

# 奈米檢測技術應用

## Applications of Nano-inspection Technologies

蘇健穎、朱念南、蕭銘華、蕭健男、陳峰志

James Su, Nian-Nan Chu, Ming-Hua Shiao, Chien-Nan Hsiao, Fong-Zhi Chen

奈米科技的蓬勃發展，主要歸因於先進製程技術、原子級操控技術以及奈米檢測技術的提升。奈米科技為原子、分子等級的介觀性質研究，更需仰賴精密檢測儀器進行分析。本文透過奈米計量單位、奈米檢測技術簡介、年度盛事等章節，說明當前奈米檢測技術的重要性。

The vigorous development of “Nanotechnology” is attributed to the enhancement of advanced fabrication technology, atomic level manipulation and nanoscale inspection technology. Nanotechnology is the meso-scale property research in the atomic or molecular level, and strongly depends on measurement systems for analysis. In this article, the importance of nanoscale inspection technology at present is introduced through nano metrology standard, nanoscale inspection technology and the annual event.

### 一、前言

「奈米」一詞翻譯自英文 “nanometer”，前面的「nano」在希臘字義中代表侏儒的意思，而計量單位表示十億分之一 ( $10^{-9}$ )，而「奈米」的定義即為十億分之一公尺 ( $10^{-9}$  m)，相當於僅有 3 到 4 個原子的長度。顯然奈米尺寸為極為渺小而無法純粹以一般視力分辨出來，不過可想而知奈米 (nanometer) 與公尺 (meter) 的尺寸比例差異，就如同一顆玻璃彈珠大小相對於地球直徑的懸殊比例。奈米科技為研究原子、分子等級微小物質特性的科學，除了突破傳統製程技術方面的侷限之外，更需要經由嚴謹的檢測技術方面的驗證。有鑑於此，國際度量衡委員會 (CIPM) 為了建立國際間奈米計量標準的一致性，決議成立奈米計量工作小組，以進一步完成奈米計量國際比對事宜。比對活

動包含線距標準 (pitch standards)、階高標準 (step height standards)、標準尺以及線寬標準 (line-width standards) 等項目，分別由德國聯邦物理技術研究院 (PTB)、瑞士聯邦計量檢驗局 (METAS)、丹麥基本計量研究院 (DFM) 及美國國家標準與技術研究院 (NIST) 等國家標準研究機構主辦。比對活動的目的除了建立奈米計量標準促使國際間檢測結果的一致性，並促進各國標準組織品質系統與技術能力的提升，使量測追溯國際單位制中公尺的定義 (International System of Units, SI)。

國際度量衡局 (International Bureau of Weight and Measures, BIPM) 定義計量學 (metrology) 為一門涵蓋科學與技術領域的量測科學，包含各個量測不確定度評估下的實驗與理論判定。計量學的應用領域極為廣泛，主要分為三方面：(一) 計量單位、單位系統的建立、量測方法的發展、計量標

準的實現與使用端標準追溯的落實；(二) 量測科學於生產製造的應用，確保量測儀器的適用性、準確性以及品質穩定性；(三) 因應衛生保健、公共安全、環境保護、消費者權益和公平交易等議題所產生的計量需求。而計量學的核心概念為可追溯性 (traceability)，即透過追溯鏈的比對活動使得量測結果與參考標準具有關聯性，而此參考標準通常為國家標準或國際標準，追溯鏈的每一個環節具有量測不確定度 (measurement uncertainty) 評估。可追溯性可藉由持續的系統校正 (calibration) 建立，使得參考標準傳遞至量測系統。

奈米計量的追溯，除了製程技術最常使用的量測數據，如線距、線寬、階高、深寬比、膜厚、表面粗糙度、粒徑、晶界尺寸等，隨著奈米科技的蓬勃發展，奈米元件的特性與功能已日漸發展成形，奈米元件的電性、磁性、力學、熱學與光學性質等多項檢測需求逐步崛起。由奈米科技所帶動的檢測技術與量測標準需求面可預期將會是廣泛的，包含微機電產業、半導體產業、顯示器產業、精密加工產業與生物科技產業等。奈米科技的發展，需進一步經由檢測技術與量測標準進行定性、定量的鑑定，以確保產品的品質與功能。對於產業國際化的趨勢，採用共同的國際單位制 (SI units)，遵循一致的標準，對於品牌與信譽的基礎建立，其重要性則顯而易見。

## 二、奈米檢測技術簡介

隨著物質尺寸不斷縮小，其相對於體積的表面積比值變化愈大，奈米材料的表面特性具有重大的影響。相較於一般大型塊材，奈米尺寸下的物理特性及化學特性的表現有著截然不同的結果，而使用

一般傳統量測方法已不適用。量子效應的現象會隨著元件逐漸縮小而增強，電子穿隧等現象則需透過更精密的檢測技術方能進行研究。奈米科技開創了嶄新的格局，世界先進國家皆投入大筆預算與人力執行相關研究計畫。

