

研發奈米科技的基本工具之一

電子顯微鏡介紹 – TEM

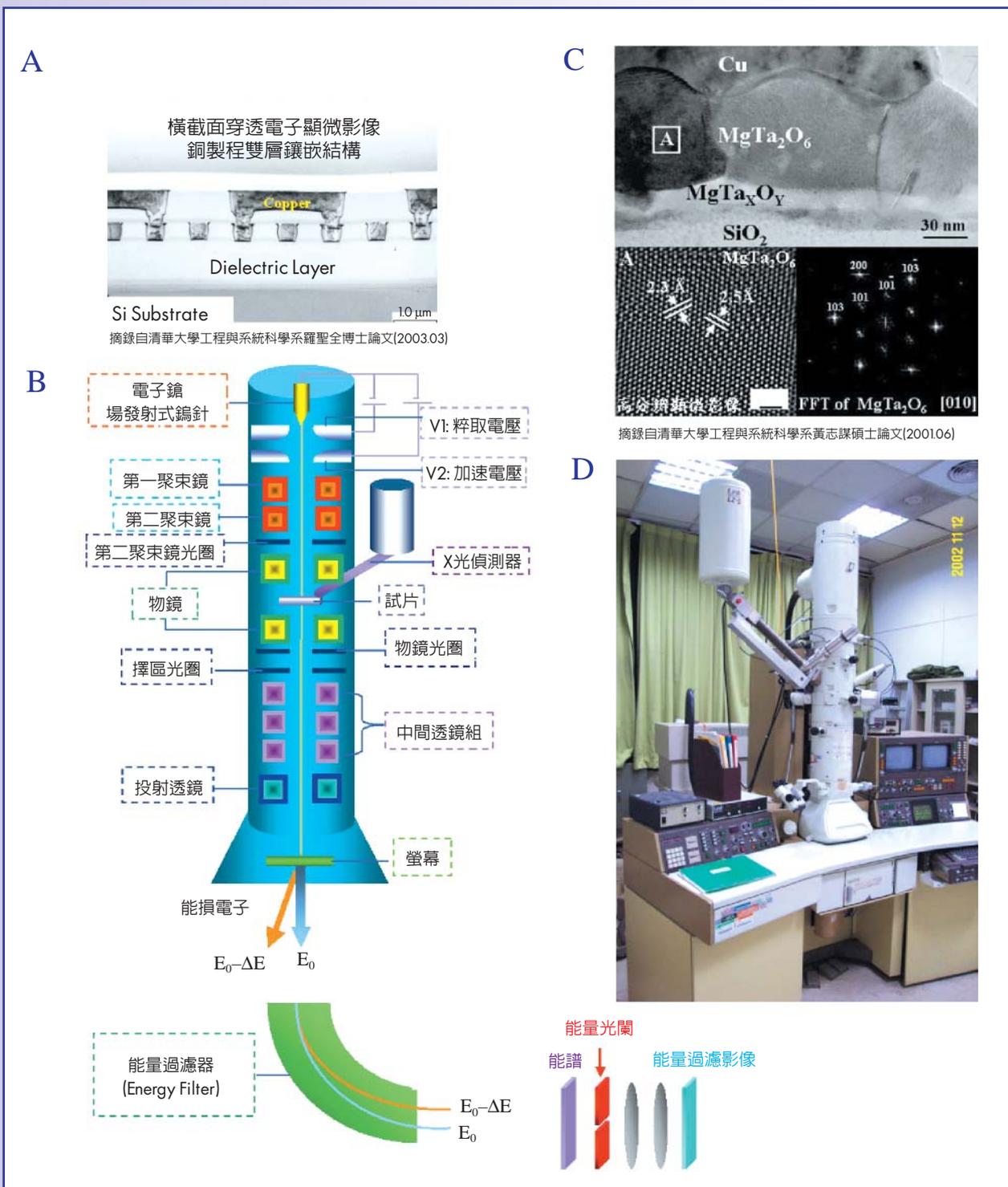
穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscopy ; TEM)

對於近十年來迅速發展的半導體製程，以及奈米尺度的先進材料，材料的研究已進入原子尺度大小，爲了觀察如此微小的尺度，新的研究工具也陸續出現。在這些新的研究工具當中，穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscopy ; TEM)可提供材料內部的形態、晶體原子結構。

自1936年第一台商用電子顯微鏡於英國建立以來，穿透式電子顯微鏡不斷地進步與突破，其最重要指標就在於影像解析度。隨著高壓設備之成熟技術發展與建立，一百萬伏特(volts)以上之超高電壓穿透式電子顯微鏡也已問世。因此原子級的影像解析度早已不再是遙不可及之夢想。

