

國立臺灣大學理學院物理學系

碩士論文

Department of Physics

College of Science

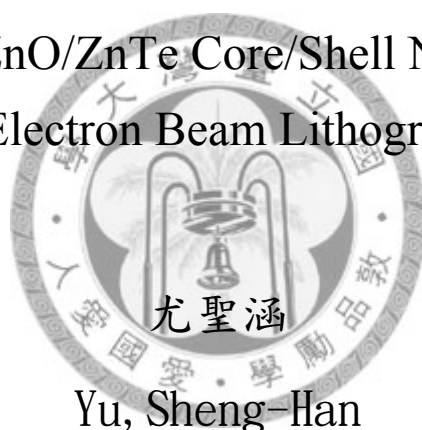
National Taiwan University

Master Thesis

以電子束微影術製作氧化鋅核/碲化鋅殼奈米線元件

Fabrication of ZnO/ZnTe Core/Shell Nanowire Device

by Electron Beam Lithography



Yu, Sheng-Han

指導教授：張顏暉 博士

Advisor: Yuan-Huei Chang, Ph. D.

中華民國98 年6 月

June, 2009

國立臺灣大學理學院物理學系

碩士論文

Department of Physics
College of Science
National Taiwan University
Master Thesis

以電子束微影術製作氧化鋅核/碲化鋅殼奈米線元件

Fabrication of ZnO/ZnTe Core/Shell Nanowire Device

by Electron Beam Lithography



尤聖涵
Yu, Sheng-Han

指導教授：張顏暉 博士

Advisor: Yuan-Huei Chang, Ph. D.

中華民國98年6月

June, 2009

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

論文中文題目

以電子束微影術製作氧化鋅核/碲化鋅殼奈米線元件

論文英文題目

Fabrication of ZnO/ZnTe Core/Shell Nanowire Device
by Electron Beam Lithography

本論文係尤聖涵君 (R95222053) 在國立臺灣大學物理學系、所
完成之碩士學位論文，於民國 98 年 7 月 13 日承下列考試委員審查通
過及口試及格，特此證明

口試委員：

張頌暉

(指導教授)

邱永芳

梁啟德

誌謝

很開心能畢業了～如果我有些許的成長，都要感謝每個人：)

智者不惑、勇者無懼，這是在張顏暉老師身上所學所得。如今我又將踏上另一段未知的旅程，我期許自己永遠懷抱這樣開朗珍惜的心情，不惑、無懼地走我的每一步，您慈父般的勉勵與指導我會永記在心的！

幽默的管傑雄老師及互相幫忙的 ebeam 夥伴，跟你們相處這兩年真的很開心，領略到各個不同領域的厲害，大開眼界；熱心的王富民學長的大力幫忙；一直很有活力開心又盡責的黃智穎學長，你的精神是我要努力加緊學習的；景翔學長實驗上的指導，很懷念剛進實驗室你對我們新生的照顧；明威學弟與我討論實驗上每個細節與改進，互吐做 ebeam 的苦水 XD，祝你未來一切順利喔；駿佑、小趙學長辛苦成長樣品提供我製程且給予我很多協助與想法，大大感謝；傳說中外表斯文、內心狂野的冠人同學，這一路上的家常閒聊與互相嘲笑，增添了實驗室的幾番樂趣，恭喜你抱得美人歸，一定要發喜帖給我阿:>；傻傻的國標舞王小戴，嘗試錯誤的學習精神我很佩服呵哈，有看到你愈來愈聰明喔，加油!! 還有要感謝我的男友，碩二最後這段考教甄與做實驗寫論文的日子，真的想說:有你真好。

最後，我要感謝我最親愛的爸爸與媽媽，這些日子不常回家鄉，但仍能時時刻刻感受到你們的關心與溫暖，每次想到你們就又能充滿滿滿的勇氣與堅定。

Abstract

Keywords: ZnO, ZnO/ZnTe, nanowire, core-shell

One-dimensional ZnO nanowires have attracted much attention for their potential applications in making electronic and opto-electronic devices. As the nanowires have large surface to volume ratio, the surface effect, especially the effect of surface defects on the performance of ZnO-nanowire-based device cannot be overlooked. For example, it is well-known that chemisorption of ambient gases, primarily oxygen, has a strong effect on the electrical properties of ZnO nanowire. In order to improve the stability of the performance of the ZnO-nanowire-based devices it is desirable to passivate the surface of the ZnO nanowire. In this paper we report the growth and characterization of ZnO-ZnTe core-shell nanowires and their electrical and opto-electronical properties. In this structure the ZnTe layer not only serve the purpose of passivating the ZnO surface, it also forms a type -II semiconductor heterostructure with the ZnO core layer . The separation of electron and hole in the type-II heterostructure is expected to enhance the light induced photo-conductivity for the core-shell nanowire.

A two-step synthesis was used to fabricate ZnO/ZnTe core/shell nanowire. In the first step, the ZnO nanowires were grown for 40 minutes at $T= 930\text{ }^{\circ}\text{C}$ in a furnace by chemical vapor deposition with a gold thin film as catalyst. After the sample was cooled down, it was then transferred to the MOCVD chamber for the deposition of ZnTe shell on ZnO core for 300 sec at $T= 550\text{ }^{\circ}\text{C}$. The morphology and size distribution of the ZnO/ZnTe core/shell nanowire arrays were studied by scanning electron microscopy and it was found that the surfaces of the well-aligned ZnO nanowires became rougher after the growth of ZnTe layer and the diameter of the nanowire increase from 70-100 nm to 150-300 nm. The x-ray diffraction and transmission electron microscope measurements show that the ZnO core has wurtzite structure, the ZnTe shell has zinc-blende structure and both materials have good crystalline quality.

The nanowire was then placed on top of a 300 nm SiO_2 layer which in term was on top of a n-type Si substrate to form a field effect transistor with the heavily doped silicon substrate served as a metal gate. Metallic electrodes consisting of Ti /Au were then deposited on the two ends of the nanowire by an electron beam evaporator and defined as source and drain electrodes by a photolithography and lift-off process.

Wavelength-dependent photoconductivity of the nanowire was then studied by dispersing the light emitted from a Xe lamp with a monochromator. It was found that the ZnO-ZnTe core-shell nanowire show improved device performance over ZnO nanowire both as a field effect transistor and as a photo-detector.



中文摘要

關鍵字：氧化鋅，氧化鋅/碲化鋅，奈米線，核/殼奈米結構

本篇論文主要探討的是氧化鋅奈米線及氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線元件的製程及在光性電性運用的研究。

本論文中我們使用兩種不同的奈米線：氧化鋅奈米線及氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線這兩個奈米結構，第一種材料是目前學術界常用的氣體、光的感測器，但其表面易與空氣中的水氣與氧氣等有作用，使其上的電子載子受困，形成無法利用的空乏區，且在量測時表面與空氣的作用會驟增，並隨著量測時間的延長而有作用程度的不等，因此有不可排除的干擾，有些數據無法有重複性(除非再放置多日或抽真空)。

有鑑於此，在其表面作鈍化變成此元件研究的大方向，有許多發表的論文都致力於此。我們在氧化鋅奈米線表面鍍上了碲化鋅奈米薄膜，形成化鋅/碲化鋅-核/殼的奈米線，不僅鈍化了表面，更可探討電子在此第二型接面(type II)的傳遞模式。

目 錄

口試委員會審定書	I
誌謝	II
英文摘要	III
中文摘要	V
目錄	VI
圖索引	VIII
第 1 章. 緒論	
1.1. 前言	1
1.2. 氧化鋅奈米線	1
第 2 章. 基本理論	
2.1. 場效電晶體	4
2.2. 光感測器	5
第 3 章. 實驗儀器簡介	
3.1. 電子束微影術系統	8
3.2. 掃瞄式電子顯微鏡	9
3.3. 蒸鍍機	12
3.4. 濺鍍機	14
3.5 電流-電壓曲線量測儀器	15
第 4 章. 實驗步驟	
4.1. 光曝光做前置基板電極	17
4.2. 灑奈米線	18
4.3. 用 SEM 定位奈米線的座標	24



4.4. 電子束微影術從奈米線接出電極至前置電極	25
第 5 章. 結果與討論	
5.1. 奈米線的 SEM 圖	27
5.2. 製作單根奈米線元件之圖	29
5.3. 單根氧化鋅奈米線元件	32
5.4. 單根氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線元件	40
5.5. 良率低的原因及討論	42
第 6 章. 結論	49



圖目錄

圖 1-1.氧化鋅的結構	2
圖 1-2.氧化鋅的基本性質	2
圖 2-1.MOS 元件示意圖	4
圖 2-2.氧化鋅 MOS 元件在快速量測與慢速量測的變化	5
圖 2-3.氧化鋅照光後產生的電子與表面的反應	6
圖 2-4.氧化鋅照光後產生的電子與表面的 I-V	6
圖 2-5.氧化鋅照光後產生的電子在真空中與空氣中的反應	7
圖 3-1.電子束微影術的裝置示意圖	8
圖 3-2. SEM 的裝置示意圖	12
圖 3-3.蒸鍍機的裝置示意圖	13
圖 3-4.濺鍍沉積法的程序示意圖	14
圖 3-5.顯示了濺鍍腔的幾何示意圖及腔內的電位分布圖	15
圖 3-6.電流-電壓曲線量測系統	16
圖 4-1.前置電極的 SEM 影像	17
圖 4-2. 奈米線樣品	18
圖 4-3. 用方法一灑落成功的奈米線	18
圖 4-4. 常見的狀況一	19
圖 4-5. 常見的狀況二	19
圖 4-6. 方法二流程圖	20
圖 4-7. 用方法二灑落成功的奈米線與常見的狀況	20
圖 4-8. 方法三示意圖	21
圖 4-9. 用方法三灑落成功的奈米線	22
圖 4-10. 用方法三灑落失敗的奈米線	22
圖 4-11. 樣品沒有經過裁切	23
圖 4-12. 定位	24
圖 4-13. 定位示意圖	25

圖 4-14. 用電子束微影術從奈米線接出電極至前置電極示意圖	25
圖 4-15. 用 ECA 程式所畫之圖；曝寫的示意圖	26
圖 5-1. 氧化鋅奈米線 SEM 圖	27
圖 5-2. 氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線 SEM 圖	28
圖 5-3. 單根氧化鋅奈米線元件 SEM 圖	29
圖 5-4. 單根氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線元件 SEM 圖	30
圖 5-5. 做出的奈米元件為 MOS	31
圖 5-6. 沒有經過高溫爐加熱之電壓-電流曲線	32
圖 5-7. 在氧氣中加熱之電壓-電流曲線	33
圖 5-8. 在氫氣、氮氣中加熱之電壓-電流曲線	35
圖 5-9. 電壓-電流曲線背景值	36
圖 5-10. 真空中加熱之電壓-電流曲線	37
圖 5-11. 順量逆量的電壓-電流曲線	38
圖 5-12. 氧化鋅感光元件的電壓-電流曲線	39
圖 5-13. 氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線示意圖	40
圖 5-14. 在真空中加熱電壓-電流曲線	41
圖 5-15. 即時觀看與慢速掃瞄的誤差	42
圖 5-16. ECA 圖之偏移與旋轉	43
圖 5-17. 定位時的痕跡一	43
圖 5-18. 定位時的痕跡二	44
圖 5-19. 灑上奈米線塗佈電子阻液之圖	45
圖 5-20. 顯影過後之圖	45
圖 5-21. 樣品 SH512	46
圖 5-22. 樣品通臭氧後結果	47
圖 5-23. 氧化鋅/碲化鋅-核/殼被電子阻液包圍	48

第一章 緒論

1.1 前言

1959年12月29日，美國物理學家理查德·費曼在美國物理學年會上預言：『未來的人類，有可能將單個原子作為建築構件，在最底層空間建造任何物質』。

果真，隨著科學的發展，科學家所能控制的尺寸不斷縮小，當材料在三維尺度之一的任一維度是在0.1~100 nm 的尺度範圍，即稱之為奈米材料 (nano-materials)。當材料尺寸到達奈米尺度時，由於「小尺寸效應」、「界面效應」、「量子尺寸效應」和「巨觀量子隧道效應」使奈米材料在結構、光電、磁學和化學性質等方面呈現不同於傳統塊材的特異性，而引起科學工作者的極大興趣，成為人類21世紀科學研究領域中的熱點。控制這些奈米材料的科學稱之為奈米科技 (nano science technology)，有效地將原子或分子組合成新的奈米結構，這些奈米結構包括奈米點、奈米粒、奈米束、奈米棒、奈米管、奈米線、奈米膜層等。相較於傳統製程是由大縮小的，奈米科技乃是由小作大的方式將這些基本單元一沏塊設計組裝成新的奈米元件。而奈米複合材料是指兩種以上的材料在奈米尺度下結合而成，可能產生新穎的特性，或兼具兩種以上的特性，應用範圍更加廣泛，且極具開發潛力，不論是在科學研究或工業技術上都呈現出高潛在的應用價值。

1.2 氧化鋅奈米線

氧化鋅為六方緊密堆積的晶體結構[1]，空間群是P63mc，屬於纖鋅礦結構，其晶格常數a 軸為3.2539 Å，c 軸為5.2098 Å，c/a 比值接近理想的六方晶結構比值1.633。因為是具有寬能隙的II-VI 族半導體材料，所以有成為短波長光電元件的可能性，並且擁有傑出的壓電特性，同時氧化鋅成本低廉與合成控制容易，所以近幾年來各種不同奈米結構的氧化鋅被開發出來，如奈米線、奈米管、奈米帶(nanobelt)、奈米花(nanoflower)和奈米環(nanoring)。這些結構形貌的

改變，將對電子結構產生變化，而對氧化鋅在元件的應用上會有很大的影響。

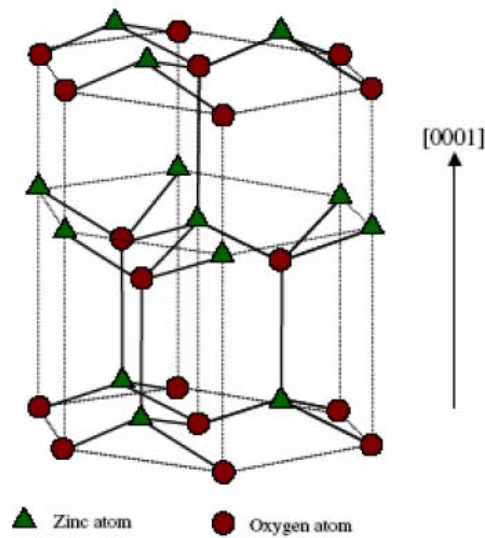


圖. 1-1 氧化鋅的結構

Properties of wurtzite ZnO

Property	Value
Lattice parameters at 300 K	
a_0	0.324 95 nm
c_0	0.520 69 nm
a_0/c_0	1.602 (ideal hexagonal structure shows 1.633)
w	0.345
Density	5.606 g cm ⁻³
Stable phase at 300 K	Wurtzite
Melting point	1975 °C
Thermal conductivity	0.6, 1-1.2
Linear expansion coefficient (/C)	$a_0: 6.5 \times 10^{-6}$ $c_0: 3.0 \times 10^{-6}$
Static dielectric constant	8.656
Refractive index	2.008, 2.029
Energy gap	3.4 eV, direct
Intrinsic carrier concentration	$<10^6$ cm ⁻³
Exciton binding energy	60 meV
Electron effective mass	0.24
Electron Hall mobility at 300 K for low n-type conductivity	200 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
Hole effective mass	0.59
Hole Hall mobility at 300 K for low p-type conductivity	5-50 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹

圖. 1-2 氧化鋅之基本性質

本論文中我們使用奈米線：氧化鋅奈米線，是目前學術界熱門討論一種奈米結構，其在場效電晶體，氣體、光的感測器[2]-[14]皆有傑出的表現，但其表面易與空氣中的水氣與氧氣等有作用，使其上的電子載子受困，形成無法利用的空乏區，且在量測時表面與空氣的作用會驟增，並隨著量測時間的延長而有作用程度的不等，因此有不可排除的干擾，有些數據無法有重複性(除非再放置多日或抽真空)。

所以在其表面作鈍化[5]變成此元件研究的大方向，有許多發表的論文都致力於此。我們在氧化鋅奈米線表面鍍上了碲化鋅奈米薄膜，形成氧化鋅/碲化鋅-核/殼的奈米線，不僅鈍化了表面，更可探討電子在此第二型界面(type II)的傳遞模式。

我們共使用三種不同的方式來連接單根奈米線，第一種方法是電子束微影術(Electron Beam Lithography)方式，將奈米線灑在有標誌定位點的基板上，再用SEM定位座標、塗上正電子阻(ZEP520)、繪畫電極圖、打電子束、顯影後蒸鍍金屬，最後完成封裝步驟。

第二種方法是製作好間距約 $1\mu\text{m}$ 的電極後灑上奈米線，找出恰跨接到兩電極間者(或兩以上)，緊接著在高溫下加熱，使電極與奈米線間的附著性良好，最後完成封裝步驟。

第三種方法是聚焦離子束(Focused Ion Beam)。

上述三種方法皆有接線成功。

第二章 原理介紹

2.1 場效電晶體

圖2-1. 為一個金屬-絕緣體-半導體的場效電晶體 (MOSFET)，是眾所皆知的開極控制的電性元件。一般的場效電晶體的結構是來自先沈積一層二氧化矽和一層在半導體之上的金屬層，當給了外加電壓，此電壓橫過這場效電晶體會造成電場，改變半導體內部的電子分佈。