目前國際度量衡機構進行奈米等級長度標準檢測之實驗室比對及能力試驗活動，以原子力顯微儀 (atomic force microscopy, AFM) 為主要檢測儀器設備之一。自 1981 年掃描穿隧電子顯微儀 (scanning tunneling microscopy, STM) 發明以來，其後續延伸發展的原子力顯微術，具備原子級解析度、成本相對經濟、檢測時間迅速、無樣品導電性限制、樣品無需費時處理、且不受環境條件侷限 (甚至可液面下量測) 等特性，廣泛應用於奈米科技領域的研究。兩位發明人於 1986 年連同電子顯微鏡發明人榮獲諾貝爾物理獎 (Nobel Prize for Physics)，被喻為 20 世紀最偉大的發明之一。

原子力顯微儀在電學特性的檢測分析能力具有廣泛的延伸應用，搭配使用微機電製程技術製造的精細導電探針、精密訊號處理器以及穩定回饋控制系統，得以進行奈米尺度下物質的導電性、電容值、電阻分佈、表面電位等各項電學特性檢測分析，有效運用於提升奈米元件效能的研究。

磁性材料的介觀性質 (mesoscopic properties) 與典型的巨觀性質有著迥然不同的差異，例如量子穿隧效應與超順磁等現象。生活中，奈米材料其實已廣泛應用在周遭生活中，像資訊儲存媒體、電器 IC 晶片、光通訊元件、自潔抗菌抗刮塗料及鍍膜等。而自然界，也發現磁性奈米粒子存在生物體內，如蜜蜂、蝴蝶、候鳥、甚至水中的鮭魚、海龜等，藉由地球磁場的導引辨識方向，而有自行回歸的本事，宛如生物羅盤一般神奇。

技術	特性	檢測說明
SCM	電容	AC 探針偏壓檢測載子濃度分佈
EFM	表面電位	非接觸式檢測電場梯度分佈
KPFM	表面電位	AC/DC 探針偏壓檢測 mV 等級電位分佈
CAFM	導電性	檢測電流範圍從 pA 至 $\mu$ A 導電性分佈
SECPM	電位	檢測液體介面之電雙層電位分佈
SSRM	電阻分佈	DC 探針偏壓檢測電阻分佈

表 1. 原子力顯微術於電學特性檢測的延伸應用一覽表。

對於奈米材料、奈米元件與生醫感測元件之磁場與磁矩的檢測需求，傳統的量測方法已不敷使用。隨著奈米科技的發展，陸續開發出多項先進奈米檢測技術，以合於研究發展與品質檢驗的需求。以下分別介紹其中主要的檢測技術：

- (1) 磁力顯微術 (magnetic force microscopy, MFM)：1987年由 Martin、Williams、Wickramasinghe 等人所發明，藉由掃描樣品表面形貌的過程，利用磁性探針即時量測探針與樣品表面的磁性交互作用力，取得空間中磁域分布的情形。磁性奈米元件的尺寸不斷縮小，具有奈米級空間解析度的磁力顯微術應運而生。典型磁力顯微術的解析度小至 30 nm，而目前為止最佳解析度紀錄為 18 nm。
- (2) 偏極分析掃描電子顯微鏡 (scanning electron microscope with polarization analysis, SEMPA)：此新技術經由電子束入射樣品表面產生二次電子，由於二次電子的自旋方向與樣品磁化方向有關，藉此取得表面磁域分佈影像。掃描電子顯微鏡快速成像的特性，有助於即時觀察薄膜成長與磁域變化的過程，解析度最小可達 10 nm。
- (3) 核磁共振力顯微儀 (magnetic resonance force microscopy, MRFM)：1993年由 IBM 研究團隊發展的技術，使用類似原子力顯微儀的懸臂探針結構，唯獨不同的是橫跨懸臂上的 RF 線圈會反轉原子自旋而產生磁共振，並利用雷射感測懸臂的微小振動頻率變化，檢測探針與核磁之間的磁性作用力。目前系統最佳解析度為 25 nm，遠較最佳的典型核磁共振造影設備高出 40 倍以上。
- (4) 自旋偏極掃描穿隧顯微儀 (spin-polarized scanning tunneling microscopy, SPSTM)：起源於德國 Hamburg University，系統使用極為尖銳的磁性薄膜探針，進行侷域性的區域掃描。當樣品表面的電子自旋方向與磁性探針的磁化方向一致時，此位置產生穿隧電流的機會增高，稱之為穿隧磁阻效應 (tunnel magnetoresistance, TMR)。主要應用於鐵磁性材料與反磁性材料研

