

第四章 鎳誘發結晶結合雷射修補技術

4.1 前言

鎳金屬誘發結晶 (NILC) 技術是一種較低成本且均勻性較佳的結晶技術其主要的結晶機制在 1993 年由 Hayzelden[20]所提出, Ni 誘發結晶的過程主要由 Ni 與非晶矽形成 NiSi_2 然後藉由 NiSi_2 的移動而進行誘發結晶, 其結晶形狀呈針狀, 且其晶粒間會夾一個 70.5° 夾角, 由於所誘發的結晶矽與 NiSi_2 的(111)面的晶格匹配(lattice mismatch)只有 0.4%, 所以可以得到非常好的磊晶晶粒, 但不幸的, 此結晶方法無法得到較大的結晶晶粒, 而且晶粒間有非晶矽的區域存在, 所以會造成電性上的減損, 為了改善結晶性, 並且修補缺陷, 因此發展出 post annealing 方法, 將未結晶的非晶矽結晶藉以改善金屬誘發結晶的結晶性, 再將部分缺陷進行修補。一般 post annealing 分為兩種方式: 一種是利用爐管進行高溫回火(annealing) [93]~[95], 另一種是利用準分子雷射 (excimer laser) 來進行[96],[97], 此兩種方式都可以將未結晶的區域做結晶的動作, 並且進行缺陷修補。回火是在冶金材料製程很常見的一種結晶技術, 主要目的是要消除材料裡 (尤其是金屬材料) 因缺陷所累積的內應力[3], 所使用的方法是將回火材料放置於適當的高溫下一段時間, 利用熱能將材料內的原子有能力進行晶格位置的重排, 以降低材料內的缺陷密度 (defect density)。主要的缺陷有晶粒邊界 (grain boundary) 及各種的點缺陷(point defects), 這些缺陷若存在於元件中將會大大的減損電性的執行能力。本章節在探討金屬誘發側向結晶經由不同 laser 能量做二次退火後的結晶機制的探討並且比較其電性上的差別。

4.2 實驗方法

實驗流程圖如圖 4.1 所示, 首先在 p type (100) 晶圓上利用爐管在 1050°C 下沈積一層 5000\AA 的氧化層, 以模擬成玻璃基板, 接著再利用低壓化學氣相沈積 (low pressure chemical vapor deposition) 系統沈積厚度分別是 500\AA 、 1000\AA 及 1500\AA 的非晶矽, 之後再利用黃光微影技術定義出金屬線 (metal line) 的圖形, 再利用 lift off 方式將厚度 20\AA 的 Ni 金屬鍍覆在非晶矽上, 再將光阻去除後在爐管進行 550°C 48 小時退火, 以達到製作 TFT 元件所需的結晶長度, 接著再利用 KrF 準分子雷射 (Lambda Physik LPX-210i, $\lambda \sim 248\text{nm}$) 進行二次退火, 所使用的準分子雷射退火設備示意圖如圖 4.2 所示, 而 KrF 準分子雷射的高斯束 (Gaussian beam) 的形狀寬度為 1.8mm 、長度為 23mm , overlap 95%, 重複率維持在 20Hz 。其準分子雷射能量密度隨著厚度不同而做調變, 其雷射能量密度

參數如表 4.1~4.4 所示，將得到的多晶矽膜進行材料分析並製作 TFT 元件。

表 4.1 研究 NILC-ELA 多晶矽膜結晶機制所使用的雷射能量密度表

膜厚	雷射能量密度(MJ/CM ²)					
500Å	120	160	200	230	265	295

表 4.2 500Å 厚的 NILC 多晶矽膜所使用的雷射能量密度表

膜厚	雷射能量密度(MJ/CM ²)					
500Å	230	250	270	290	310	330

表 4.3 1000Å 厚的 NILC 多晶矽膜所使用的雷射能量密度表

膜厚	雷射能量密度(MJ/CM ²)					
1000Å	280	300	320	340	360	380

表 4.4 1500Å 厚的 NILC 多晶矽膜所使用的雷射能量密度表

膜厚	雷射能量密度(MJ/CM ²)					
1500Å	330	350	370	390	410	430

4.2.1 材料分析

利用 SEM (Scanning Electron Microscope) 及 TEM (Transmission Electron Microscopy) 觀察結晶的微結構及 AFM (Atomic force Microscope) 分析表面型態

