

# 新世代桌上型電子顯微鏡的 設計與製作

## Design and Fabrication of New Generation Laptop Scanning Electron Microscope

張維祐、曾英碩、方建閔、陳福榮

Wei-Yu Chang, Ying-Shuo Tseng, Jian-Min Fang, Fu-Rong Chen

目前商業用之電子顯微鏡大多佔用過大的空間，以及具有的樣品製備與更換過程。本文首先將由電子光學基本的概念談起，為了達到微小化掃描式電子顯微鏡設計上的要求，在電子光學的基本理論下做了一系列的研究和模擬。最終本電子顯微鏡開發團隊(以下簡稱本團隊)成功發展了台灣第一台由國人自製的桌上型電子顯微鏡，體積為目前市面立地掃描式電子顯微鏡的三分之一，樣品解析能力可以達到 20–30 奈米的等級。未來，本團隊將進一步發展場發射式桌上型電子顯微鏡，並與像差修正器結合，以達到小於 2 奈米的解析能力。

The commercial scanning electron microscopes are all large in space such that the sample preparation and exchange takes long time. In this article we introduce the basic concept of electron optics in the beginning. In order to achieve the requirement for minimization of scanning electron microscopes, we have done intensive electron optics simulations, and develop the first homemade desktop scanning electron microscope in Taiwan. The size of desktop scanning electron microscope is one third as small as that of a commercial type. The resolution we have achieved is better than 30 nm. By combining the field emission laptop electron microscopes and the aberration correctors, we prospect to achieve the resolution better than 2nm in the future.

### 一、前言

電子顯微鏡發展的歷程可以說是人類科學發展的縮影。自十七世紀中葉以來，人們開始懂得使用光學顯微鏡觀察微觀的世界。在 1665 年出版的「Micrographia」一書之中，英國物理學家虎克提到「我看到了跳蚤的美，一種藝術與信仰的美」。這開啟了人們對於這一個微小並且神祕世界探求的

渴望。不斷追求的結果，科學家們發現光學顯微鏡解析能力的極限最終將受到光的波長所限制，300 奈米似乎是人類所能夠達到的極限了。

二十世紀是科學蓬勃發展的世紀，科學成為當代的顯學。自從 J. J. Thomson 發現了電子後，自從 J. J. Thomson 發現了電子後，利用電子能被電磁場偏折的特性，人們發展了電磁透鏡。隨後在 1926 年量子力學確定了電子的波動特性，人們

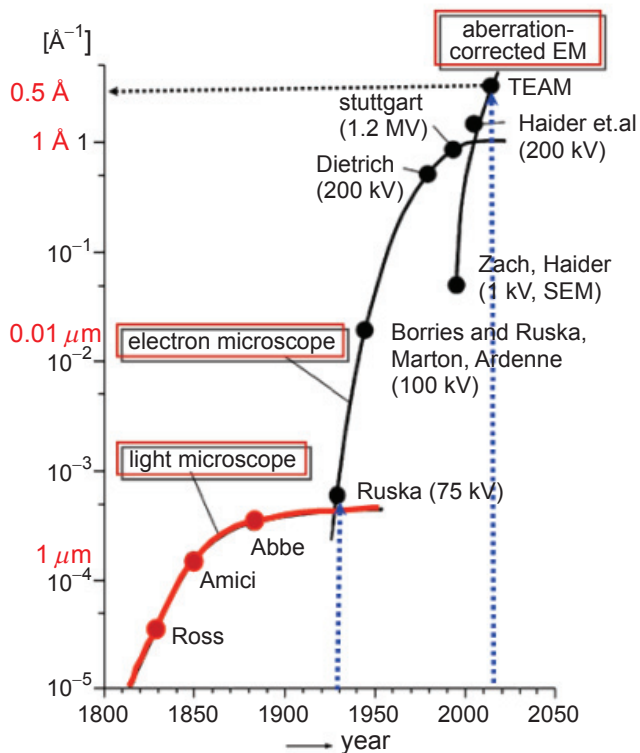


圖 1. 過去五十年來電子顯微鏡的發展歷程基本上是藉由提升加速電壓來改善解析能力，直到近十年像差修正器的出現才朝向低加速電壓高解析能力方向發展。(Chriatian Kisielowski Lecture Note)

克服了光波長對解析能力的限制。很快在 1932 年 Ruska 和 Knoll 首次應用電子透鏡製作出人類史上第一台的穿透式電子顯微鏡 (transmission electron microscope, TEM)。隨後在 1965 年 Cambridge Scientific Instruments 的第一台商業用掃描式電子顯微鏡問世，自此之後，電子顯微鏡被廣泛地應用於各類型研究領域之中，小至材料微結構的分析、刑事鑑定、古物與藝術品的鑑定，大至外太空隕石的研究等等，電子顯微鏡的應用範圍幾乎可以說是遍及了科學研究的所有枝微末節。這是人類科學發展的新紀元，電子顯微鏡可以說是目前科研領域中最為重要的工具之一。也因此對於電子顯微鏡儀器的了解及應用，是身為一個研究人員所不可或缺的重要部分。

在過去對於大多數的儀器使用者來說，往往只需要能夠很純熟地使用這些顯微設備便足以應付大

多數的研究課題。然而隨著電子顯微鏡領域儀器發展的日新月異，伴隨而來的研究方式越發創新特異。為了能在自己的研究領域之中獨具一格，僅僅是熟悉儀器，往往會被舊有儀器的使用方法所侷限。相反的，儀器的設計常常來自於使用者的需求，目前最新儀器的設計，其背後所隱含的往往是當前甚至未來科學研究的方向。為了能在這恍若軍備競賽的科研角力中拔得頭籌，相信自行設計與開發儀器的能力將是最重要的關鍵。而擁有這項能力的國家將在這場競賽之中佔有舉足輕重的角色。