究磁域界面與磁性奈米粒子的電流與熱效應等特性。

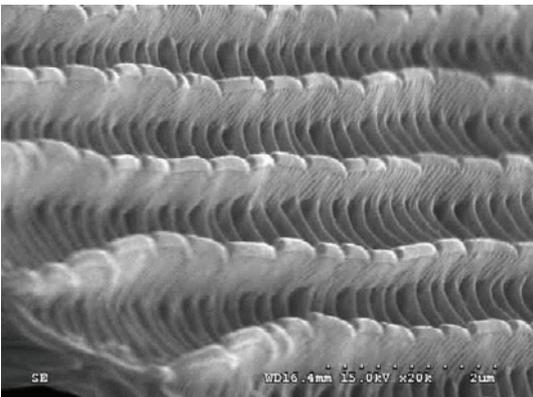
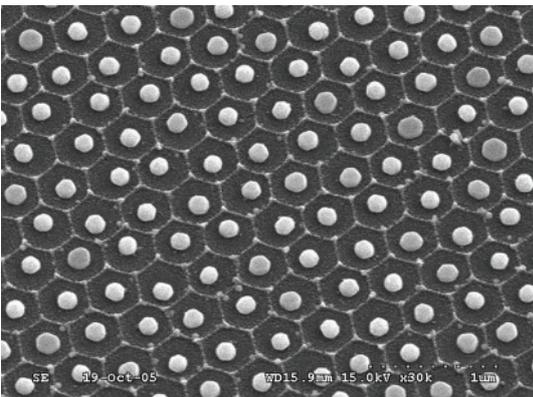
- (5) 超導量子干涉磁量儀 (superconducting quantum interference device, SQUID)：由兩個約瑟芬超導電流環所組成，使用約瑟芬穿隧效應的原理感應產生整數倍的電子對，評估磁場的變化情形，是一種能夠偵測極低磁場的感測器。由於高溫超導體的問世，使得 SQUID 能改以液態氮冷卻，節省不少成本花費。目前已廣泛應用於磁學的研究，主要量測材料磁性的微小變化。

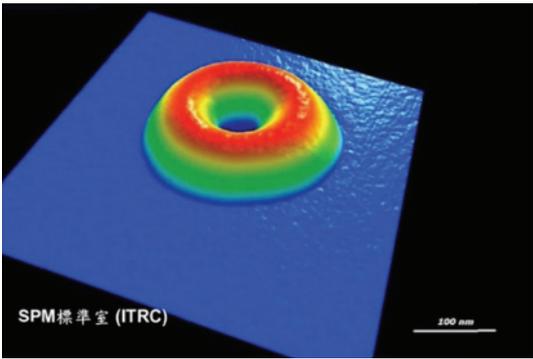
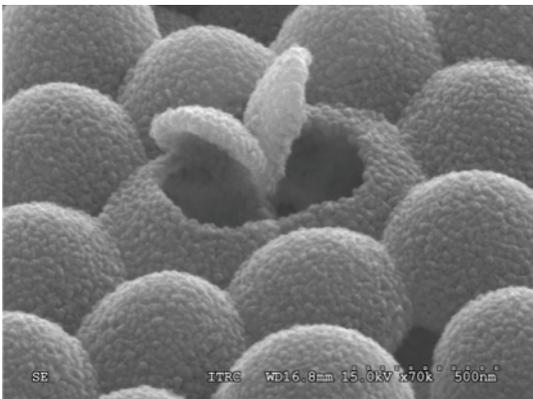
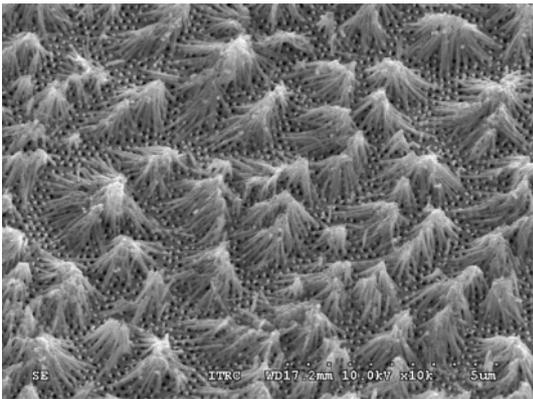
### 三、奈米檢測領域之年度盛事

「台灣奈米影像競賽」連續舉辦迄今長達 8 年時間且成果斐然，為國內奈米檢測分析界之年度盛事，主辦單位包括國家科學委員會奈米科技人才培育計畫、國立臺灣大學奈米機電系統研究中心、明志科技大學等單位。參與奈米影像競賽不僅可以充分發揮檢測分析技術能力，並且可以展現前瞻研究成果。舉辦競賽的主要目的，是鼓勵從事奈米科技之產、學、研各界，將最新研究發展或產品開發的相關成果透過精湛的影像解析技術，讓一般大眾更容易瞭解奈米科技。此外，也可以進一步激發民眾對奈米科技的興趣，培養追求科學的精神、態度與能力。影像競賽的組別分為掃描式電子顯微鏡 (SEM) 影像組、穿透式電子顯微鏡 (TEM) 影像組、及掃描探針顯微鏡 (SPM) 影像組進行競賽，歷屆參賽作品總數屢創新高 (2011 年達到 300 餘件)，獲獎難度不斷提高，競爭相當激烈。

國家實驗研究院儀器科技研究中心為我國儀器科技研究的重鎮，長年以來為因應國家科技發展政策、產業昇級之使命，積極投入奈米科技與微機電系統之研究。儀科中心擁有先進的製程檢測設備與研發能量，對於儀器微型化、關鍵零組件開發、以及支援國內外產官學研各界之委託研究，具備強而有力的競爭優勢。藉由歷屆奈米影像競賽獲獎，更能提升儀科中心於國內奈米科技領域之製程檢測分析技術的能見度。