4.2.2 薄膜電晶體 (TFT) 製作

首先利用鎳誘發結晶技術搭配準分子雷射技術製作出高品質的多晶矽薄膜，接著利用黃光微影技術定義出主動層，再利用 RIE 蝕刻出主動層，再使用 PECVD 及 LPCVD 分別沈積厚度為 1000\AA 的匣極氧化層 (gate oxide) 及 1500\AA 的匣極 (gate)，再利用黃光微影技術定義出匣極氧化層及匣極，再利用 RIE 蝕刻出匣極及 BOE 溶液蝕刻出匣極氧化層，之後進行離子佈植 P (phosphorous)，佈植劑量 $5 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ ，能量 35keV，佈植之後在爐管中進行 600°C 24 小時的退火活化，接下來用 PECVD 將 5000\AA 的保護氧化層 (passivation oxide) 長上去，再利用黃光微影技術定義出接觸窗 (contact window) 用 BOE 溶液蝕刻出接觸窗之後，再利用熱蒸鍍 (thermal coater) 機鍍上 5000\AA 的鋁薄膜，黃光微影技術定義出鋁墊，最後用鋁蝕刻液將鋁墊蝕刻出來，將 TFT 元件放至通氮氣的爐管中進行 400°C 30 分鐘的 sintering，最後利用 Keithley 4200 進行電性量測，元件製作流程示意如圖 4.3。

