

以電子顯微鏡為基礎之電子束曝光機的改裝與應用

Scanning-Electron-Microscope-Based E-Beam Writer and Its Applications in the Fabrication of Nano-Electronic Devices

陳啟東、吳憲昌

Chii-Dong Chen, Cen-Shawn Wu

曝光及成像是奈米結構製程中的一項關鍵技術。在新元件研發過程中，往往希望能在短時間內不需光罩就可以作成奈米結構，電子束曝光技術提供了一套很適合這目的的解決方案。以電子顯微鏡改裝成的簡易電子束曝光機在性能上雖比不上設計精良的專業化電子束曝光機，但在很多情況下可以符合研發工作的要求，可說是經濟實用的方案。在這篇文章中，筆者簡單的介紹了電子束微影的技術，也敘述了我們改裝電子顯微鏡的經驗及需注意的關鍵技術。

Electron beam lithography is a quick and perfect solution for the fabrication of small amount of prototype nano-scaled structures where frequently changes in design are necessary and the conventional photolithography with optical masks is found ineffective. Although a simply constructed scanning-electron-microscope (SEM)-based e-beam writer can not be on a par with the commercially available multi-million-dollar e-beam writers, it offers a cost-effective solution for the research and development laboratories. In this article we briefly introduce the e-beam lithography techniques, and we describe our experiences in the modification of an SEM into an e-beam writer. Key issues are discussed and examples of fabricated nano-devices are presented.

一、前言

自從電晶體發明以來，逐年減少尺寸大小與增快調變速度已成為既定的目標，電晶體如此快的革新腳步不只帶動半導體產業發展，更加速資訊、通訊等相關產業蓬勃發展。隨著半導體產業蓬勃的發

展，元件密度高、線寬小、成本低是半導體業界想要追求的目標。而完成這些目標的關鍵技術即為半導體製程中的微影 (lithography) 技術，如果微影技術沒有辦法符合新一代電子元件的需求，將造成半導體工業的停滯不前。由此可知微影技術在現今的半導體工業扮演多麼重要的角色。

一般使用的微影技術有光學微影、電子束 (e-beam) 微影及 X 光微影。光學微影是現今半導體產業主要使用的微影技術，它主要的優點是產能快、良率高、成本低。然而由於半導體產業的快速發展需求，線寬已經由 $0.13\ \mu\text{m}$ 往 $90\ \text{nm}$ 持續的往下縮小。由於受到使用的光波長限制，使得光學微影技術將面臨極限。雖然現在可以藉由光學鄰近修正 (optical proximity correction, OPC)、相位移光罩 (phase-shifting mask, PSM) 等技術，將光學微影製程推向 $65\ \text{nm}$ 左右，甚至使用波長為 $13.5\ \text{nm}$ 的極紫外線 (extreme ultraviolet, EUV) 當光源，可以把線寬推向 $10\ \text{nm}$ ，但伴隨而來的是成本增加及製程上的困難，讓下一世代的微影技術充滿變數。於是其他微影技術開始受到重視，尤其是電子束微影技術具有解析度高、景深大、技術成熟等優點，受到更大的重視。

另外由於現今奈米科技的發展，奈米材料的性質與應用、奈米電子、光電元件的設計與製作一直受到廣泛的重視。能瞭解不同尺度下材料的特性，進一步創造新的性質並應用到日常生活中，是研究奈米科學的重點。但是要研究奈米材料或元件，不可或缺的是必須具備奈米製程技術。奈米製程技術扮演接觸奈米尺度性質的重要角色，如何能快速、精確地在各種樣品上製作奈米尺度的圖形是令人關注的。電子束微影技術恰好能簡單達到此目的，它不管於半導體工業或奈米科技上都扮演相當重要的角色，是一項值得注意的技術。

電子束微影技術基本上是以電子束作為曝光光源，由於電子束的波長很短，因此比較沒有繞射的問題，而能達到很高的解析度。電子束的直徑依電子槍的種類及電子光學系統設計而不同，一般而言在約 $2-5\ \text{nm}$ 間。此外，電子束微影技術還有一個非常重要的優點，那就是只要直接在電腦上設計圖案再送到曝光的系統去曝光 (稱作直寫, direct write) 即可完全不需要光罩。因此它可大幅縮短從設計到製作的時間，也因此特別適合研究室或非量產型元件使用。事實上光學微影技術所用的光罩很多是用電子束微影技術作出來的。但是專業化的電子束曝光系統都非常龐大且昂貴，主要是供應半導體光罩公司使用。這些大型商用機台具備有高穩定

性與高產能的優點，但是背後配合的廠務工作與伴隨的高額維修費用並不是一般小規模實驗室所負擔得起的。因此如何利用電子顯微鏡加以改裝成為電子束曝光機為本文的重點。在這篇文章裡，筆者將先介紹什麼是電子束微影技術，再談如何將一台電子顯微鏡改裝為電子束曝光機。最後會介紹一些筆者實驗室以改裝後的電子束曝光機所完成的一些電子元件及其功能。

二、電子束微影技術

電子束微影 (e-beam lithography) 技術是指利用電子束將以電腦輔助軟體 (CAD) 所設計好的圖案曝光於電子束阻膠 (e-beam resist)，經顯影的動作後將圖案顯現出來的技術。廣義的電子束微影技術還包括後段製程，如蒸鍍、蝕刻等動作，將該圖案轉至各種材料 (如金屬、半導體) 薄膜上的整體製程技術。當高分子的電子束阻膠被能量約數十個電子伏特的電子束照射後，其分子鍵結或者被切斷 (正阻膠) 或被連結 (負阻膠)，在經過顯影的步驟後，使阻膠內有或無電子束反應的區域得以被區分。實驗室常使用的正電子阻膠有 PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯, polymethylmethacrylate)，及 ZEP520A (日本 ZEON 公司產品)。

