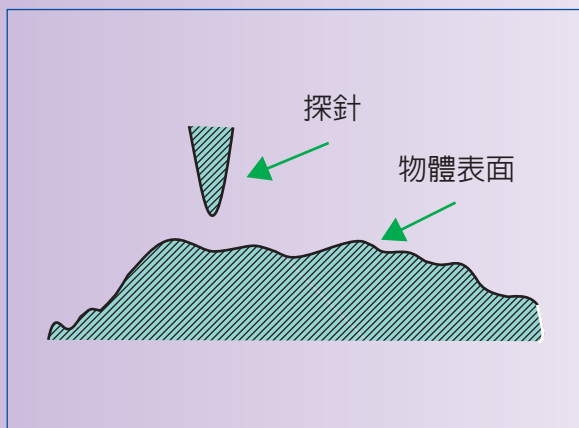


探針底下的奈米世界

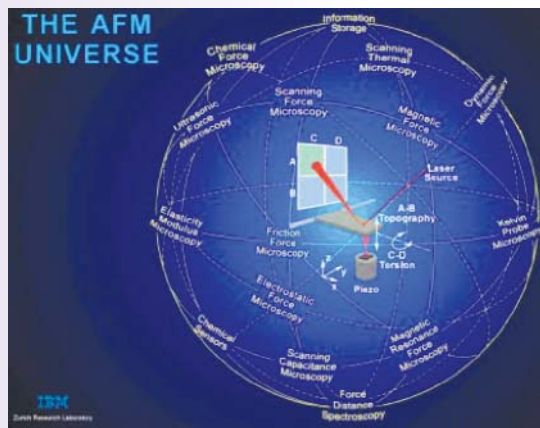
在人類肉眼不能觀察的微小世界裡，有太多太多令人想像不到的世界。幾個微米的細胞或更小的奈米結構中存在著各種新奇的現象。爲了觀察這些微小世界的現象，人類發展了各式的工具，於是在三百多年前虎克發明光學顯微鏡。當然我們熟知的這些顯微鏡得到的往往只有二維的平面影像，而且是在很難達到微米尺度以下的解析，光學顯微鏡即是受限於光學繞射的因素，不能看到可見光以下（ ~ 0.5 微米）的解析。特別是要觀察微米等級以下之物體表面形貌，現有的工具常顯得能力不足。如果要更進一步分析微米等級以下之物體表面的物理與化學性質，就更是難上加難。

掃描探針顯微鏡的誕生

爲了解決上述的困難，於是有人想到一種很直覺而簡單的方法，就是拿一支很尖的探針在表面上方一固定高度的位置做來回掃描（圖一），同時記錄探針行走的軌跡就可以繪出一幅類似三維的表面形貌影像，這是一般顯微鏡所不能做到的。自然地，如果探針的針頭越尖，可以得到的橫向解析就越高。於是利用這種探針在表面掃描爲機制的新型顯微鏡就誕生了，它被稱爲掃描探針顯微鏡(Scanning Probe Microscope，簡稱SPM)。SPM是一個總稱，它包含數十種以上之各類以探針爲基本