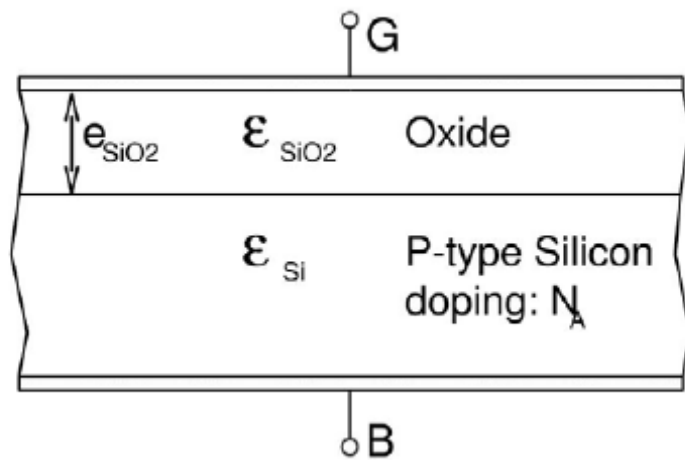


圖. 2-1. MOS 元件示意圖

量測完MOS後可經由下列方程式得到半導體奈米線的一些性質：

C_g 為無限大平板上平置一圓柱的開極電容， r 為奈米線的半徑， L 是奈米線的通道長度， t 是絕緣層二氧化矽的厚度， ϵ_0 是空氣的介電常數， ϵ 是二氧化矽的電介質常數， μ_e 為 mobilities 經由電動力學可求得：

$$\frac{C_g}{L} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\cosh^{-1}\left(\frac{r+h}{r}\right)} \quad \dots\text{eq.}(1)$$

$$\mu_e = \frac{dI_{DS}}{dV_G} \frac{L^2}{V_{DS}C_g} \quad \dots\text{eq.}(2)$$

由以上方程式可求得氧化鋅奈米線的性質。

然而，因為氧化鋅表面天生的氧缺陷，使得在量測場效電晶體時有載電電子愈來愈少的趨勢。

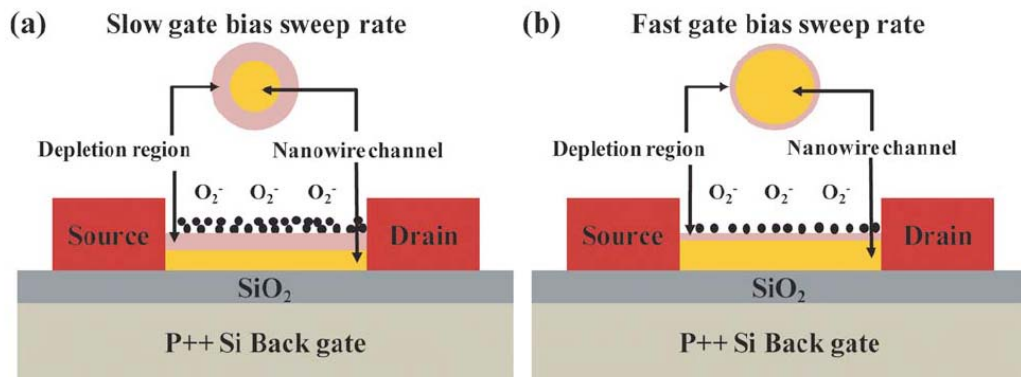


圖. 2-2 氧化鋅 MOS 元件在快速量測與慢速量測的變化[7]。

圖.2-2 顯示當加入閘極偏壓時，將載電電子吸引至表面而行成通道，可使奈米線電阻值下降，然而這些電子到表面的同時，一段時間後會被空氣中的氧氣所結合而行成無法使用的空乏層，降低導電性質。

2.2 光感測器

氧化鋅內載電載子數量有限，若打入光給予能量，產生電子電洞對，可使元件內載電載子激增，增加其導電性，然因氧化鋅表面有許多電子被氧缺陷困住，所以產生的電子電洞對，在表面也會與空氣中的氧或水氣結合，降低了光的效應，但縱何來看整體的載電電子是大幅增加的，導電性亦有增強的效果。

$$\text{Photoexcited electron-hole pair mechanism } h\nu \rightarrow e^- + h^+ \quad \dots \text{eq.(3)}$$

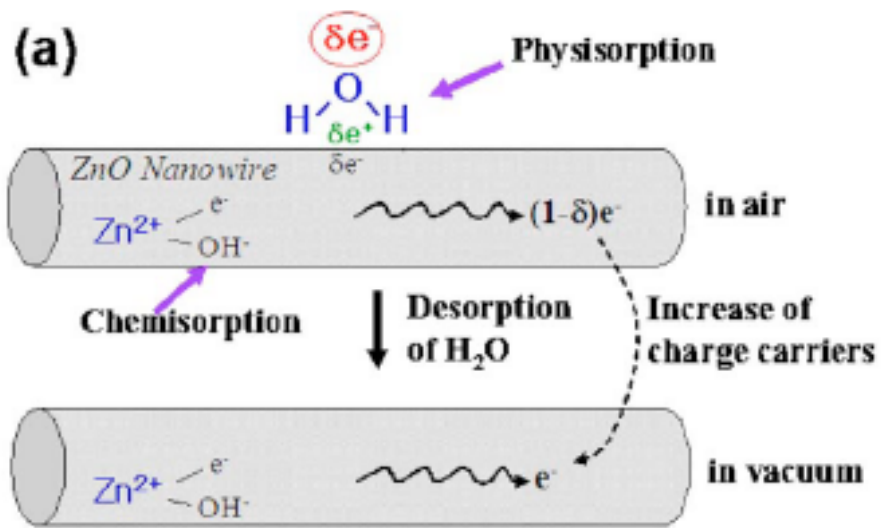


圖. 2-3 氧化鋅照光後產生的電子與表面的反應

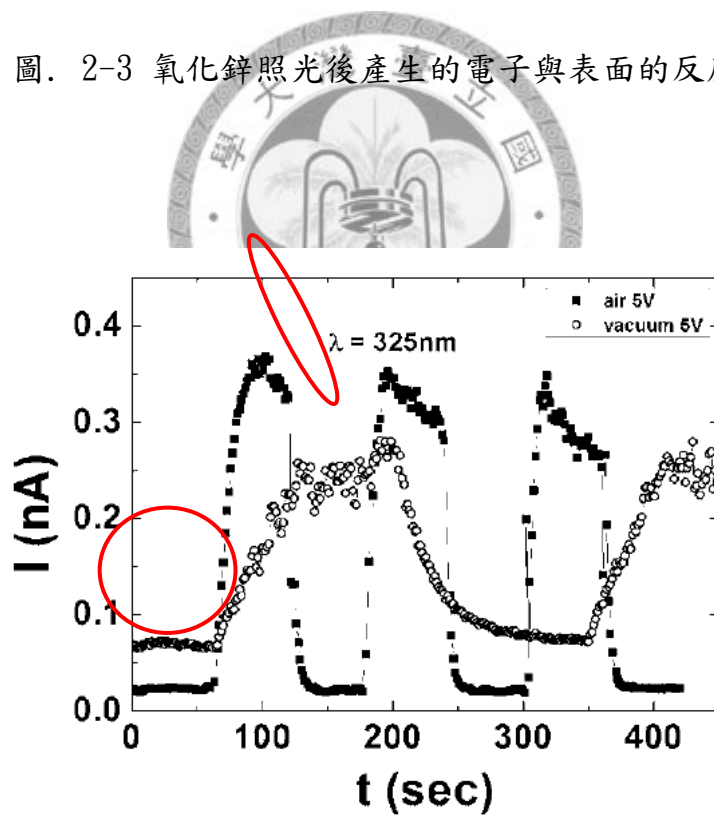


圖. 2-4 氧化鋅照光後產生的電子與表面的 I-V

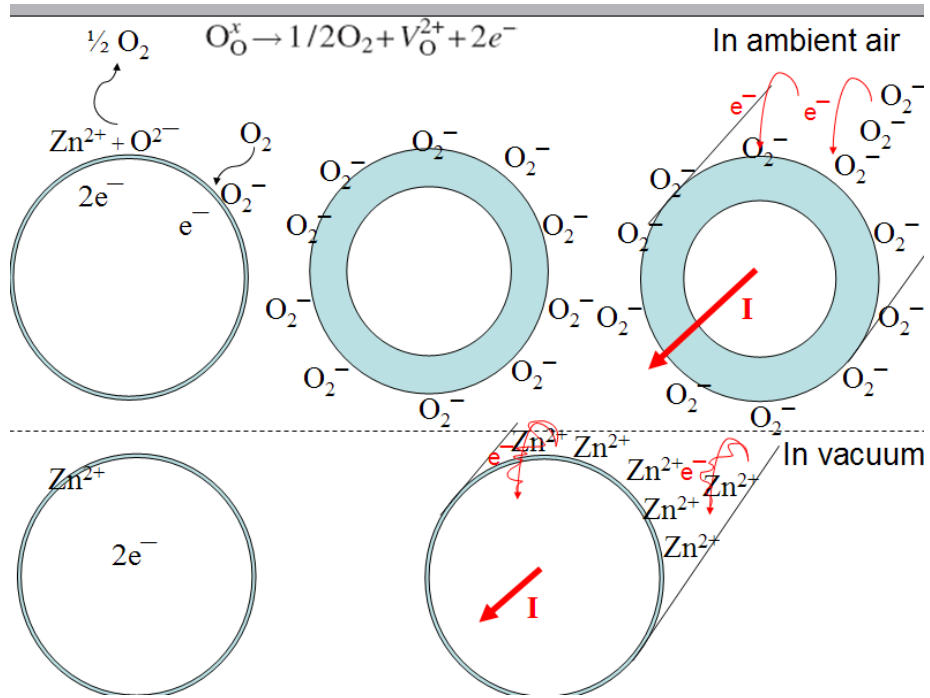


圖. 2-5 氧化鋅照光後產生的電子在真空中與空氣中的反應



第三章 實驗儀器簡介

3.1 電子束微影術系統

一般來說，電子束微影術系統由以下部份組成：

- (1) 生成電子束的電子槍；
- (2) 兩片以上聚焦用的電磁濾鏡；
- (3) 一個遮板控制電子束開與關；
- (4) 矯正電子束散光的濾片；
- (5) 幫助定位電子束的光圈；
- (6) 校正、排列對準系統，使電子束在畫面正中央。

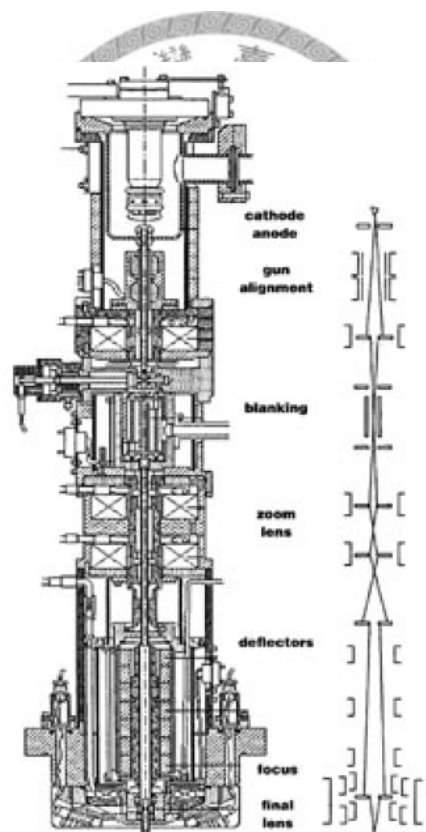


圖 3-1. 電子束微影術的裝置示意圖

3.2 掃描式電子顯微鏡

掃描電子顯微鏡 (scanning electron microscope, SEM) 是一種利用電子束掃描樣品表面從而獲得樣品信息的電子顯微鏡。它能產生樣品表面的高解析度圖像，且圖像呈三維，掃描電子顯微鏡能被用來鑒定樣品的表面結構[15]。

【1】SEM 的結構

掃描電子顯微鏡由三部分組成：真空系統，電子束系統以及成像系統。

1. 真空系統：

真空系統主要包括真空泵和真空柱兩部分。真空柱是一個密封的柱形容器。真空泵用來在真空柱內產生真空。有機械泵、油擴散泵以及渦輪分子泵三大類，機械泵加油擴散泵的組合可以滿足配置鎢槍的 SEM 的真空要求，但對於裝置了場致發射槍或六硼化鏷槍的 SEM，則需要機械泵加渦輪分子泵的組合。成象系統和電子束系統均內置在真空柱中。真空柱底端即為右圖所示的密封室，用於放置樣品。

之所以要用真空，主要基於以下兩點原因：

電子束系統中的燈絲在普通大氣中會迅速氧化而失效，所以除了在使用 SEM 時需要用真空以外，平時還需要以純氮氣或惰性氣體充滿整個真空柱。

為了增大電子的平均自由程，從而使得用於成象的電子更多。

2. 電子束系統

電子束系統由電子槍和電磁透鏡兩部分組成，主要用於產生一束能量分佈極窄的、電子能量確定的電子束用以掃描成象。

電子槍

電子槍用於產生電子，主要有兩大類，共三種。一類是利用場致發射效應產生電子，稱為場致發無線電子槍。這種電子槍極其昂貴，在十萬美元以上，且需要小於 10^{-10} torr 的極高真空。但它具有至少 1000 小時以上的壽命，且不需要電磁透鏡系統。

另一類則是利用熱發射效應產生電子，有鎢槍和六硼化鎢槍兩種。鎢槍壽命在 30~100 小時之間，價格便宜，但成象不如其他兩種明亮，常作為廉價或標準 SEM 配置。六硼化鎢槍壽命介於場致發無線電子槍與鎢槍之間，為 200~1000 小時，價格約為鎢槍的十倍，圖像比鎢槍明亮 5~10 倍，需要略高於鎢槍的真空，一般在 10^{-7} torr 以上；但比鎢槍容易產生過度飽和和熱激發問題。

電磁透鏡

熱發無線電子需要電磁透鏡來成束，所以在用熱發無線電子槍的 SEM 上，電磁透鏡必不可少。通常會裝配兩組：

匯聚透鏡：顧名思義，匯聚透鏡用匯聚電子束，裝配在真空柱中，位於電子槍之下。通常不止一個，並有一組匯聚光圈與之相配。但匯聚透鏡僅僅用於匯聚電子束，與成象會焦無關。

物鏡：物鏡為真空柱中最下方的一個電磁透鏡，它負責將電子束的焦點匯聚到樣品表面。

3. 成像系統

電子經過一系列電磁透鏡成束後，打到樣品上與樣品相互作用，會產生次級電子、背散無線電子、歐革電子以及 X 射線等一系列信號。所以需要不同的探測器譬如次級電子探測器、X 射線能譜分析儀等來區分這些信號以獲得所需要的信息。雖然 X 射線信號不能用於成象，但習慣上，仍然將 X 射線分析系統劃分到成象系統中。

有些探測器造價昂貴，比如 Robinsons 式背散無線電子探測器，這時，可以使用次級電子探測器代替，但需要設定一個偏壓電場以篩除次級電子。

【2】基本參數

1. 放大率

與普通光學顯微鏡不同，在 SEM 中，是通過控制掃描區域的大小來控制放大率的。如果需要更高的放大率，只需要掃描更小的一塊面積就可以了。放大率由屏幕／照片面積除以掃描面積得到。所以，SEM 中，透鏡與放大率無關。

2. 場深

在 SEM 中，位於焦平面上下一小層區域內的樣品點都可以得到良好的會焦而成象。這一小層的厚度稱為場深，通常為幾奈米厚，所以，SEM 可以用於奈米級樣品的三維成像。

3. 作用體積

電子束不僅僅與樣品表層原子發生作用，它實際上與一定厚度範圍內的樣品原子發生作用，所以存在一個作用「體積」。作用體積的厚度因信號的不同而不同：

- v 歐革電子：0.5~2 奈米。
- v 次級電子： 5λ ，對於導體， $\lambda=1$ 奈米；對於絕緣體， $\lambda=10$ 奈米。
- v 背散無線電子：10 倍於次級電子。
- v 特徵 X 射線：微米級。
- v X 射線連續譜：略大於特徵 X 射線，也在微米級。

4. 工作距離

工作距離指從物鏡到樣品最高點的垂直距離。如果增加工作距離，可以在其他條件不變的情況下獲得更大的場深。如果減少工作距離，則可以在其他條件不變的情況下獲得更高的解析度。通常使用的工作距離在 5 毫米到 10 毫米之間。

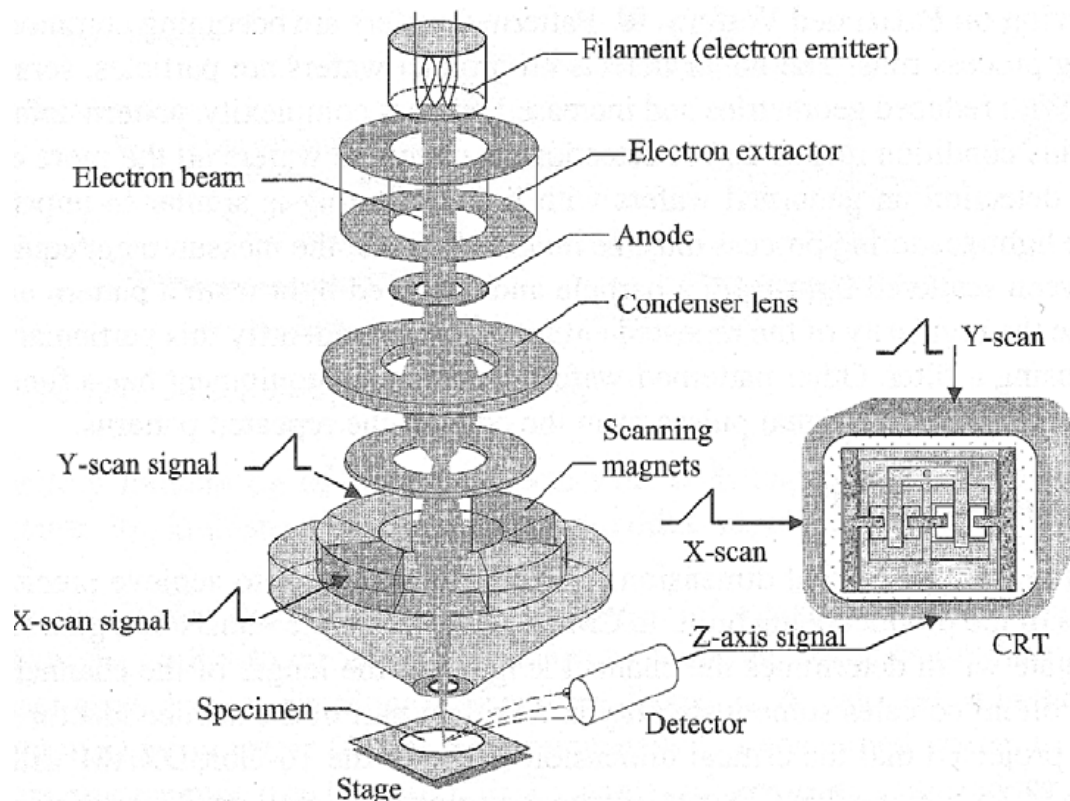


圖 3-2. SEM 的裝置示意圖。

3.3 蒸鍍機

蒸鍍法是一種廣泛被使用的薄膜沉積技術。其沉積物的來源在真空環境蒸發，蒸發後的粒子可以在真空中直線前行至基板，並凝結成固態。

蒸鍍法牽涉到兩個基本步驟：材料在熱源蒸發以及凝結於基板上。這就類似於燒開水時有水滴凝結於茶壺蓋上的原理，只不過周遭氣體壓力和熱源不同罷了。蒸鍍過程發生於真空中，亦即蒸鍍過程之前必須將欲鍍材料以外的氣體全部移除。在高真空環境（具有較長的平均自由徑），蒸發出來的粒子可以不和背景氣體分子發生任何碰撞而直接沉積至目標基板上。在 10^{-4} Pa 之真空度，一個 0.4

nm 的粒子可擁有 60 m 之平均自由徑。真空腔內的高溫物體，譬如熱電阻絲，會產生實驗上不想要的蒸氣而侷限了真空品質。

蒸發出來的原子若與外質粒子碰撞有可能和其發生反應，譬如蒸鍍鋁的時候若有氧的存在，即可能形成氧化鋁。此外，因欲鍍物質蒸發後依直線軌跡前行，若是基板表面不平整（譬如積體電路），則某些區域的粒子會遭受到阻擋，蒸鍍薄膜的厚度亦不均勻，這現象被稱為「陰影效應 shadowing」或者「階梯遮蓋效應 step coverage」