究竟新世代的儀器應該具備什麼樣子的要求呢？除了將電子顯微鏡與其他分析儀器做結構上的整合，強調電子顯微鏡的「多功能性」外，答案很明顯的是達到在電子顯微鏡領域之中「解析能力」的極限 ( $< 0.1 \text{ nm}$ )。電子顯微鏡的解析能力  $\delta$  主要由球差  $C_s$  與波長  $\lambda$  所決定。

$$\delta = 0.66C_s^{1/4} \lambda^{3/4}$$

從圖 1 可以看出，自 Ruska 以來，為了提升電子顯微鏡的解析能力，最直覺的方式就是降低電子的波長。這個時期，各式各樣儀器設計的基本目的，可以說都是在想盡辦法提升電子的加速電壓，以降低電子的波長。加速電壓的提升，在理論上為人類帶來了原子等級的解析能力，然而伴隨而來的卻是對待測樣品難以忽略的損害，特別在有機材料與生物樣本等材料中尤其嚴重。這對於當前的科學發展來說，可說是相當致命的傷害。直到近五年以來，隨著像差修正器的問世，人們開始體認到，解析能力的提升不再僅僅只能靠降低波長來達到，對於像差的修正可以大幅度提升在相同加速電壓之下所能達到的解析能力。可以預期的，像差修正器的發展將是顯微儀器領域未來的首要目標。

從另一角度來看，自 1980 年起，當時個人電腦尚未普及，主要使用的運算工具是大型主機 (mainframe)。30 年後的現在，個人電腦的市場是當時的數十倍之多，運算能力也遠比當年大型主機更為優秀，因此合理的預期，未來科學儀器發展趨勢亦將延續個人電腦發展的模型，更加微小快速與方便。

因此，鑒於目前市面上普遍備使用的電子顯微鏡系統，往往體積過於龐大，進而使得試片的更換、抽真空的速度過於冗長，儀器的使用相對來說也較為複雜。對於這個強調擁有迅速、即時與精確「看見」能力的顯微領域，本團隊的目標在於保有傳統電子顯微鏡系統良好解析能力的同時，更進一步能製作出一台對使用者更為友善且兼具多功能性新世代的桌上型電子顯微設備。

從儀器設計的角度來說，時常將傳統幾何光學中所建構完備的理論應用於電子的諸多特性之中，這是一個在台灣較為少見的學科領域，稱為「電子光學」。在本文之中，首先將由電子光學的基礎談起。為了建立國內僅有的電子顯微鏡自製能力以及相關電子束應用儀器的核心技術，如：超高真空技術、電子槍機構、穩定高壓電源、樣品載台機構、整體機構設計、電子儀控與軟體介面等。同時亦將在本文中介紹如何在理論的框架之下建構出現有的儀器，並將介紹像差修正的基本原理。最後介紹本團隊成果與未來的發展目標。

## 二、電子光學儀器與原理

電子光學的基本理論來自於古典力學中 Lagrange 方程處理粒子運動的方式。對於任一電子光學的器件，只要能夠知道器件的電位  $\Phi$  或磁位  $\vec{A}$  的分布，即能夠利用 Lagrange 方程計算，包含電子在內任意帶電粒子軌跡<sup>(1)</sup>。

$$L(x, y, x', y') = [2\eta\Phi(x, y, z)(1 + x'^2 + y'^2)]^{1/2} - \eta[x'A_x(x, y, z) + y'A_y(x, y, z) + z'A_z(x, y, z)]$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mathbf{r}} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{r}}} \right) = 0, \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y)$$

而電子在電磁場中運動的規律，可以類比於幾何光學中的費馬原理，式中  $L$  可以視為幾何光學中透鏡的折射率，一旦有了折射率，便能夠藉此計算出電子在電子透鏡之中軌跡等特性。

另一方面，電子顯微鏡與光學顯微鏡在結構上也相當類似，都是利用一系列的透鏡系統達到放大物體的目的，以供觀察。唯一的差別在於電子

顯微鏡利用的是電子源與試樣作用，激發樣品表面各種與材料特性相關訊號，如二次電子、背向散射電子，而並非使用光源。幾乎所有的電子顯微鏡都具有類似的結構，它們包含電子源 (electron source)、電子透鏡系統 (electron lens system)、試片室 (specimen chamber)、偵測系統 (detector system)，以及真空系統 (vacuum system)。電子源就是電子槍 (electron gun)，目前常見的有熱游離電子槍 (thermionic electron gun)，包含了鎢 (W) 燈絲與六硼化鏷 ( $\text{LaB}_6$ ) 燈絲以及冷場發射電子槍 (cold field emission electron gun)。電子聚焦系統則包含靜電透鏡與磁透鏡，兩者偏轉電子的光學特徵相似，唯一不同的是，其偏轉電子的能力與電子的加速電壓分別有如下關係  $n_E \propto 1/V$ 、 $n_B \propto 1/\sqrt{V}$ 。因而在需要有高加速電壓的電子光學系統中，如電子顯微鏡、同步加速器等，常常廣泛地使用磁透鏡。如圖 2 所示為掃描式電子顯微鏡基本架構。

當電子由電子槍發出後，首先，經由兩個磁透鏡將電子束聚焦為一點，經由物鏡 (objective lens) 將電子源投射至試片，激發二次電子與背向散射電子訊號後，再由偵測器 (detector) 接收訊號。整個過程中，藉由磁偏轉器 (magnetic deflector) 不斷在