表 2. 國研院儀器科技研究中心於「台灣奈米影像競賽」歷年得獎作品。

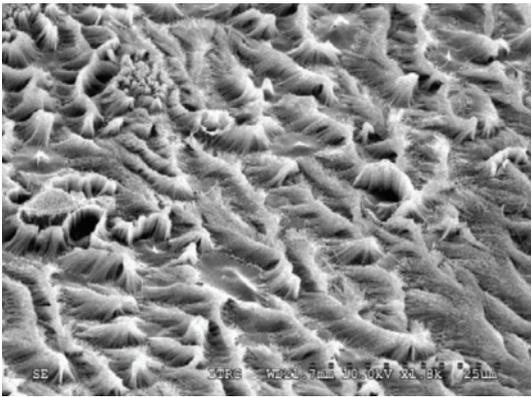
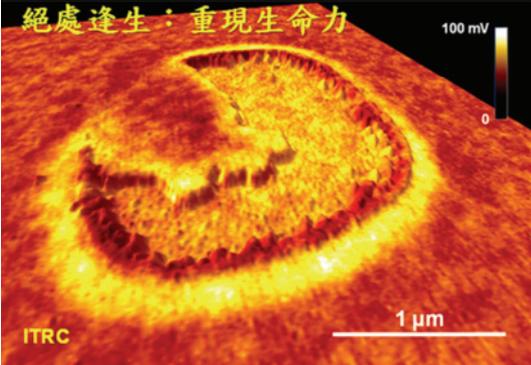
得獎作品	年度	名次	作者
 <p data-bbox="341 754 587 786">『光子晶體奈米薄殼』</p> <p data-bbox="183 790 746 822">Nanoscale Shell-like Structures of Photonic Crystals</p>	97 年	佳作	朱念南、柯志忠、游智傑、吳振勇
<p data-bbox="769 367 1414 696">圖中的三維結構是以原子層沉積技術 (atomic layer deposition) 製作的光子晶體奈米薄殼，利用蝴蝶鱗粉作為奈米模板 (nano templates)，於鱗粉表面鍍製氧化鋁薄膜，再以高溫 800 °C 移除有機體，即可得到結構完整的奈米薄殼，此類仿生結構具有複雜三維組織，充分顯示原子層沉積技術高階梯覆蓋特性於此類應用的優勢，且特別適合高深寬比與複雜型態之表面鍍膜。於實驗觀察結果發現，薄殼結構因熱應力產生撓曲變形，產生有如玉米形狀的結構，令人讚嘆巧合之美。</p>			
 <p data-bbox="261 1283 668 1314">『原子層沉積技術製作之薄殼結構』</p> <p data-bbox="205 1319 724 1386">Ultra-thin Shell-like Structures by Atomic Layer Deposition Technology</p>	97 年	佳作	柯志忠、游智傑、朱念南、吳振勇
<p data-bbox="769 891 1414 1182">本實驗進行複製仿生結構的研究，利用原子層沉積技術 (atomic layer deposition)，於高分子奈米模板表面鍍製氧化鋁薄膜，再以高溫 800 °C 移除有機體，即可得到如圖中的複雜三維結構，傳統製程無法於複雜表面或三維結構表面均勻覆蓋薄膜，所以仿生結構方面的研究，往往受侷限，因原子層沉積技術能克服高複雜表面鍍膜問題，故可得到如圖中的薄殼結構，藉此可印證低溫製程特性與高階梯覆蓋率等特性。</p>			
 <p data-bbox="296 1852 632 1883">『開心農場 一個蘿蔔一個坑』</p> <p data-bbox="180 1888 751 1951">Happy Farm: Regular Distribution Just Like a Carrot in Each Pit</p>	98 年	第一名	柯志忠、李昭德、蕭健男
<p data-bbox="769 1458 1414 1935">本實驗結合奈米球模板技術 (nanosphere lithography)、旋鍍法與薄膜沉積技術，製備新穎奈米微結構。先以聚苯乙烯奈米球鋪排於 Si 基板上，再使用 NiO 溶液進行旋鍍法並加熱至 350 °C 移除奈米球，形成連續蜂巢狀結構作為農場場地；隨後鍍製 Au 或 Ag 金屬薄膜，再進行 1050 °C 高溫熱處理，則在蜂巢狀結構內形成奈米尺寸之金屬顆粒，如同散佈於農場上之農作物。顆粒尺寸如同農作物健康度影響，因而略有所不同。傳統奈米球模板技術主要是將奈米球作為遮罩及利用其最密堆積特性，成長奈米顆粒陣列。本實驗製備新穎奈米微結構，將金屬奈米顆粒各自局限於單一蜂窩狀微結構內，並維持週期性陣列排列，提供未來開發奈米微結構之參考。</p>			

得獎作品	年度	名次	作者
 <p data-bbox="213 591 363 613">SPM標準室 (ITRC)</p> <p data-bbox="635 600 676 613">100 nm</p> <p data-bbox="300 667 628 734">『奈米甜甜圈』 What a Delicious Nano Donut!</p>	98年	第二名	蘇健穎
 <p data-bbox="229 1160 699 1182">SE ITRC Wd16.8mm 15.0kV x70k 500nm</p> <p data-bbox="363 1214 564 1281">『挖空心思』 Rack One's Brains</p>	99年	第一名	朱念南、柯志忠
 <p data-bbox="229 1697 699 1720">SE ITRC Wd17.2mm 10.0kV x10k 5um</p> <p data-bbox="405 1751 523 1818">『堆穗』 Harvesting</p>	99年	第三名	林峻霆、黃茂榕、陳世佳、朱念南、蕭銘華