穿透式電子顯微鏡的基本構造如圖一(B)所示。與掃描式電子顯微鏡成像原理不同的是，穿透式電子顯微鏡是利用高能電子束（一般約在100keV~1MeV）穿透厚度低於100nm以下之薄樣品，和薄樣品內的各種組織產生不同程度之散射。散射後的電子以不同的行徑通過後續的透鏡組合和透鏡光圈，形成明暗對比之影像，而這些明暗對比之微結構影像是藉由螢光板來呈現。因此穿透式電子顯微鏡分析即擷取穿透薄樣品之直射電子(Transmitted Electron)或是彈性散射電子(Elastic Scattered Electron)成像，或作成繞射圖案(Diffraction Pattern ; DP)進而解析薄樣品微結構組織與晶體結構，如圖一(A)與(C)所示。一般而言，除了電子顯微鏡本身的性能，樣品之厚度是否夠薄(<100nm)與夠平坦均勻，也決定穿透式電子顯微影像之品質。

穿透式電子顯微鏡可以配合X光能量分散光譜(Energy Dispersive Spectroscopy ; EDS)及能量損失譜儀(Electron Energy Loss Spectroscopy ; EELS)，不僅可以分析材料結構並且可以定量材料內部的成份。圖一(D)爲工研院材料所所配置之穿透式電子顯微鏡：JEOL-2000FX之外觀圖。此儀器即裝配有X光能量分散光譜與能量損失譜儀。從X光能量分散光



圖一(A)橫截面穿透式電子顯微影像圖(Cross-section TEM Image)；(B)穿透式電子顯微鏡基本構造圖；(C)橫截面高分辨穿透式電子顯微影像圖(High-resolution TEM Image)與材料繞射圖案(Diffraction Pattern; DP)；(D)工研院材料所微結構與特性分析實驗室之穿透式電子顯微鏡外觀圖(JEOL-2000FX)

譜及能量損失譜儀，我們可以得到材料化學成份組成、分子鍵結形式等等。而美國Gatan公司所發展的能量過濾器(Energy Filter)，不僅可以如傳統的能量損失譜儀得到高解析能量損失譜，作成份定量分析，並且可以選擇特定能量得到材料內部元素分佈影像。其分析原理即利用非彈性散射電子(Inelastic Scattered Electron)所損失的特徵能量，來得到樣品的成分訊息，將能量分佈相對於貢獻至此能損的電子數目作成能量損失譜，可以得到元素的種類及成分、化學鍵結、能帶結構、厚度等訊息。而這樣配備能量過濾器的分析工具，我們稱之為能量過濾電鏡(Energy-Filtering TEM；EFTEM)。

能量過濾穿透式電子顯微鏡目前已成為量測材料性質相當有用的工具之一，其分析之優勢除奈米級電子束探針使其具有高空間解析率；同時，在電子能量損失譜中亦蘊含相當豐富之材料訊息。經由分析試片材料中原子內殼層激發所導致入射電子高達數百電子伏特(>100eV)之特徵能量核心損失峰，及蘊含著分析材料中價電子激發狀態電子能量損失譜的低損失能量範圍(<50eV)訊息。電子能量損失譜儀可以得到材料成分定性定量的結果。然而，更重要的是，由於電子能量損失譜的低損失能量範圍(<50eV)蘊含著價電子激發狀態的訊息，這些訊息不但經由電漿峰反映出化學成分的特徵，同時在較低能量損失範圍(<10eV)能譜亦與試片材料中的能帶結構有關。因此，分析低能譜損失譜不僅可以得到化學成分訊息，同時亦有可能得到材料中能帶間隙寬度與介電函數等電性的訊息。而能量核心損失峰之微細結構，亦含有材料電子組態特性訊息，可以得到鍵結與態密度等性質。

不同的奈米層次分析儀器發展出不同型態之穿透式電子顯微鏡，如能量過濾電鏡、分析式電鏡(Analytical TEM)、高分辨解析率電鏡(High Resolution TEM；HRTEM)等等。工研院奈米中心即將在2003年底引進先進之穿透式電子顯微鏡：JEOL-2100F。其搭配許多先進分析設備如：EDS、Gatan Imaging Filter 2001、Bright Field (BF) Detector與Annular Dark Field (ADF) Detector等。可以針對奈米尺度之材料作奈米尺度之微細結構、化學成份、化學鍵結、電子分佈情況，與光電性質等相當全面且完整之材料性質分析，相信對未來之奈米材料研究會有相當大之幫助。與JEOL-2100F相關之訊息與儀器性能，可以參考右列網站：<http://www.jeol.com/tem/jem2100f.html>。

(清華大學博士 羅聖全)