

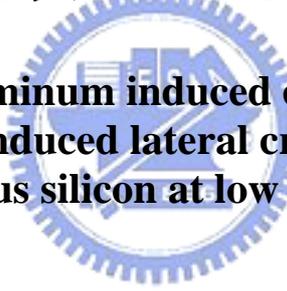
# 國立交通大學

材料科學與工程學研究所

## 碩士論文

以鋁誘導非晶矽低溫結晶及側向結晶之研究

**A study on aluminum induced crystallization and  
aluminum induced lateral crystallization of  
amorphous silicon at low temperature**



研究生：蔡雨霖

指導教授：劉增豐 教授

朝春光 教授

中華民國九十六年七月

以鋁誘導非晶矽低溫結晶及側向結晶之研究

**A study on aluminum induced crystallization and  
aluminum induced lateral crystallization of  
amorphous silicon at low temperature**

研究生：蔡雨霖

Student : Y.L. Tsai

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

# 以鋁誘導非晶矽低溫結晶及側向結晶之研究

學生:蔡雨霖

指導教授:劉增豐教授

朝春光教授

國立交通大學材料與工程學系碩士班

## 摘要



本論文的目的是研究鋁誘導非晶矽低溫結晶以及側向結晶的現象。使用試片是已經鍍覆一層非晶矽薄膜的玻璃基板。為了作鋁誘發側向結晶的觀察，試片先經過微影製程的處理後，再分別以 15V、3.5A 及 25V、5.6A 兩種電流條件蒸鍍上鋁，使試片的部份區域不與鋁接觸。

經過 450°C、475°C、550°C 的熱處理後，利用 X-ray 繞射發現皆有鋁誘發結晶的現象，而 25V、5.6A 電流條件的試片由電子顯微鏡的影像可以觀察到側向結晶的晶粒。比較不同的蒸鍍條件及熱處理條件所得結果得知，鋁的表面形貌會決定有否產生側向結晶，而溫度是影響側向結晶速度的主要因素。

A study on aluminum induced crystallization and aluminum induced lateral crystallization of amorphous silicon at low temperature

Student: Yu Lin, Tsai

Advisors: Dr. T. F. Liu

Dr. C. G. Chao

Department of Material Science and Engineering  
National Chiao Tung University

Abstract



To study the phenomenon of aluminum induced crystallization and aluminum induced lateral crystallization is the purpose of this thesis. The samples were glass substrates which had been coated a thin film of amorphous silicon on. In order to study the phenomenon of aluminum induced lateral crystallization, the samples were treated with lithography process before aluminum was coated on them at current conditions of 15V, 3.5A and 25V, 5.6A. This treatment made that some areas of the samples did not contact with aluminum.

After heat treatments at 450°C, 475°C and 550°C, we found that the phenomenon of aluminum induced crystallization occurred by analyzing the X-ray diffraction patterns. The lateral crystallization were also observed in the SEM images of the samples which was coated aluminum at 25V, 5.6A. By comparing the results which obtained from experiments

in different coating conditions and different heat treatment conditions, the surface morphology of aluminum layer determines whether lateral crystallization occurs or not. Temperature is the main fact which influences the velocity of lateral crystallization.



## 誌謝

由衷感謝指導教授 **劉增豐** 博士與 **朝春光** 博士在學生求學期間的悉心指導與諄諄教誨，尤其在論文上的指導使得學生能順利完成本篇論文的製作。在此，對吾師 **劉增豐** 教授與 **朝春光** 教授獻上最高的敬意。

研究期間，首先要感謝 **黃世陽** 學長的提攜，讓我在實驗上能獲得傾力的協助與論文撰寫之指導。另外，感謝 **蘇俊瑋** 與 **林志龍** 學長在電子顯微鏡的操作與數據分析上的教導；以及感激 **王承舜**、**楊勝裕**、**段逸軒**、**陳信良**、**郭柏村** 等諸位學長在當我遇到問題時幫忙解惑與生活的協助。同時，感謝 **陳柏至**、**劉哲郎**、**王浩仰**、**黃敬恆**、**林欣龍** 等實驗室同學們與學弟，陪伴我一起同歡樂共甘苦。此外，要感謝實驗室助理 **萬雅臻** 小姐從旁協助處理生活與實驗上的問題。

最後，將這篇論文謹獻給最敬愛的父母、妹妹 **幸容** 與女友 **惠瑜**，以及諸位好友們，感謝他們這些日子以來的支持與包容，讓我能在安定舒適的環境中順利完成學業。

# 目錄

中文摘要	I
英文摘要	II
誌謝	IV
目錄	V
表目錄	VII
圖目錄	VIII
一. 前言	1
二. 文獻回顧	2
2.1 液晶顯示器原理	2
2.2 多晶矽在薄膜電晶體的應用	7
2.3 低溫多晶矽	9
2.3.1 固相結晶	9
2.3.2 準分子雷射退火結晶	10
2.3.3 金屬誘發再結晶	11
2.4 鋁誘發再結晶	12
三. 實驗方法	15
3.1 實驗步驟	15
3.2 試片製備	16
3.3 非晶矽膜厚度	17

3.4	蒸鍍鋁與熱處理條件	17
3.5	試片分析	18
四.	結果與討論	21
4.1	實驗初期的面臨的問題	21
4.2	蒸鍍鋁條件對再結晶的影響	23
4.3	非晶矽膜厚差異的影響	29
4.4	X-ray 繞射結果	32
4.5	溫度對側向成長的效應	38
4.6	EDS 分析結果	47
五.	結論	51
六.	參考文獻	53



## 表目錄

表 4.5-1 475°C 側向再結晶面積比例·····	46
表 4.5-2 550°C 側向再結晶面積比例·····	46
表 4.6-1(a) A 處淺色區元素分析·····	49
表 4.6-1(b) B 處深色區成分分析·····	49
表 4.6-1(c) C 處非晶區的成分分析·····	49
表 4.6-2(a) A 處淺色區成分分析·····	50
表 4.6-2(b) B 處深色區成分分析·····	50



## 圖目錄

圖 2.1-1 液晶基本原理示意圖.....	3
圖 2.1-2 電晶體排列示意圖.....	5
圖 2.1-3 電晶體結構示意圖.....	6
圖 2.2. 開口率計算方式示意圖.....	8
圖 2.4 多晶矽結晶示意圖.....	14
圖 3.1 實驗流程圖.....	15
圖 3.2 試片製備流程圖.....	17
圖 4.1 實驗失敗的試片 SEM	
(a)10000X.....	22
(b)30000X.....	22
圖 4.2-1 兩個蒸鍍條件試片 450°C 熱處理後的 OM	
(a)15V、3.5A、5 小時.....	26
(b)25V、5.6A、5 小時.....	26
圖 4.2-2 兩個蒸鍍條件試片 450°C 熱處理後的 SEM	
(a)15V、3.5A、5 小時.....	27
(b)25V、5.6A、5 小時.....	27
圖. 4.2-3 兩種蒸鍍條件所鍍鋁的表面形貌 SEM 圖	
(a)15V、3.5A.....	28

(b)25V、5.6A.....28

圖 4.3 兩種多晶矽膜厚不同的試片熱處理後的 SEM

(a)非晶矽膜厚 20nm、450°C 5 小時熱處理.....31

(b)非晶矽膜厚 100nm、475°C 30 分鐘熱處理.....31

圖 4.4-1 尚未進行熱處理的試片的繞射圖..... 32

圖 4.4-2 475°C 經過各個熱處理時間後的 X-ray 繞射圖

(a)5 分鐘.....35

(b)1 小時.....35

(c)5 小時.....36

圖 4.4-3 550°C 經過各個熱處理時間後的 X-ray 繞射圖

(a)5 分鐘.....37

(b)2 小時.....37

圖 4.5-1 475°C 經過各個熱處理時間後的 SEM

(a)30 分鐘..... 40

(b)1 小時.....40

(c)3 小時.....41

(d)5 小時.....41

(e)9 小時.....42

圖 4.5-2 550°C 經過各個熱處理時間後的 SEM

(a)5 分鐘.....	43
(b)15 分鐘.....	43
(c)30 分鐘.....	44
(d)1 小時.....	44
(e)2 小時.....	45
圖 4.5-3 側向再結晶面積比例的折線圖.....	46
圖 4.6-1 475°C、30 分鐘熱處理的 SEM.....	49
圖 4.6-2 550°C、30 分鐘熱處理的 SEM.....	50



## 第一章 前言

鋁誘導非晶矽在低溫狀態下結晶已廣泛地被研究，一般認為是以層交換的機制成長。以鋁誘發的優點是可以在較低的溫度使矽再結晶，相對於以其他金屬誘發的再結晶溫度，如Ni，必須在 500°C 以上的溫度才有明顯的再結晶現象，鋁只要再 400°C 以下就可以有很明顯的再結晶現象產生，甚至在 150°C 下就可以觀察到再結晶的晶粒<sup>[1]</sup>。另外，少量的鋁殘留在結晶的矽中，可以當作p-type的參雜物，對電性不會有太大的影響，而其他的金屬若殘留在結晶的矽中，會成為不純物，影響到多晶矽在電性上的表現<sup>[2][3]</sup>。從這些觀點來看，鋁作為誘導結晶的金屬是一個很優越的選擇。

然而過去的研究鮮少提及以鋁誘導的多晶矽側向結晶( Lateral crystallization )。側向結晶就是多晶矽核的橫向成長，這樣的成長方式可以使晶粒變大、晶界變少，進而提高多晶矽的電子遷移率。

本實驗藉由微影製程的方式使多晶矽薄膜上部份區域蒸鍍上鋁，其他區域不跟鋁接觸，而後進行熱處理，藉此觀察多晶矽是否有側向成長的現象產生。

## 第二章 文獻回顧

隨著資訊科技的蓬勃發展，人類對生活的便利性要求日漸增高，對日常生活中最常接觸到的科技產品—顯示器而言，人們希望朝向達到薄型化、輕量化、低耗電量、無輻射污染、攜帶性甚至是可撓性的方向前進。液晶顯示器（Liquid Crystal Display）的發明符合人類對於上述各項生活便利性的要求，逐漸地取代傳統的CRT（Cathode Ray Tubes），成為目前主流的視訊產品。另外，由於液晶顯示器具有薄型及輕量的優點，大量地被運用在許多的高科技產品上，如行動電話、數位相機、個人數位助理、及筆記型電腦等。液晶顯示技術的快速發展與成長也帶動了這些產品的演進，在短短數年間生產技術突飛猛進，產品推陳出新，創造了龐大的商機。

### 2.1 液晶顯示器原理

液晶顯示器的基本成像原理是將液晶材料置於兩片附有配向膜及偏光板的透明導電玻璃間，利用導電玻璃通電之後，兩片玻璃間產生的電場，影響其間液晶材料的排列方式，進而控制光線前進方式，如圖 2.1-1 所示。當未給予外加電場時，由於上下兩片配向膜的溝槽方向互相垂直，而液晶材料會依照配向膜溝槽的方向排列，所以液晶材

料會以旋轉的方式排列，當光線通過偏光板及配向膜進入液晶層，會受液晶材料的影響而旋轉 90 度，通過下方的偏光板射出發光。當對導電玻璃施加外加電場時，液晶材料會依照電場的方向排列而垂直於配向膜，光線進入液晶層後，變保持原本行進的方向通過液晶材料的間隙，由於光前進的方向與下方偏光的方向互相垂直，所以光線會被偏光板阻擋而顯現出黑色。這樣所得到光暗對比的現象，叫做扭轉式向列場效應，簡稱 TNFE (twisted nematic field effect)，這也是扭轉式向列型 (Twisted Nematic; TN) 顯示器的顯示原理。

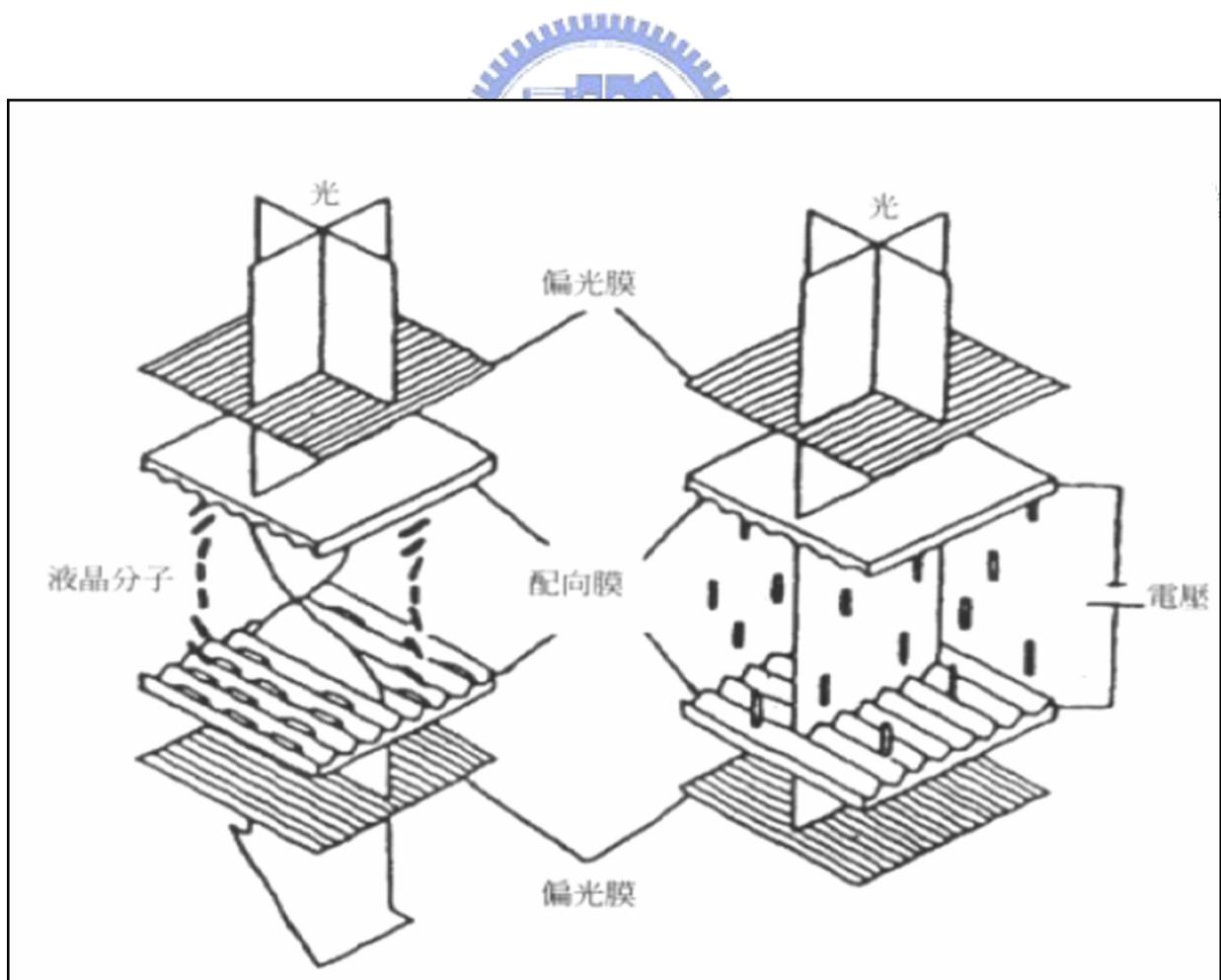


圖 2.1-1 液晶基本原理示意圖

依驅動液晶旋轉方式來分類可分為被動矩陣驅動 (Passive Matrix) 以及主動矩陣驅動 (Active Matrix) 兩種。其中，被動矩陣驅動又可分為扭轉式向列型 (Twisted Nematic; TN) 以及超扭轉式向列型 (Super Twisted Nematic; STN)；而主動矩陣型主要以薄膜式電晶體型 (Thin Film Transistor; TFT) 為主。

