

應用於桌上型掃描式電子顯微鏡之背向散射電子偵檢器研究與製作

Fabrication and Study of Backscattered Electron Detector for Desktop Scanning Electron Microscope

林瑋叡、莊昀儒、陳福榮

Wei-Ruei Lin, Yu-Jun Chuang, Fu-Rong Chen

本研究設計的多片環形背向散射電子偵檢器，只需收集背向散射電子，即可顯示試片的原子序對比以及表面形貌分辨率。相較於典型的多片扇形背向散射電子偵檢器，具有更好的原子序敏感度以及表面形貌對比。多片環形背向散射電子偵檢器考慮入射電子束與不同的試片傾斜角度，產生不同的背向散射電子的角度分佈，設計了多片環形的空乏區，使多片環形背向散射電子偵檢器可收集不同分佈角度的背向散射電子，故可提升表面形貌對比。

The multi-annular backscattered electron detector (BSED) proposed in this thesis has been evolved so that collecting BSEs is already adequate for the display of Z-contrast as well as surface topography. Compared with the traditional multi-fan shaped BSED, the BSED proposed in this thesis can provide higher sensitivity of Z-contrast and better surface topography contrast. With the consideration that different angular distribution of BSEs can be resulted from different tilt angles between the BSEs and specimens, a multi-annular BSED has been proposed in this thesis. Benefited by this structure, BSEs from different angular distribution can also be collected, improving the quality of the surface topography contrast.

一、前言

四百多年前，光學顯微鏡的發明對於近代科學研究有了重大的影響，其發明的原動力來自於人們想要更進一步的瞭解肉眼所無法觀測到的微小物體。在十七世紀，英國人虎克 (Robert Hooke) 利用光當作光源，自行發明的複合式顯微鏡觀察軟木塞

細胞，開啟了顯微學蓬勃發展的大門。一直到十九世紀，顯微鏡的發展已有了長足的進步，並奠定了現今顯微鏡的基本規格。時至今日，隨著製程技術的進步，科學研究尺度已經由微米時代進入到奈米時代，由於光學顯微鏡 (optical microscopes, OMs) 受限於光源，其解析度最佳只能達到約0.3微米。光學顯微鏡無法滿足現今觀測的需求，進而發展

了電子顯微鏡 (electron microscopes, EMs)。電子顯微鏡放大倍率可至 10000 倍以上，而景深 (depth of field) 更是光學顯微鏡的 300 倍以上。可觀察更細微的部分，除了這些優點外，電子顯微鏡及其週邊設備還具有分析晶體結構 (crystal structure, CS)、微細組織 (micro structure, MS)、化學成分 (chemical composition, CS)、化學鍵結 (chemical bonding, CB) 和電子分佈情況 (electronic structure, ES) 等用途。

掃描式電子顯微鏡主要是由電子槍 (electron gun)、聚光鏡 (condenser)、掃描震盪器 (scan generator) 以及影像放大器 (video amplifier) 等等所組成的，其工作原理係將電子槍產生的電子，經過電壓差 5–50 keV 使電子加速，再經由聚光鏡以及探針形成透鏡 (probe-forming lens) 聚焦形成電子束使用掃描震盪器掃描試片。當入射電子束掃描試片時，電子束與試片發生交互作用力產生訊號，電子束與試片產生的訊號主要分成兩種；二次電子訊號以及背向散射電子訊號。二次電子能量低、作用體積 (interaction volume) 小，故對試片的表面起伏敏感，掃描式電子顯微鏡觀測試片的表面形貌都以偵測二次電子訊號為主。然而背向散射電子多寡與原子序有關，故掃描式電子顯微鏡觀測試片的元素組成則以偵測背向散射電子訊號為主。使用二次電子偵檢器、背向散射電子偵檢器以及 X 光偵檢器，收集這些訊號經過影像放大器放大訊號分析試片。電子束與試片產生的訊號無法直接透過肉眼觀察，所以必須利用偵檢器 (detectors) 加以收集，並產生影像訊號以方便使用者讀取。

根據不同的材料以及處理的方式，背向散射電子偵檢器大致上可分為 E-T 偵檢器 (everhart-thornley detectors)、閃爍背向散射電子偵檢器 (scintillation detectors) 以及固態背向散射電子偵檢器 (semiconductor detectors)。由於固態背向散射電子偵檢器之製程較簡易且成本也較另外兩類型之偵檢器來的低，故本文將以固態背向散射電子偵檢器做為研究重點。背向散射電子半導體偵檢器發展歷史已久，在 1968 年，Thornton 首先設計了兩片半環形 (semiannular) 背向散射電子偵檢器，擺放的位置於入射電子束同軸心處，擺放此處以及此環形的設計，是考慮了背向散射電子的分佈情形，擺放

至此處以及環形會具有最大的幾何效率，而分成兩片半環形的目的是為了提升背向散射電子對表面形貌的解析，如圖 1(a) 與 (b) 所示。當入射電子束掃描試片，掃描至原子序較大的區域時，因背向散射係數變大，而產生較多的背向散射電子，使得背向散射電子偵檢器的電流訊號提升，反之當入射電子束掃描在原子序較小的區域時，因背向散射係數變小，而產生較少的背向散射電子，使得偵檢器電流訊號下降，當將 A、B 偵檢器兩個電流訊號相加，產生的電流訊號與試片表面形貌無關，只與背向散射係數有關，故可利用 A + B 分析試片的原子序對比。當試片掃描在相同原子序大小的凹低起伏的試片上時，試片的表面形貌會影響背向散射電子偵檢器的收集立體角 (solid angle) 以及背向散射係數，改變背向散射電子偵檢器收集背向散射電子的數目，使得電流訊號改變，當 A、B 偵檢器兩個電流訊號相減時，此時表面形貌對比度明顯。A. Munden 和 D. Walker 在 1973 年，製作環形的表面障礙層偵檢器來偵測背向散射電子⁽¹⁾，當時反應速度太慢，無法用於較快之掃描速率，其原因為當時的偵檢器厚度為 6.3 mm，而反應速度考慮因素包括，背向散射電子進入到偵檢器內產生電子-電洞對所須要的時間，電子-電洞對受到內建電位在空乏區飄移的時間以及擴散至兩端傳至其他電子元件所需要的時間，全部相加在一起就是為背向散射電子偵檢器的反應時間，因此時半導體技術未純熟，故無法製作太薄的晶圓，而在當時 6.3 mm 已經是非常薄了。之後由 J. Stephen 等人在 1975 年製作的環形的 P-N 接面偵檢器⁽²⁾，雖有低的雜訊，但因高電容仍無法用於較快之掃描速率。隨半導體工業進步，D. Gedcke、J. Ayers 和 P. DeNee 在 1978 年製作的環形的表面障礙層偵檢器偵測背向散射電子⁽³⁾，此時的偵檢器已可用於較快的掃描速率，且仍具有低的雜訊的優點，此時偵檢器的大小為直徑為 37 mm、厚度降至 2.7 mm。G. Fritz 等人在 1999 年製作擴散接面偵檢器⁽⁴⁾，如圖 2。相較於離子佈植形成的 P-N 接面，擴散接面偵檢器側面仍有具空乏區，在相同收集背向散射電子的面積下仍有更大的工作區域。但擴散製程對溫度以及濃度敏感，在製程控制上較為困難。且每個工作面

