

# 國立交通大學

材料科學與工程學研究所

碩士論文

銀誘發非晶矽形成低溫多晶矽薄膜之研究

**A study on silver induced crystallization of  
amorphous silicon thin film at low temperature**



研究生：王浩仰

指導教授：劉增豐 教授

朝春光 教授

中華民國九十六年七月

銀誘發非晶矽形成低溫多晶矽薄膜之研究

**A study on silver induced crystallization of  
amorphous silicon thin film at low temperature**

研究生：王浩仰

Student : H.Y. Wang

指導教授：劉增豐

Advisor : prof. T.F. Liu

朝春光

prof. C.G. Chao

國立交通大學  
材料科學與工程學系  
碩士論文



Submitted to Department of Material Science and Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Material Science and Engineering

July 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

## 中文摘要

銀誘發非晶矽形成低溫多晶矽薄膜之研究

學生:王浩仰

指導教授:劉增豐 博士

朝春光 博士

國立交通大學材料科學與工程學碩士班

本論文是利用金屬誘發結晶法(MIC)，選用銀(Ag)做為誘發結晶的金屬，誘發非晶矽(a-si)在低溫下成長成為多晶矽(poly-si)的技術，論文中以玻璃做為基板，玻璃上鍍一層約為 100 奈米(nm)的非晶矽，此二層作為基礎試片，以蒸鍍法將銀鍍在基礎試片的非晶矽上面，厚度約為 250nm，在於石英爐管中以真空退火 350~550 度、60~300 分鐘，初步結果發現銀的確可以誘發非晶矽的再結晶，而此結晶形狀為較為少見的甜甜圈狀，當增加退火溫度時，再結晶的晶粒大小、晶粒數目和晶粒面積佔各個 pattern 的百分比都會有明顯的增加，當退火溫度達到 550 度時，增加的幅度更是明顯。當甜甜圈成長時，發現其橫向成長較緩慢，縱向成長較快速，表示銀誘發的再結晶較不容易側向生長。此篇論文的另一個發現是，增加銀的厚度，相對誘發生成的出來的再結晶顆粒也會跟著增加。

# **A study on silver induced crystallization of amorphous silicon thin film at low temperature.**

## **Abstract**

In this thesis, crystallization of a-Si films on glass substrate using silver (Ag) induced crystallization (AIC) technique at low temperature has been studied. An amorphous silicon layer (about 100 nm) coated on the glass and then coated silver layer (about 250 nm) by thermal evaporation coating machine. The sample was put in the quartz tube annealing at 350~550 °C for 60~300 minutes with vacuum. The result found that silver could induce the crystallization of amorphous silicon at low temperature. The crystallization form was doughnut shape, which has never been observed. When the annealing temperature increased, the size of crystalline grain, number of nuclei and percentage of doughnut area per pattern area obviously increased. When annealing temperature reached 550 degrees, the increase was more obvious. When these doughnuts grew, ones grew slowly in horizontal direction, but rapidly in vertical direction. Another discovery of this thesis was that the effect of silver-induced crystallization would increase as the thickness of the silver layer increased.

## 誌謝

首先誠摯的感謝指導教授劉增豐博士及朝春光博士，兩位老師悉心的教導使我得以一窺低溫多晶矽領域的深奧，不時的討論並指點我正確的方向，使我在這些年中獲益匪淺。老師對學問的嚴謹更是我輩學習的典範。本論文的完成另外亦得感謝劉院長辦公室的阿萬仔秘書大力協助。因為有妳的體諒及幫忙，使得本論文能夠更完整而嚴謹。

兩年裡的日子，實驗室裡共同的生活點滴，學術上的討論、言不及義的閒扯、讓人又愛又怕的宵夜、趕作業的革命情感、因為睡太晚而遮遮掩掩閃進實驗室...，感謝眾位學長姐、同學、學弟的共同砥礪，你/妳們的陪伴讓兩年的研究生活變得絢麗多彩。

感謝承舜、逸軒、俊瑋、龍哥、世陽、瞎克濕學長、蓉萱學姐們不厭其煩的指出我研究中的缺失，且總能在我迷惘時為我解惑，也感謝烏霖、黑肥、牛郎、小胖、丕高、北北、角頭、謝晒、瞎雞同學的幫忙，恭喜我們一起瞎過這兩年。實驗室的欣龍學弟當然也不能忘記，真誠的幫忙及搞笑我銘感在心。

最後，謹以此文獻給我摯愛的雙親跟家人。

# 目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
誌謝	III
目錄	IV
表目錄	VI
圖目錄	VII
第一章、前言	
1.1 Thin Film Transistor 發展近況	1
1.2 研究動機	2
第二章、文獻回顧	
2.1 低溫多晶矽之技術發展	3
2.1.1 準分子雷射退火	3
2.1.2 固相再結晶	6
2.1.3 金屬誘發再結晶	6
2.2 選用銀誘發再結晶的原由	7
第三章、實驗步驟	
3.1 實驗流程	10
3.2 SEM 觀察表面晶粒大小與形貌	14

3.2.1 SEM 簡介.....	14
3.2.2 SEM 觀察試片之製備.....	16
3.3 掃描探針顯微技術.....	16
3.3.1 SPM 及 AFM 簡介.....	17
3.3.2 AFM 觀察試片之製備.....	19
 第四章、實驗結果與討論	
4.1 實驗初期所遇的難題.....	21
4.2 Ag 薄膜對非晶矽結晶的誘發效果.....	25
4.3 Ag 薄膜對非晶矽結晶在退火後的EDS分析.....	29
4.4 退火溫度及時間對非晶矽結晶的影響.....	37
第五章、結論.....	57
Reference.....	58



## 表目錄

表 4.3.1 第一擇點的成分重量百分比與原子百分比.....	32
表 4.3.2 第二擇點的成分重量百分比與原子百分比.....	34
表 4.3.3: 第三擇點的成分重量百分比與原子百分比.....	36
表 4.4.1(a) 350°C 影像分析結果.....	41
表 4.4.1(b) 350°C 影像分析表附趨勢圖.....	41
表 4.4.2(a) 450°C 影像分析結果.....	43
表 4.4.2 (b) 450°C 影像分析表附趨勢圖.....	43
表 4.4.3(a) 550°C 影像分析結果.....	48
表 4.4.3 (b) 550°C 影像分析表附趨勢圖.....	48
表 4.4.4 平均影像分析數據.....	51
表 4.4.5 圖 4.4-15 與圖 4.4-16 之影像分析.....	56



## 圖目錄

圖 2.1-1:ELA設備外觀.....	4
圖 3.2-1:JSM-6700F 的正視圖.....	14
圖 3.2-2:SEM 電子束成像的原理簡圖.....	15
圖 3.3-1:C-AFM 操作原理.....	19
圖 4.1-1:利用真空膠黏貼的試片.....	24
圖 4.1-2:超音波震盪失敗的圖片.....	24
圖 4.2-1:450°C 退火 3 小時 370X 二次電子影像.....	27
圖 4.2-2:450°C 退火 3 小時 600X 二次電子影像.....	27
圖 4.2-3:450°C 退火 3 小時 6,000X 二次電子影像.....	28
圖 4.2-4:450°C 退火 1 小時 15,000X 的二次電子影像.....	28
圖 4.3-1:(a)450°C 退火 3 小時的二次電子影像.....	31
圖 4.3-1:(b)EDX 第一擇點 peak 強度分布圖.....	31
圖 4.3-2:(a)450°C 退火 3 小時的二次電子影像.....	33
圖 4.3-2:(b)EDX 第二擇點 peak 強度分布圖.....	33
圖 4.3-3:(a)450°C 退火 3 小時的二次電子影像.....	35
圖 4.3-3:(b)EDX 第三擇點 peak 強度分布圖.....	35
圖 4.4-1:退火 350°C 一小時 500X 二次電子影像.....	40
圖 4.4-2:退火 350°C 三小時 250X 二次電子影像.....	40



圖 4.4-16:450°C退火三小時 550X 的二次電子影像.....55

圖 4.4-17:450°C退火三小時 12,000X 的高倍率二次電子影像..... 55




# 第一章 前言

## 1.1 Thin Film Transistor 發展近況

一二十年來，液晶顯示器(Liquid-Crystal Display)與半導體同為政府的兩兆雙星目標，被列為策略性工業，屬於明日之星產業。液晶顯示器技術近年來蓬勃發展，從早期被動矩陣式TN、STN LCD發展到主動矩陣式TFT LCD，不管在色彩飽和度、對比、亮度值、反應時間與可視角方面皆有驚人的進展，而為了實現人類對產品更高解析度的需求，主動矩陣式TFT LCD開發技術漸漸轉向低溫多晶矽(LTPS)。TFT LCD其應用方面已經深入每個人的日常生活中，如手機、數位相機、NB、PDA、GPS等，都需要用到LCD顯示器。在考慮到高品質低成本小尺寸大畫面的情況下，以往的非晶矽薄膜電晶體液晶顯示器，由於載子遷移率的限制( $\text{mobility} < 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )，要進一步滿足高畫質、大畫面、輕薄短小、省電種種需求無異是緣木求魚，所以低溫成長大晶粒(grain)多晶矽(polycrystalline silicone, poly-Si)薄膜在便宜的玻璃基板上，以作為矽晶薄膜元件，如平面顯示系統(system on panel)和太陽能電池(solar cell)，是近年來的挑戰。尤其是由於多晶矽具有高遷移率( $\text{mobility} > 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )，

可以作為高解析集成主動矩陣液晶和有機發光二極體顯示器之驅動電路。過去幾年來，許多技術被提出來達成大面積成長多晶矽於玻璃基板上。這樣可以同時完成把驅動IC跟TFT完成在玻璃基板上，亦可以省下構裝驅動IC的成本與省去後段組裝的時間跟材料。如此一來，不只整體的重量輕量化，亦可大量的減低製作成本，進而加速整個製程的運作。

## 1.2 研究動機



自己的背景屬於一個材料人，研究分析材料就是我們的特長，創造研發新材料是我們的擔當，由於在TFT-LCD 這個新的範疇裡，仍然有許多未知的領域尚未發現，對於研究新的事物，本身就擁有極高的興趣，再加上TFT-LCD 也有部份既有但是不成熟的技術等著去改進，進而開發出更好的製程與能廣泛被應用的產品，促進經濟發展，增加就業機會，改善社會風俗，人人路不拾遺、夜不閉戶，進而達到大同世界，這就是我的研究動機。

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 低溫多晶矽之技術發展

現在以非晶態的矽( amorphous silicon )作為電晶體的通道、源集以及汲極，稱之為非晶型薄膜電晶體。由於非晶型薄膜電晶體的製程溫度低，相當適合應用於使用玻璃基板的TFT-LCD上，所以過去的TFT-LCD以非晶型薄膜電晶體為主流。但由於非晶矽的電子遷移率低，使得電晶體在尺寸及反應時間上有製程的極限，漸漸無法達到消費者的要求，所以多晶矽的薄膜電晶體便漸漸的被需求，試圖突破製程上的瓶頸。若想要在低溫狀態下形成多晶矽的薄膜電晶體，一般的方法是沉積一層非晶矽薄膜，再退火形成多晶矽。而要沉積一層非晶矽薄膜的方法也有相當多種，像是一般的化學氣相沉積法(CVD)，或是低壓化學氣相沉積(LPCVD)、電漿輔助化學氣相沉積法(PECVD)以及濺鍍法(sputtering)等，各有優缺點。而要使非晶矽薄膜結晶常見的方式有下列幾種：

#### 2.1.1 準分子雷射退火(ELA, Excimer laser annealing, )<sup>[1][2][3][4]</sup>

準分子雷射退火，一般是利用 308nm 波長的 XeCl 準分子雷射以數十 ns 之脈衝放射在玻璃基板上掃描，在掃描的同時可以使非晶矽薄膜的溫度短時間(約幾十 ns)間升高至熔點，雷射光經過雷射光束雙軸調變器 (Line Beam Homogenizer) 導引，形成長軸最大 365mm 之細長型雷射光束 (Line Beam)，照射在玻璃基板上 a-Si 薄膜使其結晶。產生成核成長的多晶矽，因為雷射作用的時間很短，所以還不會對玻璃基板造成熱損害。

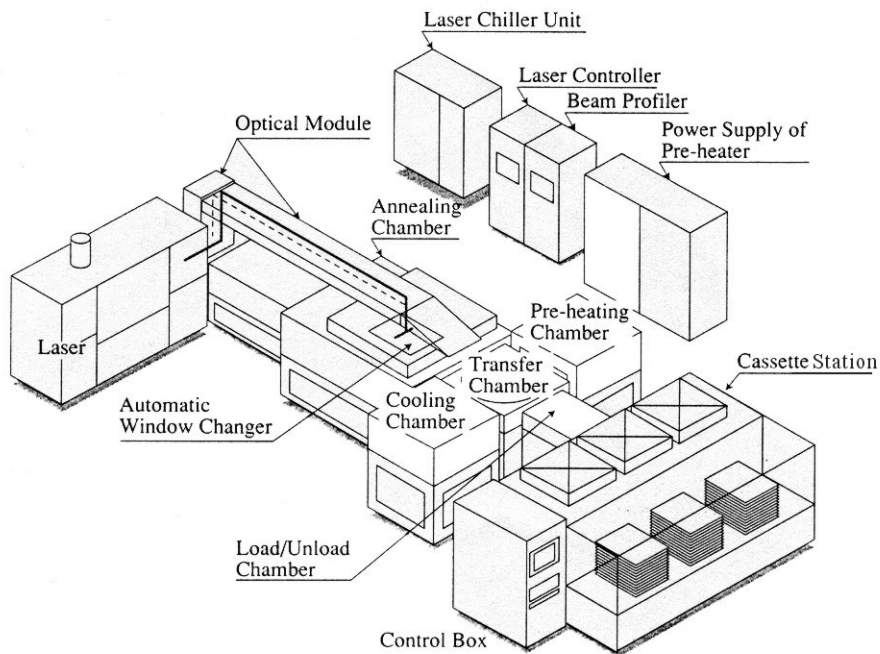


圖2.1-1 ELA設備外觀

ELA 是影響 LTPS TFT-LCD 生產良率之關鍵製程，影響良率最大因素，首先是雷射光束長軸方向雷射光束能量分佈 (Beam Profile)

均勻性，為了要獲得粒徑非常平均之多結晶矽薄膜，必須將 a-Si 薄膜厚均勻性控制在±數個%以下，同時也必須讓雷射光束能量分佈均勻性保持在±2%以下，其次則是雷射光束輸出能量時間穩定性。故對 ELA 設備而言，除了隨基板尺寸大型化後必須擴大長軸光束長度和增加照射能量密度外，降低雷射脈衝變動率、提高長軸能量分佈均勻性以及短軸形狀最適化也都是重要事項。另外，由於準分子雷射使用鹵素 (Halogen) 氣體雷射，長時間使用將會產生輸出和能量分佈 (Profile) 變動，因此必須要進行氣體更換或雷射管更換，增加設備維護成本。從製程的角度來看，最大課題是採用上閘極 (Top Gate) TFT 結構多晶矽薄膜和閘極絕緣膜之界面控制，通常利用 ELA 進行 p-Si 薄膜結晶，會因 ELA 條件而使結晶表面型態 (Morphology) 產生大幅變化，造成表面非常粗糙和降低閘極絕緣膜可靠度，如此呈現在 TFT 元件特性上的是漏電流與 SS 過大，V<sub>th</sub> 偏移等問題，故提供一表面粗糙度低、良好品質的多晶矽薄膜，對於 TFT 元件的特性是非常重要的。在氧化矽和準分子雷射退火 (Excimer laser annealing, ELA) 的 poly-Si 介面，已被證實由於粗糙表面增強的電場，使得薄膜電晶體 (thin film transistor, TFT) 有較高的漏電流和低介電崩潰電場。雖然 ELA 退火 a-Si 可得到好品質 poly-Si 並適用於玻璃基板之低溫製程，成為常用的製程方法，但是仍然有很多問題存在，如高



製程成本、大面積之均勻性、和表面粗糙度等。

### 2.1.2 固相再結晶(SPC, Solid Phase Crystallization)<sup>[5][6][7]</sup>

一般來說SPC通常是利用石英爐管來進行退火處理，將一般的非晶薄膜送入爐管中利用石英爐管裡的高溫環境(>600°C)使其結晶成多晶矽(Poly-Silicon)。但由於玻璃基板低熔點之限制，製程溫度必須低於600 °C。在這樣的溫度下，非晶矽(amorphous silicon, a-Si)固化長晶速度非常慢，而導致只能得到比微米還小之晶粒。除此之外，固-液相間之質量密度差異大，也導致高表面粗糙度。高表面粗糙度的多晶矽會成為載子(carriers)的散射中心(scattering centers)，因而降低場效電晶體之遷移率。又因為在高溫長時間退火下，一般的玻璃基板會軟化變形。所以總和來說，SPC不適用在玻璃基板上的薄膜電晶體。

### 2.1.3 金屬誘發再結晶(MIC, Metal Induced Crystallization)

[8][9][10][11][12][13][14]

在 SPC 法中，由於要使 a-Si 結晶的溫度太高(>600°C)，因

此將非晶矽轉變成多晶矽時，如何將溫度降低是一大關鍵，在國外研究中將金屬薄膜鍍在 a-Si 上，藉由其在較低的溫度下，先行與 a-Si 形成矽化物(silicide)，此時矽原子便可由矽化物中溶解並析出結晶，矽化物在此幫助其孕核，使其結晶溫度因而下降，所以結晶的溫度，就取決於形成金屬矽化物的溫度。文獻指出這些金屬包括 Al、Pd、Ni、Au、Ag... 等等，都可在低溫退火條件下使結晶溫度降至 600°C 以下，且結晶時間較短(<10 小時)，即可以結晶成 Poly-Si。即所謂的金屬誘發再結晶(metal-induced crystallization, MIC)。用 MIC 法或所謂金屬誘發橫向長晶法(metal-induced lateral crystallization, MILC)已成功應用於 poly-Si 之成長上。而此論文就是利用 MIC 方法以銀來誘發非晶矽在玻璃基板的結晶。

