

研發奈米科技的基本工具之一

電子顯微鏡介紹 – SEM

電子顯微鏡之歷史演進

光學顯微鏡(Light Microscopes)受限於波長繞射的限制，因此解析度只能到300nm左右。為突破對物體微觀世界之觀察，開始有電子顯微鏡(Electron Microscopes)之發展。自十九世紀末（西元1897年）英國科學家湯姆森(J.J. Thomson)發現電子(Electron)以來，在十九世紀末二十世紀初，許多的物理理論相繼發展與驗證，這些科學發展也奠定電子波質二元論之基礎。1927年美國 Davisson和Germer兩氏以電子繞射實驗證實了電子的波動性。之後J.J. Thomson作陰極射線管實驗時，觀察到電場及磁場可偏折電子束。因此後人開始利用此一觀點，藉由電磁場聚焦電子產生放大作用。電磁場對電子之作用與光學透鏡對光波之作用非常相似，因而發展出電磁透鏡。為探討奈米尺度物體之微觀世界，電子顯微鏡之技術隨著時代不斷的改進，以滿足人類對物體之奈米世界的渴望。

談到電子顯微鏡，我們一定會提到對此領域相當有貢獻之諾貝爾獎得主：Ruska。1932年Ruska與Knoll首次將電磁透鏡之構想應用在實際之實驗儀器上，之後於1934年Ruska在其實驗室製作出第一部穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscope；TEM)。以下我們將針對掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy；SEM)之原理與應用做一廣泛之介紹。

掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscopy；SEM)

隨著材料科學的進步，微結構影響在材料本身的性質甚鉅，因此欲瞭解材料本身的性質，就必須有良好的顯微分析技術及工具。電子顯微鏡就是其中之一，其利用電子與物質作用所產生之訊號來鑑定微區域結構、微細結構、化學成份、化學鍵結和電子結構的電子光學裝置。掃描式電子顯微鏡原理的提出與發展，約與TEM同時；在1935年提出掃描式電子顯微鏡的理論與構想，到1942年Zworykin等人發展出第一台實驗室用掃描式電子顯微鏡。1965年英國Cambridge公司首先推出商品化的掃描式電子顯微鏡。在之後的數十餘年，隨著科技進步，儀器本身的能力如：解析度、操作方便性不斷提升，而周邊之分析儀器也不斷的改良，以追求更精確、更豐富的物質基本性質分析。

掃描式電子顯微鏡主要是來觀察物體的表面型態，其試片製作較簡單，解析度可達奈

米尺度且景深長，在觀察材料表面形貌上非常清楚而容易，目前已被廣泛的使用。而一般光學顯微鏡，受限於波長繞射的限制，因此解析度只能到300nm左右。

由Abbe's equation

$$d \geq \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

n：介質之折射率、λ：波長、α：透鏡半角。

得知欲提高解析度，則必須朝向單一波長，且採用短波長光源，與增大透鏡折射率等方法。電子顯微鏡之工作原理，即以波長遠小於一般可見光的高能量電子為光源，因此解析度可大大的提升，一般常見各種顯微術比較如表一。