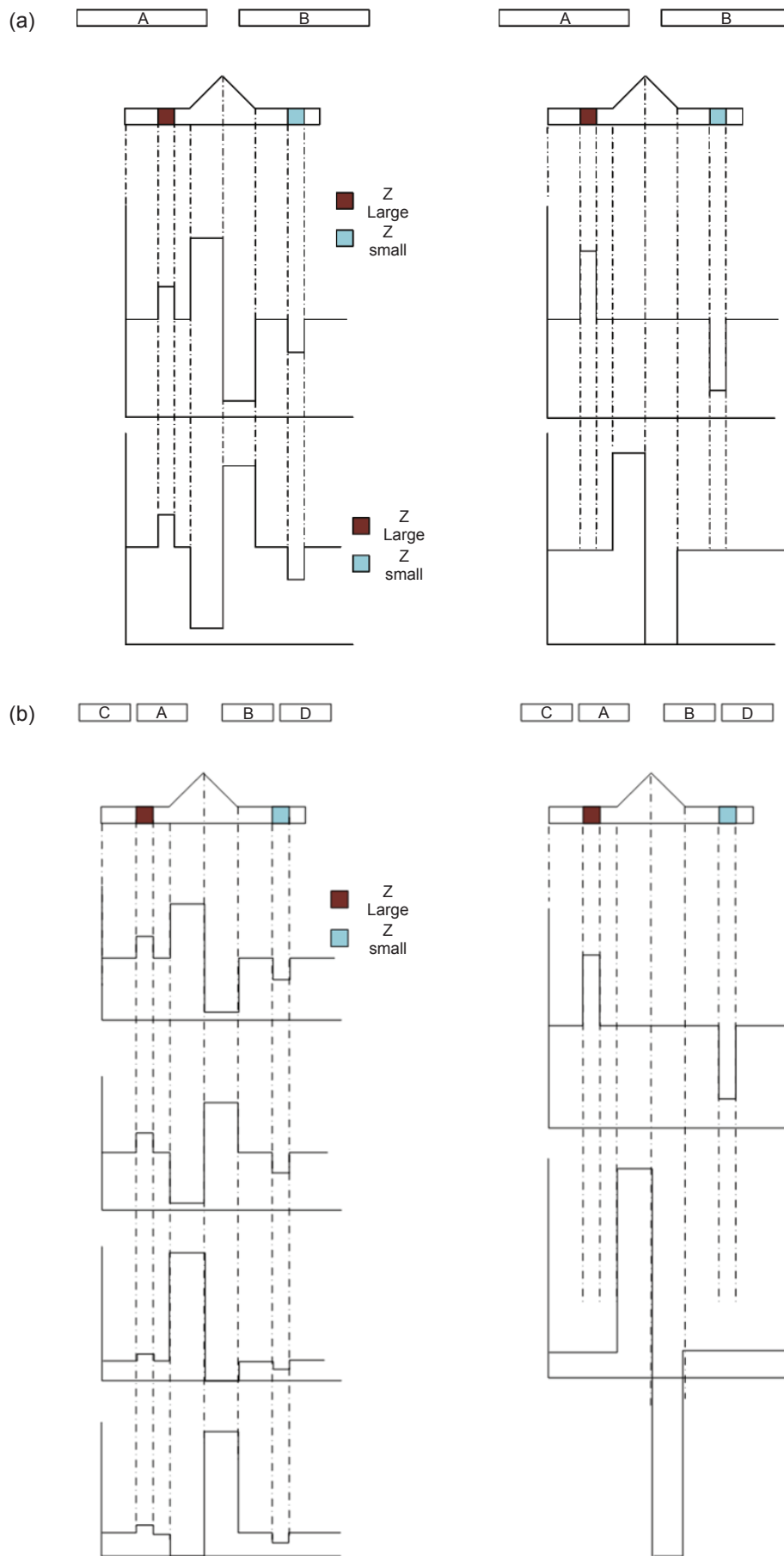


圖 1. (a) 多片扇形偵檢器測得訊號與試片的關係圖、(b) 多片環形偵檢器測得訊號與試片的關係圖。

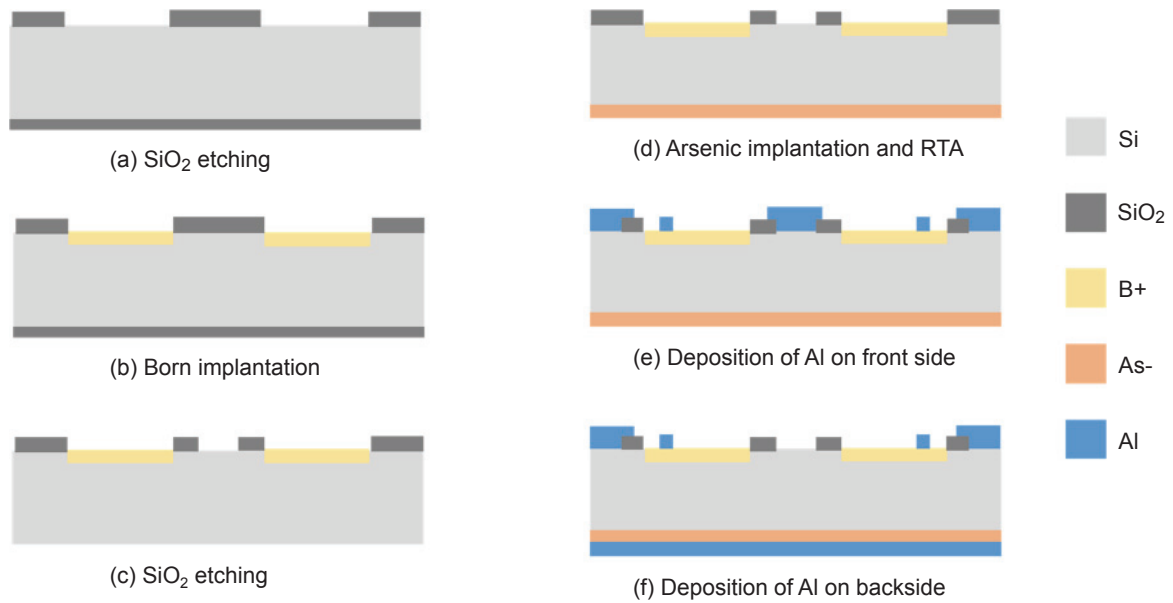


圖 2. 典型多片扇形背向散射電子偵檢器流程圖。

積的間隔距離必須足夠分開，避免空乏區重合，造成交互影響(cross talk)。G. Meier 等人在 2009 年亦設計了表面障礙層偵檢器，採用金屬－半導體－金屬界面 (metal-semiconductor-metal junctions, MSM Junctions) 所形成之背向散射電子偵檢器⁽⁵⁾，金屬－半導體－金屬界面起初是於用於光子的偵檢器亦可用於偵測電子偵檢器，而金屬－半導體－金屬界面具有快的反應時間、高的增益以及長的壽命等優點，但仍具有較厚之無感層這項缺點。除了常見的環形背向散射電子偵檢器外，在 1998 年，D. Kaczmarek 收集不同角度的背向散射電子分析試片表面形貌⁽⁶⁾，利用大角度的背向散射電子分析試片原子序的對比，小角度的背向散射電子分析試片表面形貌的對比。