圖一 探針在表面上掃描

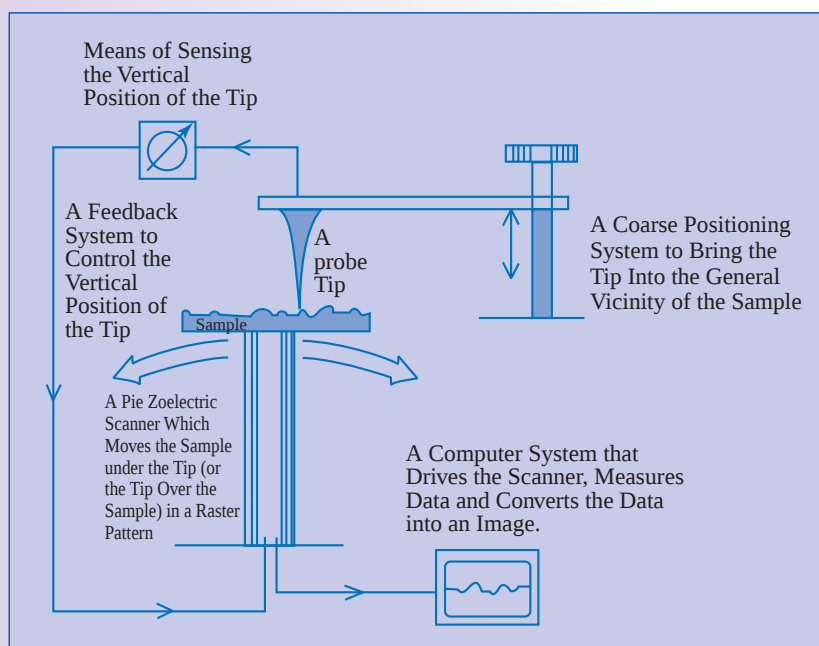


圖二 各式以掃描探針為基本原理的顯微鏡

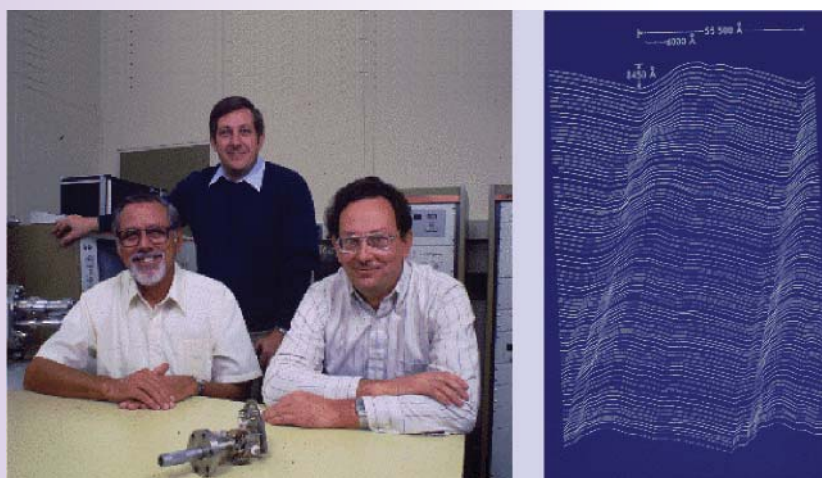
操作原理的表面分析工具（圖二）。

SPM的原始構想非常簡單，就是利用探針與物體表面的物理交互作用來描繪物體表面的形貌。這裡所說的交互作用可以是接觸力、凡得瓦爾力、電流、光強度等等。通常交互作用的大小會隨探針與物體表面的距離而變化。只要讓探針順著表面掃描時維持固定大小的交互作用，就是維持固定高度的掃描。因此探針行走的軌跡就是物體表面的形貌（圖三）。為達到這個設計必須有一個可以控制探針在空間位置的制動裝置（通常是一中空圓柱形的壓電材料）及一個偵測

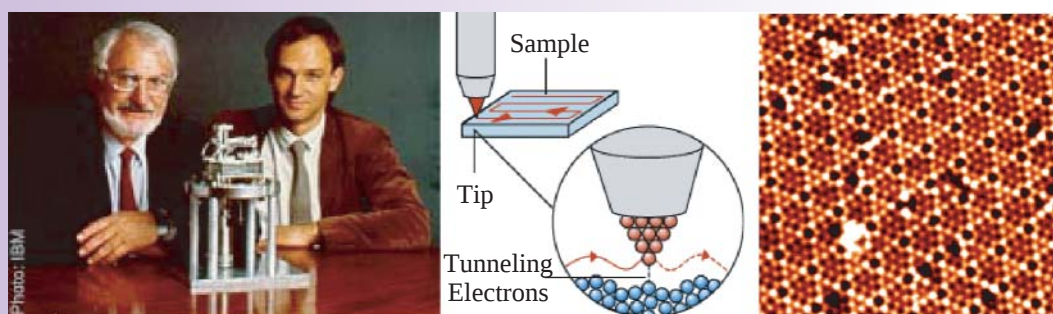
交互作用的裝置。偵測裝置將偵測到的交互作用大小與預設值做比較，並將兩者的差值做為回饋訊號給制動裝置，以維持探針在固定高度。所以只要記錄制動裝置在



圖三 掃描探針顯微鏡的原理
(資料來源：Thermomicroscope Co.)



