

# 奈米尺度量測儀器「原子力顯微鏡」簡介

標準檢驗局台南分局 方技士冠權

## 一、 前言：

隨著科技發展日新月異，現今衡量一個國家的強弱、經濟貿易的盛衰，人民生活水準的高低，莫不與計量科技發展息息相關，而計量本身也是整個先進科技的前端技術。就「計量學」(Metrology)或稱「度量衡學」而言，計量係為各類學門、領域之基礎科學，由此可知國家整體科技發展有賴於整個研發和品管的前端技術－計量科技的成熟發展。

在高科技之微電子時代中，計量學之工業計量所扮演的角色及其應用日益彰顯，如奈米計劃中對於微小物體之表面特性及其結構之量測，則需有較精密之儀器及科技能力才能達成。目前計量型之精密量測儀器有原子力顯微鏡 (AFM)、掃描式穿隧顯微鏡 (STM) 及近場光學顯微鏡 (NFOM) 等儀器的發明，可直接量測獲得材料表面結構、階高、電性及光學性質等關鍵性訊息及數據。目前在工業及企業活動中各種高精度計量應用以原子力顯微術為主流，因其除可進行奈米等級的表面形貌量測分析外，亦可運用於奈米元件的開發。

本文將針對原子力顯微鏡工作原理及應用領域作粗淺的介紹，並提出原子力顯微鏡於當前高精度產業未來之應用方向。

## 二、 原子力顯微鏡工作原理：

原子力顯微鏡 (Atomic Force Microscopy, AFM)是由IBM公司的Binnig與史丹佛大學的Quate於一九八五年所開發，其目的是為了使非導體也可用掃描式顯微鏡觀測。AFM是以一根微細探針在工作表面上進行掃描，探針與工件間的交互作用力會隨著表面粗糙高低情形變化，藉由電腦迴饋控制線路及超精密的電子機械技術，以得到工件之奈米級解析度表面特性。原子力顯微術由於其能取得樣品表面形狀至原子解析度，並且適用於各種材料，不像掃描穿隧顯微鏡 (STM) 受限於導電材質，因此已成為掃描探針顯微術中最重要技術，尤其對於傳統掃描電子顯微鏡無法清楚解析之工件更是最佳檢測工具。AFM作動原理示意圖(如圖一所示)，由上方入射雷射光來量測探針之支持懸臂的變形量，再將它反射到光強度探測器 (Split-diode photo-detector) 經由訊號轉換而來求得其表面狀態。

AFM量測係利用探針針尖與工件表面少數原子之間的作用力(凡得瓦爾力)為作動基礎，當探針原子與工件表面原子距離較遠時，原子間呈現相互吸引的狀態，然而在兩者接近至某一程度時，因原子外圍電子互相排斥作用使得原先之吸引力逐漸被抵消，使得探針原子與工件表面原子兩者間作用力變成排斥力。在

AFM 的系統中，即利用微小探針與待測物之間交互作用力，來呈現待測物的表面之物理特性。

AFM 依作動模式可區分成接觸式、非接觸式及介於兩者之間的輕拍式等三種型式，其作動原理分述如下：

(1) 接觸式模式：

通常探針與工件表面原子的距離約為幾個埃 ( $\text{\AA}$ )，由於排斥力對於距離比較敏感，因此可以得到較高的解析度。此模式可以將探針與工件之間的作用力分成定力式與可變式兩種，其中定力式的原理是將探針隨時與工件保持在一固定的高度距離掃描，而為了保持這種固定的高度距離，支撐工件的壓電材料平台將會進行不同的伸縮運動，再由壓電材料的伸縮電壓值轉換成工件表面的高低資料，同時利用迴授系統調整探針高低；另一種可變式作用力的掃描是將迴授系統關閉，不調整探針的高低，因此在掃描時由於工件表面的高低起伏，使得探針與工件間的距離隨時會有變化，因而直接影響到懸臂樑的偏移量，再經由光強度偵測器將雷射光訊號轉換成工件表面的高低資料。這種模式的探針與工件之間的由於量測過程中會與工件表面接觸，對於較軟的工件（如高分子材料）有可能會破壞到工件表面，因此不適用於軟質材料的工件。