電子阻膠的解析度受到幾個因素影響，第一為化學分子的極限：在室溫中電子束能同時破壞一大團的鍵結，由此可以定義出它們「顆粒」的大小，也就是說它的解析度不能比這個值好。例如 PMMA 的解析度優於 $30\ \text{nm}$ ，而其「顆粒」的大小約是 $2.5\ \text{nm}$ 。第二個因素為劑量過高或過度顯影造成線寬變粗的現象。比起 PMMA，ZEP520A 有很高的感光度，以同一電流量曝光時僅需約十分之一 PMMA 的曝光時間，也就是說 ZEP520A 僅需很小的曝光劑量就可將高分子鍵結打斷。曝光劑量的定義是單位面積內的電荷庫倫數，也就是 (曝光電流 \times 曝光時間) / 曝光面積。實際上曝光時，電子束是以數位裝置控制其位置與移動速度的，所以是先曝光不連續的點，再由點連成線，由線連成面。所以曝光劑量也可以點劑量或線劑量表示，它們與面劑量是可互相換算的。以下以 PMMA 為例，簡述一

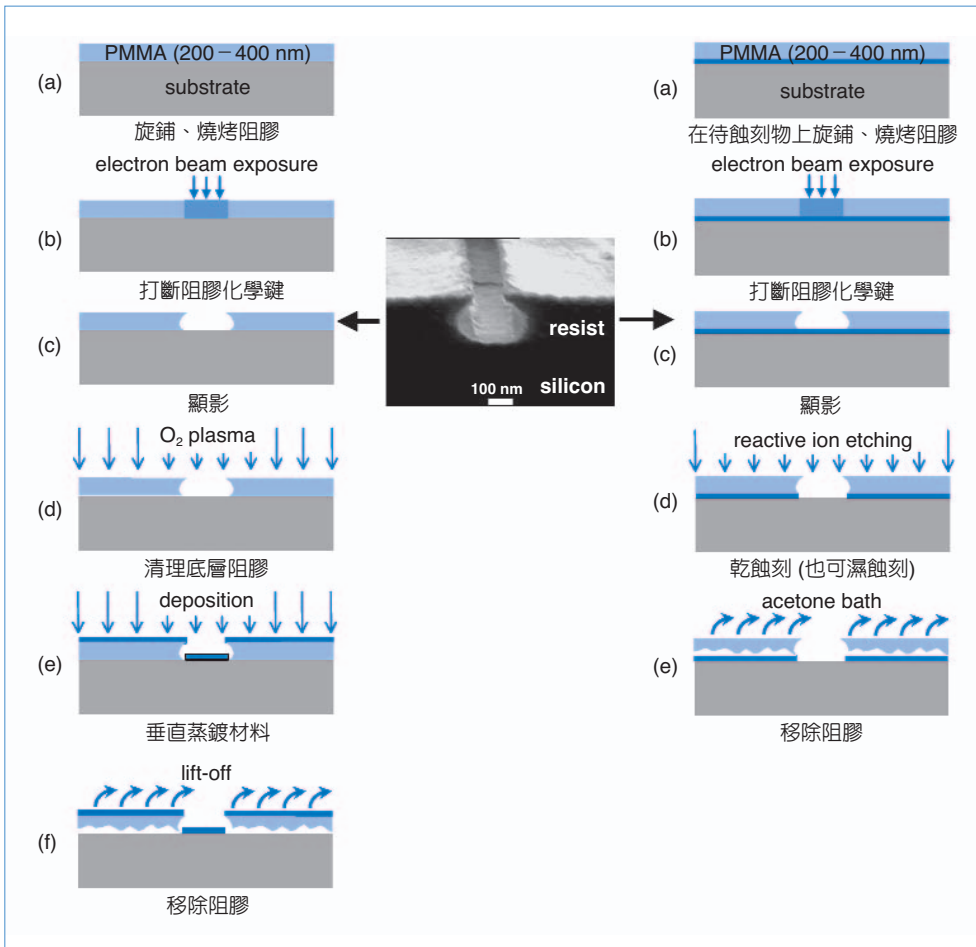


圖 1. 電子束微影技術。左列為舉離、右列為蝕刻的動作序列。蝕刻製程常用在待蝕刻物不易以蒸鍍方法製作或與舉離製程無法配合的情況時使用。但舉離製程一般比較容易控制線寬。中央的電子顯微鏡相片是曝光後阻膠的 undercut 截面圖。如以高加速電壓曝光，undercut 情況就會減小。

般電子束微影技術的流程，圖 1 為流程之示意圖。

1. 烘烤

將塗佈完成的晶片移入 hot-plate 上，以 135 度烘烤 (baking) 一個小時以上，其主要的目的在於將 PMMA 的溶劑 anisole 蒸發掉。

2. 曝光

將完成上述兩步驟之晶片移入電子束曝光機內，調整至適當工作高度 (working distance)，通常工作高度越短解析度越好。接著將電子束曝光機之各項設定包含像散、聚焦、光圈對準調整到最好的狀態，這個步驟通常是最重要的，它會影響到曝光 (exposing) 的解析度與圖形的失真度。之後將電腦輔助軟體上所設計的圖案透過控制電子偏轉線圈以及電子束光學 (electron optics) 系統以電子束在晶片上直寫出來。