## 2.2 選用銀誘發再結晶的原由

因為在了解了固相再結晶法(SPC, Solid Phase Crystallization)與準分子雷射退火法(ELA, Excimer laser annealing)之後，考慮到未來的應用面，以及在降低成本的前提之下選擇了金屬誘發結晶(MIC, Metal induced Crystallization)此方法，眾所皆知的Si在晶

體學上屬於鑽石結構(Diamond Cubic)，所以優先考慮以晶格相近於Diamond Cubic的金屬做為考量，所以就考慮了晶格為面心立方(FCC, Face-Centered Cubic)的數種金屬如Al、Pd、Ni、Au、Ag等。Ni<sup>[15][16]</sup>、Pd<sup>[17][18]</sup>等金屬的文獻也不少，而使用Ni和Pd此類金屬的成長機制為在金屬與矽的界面會先生成介金屬化合物(Intermetallic compound)，介金屬化合物中的矽原子在化合物與非晶矽薄膜的界面的自由能，比存在於化合物與初析出的多晶矽核的界面的自由能來的高，依照擴散動力學，則矽原子傾向往多晶矽核方向擴散，以此類金屬誘發的多晶矽依此機制成長<sup>[19]</sup>。還有Al<sup>[20][21][22][23][24]</sup>也是相當多學者在討論的重點金屬，然而以鋁來誘發再結晶的機制又跟之前的不同了，利用鋁是因為鋁與矽的共晶溫度低，先使金屬與矽發生共晶反應，在把過飽和的矽析出，然後成長。然而在挑選金屬的時候，又面臨了重大的考驗，因為Al、Pd、Ni是前人已經研究許久的金屬，也發了許多論文。而Au<sup>[25][26]</sup>、Ag<sup>[27]</sup>鮮少有論文提及，Au屬於稀有金屬，所以價格相當的昂貴。而銀的話，在1992年12月就有大陸學者以NaCl基板鍍上Si，將銀鍍上之後再鍍上一層Si把銀夾起來作退火處理，當時有發現一些結果，會產生一些樹枝狀的析出，但是之後幾年就再也沒有人做過了，文獻也比較少。

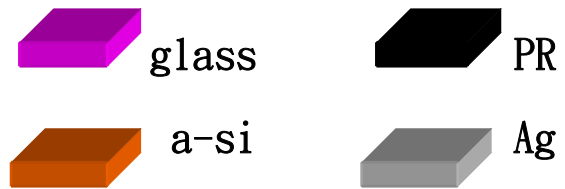
而現在大部分的應用都需要作在玻璃基板上，跟以往的矽

晶圓或是NaCl基板不同，所以要做的話可能會困難重重，雖然說走前人走過的路會比較輕鬆也比較好走，也許是我的個性使然，天生就喜歡挑戰未知的領域，所以最後我選擇了Ag這個金屬來嘗試當作MIC的材料。

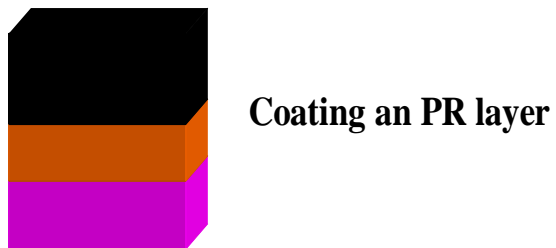
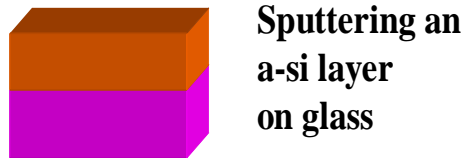


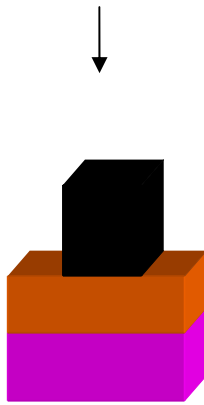
# 第三章 實驗步驟

## 3.1 實驗流程

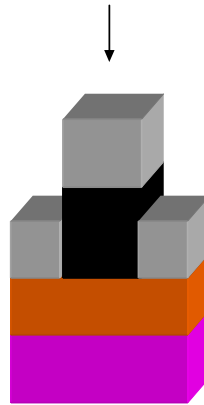


## Experimental procedure

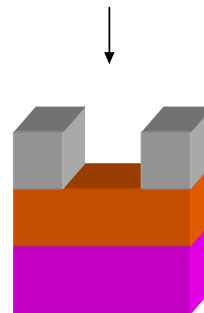




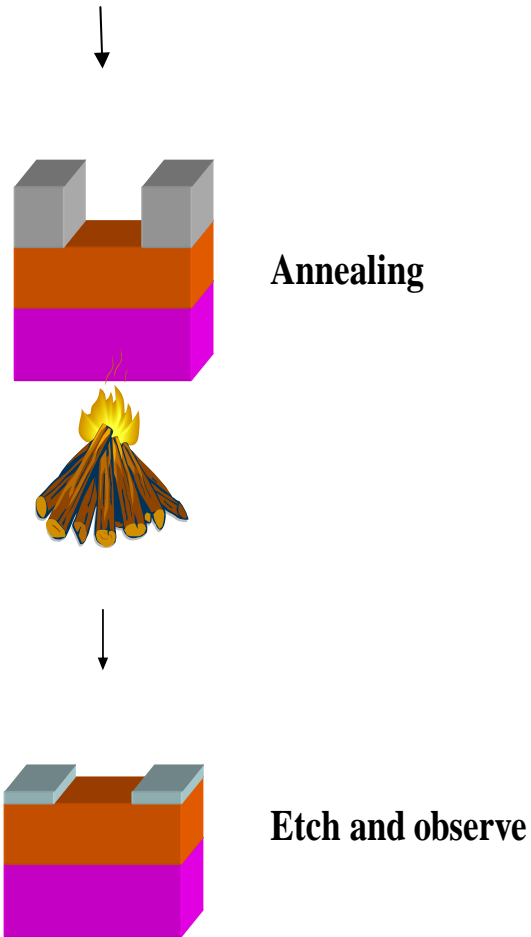
**Exposure and develop the pattern**



**Coating an Ag layer**



**Lift off PR and left an patterned Ag layer**



(實驗流程簡圖)

如上圖，首先在玻璃基板上利用 PECVD 法鍍上一層約 100 奈米的非晶矽，接著做一次 RCA Clean，利用黃光微影製程在非晶矽上以旋塗法(Spin Coating)鍍上一層光阻液(PR)，接著軟烤(soft bake)2

分鐘，對上光罩(Mask)之後使用曝光機曝光，曝光後以顯影液浸泡，接著放入 D. I. water 清洗去除剩餘溶劑，以氮氣吹乾之後，硬烤(hard bake)3 分鐘，如此即完成黃光微影製程。之後再使用真空熱蒸鍍機以 15V、3.4A，真空值小於  $5 \times 10^{-6}$  torr 的條件鍍上約 100 奈米的銀。將銀蒸鍍好之後，利用超音波震盪機，將試片浸入丙酮溶液中，接著震盪到光阻液都脫離試片了，再以 D. I. water 清洗 5 分鐘，之後以氮氣吹乾，這樣才完成退火前的試片製備。

試片製備之後，先以真空封管，真空值約為  $5 \times 10^{-6}$  torr，接著再以石英爐管在 350~450 度，60~300 分鐘作真空退火處理。

退火結束後，小心打破封管，取出試片再以 D. I. Water 清洗 5 分鐘，以氮氣吹乾之後，以銀蝕刻液將銀蝕刻完畢，再做一次試片清潔動作，即完成試片製備。



## 3.2 SEM 觀察表面晶粒大小與形貌

### 3.2.1 SEM 簡介

SEM 原理是由電子槍 (Electron Gun) 發射電子束，經過一組磁透鏡聚焦 (Condenser Lens) 聚焦後，用遮蔽孔徑 (Condenser Aperture) 選擇電子束的尺寸 (Beam Size) 後，通過一組控制電子束的掃描線圈，再透過物鏡 (Objective Lens) 聚焦，打在試片上，在試片的上側裝有訊號接收器，用以擇取二次電子 (Secondary Electron) 或背向散射電子 (Backscattered Electron) 成像。



圖 3.2-1 JSM-6700F 的正視圖

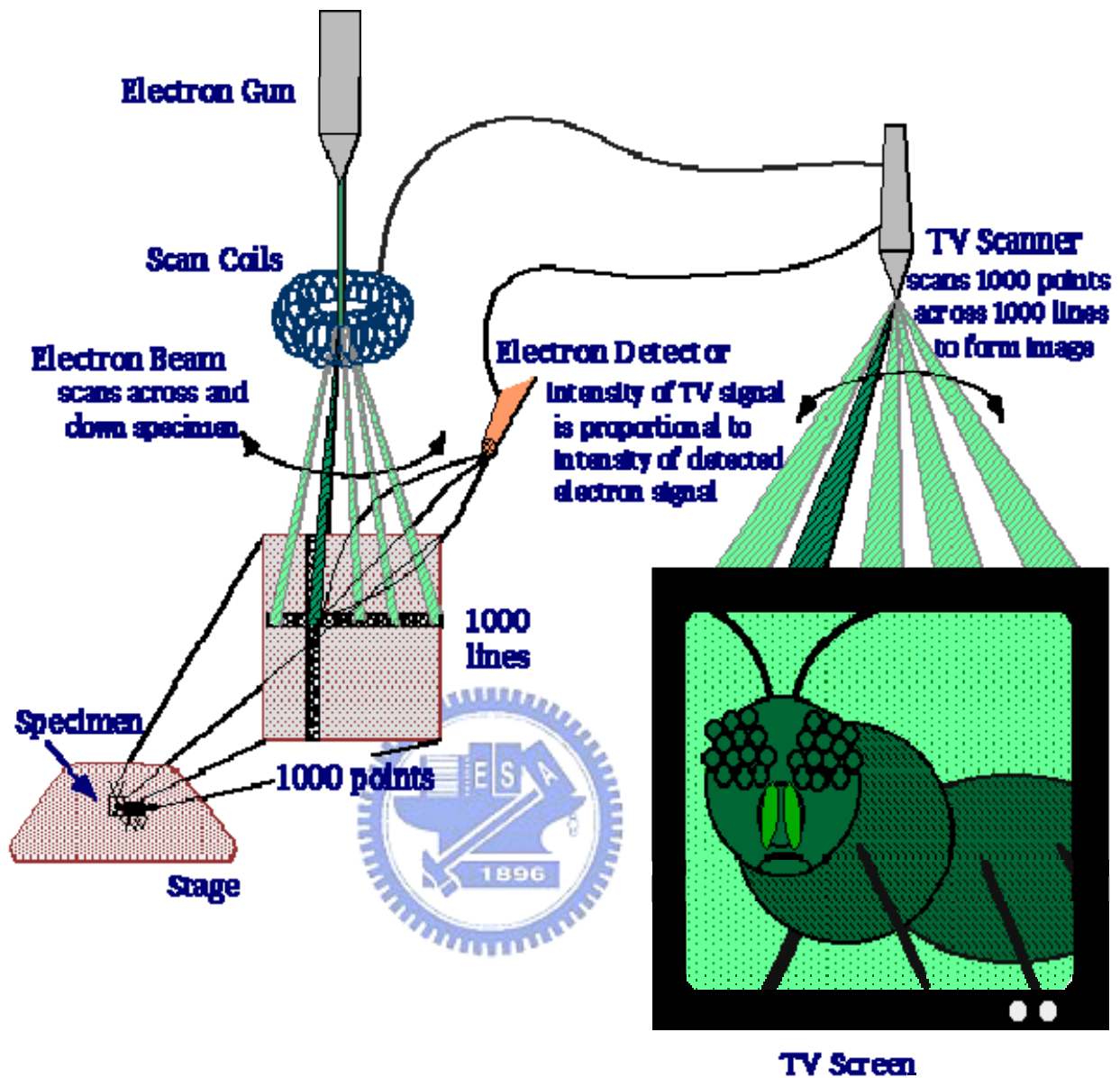


圖 3.2-2 SEM 電子束成像的原理簡圖

電腦化操作之高解析場發射掃描式電子顯微鏡，其特點為以冷場發射電子槍產生探測電流範圍較低及能量均一之電子束，適合對熱敏感樣品之分析，其高電場發射之電子束徑小，亮度高，具有傳統掃描式電子顯微鏡所明顯不及之高解析度，其解析度可高達 1.0nm，另可在

低電壓(可低至 0.5KV)下操作，具直接觀察非導體之功能，能提供金屬材料、電子材料及高分子材料等於高倍率下之二次電子影像(SEI)之表面型態觀察。冷陰極場發射掃描式電子槍較其他熱場(Thermal)發射及蕭基(Schottky)電子槍而言，其優點是電子束與能量散佈相當小，且在超高真空下操作，解析度佳。

### 3.2.2 SEM 觀察試片之製備

1. 將退火過後的試片，從封管中取出，接著以 D. I. WATER 沖洗試片，接著以氮氣沖去試片上多餘液體。
2. 以鑽石切割筆切割成適當大小，再以 D. I. WATER 沖洗試片，接著以氮氣沖去試片上多餘液體。
3. 將試片泡入硝酸蝕刻溶液，目的是將多餘的銀去除，接著做 RCA Clean 的動作。
4. 因為試片導電性差，所以在送進 SEM HOLDER 之前先利用鍍金機鍍上一層極薄的 Pt，避免 SEM 電子束 charge 太過嚴重，或是影像漂移。

### 3.3 掃描探針顯微技術(scanning probe microscopy, SPM)

### 3.3.1 SPM 及 AFM 簡介

SPM 中最早發明的 STM 是藉由導電探針與樣品間的穿隧電流來偵測表面特性，其優點是具有極佳的空間解析度，能夠清楚量測到表面單一原子以及其電子能態，因此對表面物理研究相當重要。由於 STM 對樣品與操作環境的要求較為嚴苛，僅能測量具有相當導電性的表面，且一般得在超高真空下操作以保持樣品表面的潔淨，因此在應用上較受限制。相對的，SFM 是許多掃描力顯微鏡的統稱，其利用探針與表面間的作用力來量測表面特性，因此樣品可不導電，對操作環境的要求也較少，可在一般大氣環境下甚至在液體中操作。此外，藉由使用適當的探針或方法，即可量測出各種不同的作用力形式，並獲得表面諸多特性。這些優點使得 SFM 在發展上比 STM 更為容易且應用範圍甚廣，但另一方面，由於 SFM 的探針尖端尺寸與作用力範圍常遠大於原子尺度，因此在空間解析度上比 STM 差。

SFM 其中最常見也最早出現的是原子力顯微鏡[11] (Atomic Force Microscope, AFM)，其量測的作用力是探針與表面間的凡得瓦爾力。在實際操作時，通常是保持此一作用力的大小，使探針與表面的間距固定，如此在掃描時探針的高度即隨著表面的高低起伏而變

化，換言之，藉由量測探針的高度變化，即可得到表面的形貌 (topography)。其他常見的掃描力顯微鏡，像是磁力顯微鏡(Magnetic Force Microscope, MFM)、摩擦力顯微鏡 (Friction Force Microscope, FFM)、靜電力顯微鏡 (Electrostatic Force Microscope, EFM)、壓電反應力顯微鏡 (Piezoelectric Force Microscope, PFM) 等等，雖然所量測的作用力都不相同，但都架構在 AFM 的基礎上，因此很容易整合在一起，成為分析奈米物性的利器。我們針對 CFM，SCM 和 C-AFM 分別描述如下。

- (1) 電容力顯微鏡 (Capacitance Force Microscope, CFM) 與掃描電容顯微鏡 (Scanning Capacitance Microscope, SCM)



CFM 與 SCM 對於半導體量測而言是個功能強大的工具。其主要功能可以量測半導體樣品局部電容訊號、摻雜濃度、絕緣層內的缺陷、薄膜厚度、介電常數等的空間變化。

- (2) 導電原子力顯微鏡 (Conducting atomic microscope, C-AFM):

C-AFM 主要使用金屬探針對於試片做 schottky 接觸，給定探針  $V_{tip}$  不同的偏壓 (V) 可以量測不同的電流 (I)，經由放大器作用後做出二元點陣圖，此種量測方式對特定點的漏電流有著顯著的效果。儀器示意圖如下圖

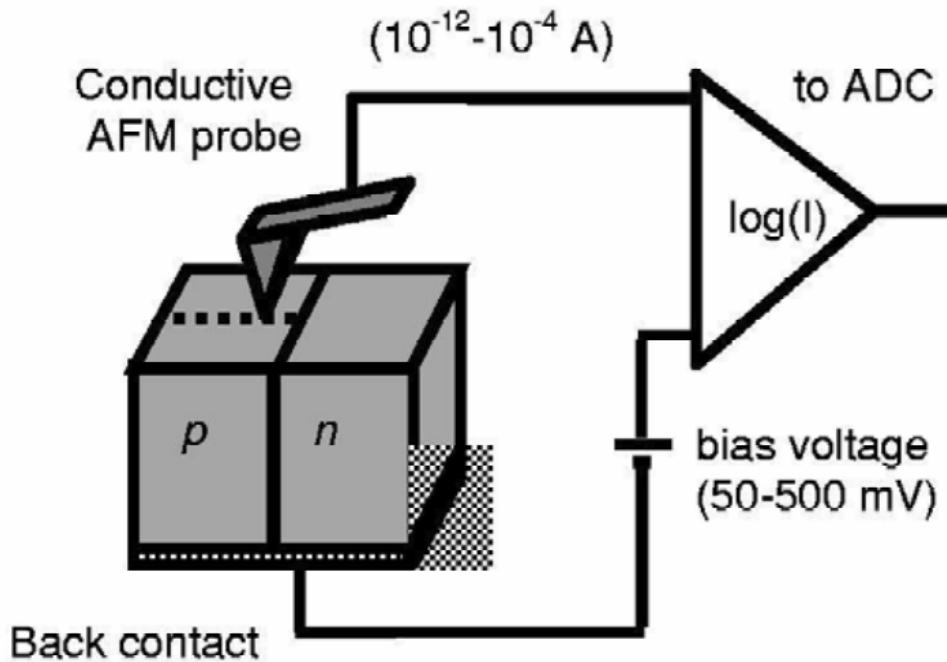


圖 3.3-1: C-AFM 操作原理

### 3.3.2 AFM 觀察試片之製備



1. 將退火過後的試片，從封管中取出，接著以 D. I. WATER 沖洗試片，接著以氮氣沖去試片上多餘液體。
2. 以鑽石切割筆切割成大約 1x1 公分平方，再以 D. I. WATER 沖洗試片，接著以氮氣沖去試片上多餘液體。
3. 將試片泡入硝酸蝕刻溶液，目的是將多餘的銀去除，接著浸泡 D. I. WATER 1 分鐘。
4. 吹乾試片表面，因為是做表面分析，所以此步驟相當重要，表面上多餘的粒子會影響實驗結果。