STN 型的顯示原理與 TN 型類似，不同的是 STN 超扭轉式向列場效應是將入射光旋轉 180 至 270 度之間，而 TN 扭轉式向列場效應的液晶分子只是將入射光旋轉 90 度或者不旋轉，所以 TN 型液晶顯示器只能表現出黑白兩種情形，並沒有辦法做到色彩的變化。而 STN 液晶顯示器由於液晶材料本身以及光的干涉現象的關係，能顯示出異於黑白的其他色調，但仍然是單一色調。如果在單色 STN 液晶顯示器加上一彩色濾光片 (color filter)，並將單色顯示矩陣的每一個像素 (pixel) 分成紅、綠、藍三個子像素 (sub-pixel)，再經由三原色比例調和，也可以顯示出全彩模式的色彩。由於液晶螢幕的像素是以行列式的方式排列，畫面是以由上而下的縱向掃描方式呈現，對於 STN 型的液晶顯示器而言，同一行的像素同時接收到訊號並顯示出顏色，當進行下一行的像素掃描時，上一行的像素便還原至皆未接受外加電壓時的狀態，如此一來當畫面密度愈高時，掃描線數就愈多，為了達到使人眼產生視覺暫留的效果，掃描的速度勢必加快，每一像素

所分配到的驅動時間將被縮短，造成顯示對比的降低甚至造成殘影的現象。

為改善此一問題，可利用主動矩陣的驅動方式。主動矩陣驅動是運用薄膜電晶體( TFT , Thin film transistor )來控制每個像素的開關動作，且可將外加的電壓儲存直到下一個訊號輸入。在主動矩陣驅動的液晶顯示器中，每一個 X 軸掃描線跟 Y 軸資料線的交點上都設有一個薄膜電晶體，如圖 2.1-2 所示，當掃描線與資料線傳輸電流至某一行像素時，每一個電晶體都將此次的電流訊號儲存於自身的電容中，如此在下一次訊號輸入前，每一個像素都能維持各自液晶材料的排列方式，便能得到更良好的對比及畫質。因此現在市面上銷售的大型液晶顯示面板，皆以主動矩陣驅動的 TFT-LCD 為主流，而 STN 型的液晶顯示器則是應用在動態畫面要求較少的文書處理器或小型面板上。

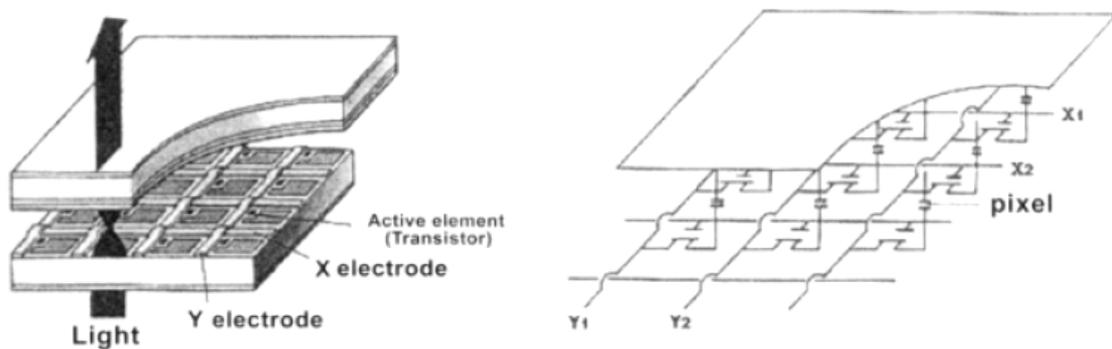


圖 2.1-2 電晶體排列示意圖

薄膜電晶體基本的結構是由一個源極 ( Source )、汲極 ( Drain ) 以及閘極所構成的三接點電子元件，如圖 2.1-3 左下角。傳統的薄膜電晶體已非晶態的矽作為連接源極和汲極的通道，當閘極未施加外加電壓時，沒有電流可以通過通道到達汲極，而汲極後方所連接的像素電極就無法產生電場來改變液晶材料的排列，我們可將這種現象視為一個關閉的狀態；當閘極給予一個適當的外加電壓時，通道的非晶矽會感應出一些電子來，如果此時在汲極也施加一個電壓，便能使大量的電子由源極經過通道而流到汲極及後方的像素電極，像素電極產生電場

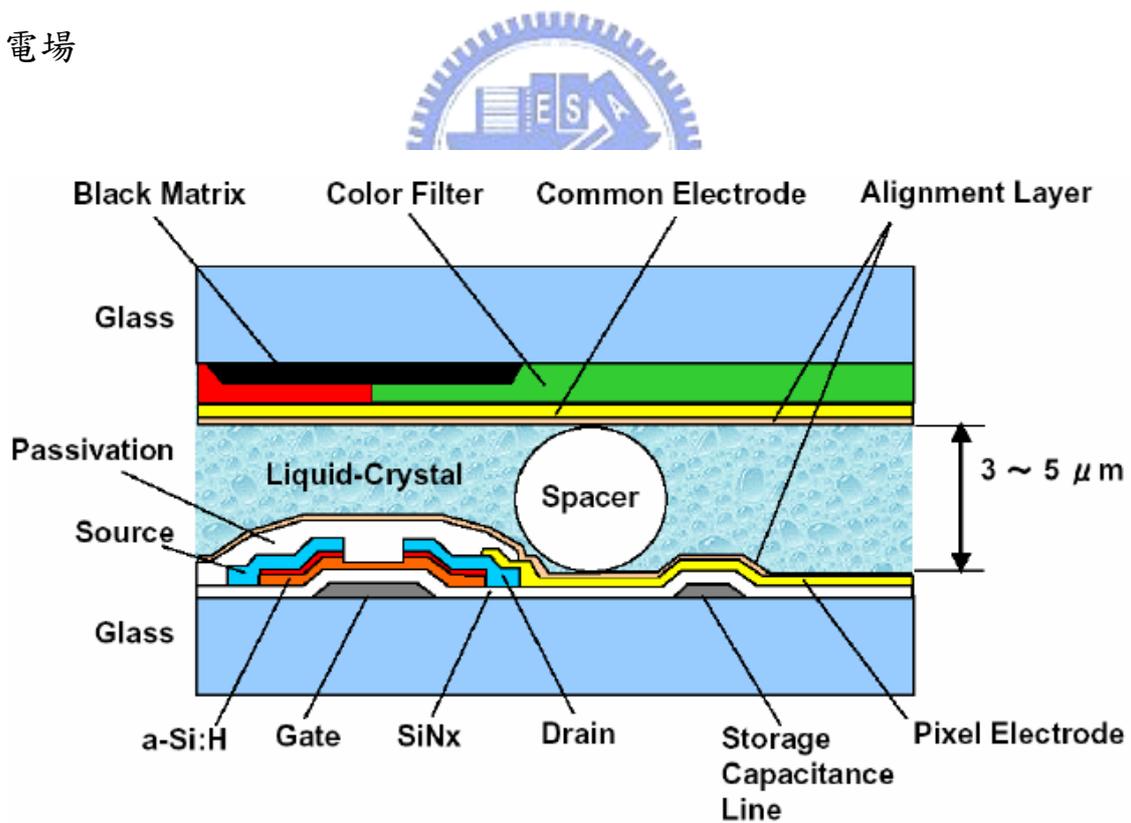


圖 2.1-3 電晶體結構示意圖

驅使液晶旋轉，如此可以視為一開啟的狀態。這樣我們就可以藉由控制閘極的電壓來支配液晶材料的排列分式，把薄膜電晶體當作一個驅動液晶材料旋轉的開關。

## 2.2 多晶矽在薄膜電晶體的應用

以非晶態的矽( amorphous silicon, a-Si )作為電晶體的通道、源集以及汲極，我們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對於液晶螢幕的畫數、畫質及反應速率的要求，此時，多晶矽的薄膜電晶體便被提出，試圖突破製程上的瓶頸。以多晶矽( poly-silicon )作為電晶體的通道、源集以及汲極，我們稱之為多晶型薄膜電晶體，而使用多晶矽優點及對於製程上帶來的幫助如下：

- (1) 電子遷移率高：非晶矽的電子遷移率僅為  $0.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，而多晶矽的電子遷移率約是  $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ，是非晶矽的數百倍<sup>[4]</sup>。
- (2) 解析度高：由於多晶矽單位面積的電場強度較大，因此可以縮小電晶體本身的尺寸，且達到甚至超越非晶矽電晶體的效能，在相

同尺寸的面板上使用多晶矽電晶體，可以擁有更多的像數，讓解析度更高。

(3) 反應速度快：電子遷移率的增加，使得電晶體每次開、關的速度變快，這將使畫質更好，畫面對比提高。

(4) 開口率提高、省電：所謂開口率就是指一個像素可以透光的有效區域除以一个像素的總面積，如圖 2.2。電晶體尺寸變小，使得一個像素可透光的區域增加，如此背光源只要提供較小的亮度，顯示出的畫面亮度就能達到人眼的需求。另外，電晶體本身也只需較小的電力便能驅動液晶旋轉。

(5) 降低製程成本：由於多晶矽電子遷移率高，所以電晶體的驅動電路可以整合在玻璃基板上，減少 IC 的成本及 IC 後段製程帶來的不良率。

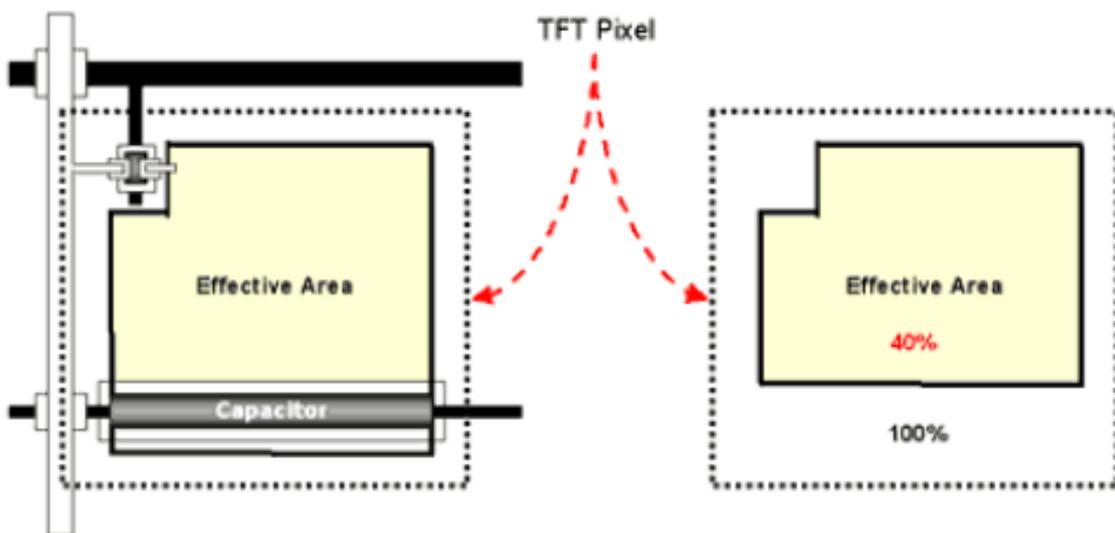


圖 2.2. 開口率計算方式示意圖

## 2.3 低溫多晶矽

電晶體的製程中要考慮到玻璃熔點的問題，必須尋求一個低溫的方法來沈積非晶矽薄膜，如化學氣相沈積法(CVD)、低壓化學氣相沈積(LPCVD)、電漿輔助化學氣相沈積法(PECVD)以及濺鍍法(sputtering)等，無法使用高溫的製程來成長多晶矽。因此若要得到多晶矽，必須以事先沈積好的非晶矽薄膜來進行熱處理，使非晶矽薄膜再結晶。然而多晶矽的再結晶溫度高於攝氏一千度，這樣的熱處理溫度不適用於玻璃基板上，所以許多學者開始研究低溫成長多晶矽的方法。以下將介紹幾種較常用的方法。

### 2.3.1 固相結晶( SPC , Solid Phase Crystallization )<sup>[5][6]</sup>

所謂固相結晶是指利用高溫熱處理的方式使矽原子得到能量而重新排列<sup>[7]</sup>，經過成核成長的機制形成再結晶晶粒，一般使用石英爐管進行熱處理。將已沈積非晶矽薄膜的試片放進石英爐管中進行退火處理使其再結晶成多晶矽。但由於玻璃基板的熔點約在600°C左右，製程溫度必須低於這個溫度，在這個溫度下矽的成核數量多，但成長的速度非常的慢，最後得到的多晶矽薄膜晶粒小，晶界多，對於薄膜的電性並沒有太大的改善。而且長時間高溫熱處理，不但會使玻璃基板軟化變形而且製程成本高，不符合經濟效應。

### 2.3.2 準分子雷射退火結晶( ELAC, Excimer Laser Annealing Crystallization )<sup>[8]</sup>

準分子雷射退火是目前業界製作多晶矽薄膜使用的方法，一般是利用 10~30ns 的脈衝週期下放射出 308nm 波長的準分子雷射，使非晶矽薄膜融化，冷卻後固化再結晶<sup>[9]</sup>。其原理是利用矽對於紫外光波段(200~400nm)的光源有很強的吸收力<sup>[10]</sup>，遠大於玻璃基板對這種光源的吸收力，造成局部加熱的效果，使非晶矽薄膜融化而玻璃基板不會遭受破壞。以準分子雷射退火的方式可以成長出結晶性佳且晶粒大的多晶矽薄膜，晶粒變大則晶界自然就會減少，而晶界減少就能增加電子的遷移率，使得薄膜在電性上也有很大改善。但由於設備成本高，使得產品價格無法降低，在市場上缺乏競爭力，另外，這種製程還有均勻性及表面粗糙度的問題，面板尺寸愈大這些缺點會更明顯地表現出來，這些都是準分子雷射退火法所面臨到的比較大的問題。