3. 顯影

將直寫後的晶片以溫度維持於 22 °C 的 MIBK (methyl isobutyl ketone) : IPA (isotropy alcohol，異丙醇) = 1 : 3 的比例所調配成的顯影液顯像 60 秒，緊接著放入 IPA 中約 30 秒洗掉顯影劑，再將晶片用氮氣吹乾即可。顯影完的晶片已經具有奈米尺度的圖形，可依照不同應用之目的進行舉離 (lift-off，步驟 4(a)) 或蝕刻 (etching，步驟 4(b)) 等製程。圖 1 中央的電子顯微鏡照片為顯影完成後，電子阻膠的截面圖，請注意 undercut 的結構，這是由於二次電子曝光所造成的結果。這種 undercut 結構對舉離是非常重要的，因為如此才能分離蒸鍍後阻膠上與晶片上的薄膜。但 undercut 結構對蝕刻是不利的，因為蝕刻希望阻膠截面能有垂直的邊緣。

4. 舉離

將晶片放入真空蒸鍍 (熱蒸鍍或電子槍蒸鍍)

系統中，蒸鍍上所需要的材料。最後再將蒸鍍好的金屬放入電子阻膠的移除劑 (如丙酮) 中，將尚未曝光的電子阻膠以及不需要的材料薄膜區清除，進而得到所設計的圖形。圖 1 左列為舉離的程序。

5. 蝕刻

如果不需要蒸鍍材料薄膜，同樣可以把電子阻膠當作保護罩進行乾式 (以電漿) 蝕刻或濕式 (以化學腐蝕) 製程，將阻膠下面的材料蝕刻出設計好的圖案，最後再把電子阻膠放入電子阻膠的移除劑 (如丙酮) 中，將阻膠保護罩移除。如此一來就可以把圖形轉移到阻膠下面的材料 (如基板) 上。圖 1 右列為蝕刻的程序。

電子束微影其實是利用入射的電子在電子阻膠內產生散射，或是它們與晶片的晶格發生碰撞產生大量的背向散射電子及二次電子來作曝光的。比起光學曝光，電子束本身雖比較沒有繞射的問題，但由於二次電子的分布造成實際曝光區域大於電子束的聚焦大小情況。另外，由於全體二次電子分布的加成效果，靠近的兩個圖案之間區域的電子阻膠雖沒有受入射電子束直接照射，其化學鍵也可能會被改變，以致顯影後不能區別出其間隔，這種現象稱之為近接效應 (proximity effect)。圖 2(a) 畫有電子

在電子阻膠及晶片內軌跡的示意圖以及二次電子的能量—距離分布曲線，電子束微影技術的極限可說是由這些曲線來決定的。這個分布曲線會受到電子束的能量 (也就是加速電壓)、電子阻膠特性及晶片本身材質、厚度等多項因素的影響。如圖 2(b) 及 (c) 所示，目前有些新開發的機種開始提高加速電壓 (至例如 10 萬伏特) 以加長入射電子的穿透深度而減低二次電子的影響。目前用電子束微影技術一般可以寫到寬度小於 30 奈米的點或細線，在仔細控制的製程下甚至可達到 5 奈米的尺寸。

三、電子顯微鏡的考慮因素

電子顯微鏡不論其品質好壞，由於設計時的使用目的就是觀察樣品，所以當成一台電子束曝光機使用時自然是有其限制，如果這些限制是可以接受的，那這改裝會是一個相對經濟的方法。尤其是為了研發目的，如果僅要作少數奈米尺寸的樣品，改裝電子顯微鏡以作電子束曝光用，不失為一個可行的方法。改裝的電子束曝光機有下列幾個限制：