「奈米甜甜圈」使用氣相合成法於 1000 °C 爐管中成長氧化鋅 (ZnO) 環狀微結構，影像中奈米甜甜圈外徑達 320 nm，內徑小至 60 nm，而高度達 72 nm。由於 ZnO 為一種寬能帶半導體材料，因此可廣泛應用於發光材料、透明導電薄膜、氣體偵測器及場發射元件等。此影像取得耗時5天，由於此樣品 ZnO 環狀微結構密度極低 (2-5/100 mm<sup>2</sup>)，使用一般研究型原子力顯微儀尋找特定形狀自然耗費時間。目標終於定位後，以高解析進行 (500 × 500) nm 影像掃描，掃描頻率微調小於 0.8 Hz，以清楚呈現 ZnO 環狀微結構表面細緻形貌，並有助於探討成長參數對於 ZnO 環狀微結構表面粗糙度的影響。

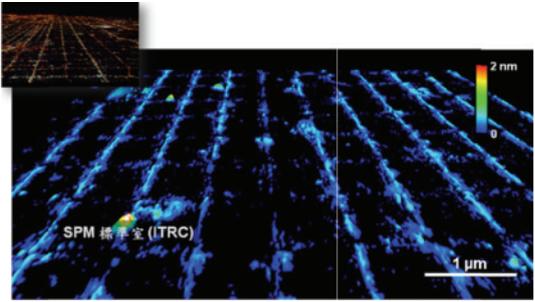
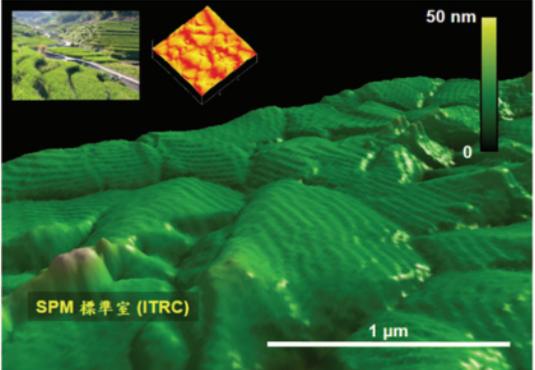
本實驗係利用聚苯乙烯奈米球作為模版，輔以原子層沉積技術 (atomic layer deposition)，將氧化鈦成長在奈米球表面，由於氧化鈦具有島狀成長 (island growth) 趨勢，所以會先在奈米球表面形成奈米顆粒進而成膜，待高溫環境下將聚苯乙烯燒掉即形成氧化鈦奈米球殼，本作品試片具有週期陣列結構可應用於光子晶體等領域。此張照片隱含著“挖空心思”之比喻。

本作品為在矽基材 (100) 上利用聚乙烯球為遮罩進行金屬輔助觸媒蝕刻 (metal assisted catalytic etching) 過程當中，過蝕刻的結果。原本垂直於基材的矽奈米柱陣列因為表面張力自然傾倒，且有規律地聚集成奈米堆穗，展現出一幅奈米尺度的農村風光。

得獎作品	年度	名次	作者
 <p data-bbox="263 705 667 772">『注意!! 奈米浪潮襲來』 Beware!! Here Comes the Nano Tide.</p>	99 年	佳作	黃茂榕、朱念南、蕭銘華
 <p data-bbox="204 1205 726 1310">『絕處逢生：重現生命力』 Rescued From Desperation: The Strength of Life Reappears.</p>	100 年	第二名	蘇健穎、許鈺宗教授研究團隊

本作品由寬度 100 nm 高度 3 mm 之矽奈米線所組成，製程由奈米球微影與觸媒蝕刻技術達成。奈米球微影用於定義線寬，觸媒蝕刻技術用於獲得高深寬比結構，當蝕刻完成後奈米線相互吸引緊靠，並朝著特定方向倒塌，形成如怒濤駭浪般的特殊景象，與近年衝擊全世界的奈米熱潮相互呼應，如此氣勢磅礴、震撼人心地影響了整個學術界乃至所有人的生活。

猶如決堤一瞬間“凝結畫面”，此為高解析表面電位顯微術 (scanning kelvin probe microscopy, SKPM) 影像，影像除了呈現表面形貌高低起伏之外，並且渲染 (render) 相對應的表面電位高低色階，其中色階亮度代表該處表面電位的高低程度。影像中心近似凹槽部分為 p-type 半導體，其周圍經黃光微影、10 keV 離子佈植及 950 °C 高溫退火形成 p-n 接面結構，其中相接鄰的亮環到暗環代表電子由 n-region 擴散到 p-region 與電洞結合形成負離子區 (暗環)，而其原處則形成正離子區 (亮環)，影像清楚呈現兩區空間電荷 (space charge) 的分佈範圍 (depletion region)，電位屏障有效阻絕載子進一步“入侵”。SKPM 為典型 Kelvin probe 於奈米科技領域的延伸應用，採用非接觸式極近距離的方式進行檢測，應用針尖與樣品表面間施加交流電壓與直流電壓，經由鎖相放大器取得樣品表面電位與功函數的侷域分佈資訊，取得此影像的設定量測距離小至 10 nm。此次使用一般研究型 SKPM 搜尋特定結構的表面電位影像困難度高。相對於電子束誘發電流儀 (Electron Beam Induced Current, EBIC) 量測表面電位，SKPM 具有良好的空間解析與定量檢測能力。