如果蒸鍍腔內的真空度很差，甚至接近大氣壓力，則沉積後的結果通常是不平整、不光滑的表面。反倒形成模糊、混濁的形貌。

任何一套蒸鍍沉積系統皆備有一具真空幫浦，並且具有能量源以使材料蒸發。本實驗中的蒸鍍機是利用熱蒸發法，將欲鍍材料置放在一可被大量電流通過而加熱的鎢形船(W-boat)內，使欲鍍物材料溫度快速增加而蒸發，最後附著在被鍍物的表面上，蒸鍍機的裝置示意圖如下。

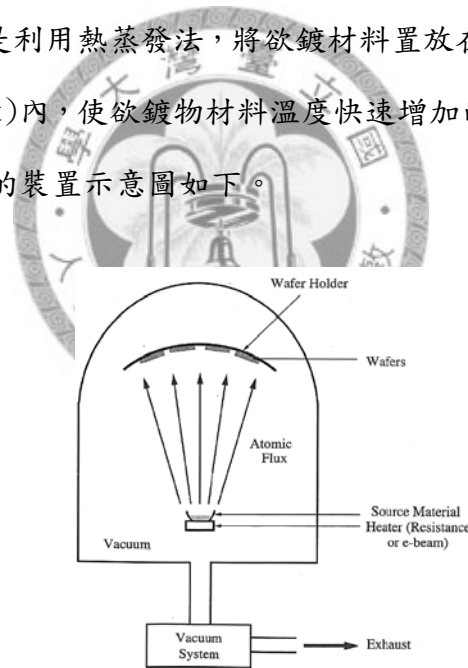


圖 3-3. 蒸鍍機的裝置示意圖。

3.4 濺鍍機

濺鍍法是用以薄膜沉積的主要方法，或者在微機電組織程序中用以提供金屬覆蓋膜。隨著真空技術的躍進，濺鍍沉積法已經廣泛地被蒸鍍沉積法取代，因其沉積速率較前者快。然而對於某些難以蒸發的材料而言，濺鍍法依然是被廣泛採用的。

在濺鍍腔的正負兩極加以高電壓，則腔內傳輸的高能電子碰撞質量較大的氣體，譬如氬(Ar)，使之游離，游離後的氬離子受到電場加速，再度碰撞其他的氬原子使之游離，這樣一連串的游離反應（如同雪崩效應）將產生可導電的電漿，其包含了電中性的氬原子加上等量的氬離子和電子。

這些質量較大的離子（通常是氬離子）受到電場加速之後會轟擊陰極上的靶材並且把動量轉移到靶材上的原子，於是靶材上的原子脫離靶材並且沉積在基板上面。圖 3-4 顯示了濺鍍沉積法的程序圖。圖 3-5 顯示了濺鍍腔的幾何示意圖，以及腔內的電位分布圖。我們通常可以在濺鍍腔內看到陰極放電以及電漿放電所產生的亮光，稱為「輝光現象」。

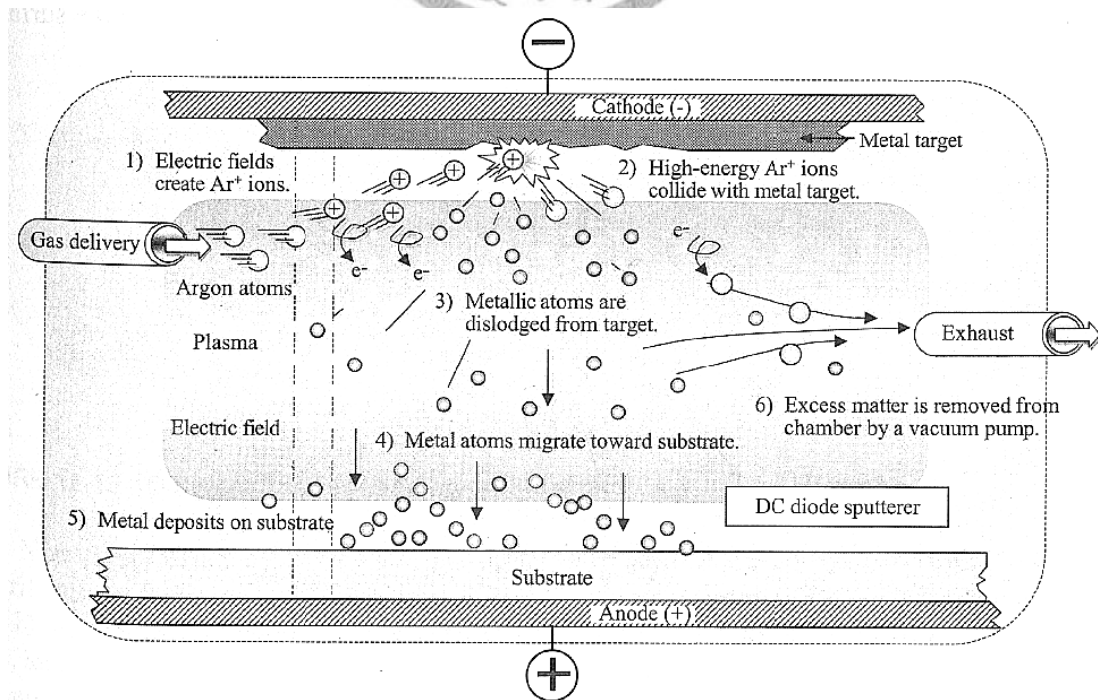


圖 3-4. 濺鍍沉積法的程序示意圖。

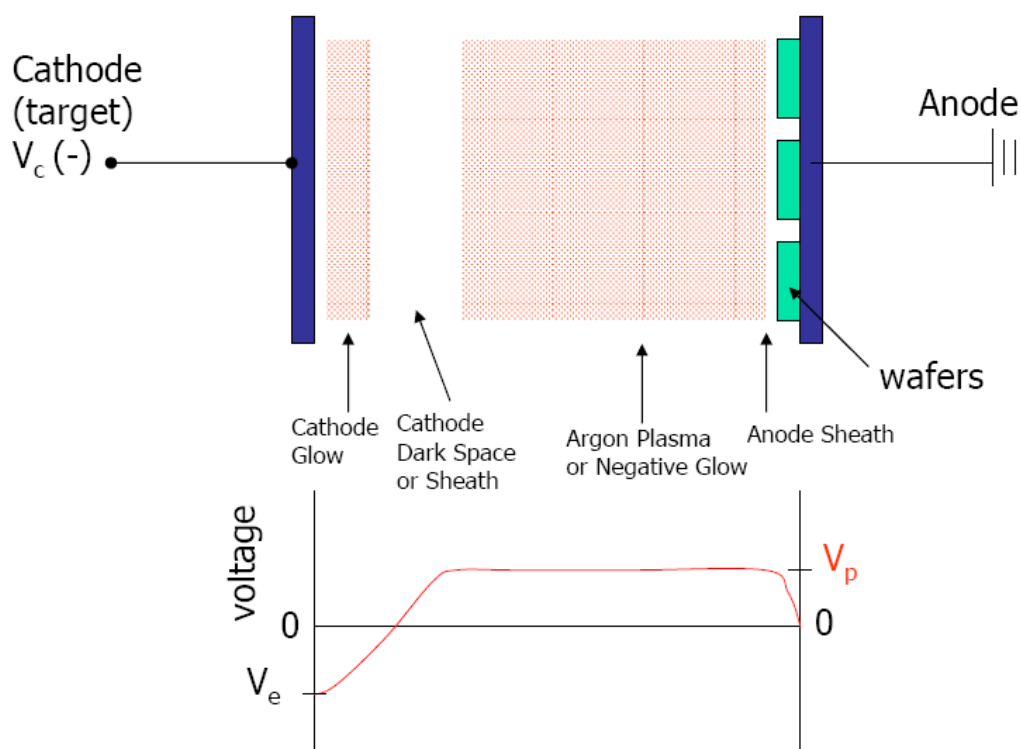


圖 3-5. 顯示了濺鍍腔的幾何示意圖及腔內的電位分布圖。

3.5 電流-電壓曲線量測系統

電流-電壓曲線量測系統主要運用於場效電晶體在加電場及感光元件在照光或未照光的條件下，其電流-電壓的曲線關係，這套系統包含雙極性電源電表 (KEITHLEY 236)、個人電腦、GPIB 介面卡、氬燈以及一套可以控制電表並記錄數據點的軟體。

本實驗中可以提供兩端電壓，並且同時測量通過元件的電流，形成一個數據點，再藉由改變輸出電壓，量得對應的電流，最後集成電流-電壓曲線，GPIB 介面卡則是電表與電腦之間的溝通媒介，透過軟體可以由電腦控制電表，並將數據點記錄於電腦內，實驗裝置圖如下。

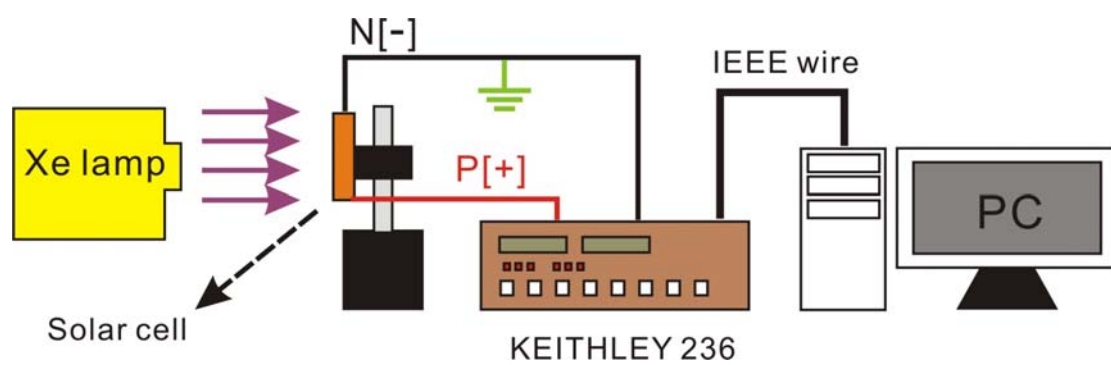


圖 3-6. 電流-電壓曲線量測系統。



第四章 製程方法與實驗

本章主要介紹的是單根奈米線元件的製程方法，包含實驗過程中的每個步驟、參數與相關實驗儀器的運用[16]。

4.1 光曝光做前置基板電極

在灑上耐米線之前需先用光曝光製作前置基板電極，以下的步驟是製成：

1. 將二氧化矽/矽基板切成約8mmx8mm的大小
2. 依序用GP清潔劑, 丙酮, 異丙醇超音波震洗各30分鐘
3. 塗佈光阻DMP3020(步驟1:3000rpm 10秒, 步驟2:5000rpm 30秒)
4. 軟烤110°C 5分鐘
5. 曝光31~32秒
6. 顯影20秒
7. 硬烤110°C 30分鐘
8. 蒸鍍或濺鍍上金屬Ti/Au (10nm/80nm).
9. 舉離：泡50°C 丙酮30分鐘，超音波隔水震約2秒，逐片以光學顯微鏡看舉離程度。

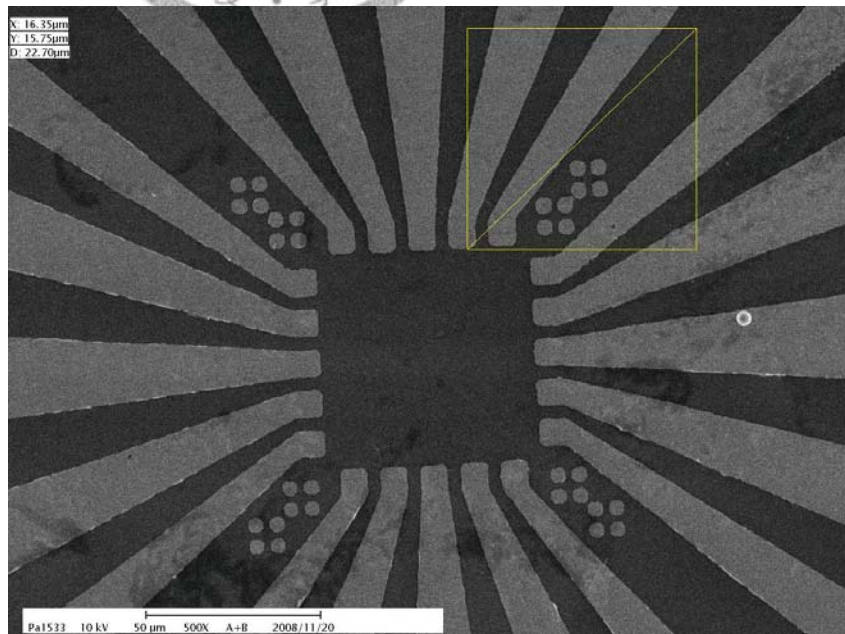


圖4-1. 前置電極的SEM 影像，中間的正方形區域邊長為75 μm 。

4.2 灑奈米線

以下介紹三種方法，都是可行之方法：

4.2.1 方法一：用針尖刮下奈米線後再用此針尖輕沾基板，可使一些奈米線附著於基板上。

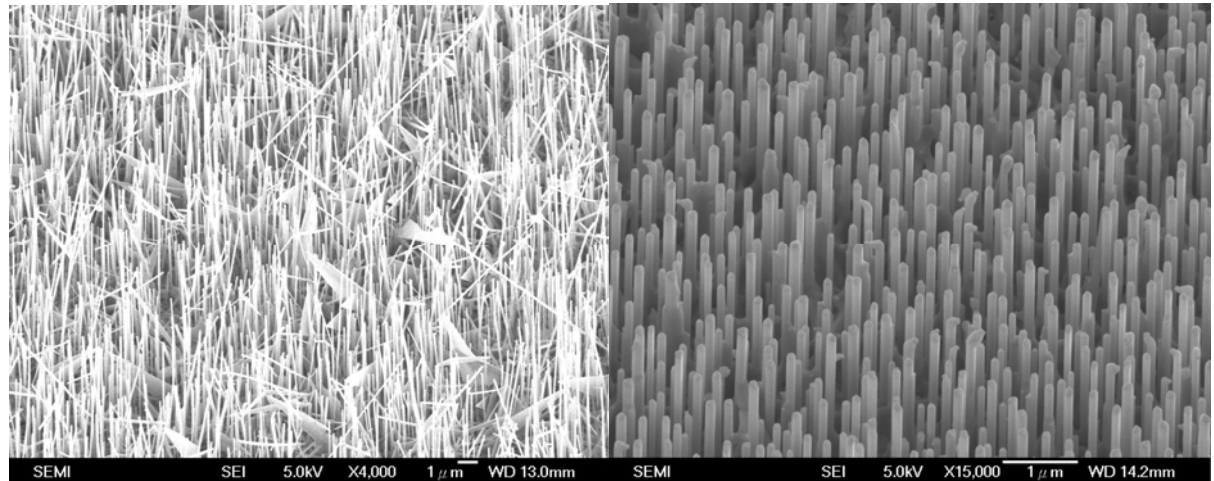


圖4-2. 圖為奈米線樣品，用針尖輕刮後再滾過基板，能使少許奈米線掉落於基板上。

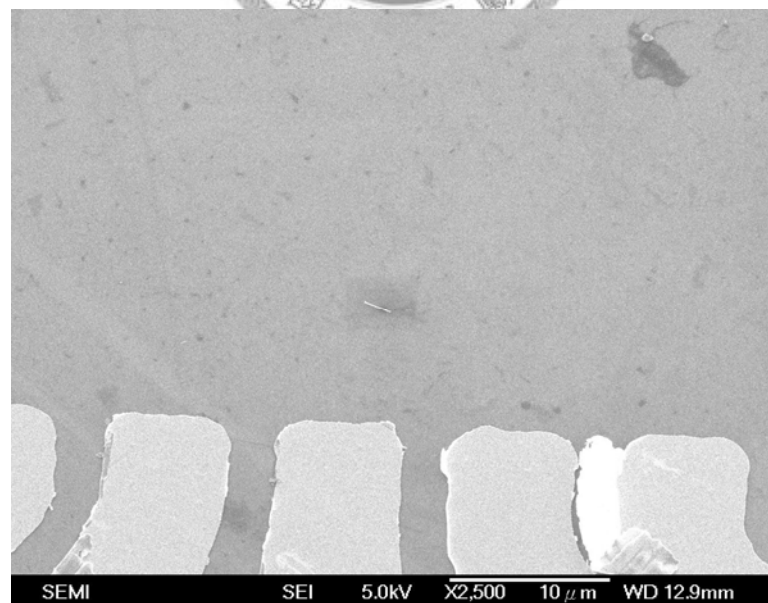


圖4-3.用方法一灑落成功的奈米線。

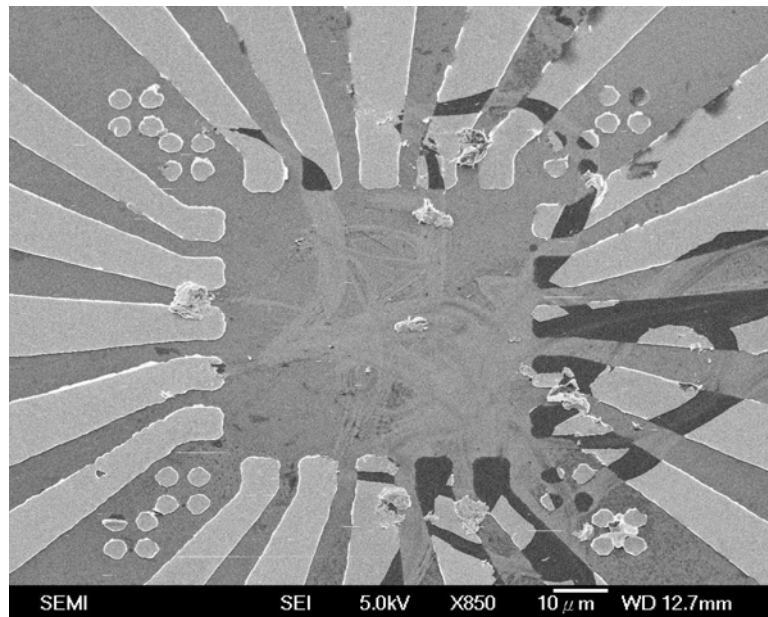


圖4-4.常見的狀況一：奈米線會掉落，但針尖易刮傷前置電極。
(注意：中間正方形邊長為75 μm, 金電極厚度90nm, 皆為很小的尺寸，手需極巧才能不傷電極)。