(2) 非接觸式模式：

探針與工件表面保持著數十埃的距離，利用共振頻率來驅動探針懸臂樑，掃描過程中，由於探針與工件表面作用力的改變會使得懸臂樑的共振頻率隨之變化，再藉由比較驅動頻率與光強度偵測器所偵測到的頻率轉換成工件表面高低資料，量測過程中不會與工件直接接觸，因此不會傷及工件表面，但缺點是解析度較前者作動模式來得差。

(3) 輕拍式模式：

此方式為改良非接觸式方法將探針與試件距離拉近，增加振幅，因為工件表面的高低起伏會使得振幅改變，而後利用非接觸式的偵測方式便可取得影像。輕拍式的解析度介於接觸式與非接觸式之間，使得破壞試件表面的機率大為減少，但在高頻率敲擊工件表面容易損及探針尖端是其缺點。

### 三、 原子力顯微鏡的應用：

由於微電子元件日趨精密微小，量測的精確度變得相當重要。掃描探針顯微鏡 (Scanning Probe Microscopes；SPM) 因為可提供適當的奈米級量測，因而確保製造部門嚴格的品質控制與成本的降低。在目前 SPM 之應用領域中，又以 AFM 之使用為主流，利用該量測儀器觀察材料的三維微觀形貌可以達到奈米級和埃級的分辨率，其應用範圍從半導體工業到細胞生物學領域十分廣泛。然而，除了形貌成像之外，AFM 也能夠探測樣品表面機械性質和其他基本性質，包括材料的定域黏附力或彈力（柔性）等性質。微觀黏附性能夠對許多物質產生影響，從油漆、膠水、陶瓷和複合材料的性質，到 DNA 的複製和藥物在人體中的作用。彈

力性質也同樣很重要，經常影響從複合材料到血細胞體系的結構和動力性質。因此，量測 AFM 探針尖在接近和離開表面過程之作用力大小，恰好可提供在微米到奈米尺度上研究這些重要參數一個新的工具。

AFM 作為形貌量測及其圖譜工具已經得到了相當廣泛的應用。現在 AFM 量測已經可以提供原子和分子尺度相互作用以及奈米尺度黏附和彈力性質的信息。這些測量正在改變我們定量觀察方式，對於我們考慮化學、生物、物理世界的微觀相互作用提供了前所未有的實驗基礎。AFM 測量準確性、重複性和簡易性正在不斷增強，以下便針對 AFM 的未來應用方向作一歸納：

1. 超高密度儲存系統之發展：利用探針型顯微鏡記錄資料，選擇不同交互作用方式會影響資料密度，希望利用微小的探針尖端儲存資料，以期把儲存系統的密度推進到原子級的世界。這種奈米級的資料儲存技術應用在高密度大容量儲存系統之市場潛力頗大，這個新產品可較目前市場上的一般光碟機儲存容量大，單面記錄容量超過 20Gbytes，且記錄密度可達 12Gbits/inch<sup>2</sup>，全球高密度、大容量資訊儲存系統將可被開發出來。
2. 量測技術將朝更高解析系統發展：AFM 可作為半導體之晶圓檢測工具時，可提供達到水平或垂直尺寸 1nm 之解析度；美國 IBM 正致力於這方面的研發，希望能將量測解析度提高到 2pm，此外藉助電腦影像法則亦可改善解析度之表現。
3. 奈米機器的開發：AFM 的探針可能不只 1 根，可能會 2 根、3 根地增加。那麼一來，將可進行更高度的操作。數十年後如果奈米機器因奈米技術的發展而問世，那時將可看到原子操作技術以今天無法相比的情況突飛猛進。