本論文研究動機為，提升背向散射電子偵檢器的表面形貌解析度。市面上販售的背向散射電子偵檢器透過多片扇形的設計，亦可得知試片的表面形貌的對比，但表面形貌的解析度，仍不甚理想。本研究考慮背向散射電子的角度分佈，設計多片環形結構，可收集不同角度的背向散射電子，提升試片的表面形貌對比。掃描式電子顯微鏡不斷的朝著解析度的提升、操作的容易性、體積的縮小化以及價格的下降等方向前進。

二、實驗方法

1. 背向散射電子偵檢器製程

典型的多片扇形背向散射電子偵檢器與本研究設計的多片環形背向散射電子偵檢器製程其步驟透過黃光微影來定義工作面積的形狀以及大小。先利用丙酮 (acetone) 清潔均勻的倒在晶圓表面，去除表面上有機殘留物。在晶圓上的丙酮未乾前，以異丙醇 (isopropanol, IPA) 沖洗，再使用去離子水 (deionized water, DI Water) 沖洗後，可使非親水性的丙酮徹底清洗掉，並反覆上述步驟多次，最後以氣槍將水分吹乾。再來將晶圓放置於加熱板上，去水烘烤，確保晶圓上無水分。接著蒸鍍六甲基二矽胺 (hexa-methylene-di-siloxane, HMDS) 做為光阻之附著劑。之後塗佈正光阻 AZ-5214，將佈好光阻的晶圓，放置於加熱板上進行軟烤。目的在於本研究所使用的曝光機為接觸式曝光機，避免光阻太軟而黏於光罩上造成汙染，亦不可烤太久，避免曝光量不足而造成顯影不易。曝光後的晶圓使用顯影液 300-MIF 來進行顯影，將所需的圖案定義出來便完成了黃光微影的步驟。