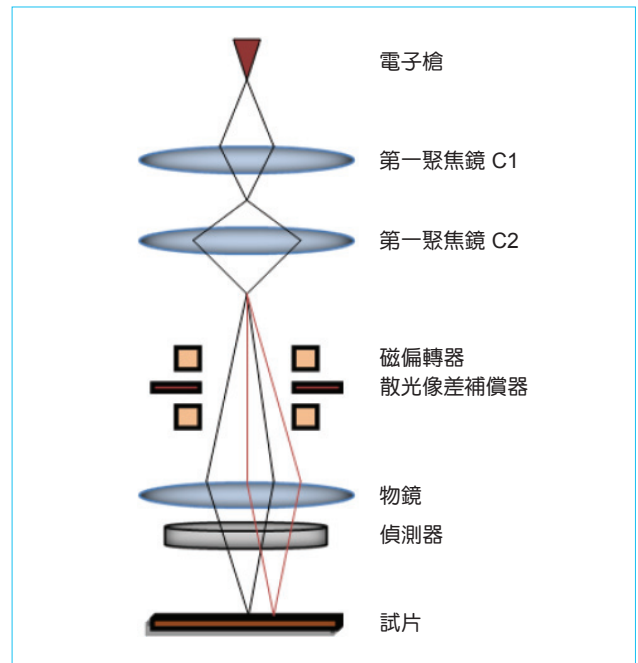


圖 2. 掃描式電子顯微鏡基本架構。

試片表面掃描，經處理後成像。其中散光像差補償器 (stigmator) 已具有初步的像差補償功能。

然而，由於真實儀器的邊界條件過於複雜，舊有電子光學的理論與儀器的設計，兩者在 1960 年以前可以說是各自為政。自 60 年代開始，由於各類計算器計算能力大幅提升，數值模擬的能力已足以應付複雜的機械結構，為各類電子光學系統的儀器設計提供了良好的設計基準。如圖 3 所示為包含了電子槍、磁透鏡與物鏡的簡單電子光學系統的數值模擬。模擬結果包含了電子軌跡與磁場分布的等位線，以及電子在像平面的成像特徵，例如電子束大小 (spot size) 與像差係數 (aberration coefficient)。值得注意的是，電子光學透鏡系統的模擬是在近光軸的限制條件之下完成的。對於任意電磁透鏡系統，一旦能夠量測到在光軸上的位能  $\phi(z)$  分布 (電位或磁位)，就能夠利用 Scherzer 關係式：

$$\Phi(r, z) = \phi(z) - \frac{r^2}{4} \phi'' + \frac{r^4}{64} \phi^{(4)} + \dots$$

由此式可以很明顯地看出，電子在光軸附近處 ( $r \sim 0$ ) 之電、磁位分布，完全由軸上電位 ( $z = 0$ ) 分布所決定。這在軸對稱的電子光學系統中相當重要。電子光學系統中的許多原則都是在 Scherzer 關係式的限制下才能成立。包含聚焦、像差係數與電子光學的幾何相依特性等等，都是在 Scherzer 關係式的限制之下利用 Lagrange 方程推導出來的。

### 三、跨世代的挑戰

隨著掃描式電子顯微鏡、穿透式電子顯微鏡相繼問世，對於新世代電子顯微鏡的諸多要求之中什麼是最迫切需要的呢？「便利性」是首要的目標。隨著科技的日新月異，多數使用者所面臨的問題，常常是光學顯微鏡的倍率已不敷使用，而傳統掃描式電子顯微鏡使用上卻又不如光學顯微鏡來得方便。因此，本團隊將目標放在發展台灣第一台自製桌上型電子顯微鏡，放大倍率在一萬倍以上。考量空間性，希望將整體體積縮小為目前市面上掃描式

電子顯微鏡的三分之一，並有快速達到真空需求與更換樣品的設計。

首當其衝的問題，自然是如何縮小整體系統體積。如圖 4 所示是本團隊早期實驗用的桌上型電子顯微鏡腔體之外部結構，在儀器初期的設計上，最迫切需要知道的是電子在整體系統架構之下軌跡的特性。幸運的是，由電子光學的理論，我們了解到：在近軸的限制條件之下，電子光學器件之間具有尺寸變化的幾何相依性。在嘗試縮小電子顯微鏡體積的同時，僅僅只需要在傳統的框架之下作適當修正，即能適用於我們的系統。

如圖 3 所示，由數值模擬結果能得到包含電子焦距與磁透鏡磁場分布等電子光學參數。焦距的大小與電子的軌跡則提供我們定位的基準。以圖 5 為例，以電子槍部分單透鏡 (einzel lens) 結構為例，當使用兩個接地的膜片與中間加負偏壓的圓柱，可以看出在不同加速電壓與透鏡距離下，對於電子的聚焦能力有明顯的差異，一般掃描式電子顯微鏡電壓常使用在五千伏特到三萬伏特之間。計算在不同距離下透鏡對於電子光源聚焦能力的差異，中心圓筒的作用距離越長，原則上聚焦能力越強，然而在縮小整體結構的過程之中，必須犧牲部分聚焦能力作為代價。取而代之的方式，我們固定一萬五千伏特作為電子槍的設計基準，以永磁透鏡代替傳統可調變磁場的磁線圈透鏡作為聚焦透鏡使用，永磁透鏡相較線圈透鏡在相同的距離之內有著更強的聚焦能力，有助於腔體縮小。然而，永磁透鏡的使用卻也犧牲了在大範圍調變加速電壓的能力。磁透鏡磁場分布受透鏡幾何形狀與材料等特性所影響，往往直接反映在透鏡的焦距與像差的大小，而決定整體電子光學系統的解析能力。