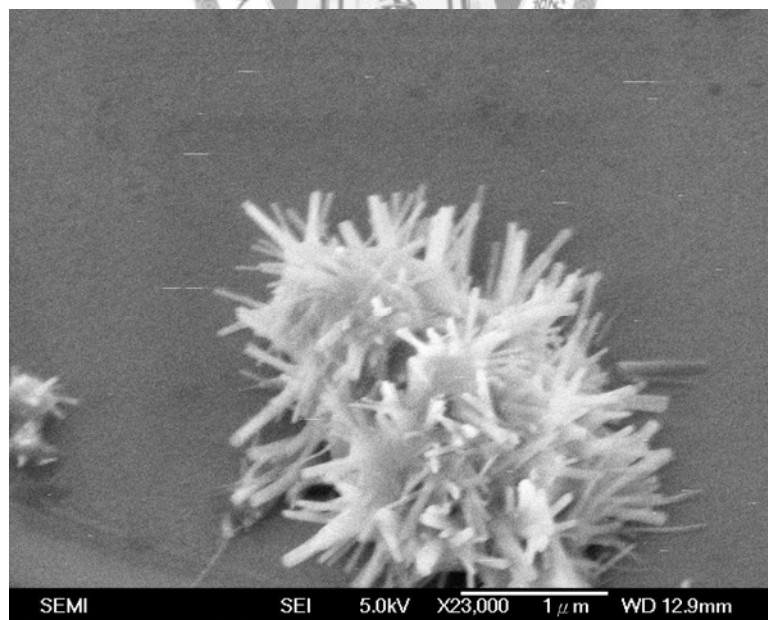


圖4-5.常見的狀況二：奈米線因針尖刮下時摩擦而結成球，可能為摩擦產生靜電使之互相吸引等原因。這樣的奈米線團不能製成單根奈米線元件。

4.2.2 方法二：用針尖刮下於異丙醇溶液，或將奈米線樣品剪成小片置入異丙醇溶液，超音波震約10秒至2分鐘後立即取微米滴管滴於基板。

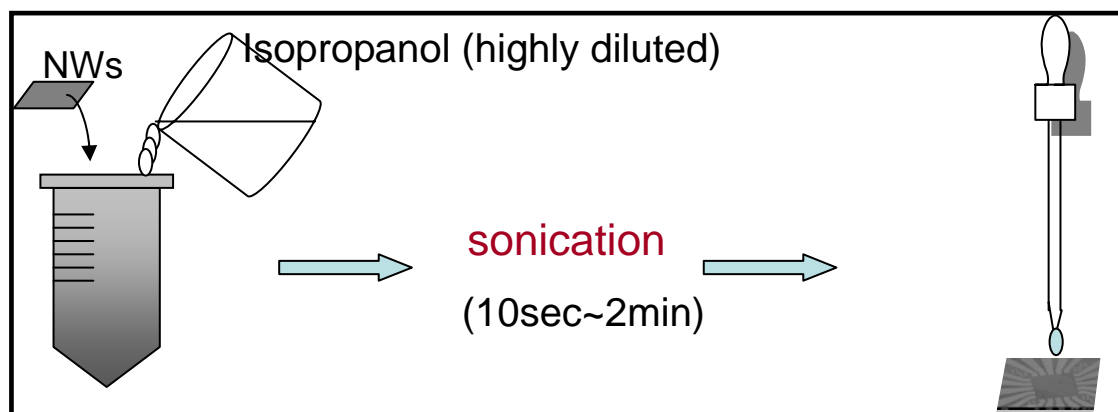


圖4-6. 方法二流程圖。超音波震動的秒數隨奈米線材料及長短而異，震過久則奈米線易震斷成小段，造成後面製程困難；震不夠久則溶液裡奈米線密度極低，不易在 $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ 區域內灑落成功。對於本實驗室長成之氧化鋅而言，30秒為最佳參數。

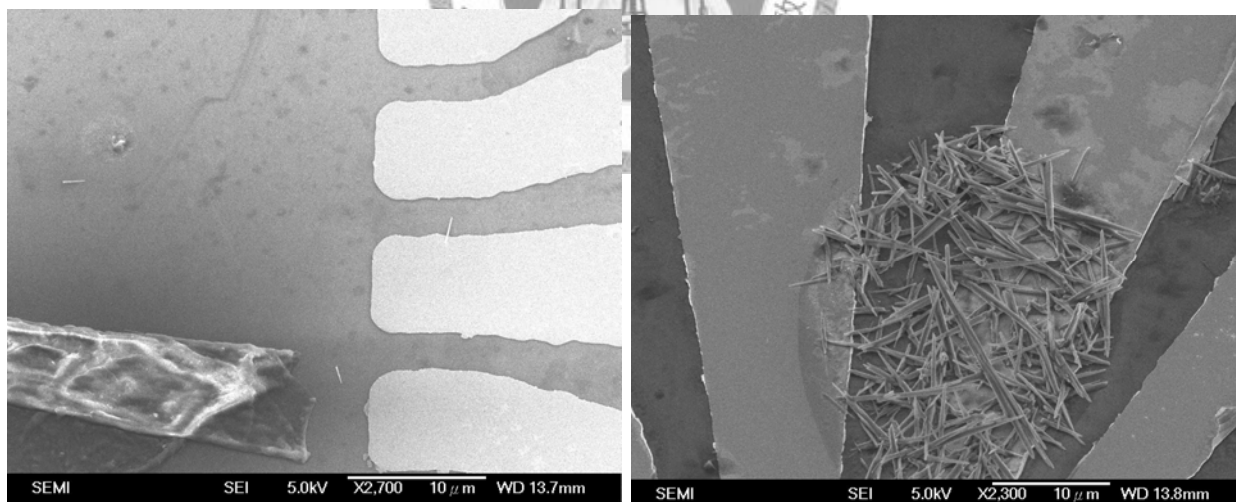


圖4-7. (a)成功機率較方法一高，且不傷前置電極，

(b)有時有奈米線群聚現象，避免的方法為震後立即取滴管滴於基板，若靜置5分鐘以上則會有此現象發生，原因可能為奈米線已沉澱於溶液底，此時吸取的溶液奈米線密度極高，易發生此現象。

4.2.3 方法三：直接在基板上輕敲使奈米線掉落

1. 奈米線樣品面與基板面緊貼

2. 輕敲奈米線樣品背面

注意事項:奈米線樣品不宜太過小片，太過小片的樣品在敲擊過程中易造成前置電極的損耗，原因可能為同樣的力道，面積愈小壓力愈大，

側向的滑動即會刮傷前置電極。若樣品面積大，即使側向滑動使前置電極損傷，也遠離中央畫圖區很遠，尺度較大打線機尚能打，能接成通路。

這是目前試出最好之方法，既乾淨又不須透過溶液。

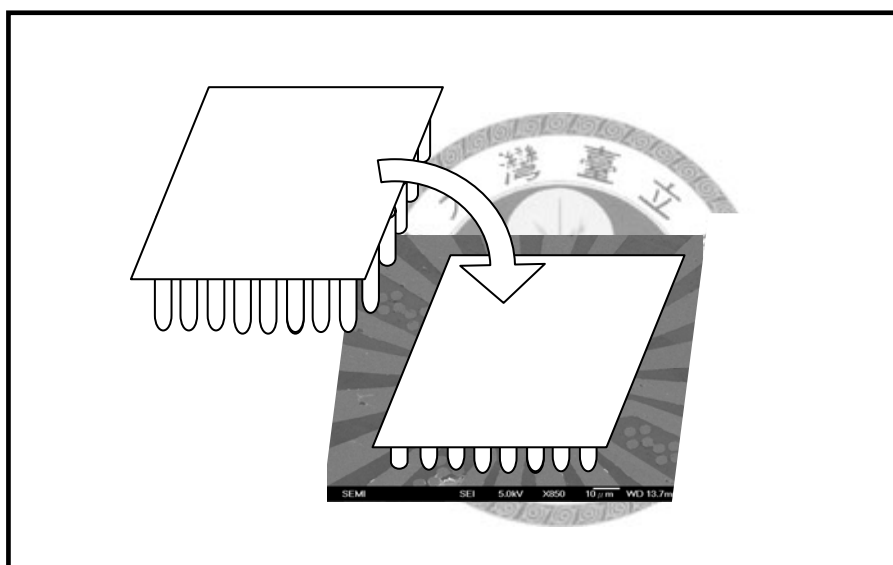


圖4-8.方法三示意圖，將奈米線樣品面蓋在基板上，再於其上輕敲，即可使耐米線掉落。

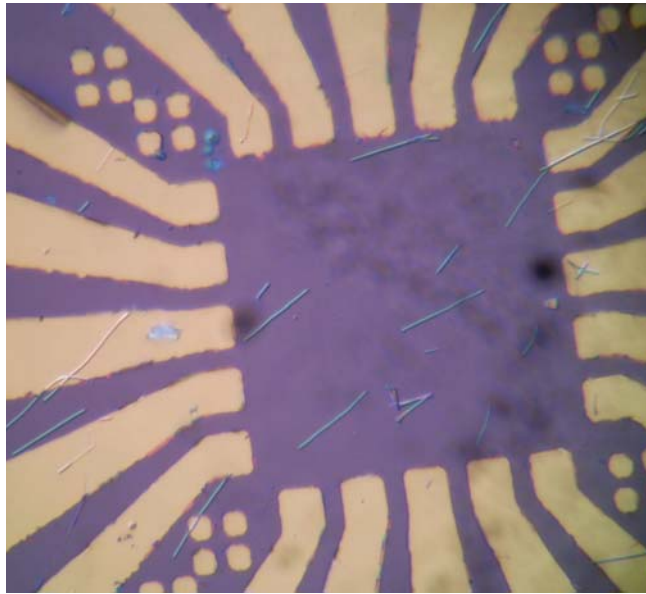


圖4-9.如圖，長奈米線易掉落，灑後基板乾淨且電極無損傷，(黑點為光學顯微鏡本身的污漬)。

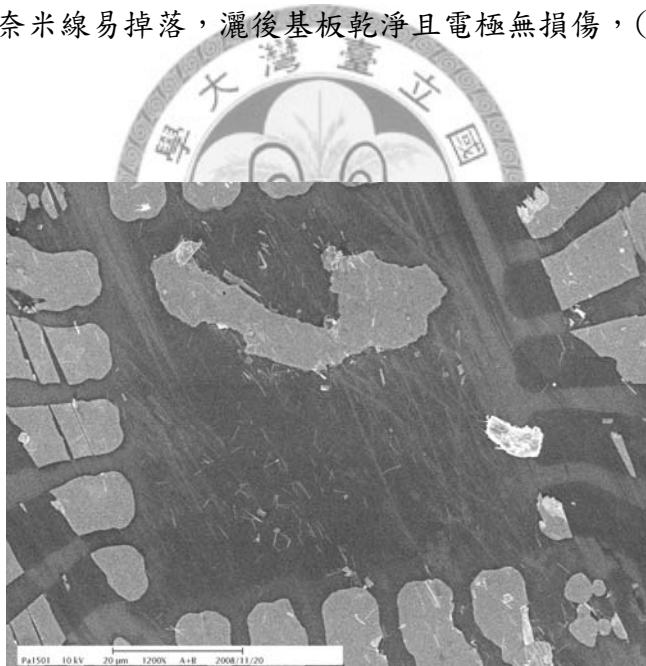


圖4-10.失敗圖：短奈米線掉落甚多，但前置電極有括傷，此為此方法常見的狀況，原因請參考注意事項。

如圖4-10，初嘗試此方法會設想將奈米線只灑於中間正方形區域間，其他地方保持乾淨，便將奈米線樣品切為小片，方便對準中央 $75\mu\text{m}\times 75\mu\text{m}$ 工作區域，但此舉因為受力面積小單位面積壓力大，易造成前置電極被敲損，也見落下的奈米線甚多。改進方法為樣品盡量覆蓋整個基板較佳，通常樣品愈邊緣的奈米線愈易被敲下，所以中間較少掉落，這剛好符合我們的需求，中間區域較乾淨且目標明確，方便做e-beam。

然而此法雖有優點，但仍有期限制，此法僅適用於易掉落之奈米線，本論文中提及的氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線因硬度較大不易敲落，亦或需大力敲擊才能落下，但大力敲擊時會損傷前置電極導致斷路，如下圖，所以我們改取方法二來做硬度較大的奈米線。

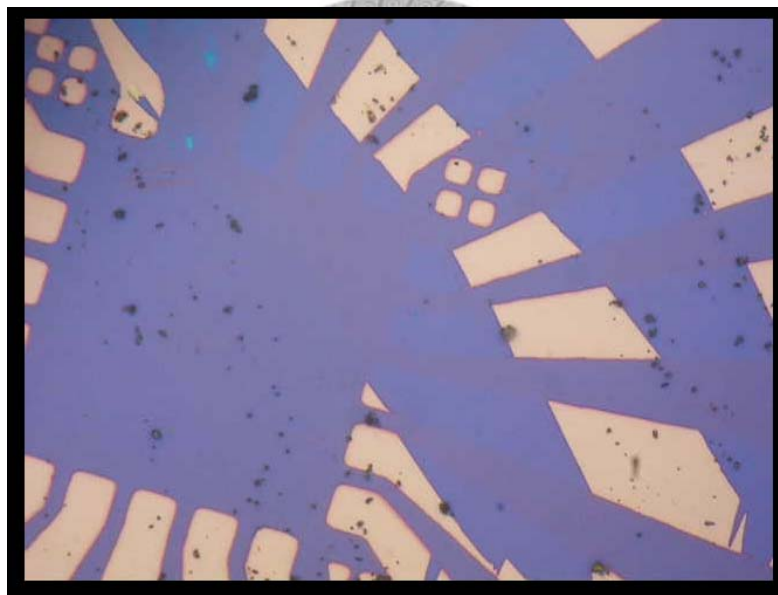


圖4-11.樣品沒有經過裁切，但因硬度大或長度短之奈米線不易掉落，需敲擊大力，造成前置電極的破損，因此此法不適用於硬度大之樣品。圖中之黑點為掉落的塊狀物，表示硬度大的樣品確實不易用敲擊之方法將奈米線灑於基板上。

4.3 用SEM定位奈米線的座標.