黃光微影製程後，進行二氧化矽的體型微加工，此道製程之目的為將工作區域之二氧化矽去

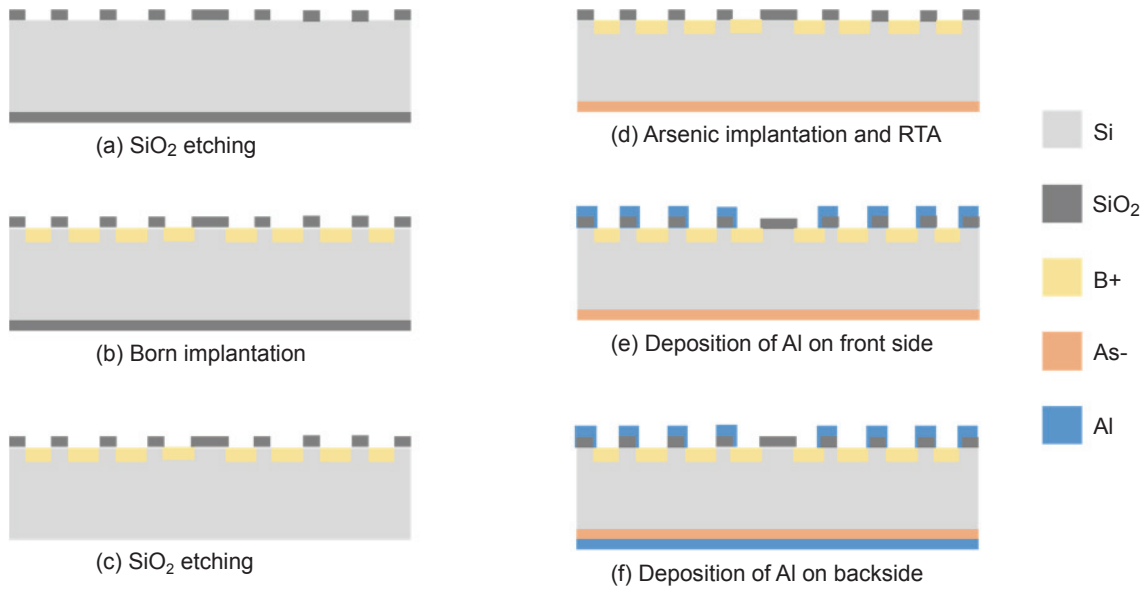


圖 3. 多片環形背向散射電子偵檢器流程圖。

除，以便之後的離子佈植。去除二氧化矽的蝕刻液為緩衝氧化層蝕刻 (buffered oxide etch, BOE)，緩衝氧化層蝕刻組成由氫氟酸 (hydrogen fluoride, HF) 加入氟化銨 (ammonium fluoride, NH_4F) 當緩衝溶液，控制酸鹼值，並且也可補充氟化物離子，相較於稀釋後的氫氟酸，更有穩定的蝕刻性。而此道製程決定背向散射電子偵檢器之工作區域。然後將定義完工作區域的晶圓進行離子佈植，正面離子佈植定義空乏區深度以及寬度，背面離子佈植使矽晶圓與金屬接觸時產生歐姆接觸。此製程之目的為在 N 型半導體產生 P-N 接面形成空乏區以及工作區域背面產生歐姆接觸。離子佈植完後，矽晶圓會受加速的離子撞擊造成損傷，嚴重還有可能變成非晶質 (amorphous) 結構，且佈植後的離子大多仍為格隙原子 (interstitial atoms)，並未佔據矽晶格點位置，故必須加熱至高溫使佈植的離子佔據矽晶格點位置變為置換型原子 (substitutional atoms)。本研究採用的退火方式為快速熱退火 (rapid thermal annealing, RTA)，相較於一般的爐管退火，快速熱退火加熱速度快且持溫時間短，使得離子擴散距離較短，不會使佈植後的濃度明顯下降，而造成空乏區的內建電位，電位能下降。最後，利用濺鍍機 (sputter) 在晶圓的正反兩面沉積上一層鋁金屬，再利用黃光微影的製程將電極圖案轉移至晶圓上，利用磷酸、硝酸、醋酸以及去離子水的混合溶液 4:1:4:1，加熱

至約 40°C ，將鋁蝕刻定義出電極。此電極可將背向散射電子在空乏區產生的電子-電洞對，從空乏區內引導出來連接到其他電子系統中再轉換成形成影像之訊號。上述的製程完成後進行雷射切割，將環形背向散射電子偵檢器從晶圓上切下並且將中心挖孔，再將得到的背向散射電子偵檢器進行打線接合 (wire bonding, WB)，完成背向散射電子偵檢器的元件製作。圖 2 與圖 3 為偵檢器製程之流程圖；圖 4 與圖 5 則為接線完成的多片扇形背向散射電子偵檢器與多片環形背向散射電子偵檢器。除了定義的工作面積之幾何形狀以及大小不同以外，其它如離子佈植、快速熱退火及鍍鋁的厚度之製程皆相同。以便證實後續測試得電流數據的差別是來自於工作面積的幾何形狀以及大小所導致的。

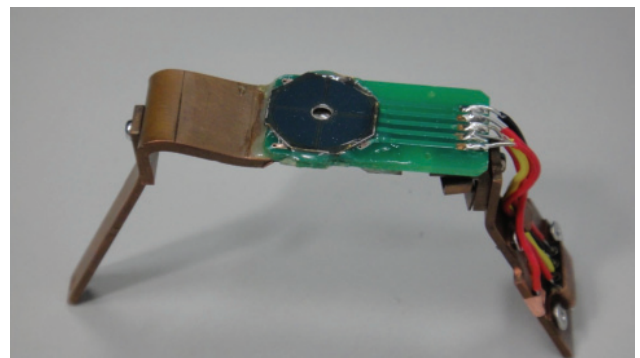


圖 4. 接線完成的典型多片扇形背向散射電子偵檢器。

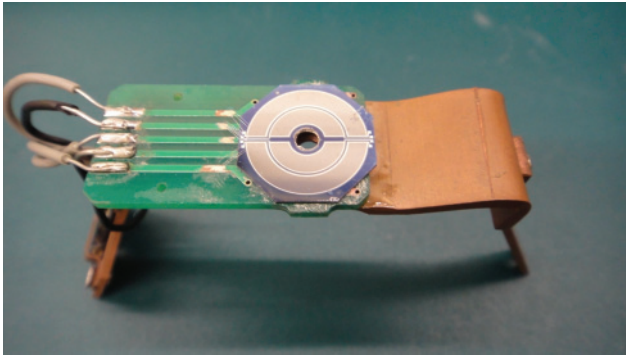


圖 5. 接線完成的多片環形背向散射電子偵檢器

2. 表面形貌測試之樣品製備

表面形貌測試片採用純矽的晶圓來製作，利用黃光微影定義出所要的形狀後，再藉由控制反應式離子蝕刻機 (reactive-ion etching, RIE) 來完成蝕刻寬度及蝕刻深度。所得到的表面形貌測試片線寬約

為 $2.72\ \mu\text{m}$ ，而深度約為 $1\ \mu\text{m}$ ，如圖 6。由於試片為純矽的晶圓，故當收集到的電流值有高低差別，表示此電流差別是來自表面形貌的差異而非原子序的對比。

3. 原子序對比之樣品製備

原子序對比即原子序需差距多少背向散射電子偵檢器方能分辨。故設計一個測試片，表面平整而原子序有差異，確保背向散射電子偵測到的電流值差異完全來自於原子序的對比。所使用的試片為鋁 (aluminium, Al)、鈦 (titanium, Ti)、鈷 (cobalt, Co)、鎳 (nickel, Ni) 以及銅 (copper, Cu) 鑲埋在一起後進行拋光，確保試片之平整，減少表面形貌造成電流值的影響，如圖 7。選用這五種元素的原因為，這些金屬不會產生電荷累積以及原子序相近且都在 30 以下，都屬於背向散射電子係數的線性範