如圖 6 所示，簡單地利用不同的線圈纏繞方式，以改變磁偏轉器上的磁場分布情形，可以很明顯地看出，磁透鏡磁場分布對於成像有決定性的影響，錯誤的線圈纏繞方式，將使圓形銅網明顯扭曲成方形。一旦決定了透鏡各器件基本架構之後，最大的困難將落在整體真空的機械結構改良上。在僅有傳統掃描式電子顯微鏡三分之一體積的有限空間內，這些問題的考量顯得更加嚴苛。事實上，這通常也是儀器造價最昂貴的部分。良好絕緣高壓電子

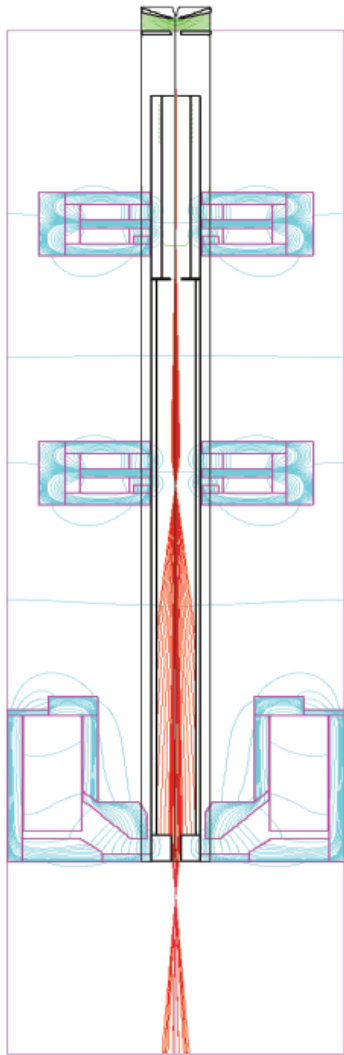


圖 3. 桌上型電子顯微鏡光學系統模擬示意圖，包含電子槍、雙聚焦透鏡以及物鏡，在加速電壓 15 kV 下，電子在透鏡系統的軌跡以及磁透鏡磁場的分布情形。

槍是重要的條件，其次，真空的影響也必須考慮在內，往往最大的問題在於更換樣品的時候對於腔體真空的影響相當劇烈。一般來說，熱游離式電子槍要求真空度在  $10^{-6}$  Torr，場發射式電子顯微鏡真空值更需達  $10^{-10}$  Torr。而真空度的好壞，直接影響了燈絲發射電子束的穩定度。如圖 7 所示，為了達到電子槍的超高真空及樣品腔體的低真空環境，我們採用光圈來完成差動式抽氣。

隨著儀器放大倍率的提升，許多原先在低倍率下對影像品質影響不明顯的因素將逐漸加劇，應予

以考量。例如，對於公差的要求，直接決定了透鏡最終能達到的解析能力，而整體防震的設計與穩壓穩流的電路，更對於最後成像的品質有著關乎成敗的影響能力。如圖 8 所示，可以很明顯地看出即便有散光像差補償器的初步校正，在一萬倍的放大倍率之下，仍有相當清楚的毛邊，而穩定的電壓供應 (ripple < 0.1%)，對影像品質有良好改善效果。

#### 四、像差修正器

從電子光學的角度來看，根據著名的 Scherzer 理論可以知道，所有軸對稱的電子透鏡都具有正的折射率。在光學透鏡中，一般是利用一個凹面透鏡產生的負折射率來補償由凸透鏡正折射率而來的球差。而在掃描式電子顯微鏡所使用的聚焦透鏡與物鏡，是利用旋轉對稱的圓柱形透鏡來模擬光學上的球面透鏡來聚焦電子束，也因此它存在有不可避免的「正」的球面像差。因此球差是一般電子顯微鏡中對影像解析度影響最為嚴重的像差，是透鏡固有的像差。