基板中間的電子束畫圖工作區如圖4-12所示，為 $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ 的正方形區域，正方形外有定位點。在灑上奈米線後，可用AFM或SEM來確定是否灑落成功，且定位其位置。

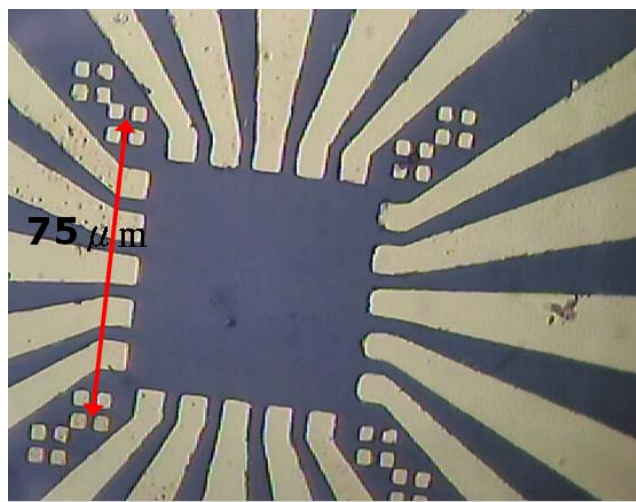


圖4-12.定位點之間距離 $75\mu\text{m}$ ，圍成一 $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ 的正方形區域。

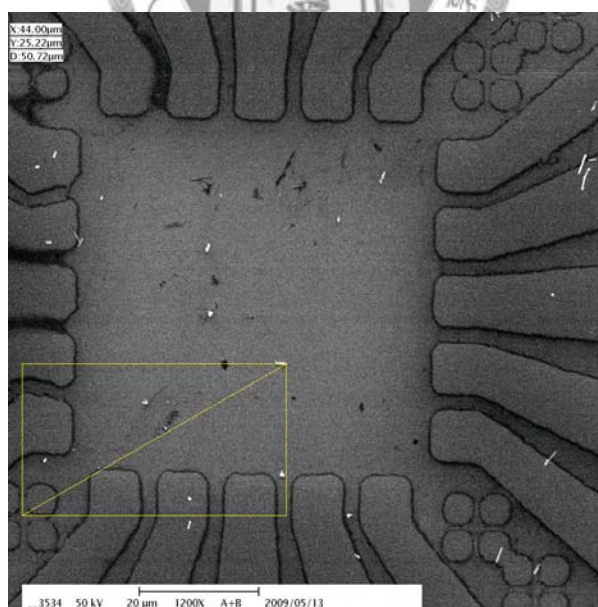


圖4-13.示意圖：以其中一定位點為 $(0,0)$ ，去定位奈米線的位置，再換算至電子束微影系統的座標。

4.4 用電子束微影術從奈米線接出電極至前置電極

將以定位好的樣品用電子束微影術接出電極至前置電極，流程如下。

1. 塗佈ZEP520光子阻劑(步驟1:500rpm 5秒, 步驟2:5000rpm 90秒)
2. 軟烤180°C5分鐘
3. 用ECA程式畫出電極圖案
4. 找出兩個定位點，用100pA的電子束將圖案曝蓋上去，畫線時間為10 μ 秒
5. 顯影20秒~2分鐘
6. 蒸鍍金屬
7. 舉離：泡48°C ZD-MAC24小時後，輕微搖晃，直至圖案顯現。

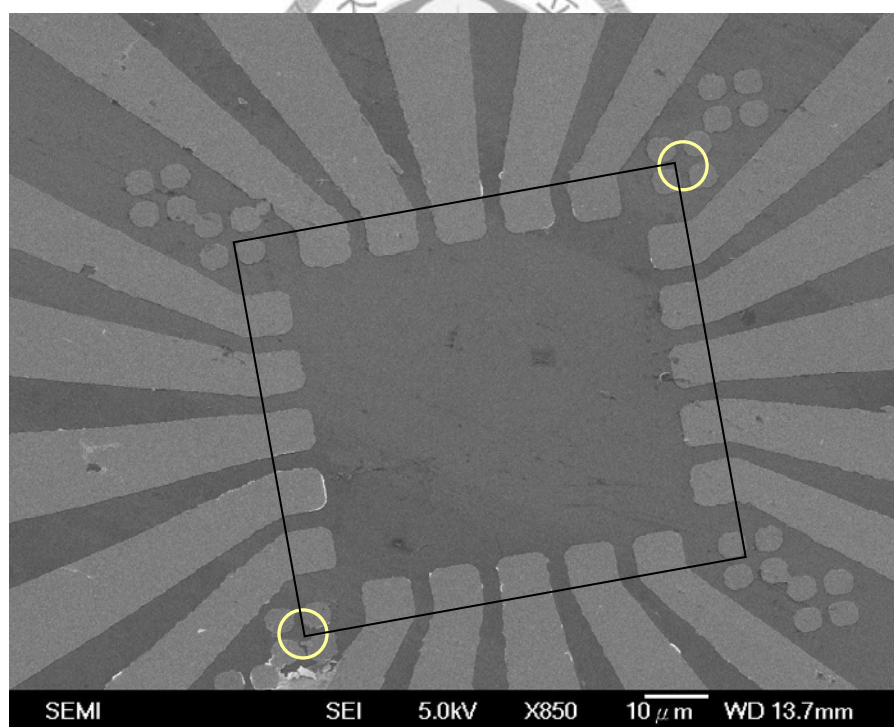


圖4-14.步驟4的示意圖，找出兩定位點後，程式會以此兩點定義出一正方形，將ECA畫之75 μ m x75 μ m正方形曝蓋上去。

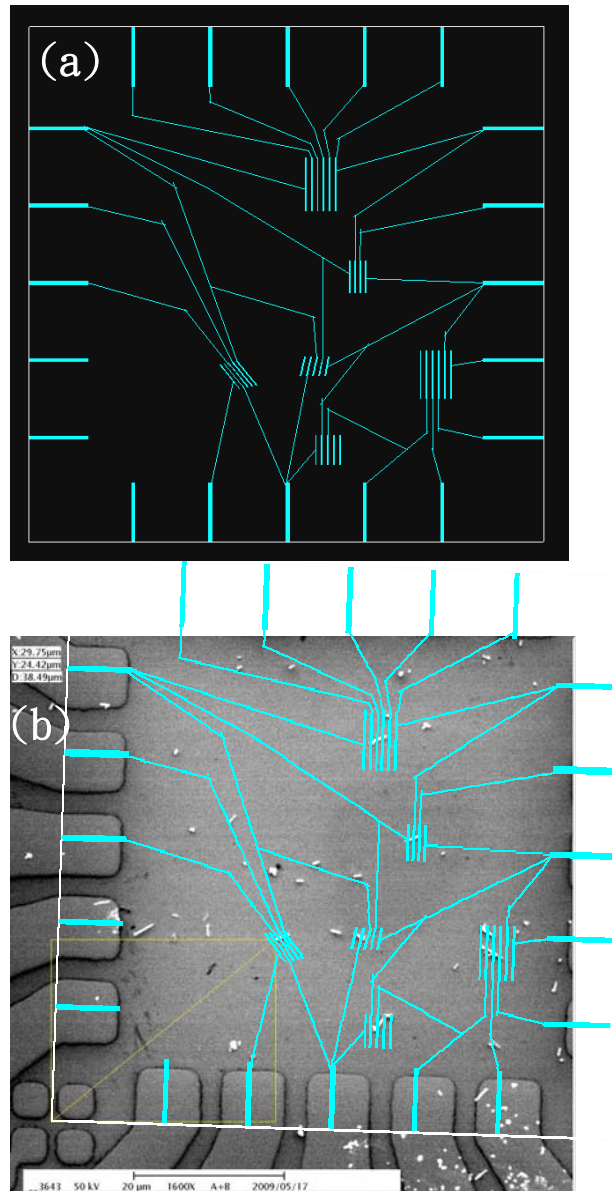


圖4-15. : (a)用ECA程式所畫之圖。(b)曝寫的示意圖，將ECA之圖曝寫上樣品上，形同可在奈米線上做圖，之後將金屬鍍蓋於藍線區域接成通路後，即可測量單根奈米線的特性。

由上圖可看出，這樣的作法有兩層的誤差，一為用SEM定位時之誤差，另一位找定位點時的誤差，對於長度不長的奈米線(約 $5\mu\text{m}$)，這些誤差將是造成此實驗之困難與失敗的主要原因，定位有些偏差即無法接到奈米線。

第五章 實驗結果與討論

5.1 奈米線的 SEM 圖

本節主要呈現的是單根奈米線的 SEM 圖，以下將分別呈現氧化鋅奈米線及氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線 SEM 圖。

【1】 氧化鋅奈米線：

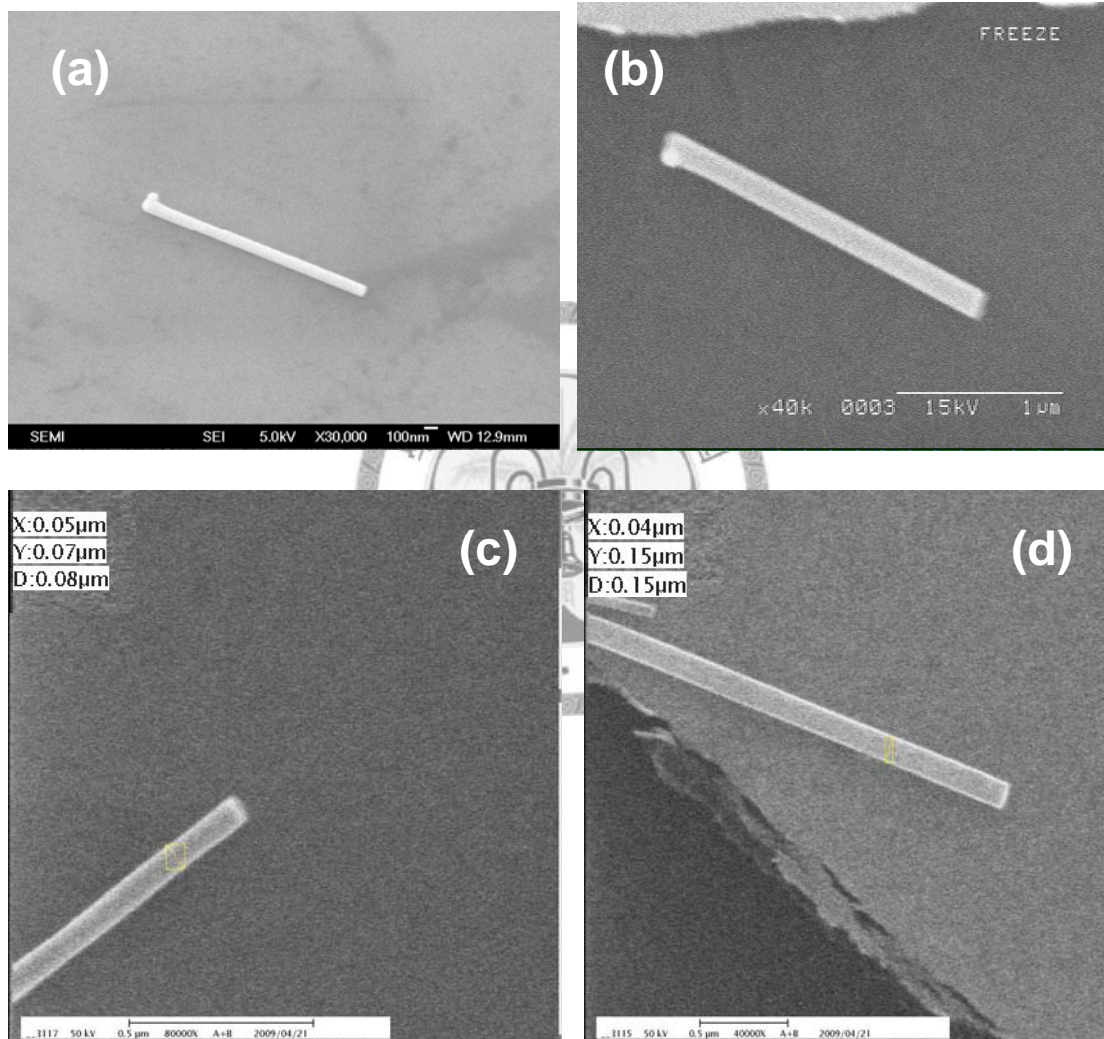


圖 5-1:圖(a)(b)為灑下之單根奈米線，清晰可見有 VLS 的催化劑金顆粒。製程最後會在兩端鍍上鉻/金電極，所以有金顆粒對實驗無影響。圖(c)(d)為藉由 SEM 取到奈米線的直徑，本實驗用之氧化鋅奈米線直徑約為 80nm 至 150nm 之間。

【2】 氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線：

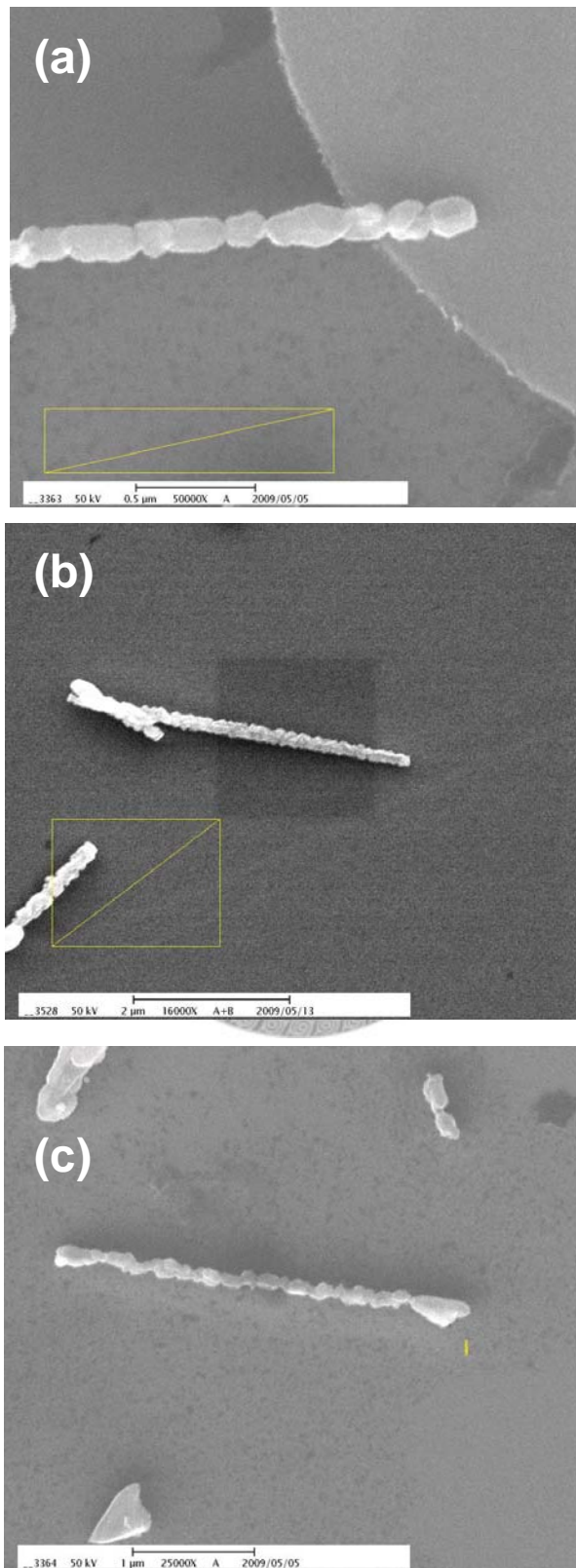


圖 5-2:圖(a)(b)(c)為灑下之單根氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線，可見各根的包覆情況不一樣，成塊狀附著，不見氧化鋅奈米線核柱內層。

5.2 製作單根奈米線元件之圖

【1】單根氧化鋅奈米線

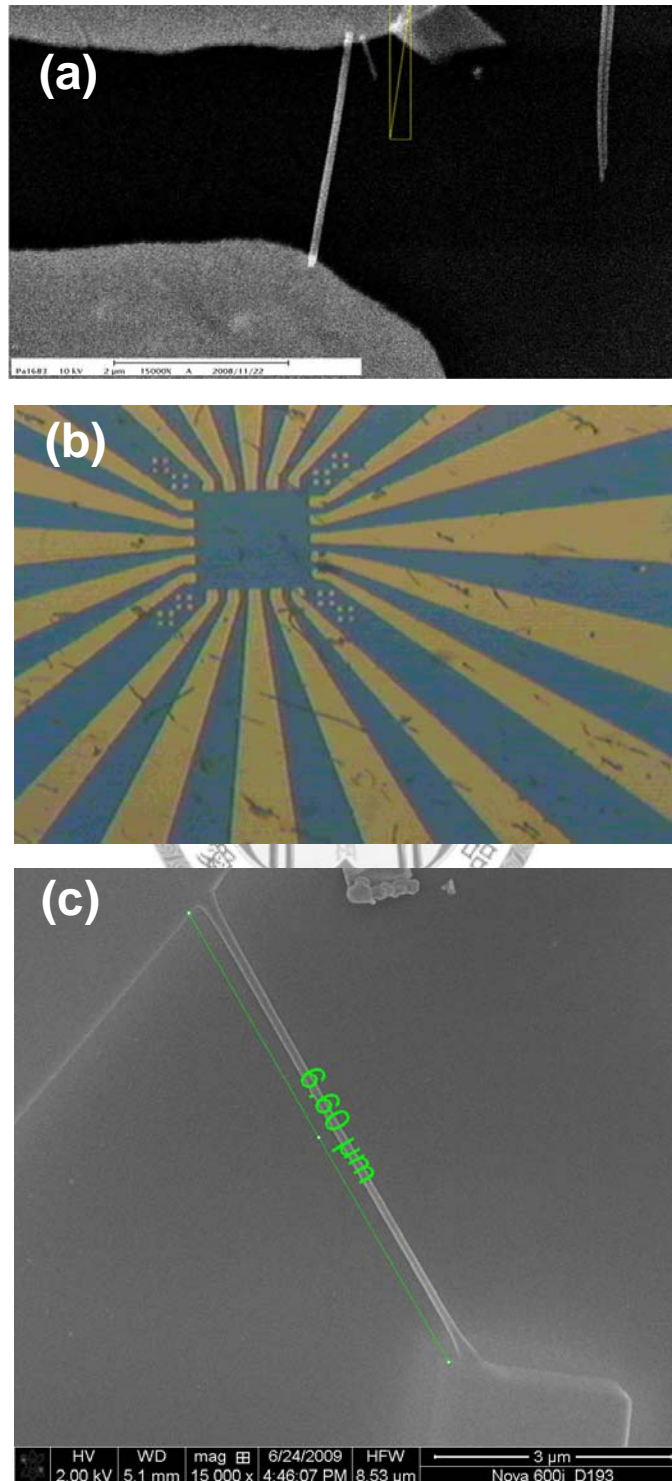


圖 5-3.:圖(a) 樣品 SH1113 在 SEM 下的圖像。(b) 樣品 SH203 在光學顯微鏡下的圖像。(c) 樣品 SH621 在 FESEM 下的圖像。

【2】單根氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線

因氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線表面不平滑，故有蓋上金屬的表面亦不平整，
如圖 5-4.所示。