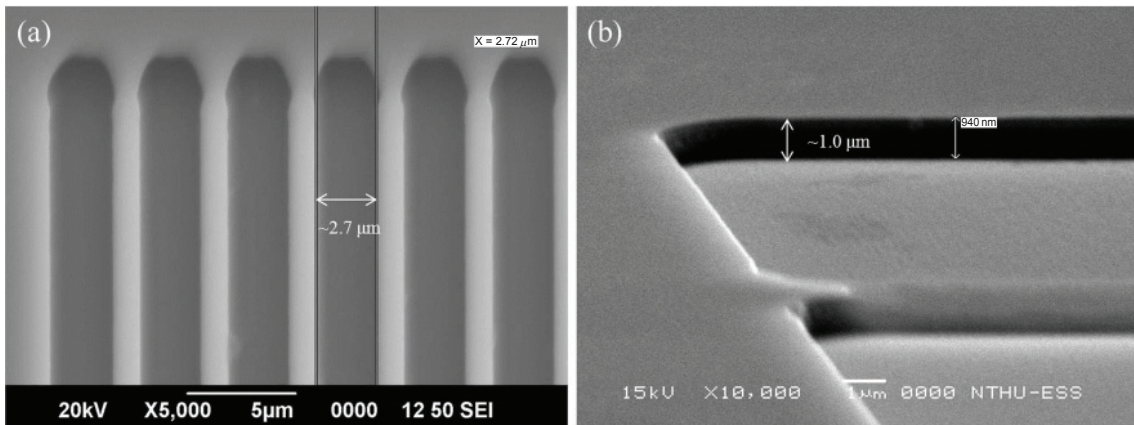


圖 6. (a) 表面形貌對比測試片上視之二次電子影像圖、(b) 表面形貌對比測試片側面之二次電子影像圖。

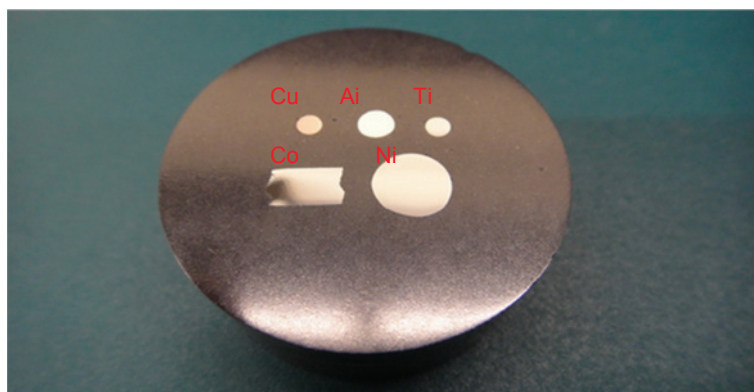


圖 7. 原子序敏感度測試片影像圖。

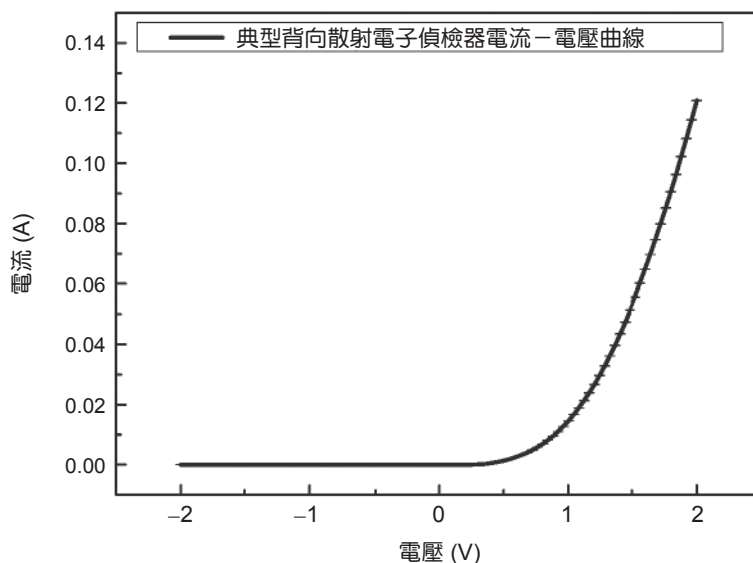


圖 8. 典型多片扇形背向散射電子偵檢器之電流－電壓曲線。

圍內，鋁、鈦、鈷、鎳以及銅原子序分別為 13、22、27、28 以及 29 而代入公式

$$\eta = -0.0254 + 0.016Z - 1.86 \times 10^{-4}Z^2 + 8.3 \times 10^{-7}Z^3$$

可得到背向散射係數分別為 0.153、0.245、0.287、0.295 以及 0.302。

此量測的方法為，將自製的背向散射電子偵檢器實際裝置在掃描電子顯微鏡上進行拍攝測試原子序敏感度試片，並量測其偵檢器的電流值。

三、結果討論

1. 電流－電壓曲線圖

製作完成的背向散射電子偵檢器先進行電流－電壓曲線圖測試。此測試可知背向散射電子偵檢器基本電性特性、暗電流以及每個區塊是否具有相同電性。背向散射電子偵檢器工作區域劃分多塊，必須確定同一片背向散射電子偵檢器其不同塊的工作區域具有相同的電性，確保之後影像分析得到電流值的差異，是來自接收到不同數目的背向散射電子所引起的，而非背向散射電子偵檢器本身電性的差異，故必須先得知電流－電壓曲線圖。量測背向散射電子偵檢器的電流電壓曲線圖時，背向散射電子偵檢器不可照光以免產生雜訊，且測試時溫度亦為

定值。

圖 8 為典型多片扇形背向散射電子偵檢器的電流－電壓曲線，當電壓為 0 伏特時，此時背向散射電子偵檢器的暗電流約為 0.3 nA。此電流－電壓曲線滿足 P-N 接面的電流－電壓特性，在順向偏壓 (forward bias) 下電壓愈大電流愈大，而在逆向偏壓 (reverse bias) 下，會產生逆向飽和電流。圖 9 為多片環形背向散射電子偵檢器的電流－電壓曲線，當電壓為 0 伏特時，此時背向散射電子偵檢器的暗電流約為 0.1 nA。此測試得到的電流－電壓曲線亦滿足 P-N 接面的電流－電壓特性，且暗電流值以及順向偏壓得到的電流值皆比多片扇形還來的低。

2. 表面形貌對比測試

表面形貌對比的定義為

$$\text{表面形貌對比} = \frac{\text{偵檢器電流值的差異}}{\text{表面高低的差異}} = \frac{I_A - I_B}{H_A - H_B}$$

其中 I_A 、 I_B 分別為入射電子束照射在試片頂端、底部時，背向散射電子偵檢器所量測到的電流值，而 H_A 、 H_B 分別為試片頂端、底部的高度，如圖 10。當入射電子束垂直掃描試片表面的頂部時，產生的背向散射電子到進入到背向散射電子偵檢器內，不會因為表面形貌的起伏阻擋背向散射電子的