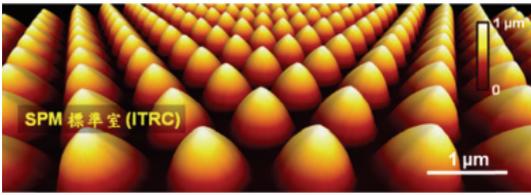
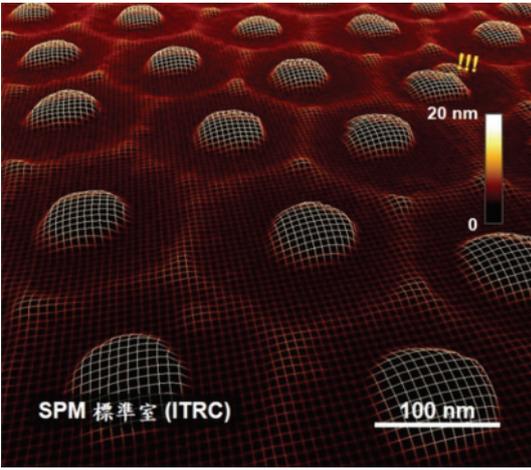
得獎作品	年度	名次	作者
 <p data-bbox="331 633 518 701">『大崩壞』 The Big Collapse</p>	100 年	佳作	林峻霆、朱念南、張展豪、林鶴南
 <p data-bbox="167 1059 683 1093">『放大10億倍：星空下的洛杉磯大都會夜景』</p>	101 年	佳作	蘇健穎、蕭銘華
 <p data-bbox="159 1870 694 1971">『重現台灣風光明媚之三芝鄉水梯田』 The reappearance of the beautiful Taiwan terraced fields in Sanzhi District</p>	102 年	金牌	蘇健穎、楊富翔、蕭銘華、蕭健男、葉哲良

本作品為氟錫氧化物基材上以化學氣相沉積法成長氧化鋅奈米線 (ZnO NWs) 過度成長的結果。ZnO NWs 不規則地雜亂分布在基材上，好似訴說著海嘯過後的大崩壞。大世界的無常這一刻在奈米世界中被記錄了下來。

洛杉磯擁有世界十大最迷人的夜景之一，登高俯瞰幅員遼闊的洛杉磯大都會區，夜間閃爍的燈光和別具特色的建築瞬間印入眼簾。據傳美國著名的國際太空站執行例行空拍任務時無意間拍攝到洛杉磯美麗的夜景，當中燈光最閃耀之處就是好萊塢和洛杉磯國際機場。洛杉磯的建築本身層次分明極具立體感官效果，景色匠心獨具，星空下燈光投射的效果，把洛杉磯的夜景襯託的更加璀璨迷人。如同洛杉磯的夜生活般多采多姿也是世界首屈一指，絕頂的大型百老匯歌舞劇演出 (Broadway Show) 以及最時尚的聚會活動，點綴出美麗的城市精華。著名的好萊塢 (Hollywood) 和迪斯尼樂園 (Disneyland Park) 都座落在這個加州最大的城市。

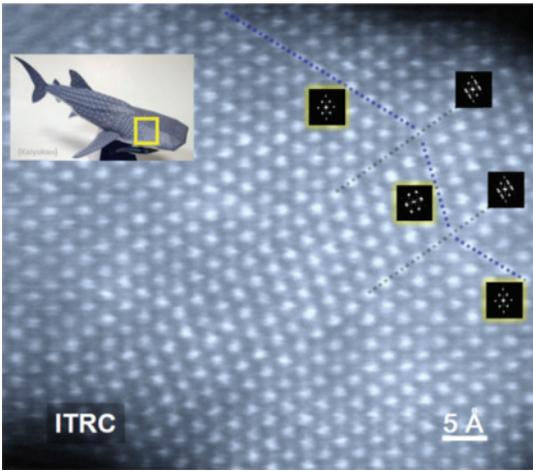
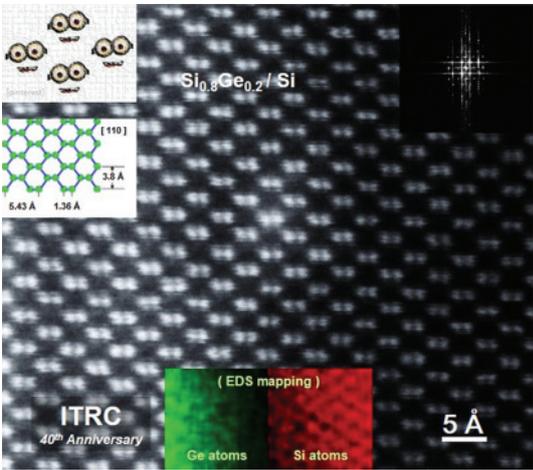
精密檢測儀器必須定期執行追溯校正，以確保量測結果的準確性以及公信力。其中最重要的參考物質 (reference material, RM) 即為傳遞標準件 (traceable standards)，可藉此達成與國際度量衡機構量測結果呈現一致性的目的。此高倍率傳遞標準件影像為歷史悠久的高級石英基板 (Rq = 0.1 nm) 週期性的金 (Au) 薄膜微結構，而定期送校更可有效管控標準件本身的品質和量測數據，進一步提升實驗室的公正性與公信力！