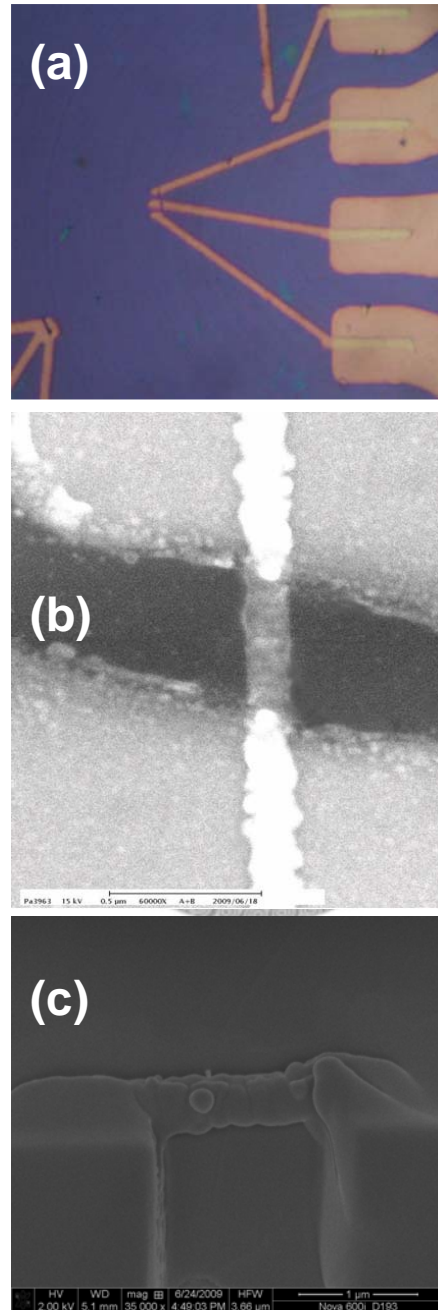


圖 5-4.:圖(a)樣品 SH525 在光學顯微鏡下的圖像；

(b) 樣品 SH525 在 SEM 下的圖像；

(c) 樣品 SH620 在 FESEM 下的圖像。

【3】打鋁線及封裝單根奈米線的元件成品

用電子束成功做出電極後，我們用鋁線連接基板與封裝板，示意圖如下。

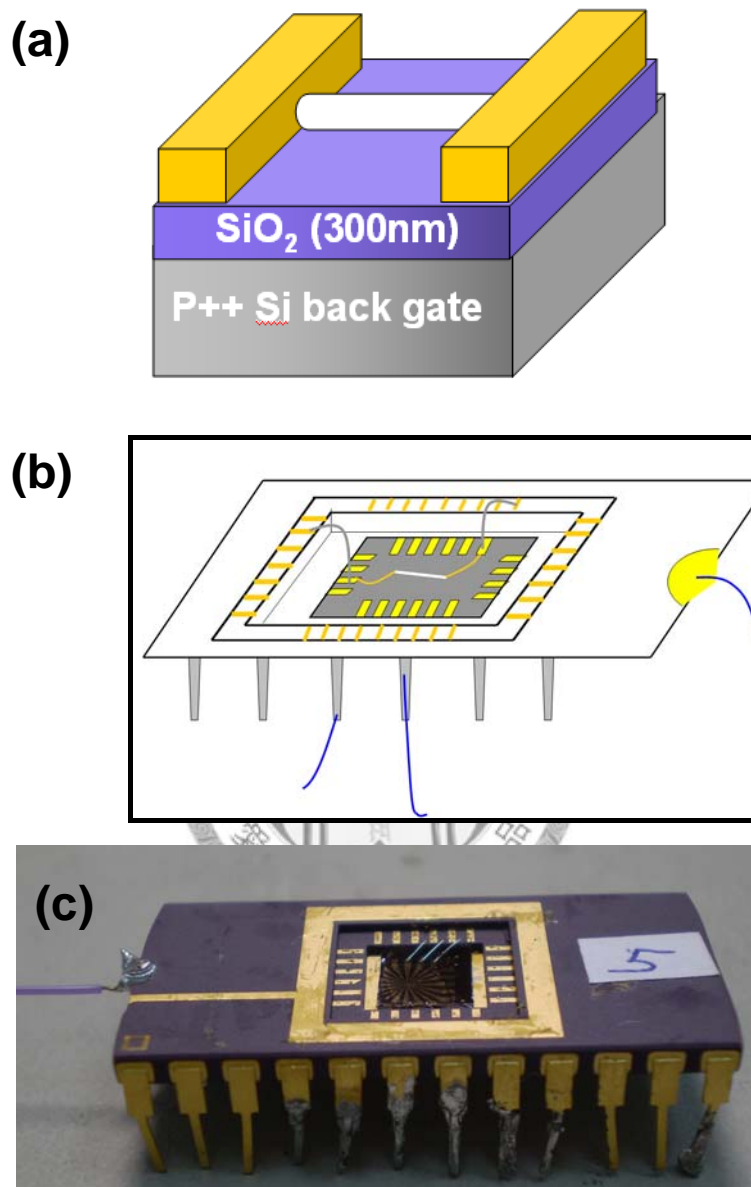


圖 5-5.:圖(a)做出的奈米元件為 MOS 。(b) 為整個製程的簡易圖，先用黃光製程做好前置電極，運用電子束微影連接奈米線與前置電極，最後打鋁線連接前置電極與封裝板，最後用鉚槍拉電線出來，用的聯結金屬為焊錫。(c)成品的實照圖，此封裝板長寬高各為 3cm x 1.5cm x 1.5cm，最後蓋上載玻片，完成元件製程。

5.3 單根氧化鋅奈米線元件

【1】場效電晶體

1. 元件製程後，沒有經過高溫爐加熱(anneal):

$I_{ds}-V_{ds}$ 曲線 及 V_g 的效應

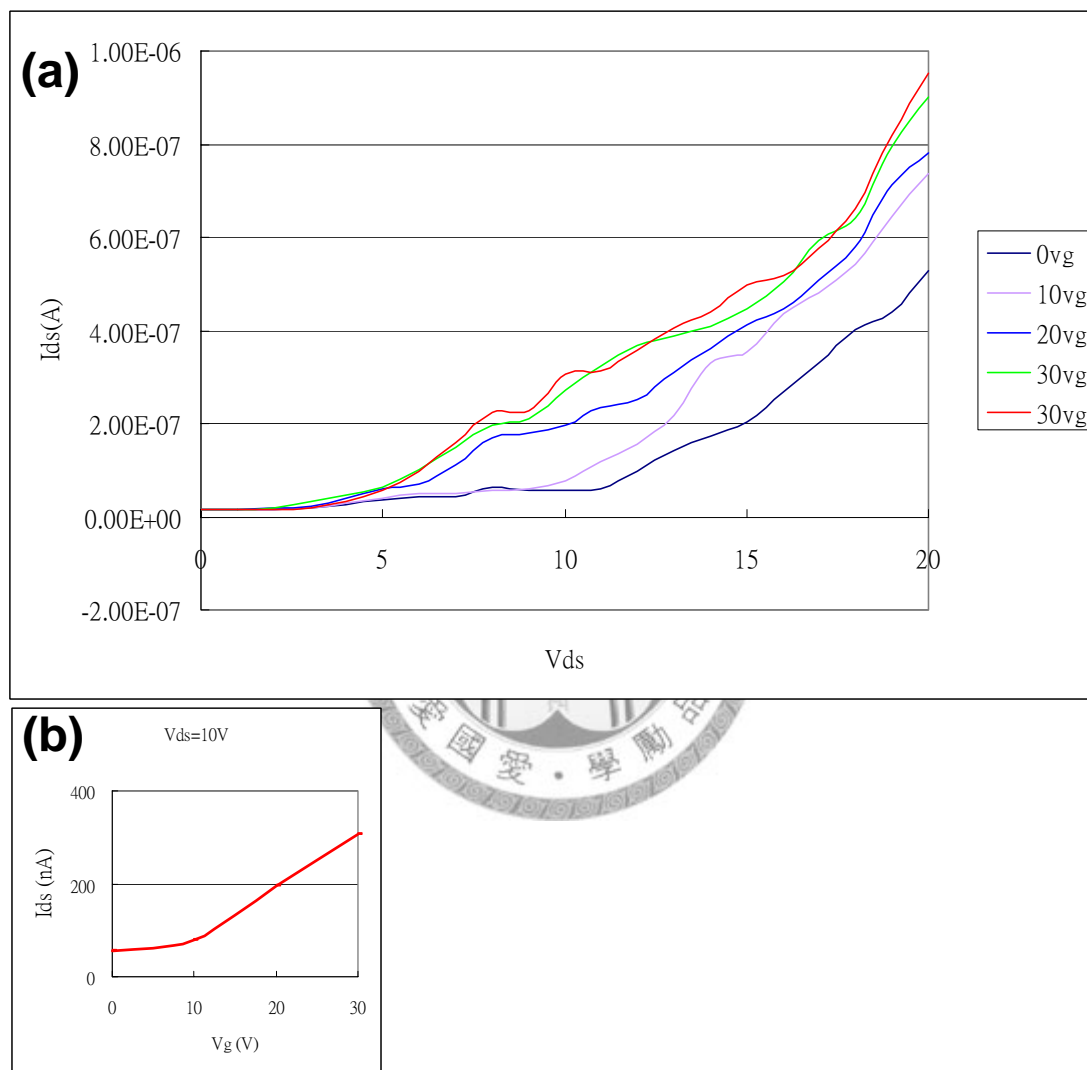


圖 5-6. (a) $I_{ds}-V_{ds}$ 曲線在不同 V_g 下的變化，在 V_g 為正偏壓時，電流有增大的現象，可推斷氧化鋅奈米線為 n 型(n-type)半導體，與理論相符。(b) 在固定 V_{ds} 下， $I_{ds}-V_g$ 的曲線。

2. 元件製程後，在氧氣中加熱(anneal) 350°C, 30min:

$I_{ds}-V_{ds}$ 曲線 及 V_g 的效應

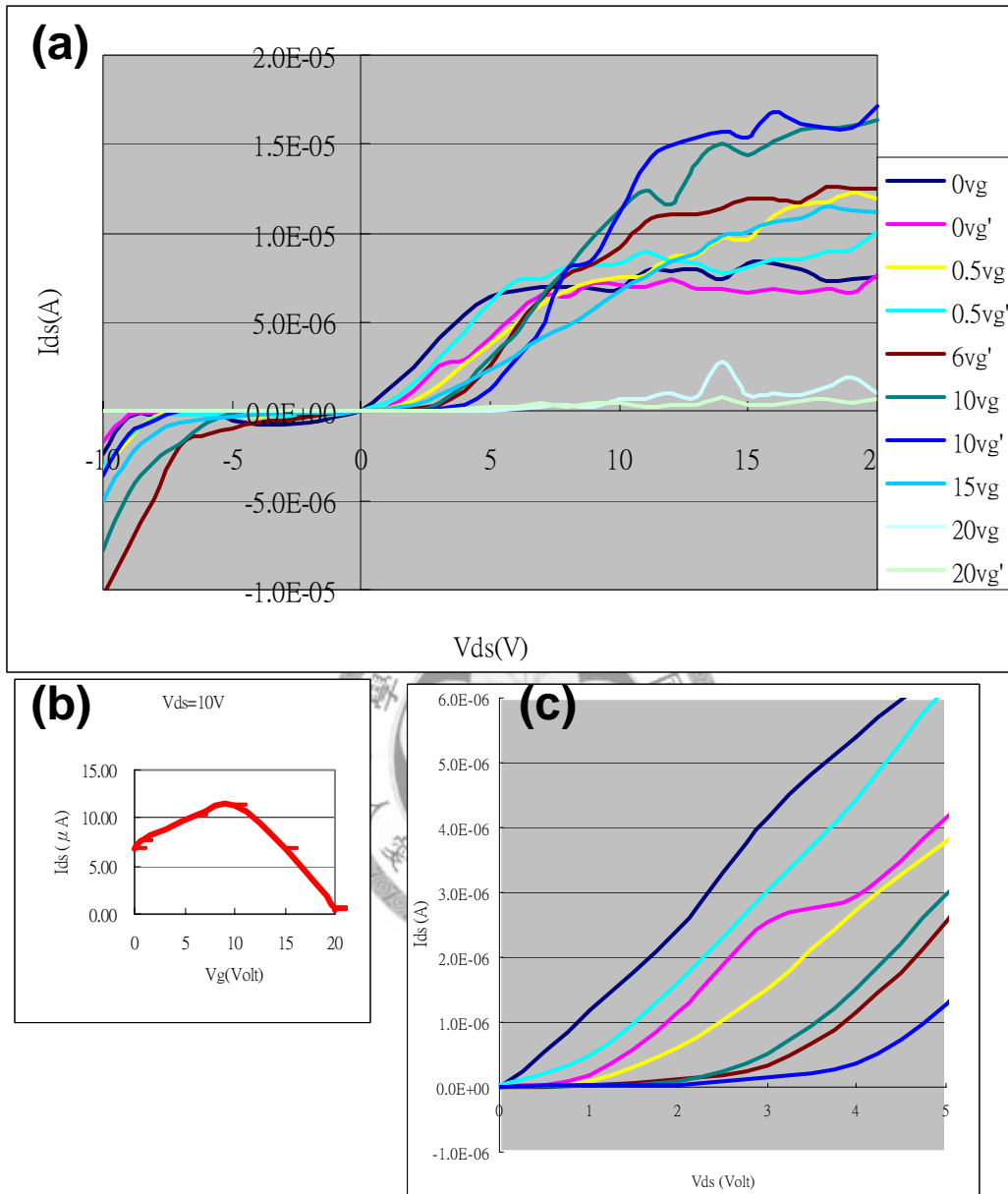


圖 5-7.: (a) $I_{ds}-V_{ds}$ 曲線在不同 V_g 下的變化，在 V_g 為正偏壓時，電流有增大的現象，可推斷氧化鋅奈米線為 n 型(n-type)半導體，與理論相符。(b) 在固定 V_{ds} 下， $I_{ds}-V_g$ 的曲線，在 V_g 大於 10Volt， I_{ds} 有減小的趨勢，重複測量圖(b) 有重複性，故排除元件壞掉的可能，應為 SiO_2 絕緣層的漏電流。圖(c):由圖(a) 顯示 $I_{ds}-V_g$ 非任何時候都成正比，若將圖(a) V_{ds} 由 0Volt 至 5Volt 放大，顯示電流有隨時愈量測值愈低的趨勢，(量測順序為 $V_g=0, 1, 2\cdots$)這現象是因為氧化鋅

天生表面的氧缺陷所造成，在加 V_g 偏壓時，會將載電載子-電子吸引至表面，而會有部份電子被空氣中的氧所結合，形同可載電的載子在表面被困住，而使電流降低。



3. 元件製程後，在氫氣、氮氣中加熱(anneal) 350°C, 30min:

I_{ds} - V_{ds} 曲線 及 V_g 的效應

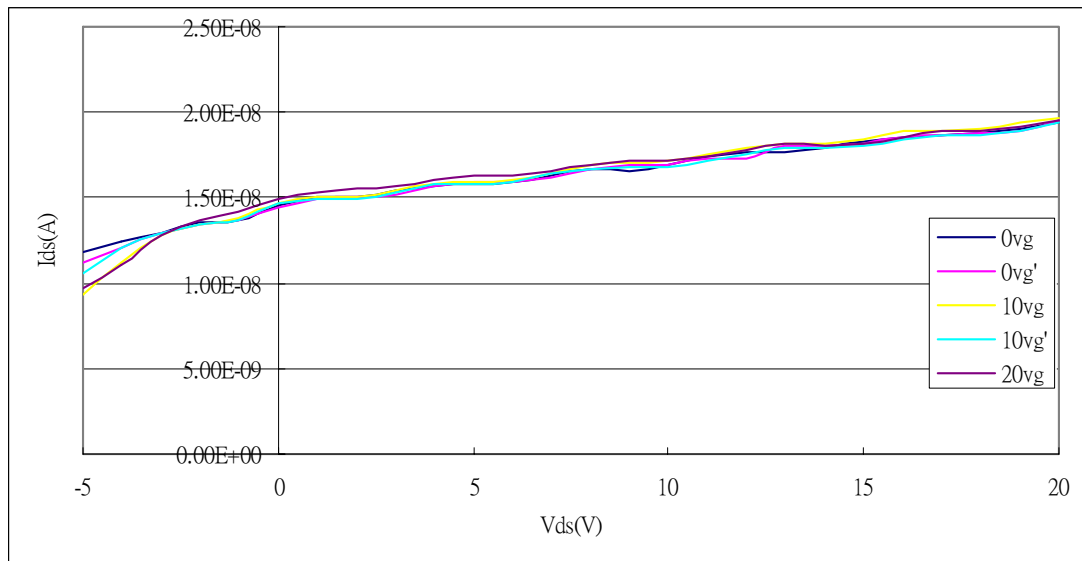


圖 5-8.:圖顯示改變 V_g 沒有明顯的變化，在測量背景值後，推斷這些元件應該是失敗了，可能的原因為線路間黏接(contact)太差，造成的電阻遠大於氧化鋅奈米線本身的電阻，加 V_g 改善載電通道的效應相對太小，故 I_{ds} 沒有明顯的變化。而在 V_{ds} 為 0 Volt 時， I_{ds} 並不為 0 Ampere，此可用圖 5-9 解釋。

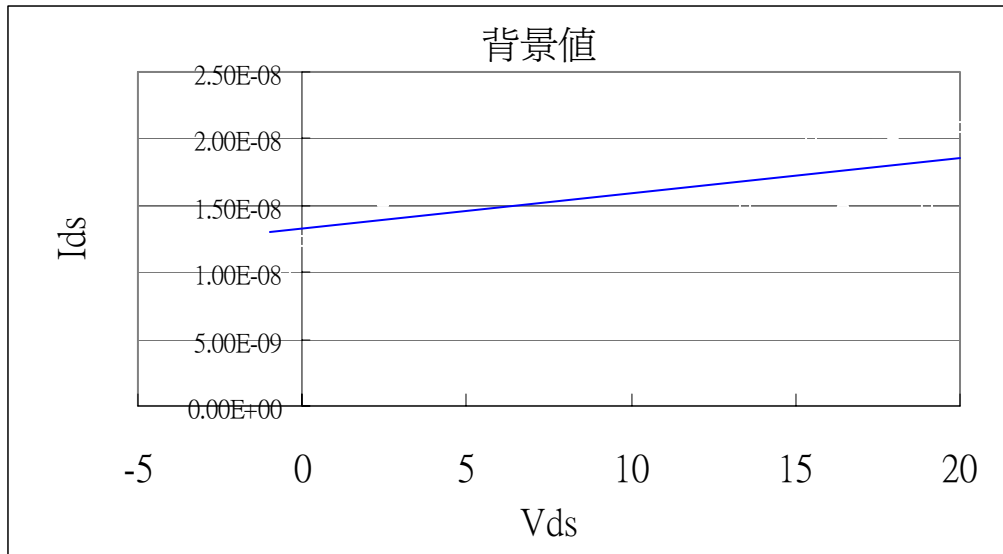


圖 5-9.: 此為 I-V 量測系統在室溫，偏壓 0 至 20 伏特的背景訊號。電流值為 10nA 至 20nA 左右，故可說明圖 5-8 的量測圖是背景訊號。



4. 元件製程後，在真空中加熱(anneal) 350°C, 30min:

$I_{ds}-V_{ds}$ 曲線 及 V_g 的效應

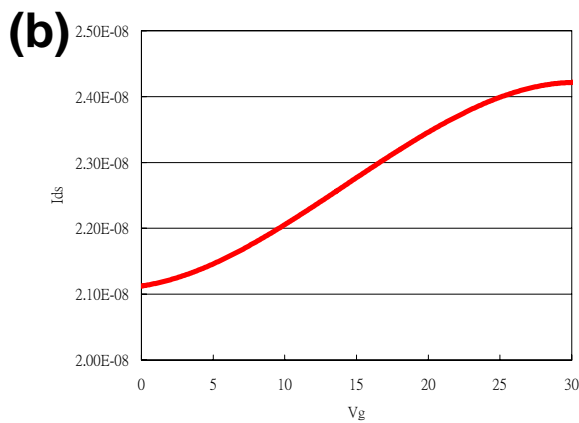
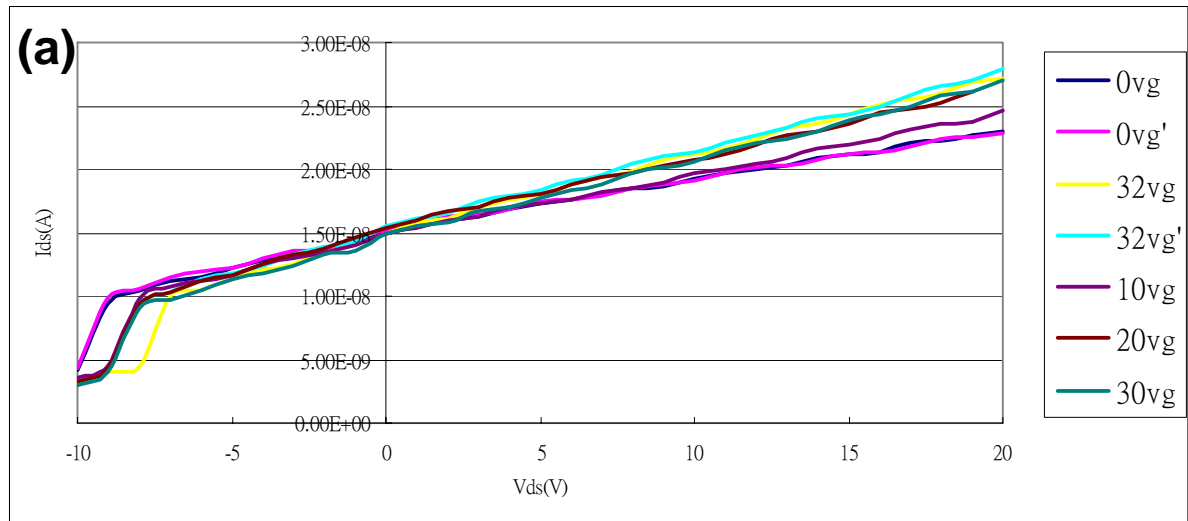


圖 5-10. (a) 圖顯示改變 V_g 時 I_{ds} 只有些微的變化，但仍有 FET 的性質。這些元件應該可能線路間黏接(contact)太差以至於電位屏障太大，或者氧化鋅奈米線表面的氧缺陷很多，造成加 V_g 時 I_{ds} 沒有明顯的隨之變化。而在 $V_g = -10\text{V}$ 時有抖升的現象，其來源為儀器的量測背景訊號及延遲性，解釋如下圖。

(b) 固定 $V_{ds} = 1\text{V}$ 時， $I_{ds}-V_g$ 圖，為 n 型 FET。

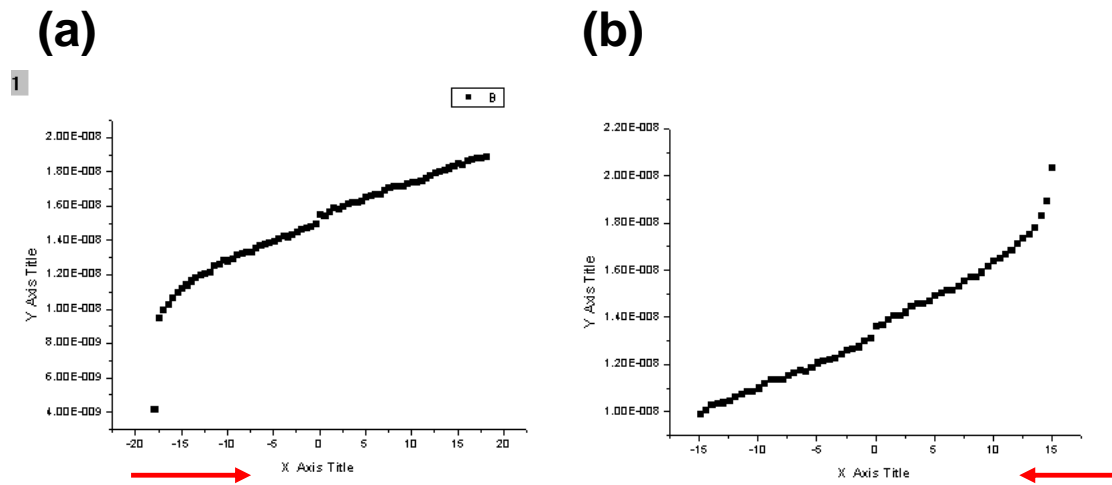


圖 5-11. (a)(b)為同一個元件的 I-V 曲線圖。圖(a)的量測為順向量測， V_{ds} 由-20至+20 伏特；圖(b)為逆向量測， V_{ds} 由+20 至-20 伏特，由此二圖可看出抖升的訊號為量測誤差，與機器的接收敏銳度有關，並非來自元件的訊號。



【2】感光元件

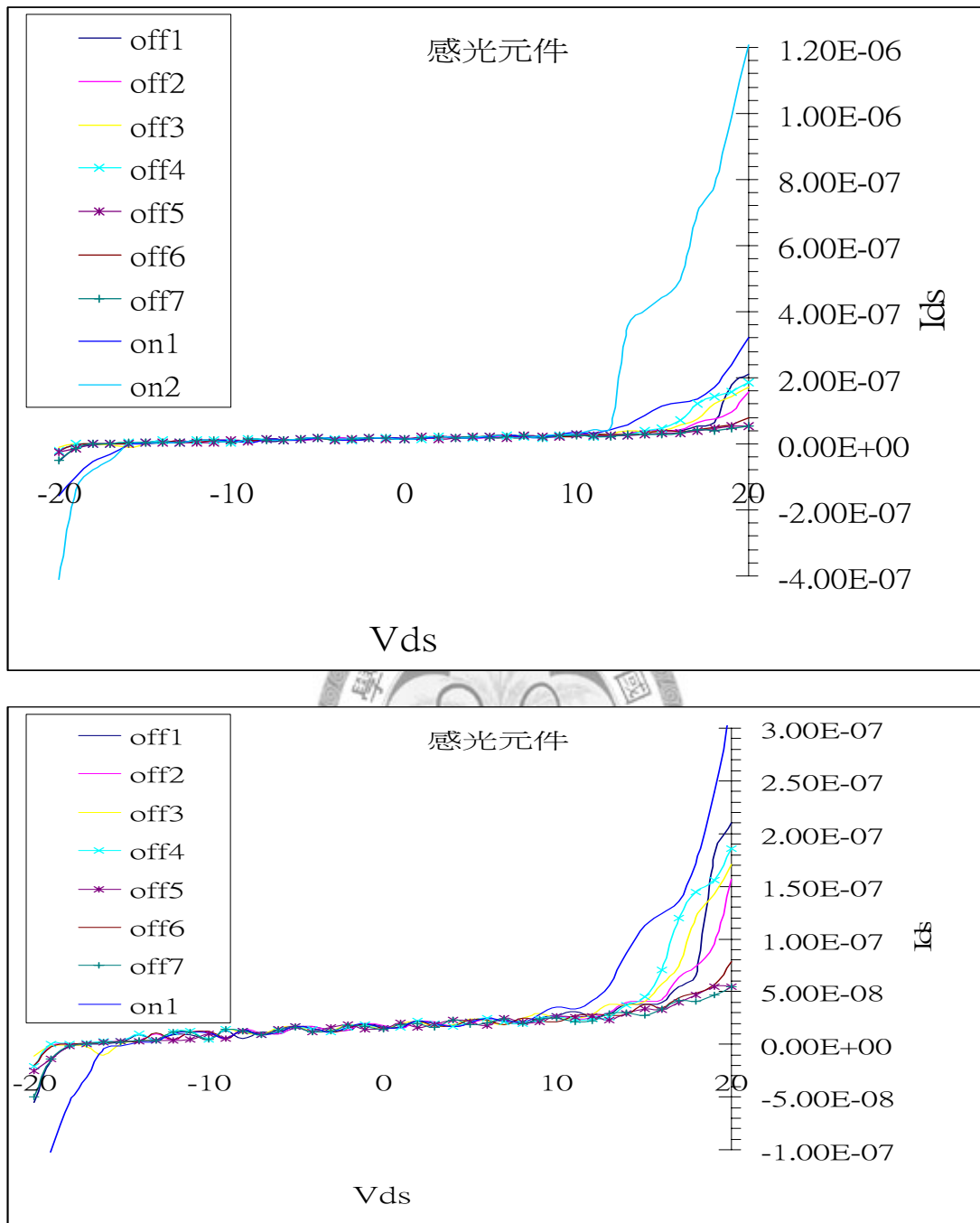


圖 5-12.:off1-7 為量測的順序，由圖可看出有愈量愈差的趨勢。on1 表示開氙氣燈後立即量測，電流驟增，然等到氙氣燈穩定後，測量 on2，得到很高的電流值，證實氧化鋅奈米線在照光後，載電載子有明顯增加。

5.4 單根氧化鋅/碲化鋅-核/殼奈米線元件

【1】場效電晶體

1. 氧化鋅/碲化鋅-核/殼示意圖

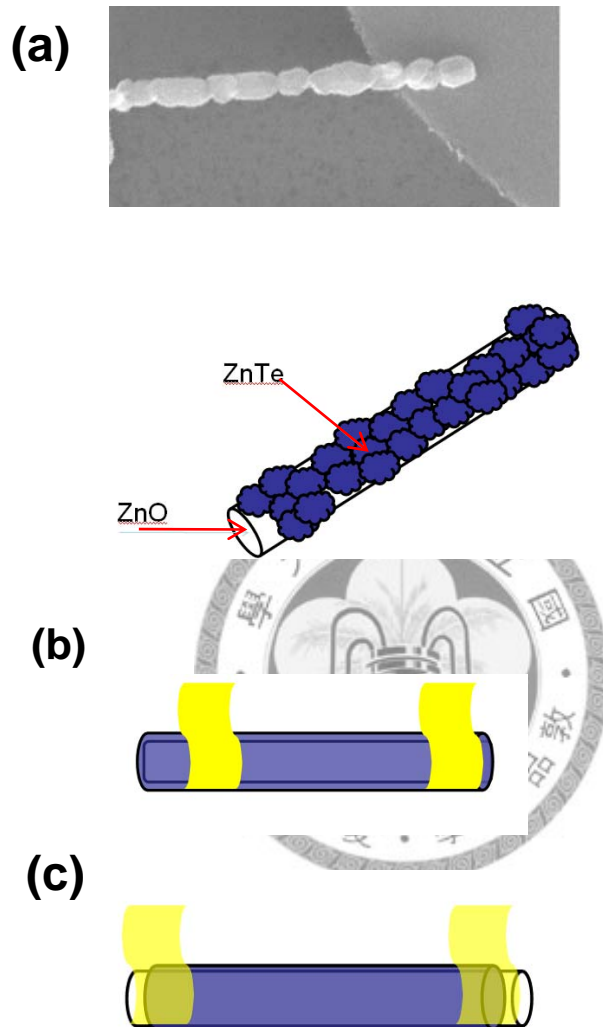


圖 5-13: 由圖 5-2 可看出碲化鋅/殼的包覆為成塊的附著在氧化鋅奈米線上，示意圖如 (a)。在元件製成後，去照 SEM 圖無法看出接到哪個表面，圖 (b) (c) 為接電極時可能的接法，(b) 為只有接到碲化鋅/殼，(c) 為有接到氧化鋅/碲化鋅-核/殼。

2. 元件製程後，在真空中加熱(anneal)200°C, 10min:

$I_{ds}-V_{ds}$ 曲線 及 V_g 的效應

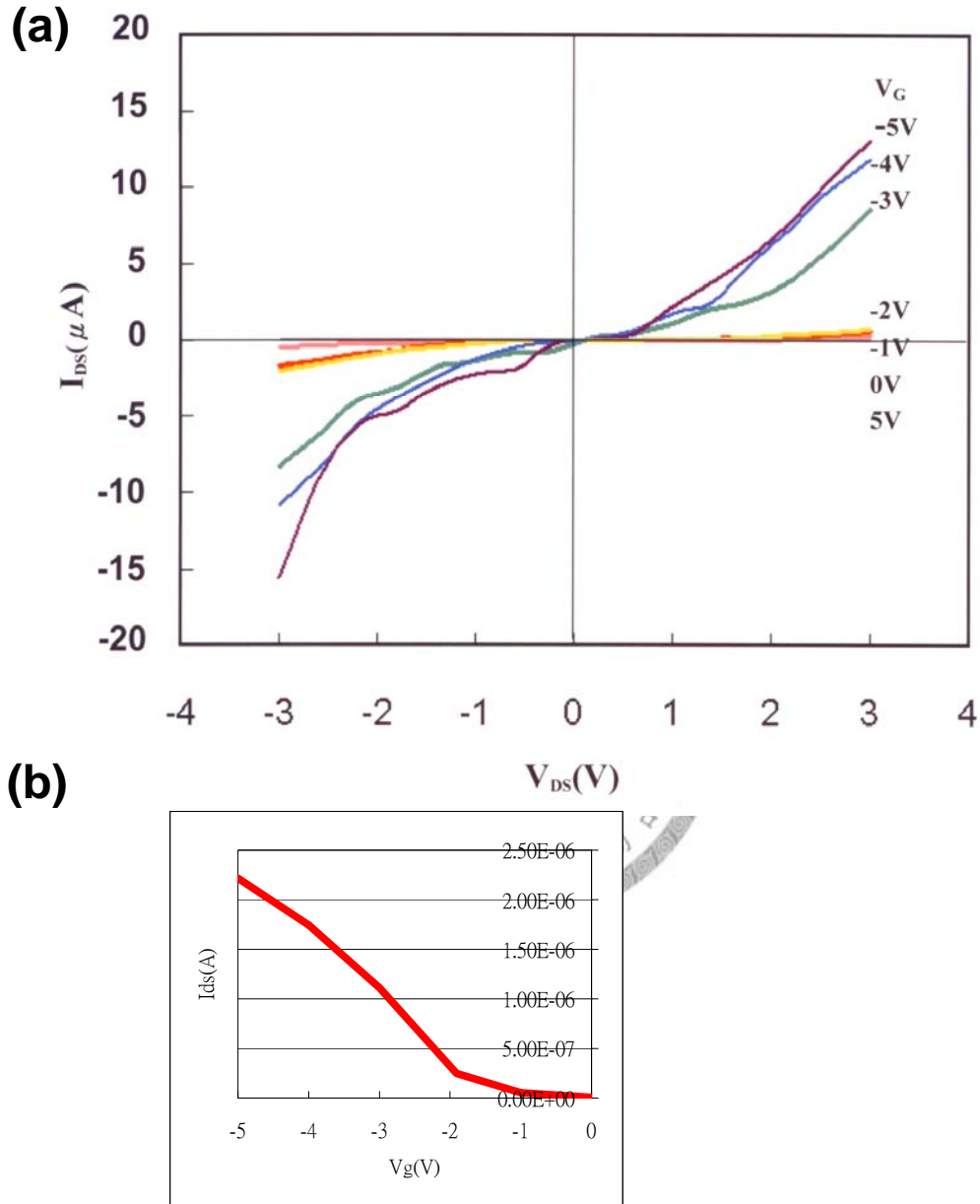


圖 5-14. (a)量測結果此元件為 P 型場效半導體，然我們知道氧化鋅奈米線為 n 型半導體，碲化鋅為 p 型，故我們討論結果為電流可能主要由碲化鋅傳遞，此元件碲化鋅的效應大於氧化鋅的效應。(b) 固定 $V_{ds}=1V$ 時， $I_{ds}-V_g$ 圖，為 p 型 FET。

5.5 良率低的原因及討論

因為本實驗所使用之奈米線不長，平均約 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ，所以減少每個步驟的誤差成為本實驗最重要的細節。此小節主要探討如何將定位的誤差減至最小，還有討論用電子束微影系統時遇到之困難。

1. 定位誤差：

定位時，用即時觀看與慢速掃描有誤差，由下圖可看出約 $0.8\ \mu\text{m}$ ，所以為求定位精準應使用慢速掃描，但因觀看時等同於在曝光，常在力求精準時而使周圍曝光過度，嚴重時會損失周圍的電極，所以本實驗的慢速掃描參數為一次為限，掃描一次後立即定位。