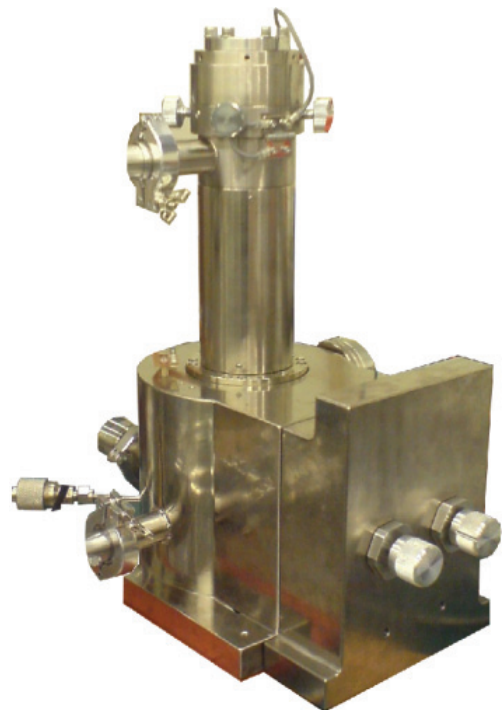
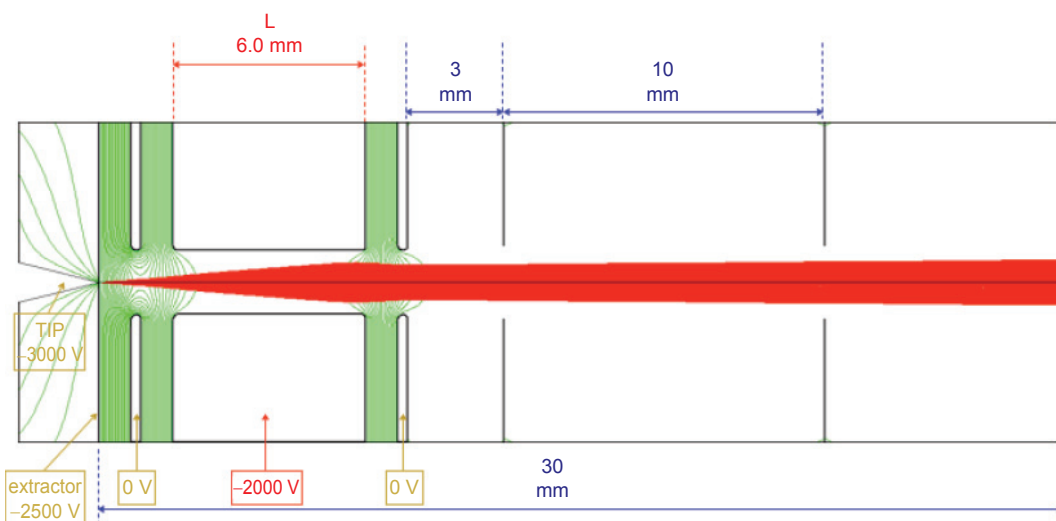
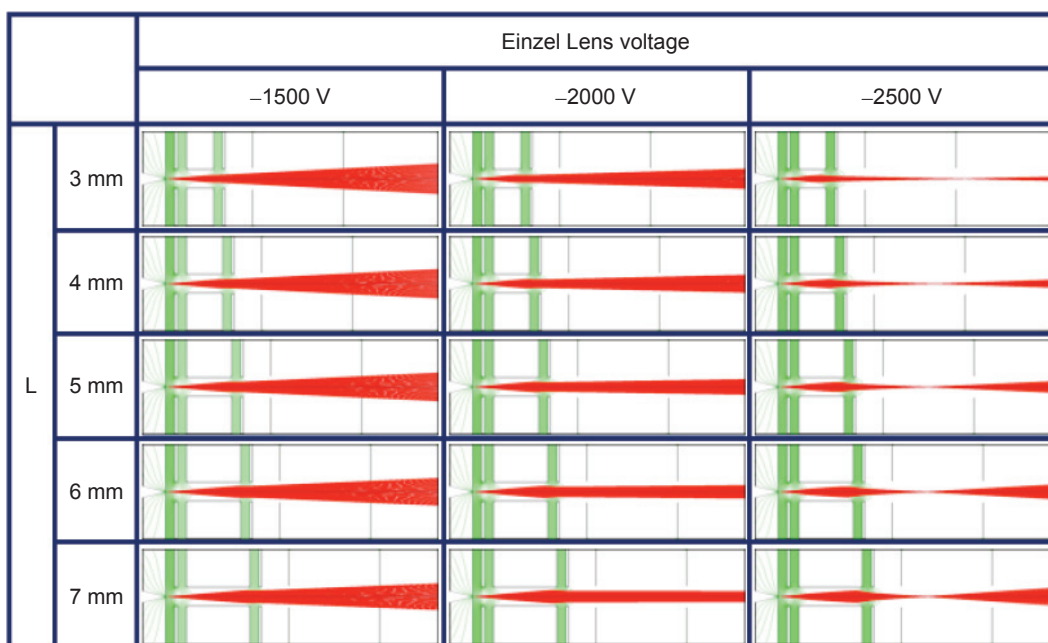


圖 4. 為實驗初期所建立的桌上型電子顯微鏡腔體結構。



(a)



(b)

圖 5.

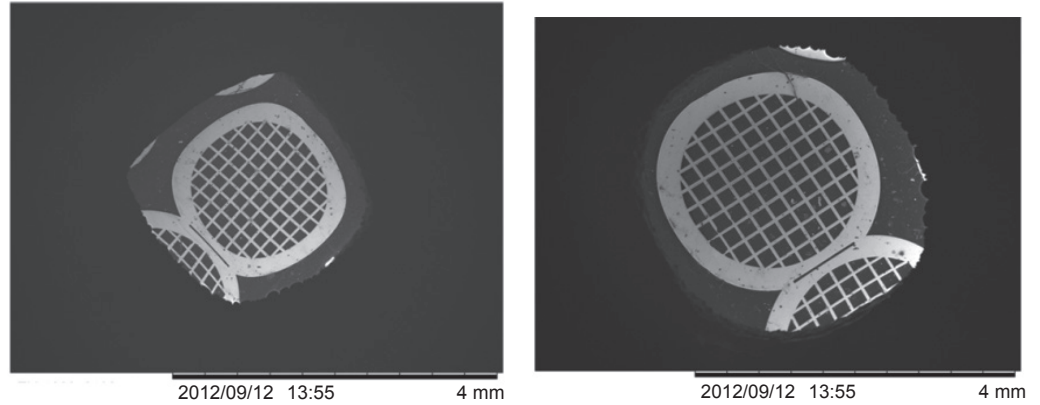
(a) 電子槍單透鏡結構，由兩接地的膜片與加負偏壓的圓柱所組成。(b) 電子槍加速電壓對單透鏡焦距模擬示意圖，加速電壓範圍由  $-1.5$  kV 至  $-2.5$  kV，einzel lens 有效長度範圍由 3 至 7 mm，可以看出不同加速電壓下聚焦能力的差異。

隨著半導體產業的發展，對於關鍵尺寸的精準量測變得相當地重要，為了避免在量測過程中破壞元件，目前的解決方式為降低電子的加速電壓。而近年生物科技的發展，電鏡應用於生物試樣觀察的需求也快速地增加。同樣地，為了避免對生物樣品的損壞，有別於傳統  $15-30$  kV 的加速電壓，最先進的電子顯微鏡常常必須附帶有能在相當低的加速電壓 ( $< 1$  kV) 下仍能有相當好的解析能力。綜合以上兩點，不難看出，未來在電子顯微鏡領域的趨勢，將往低電壓的方向做設計。而當電壓低的時