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

金屬誘發再結晶的原理是利用濺鍍在非晶矽薄膜上的金屬與非晶矽發生交互作用，使非晶矽能以一個低溫的機制再結晶成多晶矽。主要可以分為兩種機制：一種是利用金屬與矽產生介金屬化合物，如 Ni<sup>[11][12]</sup>、Pd<sup>[13][14]</sup>、Sb<sup>[15]</sup>等金屬，由於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中的界面的自由能高<sup>[16]</sup>，所以矽原子傾向往多晶矽核方向擴散，使多晶矽核依照此機制成長；另一種機制是利用非晶矽與金屬產生共晶反應，如Ag<sup>[17]</sup>、Al<sup>[18][19]</sup>、Au<sup>[20][21]</sup>等金屬，一般而言，共晶點的溫度較單相的熔點低，所以可以使矽在一個比較低的溫度結晶。以鋁矽共晶反應而言，共晶點溫度為 577°C，然而學者研究指出在 150°C 非晶矽就會因為鋁的誘導而產生再結晶。以金屬誘發的方式再結晶，製程簡單且成本低，所以這種方法被視為最有潛力取代準分子雷射退火的方法，也是目前被研究最多的低溫多晶矽製程。但某些金屬，如Ni，必須在 500°C 以上的溫度才有明顯的再結晶現象，除了熱處理溫度高耗電外，大尺寸的玻璃面板在這個溫度下加熱也會產生變形。另外，在誘發結晶後，多晶矽晶粒容易有金屬殘留的問題，有待業界及學者們研究改善。

## 2.4 鋁誘發再結晶

近年來對於鋁誘發非晶矽結晶( Aluminum induced crystallization, AIC ) 的研究，許多學者認為是以層交換 ( Layer exchange ) 的機制誘發矽結晶<sup>[22]</sup>。其原理是因為鋁層和非晶矽層之間的界面並非為熱平衡狀態，而且金屬的自由電子會產生屏蔽效應使矽的共價鍵減弱<sup>[23]</sup>，共價漸減弱使得矽原子容易溶進金屬中，因為以上兩種原因，所以矽原子會通過鋁矽界面擴散且溶進鋁層中，但由於鋁對矽原子的溶解度很低，所以很快地因為達到過飽合狀態而析出形成多晶矽核，接著更多的溶解在鋁中的矽原子，經由鋁的晶粒或晶界擴散到多晶矽核中，降低矽原子本身的自由能，多晶矽核也因此成長，如圖 2.4。另外，因為矽原子在鋁中的擴散速率非常的快<sup>[24]</sup>，且矽原子可以溶在鋁中，鋁層成為一個良好的媒介讓矽再結晶，所以矽原子在鋁層中再結晶的速度比在非晶矽層中的速度快，這也是選擇鋁作為誘發再結晶的重要因素。

有研究指出鋁層和矽層的鍍膜順序，會影響到誘導再結晶發生的速度<sup>[25]</sup>。若先蒸鍍鋁後，在鋁膜再鍍上非晶矽，由於鋁層在接觸空氣後會迅速產生一層自然氧化鋁，而氧化鋁層在之後的熱處理時，會減緩鋁矽之間的擴散行為，使得誘發再結晶的速度變慢<sup>[26]</sup>。反之，先在

玻璃基板上沈積上非晶矽膜後再鍍上鋁膜，非晶矽膜同樣也會產生自然氧化矽，但這層氧化矽是有助於鋁矽之間的擴散進行。因為鋁對氧的活性比矽對氧的活性高，所以上層的鋁會先跟氧化矽起化學反應形成氧化鋁而釋放出矽原子<sup>[27]</sup>，藉由這個反應能夠快速的產生多晶矽核，使誘導再結晶的現象較快發生。

1990 年來，鋁誘導矽在結晶的研究都是以先在基板上鍍鋁，再在鋁層上鍍非晶矽為主流。但近年來研究太陽能電池的學者也開始研究非晶矽在下層而鋁鍍在非晶矽上的狀況，由於這樣的排列方式產生層交換的速度較快，所以可以產生較大的晶粒，晶粒的尺寸可以達到數十微米<sup>[28][29]</sup>。層交換而置換到底層的鋁加上少量的矽形成的混合層，也有機會成為製造太陽能電池所需的導電介質<sup>[25][30]</sup>，所以矽層在下鋁層在上的排列方式也漸漸受到矚目。

另外，熱處理的溫度<sup>[22]</sup>、鋁膜與矽膜的比例<sup>[22]</sup>、蒸鍍鋁的晶粒大小<sup>[25]</sup>等等參數改變，也都有研究指出會影響到誘發再結晶的產生，這些研究也有助於我們對這個現象的了解與分析。

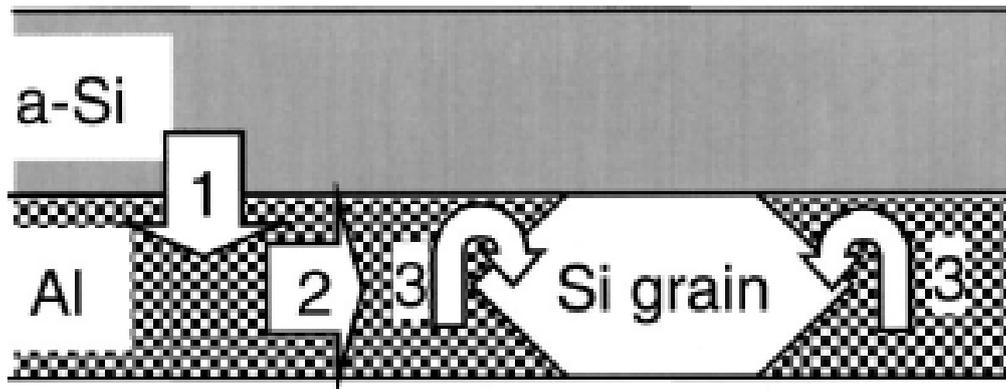


圖 2.4 多晶矽結晶示意圖

### 第三章 實驗方法

#### 3.1 實驗步驟

如圖 3.1 所示，本實驗主要分為試片製備、熱處理以及儀器分析，以下將再作細部的流程敘述以及儀器分析目的說明。

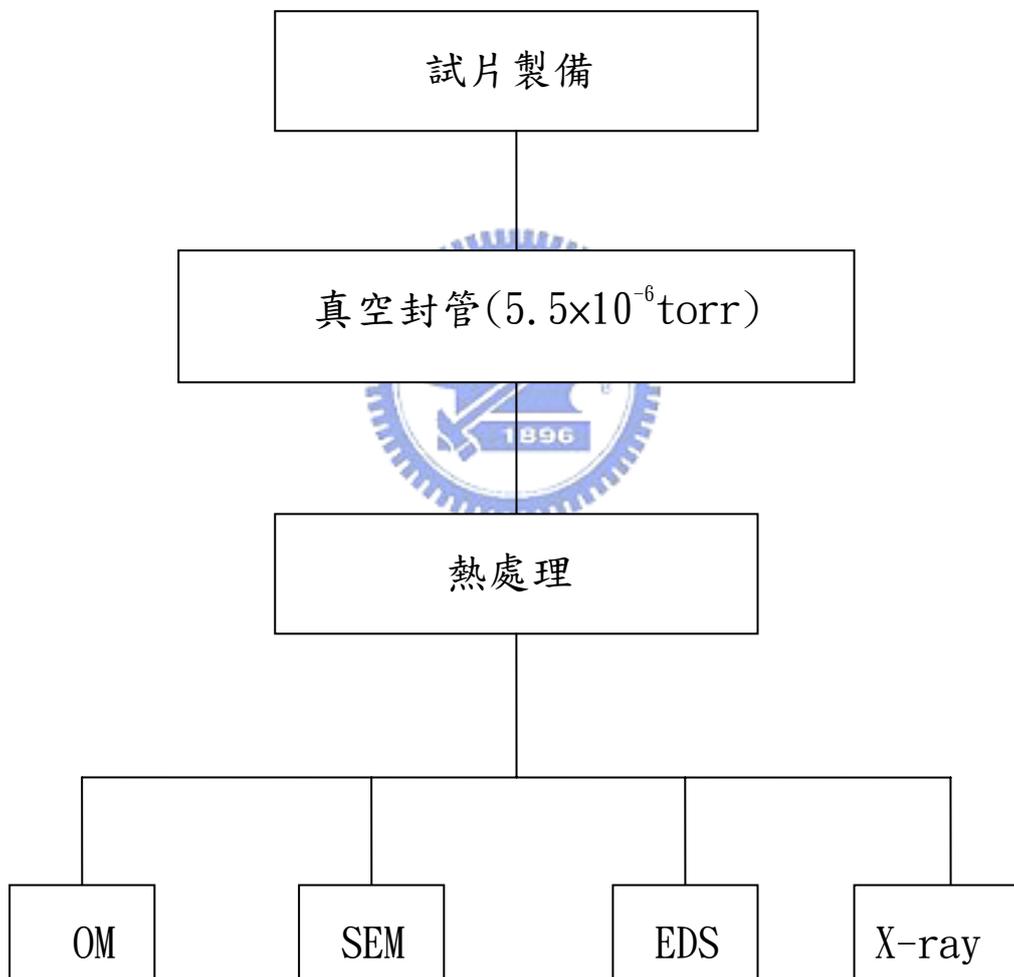
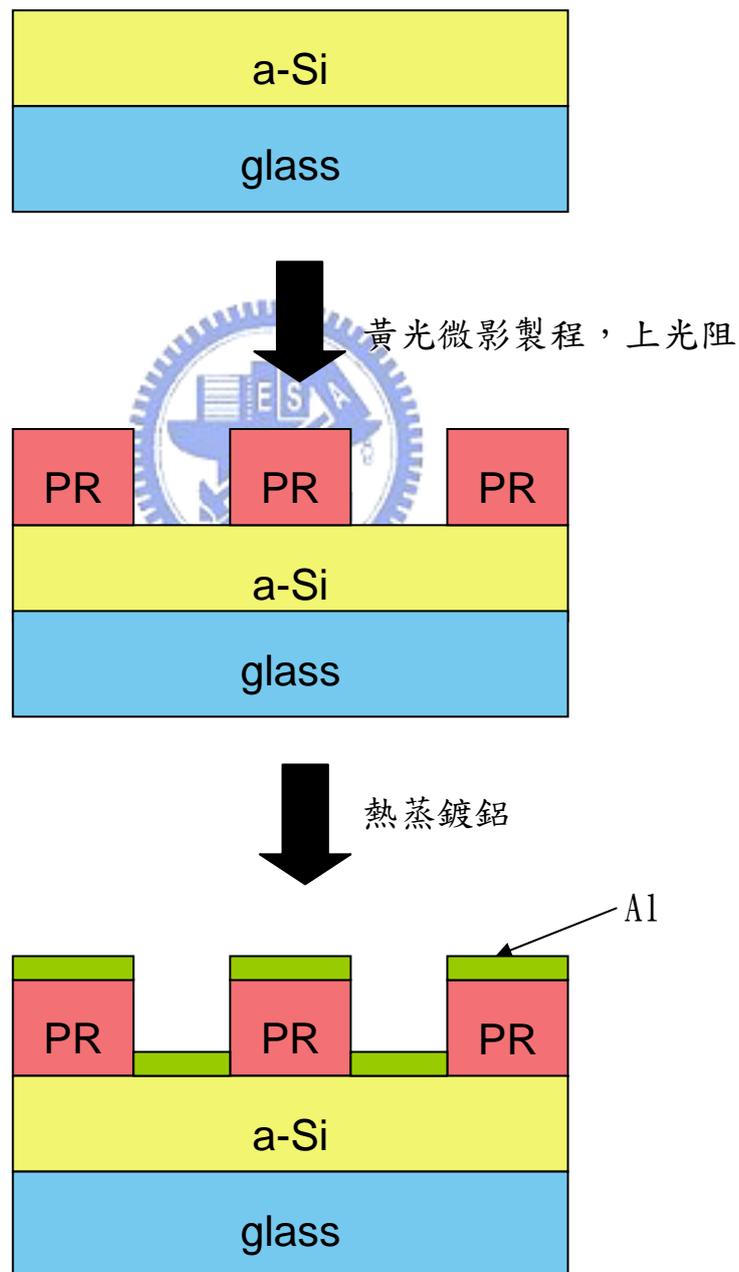


圖 3.1 實驗流程圖

### 3.2 試片製備

本實驗的試片是由產學計畫合作的公司所提供，已使用電漿輔助化學氣相沈積法鍍覆非晶矽薄膜的玻璃基板，經過 RCA clean 之後，進行微影製程以及熱蒸鍍，流程圖如下：



↓ 浸泡丙酮，去光阻

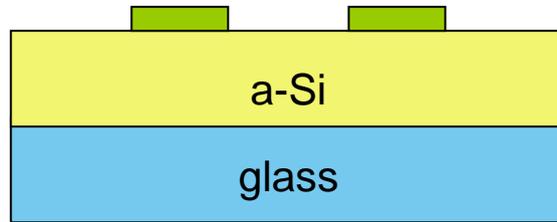
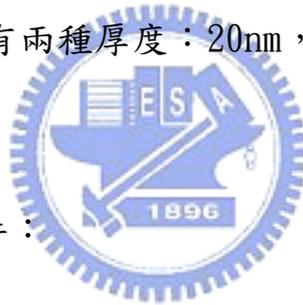