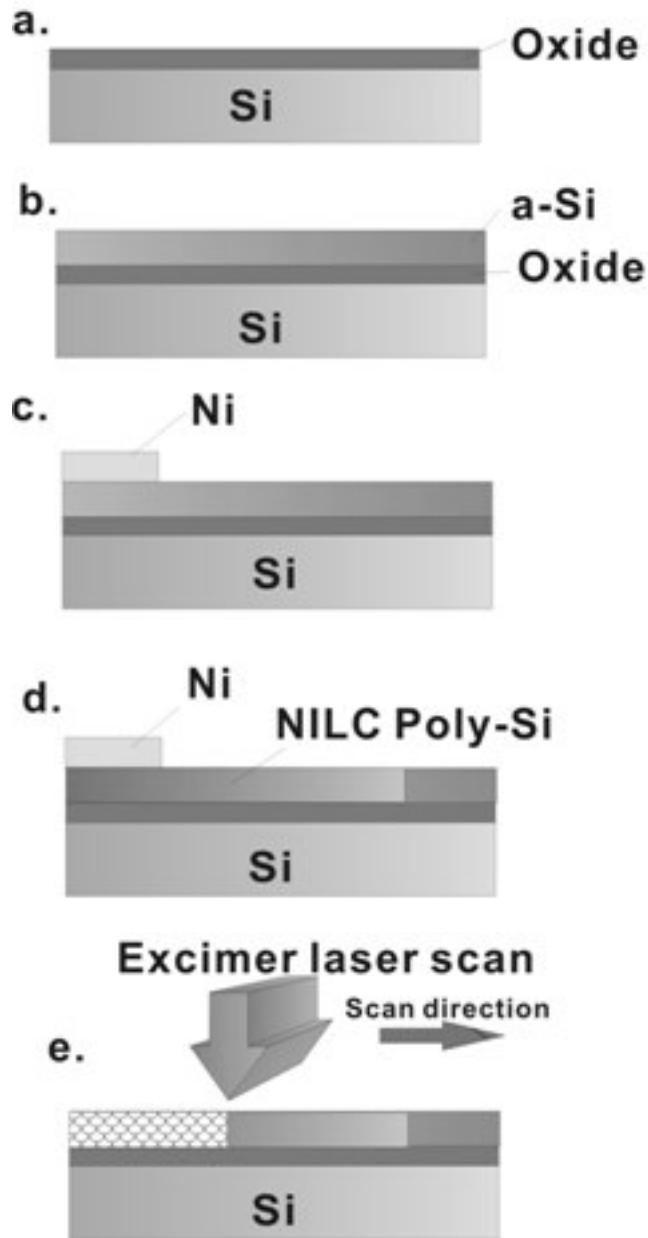


圖 4.1 鎳誘發側向結晶結合雷射退火技術製程，(a)沈積 SiO_2 在矽晶圓上，(b)用 LPCVD 沈積非晶矽 (a-Si) 薄膜，(c)用濺鍍機鍍覆鎳至 a-Si 薄膜上，(d)進行 NILC 退火，退火後將未反應的 Ni 去除，(e)進行雷射修補