5. 將清潔好的試片，黏貼在 AFM 專用圓形鐵片上，即完成觀察試片的製作。



## 第四章 實驗結果與討論

### 4.1 實驗初期所遇的難題

最初在剛接觸低溫多晶矽的這個題目時，不知道從何處開始著手，所以先參考了許多的文獻，知道有一些學者在研究討論這個題目，因為我們實驗室跟某科技公司有產學合作，所以一開始的試片是由他們公司提供的，試片是玻璃基板上鍍好非晶矽，非晶矽上又間隔地鍍上一條條的光阻。剛拿到試片時，由於實驗室沒有現成儀器可以鍍金屬，所以麻煩了其他實驗室幫忙鍍金屬。開始的那些試片都是鍍鋁的，因為一開始參考的文獻大部分是利用鋁金屬來誘發再結晶的，而且當初幫忙的實驗室也只能鍍鋁。當時鍍完鋁後，要再做下一批試片時，又都是要麻煩其他實驗室，但是每次鍍出來的鋁條件都略有不同，而且每次都要拜託別人，後來實驗室就自己買了一台新的蒸鍍機，之後就利用蒸鍍機來作鍍的動作，因為有了新機器，而我當時也決定要作銀這個金屬，所以就開始了自己的實驗，一開始鍍銀的時候，鍍好了拿去超音波震盪時，都只會發生兩種結果，一種是整片試片連帶銀跟光阻液都被震盪掉了，另一種就是光阻液也沒掉、銀也沒掉只是試片變濕了，根本沒辦法觀察。後來決定把一開始的一條條光



阻先用丙酮溶液去除，再貼上一條條的真空膠帶，鍍完銀之後再把膠帶撕下來，試圖營造出有 PATTERN 的感覺，結果效果也不好辨識度也不高。圖 4.1-1 是利用真空膠貼的 SEM 照片。後來發現光阻液其實是有最佳使用期限的化學藥品，因為一批試片從公司完成再送來新竹，至少需要 7~10 個工作天，所以當我們拿到試片要作時，事先鍍好的光阻也已經有點萎縮、氧化算是不新鮮了，所以我們把第一批試片做完之後，跟公司要了第二批試片，希望上面不要有光阻，光阻的部份再由交大這邊的黃光無塵室自己製作，所以我們利用標準的黃光微影製程，自己製作了辨識程度很高的光阻 PATTERN(有間隔的方格、也有間隔的圓形)，由於黃光微影製程做完之後就可以馬上蒸鍍上銀，所以光阻算是很新鮮的，但是在做到超音波震盪的那一步時，還是很容易把光阻跟全部的銀一起震盪掉。圖 4.1-2 是鍍完銀超音波震盪失敗的圖片。圖中的銀大部分已經不完整了，有的甚至整片都掉了，於是開始改變、調整蒸鍍機的條件。因為一開始儀器功率很小，連銀都沒辦法蒸鍍上去，求好心切之下，將儀器的輸出功率開的太大，後來發現如果電壓、電流太高，會使得銀薄膜不夠薄、厚度太大，等到銀厚度超過光阻液時，浸泡丙酮溶液時就會很容易將光阻跟銀一起拔除，甚至不用超音波震盪就會被全部拔除，再失敗了數十片之後，調整到銀最佳的電壓、電流，電壓不能超過 20V、電流不能超過 4.5A，

不然整片銀都會跟著被拔除。在嘗試出最佳的蒸鍍條件後，才終於成功了第一片試片製作。



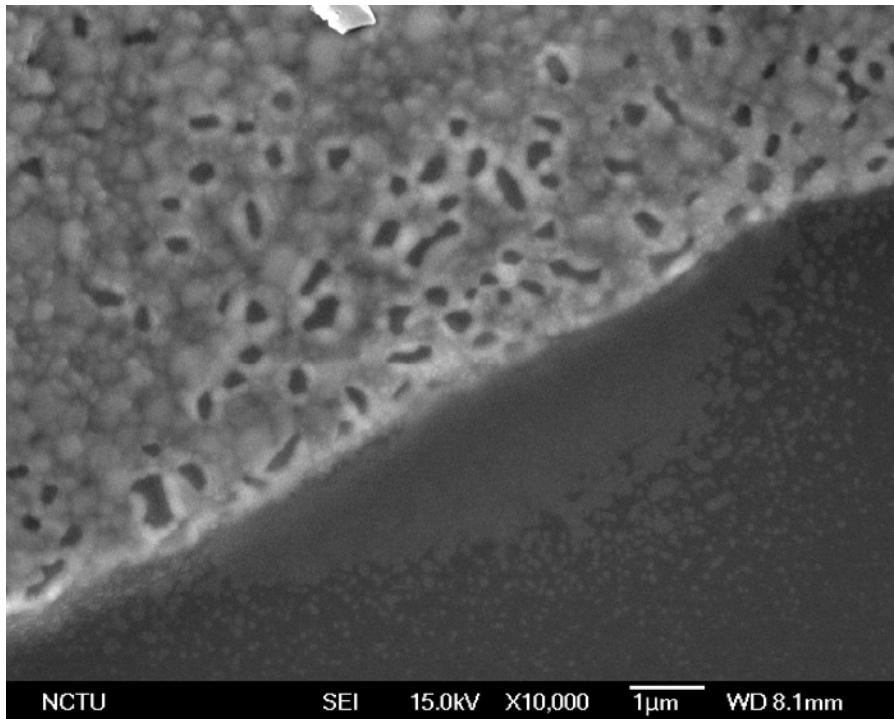


圖 4.1-1 利用真空膠黏貼的試片



圖 4.1-2 超音波震盪失敗的圖片

## 4.2 Ag 薄膜對非晶矽結晶的誘發效果

Ag
a-si
Glass

將第一批成功的試片真空封管後，拿去石英爐管作退火熱處理，蝕刻銀之後，接著經由 AFM 分析及 SEM 與 EDX 分析可以歸納以下銀薄膜對於非晶矽結晶性的影響結果：

- (1) 由圖 4.2-1 與圖 4.2-2 可以發現試片在退火後有明顯的析出，狀似甜甜圈的析出物，以下就稱為甜甜圈結構(Donut structure)。其中圖 4.2-1 為 450°C 退火 3 小時，SEM 倍率為 370X 的正視圖；圖 4.2-2 為 450°C 退火 3 小時，SEM 倍率為 600X 的正視圖。
- (2) 圖 4.2-3 為 450°C 退火 3 小時，SEM 倍率為 6,000X 的放大正視圖；圖 4.2-4 為 450°C 退火 1 小時，SEM 倍率為 15,000X 的放大正視圖。從兩張放大圖中可以清楚發現每個甜甜圈結構中都可以找到很清楚的晶界，表示甜甜圈應為多晶結構。

(3) 在 Pattern 以外沒有鍍上銀的部份，卻是相當平整的表面，看不出一點析出物，因為光只有非晶矽要在 600 度左右退火，要產生矽的再結晶，必須經過至少 24 小時，況且這試片最多只有受到 300 分鐘的 450 °C 退火，所以排除此析出物為非晶矽直接結晶成多晶矽的可能性，初步研判此析出物應為銀誘發之後析出的多晶矽。



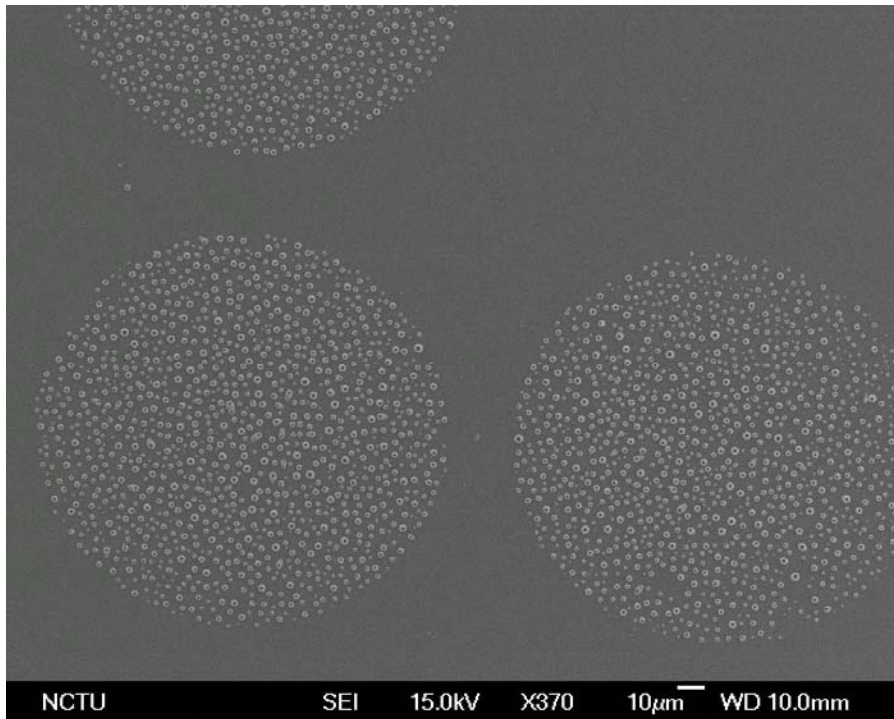


圖 4.2-1；450°C 退火 3 小時，370X 二次電子影像

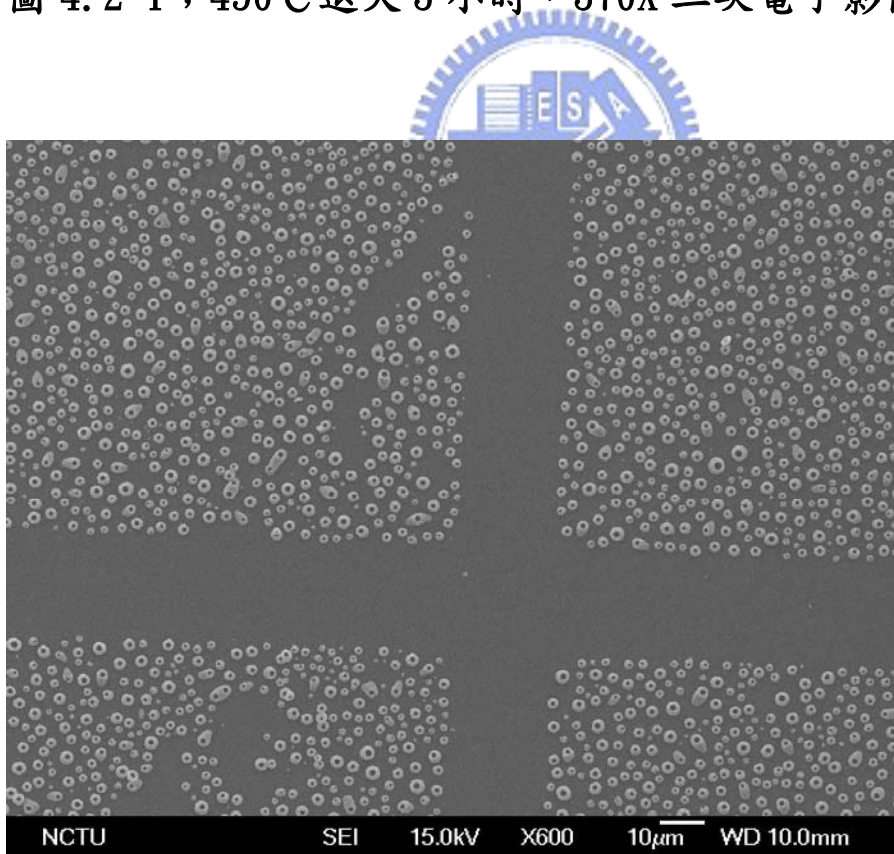


圖 4.2-2；450°C 退火 3 小時，600X 二次電子影像

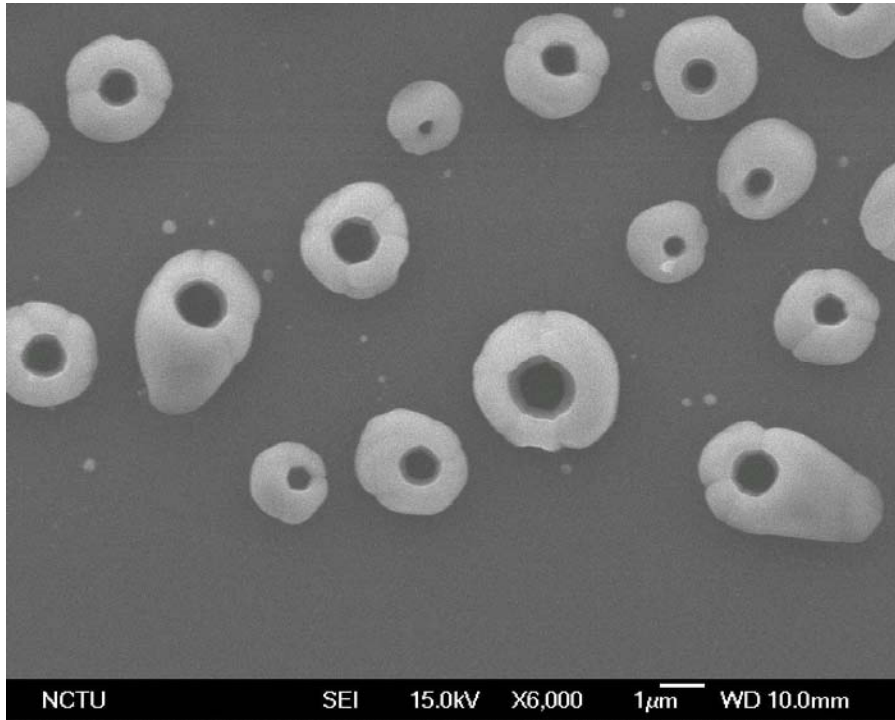


圖 4.2-3。450°C 退火 3 小時，6,000X 二次電子影像

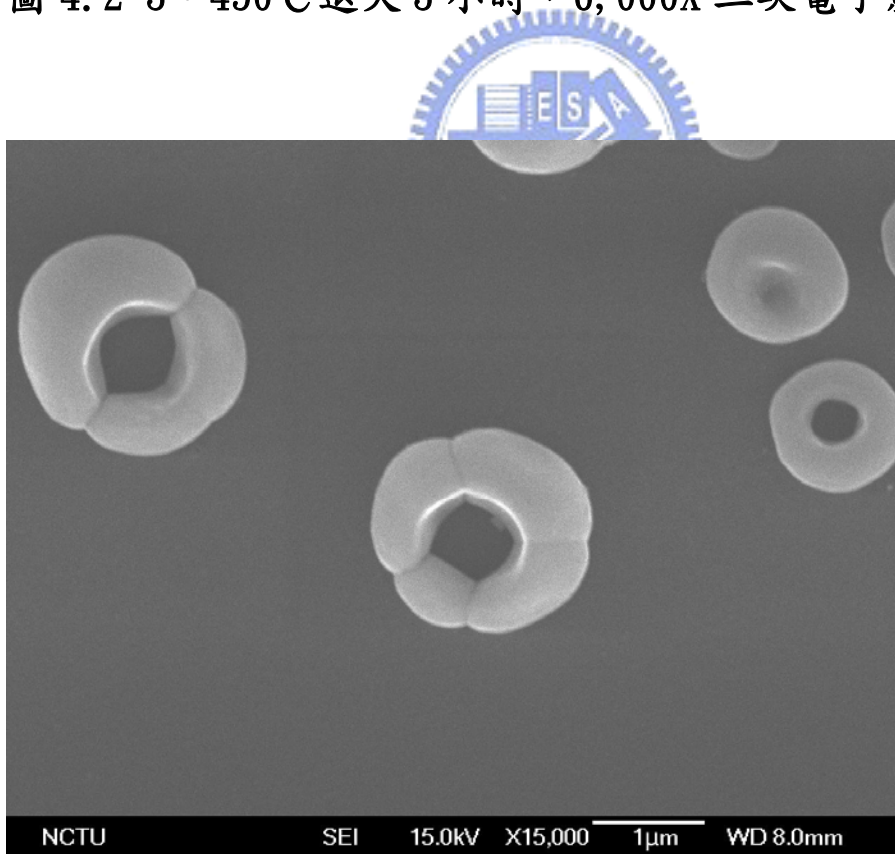


圖 4.2-4；450°C 退火 1 小時，15,000X 的二次電子影像

### 4.3 Ag 薄膜對非晶矽結晶在退火後的 EDS 分析

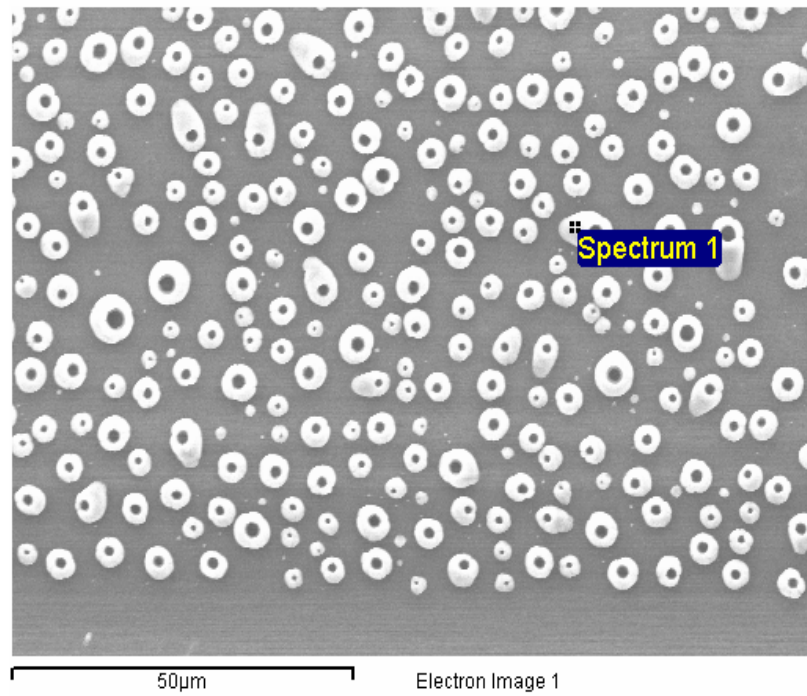
從退火後的試片，可以發現 Ag 在非晶矽上面會析出一些甜甜圈狀的析出物，初步研判應該是矽的結晶，於是再拿去做 EDS 成分分析，進一步鑑定析出物的主要成分。圖 4.3-1(a)為 450°C 退火 3 小時的 EDS 第一擇點分析圖、圖 4.3-1(b)為其 peak 強度分布圖。從圖中可以看出，第一點選擇的是析出物中甜甜圈上的點，可以看出主要的 peak 為 Si，而還是有些銀未被蝕刻液吃光，所以還有殘留一些銀的 peak。表 4.3.1 可以看出第一擇點的成分重量百分比與原子百分比。其中少量的 Pt，是在準備 SEM 試片時，為了增加導電度而鍍上的惰性電極材料，因為量很少，所以比較不會影響實驗結果。