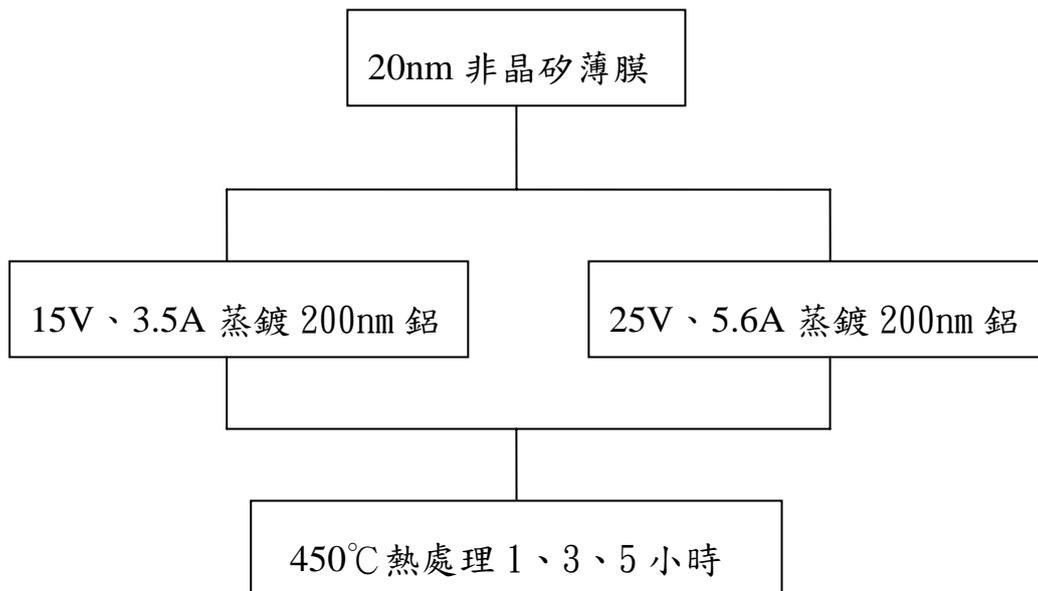
圖 3.2 試片製備流程圖

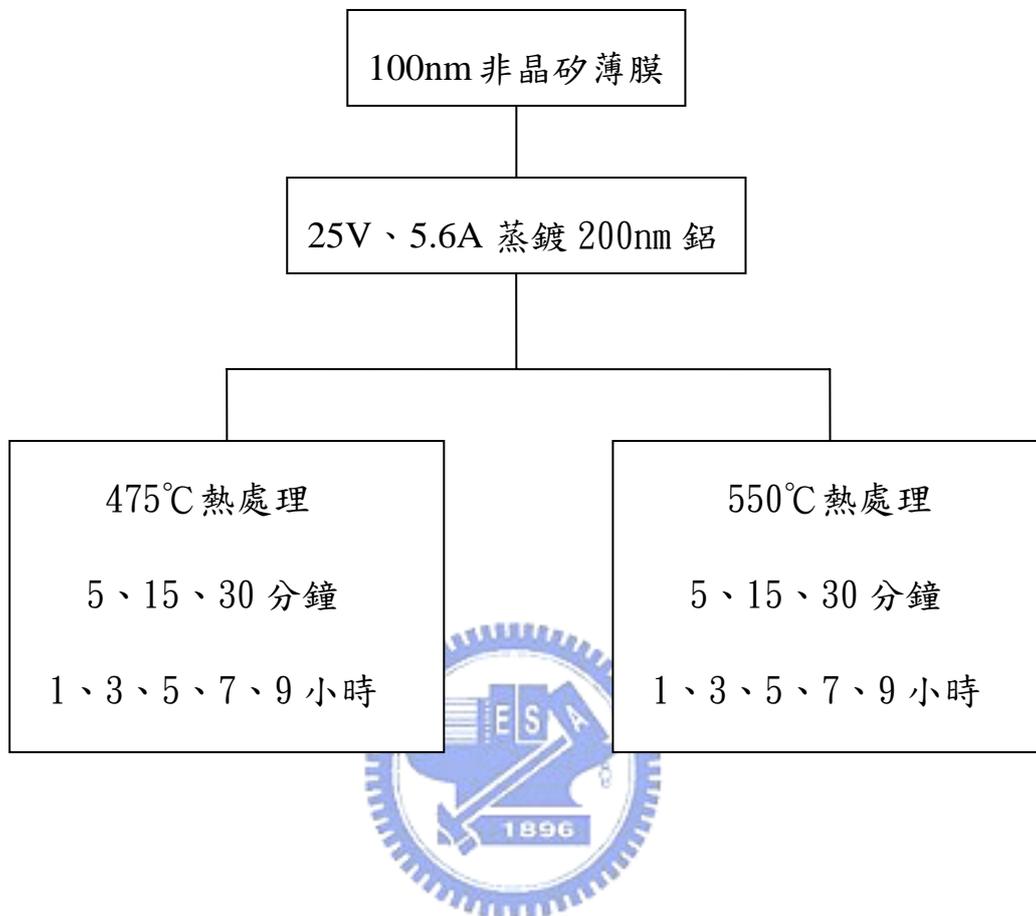
### 3.3 非晶矽膜厚度：

由廠商提供的試片有兩種厚度：20nm，100nm



### 3.4 蒸鍍鋁與熱處理條件：





### 3.5 試片分析：

#### (1) 光學顯微鏡分析：

利用光學顯微鏡觀察蒸鍍鋁的結果，觀察鋁的 pattern 是否完整，來分辨試片是否製備成功。熱處理過後的試片也是先使用光學顯微鏡來觀察初步的結果，可以經由顏色的差異來初步區分出不一樣的物質。

(2) 電子顯微鏡分析：

以 JSM-6500 熱場發射電子顯微鏡及 JSM-6700 冷場發射電子顯微鏡作試片表面分析，利用其高解析度觀察試片表面的多晶矽結晶狀況及分布。

由於矽的導電度不佳，為了讓試片有更明顯的對比，SEM 試片必須經過下列前處理：

- i. 將退火完畢的試片以鑽石筆切割成適當大小，用 D. I. water 沖洗表面，作為初步的清潔工作。
- ii. 將試片放入鋁蝕刻液( $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} = 16 : 1 : 1$ )中，在常溫下浸泡 30 分鐘，完畢後再用 D. I. water 沖洗試片，接著使用 OM 觀察是否尚有殘留的鋁。
- iii. 將試片浸泡於 secco etching 蝕刻液中，由於 secco etching 對非晶矽的蝕刻速率較對多晶矽的蝕刻速率快，所以能將非晶矽去除，使多晶矽的對比更為明顯。在常溫下浸泡 30 秒，之後再用 D. I. water 將試片徹底清潔乾淨。
- iiii. 在做 SEM 觀察之前，利用鍍金機，以  $10 \mu\text{A}$  的電流條件濺鍍 90 秒，鍍上一層 Pt，增加試片表面的導電性，以利觀察。

### (3)EDS 元素成分分析：

EDS 為電子顯微鏡的附屬分析儀器，能夠作微米級的局部區域元素分析，也可做大範圍的元素分布分析。本實驗使用 EDXs 分析多晶矽中元素的比例。

### (4)X-ray 繞射圖：

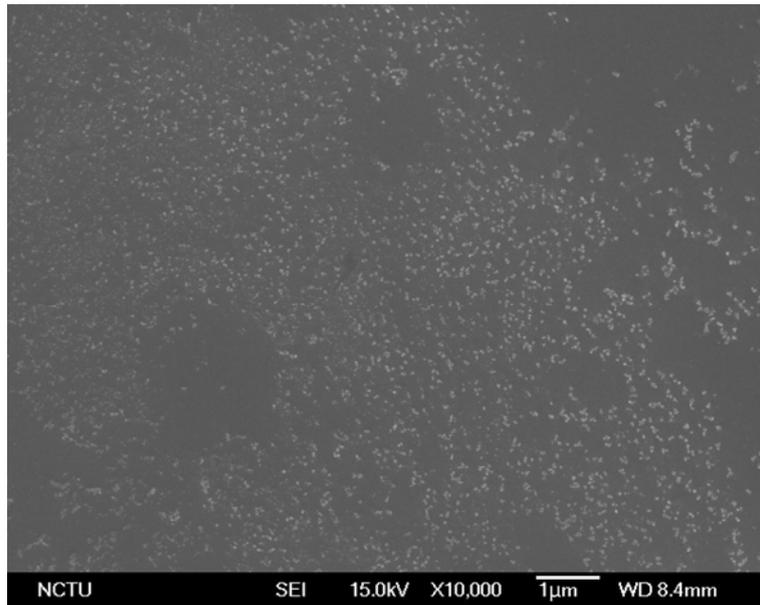
熱處理完畢的試片利用鋁蝕刻液去除殘留的鋁後，利用 X-ray 繞射儀 thin-film 的訊號偵測器，以 2 度的低掠角偵測器掃描模式，對試片作  $2\theta = 27\sim 75$  度之間的繞射分析。 $2\theta$  取  $27\sim 75$  度的原因是因為結晶矽的繞射峰主要分布在  $28.65^\circ(111)$ 、 $47.66^\circ(220)$ 、 $56.56^\circ(311)$  這三個角度，而且由於 X-ray 繞射儀機台較為老舊，無法使用小於 1 度的低掠角繞射，導致基板玻璃的非晶質繞射峰過於明顯，所以要避開  $22\sim 27$  度這個區間。我們可以經由 X-ray 繞射圖來分析熱處理過後非晶矽是否因為鋁的誘導而再結晶成為多晶矽。

## 第四章 結果與討論

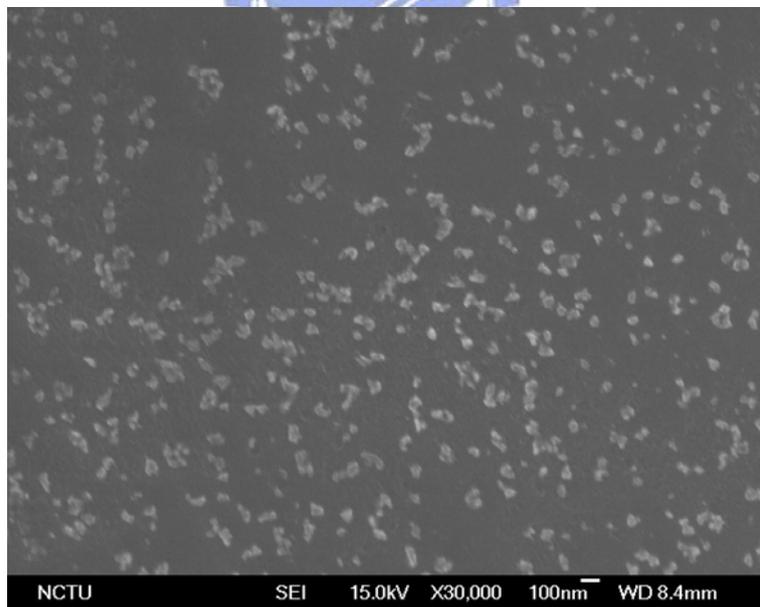
### 4.1 實驗初期的面臨的問題

實驗初期廠商所提供的玻璃基板試片，在非晶矽薄膜上有上一層條紋狀的光阻，經使用實驗室的熱蒸鍍機在這試片上鍍上一層鋁，然而蒸鍍完畢去掉光阻後，發現剛蒸鍍上的鋁膜會整層脫落，並沒有達到預期的結果。經過多次調整鍍鋁的參數條件後，情況還是沒有改善，因此認為是光阻過薄或是因為潮濕造成光阻軟化變形的問題。之後改變實驗的方式，先用丙酮將試片上的光阻移除再進行鋁的蒸鍍，使試片形成非晶矽上有一整層鋁膜的形式，將製備好的試片放進石英爐管以 450°C 進行熱處理。使用電子顯微鏡觀察實驗後的試片，沒有發現任何的晶粒產生。經過多次改進實驗前的試片清潔工作，依然沒有辦法觀察到任何再結晶的現象，在電子顯微鏡下都得到類似的結果，如圖 4.1(a)(b)。這樣的方式既無法產生再結晶，也無法觀察側向成長的結果，所以勢必要尋求其他實驗方法改進。

其後進行黃光微影製程上光阻的步驟，順利地在非晶矽膜上塗上適當厚度的光阻，使蒸鍍上的鋁能依照我們的想法部分脫落，而使實驗的結果有所改善。



(a)



(b)

圖 4.1 實驗失敗的試片 SEM(a)10000X(b)30000X

#### 4.2 蒸鍍鋁條件對再結晶的影響：

在鍍覆 10nm 非晶矽薄膜的試片上，以 15V、3.5A 以及 25V、5.6A 兩種蒸鍍條件分別鍍上 200nm 的鋁，經過熱處理後觀察兩者間的差異。由圖 4.2-1(a)，15V、3.5A 蒸鍍條件的試片，經過 450°C 五小時熱處理後的 OM 照片，在鍍鋁區產生了一些樹枝狀結構的物質，而在鍍鋁區與非晶矽區的交接處，圖中黑色箭頭處，產生了一層顏色較深的界面。圖 4.2-1(b) 是 25V、5.6A 蒸鍍條件試片經過 450°C 相同時間的熱處理後，用 OM 所拍攝的照片，很明顯地可以觀察到在鍍鋁區出現了大小、方向不一致的島狀晶粒，在鍍鋁區的邊緣，產生了一層顏色不一樣的區域，而且這個區域會隨著時間的增加漸漸地向非晶區的方向擴張。



藉由電子顯微鏡對這兩個試片作高倍率的放大觀察，圖 4.2-2(a) 是 15V、3.5A 經過 450°C 熱處理 5 小時的試片的 SEM 照片，右邊平整的區域是非晶矽區，最左邊許多孔洞的區域就是在 OM 下觀察到的顏色不一樣的界面，在孔洞區的最外圍有一層排列緻密的區域，這個區域幾乎不會隨著時間增加而成長，在照片下所看到的都不是再結晶的晶粒，而鍍鋁區在 SEM 下也觀察不到晶粒的產生。圖 4.2-2(b) 是 25V、5.6A 在 450°C 下熱處理 5 小時的試片的 SEM 照片，照片的左右兩邊是鍍鋁區，可以發現經過熱處理後這個區域已經被誘導出矽的再

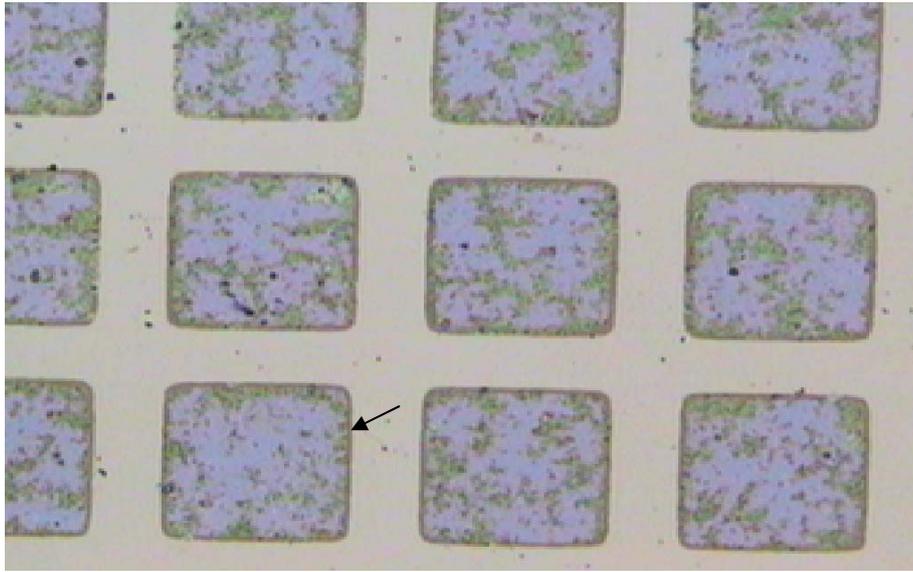
結晶島狀晶粒，而鍍鋁區的邊緣也有許多尺寸較小的晶粒產生，這個小尺寸島狀晶粒的區域會隨著時間的增加而向中間的非晶矽區的方向擴張。

對於這兩種鍍膜條件所產生的差異做以下的探討。兩種條件下所鍍出來膜厚並沒有太大的差異，所以先排除是膜厚所造成的影響。接著以電子顯微鏡觀察鋁膜的表面形貌，圖 4.2-3(a)是以 15V、3.5A 電流條件所鍍上的鋁的表面形貌，由於表面平整沒有太大的高低起伏，所以影像的對比比較不明顯。圖 4.2-3(b)是 25V、5.6A 的電流所鍍出來的鋁，由圖可以發現鋁的晶粒大約 100nm 左右，以柱狀的形式存在，每顆晶粒間都有很明顯的晶界，表面形貌相較於圖 4.2-3(a)是比較粗糙的。因此，推斷造成這兩種蒸鍍條件所製備的試片熱處理後的差異，可能是受到鋁層的表面形貌所影響。25V、5.6A 試片的鋁層，晶粒小、晶界多有利於需要靠原子擴散進行的再結晶行為發生，而且鋁層的表面粗糙與非晶矽層接觸後容易形成高自由能的缺陷，提供鋁和矽原子更多可以交互擴散的管道，所以容易產生誘導再結晶的現象。反觀 15V、3.5A 的試片，表面形貌平整且晶粒間沒有明顯的晶界，自然就較前者不容易產生再結晶的現象。