1. 受到樣品座移動精確度及穩定度的限制，不容易做長時間或大面積的曝光。一般電子顯微鏡的樣品座是以步進馬達移動，其移動精確度有

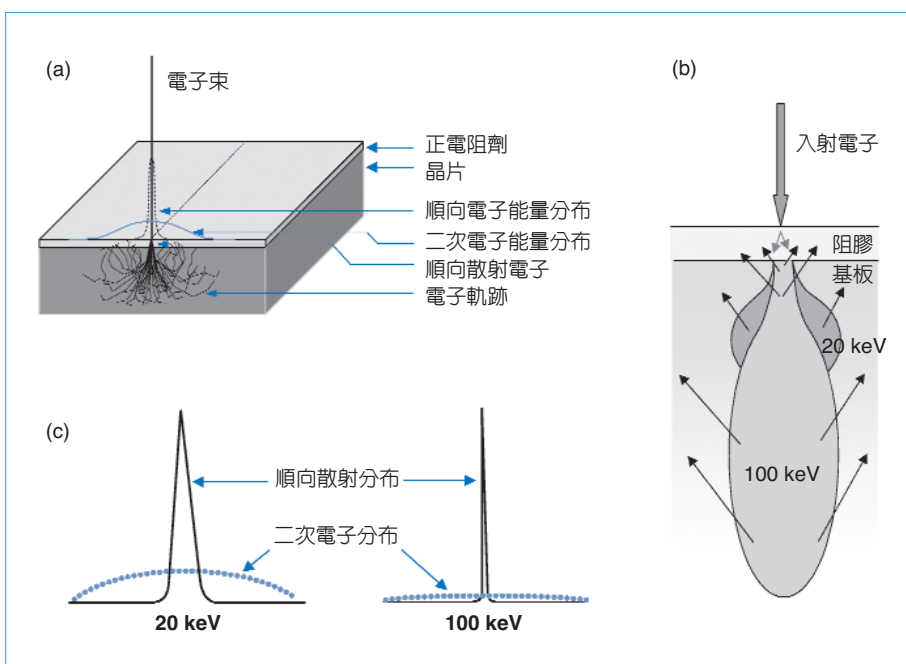


圖 2.
(a) 以電子束打入阻膠及基板時，電子束的順向散射及二次電子反向散射的軌跡示意圖。由於有二次電子曝光，使有效曝光截面大於順向散射曝光截面。(b) 以高加速電壓及低加速電壓曝光的散射截面之比較：高加速電子由於可打入基板較深，所造成的二次電子分布較廣 (如 (c) 圖所示)，但個數較少，其劑量不足以造成對阻膠的曝光，所以曝光多以順像散射電子為主，有效曝光截面也隨之減小，有利於小線寬結構之製作。

限，所以一般不考慮寫大於視野的面積。縮小放大倍率自然可以增大視野，但電子束 XY 偏向的雜訊會顯現出來。

2. 由於電子顯微鏡的電子束 XY 偏向雜訊較標準電子束曝光機高，再加上電子光學的設計不同，聚焦可能較短，欲曝最小線寬的圖案時，良率會較低。
3. 加速電壓較低也是一個缺點。一般而言，當作觀測用途之電子顯微鏡通常採用的加速電壓為 3 萬伏特或甚至更低，其主要的原因是不想太高的加速電壓破壞樣品，並且低加速電壓比較容易觀測到樣品表面的形貌。但是低壓時電子束微影技術常是利用二次電子對電子阻膠進行曝光，當提高加速電壓時，二次電子分布變廣，順向散射電子曝光逐漸變成主要因素，所以曝光的線寬也會較窄。也因此通常利用電子顯微鏡改裝之電子束曝光機，會採用其最高加速電壓進行曝光。

幾乎任何型式掃描式電子顯微鏡 (SEM) 都能被當作電子束曝光機，但是所達到線寬與穩定度會有不同的結果。電子顯微鏡由於是設計給觀測用，所以除了電子光學系統 (electron optic column, 見圖 3 右邊示意圖)，電子檢出器及影像處理功能都是很重要的。電子顯微鏡由於有影像處理功能，所以相對一些電子束 XY 偏向的雜訊可以被濾除掉。樣品機座如果會有飄移，也可能因照相時間不長，而不易被察覺。相對於此，做電子束曝光時僅寫一次，不能做平均也不能修飾，所以電子束曝光機對電子光學系統的穩定度及低雜訊的要求很高，但相反的對電子檢出器及影像處理功能要求不高。由於要求不同，最好的電子顯微鏡也未必就最適合改裝為電子束曝光機。

基本上電子顯微鏡可分三種型式：第一為熱燈絲式電子顯微鏡 (thermal filament SEM)、第二為冷陰極場發射式電子顯微鏡 (cold cathode field emission SEM)、第三為熱場發射式電子顯微鏡 (thermal field emission SEM)。熱燈絲式電子顯微鏡的電子束是由鎢絲或 LaB₆ 燈絲加熱激發出來，電流大小是三種型式裡面最大的，足以應付任何曝光應用需求。但是由於此型式之電子顯微鏡通常不具

備高解析度，因此解析度可能會比較差。冷陰極場發射式電子顯微鏡之電子束是利用場發射原理發射出來，由於針尖細，電子束也較細，因此解析度最好。但是因為利用場發射原理發射之電子束的電流非常小，容易受真空環境影響造成電流衰減或不穩定，所以若進行長時間曝光，前後劑量可能會不一。所以最適合當作電子束曝光機的電子顯微鏡為加熱針尖以輔助電子發射的熱場發射式電子顯微鏡。它一方面具有電流大的優點，另一方面又具有高解析度，最重要的是它具有極佳的電流穩定度，一般可達 0.1%/hour，這樣的穩定度足以適用於各種電子束微影技術的應用。

四、電子顯微鏡為基礎之電子束曝光機的改裝

圖 3 為改裝的硬體示意圖，大致描述如下。

1. 將電腦 DAC 卡的 XY 偏向訊號輸出接到電子顯微鏡的 XY 偏向輸入端子。基本上所有電子顯微鏡都有內建或可以要求選配 XY 偏向輸入端子或介面卡，事實上常用的 SEM EDS 功能也常會使用到此一介面裝置。改裝時，將一張裝於外接控制用電腦的 DAC 卡 (數位/類比轉換卡) 所提供二個電壓訊號接到這兩個端子來控制電子束的 XY 偏向，因此就能控制電子束以指定速度在指定位置上進行曝光。DAC 卡的雜訊及電子顯微鏡本身的雜訊大小是影響曝光效果的重要因素之一。例如當欲寫大面積時，希望視野大 (電顯倍率小)，但由於偏向訊號的雜訊，使線寬變更更差。外加偏向電壓的範圍是為讓電子束偏向至螢幕四個角落的 X、Y 電壓，一般電子顯微鏡也設計在 $\pm 5 - \pm 10$ V 間，使用上此範圍越大，S/N 比值越佳。為配合 DAC 卡的輸出阻抗，XY 偏向端子的輸入阻抗一般需大於 2 k Ω 以上。另外還有一點要注意的是：當切換至外部控制時，電子顯微鏡的內部掃描振盪線路一般來說都未關掉，這振盪的訊號 (尤其是較高頻的 X 偏向訊號) 有可能會影響曝光。一般 PC 介面的電子顯微鏡都具有軟體開關，可選擇內部掃描或外部控制訊號，則可用此軟體開關選擇 SEM 功