圖 4.3-2(a)為 450°C 退火 3 小時的 EDS 第二擇點分析圖與圖 4.3-2(b)為其 peak 強度分布圖，配合表 4.3.2 可以看出，表 4.3.2 為第二擇點的成分重量百分比與原子百分比。EDS 擇區為甜甜圈析出物正中心空心的部份，可以跟甜甜圈的部份比較發現，中心的部份 Si 的 peak 沒有那麼突顯了，反而是 Ag 的成分較高，表示析出物中心的確有 Ag 存在過的痕跡，而析出物應該也是由 Ag 誘發非晶矽再結晶而析出的，而其生長的機制目前還未確定，還待之後做進一步深入的調查。

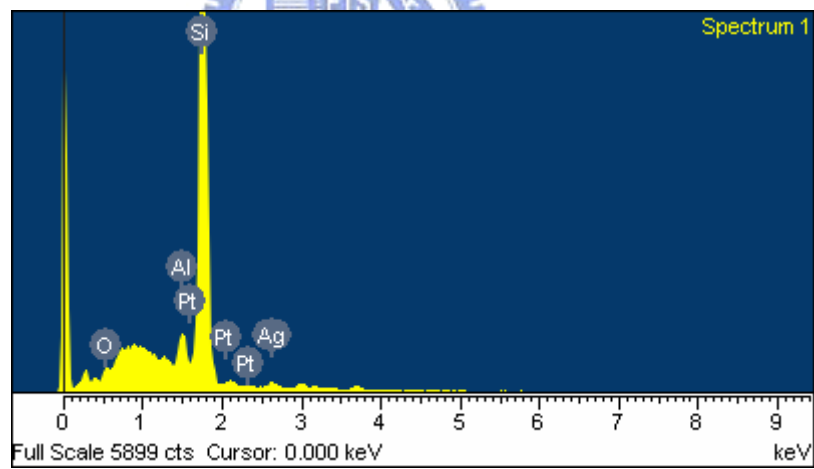


接著檢視非析出物區的 EDS 第三擇點，圖 4.3-3(a)為 450°C 退火 3 小時的 EDS 第三擇點分析圖；4.3-3(b)為其 peak 強度分布圖可以看出，再參考表 4.3.3，表 4.3.3 為第三擇點的成分重量百分比與原子百分比。在沒有析出物的區塊主要成分就是 Si，完全找不到 Ag 的蹤跡，這又再一次的證明了析出物是因 Ag 的存在而產生再結晶的反應的。

至於整個試片都存在著少量的鋁成分，則是因為在蒸鍍的過程中，蒸鍍機台有使用過鋁錠蒸鍍，即使每次使用後都會固定作用後清潔的工作，但是仍然沒辦法將這個雜質完全去除。銀的熔點 962 度，相對於鋁的熔點 660 度來的要高多了，所以當蒸鍍銀的時候，有些無法清潔完畢的鋁，也會變成鋁蒸氣跑到試片上，這就是為什麼 EDS 在試片的每個地方都可以找到少量的鋁雜質，這也是之後要注意克服的一個重點。



(a)



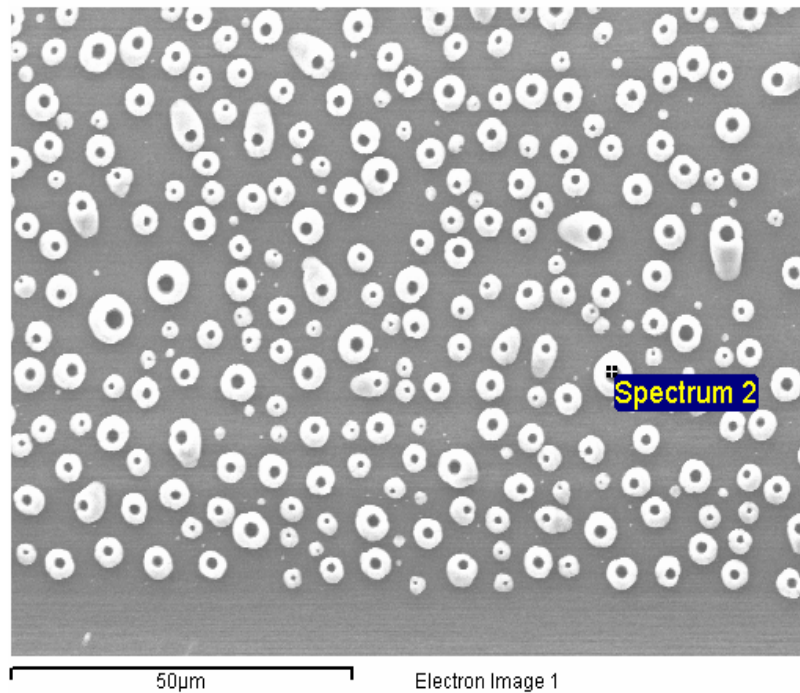
(b)

圖 4.3-1(a)450°C 退火 3 小時的二次電子影像

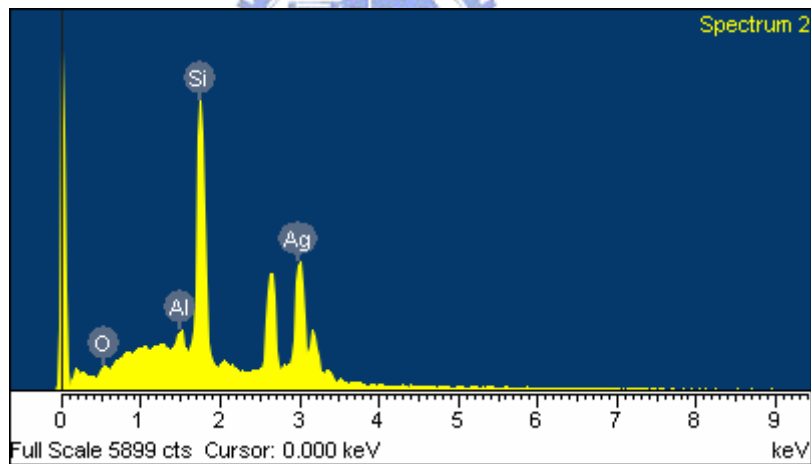
(b)EDX 第一擇點 peak 強度分布圖

表 4.3.1 第一擇點的成分重量百分比與原子百分比

Element	Weight%	Atomic%
O	9.38	16.67
Al	4.72	4.97
Si	75.33	76.28
Ag	4.58	1.21
Pt	5.99	0.87
Totals	100.00	100.00



(a)



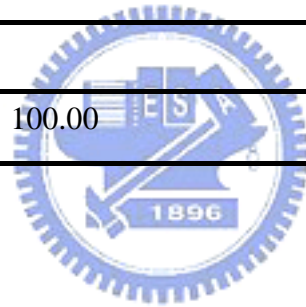
(b)

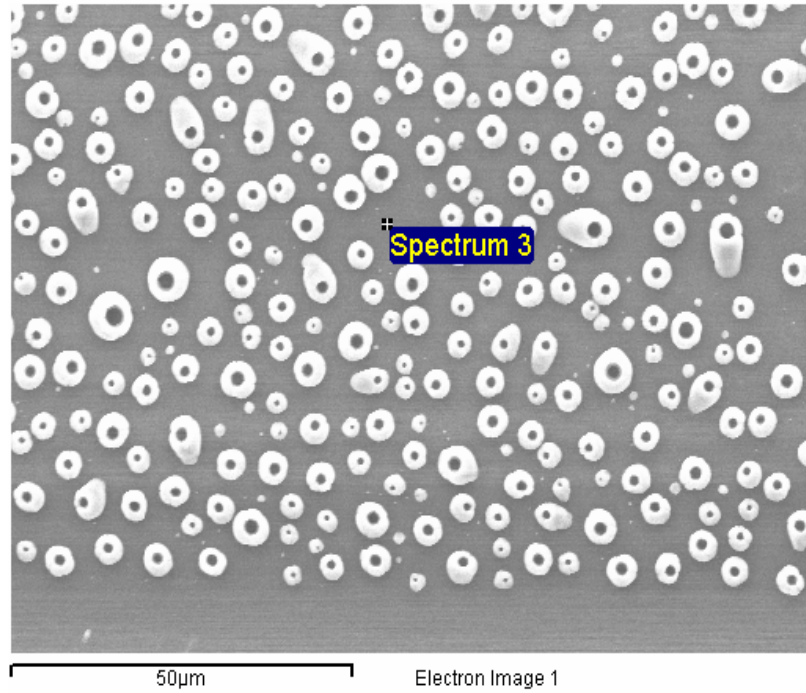
圖 4.3-2(a)450°C退火 3 小時的二次電子影像

(b)EDX 第二擇點 peak 強度分布圖

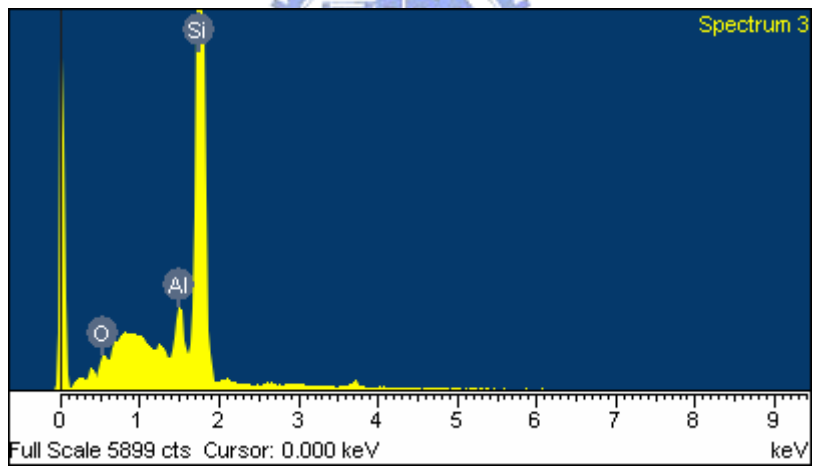
表 4.3.2: 第二擇點的成分重量百分比與原子百分比

Element	Weight%	Atomic%
O	7.69	21.51
Al	2.54	4.22
Si	31.39	50.04
Ag	58.38	24.23
Totals	100.00	100.00





(a)



(b)

圖 4.3-3(a)450°C退火 3 小時的二次電子影像

(b)EDX 第三擇點 peak 強度分布圖

表 4.3.3: 第三擇點的成分重量百分比與原子百分比

Element	Weight%	Atomic%
O	10.66	17.28
Al	6.11	5.87
Si	83.23	76.85
Totals	100.00	100.00



#### 4.4 退火溫度及時間對非晶矽結晶的影響

把不同退火條件的試片，放進 SEM 底下觀察的結果，從圖 4.4-1 退火 350°C 一小時 SEM 的 500X 正視圖跟圖 4.4-2 退火 350°C 三小時 SEM 的 250X 正視圖，可以發現 350°C 退火的試片，有出現一些零星的結晶，但是邊緣有點破碎。利用影像分析軟體分析 350°C 退火的試片，表 4.4.1 為 350°C 退火試片 1 小時、3 小時、5 小時析出物的分析。從表中可以發現溫度不變，只是增加退火時間，單位面積的成核數只會略微上升，但是平均粒徑、析出物占 pattern 的面積百分比都會上升。由於溫度比較低的緣故，所以出現的結晶少而且比較薄，在蝕刻銀的時候，很容易就將邊緣較薄的結晶析出物也跟著帶走，所以 350°C 退火的試片才呈現破碎樣，同時也因為退火一小時的試片裡較小較薄的晶粒蝕刻時被帶走了，所以留下一些較大的晶粒，使得平均粒徑稍高於其他較長的時效。

再升高一些溫度，到 450°C 之後，圖 4.4-3 為 SEM 退火 450°C 三小時 600X 的正視圖跟圖 4.4-4 為 SEM 退火 450°C 五小時 550X 的正視圖，看到試片已經有大量而且完整的結晶析出物，密集程度相對的也比 350°C 退火試片高而且晶粒也略大於之前 350°C 所見到的，參考表 4.4.2，其為 450°C 退火試片的影像分析表。對照圖 4.4-5 退火 450



°C 三小時 12,000X 的 SEM 正視圖和圖 4.4-6 退火 450 五小時 12,000X 的 SEM 正視圖，在 450°C 溫度中延長退火的時間從三小時到五小時，可以發現晶粒大小並沒有太大的改變，但是目測厚度可能略有上升，接著從圖 4.4-7(a) 450°C 退火三小時 AFM 表面起伏圖、(b) 450°C 退火三小時 AFM 擇點分析圖；圖 4.4-8(a) 450°C 退火五小時 AFM 表面分析圖、(b) 450°C 退火五小時 AFM 擇點分析圖中發現，晶粒的厚度明顯提高了，雖然延長退火時間讓晶粒大小改變不顯著，但卻對厚度影響比較大，所以此晶粒應該是垂直試片方向比水平生長的還快。

接著再提高退火溫度到 550°C，在圖 4.4-9 退火 550°C 一小時 SEM 的 500X 正視圖跟圖 4.4-10 退火 550°C 三小時 SEM 的 6,000X 正視圖可以觀察的到，配合表 4.4.3 退火 550°C 的影像分析表觀看，可以看到析出晶粒比起前面的溫度長的更密集，晶粒也是略為長大，之前的晶粒原本都為孤立的甜甜圈狀，在退火溫度提高到 550°C 時，可以清楚的看到晶粒有些暈開且相連結在一起，已經從原本的甜甜圈形狀升級到豬鼻子形狀了。圖 4.4-11(a) 550°C 退火一小時 AFM 的表面起伏圖、(b) 550°C 退火一小時 AFM 擇點分析圖跟圖 4.4-12(a) 550°C 退火三小時 AFM 的表面起伏圖、(b) 550°C 退火三小時 AFM 擇點分析圖。發現結果跟之前的一樣，結晶厚度跟溫度比較沒有明顯的關係，退火時間增加，結晶厚度也跟著增加。總和以上的結果做了一張表格，表

4.4.4 為平均的影像分析數據；圖 4.4-13(a)、(b)、(c) 為平均影像分析圖。可以發現隨著退火溫度的上升，平均粒徑、平均成核數、結晶面積百分比都會增加，而退火時間改變卻比較沒有顯著的改變。

圖 4.4-14 跟圖 4.4-15 是未退火的試片在 SEM 下 250X 正視圖，一片是完好的試片，另一片是有瑕疵的試片，在一次偶然的機會中，拿了原以為有瑕疵的試片去做退火處理，如圖 4.4-16 是 SEM 在 450°C 退火三小時 550X 的正視圖跟圖 4.4-17 是 SEM 在 450°C 退火三小時 12,000X 的高倍率正視圖，發現原本摺疊較厚的部分，退火過後的晶粒遠大於原本單層厚度的部份，相當顯著的改變。對照表 4.4.5，表 4.4.5 為上圖的影像分析表，由此可知真正影響晶粒大小的，應該是直接改變銀的厚度，在這裡只能作一個簡略的推論，要在之後的日子更深入的作下去才能夠確定這個論調。