三芝鄉 (舊稱小基隆) 特有的水梯田風光，記錄著先民開天闢地的艱辛與智慧，是台灣最廣闊的梯田區，也是台灣保育類珍貴稀有的台北赤蛙棲息地。遙望三芝鄉群峰山頭，猶如一條接著一條蜿蜒盤纏而上的綠色巨龍，綿延不斷的優美景色，最為開闊壯麗！此高倍率影像實為五環素 (pentacene) 多層奈米結構，具備載子遷移率高的特性，廣泛應用於光電半導體的研製。而使用一般研究型原子力顯微儀取得特定影像自然耗費時間，影像經過重新渲染並且調和相對應的高度色階，仔細呈現平均階高小至 (1 - 2) nm 多層奈米結構的分佈情形。

得獎作品	年度	名次	作者
 <p data-bbox="263 495 670 562">『冰原歷險記：鼠奎特的夢幻寶庫』 Ice Age : Scrat's dream treasury</p>	102 年	銀牌	蘇健穎、蕭銘華、蕭健男、陳峰志
 <p data-bbox="172 1355 758 1458">『就是愛玩躲貓貓：前瞻奈米球微影技術』 Just love playing hide and seek: Advanced nanosphere lithography technology</p>	103 年	銀牌	蘇健穎、柯志忠、蕭銘華、蕭健男 陳峰志、葉哲良

鼠奎特 (Scrat) 是家喻戶曉、電影不可或缺的串場角色，瘋狂追逐著一顆如寶石般稀有的“橡果”(Acorn)，歇斯底里的瘋狂行徑令人不禁爆笑，這一追也追了整整 10 年的時間。如今傳奇裡層出現一種電致發光體 (electroluminescent, EL)，其配方簡單、驅動能量低、反應速度快、可視角度大、具可撓曲 (flexible) 變形的魔力。到底是什麼祕方讓它這般耀眼迷人？讓我們用經典的 AFM (atomic force microscope) 邁力看下去，一層一層又一層抽絲剝繭去...，原來其中的奧妙就在裡面...，埋藏著千軍萬馬之勢的微結構陣列，瞬間統計密度遠超過  $100,000/\text{mm}^2$ 。以發光波長 (400–550) nm 研判，計算光萃取 (light extraction efficiency) 最高可大幅提升 40% 以上。驚！原來啊...這就是我們苦苦追尋的「鼠奎特的夢幻寶庫」！

奈米球微影技術 (nanosphere lithography)，有別於價格昂貴的電子束微影技術 (e-beam lithography) 或聚焦離子束 (focused ion beam) 微影技術，更具有經濟、快速、均勻、大面積、超高密度等優勢，可應用於場發射元件、發光元件增益、表面電漿共振的相關研究。於矽晶或矽鍍材料表面研製大面積、自組裝 (self-assembly) 單層規則排列的聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 奈米球陣列結構模板 (template)，即形成所謂的六方最密堆積 (hexagonal closed-packed) 結構。接續製鍍一層功能性薄膜後進行不同程度的熱退火處理，成為均勻的二維週期性排列「奈米點陣列」。此 AFM 影像為金 (Au) 的奈米結晶陣列，於此利用網格方式進行統計分析，其中金的濺鍍時間控制為 60 秒，並以  $1050\text{ }^\circ\text{C}$  進行熱退火處理 1 小時。運用奈米球半徑分別為 (100, 50, 25) nm 可獲得奈米結晶高度分別為 (15, 8, 4) nm。由於此陣列結構均勻性極佳，要特別找出有額外的奈米結晶”躲藏”在其中，使用一般研究型 AFM 取像過程耗時而且難度相當高！您也抓住它了嗎？

得獎作品	年度	名次	作者
 <p data-bbox="193 779 738 880">『驚見傳說中的繁星斑紋鯨鯊：雙晶原子結構』 Surprisingly meeting the legendary bright star-like spotted whale shark : The atomic structure of twins</p>	103 年	金牌	蕭健男、蘇健穎、蕭銘華、陳峰志、葉哲良
 <p data-bbox="220 1626 715 1760">『小小兵 (Minions) 軍團：Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> / Si 界面原子結構』 The army of Minions: The atomic structure of Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub> / Si interface</p>	104 年	金牌	蕭健男、蘇健穎、蕭銘華、陳峰志、葉哲良

歷經一甲子 60 年的發展，結合高速電腦及超高靈敏度 CCD 偵測器的輔助，大幅推昇「這項特定技術」的實現，得以揭開“原子”真實樣貌的神秘面紗。相較於傳統繞射對比及相位對比成像，「這項特定技術」更適合確定原子排列位置及電子斷層掃描的研究。需於特別設計建造的環境，控制十餘項管制條件同時達到標準，方有機會達成「直接觀察原子」的目的。本影像運用「這項特定技術」，清楚呈現金鈹奈米雙金屬粒子 (Au-Pd bi-metallic NPs) 雙晶原子結構及其雙晶界面位置之五階像差修正高角度環場暗視野影像 (HAADF)。除了以直接原子影像取代傳統結晶學分析雙晶結構使用之電子繞射與軸角對 (axis-angle pairs) 計算方法外，其成像過程必須於嚴苛穩定環境中依序調整掃描電子探束、DCOR 像差修正器、最佳化像差係數組合等多道校正程序，方能取得此 14,500,000 倍原子影像，經精密調校之系統點解析度 (point resolution) 達 0.78 Å，成像難度極高。「這項特定技術」原來就是傳聞中配備 DCOR 之「像差修正掃描穿透式電子顯微鏡 (aberration-corrected STEM)」。此雙晶原子結構影像讓人不經聯想到傳說中的繁星斑紋鯨鯊，令人讚嘆自然界神奇的巧合!