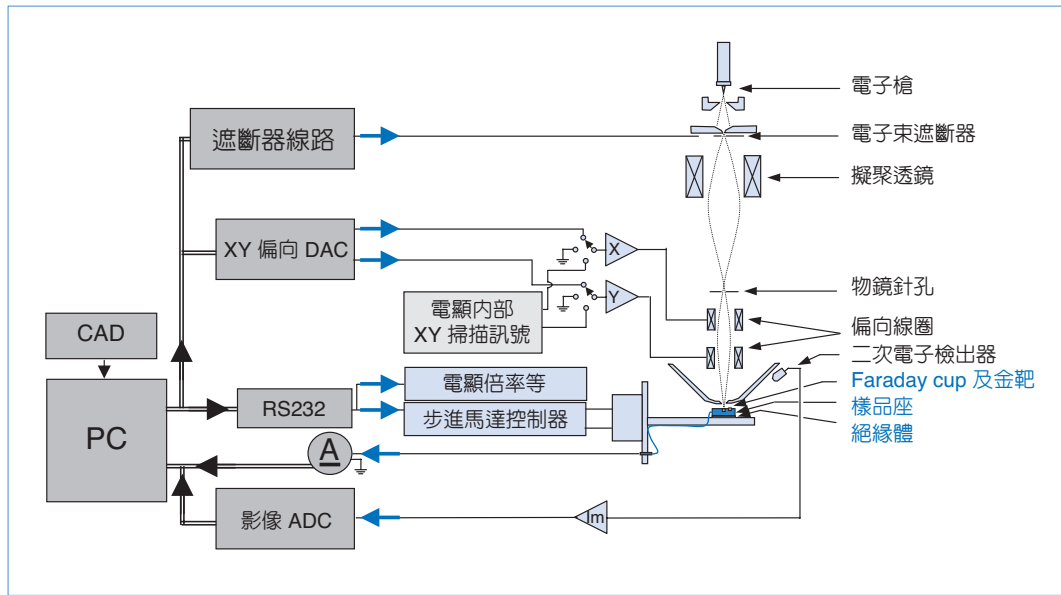


圖 3. 改裝的示意圖。左邊淺藍色部分是電子顯微鏡相關部分的方塊圖，最左邊是電子槍及電子光學部分。深藍色字體及深藍色電線是需自行加裝的部分。XY 偏向放大器前的開關可以是軟體開關 (如果是 PC 介面電子顯微鏡) 或是自己加裝的硬體開關 (如果是較早期的電子顯微鏡)，開關順序由上而下分別是曝光、打點 (spot) 及電顯模式。右邊是需改裝者準備的項目：遮斷器線路訊號、XY 偏向訊號、機座及倍率等控制訊號需由電腦或其擴充卡提供，而電子顯微鏡的類比影像輸出也需由電腦擴充卡讀入。電流計讀數也可以是手動輸入。中間連接線上的紅色箭頭是代表訊號出入方向。如果電子顯微鏡沒有遮斷器、沒有樣品座步進馬達 (這些都可加裝) 或倍率控制，也可以做曝光動作，但會有些限制，詳見內文。

能或電子束曝光功能。比較早期的電子顯微鏡可能無此軟體開關，則可自己做手動開關進行切換動作。

2. 將電子顯微鏡影像輸出接到 DAC 卡的類比輸入端子。一般 DAC 卡都會配有幾組 ADC 輸入端子。此一影像輸出訊號可讓外接的控制用電腦去攫取電子顯微鏡的影像，以便能讓使用者做對準 (alignment) 曝光的工作。通常進行兩層以上的製程時，必須把前一次曝光所製作的對準記號藉由此影像訊號進行自動或手動對準，才能精準定位第二次曝光的位置。
3. 將電子束遮斷訊號 (e-beam blank signal) 接到電子束遮斷電板 (e-beam blanker) 的驅動器。遮斷裝置的主要功能為依照圖檔區分曝光區域，當進行到不要曝光的區域時立即送 TTL 訊號至電子束遮斷電板的驅動器，以電場將電子束偏到光路外，使之不會照射於樣品上，故使用者不必擔心沒有關掉的電子束會對電子阻膠做不要

的曝光。這並不是必備的功能，但如果無此功能，比較不易區隔兩個相鄰的靠近圖案。遮斷裝置的速度越快越好，但也需配合 DAC 卡的電壓變換速度。對曝光靈敏度很高的阻膠，DAC 卡與遮斷裝置都需有很高的速度。

4. 讀取電子束電流量。為讀取正確的電流，需自製 Faraday cup，其方法如下：在非磁性金屬樣品座上做一小洞，洞內放置碳粉以吸收入射電子，再以鉬作的 pin hole 蓋住洞口，就構成 Faraday cup。此後，設計將此樣品座與電子顯微鏡的機座 (地線) 隔離，並經由適當的 electrical feedthrough 將 Faraday cup 接到顯微鏡腔體外面，並經由一台 pico-ammeter 接地，如此就可量測打到樣品的電流大小。從電子束電流與所設定之曝光劑量就可計算曝光時間，因此如果電流量測錯誤將造成曝光過度或不足。
5. 以 RS232 介面控制樣品台之移動、電子顯微鏡之倍率及自動對焦等功能。一般 PC 介面及配有