候，電子源因為本身能量散布所造成像差，也就是色差所佔的權重會較高電壓時大許多。因而為了能在低電壓下維持高解析度，降低色差是目前所有新式分析儀器共同的目標。

所以本團隊也致力於像差修正器的研發。對於像差的修正，最單純的方式就是利用非軸對稱的電子光學系統所產生「負」的像差，利用與光學透鏡正與負相消的方式來達到像差修正的目的。如圖 9(a)<sup>(3)</sup> 所示，為一組由十二個獨立的電、磁極所構成的非軸對稱電子透鏡。藉由多極的安排，產生在

圖 6.  
不同線圈纏繞方式造成銅網影像有明顯差異。



中心處近乎平行的電場與垂直的磁場分布的情形。在圖 9(b) 以磁場部分為例，若將 (a) 圖中的各分量獨立出來，可以看出偶極完全平行的磁力線被其餘較弱的四極、六極與八極的分量給修正。圖 9(c) 可以明顯看出藉由調整不同的分量大小，能改變電子的軌跡，進而修正像差。藉由兩組多極透鏡的串

聯，(c)-1 首先在第一組透鏡藉電磁分量調整能改變電子路徑，將不同能量的電子束分離消除了色差。接著，在另一組多極透鏡利用不同分量的微調，能將不規則的電子束扭曲再聚焦為一點而消除球差，如 (c)-2、(c)-3。最終能達到像差修正的目的。

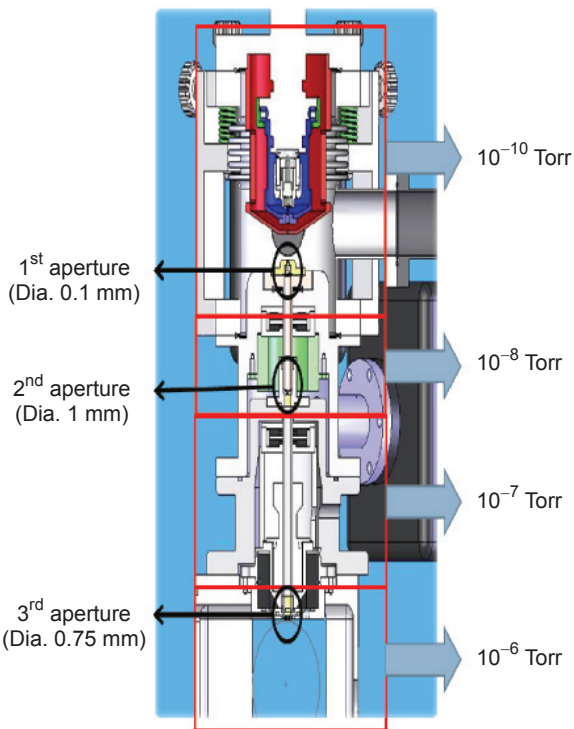


圖 7. 以場發射槍為例，我們已經順利地在設計的 20 公分長的電子槍中完成了三個數量級以上的差動式抽氣 (differential pumping)。並且也成功點亮了場發射槍，在樣品位置上得到了約 0.1 nA 的樣品電流。

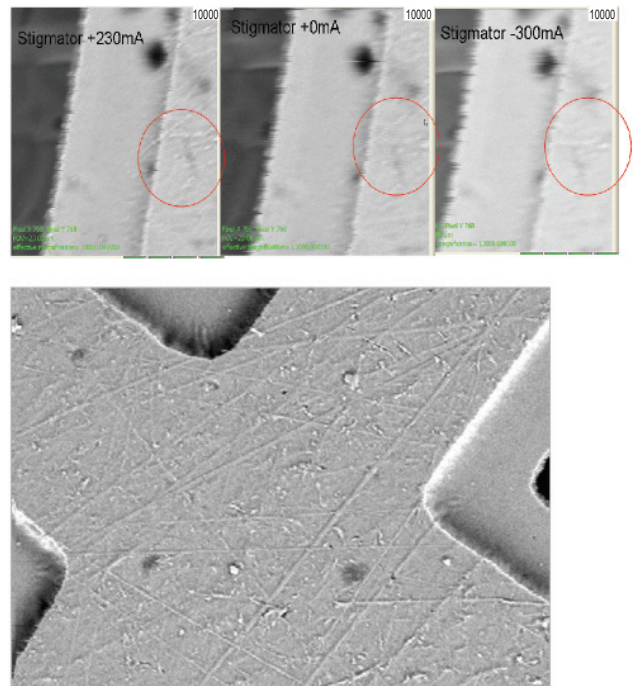
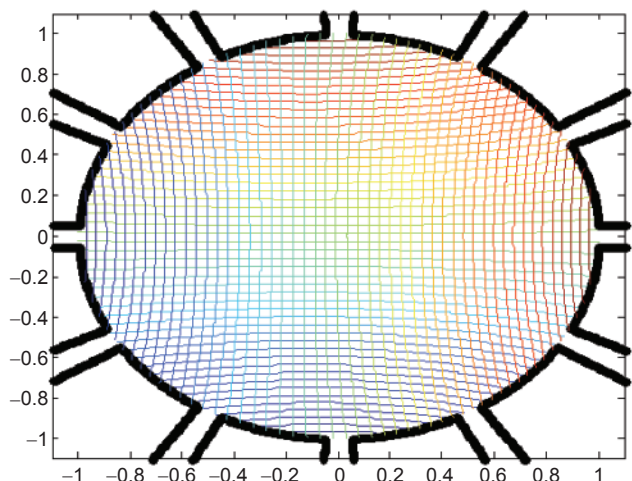
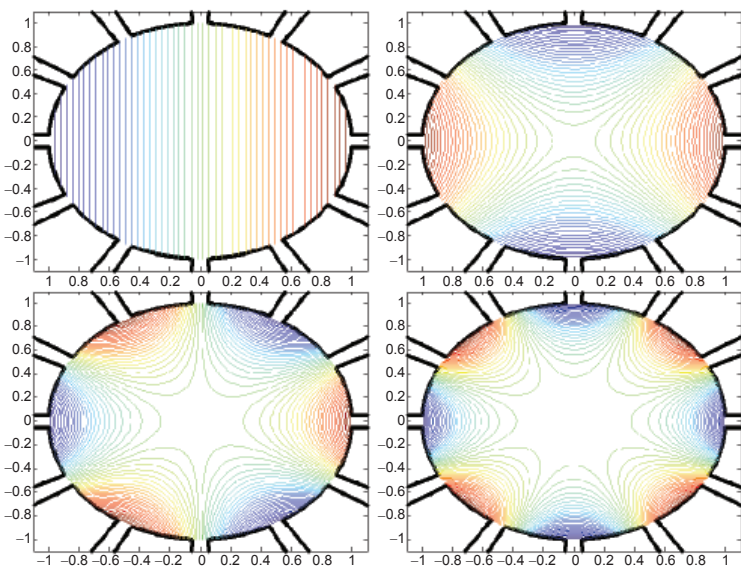