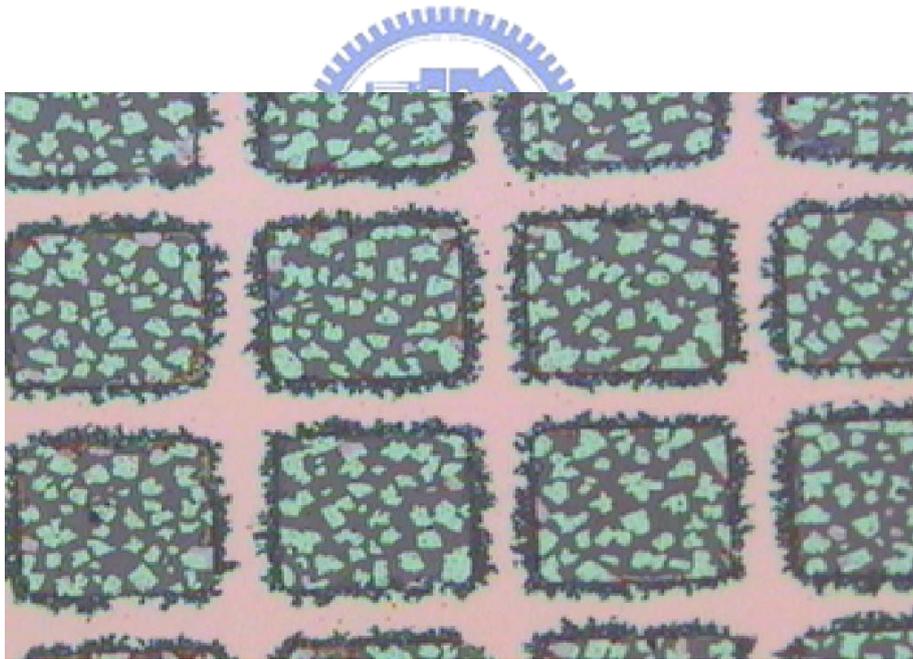
另外，兩個蒸鍍的蒸鍍時間也有很大的差異，15V、3.5A 的電流條件因為電流較小，所以固態的鋁錠完全汽化成鋁蒸氣而蒸鍍上試片

需要花 5 分鐘的時間；25V、5.6A 的電流條件，因為電流較大所以只需要花 10 秒鐘就可以完成蒸鍍的動作。所以是否因為蒸鍍的時間過長而造成所蒸鍍的鋁層較為不純，而導致影響到誘導再結晶的反應，也是有可能性存在。





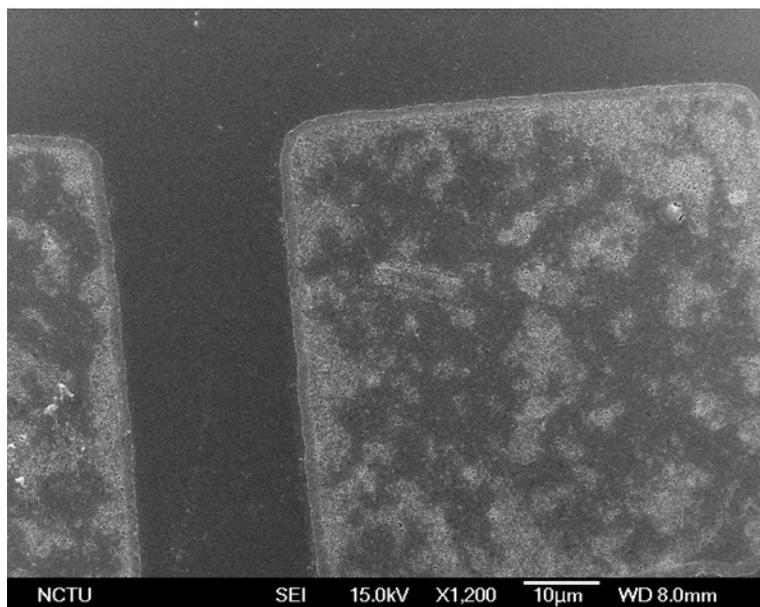
(a)



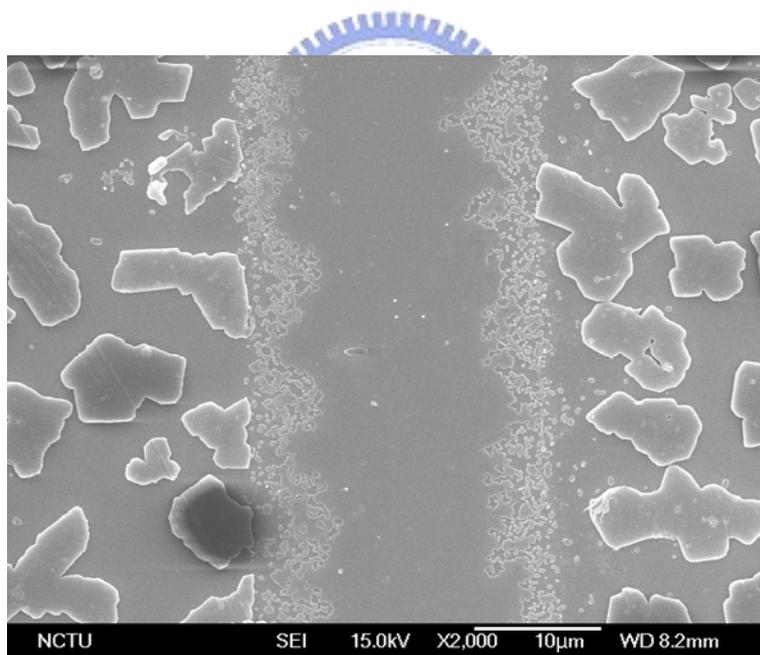
(b)

圖 4.2-1 兩個蒸鍍條件試片 450°C 熱處理後的 OM

(a)15V、3.5A、5 小時 (b)25V、5.6A、5 小時



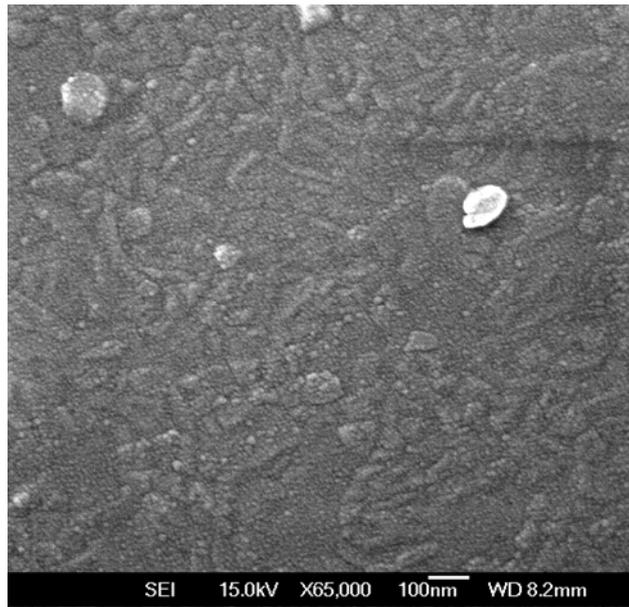
(a)



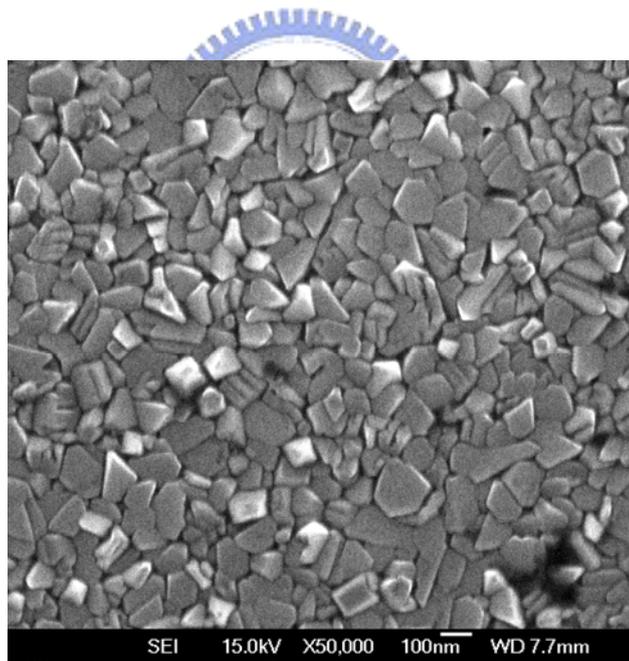
(b)

圖 4.2-2 兩個蒸鍍條件試片 450°C 熱處理後的 SEM

(a)15V、3.5A、5 小時 (b)25V、5.6A、5 小時



(a)



(b)

圖. 4. 2-3 兩種蒸鍍條件所鍍鋁的表面形貌 SEM 圖

(a)15V、3.5A (b)25V、5.6A

### 4.3 非晶矽膜厚差異的影響：

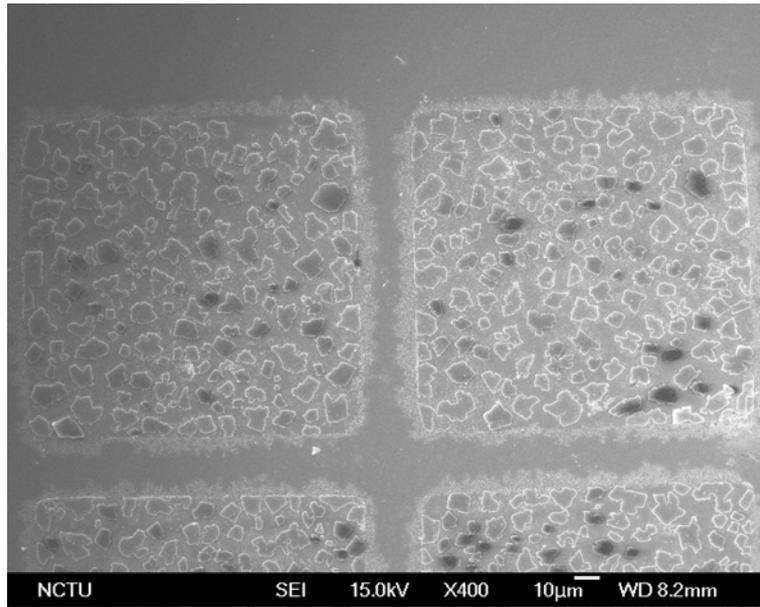
廠商所提供試片是已經鍍覆非晶矽膜的玻璃基板，而非晶矽膜的厚度有 20nm、100nm 兩種。由於前一章節所提到，以 25V，5.6A 的電流條件蒸鍍鋁膜較容易產生誘導再結晶的現象，所以我們將這兩種非晶矽膜厚不同的試片皆已 25V、5.6A 的電流進行蒸鍍鋁，熱處理後再觀察兩者間的差異。

圖 4.3(a)是非晶矽膜厚 20nm 的試片經過 450°C 5 小時的熱處理後所得到的結果，正方形的區塊是原本有蒸鍍上鋁的區域，而外圍較為平整的區塊是沒有蒸鍍鋁的非晶矽層。可以發現在去除鍍鋁區域殘留的鋁後，留下來的許多大型島狀晶粒，而在鍍鋁區與未鍍鋁的非晶矽區的界面，熱處理過後則產生許多小尺寸的島狀晶粒，而且這些晶粒會隨著熱處理的時間變長而增加且會往非晶矽區方向擴張，有類似側向成長的行為。圖 4.3(b)是非晶矽膜 100nm 的試片經過 475°C 30 分鐘的熱處理後所拍攝的照片，得到的結果跟前者類似，比較大的差異是在鍍鋁層經過熱處理後產生的再結晶晶粒比前者大很多，且大的晶粒互相接觸後而連接在一起，所以照片中看到的晶界相對的比較少，也比較不明顯。

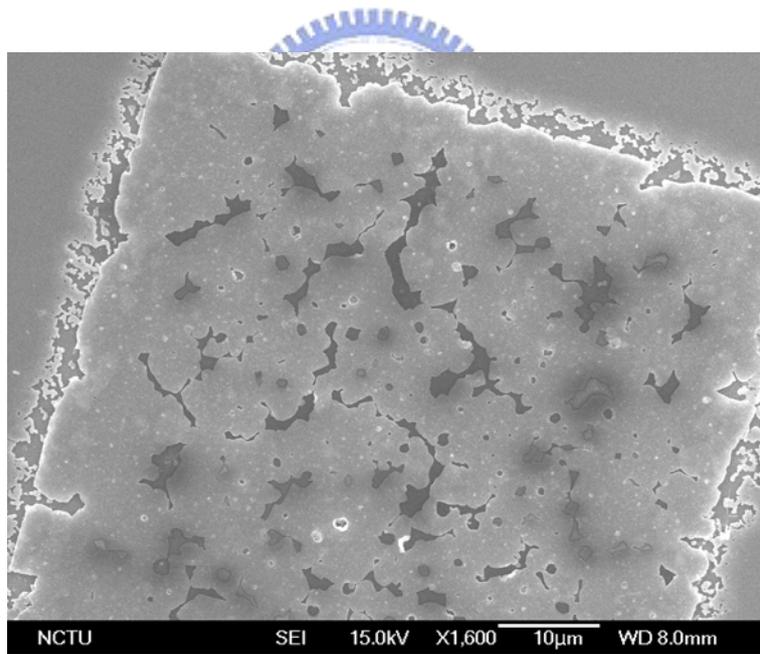
由這兩個試片得到的結果的差異，推斷熱處理後鍍鋁區得到的再結晶產物，是經過鋁矽層交換後誘發出的多晶矽再結晶晶粒。20nm

非晶矽膜厚的試片，由於非晶矽的量較少，所以層交換後產生的多晶矽晶粒的數量不足以填滿整個的鍍鋁區。100nm 非晶矽膜厚的試片，經過熱處理後大量的矽與鋁產生層交換，產生較大的晶粒互相連接在一起，幾乎快填滿了整個鍍鋁區。





(a)



(b)

圖 4.3 兩種多晶矽膜厚不同的試片熱處理後的 SEM

(a)非晶矽膜厚 20nm、450°C 5 小時熱處理

(b)非晶矽膜厚 100nm、475°C 30 分鐘熱處理

#### 4.4 X-ray 繞射結果：

為了確定在 SEM 下所看的晶粒是否就是多晶矽的結晶，使用 X-ray 繞射儀對試片做繞射分析。圖 4.4-1，試片製備步驟完成後尚未進行熱處理的試片的繞射圖，在  $38.6^\circ$  及  $65.2^\circ$  附近出現的是蒸鍍鋁薄膜的繞射峰，並沒有矽結晶的繞射峰出現。