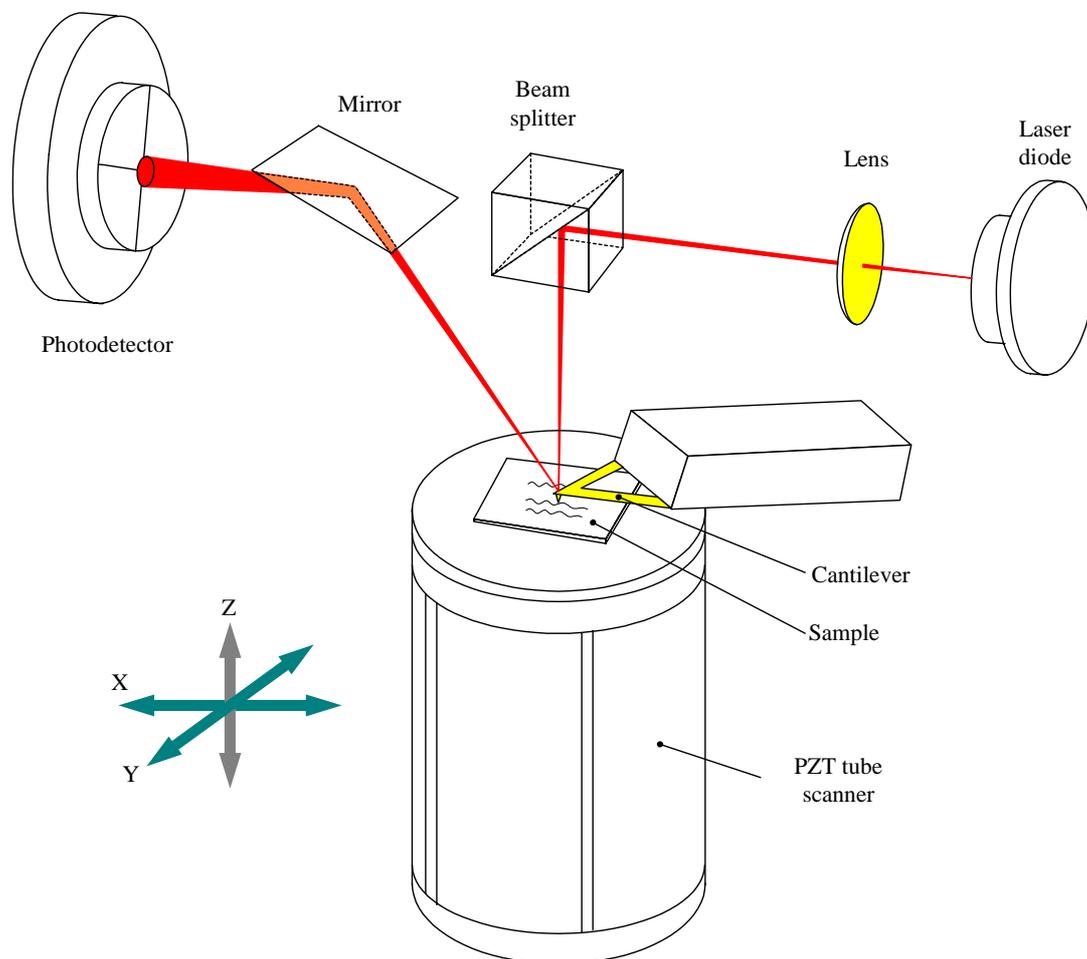
#### 四、 結論：

目前我國正在致力推動「奈米國家型科技計劃」，這研究計劃係由國科會、中研院、工研院、經濟部、教育部、原子能委員會及環保署等機構共同推動之跨部會大型計劃，計劃目標為整合我國奈米科技相關研究上、中、下游之研究人力與技術資源，並結合產業界的力量，以期加速奈米科技之產業化。為配合高精密工業製程之需求，開發出更精密量測技術才能有效協助高科技產業的發展。AFM 除了可以提供奈米精度的定量量測外，其量測的環境可不必侷限於真空的環境中，可直接在大氣中或者在液相中進行量測，因為這兩項的特點使其應用性就更加的廣泛了。同時，更換具剛性的 AFM 探針亦可直接於工件上進行奈米加工，進而開發出各種奈米元件。由此可知，AFM 勢必將成為未來奈米科技中，奈米尺度定量量測與定量加工一個非常精密的量測儀器並兼具工具機的功能。

#### 參考文獻：

1. ”量測不確定度評估理論與實務”，工業技術研究院量測技術發展中心，2001.
2. 白春禮，田方單克，“掃描力顯微術”，中國科學出版社，2000.

3. 方得華, "原子力顯微鏡奈米加工技術研究", 國立成功大學機械工程研究所博士論文, 2000.



圖一 原子力顯微鏡作動原理示意圖[節錄於參考文獻 3.]