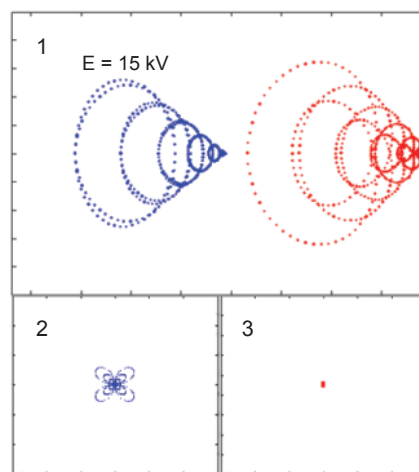
圖 8. 穩壓的電流對於成像品質的影響。首先由上圖可以看出，在電流不穩定情形下即使調整散光像差補償器，對影像的改善仍然有限，下圖為在穩壓穩流供應下對影像品質的改善，可以看出毛邊問題已有效解決。



(a)



(b)



(c)

圖 9.

$$E = 15 \text{ kV} + \Delta E$$

(a) 為一組多極像差修正器，圖上各極皆具有獨立調整電場與磁場的作用，利用電極、磁極安排產生垂直正交電磁場。(b) 依次是磁場偶極、四極、六極、八極分量，各分量大小皆不相同以偶極分量為最大，疊加後如 (a) 所示。(c) 為像差修正過程，兩組如圖 (a) 所示串聯修正器，於圖 1 首先不同能量電子分離以修正色差，之後如圖 2 在影像平面電子束斑仍有扭曲，而於圖 3 藉由調整電磁場分量大小來達到修正球差目的，電子束斑最終呈現一點。

## 五、桌上型電子顯微鏡

桌上型電子顯微鏡的設計，可以說是傳統立地式電子顯微鏡微小化的過程。在電子光學的理論框架之下，並考量諸多實務上的限制條件，本團隊已經開發出熱燈絲式桌上型電子顯微鏡，目前已經到達接近一萬倍的解析度。這也是國內首次跨足電子顯微鏡系統的自主高科技檢測儀器的開發。所有零件的自製，包含熱燈絲式電子槍、高壓模組、電子透鏡、電子偏轉器、電子物鏡、背向散射電子偵測器、樣品台、真空腔體、防震設計、穩壓穩流電路、全數位化電子控制電路、傳輸介面，以及 PC 端控制軟體，都在我們的努力之下逐一設計完成。

整體系統的架構如圖 10 所示，以電子槍和包

含電子透鏡、樣品台在內的腔體為主體，由高壓模組提供電子槍穩定高壓。儀控部分，以電路控制系統橋接儀器端與個人電腦上影像端。儀器啟動後首先對腔體進行粗抽，直到  $10^{-2}$  Torr 的真空值後，經電路系統控制渦輪幫浦運作對電子槍部分細抽直至  $10^{-6}$  Torr。真空架構如前面提到的，由光圈作為區隔。因為樣品所在處腔體對於真空值要求並不高，約在  $10^{-2}$  Torr 的等級，因而對於樣品製作的要求，也相較傳統立地式電子顯微鏡來得寬鬆許多，對於樣品能夠容忍的範圍較大，將有機會與生物樣品觀測結合。樣品進程在  $x$  軸與  $y$  軸軸向設計為  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ ，可觀測視野相當廣。圖 11 為本團隊完成之桌上型電子顯微鏡與使用者介面。