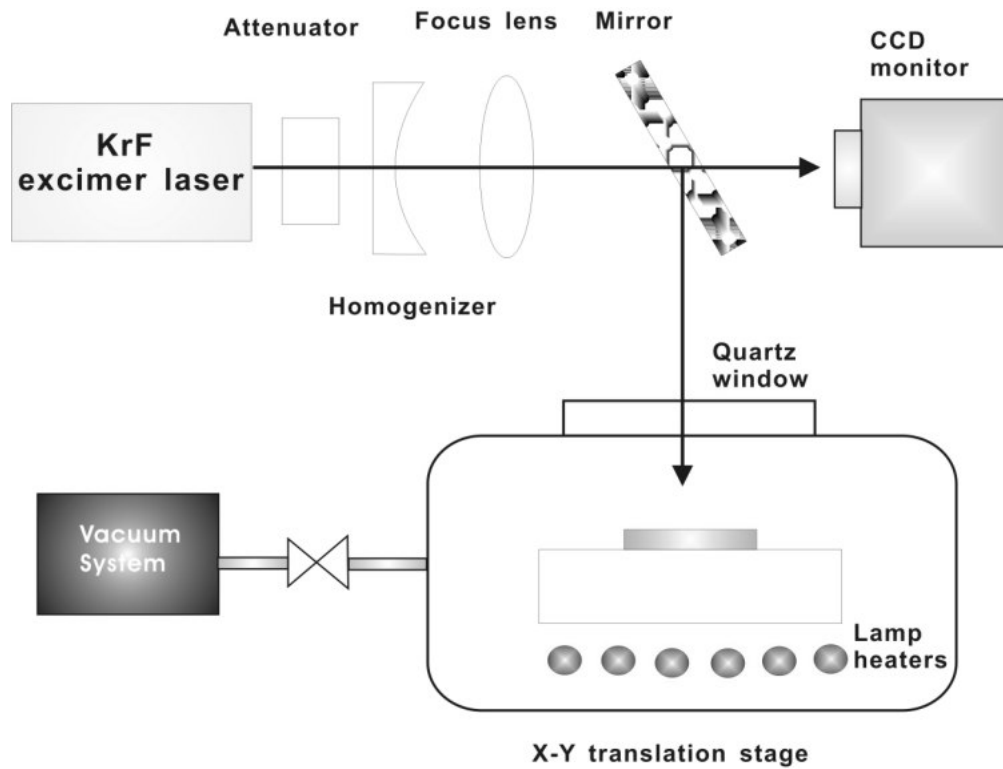


圖 4.2 準分子雷射設備示意圖



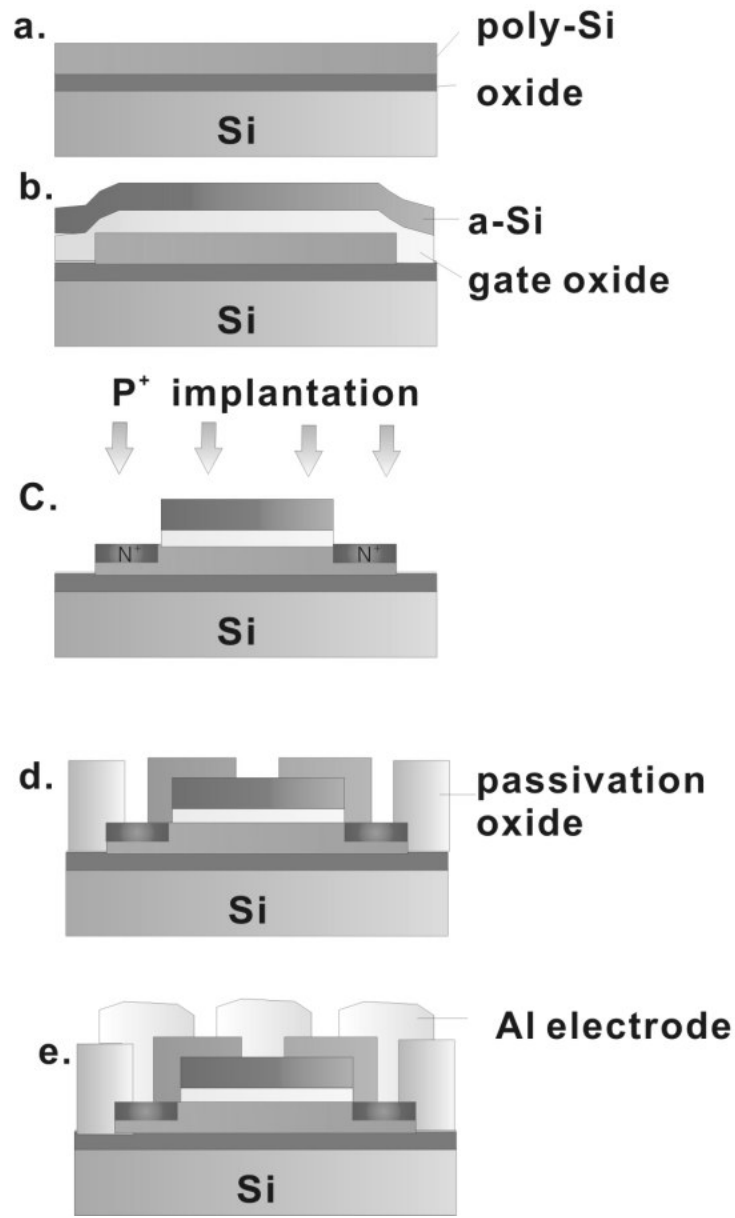


圖 4.3 TFT 元件製作流程圖

4.3 結果與討論

4.3.1 NiSi₂ 誘發結晶的觀察

鎳金屬誘發結晶是由鎳和矽反應形成 NiSi₂ 後進行誘發結晶，結晶會形成網狀分佈如圖 4.4 所示，由圖中可觀察到當非晶矽厚度為 1000Å 時，會形成三層的針狀結晶，所以預估其一層的結晶厚度約為 350Å 左右，且其晶粒寬度約 50~60nm，長約為 700nm，另外，由圖 4.5 的 TEM 分析觀察到針狀結晶前端黑色的部分約為 6nm 的寬度，且由 EDS 測出其有 Ni 及矽的訊號如圖 4.7 所示，所以證實了 Ni 金屬誘發結晶是由 NiSi₂ 進行遷移而進行誘發結晶。而由圖 4.5 的繞射圖形及由其原子影像進行傅立業轉換得到其結晶指向為 <110> 方向，這和 Hayzelden[20] 所提出的 Ni 誘發結晶的機制是一致的，他提到 Ni 和 Si 反應形成 NiSi₂，而一般較容易觀察到的 NiSi₂ 為 <110> 方向，而從 NiSi₂ 上的 {111} 面成長出去。