XY 軸步進馬達機座的電子顯微鏡皆可做到這些自動控制的功能。比較早期的顯微鏡可能就不易裝這些功能，雖不易使用，但這並不影響曝光的品質。

軟體部分包含兩部分，一為圖形繪製程式 (CAD)，利用這套軟體使用者可以繪製各種圖形，並可以把所繪製的圖形轉入執行檔進行曝光，曝光的劑量在圖形檔內一般是以不同顏色代表。另一部分是控制程式，負責執行檔的編撰。使用者在此定義曝光檔名、曝光順序、曝光劑量 (與顏色的關係) 曝光點與點間、線與線間的間距等需要之參數。控制的軟體會將設計好的圖案經由 DAC 卡轉為控制 XY 偏向的兩個類比電壓以控制偏向。此控制程式也經由同一 DAC 卡將接收電子顯微鏡的影像類比訊號表現在電腦螢幕以讓操作者做對準的工作。

我們實驗室改裝過兩台掃描式電子顯微鏡，一台為 Hitachi S-4200 冷陰極場發射式電子顯微鏡，它沒有電子束遮斷器，也沒有配備控制放大倍率等功能的介面裝置，所以使用上較不方便。但我們將其手動的 XY 樣品機座改為以 RS232 驅動的步進馬達機座，所以至少比較方便於使用對準曝光的功能。另一台為 FEI 公司所生產之 PC 介面的 Sirion 熱場發射式電子顯微鏡，它搭配有電子束遮斷器，也可控制放大倍率、樣品座步進馬達，使用較方便。在控制系統方面，我們使用美國的 Nanometer Pattern Generation System (NPGS，網站 <http://www.jcnabity.com/>)，它提供了多種廠牌型號的電子顯微鏡的控制程式。市售的控制系統除了 NPGS 外，據我們所知，還有德國的 Raith 公司 (http://www.raith.com/WWW_RAITH/nanolithography/nano_overview.html) 也提供了從低階到高階的幾種選擇，還包括備有雷射干涉儀座標定位的樣品座之完整 turnkey system。

五、電子束微影技術在奈米電子元件製程上的應用

電子束微影技術不需要光罩，可以輕易將電腦輔助設計之圖形轉移到樣品上，再搭配蒸鍍系統與乾蝕刻系統，即可製作出奈米圖案，所以廣泛應用

於各種領域，包括半導體光罩製作、奈米電子元件、奈米光電元件、分子電子元件、生化感測元件和量子電子元件研發等等，其應用範圍既廣且深。筆者實驗室的主要研究課題是在於奈米電子元件的開發製作及其物理特性的研究。本文僅就實驗室裡的研究課題稍作簡介。

奈米電子元件就是以奈米結構為核心所作成的電子元件。由於尺寸小，自然可以提高集裝密度與工作速度，同時也可降低工作電壓，這也是目前半導體工業一直要儘量把元件做小的主要原因。但是奈米電子元件的重點不只是在於其微小尺寸，更重要的是要能利用這種奈米尺寸結構的特性。對電子元件而言，奈米尺寸的結構有兩個基本的特徵：第一是體積小，如此不但可降低其電容量，提高電子進出此元件時電位能的改變量，這就是電荷效應 (charging effect) 的由來。如果體積作得更小，將會使電子在其內部的行動受限制，產生動能量化 (energy quantization) 的現象，也就是所謂的量子效應。第二是表面積與體積的比值大，這使其表面效應明顯表現出來，也容易與外界起化學反應。因為這兩個特性，奈米電子元件對外界的電荷變化有極高的靈敏度，可以用來檢測所有與電荷變化有關的物理或化學反應。

奈米電子元件可以由金屬或半導體的奈米顆粒或細線組成，也可以由非傳統的物質如奈米碳管、化學分子或生物分子組成。由於奈米顆粒或細線等材料並非都是以由大做小 (top down) 的奈米製程技術製作而成的，它往往需要利用以從小做大 (bottom up) 的原子自行組裝合成技術以及細線或碳管等的成長技術。然而奈米電子元件的製作不只是用到這兩項技術，更困難的是要把這兩項技術加以結合，也就是要把奈米顆粒、細線或分子銜接到奈米尺寸的電極上，這將牽連到表面化學及電子在介面間傳輸的特性等問題。換句話說，巨觀世界與奈米物質之間的互通聯繫是奈米科技發展必定面臨之重大挑戰，所以是必須結合固態物理、元件製程、材料科學、化學或分子生物學才能克服困難的一個嶄新領域。

電子束微影技術是發展奈米電子元件一項強而有力的工具。實驗室內主要的研究用元件都是利用

電子顯微鏡改裝的電子束曝光機、搭配顯影及蒸鍍、乾蝕刻技術並結合化學合成、生物分析技術製作完成的。應用這些技術，我們已作出多種研究領域之奈米電子元件。首先，在基礎物理研究方面，為研究電子聲子在奈米懸浮導線的交互作用，製作了如圖 4(a) 所示、寬度為 30 nm 但長度為數微米的金屬懸浮導線。同時也結合電子束微影技術與雙角度蒸鍍技術製作出超導與磁性物質之單電子電晶體⁽¹⁾，元件結構如圖 4(b)。在這種單電子電晶體元件中，超導奈米島受到電子自旋不平衡而造成超導導電性被壓抑。藉由此奈米元件可以瞭解奈米尺度超導與磁性之交互作用，進而能控制超導相變。此外能更清楚奈米磁區所表現出自旋翻轉機制與弛豫時間，這對發展自旋奈米電子元件是相當有用的資訊。圖 4(c) 是一維約瑟芬結之奈米電子元件⁽²⁾ 的部分區域之 AFM 相片圖，在此元件中，藉由調變磁場而控制一維約瑟芬結元件電性，因此觀察到從超導態轉變至絕緣態之量子相變行為。此外，結合奈米材料之合成技術，我們也已進行幾個新穎奈米電子元件研究，其中奈米碳管單電子電晶體就是一個很好的例子。由於奈米碳管具有準一維結構，其電性傳導性質是令人十分感興趣的。利用化學氣相沈積成長奈米碳管並加以定位後，再使用電子束微影技術製作電極並進行電性量測，圖 4(d) 為奈米碳管元件之電子顯微鏡照片⁽³⁾。實驗結果顯示此奈米電子元件具有單電子電晶體的重要特性，例如庫倫阻斷、庫倫振盪等效應。