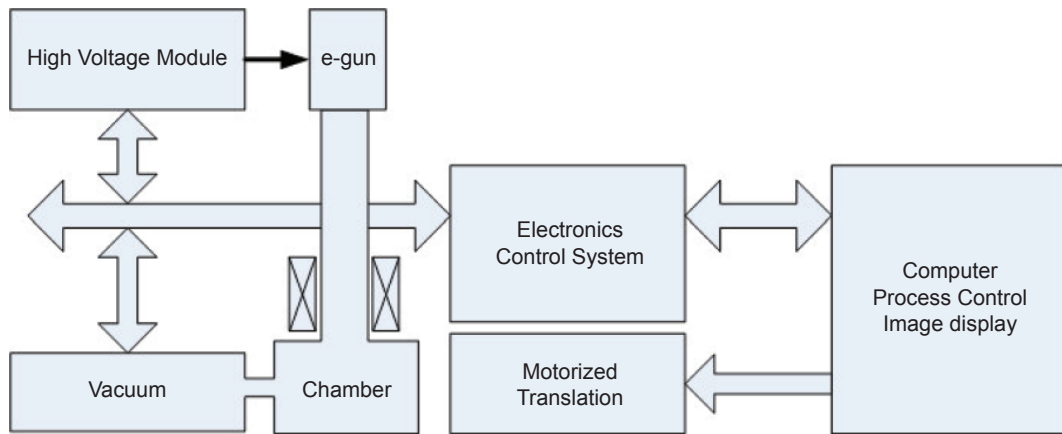


圖 10. 桌上型電子顯微鏡系統，包含主體電子槍和腔體以及真空系統、高壓模組與成像系統，並由電子磁控系統橋接。

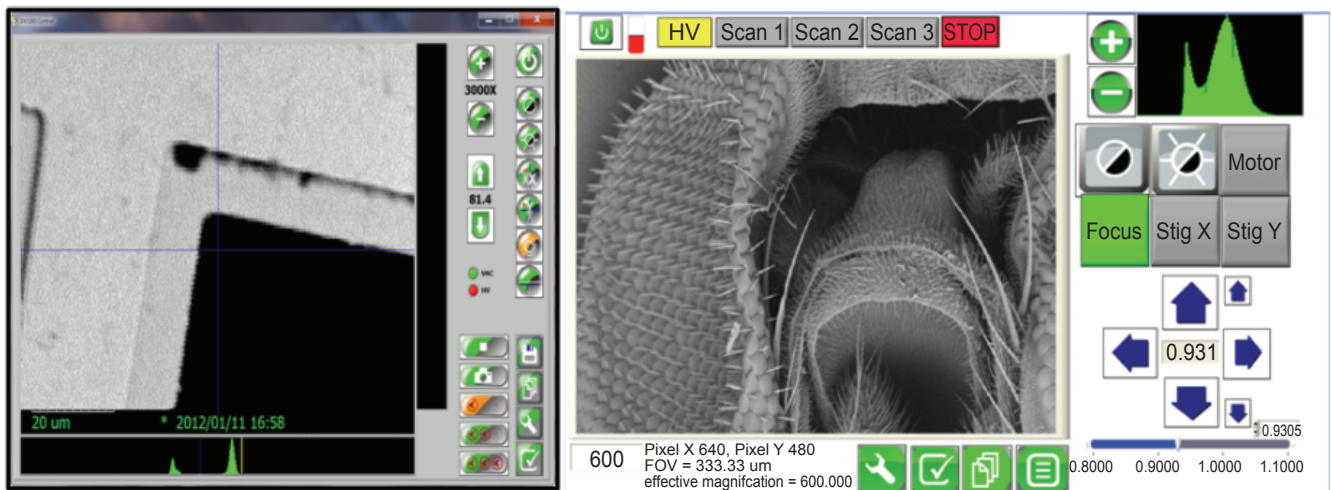


圖 11. 本團隊完成之桌上型電子顯微鏡與使用者介面。

## 六、結語

為了能夠為目前新興製程的半導體技術提供能夠替代光學顯微鏡的另外一種選擇，我們以低真空、小的使用空間以及快速置換樣品的使用方便性觀念，設計了台灣第一台的桌上型掃描式電子顯微鏡。此將能使用在大量快速檢測樣品的工業上，取代傳統電子顯微鏡使用麻煩的缺點，並補償光學顯微鏡解析能力的不足。最終將有機會能夠配合其他先進的檢測儀器，例如 EDS 或是 EBSD，可成為全方面的檢測工具。隨著電子或離子束在各領域的應用越發廣泛，從日常生活的顯像管到學術領域的各類電子顯微鏡、質譜儀等等，對於電子光學相關技術研發將日趨重要，而如何利用團隊目前電子顯微鏡技術成功開發的經驗，開發更新更多樣化高科技的儀器，例如聚焦離子束系統、離子顯微鏡及電子直寫等，將是本團隊未來的目標。

## 誌謝

感謝國科會 (NSC-100-2120-M-007-005-) 對於此研究所提供的財務支援，以及團隊的所有同仁。黃祖緯博士、李德輝先生、殷廣鈞先生、白嘉惠、黃鈺珊、楊麗巧、林信余、顏存濱等對於本研究計畫皆有重要的貢獻。

## 參考文獻

1. P. W. Hawkes, *Principles of Electron Optics*, **1** (1996).
2. E. Munro, *Munro's Electron Beam Software Ltd.*, 14 Cornwall Gardens London SW7 4AN, UK.
3. K. Tsuno, *Rev. Sci. Instrum.*, **75**, 4434 (2004).



張維祐先生為國立清華大學工程與系統科學系博士班學生。

Wei-Yu Chang is currently a Ph.D. student in the Department of Engineering and System Science at National Tsing Hua University.



曾英碩先生為清華大學研究助理，目前為中華大學機械工程學系碩士班學生。

Ying-Shuo Tseng is a research assistant at National Tsing Hua University. He is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at Chung Hua University.



方建閔先生為清華大學研究助理，目前為中華大學機械工程學系碩士班學生。

Jian-Min Fang is a research assistant at National Tsing Hua University. He is currently a M.S. student in the Department of Mechanical Engineering at Chung Hua University.



陳福榮先生為美國紐約州立大學石溪分校材料科學博士，現任國立清華大學工程與系統科學系教授。

Fu-Rong Chen received his Ph.D. in materials science from the State University of New York at Stony Brook, USA. He is currently a professor in the Department of Engineering and System Science at National Tsing Hua University.