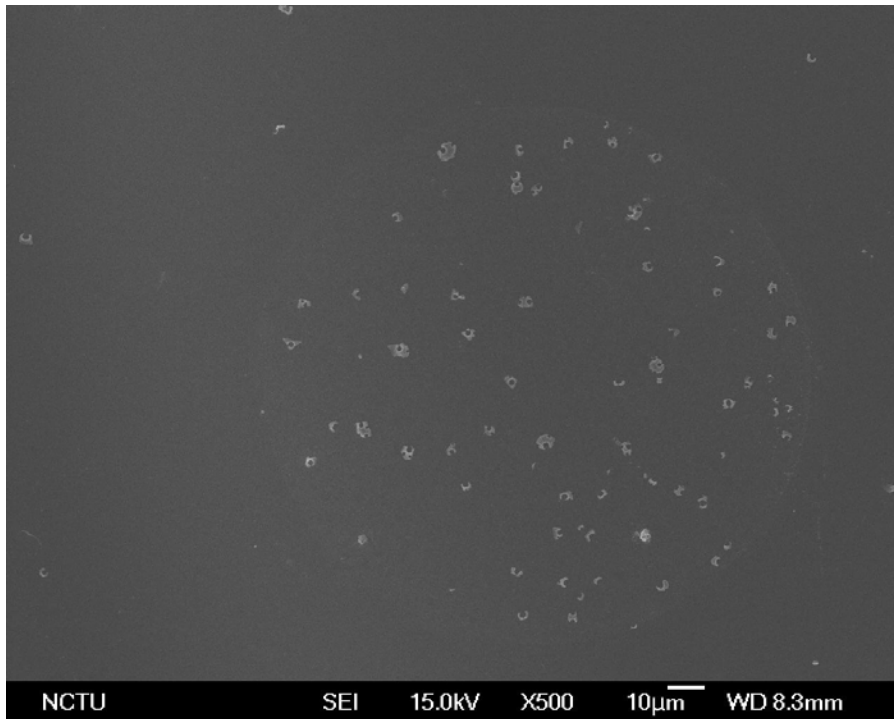


圖 4.4-1 退火 350°C 一小時 500X 二次電子影像

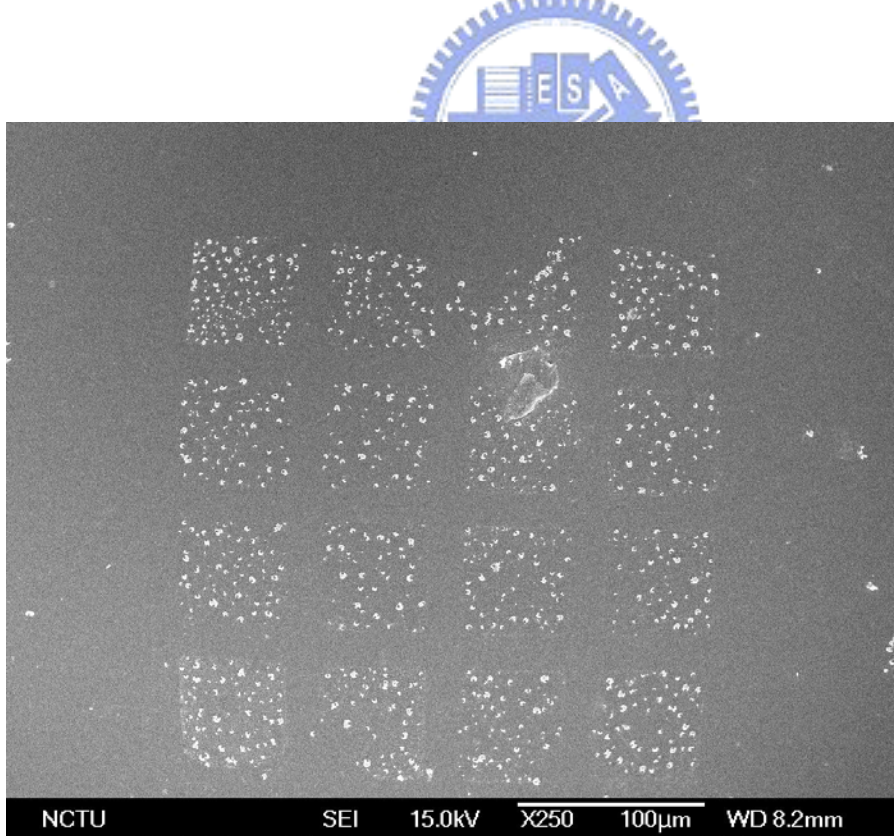


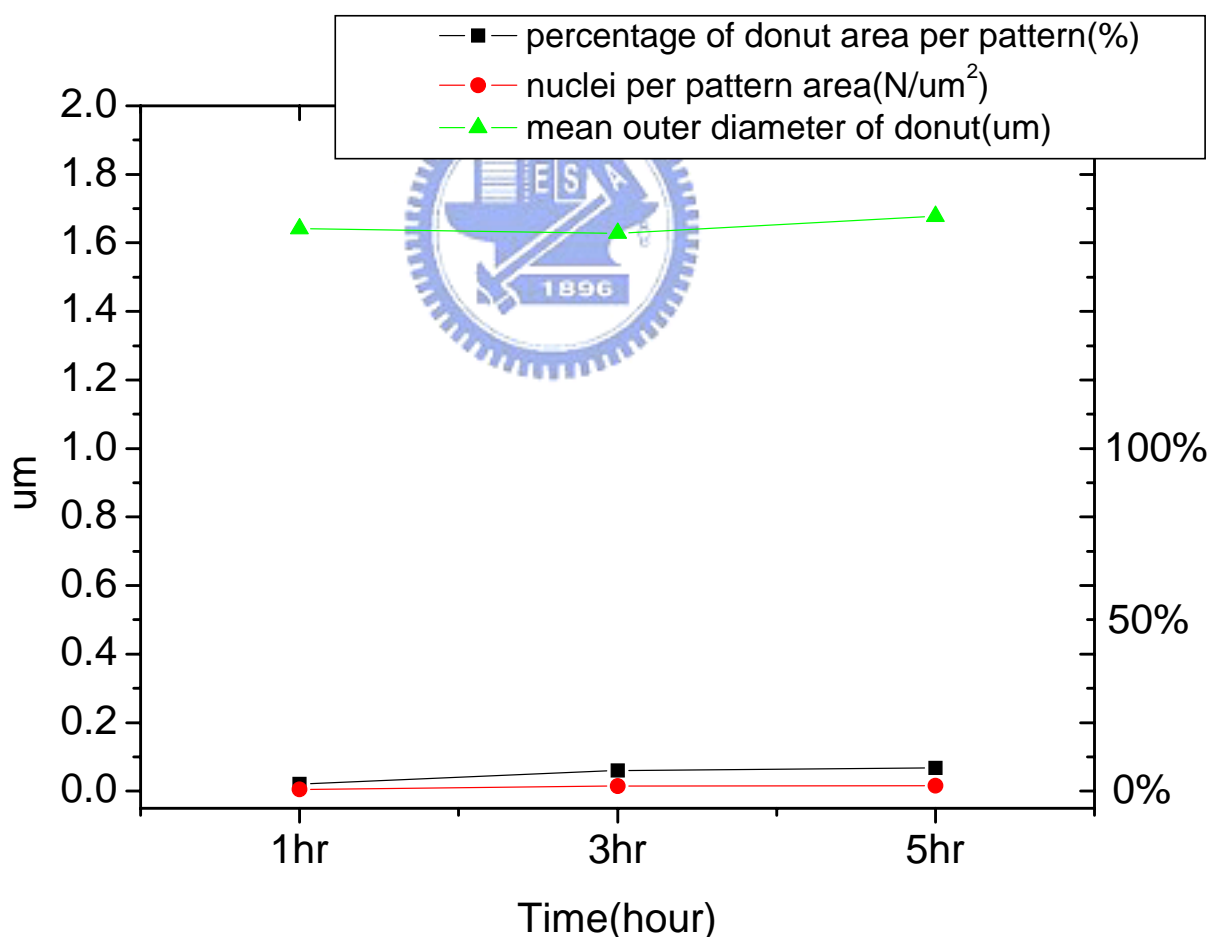
圖 4.4-2 退火 350°C 三小時 250X 二次電子影像

表 4. 4. 1(a)350°C 影像分析結果

(b)350°C 影像分析表附趨勢圖

350°C	1hr	3hr	5hr
甜甜圈面積佔 Pattern 的比率	0.0203	0.0601	0.0681
單位面積的成核數量	0.0056	0.015	0.01545
每個甜甜圈的外徑平均( $\mu\text{m}$ )	1.641	1.628	1.677

(a)



(b)

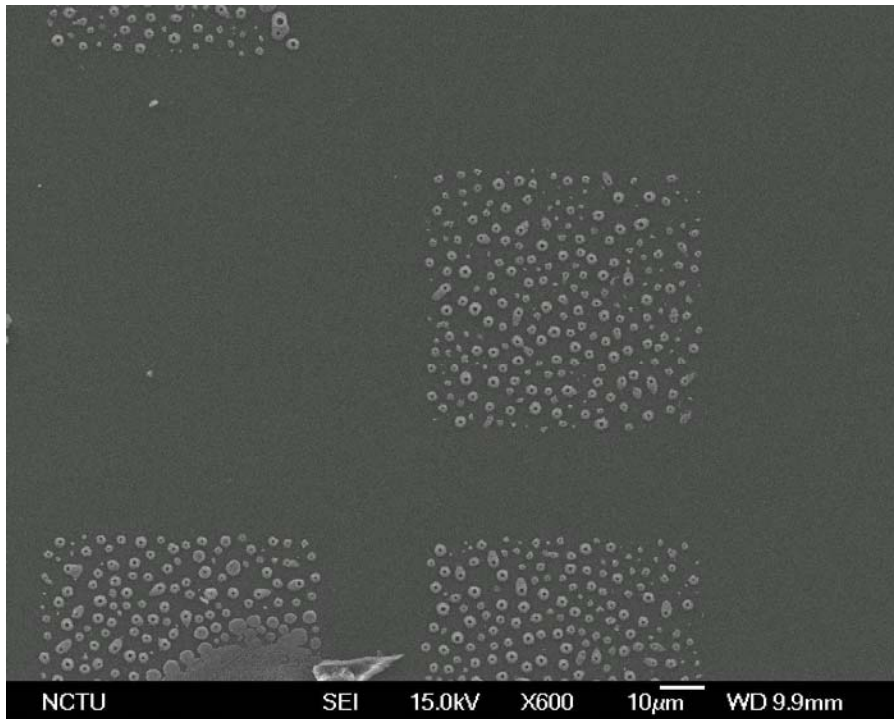


圖 4.4-3:退火 450°C 三小時 600X 二次電子影像

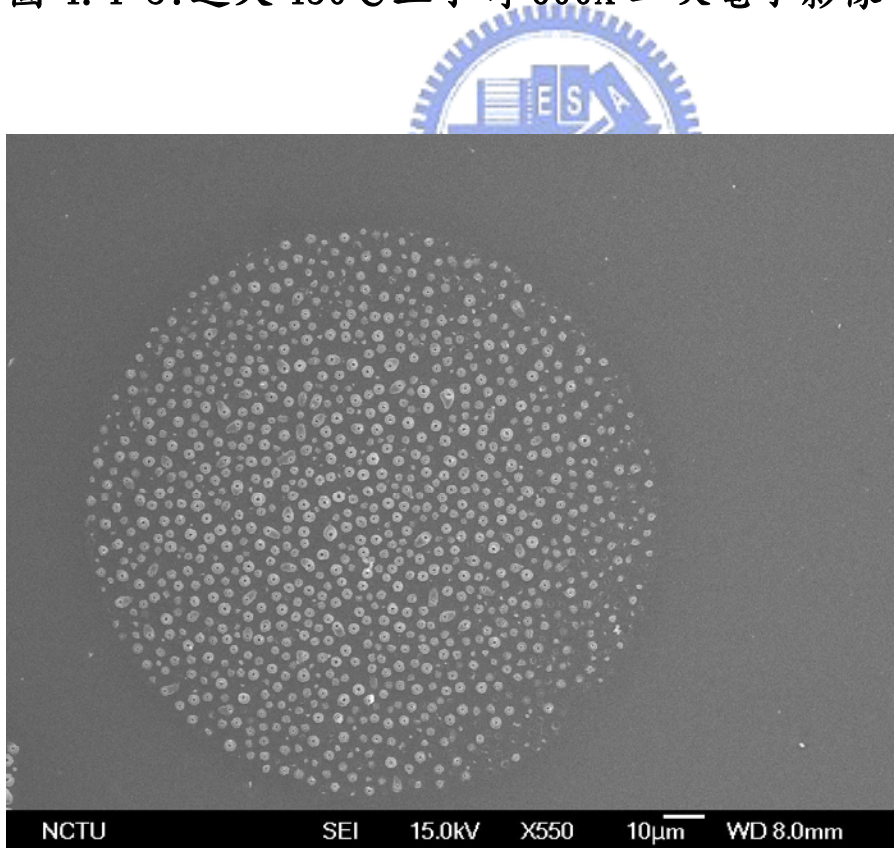


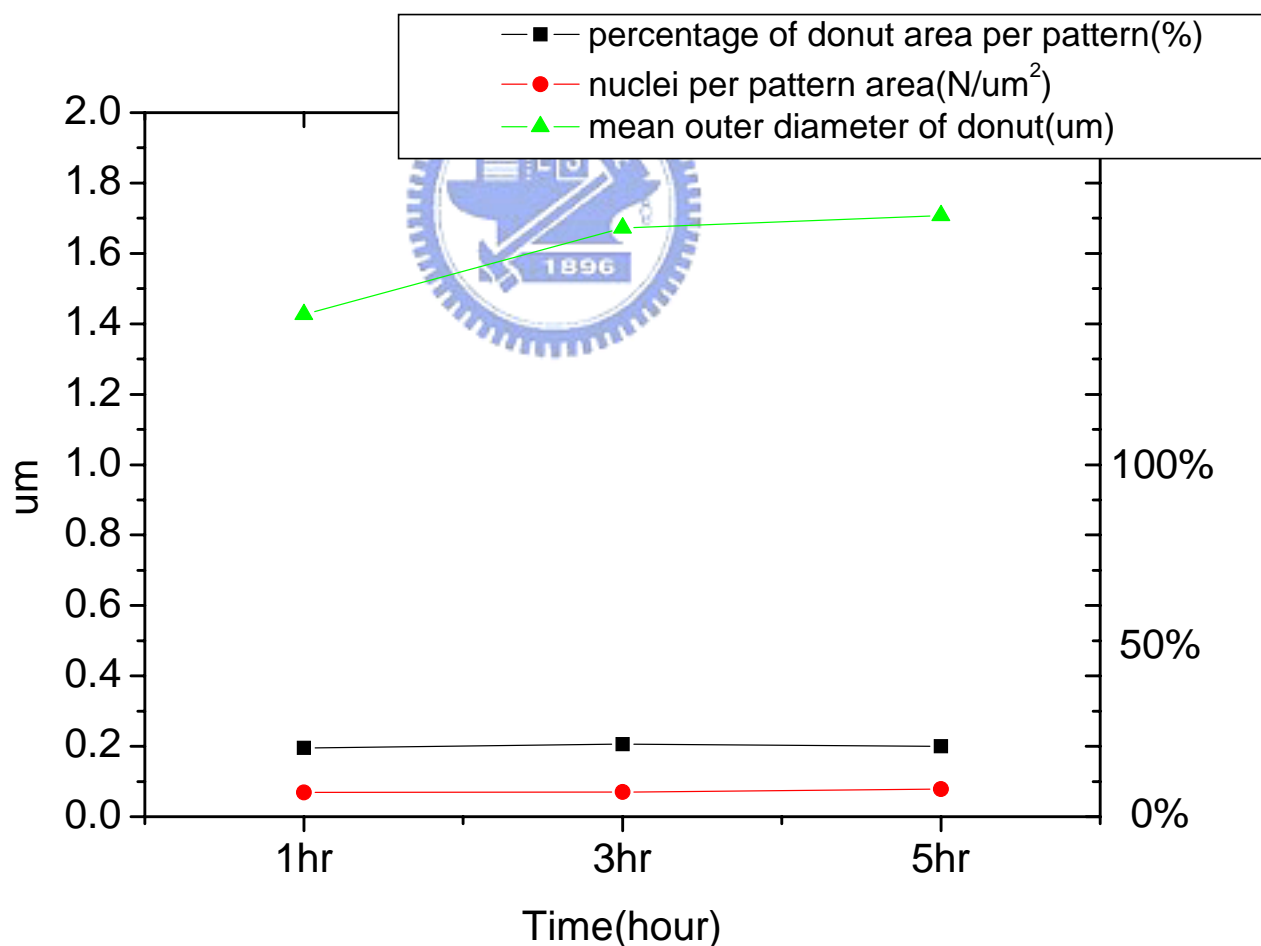
圖 4.4-4:退火 450°C 五小時 550X 二次電子影像

表 4. 4. 2(a) 450°C 影像分析結果

(b)450°C 影像分析表附趨勢圖

450°C	1hr	3hr	5hr
甜甜圈面積佔 Pattern 的比率	0.1951	0.2056	0.1996
單位面積的成核數量	0.069	0.0706	0.0785
每個甜甜圈的外徑平均( $\mu\text{m}$ )	1.4269	1.6727	1.7077

(a)



(b)