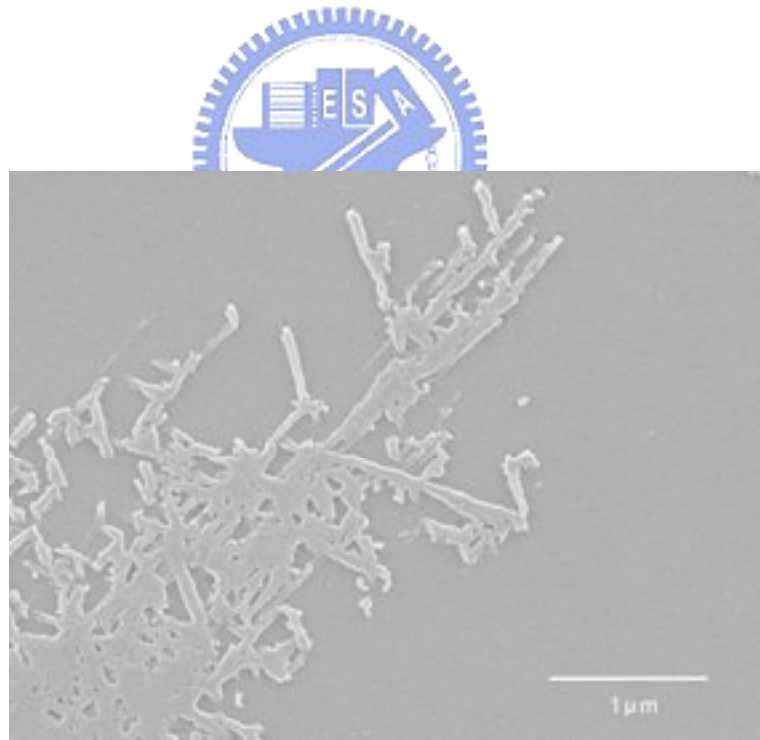


圖 4.4 NILC 針狀結晶

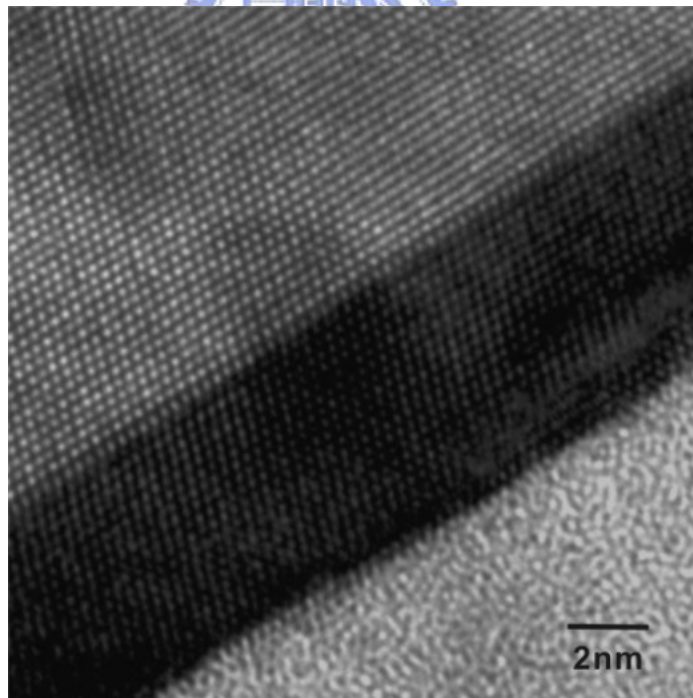
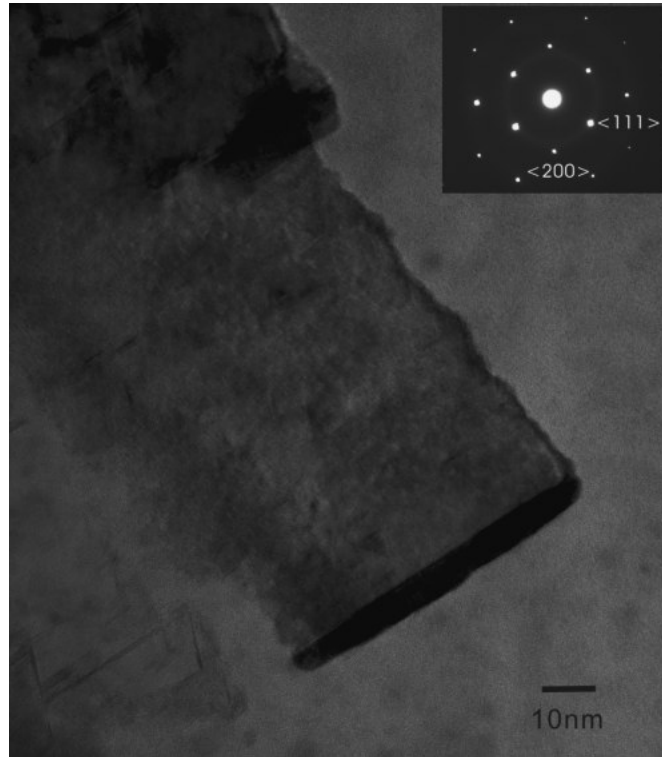