圖四 Topografiner 的實體以及發明人R. Young、F. Scire及J. Ward（由左至右），以Topografiner繪出的物體表面影像（資料來源 <http://physics.nist.gov/GenInt/STM/topograf.html>）



圖五 （左起）Binnig（右）、Rohrer與他們的STM，STM的的工作原理（資料來源：<http://www.nobel.se/physics/educational/microscopes/scanning/index.html>），用STM得到之矽表面之原子排列（資料來源：清大果尚志教授）

水平移動的同時在垂直方向的伸縮情形，就能完成表面形貌的影像。

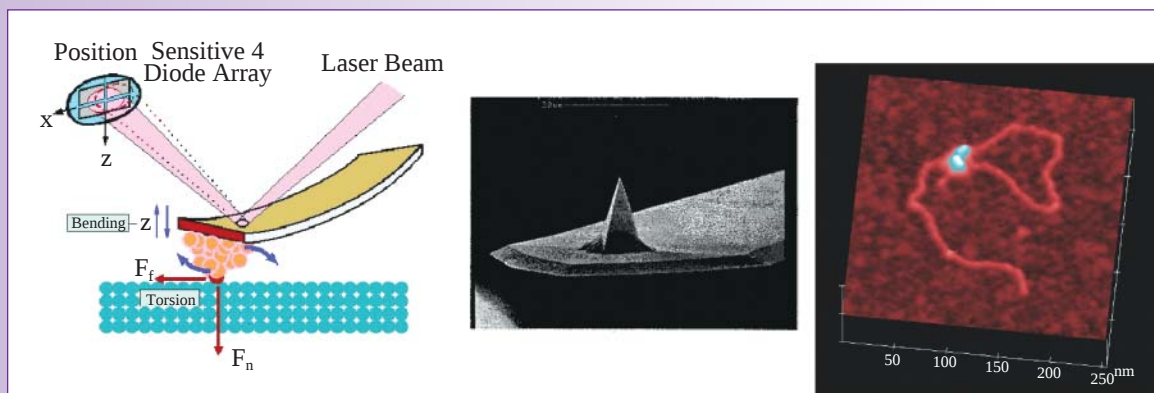
這樣的原始構想是美國標準與技術研究院（National Institute of Standards and Technology，前身為美國標準局）的R. Young等人首先於70年代提出的，當時稱為Topografiner（圖四）。以探針作為場發射電流(Field Emission)的發射源，維持探針與表面之間固定的場發射電流，這樣的設計只能有微米的解析（圖五）。

掃描穿隧顯微鏡

80年代，在瑞士IBM實驗室的Binnig及Rohrer（圖五）開發出掃描穿隧顯微鏡(Scanning Tunneling Microscope; STM)，利用穿隧電流來控制探針與表面之間的距離，因為穿隧電流對於距離極為靈敏，所以STM可以做到顯微鏡前所未有的次原子解析，看到個別原子在物體表面的空間排列，受到整個物理學界的重視。於是SPM正式登上科學儀器的舞台，開始一個全新的科學研究的領域。而且它的影響更擴及化學、材料、生命科學。經過20幾年的發展，它的功能已從簡單的形貌輪廓分析，進展到複雜的電性、磁性、光學、化學、機械等性質的奈米尺度分析，是以往各式顯微鏡所辦不到的。SPM對近年奈米科技的快速進展有極大的貢獻，更是不可或缺的重要工具。

原子力顯微鏡

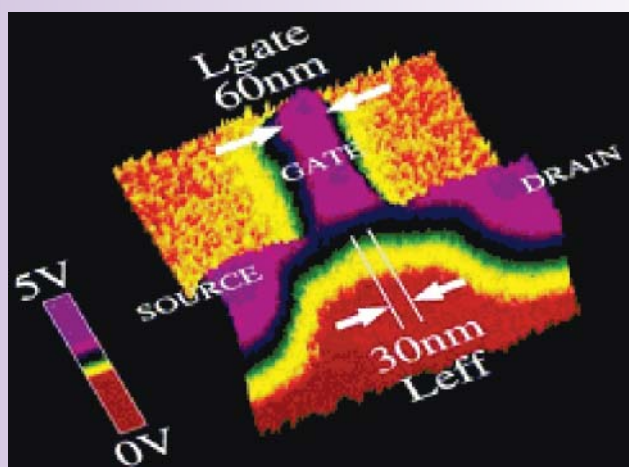
STM固然對於基礎科學的研究佔有無可取代的地位，但是它卻只適用在導電材料，因此限制了STM的應用範圍。於是就有原子力顯微鏡(Atomic Force Microscope;