當材料縮小至奈米尺度時，電子傳輸特性、光學性質通常是未知但隱含許多截然不同於巨觀世界的豐富物性。為了把奈米材料加上電極進行量測，我們結合了化學自行組裝合成技術製作了如圖 4(e) 所看到的元件⁽⁴⁾。所使用的系統是把直徑約為 14 奈米的金顆粒包一層碳六十的小顆粒，再把它夾於一對懸浮於空中的金電極的間隙中。間隙的大小約為 15 奈米。為了要使它們能支撐本身的重量，電極的寬度約是 180 奈米。在完成電極的製作之後，把電極浸泡於含有預先合成好的金一碳六十顆粒的溶液中，這些奈米顆粒可藉由巖基而與兩端的金電極連接上。電性量測的結果顯示，由於有碳六十的顆粒夾雜於其間，電流隨閘極電壓的變化顯現出單

電子電晶體特有的庫倫振盪的特性。

筆者對於各種材料的單電子電晶體之所以感興趣是因為這種元件具有發展的潛能。單電子電晶體的最大特色是具有非常高的電荷靈敏度。目前實驗的報導，在一秒內，場效應電晶體可量到百分之一個電子電荷量變動，但單電子電晶體可量到百萬分之一個電子電荷量變動。這靈敏度可使用於電流標準器及單一光子的檢測器，另外在物理方面，它也被用來作量子電腦的運算單元。未來若想要把它應用於一般的民生科技上，則需要有可在室溫工作的單電子電晶體，目前較有可能達成室溫工作的單電子電晶體是以矽材料為基礎的單電子電晶體。它的優點是可以利用氧化、蝕刻加以縮小元件尺寸，所以製作出的元件可以克服熱擾動達成於室溫操作的目標。並且最主要優點是可以結合現今的半導體製程，所以矽單電子電晶體也是被相當關注的焦點之一。圖 4(f) 為矽單電子電晶體的電子顯微鏡照片，目前所達到的工作溫度接近室溫，並且在低溫環境還能呈現單一週期的庫倫振盪效應。除此之外，開發跨領域的奈米電子或光電元件也是重要的研究課題。圖 4(g) 是結合電子束微影技術與化學電鍍技術製作出來的具有介電性質之半導體材料，並且具有高深寬比之週期性二維柱狀光子晶體結構⁽⁵⁾。由於電子束微影術可改變排列週期、空間結構，而電鍍技術可製作所需之介電常數材料，因此可作為光通訊應用之光電元件，同時亦可鍵結生化物質形成規則排列之生化感測器。同樣是規則排列的奈米結構，圖 4(h) 為以 SOI (silicon on insulator) 配合乾式蝕刻所製作而成的光子晶體結構之電子顯微鏡照片。

六、結論

在本文中簡單的介紹電子束曝光的技術，也敘述了筆者改裝電子顯微鏡為電子束曝光機的經驗。同時也分析改裝的設備比起一般專業化的電子束曝光機一些性能上或功能上的差異，希望能提供給欲作電子束曝光的實驗室參考。一個簡單的結論是，對研發工作而言，改裝的設備在電子束曝光的應用上應可符合一般的要求，但可能由於加速電壓的偏

