

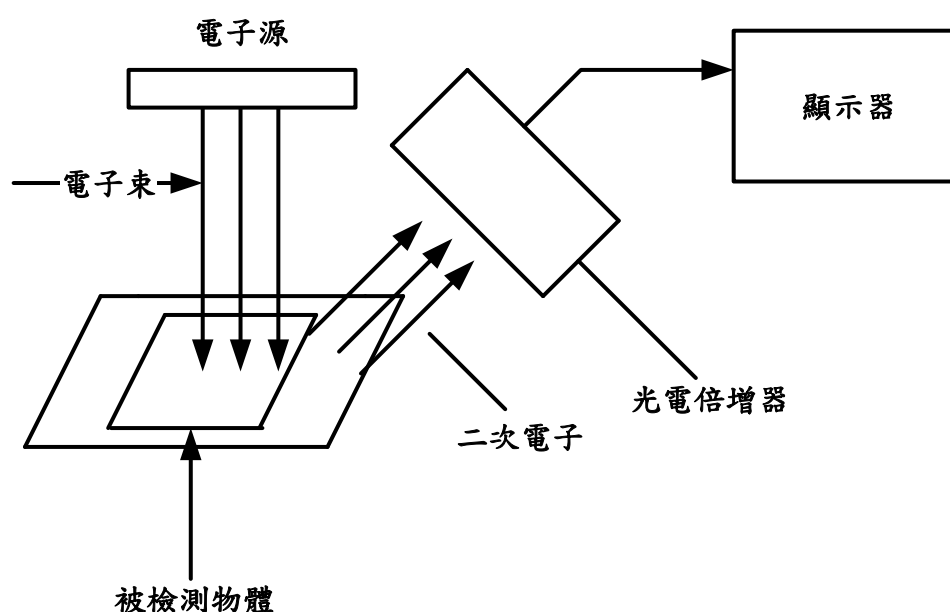
李家同

呂嘉維

全世界能自行研發與製造電子顯微鏡的國家屈指可數，而台灣正逐步成為其中的一員。本文將深入介紹台灣在電子束顯微鏡領域的重要進展與技術突破。

## 電子顯微鏡的原理

首先，我們要搞清楚電子顯微鏡的原理。請看圖一。電子束顯微鏡的核心，是由電子槍釋放出極細的電子束。電子束顯微鏡是一種利用**電子而非光線**來成像的高解析度觀測工具。它揭示了肉眼與光學顯微鏡無法窺見的奈米世界，是奈米技術、生醫研究、半導體檢測等尖端領域的關鍵儀器。圖一展示了其基本構造與運作原理。



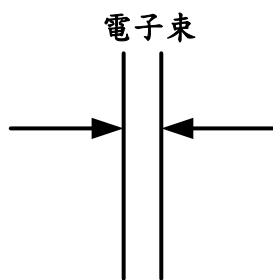
圖一

### 成像流程：

1. 電子源（電子槍）產生加速電子。
2. 經過**電磁透鏡**聚焦成極細電子束。
3. 電子束掃描樣品表面（SEM）或穿透樣品（TEM）。
4. 與樣品互動產生**二次電子**、**背散射電子**、**透射電子**、**X光**等訊號。

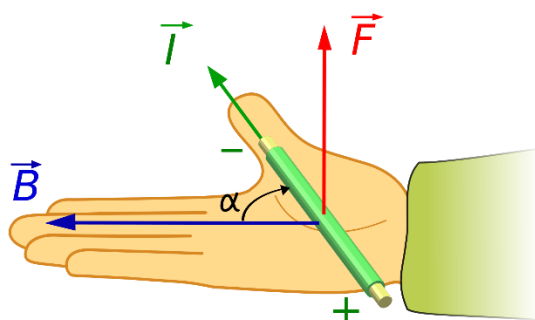
5. 偵測器將訊號轉為圖像，反映樣品的形貌、成分與結構。

電子顯微鏡主要靠電子源所放出來的電子束，台灣這家公司的電子束直徑是 10 奈米。要產生如此細的電子束，可以想見要製造兩組方向對立的力，如圖二所示。



圖二

圖二所顯示的力是 Lorentz force，Lorentz force 是由電磁場和電流產生的，電磁場和電流要垂直，所產生的 Lorentz force 也和電流以及磁場垂直，如圖三所示。



圖三

至於磁場如何產生，一般讀者恐怕不容易搞清楚。我們只要知道產生磁場的技術是這家公司的工程師自行發展出來的。能夠用以控制 10 奈米直徑的電子束，當然是相當不容易的。

## 二次電子與影像產生

電子束撞擊被檢測物體表面以後，會產生稱為 **二次電子** (secondary electrons) 的粒子。二次電子的強度由被檢測物體上的高低決定，也就是說，二次電子可以反映被檢測物體的形狀。這些二次電子接著被引導至 **光電倍增器** (photomultiplier)，這是一個能將物理訊號轉換成數位影像的關鍵元件，所以我們可以在顯示器上看到物體的形狀。這樣的轉換過程，讓每個掃描

