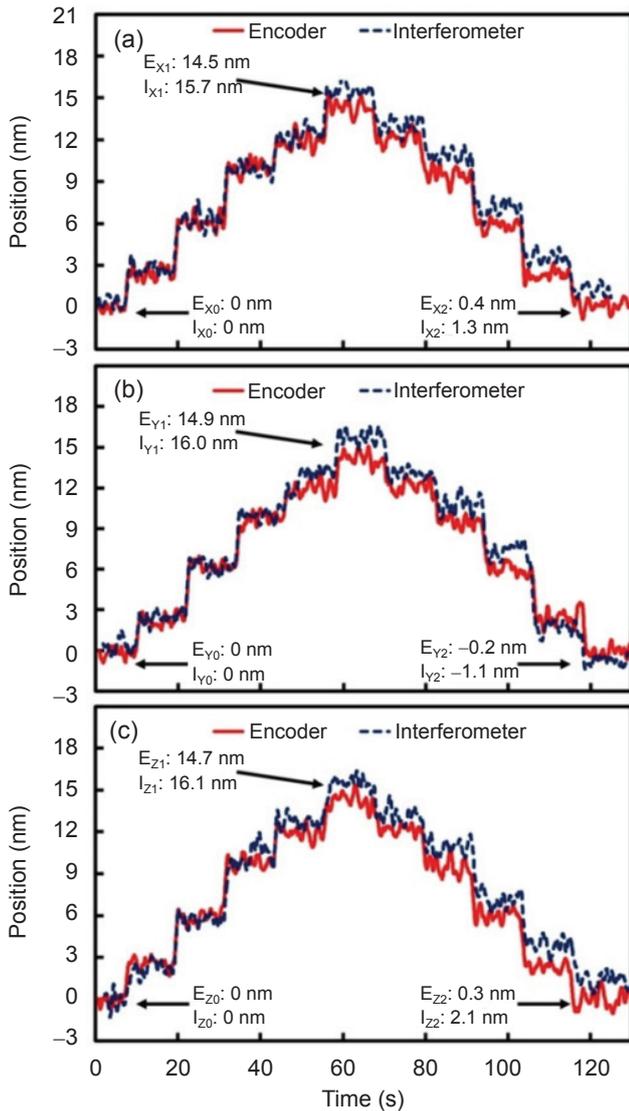


圖 18. 閉迴路超精密摩擦驅動致動系統之定位解析度量測數據。

五、超精密光學量測與致動系統之未來展望

中央研究院物理研究所開發的干涉儀、光譜儀、摩擦驅動致動系統已經過實驗驗證，應用於原子力顯微鏡、生化檢測平台、微機電晶片量測系統、X 光顯微鏡、共軛焦顯微鏡之中。期間我們累積了不少經驗，並且不斷增進系統之穩定性與可靠度，目前已達到接近市售系統之品質。超精密量測、致動技術為多種精密儀器之基石，我們期望未