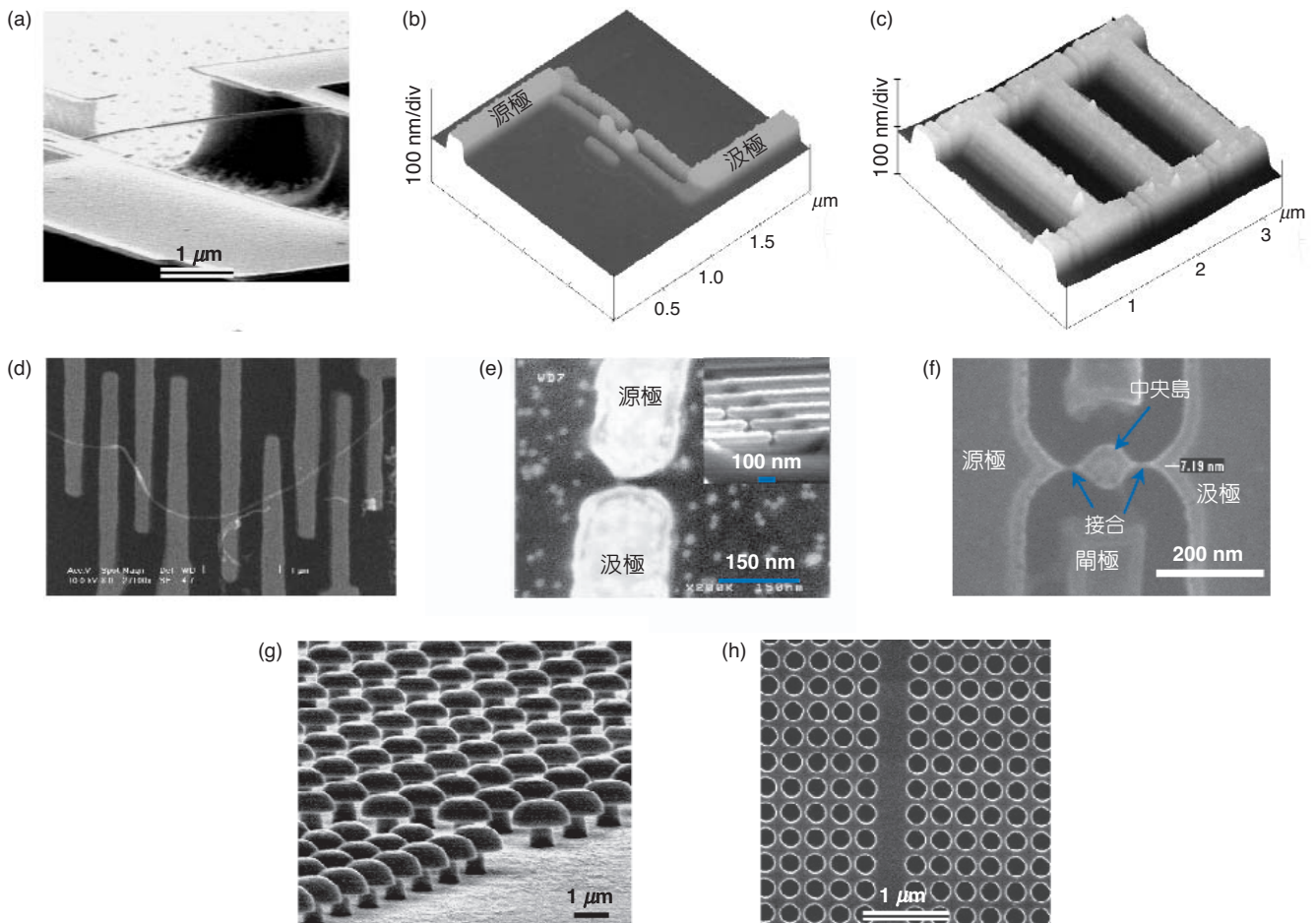


圖 4. 筆者實驗室以改裝的電子顯微鏡製作出來的一些元件：(a) 懸浮的合金導線，寬 30 nm，長數微米。(b) 及 (c) 磁性超導的單電子電晶體及一維鋁約瑟芬結元件的原子顯微鏡相片。(d) 多層奈米碳管元件的電子顯微鏡相片。(e) 以奈米金顆粒形成的單電子電晶體，插圖是未加金顆粒前的電極截面照片。(f) 以 SOI 製程製作出的矽單電子電晶體，經由氧化蝕刻動作，可將接合點線寬縮到 10 nm 以內。(g) 配合電鍍所形成的二維 CdSe 蘑菇形陣列。(h) 在 SOI 上經由乾蝕刻製程所製作出的二維規則圓洞陣列，用以做光子晶體。

低、電子束偏向系統的雜訊、數位類比轉換器的速度、樣品座的穩定度等問題，將使最小線寬、曝光面積、製程良率等稍受限制。如果這些限制是可以接受的，改裝電子顯微鏡成為電子束曝光機是經濟實用的一個解決方案。在電子束微影技術方面，設備的好壞當然是重要的，但是使用者還須對機器特性、阻膠特性及曝光顯影參數等有充分瞭解才能顯像出小的線寬。此外要注意的是，電子束曝光雖是奈米結構製程中一個關鍵的步驟，但還需有前面的光學微影技術及後續的蒸鍍、蝕刻等多方面製程的

配合，才能製造出想要的奈米結構或電子元件。尤其是電子元件的製程方面，往往不是結構完美就完成了，很多元件設計、材料問題、電性接觸等問題也都必須解決才能製作出可以使用的元件。這些都不是在本文討論的範圍內。最後，本文介紹筆者以改裝的電子顯微鏡所做的一些電子元件的原子力顯微鏡、電子顯微鏡相片，以提供作參考。感謝中央研究院物理研究所量子電子元件實驗室的學生及助理提供了這些電子元件的相片。

參考文獻

1. C. D. Chen, Watson Kuo, D. S. Chung, J. H. Shyu, and C. S. Wu, *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 047004 (2002).
2. W. Kuo and C. D. Chen, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 186804 (2001).
3. Y. F. Hsiou, Y. J. Yang, L. Stobinski, W. Kuo, and C. D. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 984 (2004).
4. C. S. Wu, C. D. Chen, S. M. Shih, and W. F. Su, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 4595 (2002).
5. Ya-Wen Su, Cen-Shawn Wu, Chia-Chun Chen, and Chii-Dong Chen, *Adv. Mater.*, **15**, 49 (2003).

-
- 陳啟東先生為瑞典查爾默科技大學應用物理博士，現任中央研究院物理研究所副研究員。

- 吳憲昌先生為國立彰化師範大學物理碩士，現為國立台灣大學光電工程研究所博士班學生。
- Chii-Dong Chen received his Ph.D. in applied physics from Chalmers University of Technology, Sweden. He is currently an associate research fellow in the Institute of Physics, Academia Sinica.
- Cen-Shawn Wu received his M.S. in physics from National Changhua University of Education. He is currently a Ph.D. candidate in the Institute of Electro-Optical Engineering at National Taiwan University.