圖六 （左起）AFM的工作原理，利用微加工做成之AFM探針，以AFM得到的DNA影像

AFM)的技術被發展出來。原子力顯微鏡採用新的機制來維持探針與試片表面的距離（圖六）。利用維持一個微小的懸臂（一端是固定，一端可自由擺動，而且爲了解析，在自由的一端向下的一面有一支突出的針頭）與表面之間固定大小的接觸力。懸臂自由一端的針頭接觸到物體表面時，會受到一個向上頂的力量而使懸臂產生偏折，因此只要固定懸臂的偏折量就能維持固定的接觸力。與STM同樣的道理，記錄制動裝置的伸縮量就可以繪出表面的形貌。但是要偵測懸臂的偏折，必須要使用一些進步的技術才能有高的解析，甚至次奈米解析。目前最常用的方法是光槓桿原理，它是一種利用光機械訊號放大的作用，將一雷射光照射在懸臂的正面，反射到一四象限光偵測器上。懸臂在垂直方向的偏折會引起雷射光打在光偵測器位置的移動，而且兩者會呈正比關係，位移放大倍率是 D/L ， D 是光偵測器到探針的距離（約爲數公分）， L 是懸臂的長度（約爲數百微米），相當於幾百倍的放大。光偵測器可以分辨微米以下的位移，因此可以分辨奈米以下的探針偏折，使得AFM在垂直方向有次奈米的解析。再加上現有的加工技術已經可以將矽基板加工出懸臂與針頭，針頭半徑可以在10奈米以下，甚至數個原子的大小，因此，AFM可以達到從原子到微米的橫向解析。AFM的操作環境可在真空大氣甚至水中，可分析的材料包含各種固態、化工、半導體電子、有機生物等，幾乎無所不包。所以，AFM的應用可以從基礎研究至工業檢測分析，遠超過STM所能涵蓋的範圍。

AFM不僅可以分析物體表面的形貌，經過適當的改良，還可以同時檢測表面的磁力（磁力顯微鏡）或靜電力（靜電力顯微鏡）、接觸電位（掃描電位顯微鏡）、電容（掃描電容顯微鏡）、導電性（導電原子力顯微鏡）。主要的工作原理就是在AFM



圖七 以SCM分析一金屬氧化半導體電晶體之摻雜濃度之分佈

順著表面掃描的同時，另外加上一個不同功能的偵測裝置。例如，掃描電容顯微鏡 (Scanning Capacitance Microscopy; SCM) 就必須加上一個可以感應探針與表面之間電容值的感測器，於是就能同時得到AFM的影像及對應電容之影像（圖七）。

只是針對這些外加功能，除了另外加一個偵測裝置，還得在針頭上加一些手腳，就是鍍上具有不同物理特性的材料。例如，測磁力時探針就鍍上鈷薄膜，於是探針的偏折會受到磁力大小而不同，而同時得到表面磁力的分佈影像（只是這時候AFM的操作模式比較複雜一些，懸臂是在表面上一直擺動，擺動的振幅會受到探針與表面之間的凡得瓦爾力影響，於是只要探針掃描的同時保持固定的振幅，就是維持探針在固定高度。這樣的操作模式稱為非接觸式AFM）。

結 語

SPM無疑已經成為重要的科學研究儀器，對於微觀世界的分析研究是一項必備工具。SPM本身具有多樣性、功能性與便利性等優點，在國內以及世界各地的大學或研究單位都已經被廣泛使用做為表面的分析工具。甚至如半導體、TFT LCD顯示器及光碟等高科技產業，也都必須使用SPM。在奈米技術越來越重要的未來，SPM勢必成為一無可或缺之利器。

（工研院量測中心研究員 簡世森、戴鴻名）