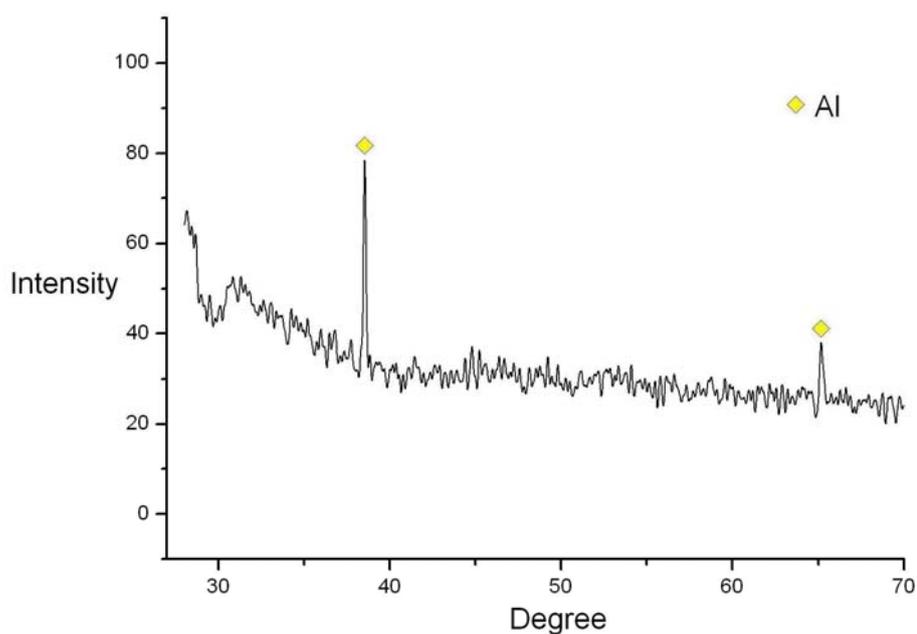


圖 4.4-1 尚未進行熱處理的試片的繞射圖

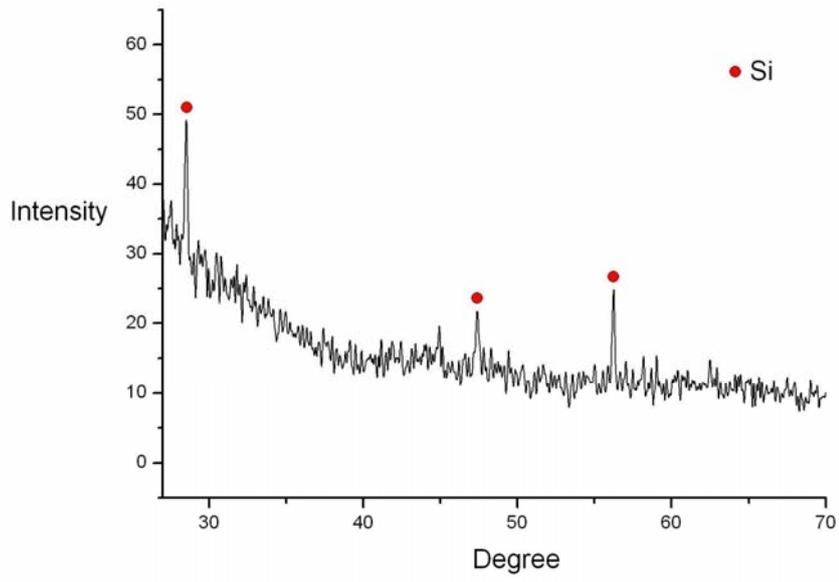
我們對 475°C 熱處理條件的幾個試片進行繞射圖的分析，首先，對經過五分鐘的熱處理後，以去除表面殘留的鋁的試片進行分析，由圖 4.4-2(a)，發現鋁的繞射峰已經完全消失，而取而代之的是多晶矽在 28.5°、47.4° 及 56.2° 的三跟主要的繞射峰。這也表示在 475°C 下熱處理五分鐘後就有誘導結晶的現象發生。對熱處理一小時的試片進行分析，可以觀察到三個繞射峰的強度有增強的現象，如圖 4.4-2(b)，這表示多晶矽的數量有增加的趨勢。再對熱處理五小時的試片進行分析，如圖 4.4-2(c)，可發現鋁的繞射峰又再度出現，因為表面的鋁已經完全去除，所以這些訊號應該是來自於擴散進入底層的鋁晶粒，這也可以證實鋁和矽之間確實是有層交換的反應產生。在短時間的熱處理時，由於擴散進入矽層的鋁的數量不夠多，訊號無法被偵測器偵測出來；當熱處理的時間拉長後，就有大量的鋁擴散進底部的矽層再聚集成晶粒，由於 X-ray 的偵測深度較深，所以在底層的鋁晶粒的訊號就再度被偵測出來。

接著觀察 550°C 熱處理某幾個時間條件的繞射圖。經過五分鐘的熱處理後所得到的繞射圖，可發現已經有鋁的訊號存在，如圖 4.4-3(a)，這顯示出在這個溫度下，鋁和矽之間的交互擴散速度是非常快的，只經過五分鐘就有足夠的鋁擴散進入底部的矽層，而使訊號被偵測出來。隨著時間的增加，鋁和矽的訊號都有稍微增強的現象，

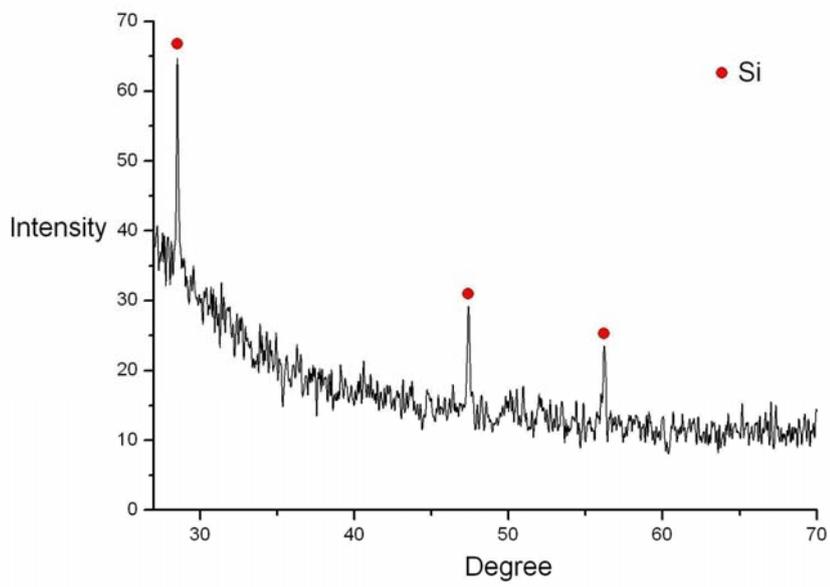
如圖 4.4-3(b)。

由以上 X-ray 繞射圖可以證實前面章節所觀察到的晶粒確實為鋁所誘發出的多晶矽再結晶晶粒。由這兩個熱處理條件所得到的結果的差異，可以發現溫度對於這種層交換的再結晶反應，特別是對於鋁矽原子之間的擴散行為，有非常重大的影響力。

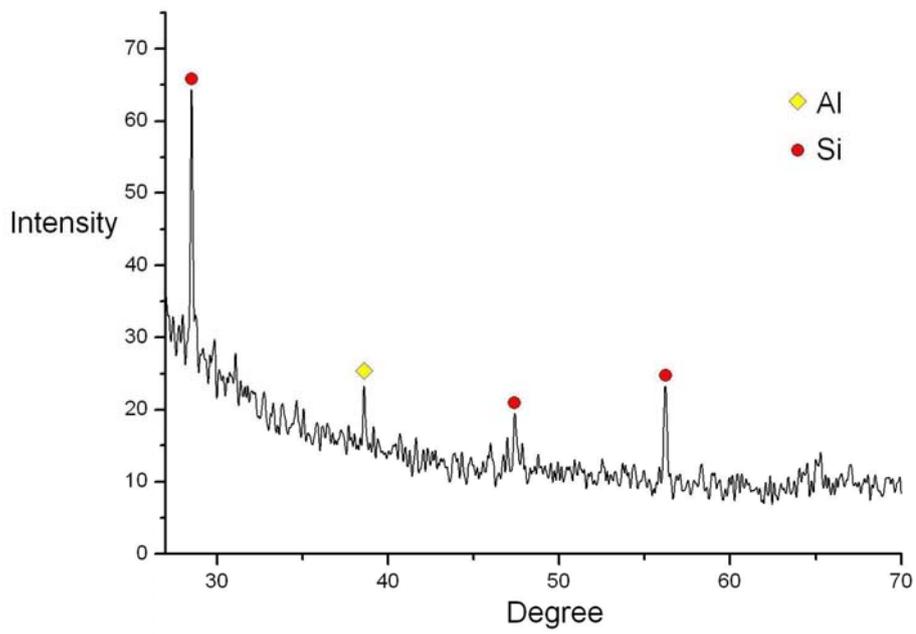




(a) 5 分鐘



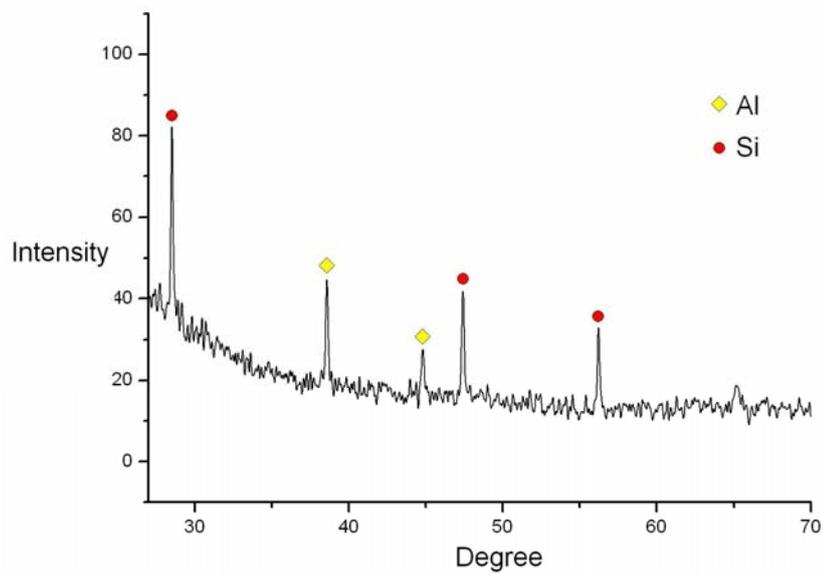
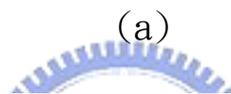
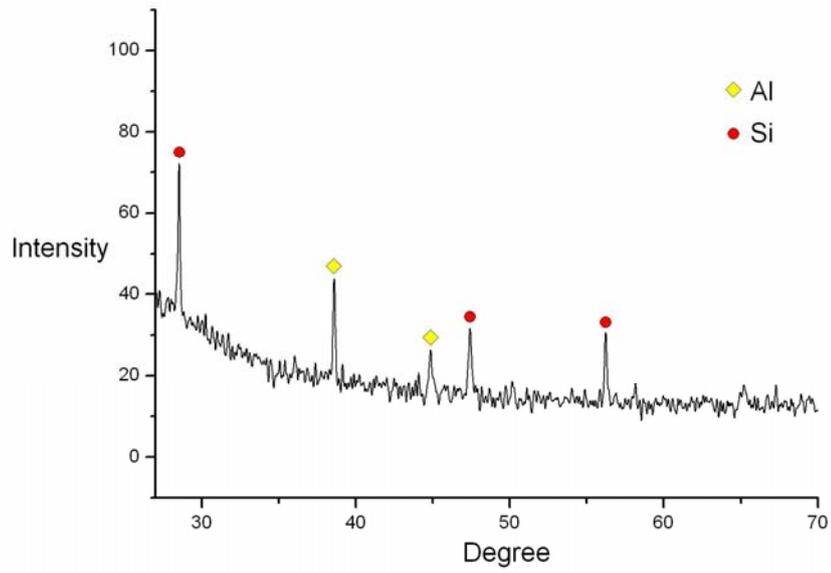
(b) 1 小時



(c)5 小時

圖 4.4-2 475°C 經過各個熱處理時間後的 X-ray 繞射圖

(a)5 分鐘 (b)1 小時 (c)5 小時



(b)

圖. 4. 4-3 550°C 經過各個熱處理時間後的 X-ray 繞射圖

(a)5 分鐘 (b)2 小時

#### 4.5 溫度對側向成長的效應：

我們由比較試片經過 475°C 與 550°C 熱處理後多晶矽側向成長的狀況，來觀察溫度對於側向成長的影響。由圖 4.5-1(a)，兩邊是鍍鋁區，中間平整區域是非晶矽區，可以發現經過 475°C 三十分鐘的熱處理後，界面附近已經產生一些小尺寸的晶粒，再從圖 4.5-1(b)、(c) 中可以發現隨著熱處理的時間增長，這些小晶粒會慢慢地連接在一起而粗大化，由圖 4.5-1(d) 左下方箭頭處，經過 5 個小時的熱處理後，已經有數個微米大的晶粒產生。這個再結晶區會隨著時間漸漸地向非晶矽區擴張，但是速度是非常慢的，由圖 4.5-1(e)，經過 9 個小時之後還是無法擴張至整個非晶矽區。

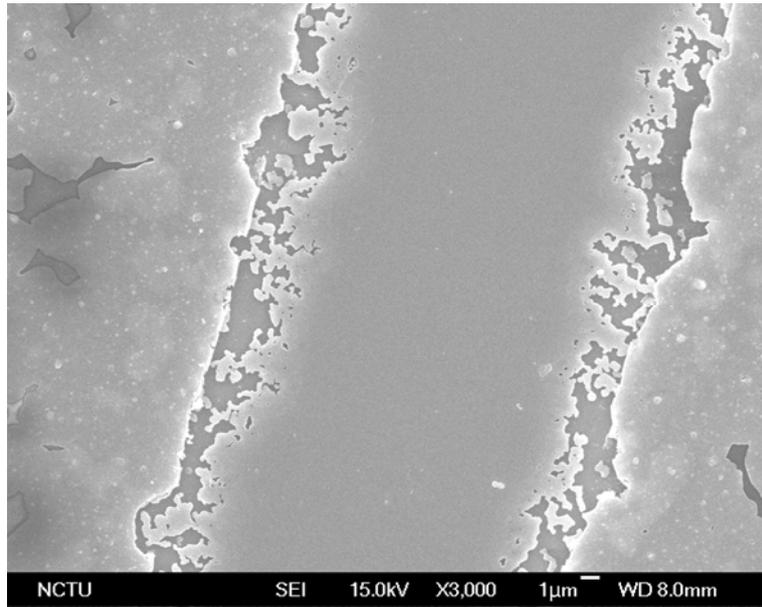
反觀 550°C 熱處理的試片，由圖 4.5-2(a)，只經過短短 5 分鐘的熱處理，非晶區已經遍佈小尺寸的島狀晶粒。由圖 4.5-2(c)，經過 30 分鐘後小晶粒幾乎完成粗大化，僅僅剩下一些小孔洞，而兩小時過後已經沒有任何的孔洞，如圖 4.5-2(e)，完成粗大化。

表 4.5-1 是使用影像分析軟體對圖 4.5-1(a)~(e) 中未鍍鋁的非晶矽區，進行所產生的再結晶區域面積的比例分析。利用軟體可以計算出已經產生側向再結晶的區域的面積及非晶矽區域的總面積，將得到的兩個值相除就得到兩者的比例。表 4.5-2 是以相同的方法對 550°C 熱處理試片的影像進行分析所得到的結果，由於在這個溫度下