圖 4.5 (a) NILC 的針狀結晶 TEM 影像及其繞射圖形(b)原子影像

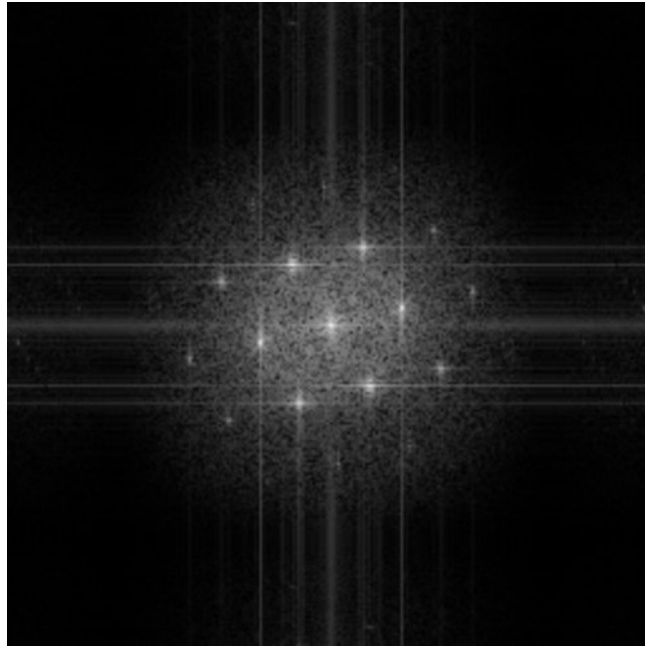


圖 4.6 傅立葉轉換

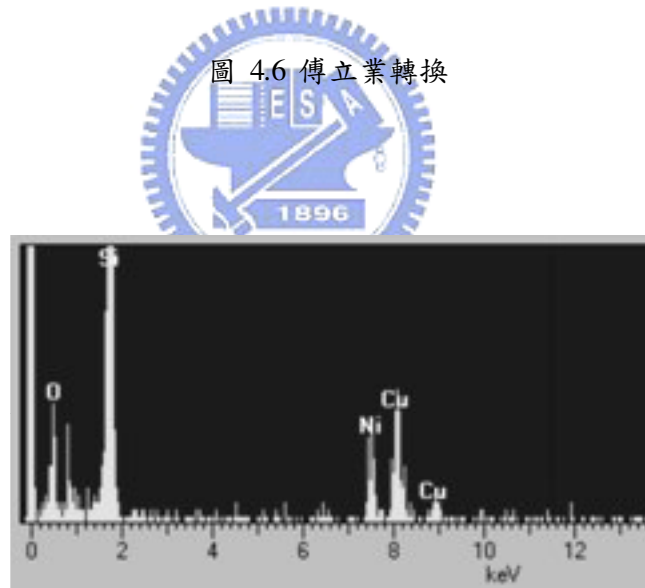


圖 4.7 NILC 針狀結晶前端的 EDS 分析

4.3.2 NILC-ELA 多晶矽薄膜的結晶分析與觀察

4.3.2.1 NILC 厚度 500Å

圖 4.8 是傳統的 NILC 多晶矽薄膜經過 Secco 溶液 [88] 處理過的 SEM 照片。NILC 的區域是由針狀結晶組成，針狀的晶粒的寬度和長度分別為 50nm 和 700nm 從圖中可發現在針狀晶粒間仍然有些未結晶的區域被 Secco 溶液蝕刻掉。首先觀察一下膜厚是 500Å 的 NILC 薄膜經過不同能量的雷射退火做再結晶後的結晶型態的差別。圖 4.9(a) ~ (c) 是 NILC 薄膜經過不同能量密度的雷射照射後得到的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的 SEM 照片。其能量密度分別是 $160\text{mJ}/\text{cm}^2$, $265\text{mJ}/\text{cm}^2$ 及 $295\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。由圖中可看出其微結構會因雷射能量密度而有差別。在較小能量密度時，結晶的形狀仍為針狀，且晶粒較小，而等到能量增加到 $265\text{mJ}/\text{cm}^2$ 時，晶粒尺寸會明顯變大，但當能量達到 $295\text{mJ}/\text{cm}^2$ 時，晶粒成多邊行的小晶粒狀，比較圖 4.8 與圖 4.9 的 SEM 照片，可以很明顯的看出來結晶已獲得改善，晶粒間的非晶矽區已經減少許多。但是不是任何的雷射能量密度所達到的結晶效果都一樣，這由微結構上的差別可以看得出來，為了找出較佳的雷射能量密度，因此針對雷射能量密度對 NILC 多晶矽在結晶結構上的影響加以進一步的研究。我們提出了一些機制在以下加以說明。

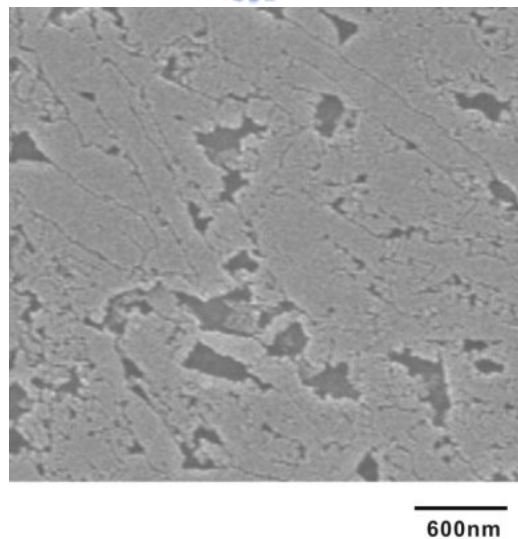
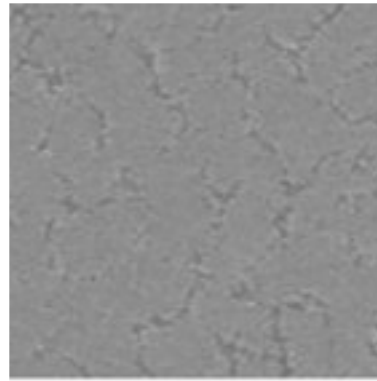
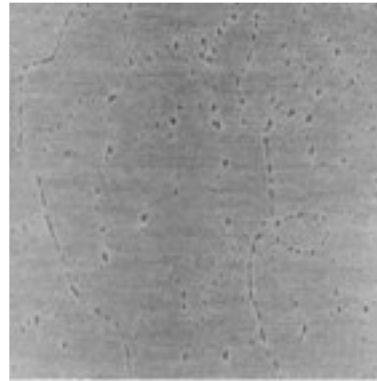