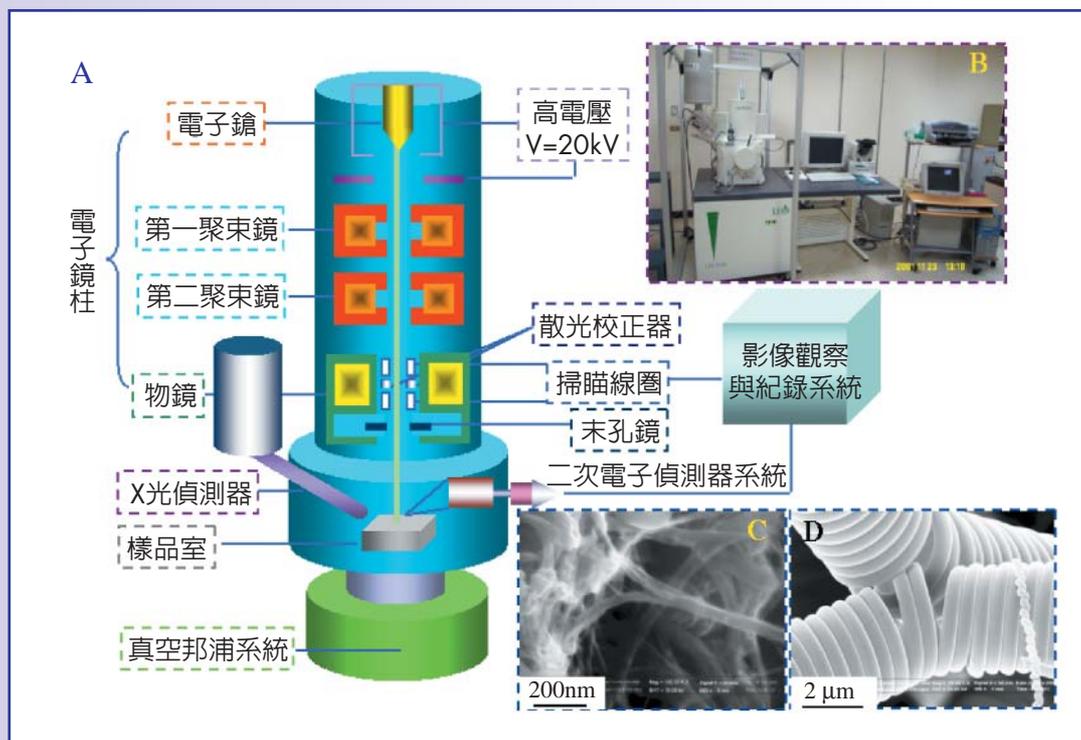
掃描式電子顯微鏡外觀如圖一(B)所示，此為LEO 1530場發射掃描式電子顯微鏡(Field Emission Scanning Electron Microscope；FE-SEM)。其主要構造示意圖如圖一(A)所示，主要分為電子鎗系統、電磁透鏡組與掃描線圈等。SEM的主要工作原理為電子鎗透過熱游離或是場發射原理產生高能電子束，經過電磁透鏡組後，可以將電子束聚焦至試片上，利用掃描線圈偏折電子束，在試片表面上做二度空間的掃描。當電子束與試片作用時，會產生各種不同的訊號，如二次電子、背向散射電子、吸收電子、歐傑電子、特徵X光...等。在一般掃描式電子顯微鏡偵測系統上，主要為偵測二次電子及背向散射電子成像，這些訊號經過放大處理後即可成像觀察，如圖一(C)、(D)所示為二次電子顯微影像。而特徵X光則可經由偵測器如：能量分散光譜儀(Energy Dispersive Spectroscopy；EDS)系統，則可以偵測特徵X光作材料元素成分分析。

一般電子束聚焦在試片上，試片表面的電子會被撞擊而釋放出來，稱為二次電子，其能量約為50eV，因此只有試片表面下約5~50nm的二次電子，才有機會脫離試片表面被偵測，此為試片表面的電子，帶有表面形貌的訊息，被二次電子偵測器接收成像，可以得到試片表面凹凸的影像。

一般的二次電子偵測器裝在試片的測邊，操作者可以利用偵測器與試片的相對位置及影像的明暗，判斷試片表面為凹入或凸起，但若試片傾轉的方向與偵測器背對，則偵測到的二次電子會較少，影像的判斷會受到影響。有另一種新型態的二次電子偵測系統，在LEO 1530 FE-SEM中，此為環狀二次電子偵測器，加裝在整個電子束系統的腔體中。二次

表一 各種顯微術的比較

	光學顯微術	掃描式電子顯微術	穿透式電子顯微術	掃描探針顯微術
最高解析度	300nm	1nm	原子級	原子級
成像環境	無限制	真空	真空	無限制
樣品製備	無	觀察表面需導電	手續複雜	無
成分分析	有	有	有	無



圖一 (A)掃描式電子顯微鏡基本構造圖；(B)工研院材料所微結構與特性分析實驗室之場發射掃描式電子顯微鏡外觀圖(LEO 1530 FE-SEM)；(C)與(D)二次電子顯微影像圖

電子在脫離試片表面後，被一弱靜電電場加速至高能量，被環狀二次電子偵測器接收。此新型態環狀二次電子偵測器，偵測效率高，可以得到相當清晰的影像，對高倍率觀察有絕對的幫助。但是若遇到規則性對稱排列之凹入或突出試片，則較無法單由影像判斷凹入或突起，需要藉助測邊的二次電子偵測器與傾轉試片加以判斷。

背向散射電子則為電子束與試片作用，發生彈性散射，其能量等於入射電子束能量，或因傳遞損失略小於入射電子束能量。此背向散射電子帶有元素成分的訊息，試片原子序越高，背向散射電子越多，因此在背向散射電子影像中，越亮的部分代表原子序越大的區域。背向散射電子的深度約在試片下500nm左右，因為背向散射電子產生後，仍須在試片內部行進一段距離，才能脫離試片被偵測器接收，因此背向散射電子影像的解析度明顯不如二次電子影像。

掃描式電子顯微鏡在材料微結構分析領域中是相當重要的一項分析儀器，然而在進入奈米的世界中，更高倍率與高性能的掃描式電子顯微鏡是必備的。場發射掃描式電子顯微鏡正好可以符合這樣要求，結合高倍率影像觀察與EDS微區成分分析，使場發射掃描式電子顯微鏡成為奈米材料的分析上不可缺少的工具。