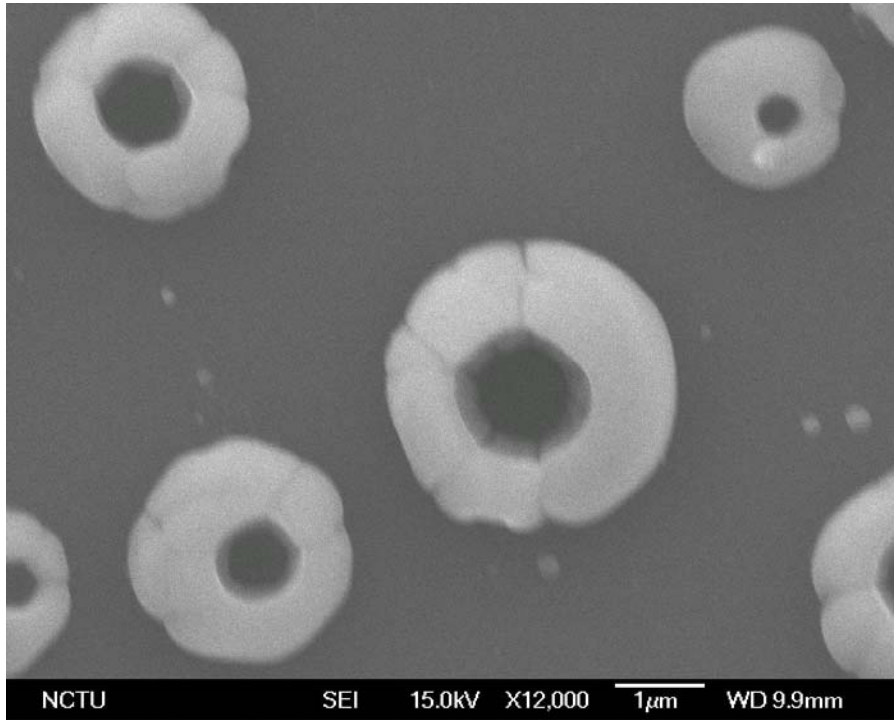


圖 4.4-5:退火 450°C 三小時 12,000X 二次電子影像

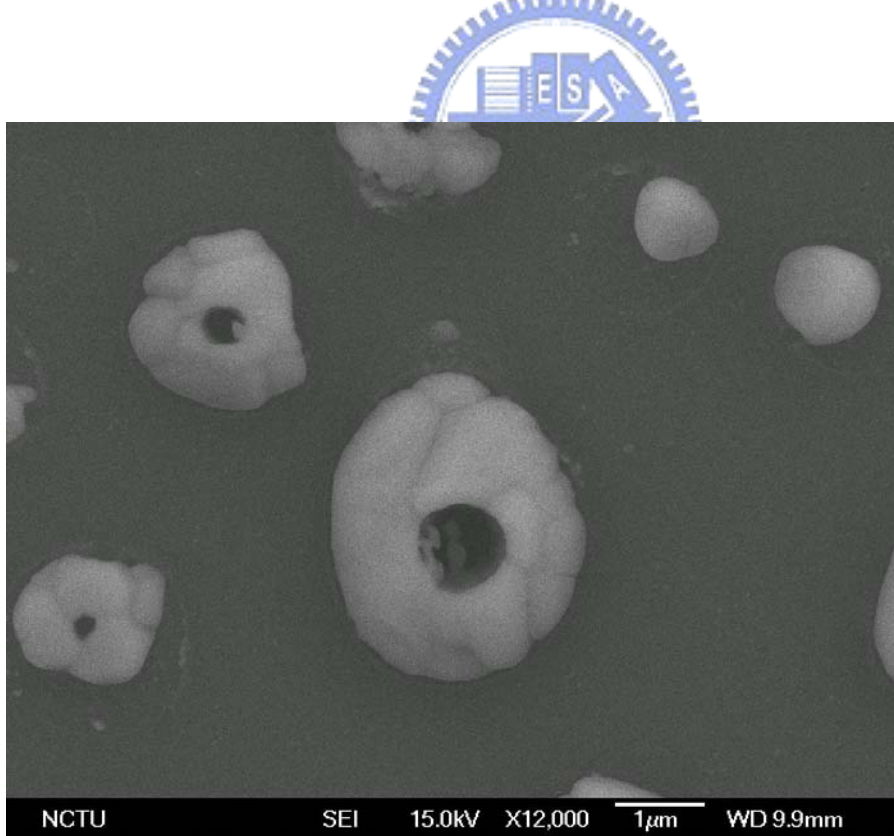
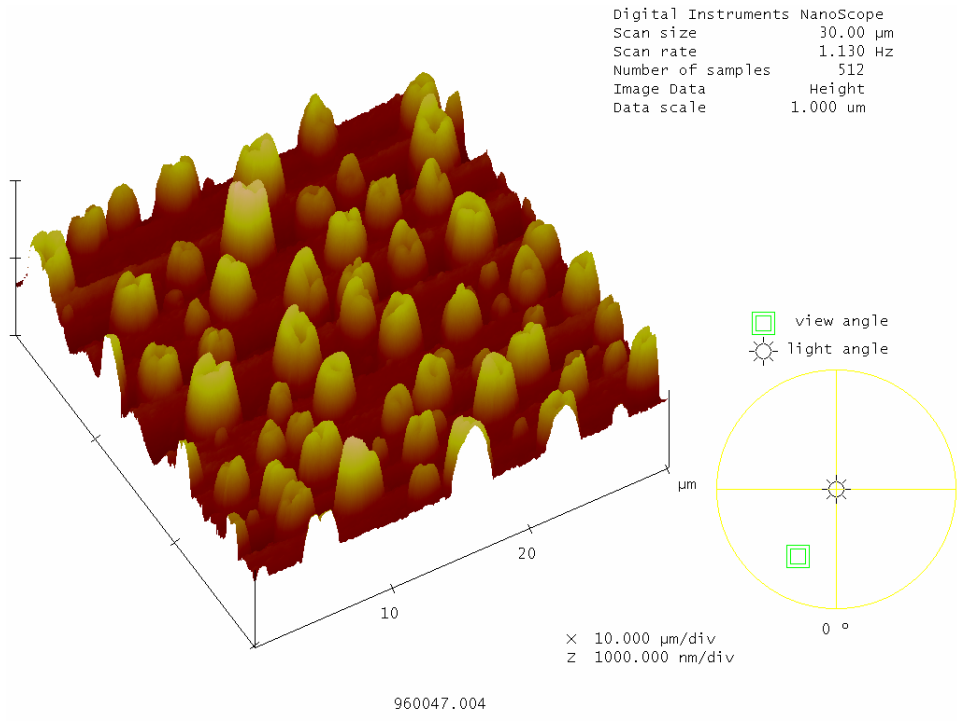
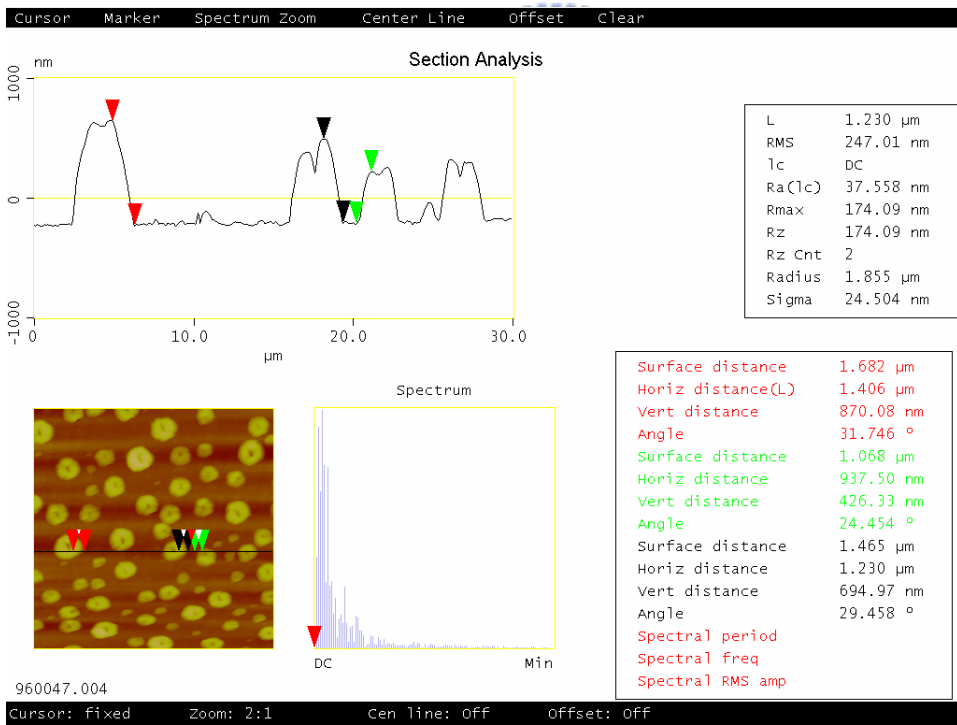


圖 4.4-6:退火 450°C 五小時 12,000X 二次電子影像



(a)

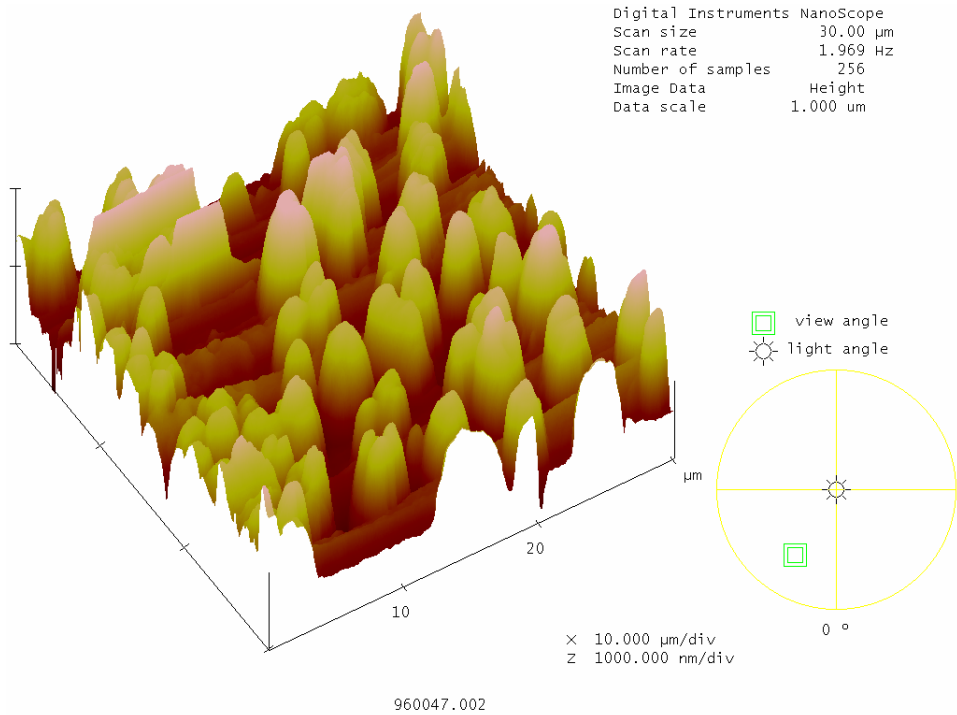


(b)

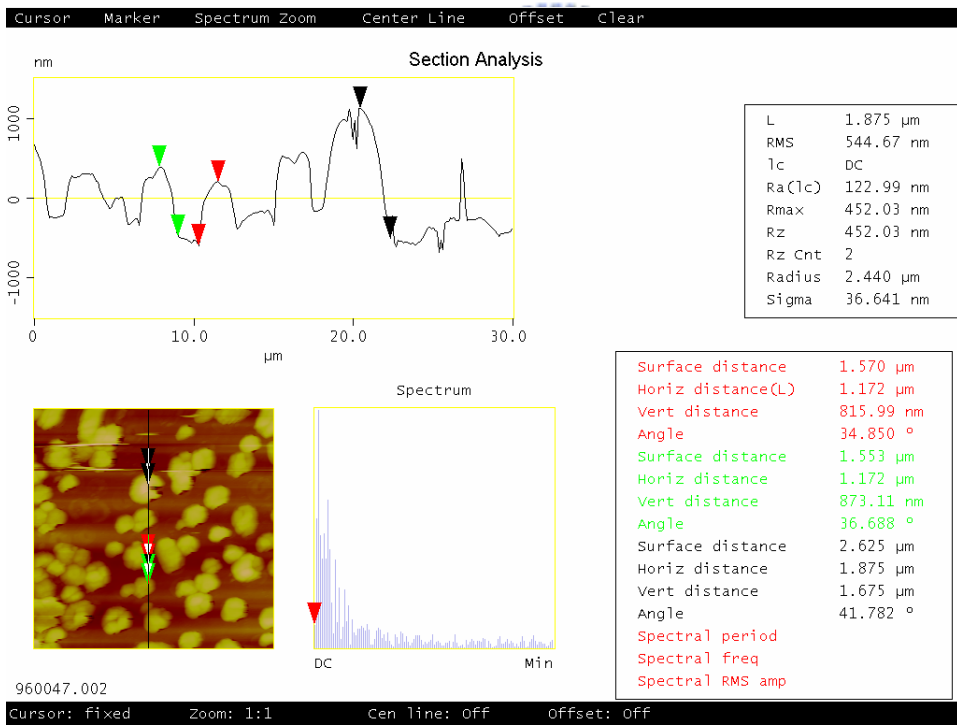
圖 4.4-7(a) 450 $^\circ\text{C}$ 退火三小時 AFM 表面起伏圖

(b) 450 $^\circ\text{C}$ 退火三小時 AFM 擇點分析圖





(a)



(b)