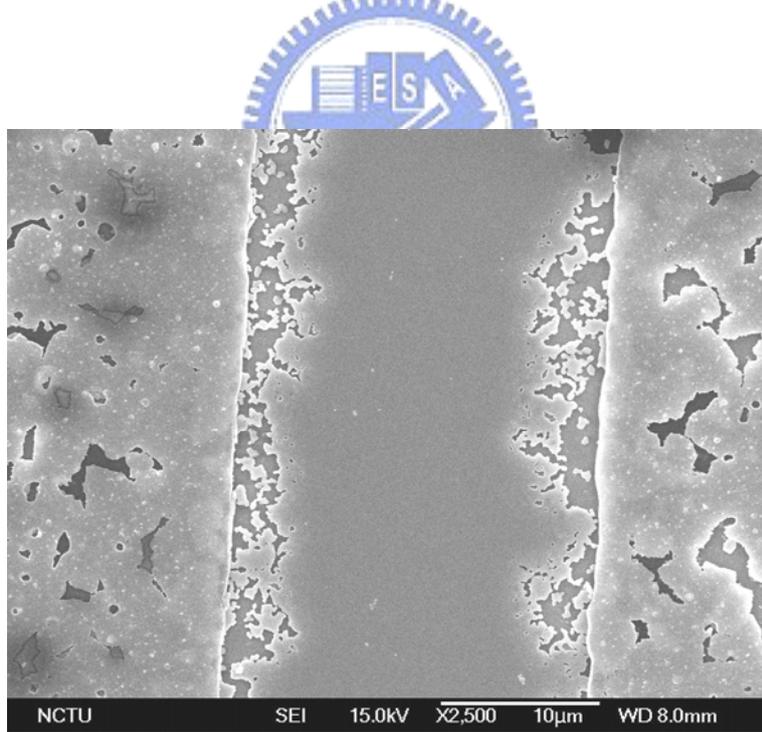
五分鐘熱處理後全部的非晶矽區已經都產生側向再結晶，所以另外進行了更短時間的觀察再加以分析。由圖 4.5-3 比較兩者的折線圖可以得知溫度對側向再結晶的速度有很大的影響。

由於再結晶是屬於一種熱活化的反應，所以溫度乃是影響實驗結果的最主要的參數，但以上兩個溫度參數只差  $75^{\circ}\text{C}$ ，實驗結果就有如次大的差異，這也是一個值得我們去探討的問題。

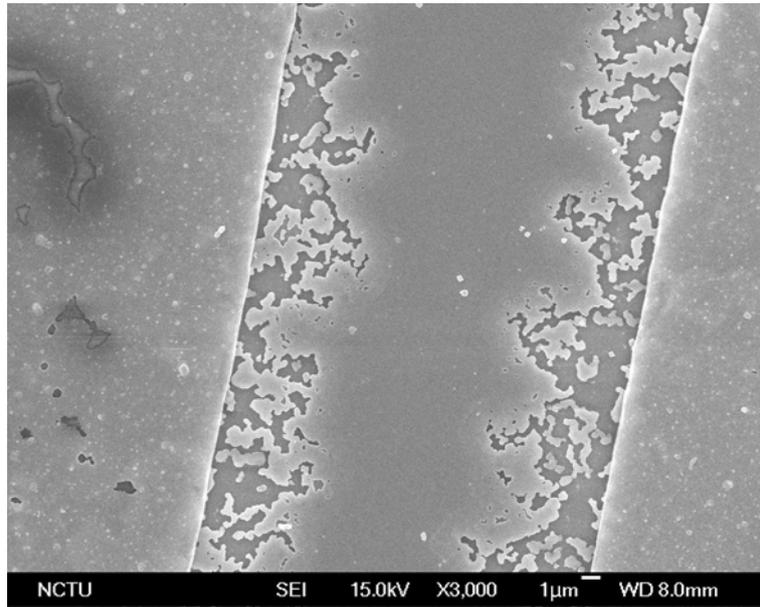




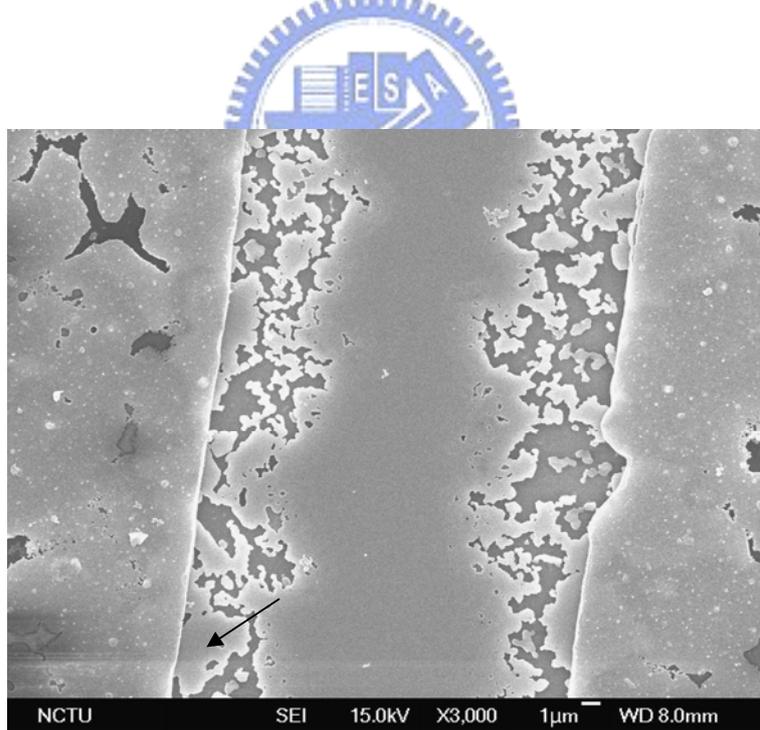
(a) 30 分鐘



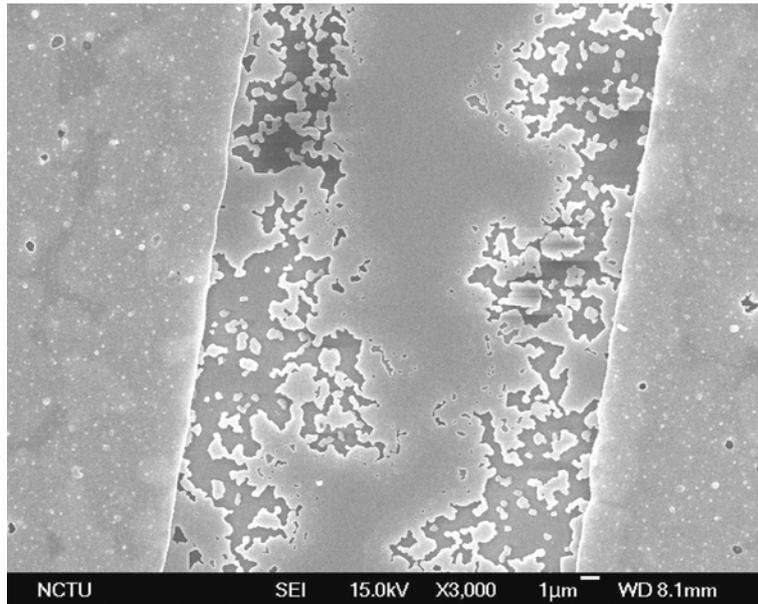
(b) 1 小時



(c) 3 小時



(d) 5 小時

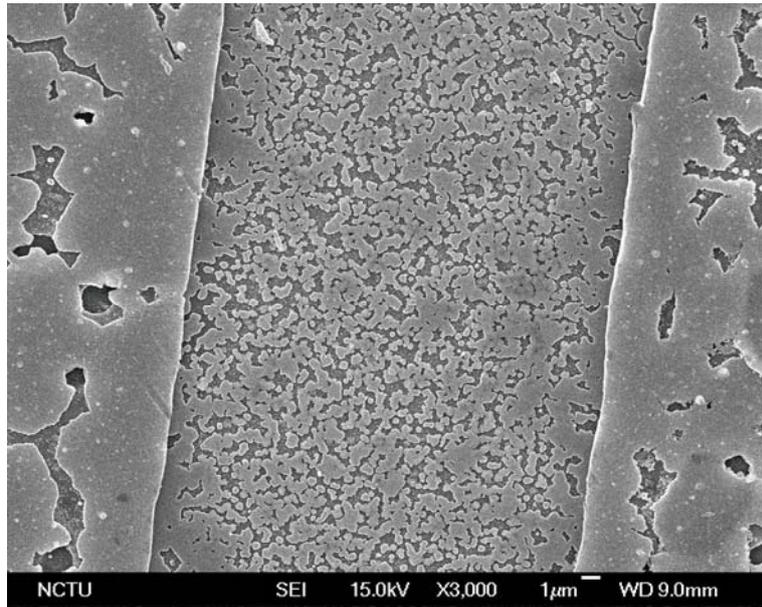


(e)9 小時

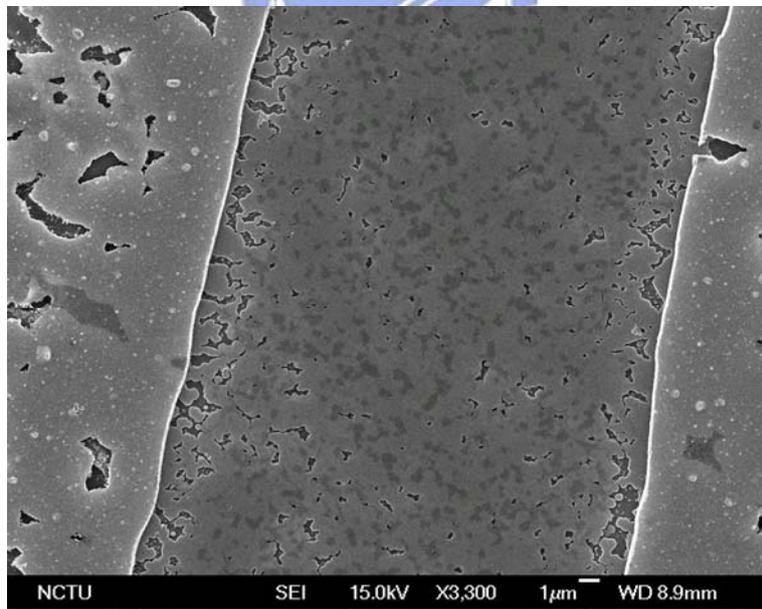
圖 4.5-1 475°C 經過各個熱處理時間後的 SEM

(a)30 分鐘 (b)1 小時 (c)3 小時

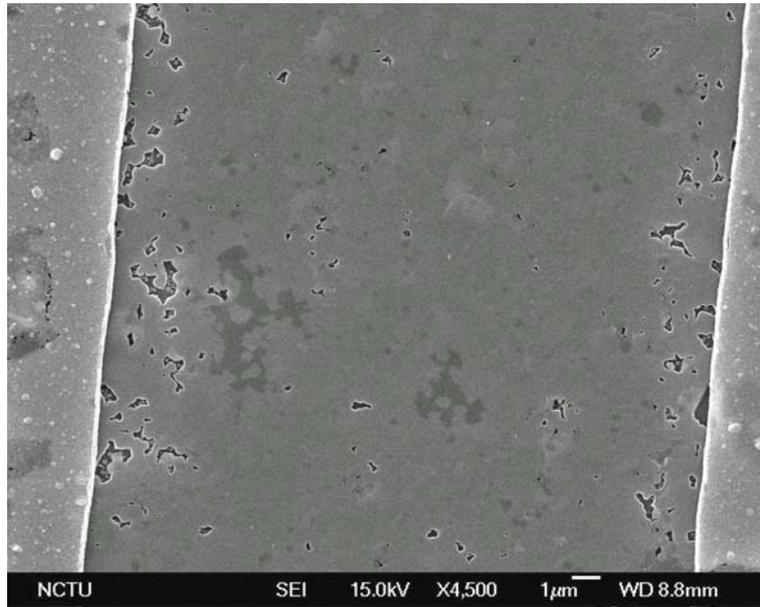
(d)5 小時 (e)9 小時



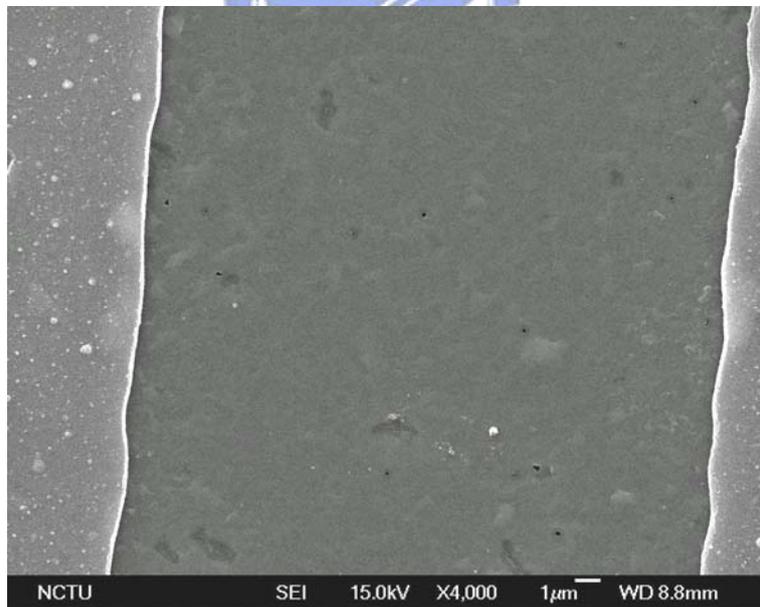
(a)5 分鐘



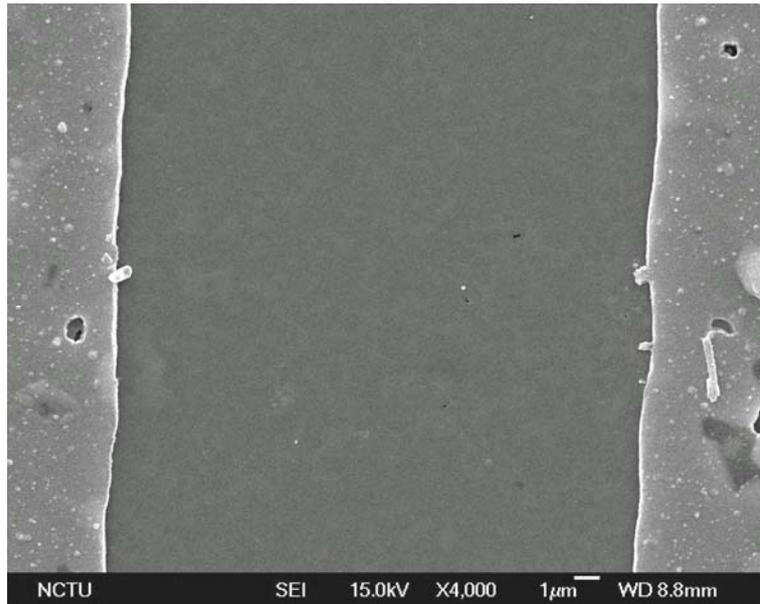
(b)15 分鐘



(c)30 分鐘



(d)1 小時



(e) 2 小時

圖 4.5-2 550°C 經過各個熱處理時間後的 SEM

(a) 5 分鐘 (b) 15 分鐘 (c) 30 分鐘

(d) 1 小時 (e) 2 小時

表 4.5-1 475°C 側向再結晶面積比例

Annealing time	30min	1hrs	3hrs	5hrs	9hrs
Ac/At	0.2529	0.2799	0.4883	0.5607	0.7213