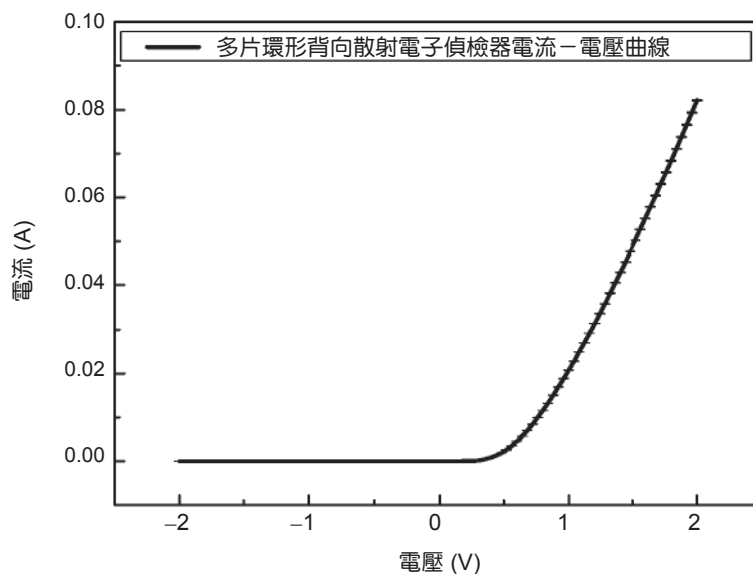


圖 9. 多片環形背向散射電子偵檢器之電流－電壓曲線。

收集，而影響降低幾何效率，故此時的電流值較大，而當電子束垂直掃描在試片表面的底部時，產生的背向散射電子會受到表面形貌起伏的阻擋，幾何效率下降，使得量測到的電流值下降。故利用此特性可以得知表面形貌高低，影響電流值差異，了解背向散射電子對表面形貌的對比度。實際量測背向散射電子偵檢器之電流，多片環形背向散射電子偵檢器的電流值雖比多片扇形背向散射電子偵檢器所量測到的電流值小，但在加速電壓為 20 keV 時，多片扇形背向散射電子偵檢器表面形貌對比約為 $40.08 \text{ nA}/\mu\text{m}$ ，而多片環形背向散射電子偵檢器的表面形貌對比約為 $82.11 \text{ nA}/\mu\text{m}$ ，是因多片環形背向散射電子偵檢器，雖然只利用外環進行試片表

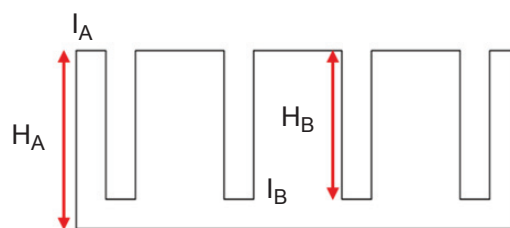


圖 10. 表面形貌測試試片示意圖。

面形貌的量測，雖使得能收集的背向散射電子數目變少，但只收集對表面形貌敏感的小角度背向散射電子，使得有更好的表面形貌的對比。圖 11 為使用典型多片扇形偵檢器以及多片環形偵檢器所拍攝的表面形貌試片圖。

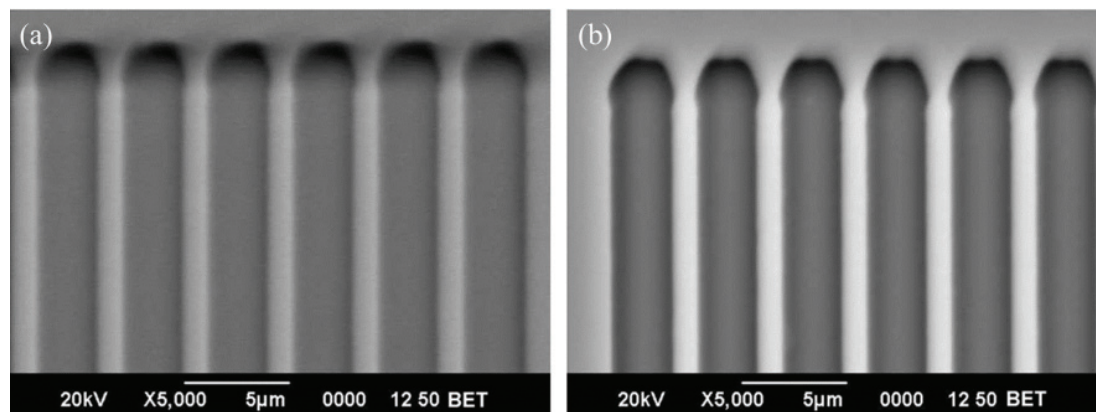


圖 11. (a) 典型多片扇形偵檢器拍攝表面形貌試片圖、(b) 多片環形偵檢器拍攝表面形貌試片圖。

3. 原子序敏感度對比測試

原子序敏感度的定義為

$$\text{原子序敏感度} = \frac{\text{偵檢器電流值的差異}}{\text{原子序的差異}} = \frac{I_A - I_B}{Z_A - Z_B}$$

其中 I_A 、 I_B 分別為入射電子束照射在不同的原子序，背向散射電子偵檢器所量測到的電流值，而 Z_A 、 Z_B 分別為不同的原子序，如圖 12。此量測的方法為，將自製的背向散射電子偵檢器實際裝置在掃描電子顯微鏡上進行拍攝測試原子序敏感度試片，並量測其偵檢器的電流值。圖 13 為加速電壓為 10 keV 時，背向散射電子偵檢器之電流與原子序的關係，由圖可知當偵檢器的電流值隨著原子序上升而增加。此結果是由於原子序上升，背向散射係數上升，背向散射電子變多，使偵檢器的電流值增加。並由此圖的曲線斜率可知多片扇形偵檢器的原子序敏感度，在加速電壓為 10 keV 時，原子序敏感度約為 3.77 nA/Z，表示在背向散射電子線性範圍內以及加速電壓為 10 keV 的條件下，每差一個原子序，多片扇形偵檢器電流差距為 3.77 nA；而多片環形背向散射電子偵檢器的原子序敏感度在