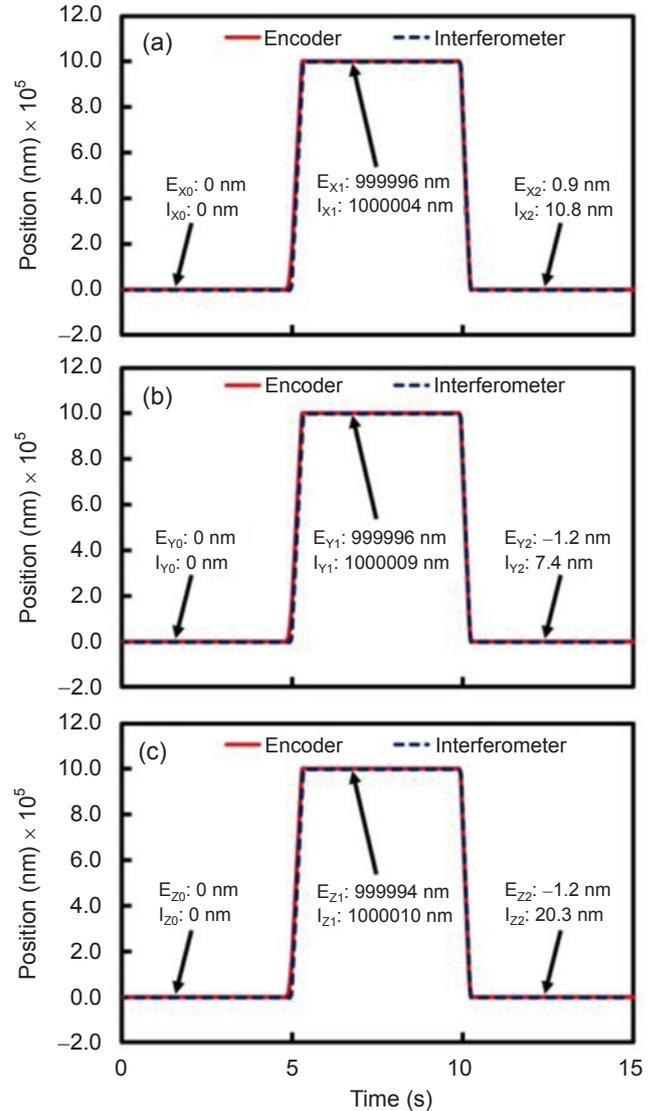


圖 19. 閉迴路超精密摩擦驅動致動系統之重複定位精度量測數據。

來可透過多項關鍵技術授權民間企業商品化，以提升台灣未來產業競爭力。

誌謝

特別感謝科技部、中央研究院、台灣大學機械系黃光裕教授的支持，尤其是中央研究院物理所精工室的超精密加工能力，以及過去多年曾參與技術開發的所有同仁。

參考文獻

1. E. T. Hwu, S. K. Hung, I. S. Hwang, and K. Y. Huang, *Jap. J Appl. Phys.*, **45**, 3B, 2368 (2006).
2. K. C. Fan, C. Y. Lin, and L. H. Shyu, *Meas. Sci. Technol.*, **11**, N1(2000).
3. F. Quercioli, B. Tiribilli, C. Ascoli, P. Baschieri, and C. Frediani, *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 3620 (1999).
4. B. Jos and R. v. Gerard, *Appl. Optics*, **30**, 1179 (1991).
5. T. R. Armstrong and M. P. Fitzgerald, *Meas. Sci. Technol.*, **3**, 1072 (1992).
6. 黃英碩, 科儀新知, **144**, 7 (2005).
7. 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).
8. W. M. Wang, K. Y. Huang, H. F. Huang, I. S. Huang, and E. T. Hwu, *Nanotechnology*, **24**, 455503 (2013).
9. 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).
10. W. W. Hsiao, H. S. Liao, H. H. Lin, Y. L. Lee, C. K. Fan, C. W. Liao, P. Y. Lin, E. T. Hwu and C. S. Chang, " *Anal. Sci.*, **29**, 885 (2013).
11. E. T. Hwu, H. S. Liao, F. G. Bosco, C. H. Chen, S. Keller, A. Boisen, and K. Y. Huang, *J. Sensors*, 580939 (2011).
12. 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).
13. Ching-Hsiu Chen, Chung-Hsiang Cheng, Bo-Jing Juang, Hsien-Chen Ko, Ing-Shouh Hwang, Kuang-Yuh Huang and En-Te Hwu, *ASPEN*, 12 (2013).
14. T. Uchihashi, R. Iino, T. Ando, H. Noji, *Sci.*, **333**, 755 (2011).
15. E. T. Hwu, S. K. Hung, C. W. Yang, and I. S. Hwang, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 221908 (2007).
16. E. T. Hwu, S. K. Hung, C. W. Yang, and I. S. Hwang, *Nanotechnology*, **19**, 115501 (2008).
17. E. T. Hwu, H. Illers, L. Jusko and H-U Danzebrink, *Meas. Sci. Technol.*, **20**, 084005 (2009).
18. G. Hong, et al., *China Meas. Technol.*, **32**, 5 (2006).
19. S. Ottonelli, et al., *Sensors*, **9**, 3527 (2009).
20. K.C. Fan, et al., *Meas. Sci. Technol.*, **22**, 055302 (2011).
21. 鄭仲翔, 國立虎尾科技大學光電與材料科技研究所碩士論文 (2011).
22. Chien-Hung Liu, Chung-Hsiang Cheng, *Sens. Actuators, A*, **181**, 87 (2012).
23. Cha'o-Kuang Chen, Chien-Hung Liu, Chung-Hsiang Cheng, *Smart Sci.*, **1**, 1 (2013).
24. Francis J. Deck, et al., *U.S. Patent* 7,483,135 B2 (2009).
25. Jason K. Streit, et al., *Anal. Chem.*, **85**, 1337 (2013).



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副技師。

Edwin Hu received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an Associate Research Scientist at the Institute of Physics, Academia Sinica.



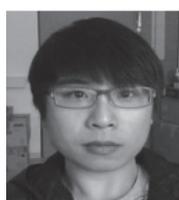
鄭仲翔先生現為國立台灣大學機械工程博士班學生，並擔任中央研究院物理研究所研究助理。

Chung-Hsiang Cheng is currently a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University and 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，並擔任中央研究院物理所專職研究助理。

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



王偉珉先生現為國立台灣大學機械工程博士班學生，並擔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 and a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica.



陳皇翰先生為國立宜蘭大學生物機電學士，現任中央研究院物理研究所助理。

Huang-Han Chen received his bachelor degree in Biomechatronic Engineering from National Ilan University. He is currently a research assistant at the Institute of Physics, Academia Sinica.