由於放大倍率的關係，這是一幀綿延不絕的圖紋，猶如即將上映的電影中數不盡卻排列整齊的小小兵 (Minions) 軍團，團結逗趣的模樣總是令人不禁莞爾! 本影像以配備先進 DCOR 像差修正器之高解析掃描穿透式電子顯微鏡 (scanning transmission electron microscope, STEM) 進行分子束磊晶 Si<sub>0.8</sub>Ge<sub>0.2</sub>/Si 界面之 (111) 平面 [110] 方向原子結構高角度環場暗視野 (HAADF) 影像分析，其中啞鈴狀結構 (dumbbell) 之原子間距僅 1.36 Å。HAADF 影像分析除了呈現真實原子柱位置與原子序對比 (Z-contrast) 之外，並可經由能量分散光譜儀同步取得化學元素原子分布影像 (atomic EDS mapping)。取像過程必須於嚴苛穩定的環境中依序執行掃描電子探束、DCOR 像差修正器、像差係數組合最佳化等多道校正程序，方有機會取得此 14,500,000 超高倍率原子影像，此外精密調校之系統點解析度 (point resolution) 高達 0.78 Å，成像難度由此可知。

## 四、結論與未來展望

奈米檢測技術對於增進奈米材料及奈米元件的物理特性或化學特性的瞭解，已大幅超越傳統量測技術的極限，與奈米科技的發展具有深遠的影響。透過先進的奈米檢測技術取得準確的資訊，用以判斷材料或元件特性、功能及效率等性質，進而開發創新的產品，以期改善人類生活品質。國家實驗研究院儀器科技研究中心，成立至今 40 餘年以來，已深植相關儀器技術開發能力，為國內科技發展奠定厚實的基礎。長年來，儀科中心更積極整合光電系統、真空與薄膜等各項技術，並跨越奈米科技與微機電系統領域，開發各項創新的製程檢測分析技術，提供產官學研各界技術服務，滿足相關研發工作的需求。

## 誌謝

感謝科技部提供本研究之計畫經費 (計畫編號: MOST 104-2622-E-492-024 -CC2)。

## 參考文獻

1. 方維倫等作者,「奈米檢測技術」,國研院儀器科技研究中心 (2009).
2. 丁志明,方維倫等作者,「微機電系統技術與應用」,國研院儀器科技研究中心 (2003).
3. 陳力俊,張立,梁鉅銘,林文台,楊哲人,鄭晃忠,「材料電子顯微鏡學」,國研院儀器科技研究中心 (1994).
4. 「儀器總覽」,國研院儀器科技研究中心 (1998).
5. 張立德,牟季美,「奈米材料和奈米結構」,滄海書局 (2002).
6. 財團法人工業技術研究院,「奈米科技與檢測技術」,全華科技圖書公司 (2003).
7. G. Binnig and H. Rohrer, *Rev. Mod. Phys.*, **59**, 615 (1987).
8. Z. W. Liu, H. Lee, Y. Xiong, C. Sun, and X. Zhang, *Science*, **315**, 1686 (2007).
9. Y. Naitou, H. Arimura, N. Kitano et al., *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 012112 (2008).
10. O. Renata, O. Andrej, *FUEL*, **90**, 3123 (2011).
11. Y. Z. Zhi, H. G. Jin, *Mat. Lett.*, **65**, 3234 (2011).
12. N. Ziani, G. Piovano, F. Cavaliere et al., *Phys. Rev. B*, **84**, 155423 (2011).
13. A. Olson, A. Bacon, Y. Sosa et al., *J. Phys. Chem. A*, **115**, 11001 (2011).
14. M. Rahirni, R. Mikkelsen, *Anal. Chem.*, **83**, 7555 (2011).
15. 台灣奈米影像競賽歷屆成績公告 (2007-2015).



蘇健穎先生為國立交通大學博士候選人，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

James Su is a Ph.D. candidate at National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



朱念南現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理技術師。

Nian-Nan Chu is currently an assistant technologist at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蕭銘華先生為國立中興大學材料科學與工程學博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心生醫平台與育成組副組長。

Ming-Hua Shiao received his Ph.D. in material science and engineering from National Chung Hsing University. He is currently a deputy division director of biomedical platform and incubation services division at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蕭健男先生為國立台灣大學材料科學與工程學博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心真空設備技術組組長。

Chien-Nan Hsiao received his Ph.D. in material science and engineering from National Taiwan University. He is currently a division director of vacuum equipment technology at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



陳峰志先生為國立成功大學機械工程學博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心代理主任。

Fong-Zhi Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from National Cheng Kung University. He is currently the Acting Director General at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.