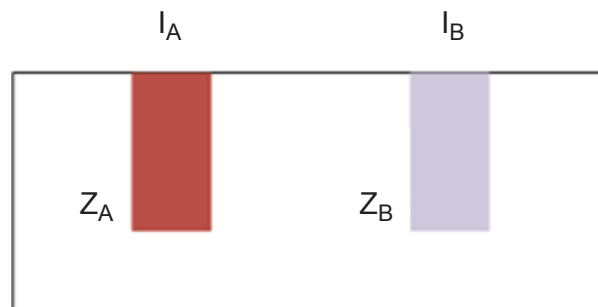


圖 12. 原子序敏感度測試試片示意圖。

加速電壓 10 keV 時，約為 4.07 nA/Z。而圖 14 顯示當提升加速電壓至 20 keV 時，多片扇形背向散射電子偵檢器原子序敏感度提升至 14.44 nA/Z；而多片環形背向散射電子偵檢器原子序敏感度提升至 16.71 nA/Z。由實際量測到的值可知，當加速電壓愈大，而原子序敏感度愈大，因加速電壓愈大使背向散射電子的能量亦愈大，而引發產生的電子-電洞愈多電流值愈大，使偵檢器電流值上升，而敏感度上升。此外，多片環形背向散射電子偵檢器的工作面積大於多片扇形背向散射電子偵檢器的工作面積。工作面積較大可收集較多的背向散射電子，故多片環形背向散射電子的原子序敏感度優於多片扇

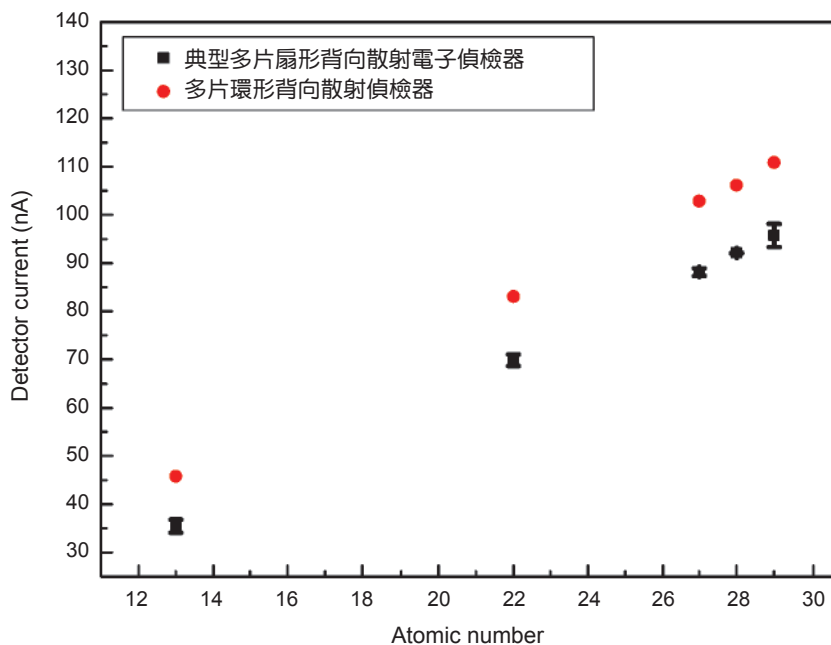


圖 13. 在 10 keV 時，典型多片扇形與多片環形背向散射電子偵檢器電流與原子序之關係。

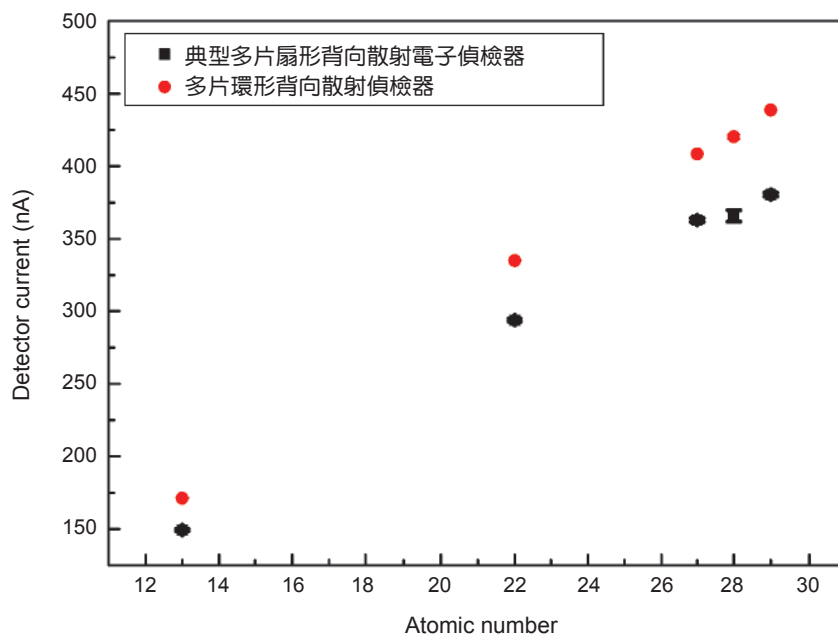


圖 14. 在 20 keV 時，典型多片扇形與多片環形背向散射電子偵檢器電流與原子序之關係。

形背向散射電子偵檢器原子序敏感度。多片扇形劃分為四塊，每一塊的工作區域面積為 0.384 cm^2 ，總面積為 1.536 cm^2 ；多片環形也劃分四塊，內環面積為 0.285 cm^2 而外環面積為 0.498 cm^2 ，總面積為 1.566 cm^2 。

4. 影像結果

進行影像拍攝測試前，先製作鋁－銀共晶相試片，在溫度為 $567 \text{ }^\circ\text{C}$ ，以及 28 wt.% 的鋁與 62

wt.% 的銀的成份比例會有鋁－銀合金的共晶點 (eutectic point) 的共晶試片。利用共晶相的兩相原子序組成的不同以及表面形貌的起伏拍攝影像來測試背向散射電子偵檢器的對比度，圖 15 為完成的鋁－銀共晶相試片之二次電子影像圖。而拍攝樣品的位置以及操作皆相同的條件下進行影像分析。圖 16－17 則為透過典型多片扇形以及多片環形背向散射電子偵檢器所拍的鋁－銀合金成分圖，其中較大原子序產生的電流值較高，故為白色；而較小原