表 4.5-2 550°C 側向再結晶面積比例

Annealing time	1min	2min	3min	5min
Ac/At	0	0	0.95	1

\*註 Ac：非晶矽區產生側向再結晶的面積

At：非晶矽區總面積

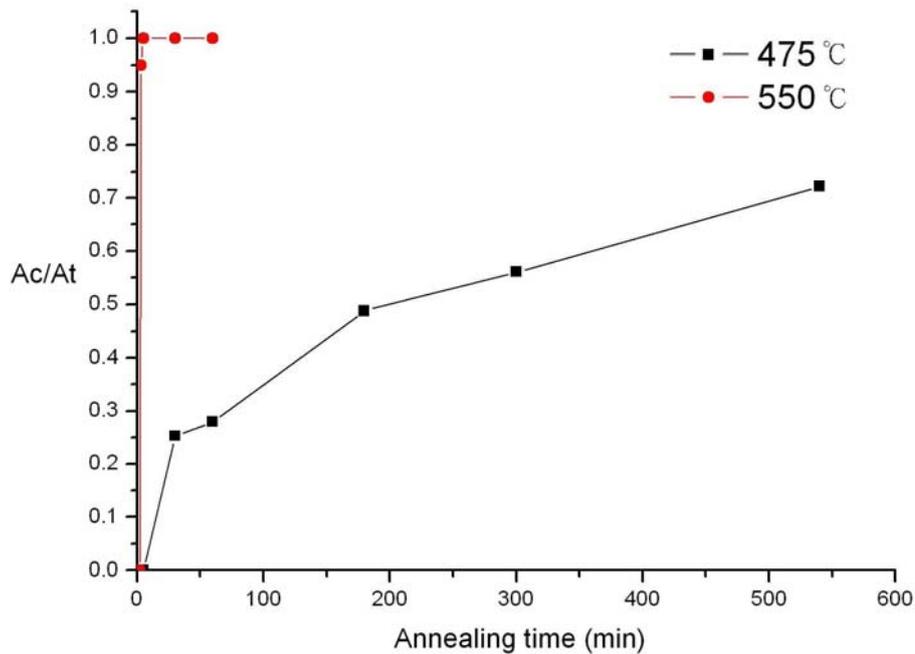


圖 4.5-3 側向再結晶面積比例的折線圖

#### 4.6 EDS 分析結果

藉由對 475°C 及 550°C 這兩個熱處理溫度下某幾個時間條件的試片，作 EDS 的元素分析，有助於了解在鍍鋁區所誘發出的多晶矽晶粒及側向成長的小尺寸晶粒內，局部位置的元素成分分布狀況。也對晶粒內原子隨著時間而進行什麼樣的擴散行為進行分析。

圖 4.6-1 是經過 475°C 30 分鐘的熱處理後的 SEM 影像，因為在使用 EDS 進行量測分析時，必須調高 SEM 的探針電流輔助，在這個情況下畫面的對比會大幅的提高，我們發現在鍍鋁區的多晶矽晶粒裡面有兩種顏色深淺不同的兩個區域。表 4.6-1(a)(b) 是對這兩個區域各作五個點的局部元素分析後的平均值，發現顏色較淺的區塊矽的原子百分比為 83.52% 而鋁的原子百分比是 5.53%。顏色較深的區塊相較之下是鋁原子含量較多的區域，而且隨著熱處理時間增加，深色區塊的鋁原子含量會增加，而淺色區塊的鋁原子含量會減少。這顯示出在多晶矽晶粒中似乎還有鋁原子偏析的行為在進行。

圖 4.6-2 是經過 550°C 30 分鐘的熱處理後的 SEM 影像，可以觀察到在非晶矽的小尺寸島狀晶粒連接在一起後，也是有類似前面的狀況，有顏色深淺不同的兩個區域。由表 4.6-2(a)(b) 發現，同樣的再淺色區域的鋁含量比較少，而深色區的鋁含量較多，而且隨著時間的變化，也同樣地會有原子擴散的現象產生。

表 4.6-1(c)是圖 4.6-1. 裡面中間尚未有島狀晶粒產生的非晶矽區的局部元素分析，發現有鋁原子的存在，而且含量達到原子百分比 6.68%，這個含量甚至超過鍍鋁區的某些區域。這顯示出經過 475°C 30 分鐘的熱處理後，已經有相當多的鋁原子擴散到這個區域，由圖 4.5-1(e)我們得知這個區域經過九個小時的熱處理後也不會有島狀的晶粒產生。這使我們對這個區域的擴散行為產生疑惑，有鋁原子的存在但卻無法產生在結晶晶粒，這個問題，由於目前還沒有辦法對這區域進行側向的微結構觀察，所以還沒有一個確切的答案。



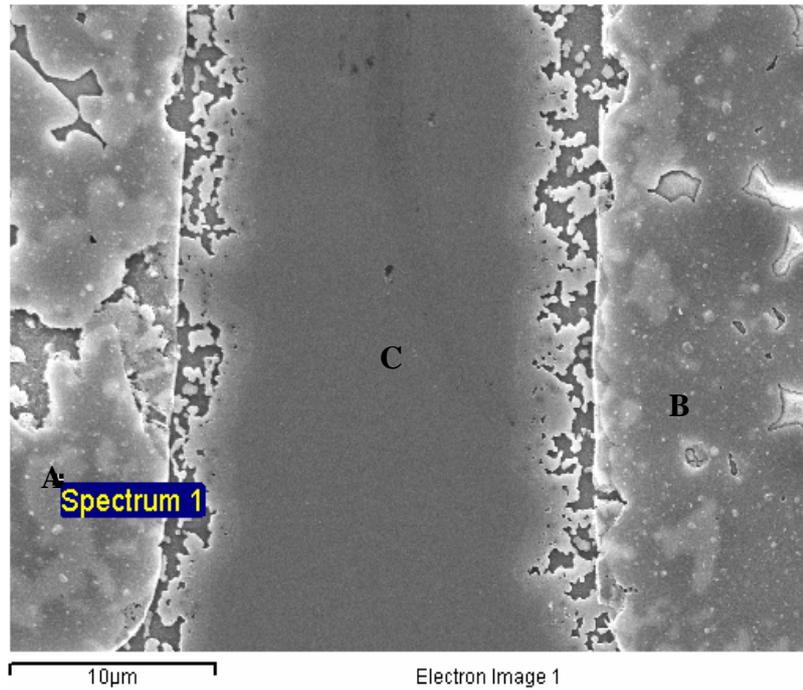


圖 4.6-1 475°C、30 分鐘熱處理的 SEM



表 4.6-1(a) A 處淺色區元素分析

Element	Weight%	Atomic%
O K	5.53	9.37
Al K	5.51	5.53
Si K	86.62	83.52
Ca K	2.23	1.58

表 4.6-1(b) B 處深色區成分分析

Element	Weight%	Atomic%
O K	11.92	19.31
Al K	8.50	8.16
Si K	76.41	70.49
Ca K	3.17	2.05

表 4.6-1(c) C 處非晶區的成分分析

Element	Weight%	Atomic%
O K	8.73	14.48
Al K	6.97	6.86
Si K	80.89	76.41
Ca K	3.41	2.26

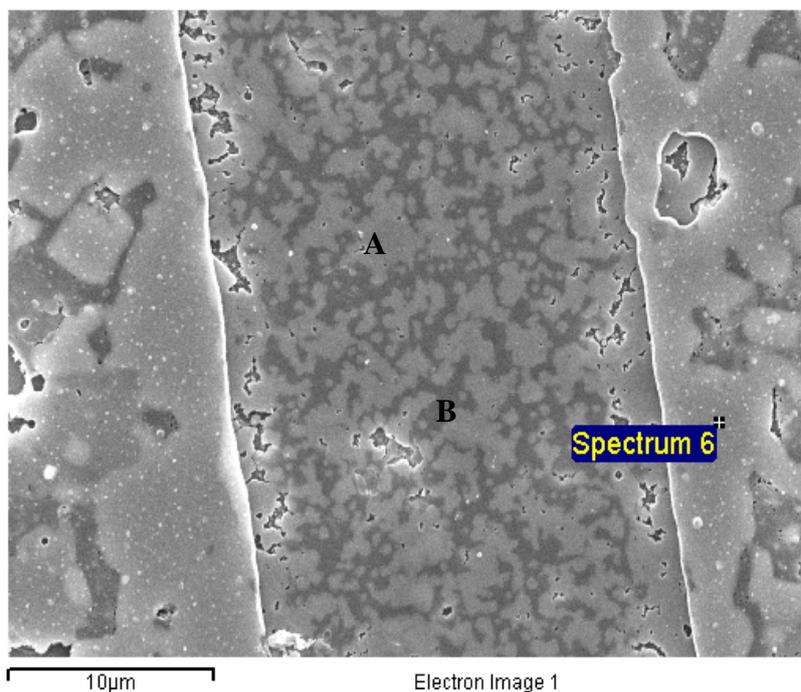


圖 4.6-2 550°C、30 分鐘熱處理的 SEM

表 4.6-2(a) A 處淺色區成分分析

Element	Weight%	Atomic%
O K	10.29	16.87
Al K	8.49	8.25
Si K	77.78	72.63
Ca K	3.44	2.25

表 4.6-2(b) B 處深色區成分分析

Element	Weight%	Atomic%
O K	20.30	31.17
Al K	13.18	12.00
Si K	61.38	53.68
Ca K	5.14	3.15

## 第五章 結論

1. 以基板/非晶矽層/鋁層(25V、5.6A)的排列方式製備試片，經過 475°C 熱處理五分鐘後，就會因為層交換現象的發生而產生多晶矽再結晶，熱處理溫度升高層交換的速度會加快。隨著熱處理時間增加，擴散至下層的鋁漸漸增加。

2. 以 15V, 3.5A 的電流條件所蒸鍍的鋁，表面形貌平整且晶粒不明顯，試片熱處理後不會有側向結晶的現象發生；以 25V、5.6A 的電流條件所蒸鍍的鋁，晶粒呈柱狀，晶粒小且表面粗糙，與非晶矽層接觸後容易形成高自由能的缺陷，有助於矽原子在鋁中的擴散行為，使試片熱處理後可以產生側向結晶的現象。由此推論蒸鍍鋁的晶粒形狀及表面形貌為影響有否產生側向結晶的主要因素。

3. 以 25V、5.6A 的蒸鍍條件所製備的試片，經過 475°C 九個小時的熱處理，試片未鍍鋁的非晶矽區域產生側向結晶的面積比例達 72.13%；經過 550°C 的熱處理五分鐘後，產生側向結晶的面積已經達到 100%。兩者差異顯示出溫度是影響側向結晶發生速度的最主要因素。

4. 側向再結晶的發生，推測應該是鋁擴散至下層後，再間接與旁邊沒鍍鋁的非晶矽層交互擴散後所產生。但目前尚無法對於該處進行

橫截面的觀察，所以其中具體的擴散行為及機制，還沒有一個確定的  
答案。



## 第六章 參考文獻

1. M. S. Haque, H. A. Naseem, and W. D. brown, J. Appl. Phys. 75, pp. 3928-3937, 1994
2. S. W. Lee, S. K. Joo, IEEE Trans. Electron Devices 17, 160, Korea, 1996
3. S. W. Lee, T. H. Ihn, S. k. Joo, IEEE Trans. Electron Devices 17, 407, Korea , 1996
4. “彩色液晶顯示器原理與技術”, 建興出版社 pp. 151-152, 2000
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. T. Matsuyama, N. Terada, T. Sawada, S. Tsuge, K. Wakisaka, and S. Tsuda, J. Non-Cryst. Solid, 198-200, pp. 940, 1996
9. K. Ishikawa, M. Ozawa, C. -H. Neuhaus, and M. Matsumura, Jpn. J. Appl. Phys., 37, pp.731, 1998
10. S.D. Brotherton, J. R. Ayers, M. J. Edwards, C. A. Fischer, C. Glaister, J. P. Gowers, J. D. McCulloch, and M. Trainor, Thin Solid Films, 337, pp.188, 1999
11. F. A. Quli, J. Singh, Material Science and Engineering, B67, pp.139-144, 1999
12. Soo Young Yoon, Ki Hyung Kim, and Chae Ok Kim, J. Appl. Phys., 82, pp.5865-5867, 1997
13. Seok-Woon Lee, Yoo-Chan Jeon, and Seung-Ki Joo, Appl. Phys. Lett., 66, pp.1671-1673, 1995
14. R. J. Nemanichi, C. C. Tsai, M. J. Thompson, and T. W. Sigmon, J. Vac. Sci. Technol., 19, pp.685, 1981
15. S. F. Gong, H. T. G. Hentzell, and A. E. Robertsson, J. Appl. Phys., 64, pp.1457-1463, 1988
16. E. A. Gulians, W. A. Anderson, L. P. Guo, V. V. Gulians, Thin Solid Film, 385, pp.74-80, 2001
17. B. Bian, J. Yie, B. Li, and Z. Wu, J. Appl. Phys. 73, pp.7402, 1993
18. O. Nast, S. Brehme S. Pritchard, A. G. Aberle, S. R. Wenham., Solar Energy Materials and Solar Cells, 65, pp.385-392, 2001
19. J. Klein, J. Schneider, M. Muske, S. Gall, W. Fuhs, Thin solid Films, 481, pp.451-452, 2004
20. L. Hultman, A. Robertsson, H. T. G. Hentzell, I. Engstrom, and P. A. Psaras, J. Appl. Phys., 62, pp.3647, 1987

21. A.A. Baski, K.M. Jones, K.M Saoud, "STM studies of 1-D noble metal growth on silicon", *Ultramicroscopy* 86 (2001) 23-30
22. O. Nast, And S. R. Wenham., *J. Appl. Phys.*, 88, pp.124-132, 2000
23. A. Hiraki, *Surf. Sci.*, 168, pp.74, 1986
24. J. O. McCaldin, H. Sankur, *Appl. Phys. Lett.*, 19, pp.524-527, 1971
25. O. Nast, And A. J. Hartmann, *J. Appl. Phys.*, 88, pp.716-724, 2000
26. Hyeongnam Kim, Daewon Kim, Gyuyul Lee, Dongseop Kim, Soo Hong Lee, *Solar Energy Material and Solar Cells*, 74, pp.323-329, 2002
27. R. Brendel, and R. Hezel, *J. Appl. Phys.*, 71, pp5383, 1992
28. G. Ekanayake, T. Quinn, H. S. Reehal, *Journal of Crystal Growth*, 293, pp351-358, 2006
29. G. Ekanayake, H. S. Reehal, *Vacuum*, 81, pp.272-278, 2006
30. Y. Matsumoto, Z. Yu, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40, pp.2110, 2001