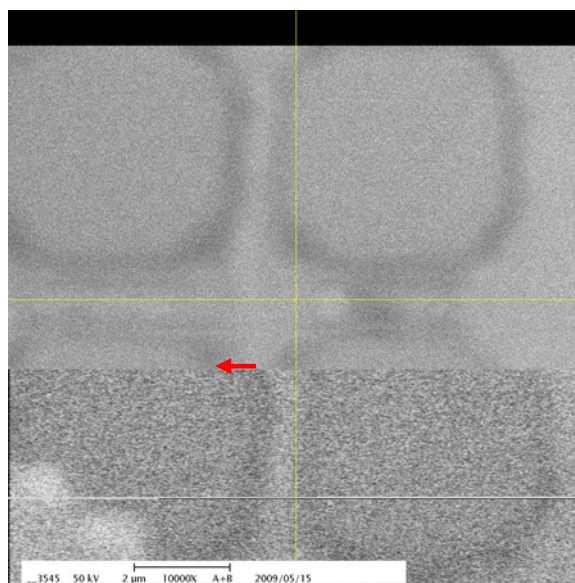


圖 5-15. 即時觀看與慢速掃描的誤差。

2. 系統誤差：

使用電子束微影術時，有時會有無法預期的誤差產生，如下：

- a. 定位看起來良好，但 ECA 圖蓋上去時有偏差，如圖 5-16.，ECA 之圖應以兩定位點定義出的正方形曝蓋，但可看出畫出之圖有偏移與旋轉。

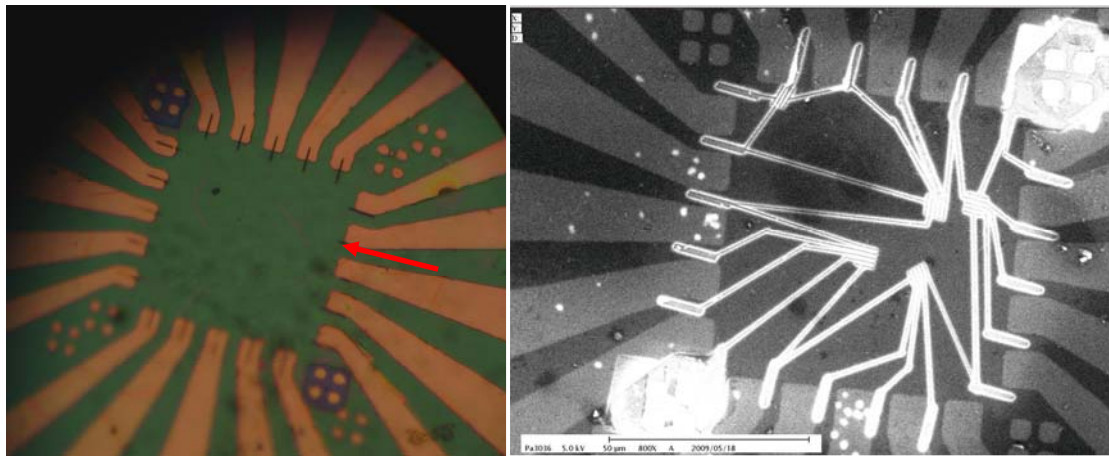


圖 5-16. ECA 圖之偏移與旋轉。

- b. 定位點一移至定位點二時，電子束有時關閉不完全，沿路上留下痕跡，造成畫的電極圖都黏於一起，導通了。如下圖。



圖 5-17.定位時的痕跡，會使中間繪圖區域的獨立線路連通而造成失敗。

- c. 定位定位點時，為精準對準，必須要微調，微調時 SEM 有時不會直接到指定的點，而會沿某軌跡到某點再回來，如圖 5-18，造成整列的前置電極都連通，不能使用。

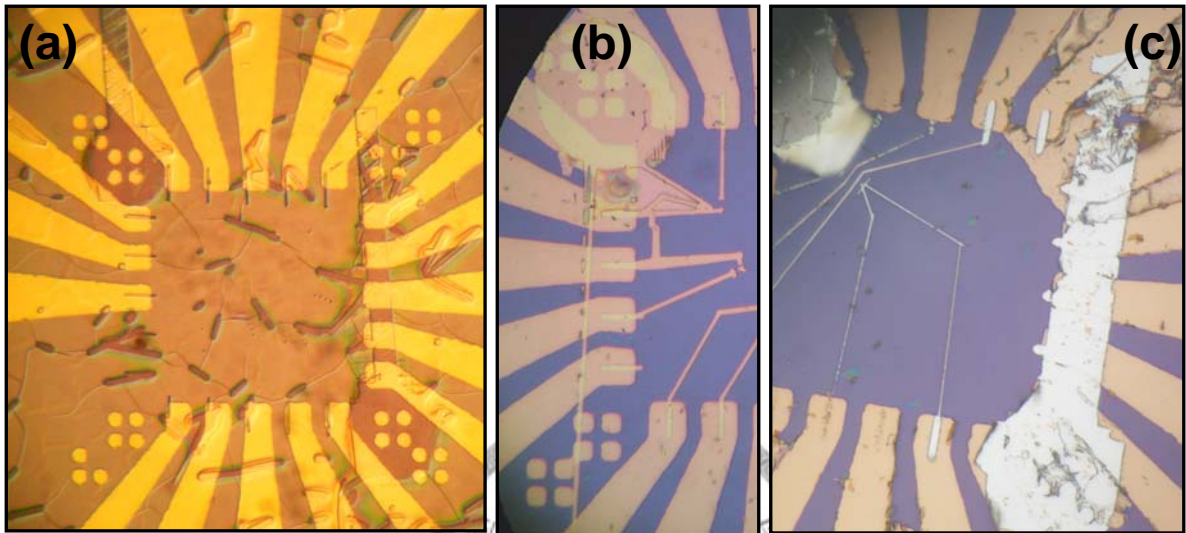


圖 5-18. (a)由圖可看多沿定位點有兩列曝光極乾淨的軌跡。

(b)這樣的現象，造成整列的前置電極連結，造成短路。

(c)此為微影後蒸鍍銀的元件，有一樣的現象。

原本我們想說在多次試驗後應可歸納出若出現此狀況，該如何藉由描繪 ECA 圖時避開這些前置電極，但結果是目前我們仍無法預測，似乎與基板大小，放入電子束機台裡時的位置有關，太多變數目前仍無法預測。

3. 奈米線與電子阻液的不穩定性：

用電子束微影前，需先塗佈電子阻液，實驗過程中發現有些奈米線會與電子阻液有奇特的作用或排斥，使得奈米線上無法塗佈電子阻液，形容無法在其上用電子束微影；這樣的不穩定性會使本實驗製程良率更低，以下為現象及我們設法改善的方法及結果。

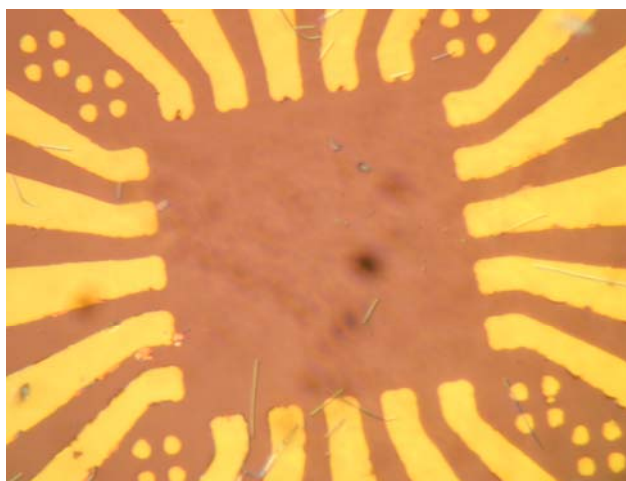


圖 5-19.，這是灑上奈米線塗佈電子阻液之圖，可看出塗佈均勻，此時並沒有排斥的現象發生。



圖 5-20.，這是顯影過後之圖，由圖可看定位點周圍因為打電子束的關係，所以電子阻被打掉了，但在其右上方及遠右方，可看出有奈米線在沒有打電子束的地方，其上卻沒有電子阻液殘留。

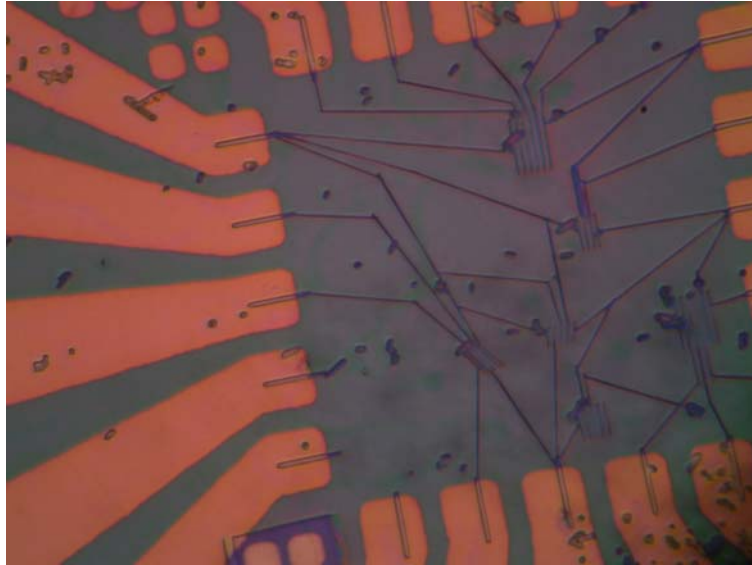


圖5-21.如圖，定位有成功，但奈米線(此片為ZnTe)偶發的排斥電子阻液，形同無法在奈米線上做圖，所以失敗了。而製成進行到這步驟花費時間是許多的，這樣的現象非常困擾我們。

為了釐清為何奈米線與電子阻液有作用，我們嘗試了幾種解釋：

1. 奈米線上因照過SEM，所以其上可能有未導走的電子殘留，故電子阻液塗佈上去立即被電子作用。但我們嘗試了灑奈米線後沒有照SEM便立即去顯影，仍然有同樣的現象，故排除是SEM造成的影響。
2. 若電子阻液的高度與奈米線高度相當，會造成塗佈時不均勻，但由AFM之圖，可看出電子阻液甚高於奈米線，且在未顯影前塗佈是均勻的，故排除此可能。
3. 奈米線的排水性，可能會造成排斥電子阻液，我們打了增加親水性的臭氧(Ozone treatment)，但沒有顯著改善，情況依舊。

臭氧 (Ozone treatment) 結果：

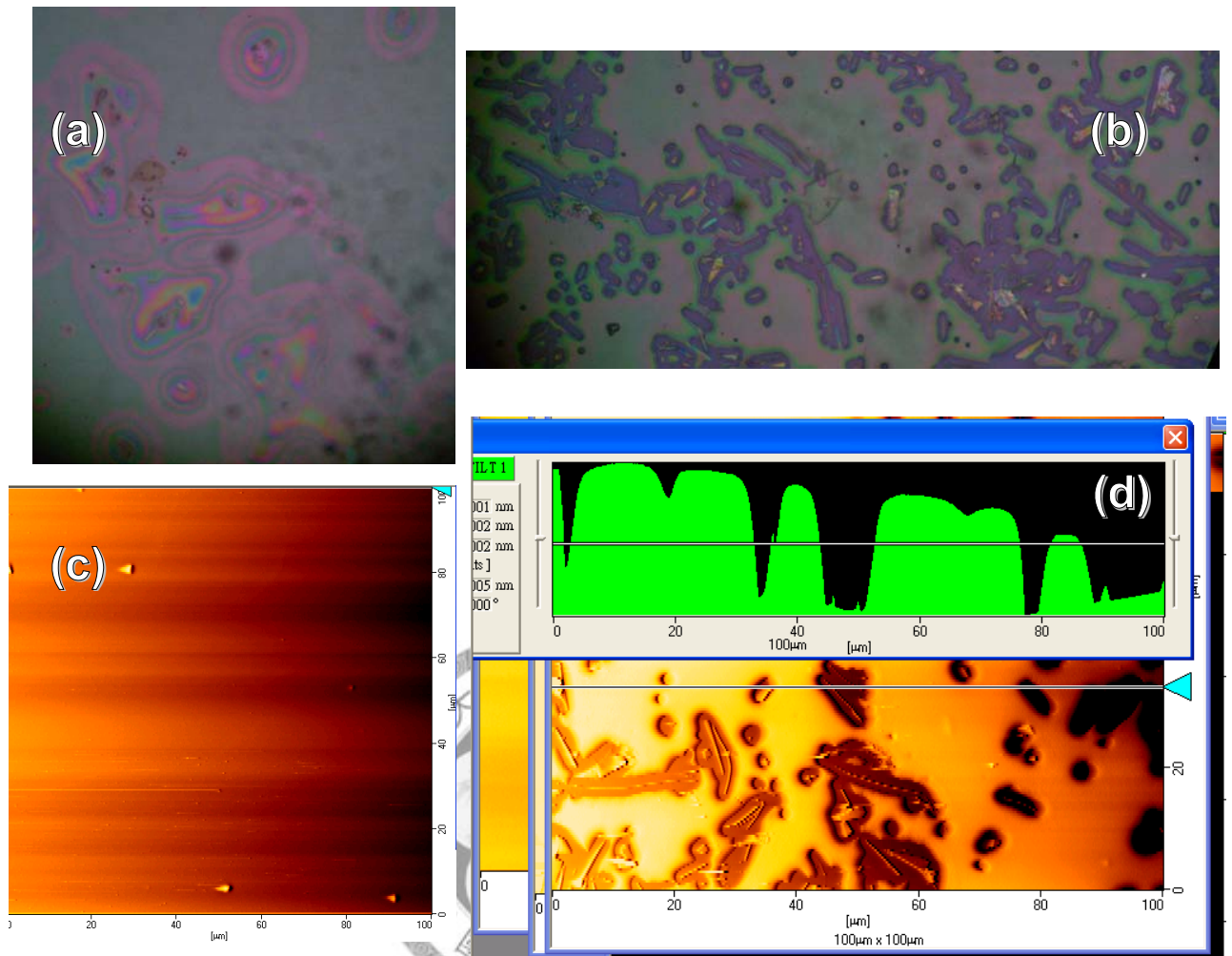


圖5-22. (a)(b)為光學顯微鏡擷取之圖：(a)為灑奈米線後塗佈電子阻液，未顯影之圖，(b)為已顯影之圖。(c)(d)為AFM圖：(c)為灑奈米線後塗佈電子阻液，未顯影之圖，(d)為已顯影之圖。由(c)顯示顯影前電子阻液的塗佈是很均勻的；由(d)可看出奈米線比電子阻液低許多，非造成塗佈不均的主因。

然而我們也有發現奈米線跟電子阻液有情況相反的關係，有時電子阻液不被排斥反而黏很緊，如下圖，可見氧化鋅/碲化鋅-核/殼的奈米線被某物質緊緊包圍，因為這層物質是透明的，所以我們推論應該是電子阻液，我們在浸泡舉離溶液長達24小時仍有此現象。

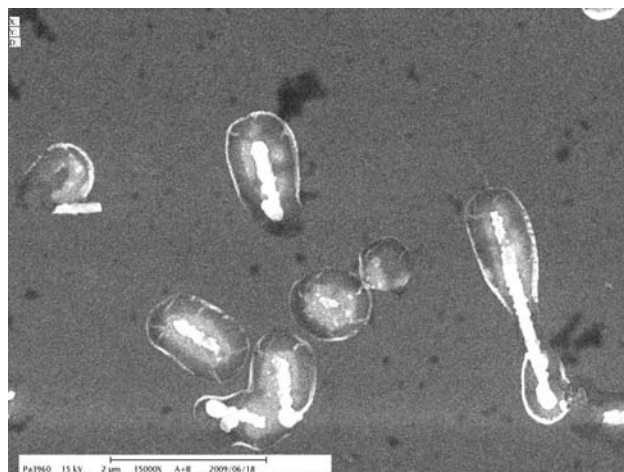


圖 5-23. 氧化鋅/碲化鋅-核/殼(ZnO-ZnTe)被電子阻液包圍。

由圖 5-20.：奈米線與電子阻液相斥，與圖 5-23.：奈米線與電子阻液的相吸，皆屬隨機發生，我們目前仍不知是實驗的哪一個步驟造成奈米線性質的改變，亦或是成長過程中，每根奈米線的參數不盡相同(每根成長的位置不同，離火遠近，離來源遠近)，所造成的影響。

以上是本小節：良率低的原因，在以上眾多變數的情況下，我們建議應使用與電子阻液沒有作用的奈米材料較適合本實驗製成。

第六章 結論

本實驗所製作的氧化鋅奈米線的場效電晶體及感光元件皆有不錯的品質，在場效電晶體的方面，量得到氧化鋅為n型半導體，其 μ_e (mobilities) 最佳的值約為 $30 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，此值與期刊論文相比尚可，(1~60 cm^2/Vs ，60之值為有鈍化或表面處理、在真空中量測等之值)，然本實驗生產出的氧化鋅奈米線場效電晶體沒有經過鈍化前即有 $30 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，表示品質甚良好。在感光元件的方面，開與關的比值約為25，電流值由 5.0×10^{-8} 升至 1.2×10^{-6} 安培，亦具有良好的感光性質。

鈍化氧化鋅表面我們使用包覆碲化鋅薄層上去，形成氧化鋅/碲化鋅-核/殼的結構。氧化鋅為天然的n型半導體，碲化鋅為天然的p型半導體，在場效電晶體的量測實驗中，我們得到的結果是整體為p型半導體，外加負閘極電壓能使電流大幅增加，電流值約為 10^{-5} 安培，有良好的導電性質其， μ_e 的值約為 $20 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。



參考資料

- [1] 魏哲源,“氧化鋅/二氧化鈦核殼奈米線製備及特性研究”,碩士論文(2008)
- [2] Jongsun Maeng, Gunho Jo, et al., Appl. Phys. Lett. **92**, 233120 (2008)
- [3] Seung-Eon Ahn, Hyun Jin Ji, et al., Appl. Phys. Lett. **90**, 153106 (2008)
- [4] Sunghoon Song, Woong-Ki Hong, et al., Appl. Phys. Lett. **92**, 263109 (2008)
- [5] Sanghyun Ju, Sunkook Kim, et al., Appl. Phys. Lett. LETT. **92**, 022104 (2008)
- [6] L. Liao, H. B. Lu, J. C. Li, et al., Appl. Phys. Lett. **91**, 173110 (2007)
- [7] Jung Inn Sohn and Mark E. Welland, et al., Appl. Phys. Lett. **91**, 043109 (2008)
- [8] Sanghyun Ju¹, Kangho-Lee¹, Nanotechnology **18** (2007) 155201 (7pp)
- [9] L Liao¹, J C Li^{1,2,4}, D F Wang¹, C Liu¹, Nanotechnology **16** (2005) 985-989
- [10] Shoou-Jinn Chang, IEEE TRANSACTIONS ON NANOTECHNOLOGY, VOL. 7, NO. 6, NOVEMBER (2008)
- [11] Liang-Wen Jia, Sheng-Joue Young, et al., Phys. Lett. **90**, 033109 (2007)
- [12] Vibha Saxena, D. K. Aswal, S. K. Deshpande et al., Phys. Lett. **90**, 043516
- [13] Zhi-Min Liao, Zhen-Kai Lv, Yang-Bo Zhou, Nanotechnology **19** (2008) 335204 (4pp)
- [14] Kanghyun Kim · Haeyong Kang · Hyeyoung Kim · Jong Appl Phys A (2009) 94: 253-256

[15] 陳建良, ”奈米結構單晶矽太陽能電池之製程及研究”, 碩士論文

[16] 林詠絮, ”Fabrication of graphene device by ebeam lithography system
”, 碩士論文