點的電子數量對應為影像亮度。電子量越多，該點影像越亮；反之則暗，最終形成一張高對比度的灰階影像。

光電倍增器是一個相當複雜的設備，它是一個「從物理信號 → 電子信號 → 數位影像」的過程：

1. 內部有不同偵測器來接收這些電子。

最常見的是 **Everhart-Thornley 偵測器**，它接收二次電子，內部通常有：

- 一個金屬網格（引導電子進入）
- 一個閃爍體（scintillator，讓電子撞擊後發出光）
- 一個光電倍增管（把光轉成電訊號並放大）

2. 把「電子數量」變成「亮度訊號」

- 掃描每一點時，收到的電子量多 → 訊號強 → 那個點的影像比較亮。
- 電子量少 → 訊號弱 → 那個點比較暗。

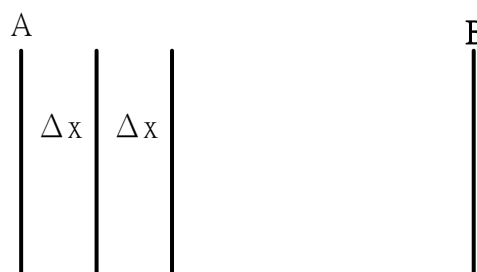
這樣就能一點一點地建出一張灰階圖像。

3. 訊號送進電腦 → 顯示影像

- 每一個像素對應樣品表面的一個掃描點。
- 系統會同步記錄「掃描到哪裡」和「收到多少訊號」，然後在螢幕上畫出影像。

整張圖像的解析度（例如 1024 x 768）就是掃描的點數組成的。解析度的關鍵： $\Delta x$  越小越精細。

電子顯微鏡的優勢在於其高解析度，請看圖四：



圖四

精密運動：馬達、光學尺與控制系統

假設有兩條線 A 和 B，我們要仔細地看 A 和 B 之間的情形，當然我們要掃描。如果兩次掃描間的距離是  $\Delta x$ ， $\Delta x$  越小，我們看得越清楚。也就是說，解析度會比較高。

電子顯微鏡的  $\Delta x$  是奈米級的，台灣的這家公司  $\Delta x$  可以小到 50 奈米。最新型的光學顯微鏡， $\Delta x$  是 200 奈米。因此，電子顯微鏡的解析度會比較高。

雖然我們說，在一般情況之下電子顯微鏡的  $\Delta x$  是 50 奈米，但有時候為了力求非常精密， $\Delta x$  可以小到 5 奈米。也就是說，這個電子顯微鏡的馬達可以只移動 5 奈米。這是相當不容易的。

這家公司的電子顯微鏡使用的樣品載台是使用線性馬達，馬達是國產的。要使馬達如此精密，必須裝上非常精密的光學尺。光學尺當然是從外國引進的，但是控制馬達的控制器該公司自己製作的。

要是馬達只移動 5 奈米，控制的訊號是相當有學問的，我們要使馬達在極短時間內加速、等速和減速。馬達控制是用軟體的，所以這家公司也有相當多軟體工程師懂得如何很精確地控制馬達。

要將馬達、光學尺和控制器結合起來，需要非常精密的組裝技術。這個技術也是工程師們經年累月所發展出來的。

不同於晶片製造機台裡面的電子束顯微鏡，這家公司做的電子顯微鏡可觀測各種立體形狀的待測物。因為形狀不像晶圓的扁平狀，機台承載待測物的機構需要特別設計，譬如需要測定一個圓柱體的側邊微小孔洞時，這家公司就需要特別設計一個讓圓柱體平躺且可旋轉的載盤，讓待測的位置可以順利移動到電子束下方。而在用顯微鏡觀測之前，必須要先對待測物做 Alignment，方法是用一個光學相機拍攝整體影像後，再利用軟體的分析，自動的判斷出要觀測的位置是在多少座標，之後才能精準地把觀測點移動到電子束下方，而觀測精度大約是 10nm，因此載盤的移動也是要很精確的。

## 電子束顯微鏡是一項系統整合的藝術品

### 技術門檻：融合物理、機電與軟體的系統整合極限

#### 1. 超高真空與電子源穩定性

- 電子在空氣中極易散射，整個成像區必須維持高真空環境 ( $10^{-5} \sim 10^{-7}$  torr)。
- 電子源需長時間穩定發射，常用場發射 (FEG) 或熱陰極技術。

## 2. 電磁透鏡控制精度

- 必須在微小尺度中精準聚焦電子束，透鏡控制電流需具**高穩定性與低雜訊**。
- 電磁偏轉需快速響應，以達成高解析掃描。

## 3. 奈米級掃描定位技術

- 採用**線性馬達 + 光學尺 + 演算法控制器**，使掃描範圍誤差低於 10 奈米。
- 機構須具**熱穩定性與低震動特性**。

## 4. 訊號轉換與數位影像處理

- 多訊號來源（如二次電子與背散射電子）需經**多層放大與數位濾波**。
- 掃描同步技術與即時影像渲染需靠**高速 FPGA 處理**。

## 5. 系統整合與人機介面

- 軟硬體需高度整合，具備**自動對焦、自動對比、自動導航功能**。
- 使用者介面需簡潔直觀，支援自動拍攝、AI 分析、客戶端工廠連線等功能。

大家應該知道，電子束顯微鏡是精密工業的產品，這顯示我國已經有製作電子顯微鏡的能力。全世界只有九個國家可以製作電子顯微鏡，因其涉及真空、電子光學、奈米級馬達控制、材料學、軟硬體整合等多領域高端技術。台灣雖然不是傳統電鏡大國，但已成功發展出自主品牌，尤其在先進封裝檢測、非晶圓樣品觀測、桌上型電鏡、國產化線性馬達控制等方面具備競爭優勢。我們應該感謝工程師們有豐富的學識，也有埋頭苦幹的精神。我們實在應該替他們叫好。

希望同學們知道，要製作出一個相當精密的設備是要有學問的，如果這家公司工程師都不懂電磁學，電子束顯微鏡是絕對做不出來的。如果這家公司的工程師不知道如何控制馬達，也不可能今天的成就。

還有一點，大家不要以為電子束顯微鏡公司內只有電機工程師，其實他們是需要相當多軟體工程師的。