圖 4.4-8(a) 450 $^\circ\text{C}$ 退火五小時 AFM 表面起伏圖

(b) 450 $^\circ\text{C}$ 退火五小時 AFM 擇點分析圖

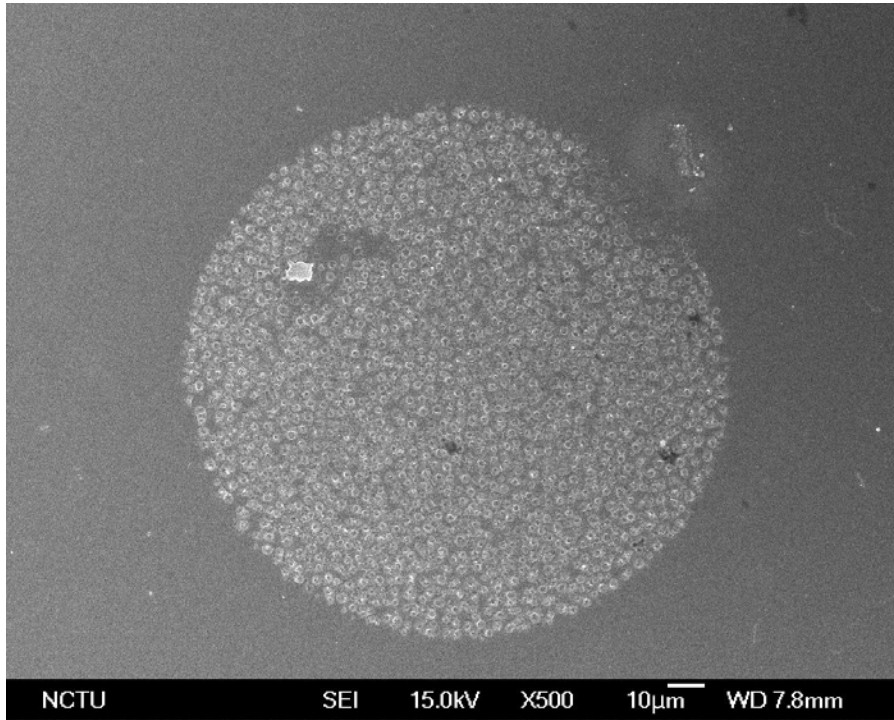


圖 4.4-9 退火 550°C 一小時 500X 二次電子影像

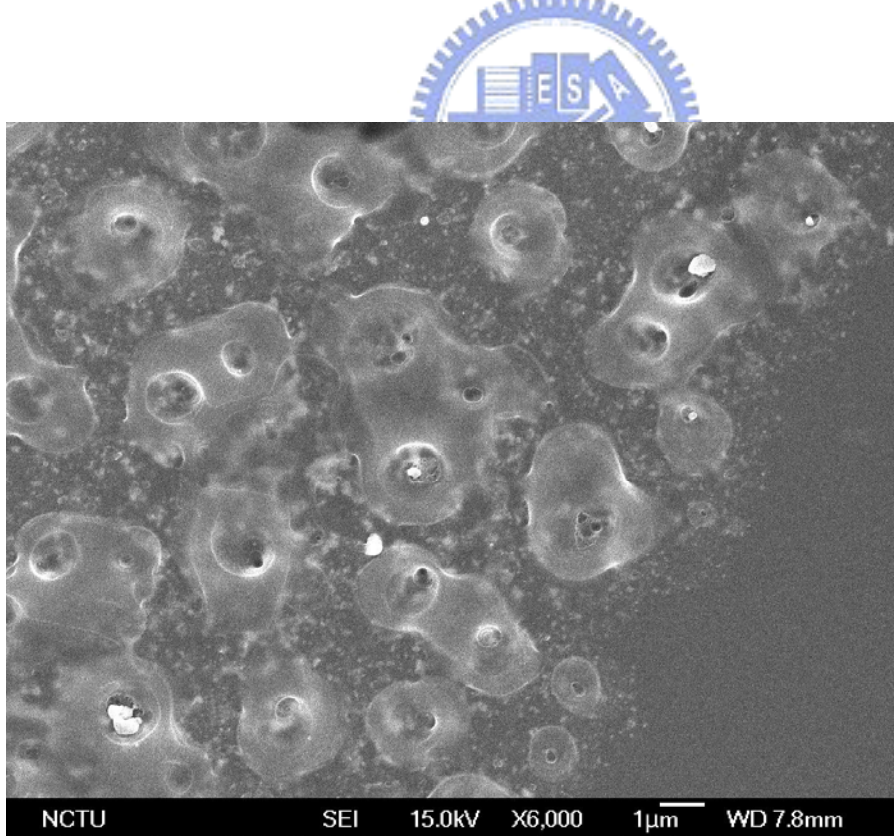


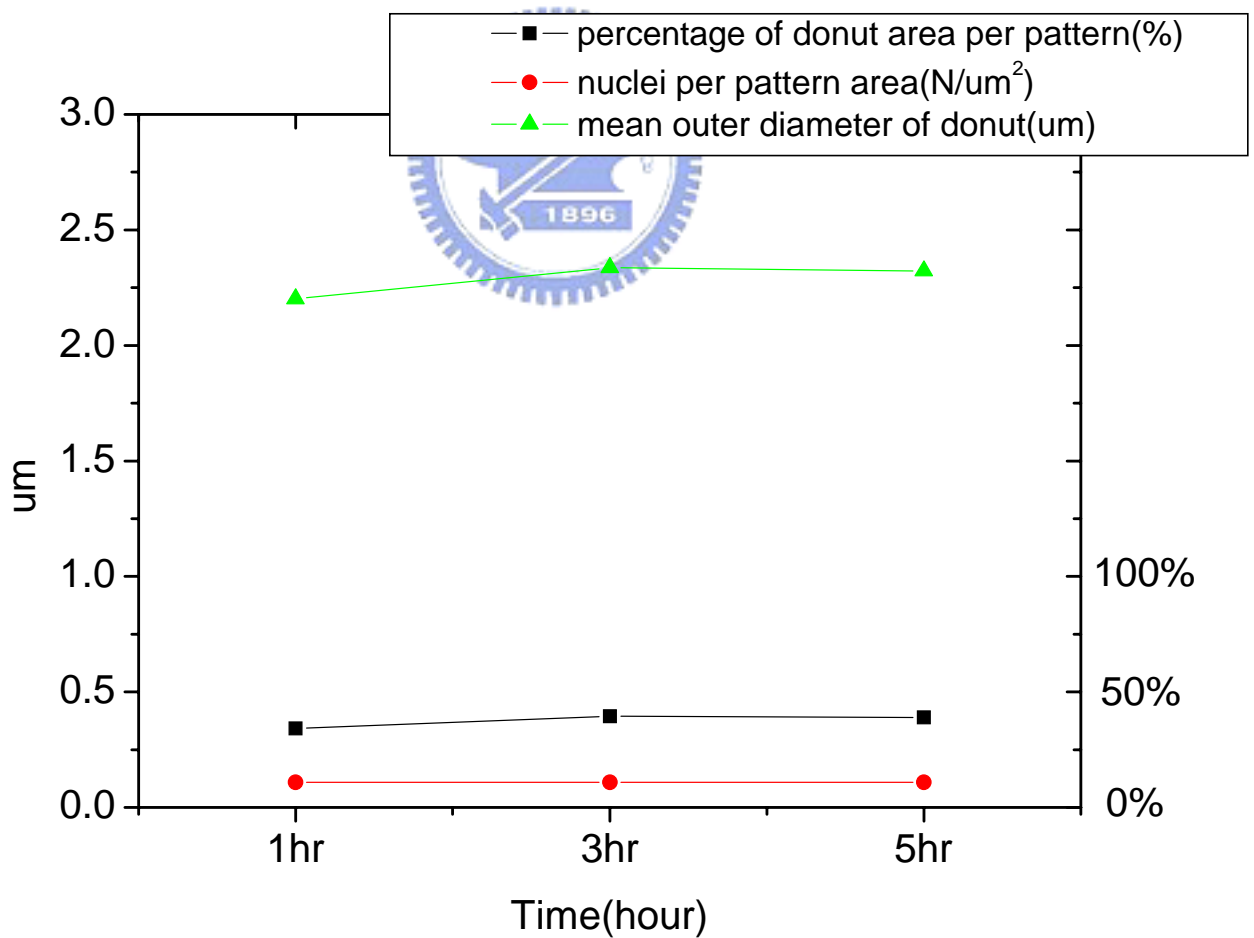
圖 4.4-10 退火 550°C 三小時 6,000X 二次電子影像

表 4. 4. 3(a) 550°C 影像分析結果

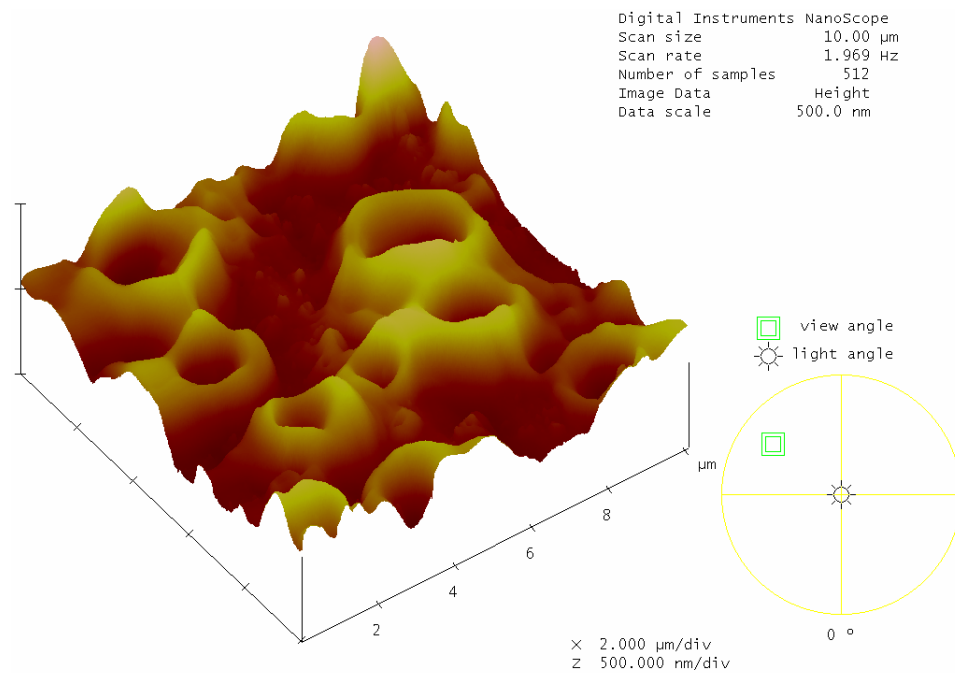
(b)550°C 影像分析表附趨勢圖

550°C	1hr	3hr	5hr
甜甜圈面積佔 Pattern 的比率	0.3424	0.3948	0.3901
單位面積的成核數量	0.1084	0.1095	0.1088
每個甜甜圈的外徑平均( $\mu\text{m}$ )	2.202	2.337	2.322

(a)

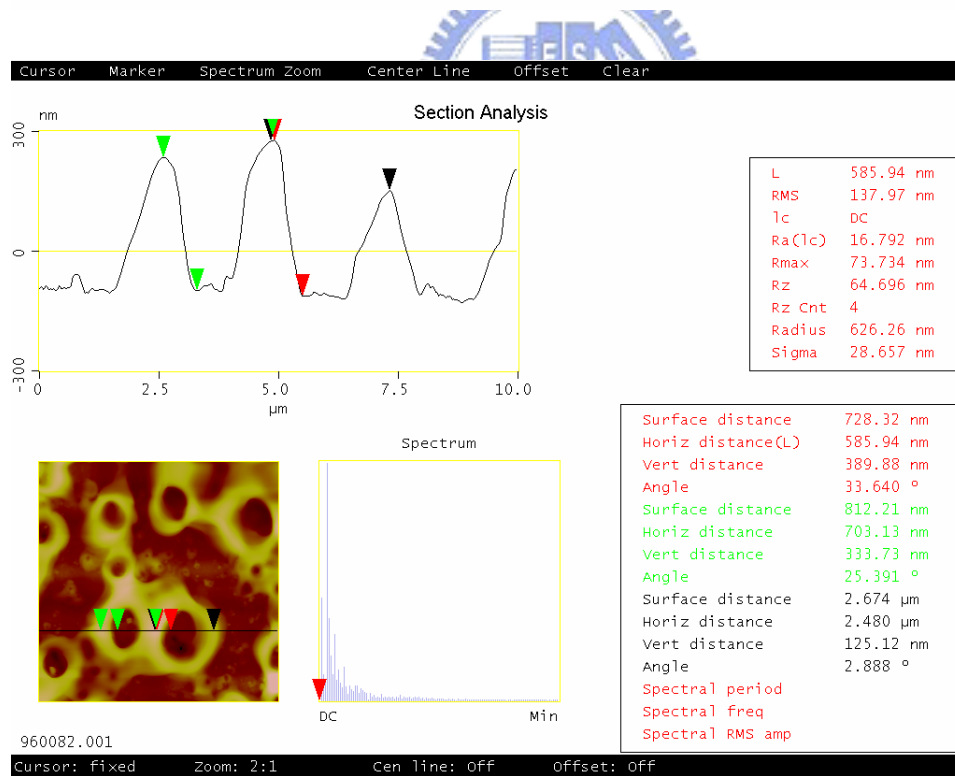


(b)



960082.001

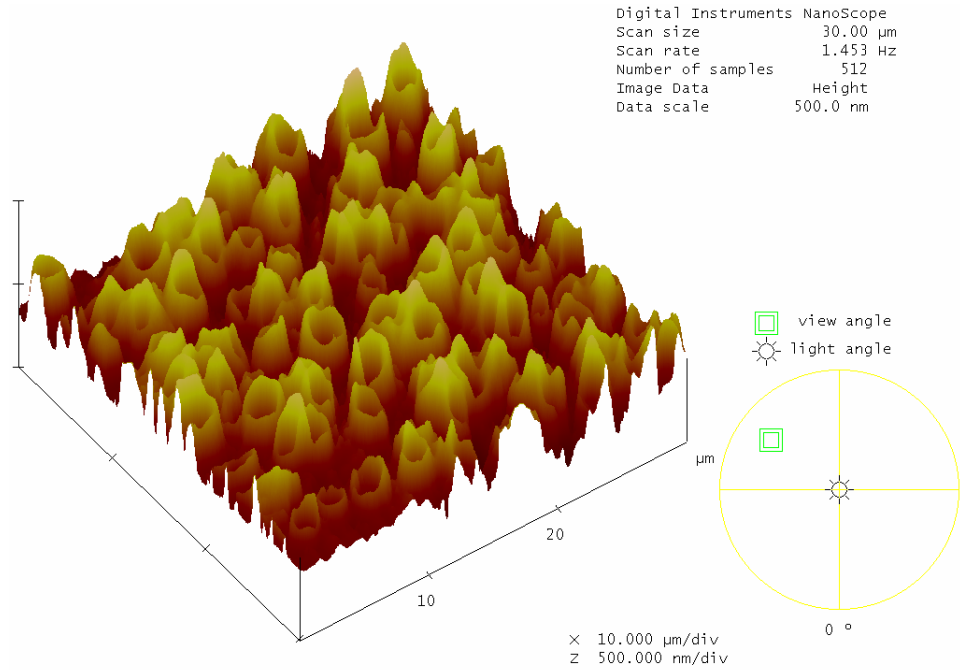
(a)



(b)

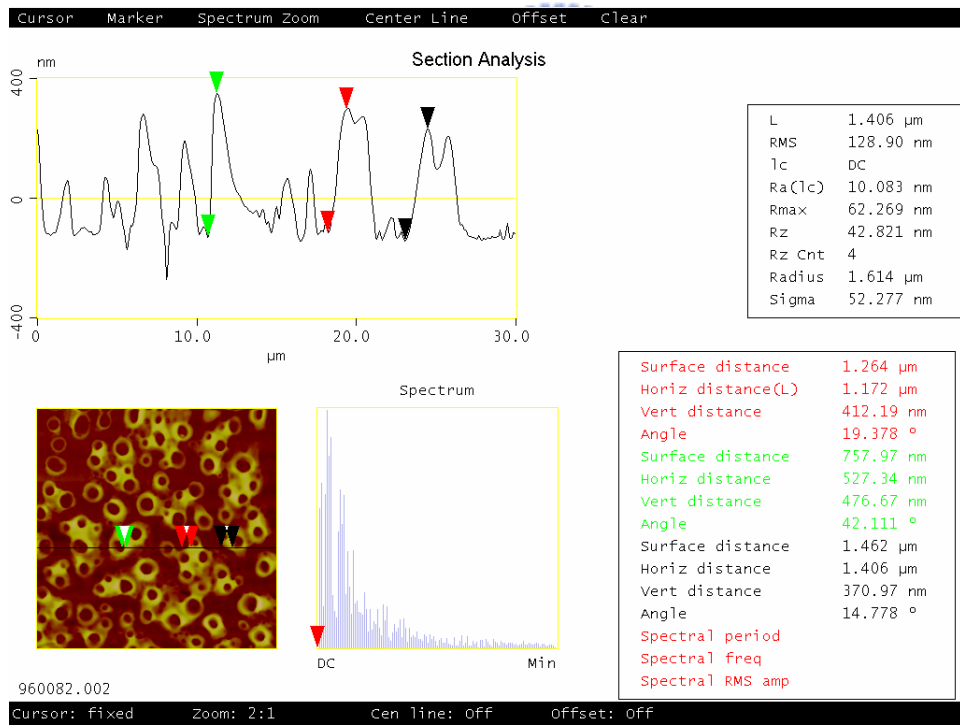
圖 4.4-11(a)550°C退火一小時 AFM 的表面起伏圖

(b) 550°C退火一小時 AFM 擇點分析圖



960082.002

(a)



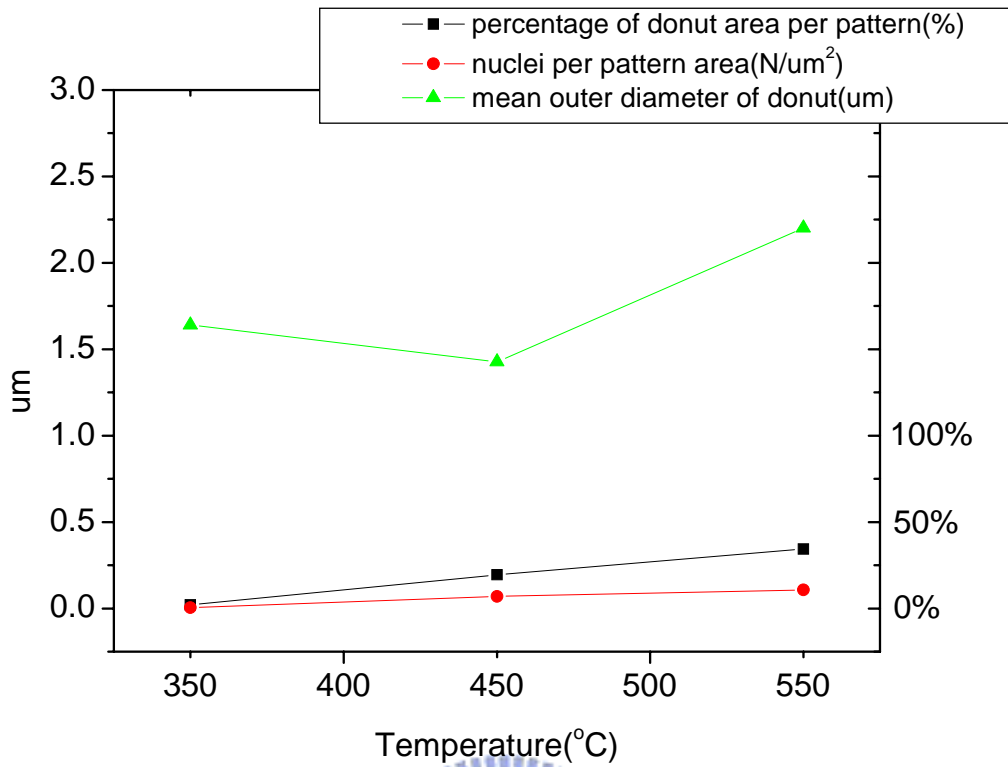
(b)

圖 4.4-12(a)550 $^\circ\text{C}$ 退火三小時 AFM 的表面起伏圖

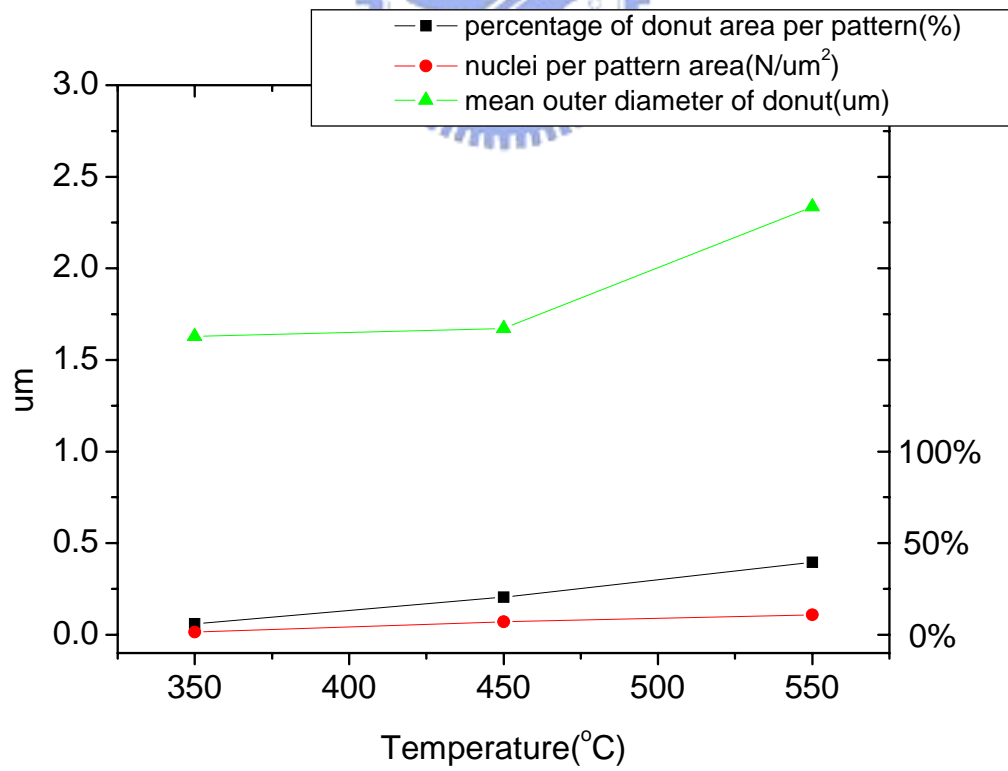
(b) 550 $^\circ\text{C}$ 退火三小時 AFM 擇點分析圖