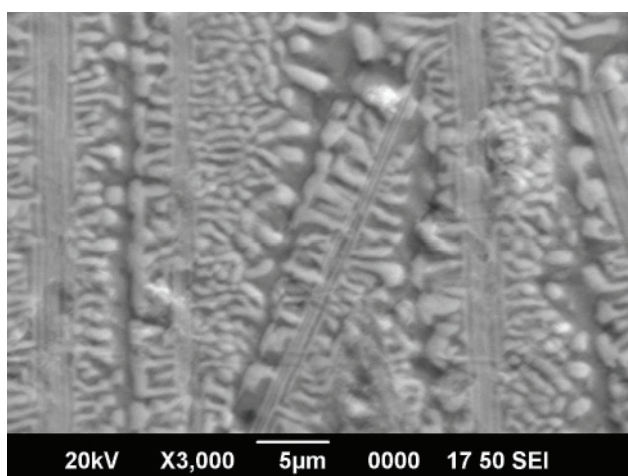


圖 15. 鋁－銀合金的二次電子影像圖。

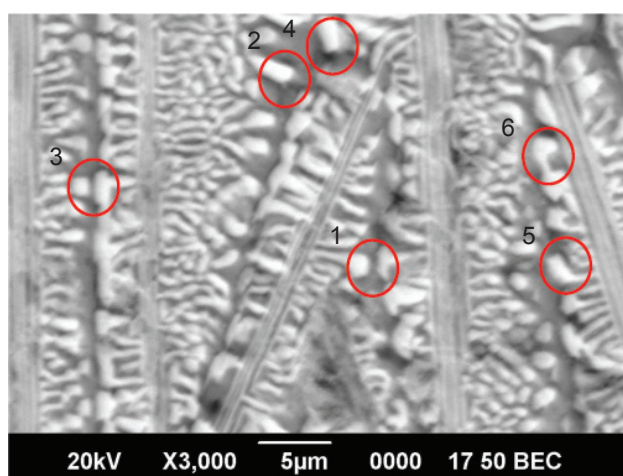


圖 16. 典型多片扇形偵檢器拍攝之鋁－銀合金背向散射電子影像圖。

表 1. 典型多片扇形與多片環形背向散射電子偵檢器拍攝之影像標示的 6 個點電流對比值比較。

	1	2	3	4	5	6
多片扇形偵檢器	0.321	0.319	0.213	0.354	0.289	0.301
多片環形偵檢器	0.389	0.352	0.370	0.458	0.414	0.386
對比提升百分比	17.5%	9.4%	42.4%	22.7%	30.2%	22.0%

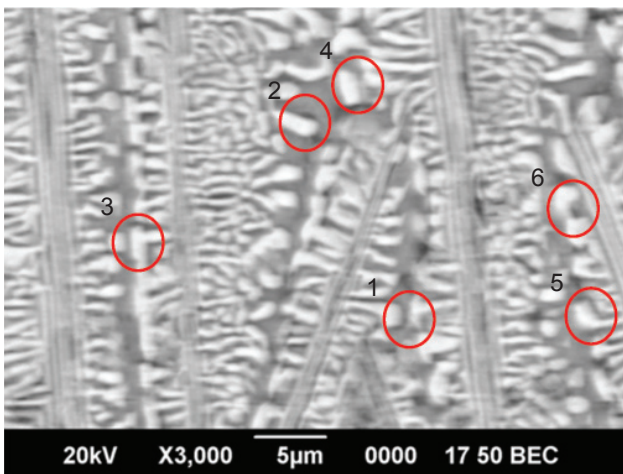


圖 17. 多片環形偵檢器拍攝之鋁－銀合金背向散射電子影像圖。

子序產生的電流值較低，故為黑色。已知影像對比定義為

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}$$

利用其定義可得到表 1。表 1 為使用典型多片扇形及多片環形背向散射電子偵檢器拍攝影像後，標示 6 個對比度分析點，多片環形背向散射電子偵檢器得到的對比度優於多片扇形背向散射電子偵檢器，此乃因多片環形背向散射電子偵檢器考慮了背向散射電子的分佈，利用大角度背向散射電子分析原子序對比，利用小角度背向散射電子分析表面形貌，雖然使得可收集背向散射電子的面積變小，但卻提升了影像的對比度。利用多片環形偵檢器得到影像的對比提升，但提升的比例皆不相同，是因試片表面並非只有原子序的對比，還有表面形貌起伏些許的差異，故提升的對比非定值。

四、結論

總括而言，由以上的基本測試可得知多片環形背向散射電子偵檢器優於典型多片扇形背向散射電子偵檢器的部分，不只在於原子序敏感度，還有表面形貌對比。得到此結果的原因為，多片環形背向散射電子偵檢器工作面積大於多片扇形背向散射電子偵檢器，且多片環形背向散射電子偵檢器還考慮了背向散射電子的分佈。此外，工作距離愈短，可使偵檢器得到的電流值上升，提升原子序敏感度與表面形貌對比。且多片環形偵檢器利用不同的工作距離，還可以收集不同角度的背向散射電子進行表面形貌分析。本研究利用了簡易製程以及較低成本，成功開發了應用於掃描式電子顯微鏡及桌上型掃描式電子顯微鏡之背向散射電子偵檢器。

誌謝

感謝科技部 (MOST 104-2221-E-007-067-MY3、MOST 105-2221-E-007-023-MY3 及 MOST 106-2221-E-130-019) 提供研究經費上的支持。

參考文獻

1. Munden, A. and D. Walker, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **6**, 916 (1973).
2. Stephen, J., et al., *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **8**, 607 (1975).
3. Gedcke, D., J. Ayers, and P. DeNee, *Scan Electron Microsc*, **1**, 581(1978).
4. Fritz, G., et al., *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, **17**, 2836 (1999).
5. Meier, G., et al., *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, **14** (6), 3821(1996).
6. Kaczmarek, D., *Scanning Microscopy*, **12** (1), 161 (1998).



林瑋叡先生為國立清華大學工程與系統科學系博士班候選人

Wei-Ruei Lin is currently a Ph.D. candidate in the Department of Engineering and System Science at

National Tsing Hua University.



莊昀儒先生為清華大學工程與系統科學博士，現為銘傳大學生物醫學工程學系副教授

Yun-Ju Chuang received his Ph.D. in Engineering and System Science

from National Tsing Hua University. He is currently an associate professor in the Department of Biomedical Engineering at Ming Chuan 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，現為國立清華大學工程與系統科學系教授

Fu-Rong Chen received his Ph.D. in material science from Stony Brook

University of New York, USA. He is currently a professor in the Department of Engineering and System Science at National Tsing Hua University.