表 4.4.4 平均影像分析數據

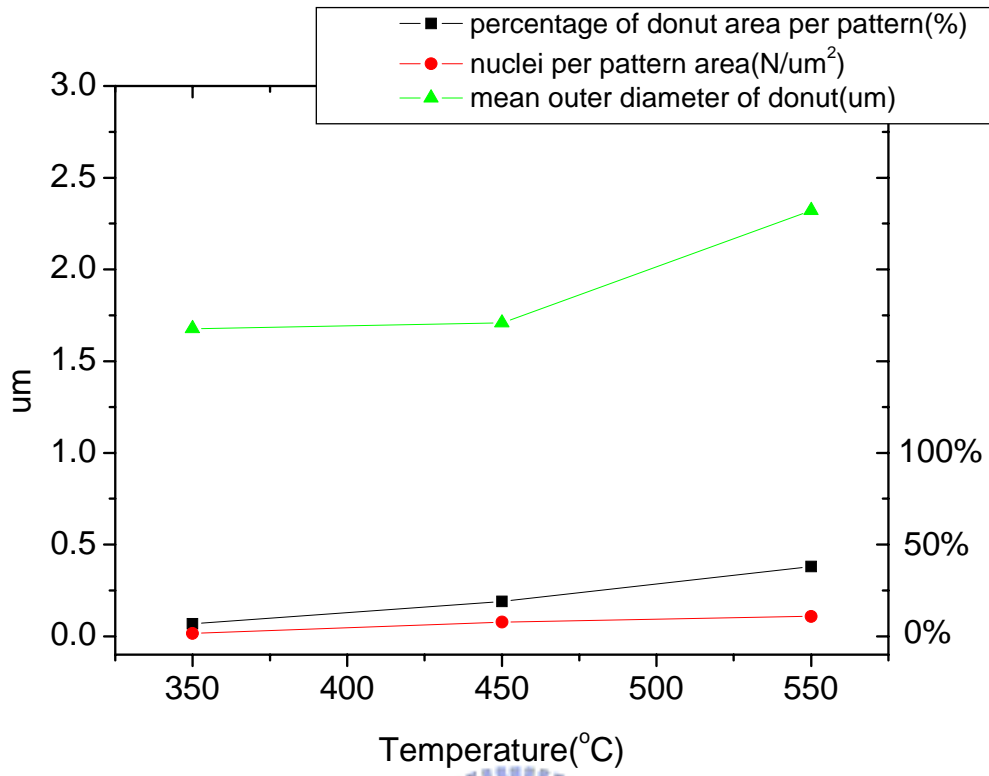
甜甜圈面積佔 Pattern 的比率	1hr	3hr	5hr
350°C	0.0203	0.0601	0.0681
450°C	0.1951	0.2056	0.1896
550°C	0.3424	0.3948	0.3801
單位面積的成核數量	1hr	3hr	5hr
350°C	0.0056	0.015	0.01545
450°C	0.069	0.0706	0.0785
550°C	0.1084	0.1095	0.1088
每個甜甜圈的外徑平均	1hr	3hr	5hr
350°C	1.641	1.628	1.677
450°C	1.4269	1.6727	1.7077
550°C	2.202	2.337	2.322



(a)



(b)



(c)

圖 4.3-13 平均影像分析圖(a)1hr, (b)3hr, (c)5hr



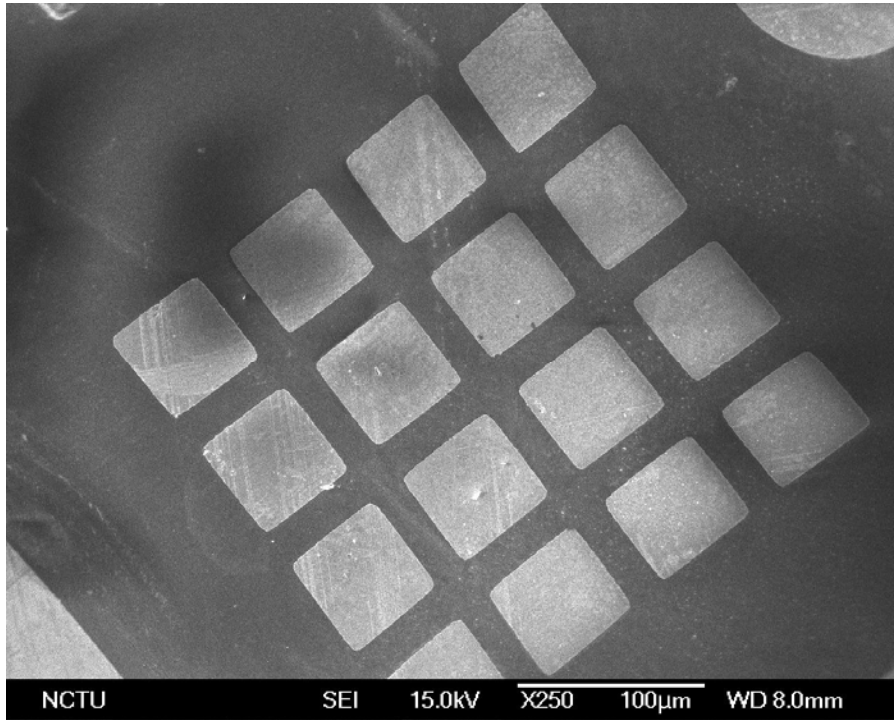


圖 4.3-14: 未退火試片 SEM 下 250X 二次電子影像

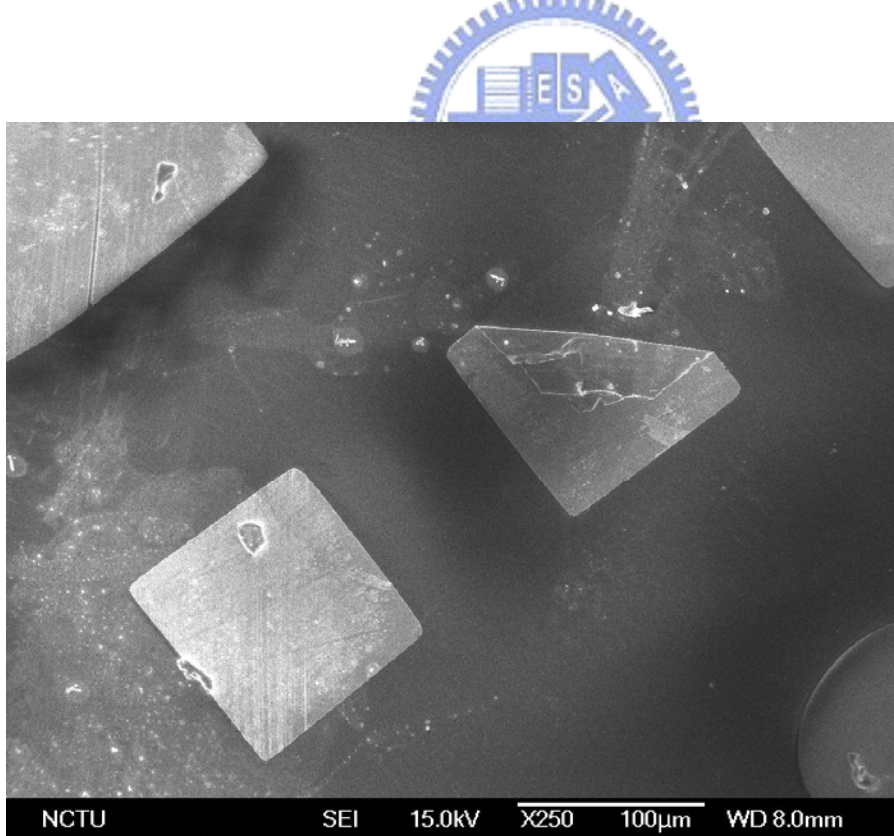


圖 4.3-15: 未退火試片 SEM 下 250X 二次電子影像

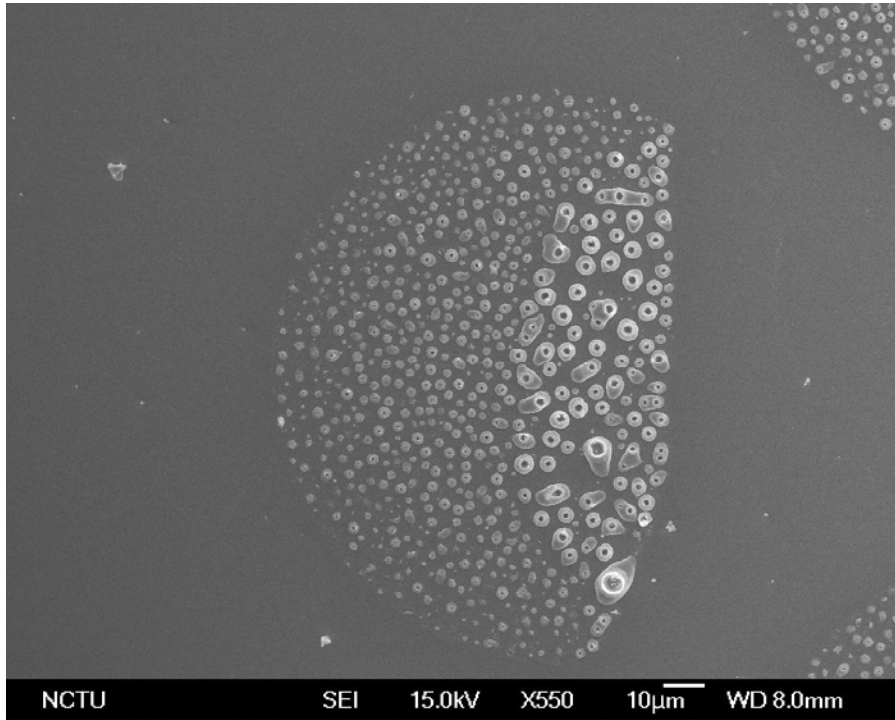


圖 4.4-16:450°C退火三小時 550X 的二次電子影像

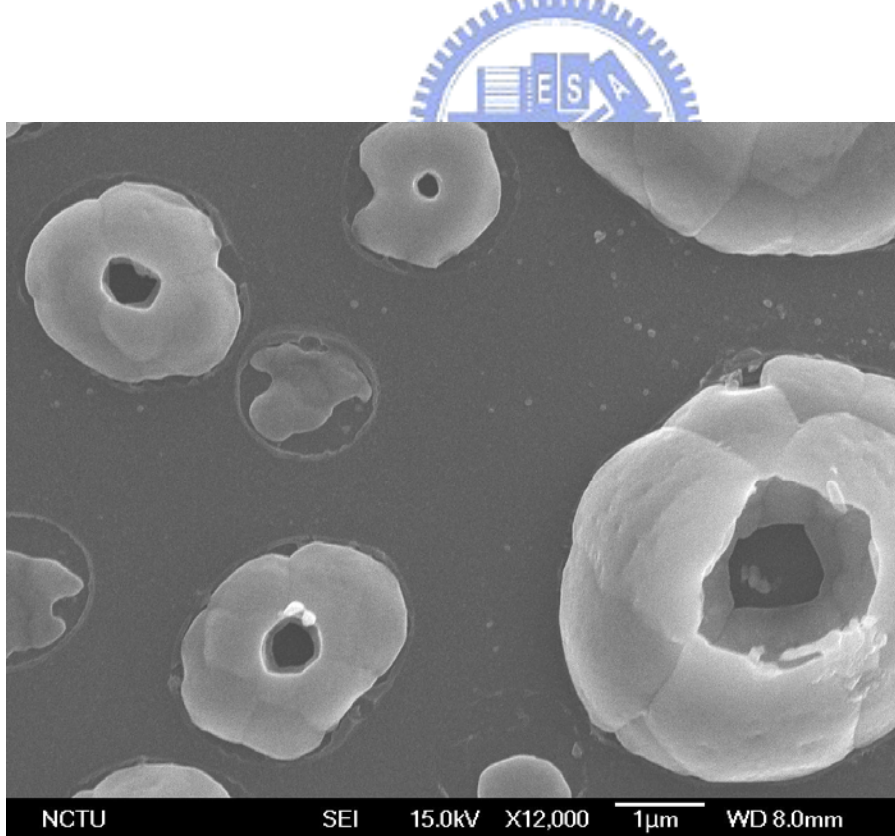


圖 4.4-17:450°C退火三小時 12,000X 的高倍率二次電子影像

表 4.4.5 為圖 4.4-15 與圖 4.4-16 之影像分析

銀薄區	每個甜甜圈的外徑	每個甜甜圈佔左半部分的平均面積
Min	0.50408971	0.00000976
Max	4.7885785	0.00104305
Mean	1.6842235	0.00018333
Sum	1952.015	0.21248186
銀厚區	每個甜甜圈的外徑	每個甜甜圈佔右半部分的平均面積
Min	0.53508103	0.00011847
Max	6.4222422	0.01524396
Mean	2.7289593	0.00471558
Sum	188.29819	0.32537568



## 第五章 結論


1. 在玻璃基板上以 PECVD 的方式鍍上約 100nm 的非晶矽，接著以蒸鍍的方式，蒸鍍條件為 18V、3.7A，再非晶矽上鍍厚度約 250nm 的銀，經過大於 350°C 的退火溫度後，發現的確可以使銀誘發矽的再結晶，且再結晶形狀為相當特殊的甜甜圈形狀，這是在其他文獻上從未發現過的。

2. 退火溫度不變，增加退火時間，再結晶晶粒的直徑只有略微的增加，但再結晶晶粒的厚度卻有較明顯的變厚，表示此再結晶晶粒，橫向成長較緩慢，縱向成長較快速，表示以銀誘發的再結晶不容易側向生長，較不適合做為 TFT-LCD 上的多晶矽。

3. 退火時間不變，增加退火溫度，再結晶的晶粒大小、晶粒數目和晶粒面積佔各個 pattern 的百分比都會有明顯的增加，當溫度到達 550°C 時，再結晶的晶粒大小、晶粒數目和晶粒面積佔各個 pattern 的百分比會有大幅度的提昇。

4. 改變金屬厚度，在此篇論文中發現，當銀膜厚增加一倍時，甜甜圈的平均外徑增加了約 62%，表示銀的厚度增加，所誘發生成的再結晶也會跟著成長。

## 參考文獻

1. C. T. Angelis and C. A. Dimitriadis, M. Miyasaka, J. Stoemenos, F. V. Farmakis, G. Kamarinos, and J. Brini, “Effect of excimer laser annealing on the structural and electrical properties of polycrystalline silicon thin-film transistors”, *J. Appl. Phys.*, volume 86, number 8, 1999.
2. Mitsutoshi Miyasaka, John Stoemenos, “Excimer laser annealing of amorphous and solid-phase-crystallized silicon films”, *J. Appl. Phys.*, volume 86, number 10, 1999.
3. D N Kouvatso, V E Vamvakas and D Davazoglou, “Electrical stressing effects in solid-phase crystallized polysilicon thin film transistors”, *Semicond. Sci. Technol.* 17 (2002) 515–521.
4. Byung-Hyuk Min, Cheol-Min Park, and Min-Koo Han, “Electrical Characteristics of Poly-Si TFT’s with Smooth Surface Roughness at Oxide/Poly-Si Interface”, 
5. R. B. Bergmann, G. Oswald, M. Albrecht, and V. Gross, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 45, pp.147, 1997
6. R. S. Sposili and J. S. Im, *Appl. Phys. Lett.*, 69, pp.2864, 1996
7. A. G. Aberle, P. I. Widenborg, D. Song, A. Straub, M.L. Terry, T. Walsh, A. Sproul, P. Campbell, et al, *Proceedings of the 31<sup>st</sup> IEEE PVSEC-USA*, pp.887, USA, 2004
8. R. Kishore, C. Hotz, H. A. Naseemm, and W. D. Brown, *Electrochem.Solid-State Lett.*, 4, G14 (2001).
9. Y. Ishikawa, A. Nakamura, Y. Uraoka, and T. Fuyuki, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1*, 43, 877 (2004).
10. G. J. Qi, S. Zhang, T. T. Tang, J. F. Li, X. W. Sun, and X. T. Zeng, *Surf. Coat.*

- Technol., 198, 300 (2005).
11. R. Kishore, C. Hotz, H. A. Naseem, and W. D. Brown, Microsc. Microanal., 11, 133 (2005).
  12. S. W. Lee, T. H. Ihn, and S. K. Joo, IEEE Electron Device Lett., 17, 407 (1996).
  13. R. Kishore, C. Hotz, W. D. Brown, and H. A. Naseem, Microsc. Microanal., 6, 452(2000).
  14. S. H. Lim, J. Washburn, Z. Liliental-Weber, and D. Shindo, J. Vac. Sci. Technol. A 19, 2601(2001).
  15. F. A. Quli, J. Singh, Material Science and Engineering, B67, pp.139-144, 1999
  16. Soo Young Yoon, Ki Hyung Kim, and Chae Ok Kim, J. Appl. Phys., 82, pp.5865-5867, 1997
  17. Seok-Woon Lee, Yoo-Chan Jeon, and Seung-Ki Joo, Appl. Phys. Lett., 66, pp.1671-1673, 1995
  18. R. J. Nemanichi, C. C. Tsai, M. J. Thompson, and T. W. Sigmon, J. Vac. Sci. Technol., 19, pp.685, 1981
  19. E. A. Guliants, W. A. Anderson, L. P. Guo, V. V. Guliants, Thin Solid Film, 385, pp.74-80, 2001
  20. O. Nast, S. Brehme S. Pritchard, A. G. Aberle, S. R. Wenham., Solar Energy Materials and Solar Cells, 65, pp.385-392, 2001
  21. J. Klein, J. Schneider, M. Muske, S. Gall, W. Fuhs, Thin solid Films, 481, pp.451-452, 2004
  22. O. Nast, And S. R. Wenham., J. Appl. Phys., 88, pp.124-132, 2000
  23. O. Nast, And A. J. Hartmann, J. Appl. Phys., 88, pp.716-724, 2000
  24. R. Brendel, and R. Hezel, J. Appl. Phys., 71, pp5383, 1992
  25. A.A. Baski, K.M. Jones, K.M Saoud,"STM studies of 1-D noble metal growth on silicon", Ultramicroscopy 86 (2001) 23-30

26. L. Hultman, A. Robertsson, H. T. G. Hentzell, I. Engstrom, and P. A. Psaras, *J. Appl. Phys.*, 62, pp.3647, 1987
27. Bo Bian, Jian Yie, Boquan Li and Ziqin Wu, "Fractal formation in a-si:H/Ag/a-si:H films after annealing", *J. Appl. Phys.* 73 (11), 1 June 1993