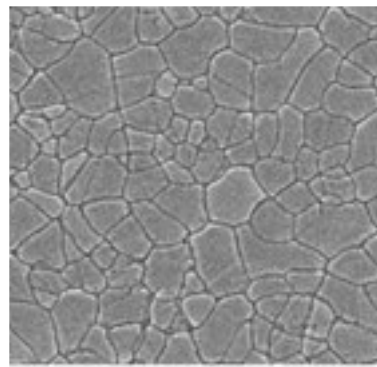
圖 4.8 傳統的 NILC 多晶矽薄膜經過 Secco 溶液處理過的 SEM 照片



(a) **600nm**



(b) **600nm**



(c) **600nm**

圖 4.9 NILC 多晶矽薄膜在不同能量密度的雷射照射下的 SEM 照片 (a)160 mJ/cm^2 (b)265 mJ/cm^2 (c)295 mJ/cm^2


針對雷射能量密度對 NILC 多晶矽在結晶結構上的影響提出兩個結晶的機制 (A) 非晶矽熔融區域 (a-Si melting) (B) 非晶矽和多晶矽熔融區域(a-Si /poly-Si melting) , 以下就此兩個機制作討論：

(A) 非晶矽熔融區域

當能量密度小於 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 時, NILC-ELA 膜是處於非晶矽熔融區域, 這是因為雷射能量太小, 只足夠讓在 NILC 複晶矽晶粒周圍的非晶矽區域熔融。如圖 4.9(a), 此雷射能量密度所造成的結晶的晶粒尺寸和形狀仍然和 NILC 的針狀晶粒相似。

除了 SEM 的分析外, 同時也利用 AFM 來研究雷射能量對多晶矽晶粒成長機制的影響。由於原本的 NILC 針狀結晶薄膜的表面較平滑, 其 $R_a=0.356\text{nm}$, 但在雷射退火之後, 從 AFM 的結果中很容易發現 NILC-ELA 薄膜的表面有一些突起(如圖 4.10 中白色區域)及一些較低窪的區域(如圖 4.10 中較黑的區域)。這些突起與低窪區域是如何形成的在以下做討論。

A-1. 突起的形成



由於主動層的表面粗糙度增加將會造成主動層和匣極氧化層的界面粗糙度增加, 而造成載子的散射中心增加, 這將會降低元件的執行效果, 因此主動層的表面粗糙度的研究是非常重要的, 關於雷射結晶影響表面粗糙度的研究, 之前已經有相關的結果被提出來。在 1972 年 Fork 等人[98] 在雷射退火非晶矽結晶的研究中提出這些突起(bump)是在雷射退火的薄膜製造過程中晶粒在側向成長最後凝固的部分, 這是由於固相態的矽活動擴展到剩餘的密度較大的液態矽材料上 Si 的累積所造成的。另外發現, 當雷射熔融 Si 後, Si 在凝固過程中, 當晶粒成長到碰撞在一起時會形成晶界, 結果發現此晶界即是突起的地方。這種晶界的突起是由於液態矽的密度為 $2.53\text{g}/\text{cm}^3$, 而固態矽約為 $2.30\text{g}/\text{cm}^3$, 明顯的液態矽的密度大於固態矽, 所以也就是說液態矽的體積小於固態矽的體積, 因此由液態矽凝固成固態矽時體積會膨脹, 所以就會造成晶界處的突起。由於此突起會形成載子的散射中心, 而減損電性的執行效果, 因此有許多的研究結果[99],[100] 提出如何消除此突起而改善表面粗糙度。

NILC的針狀晶粒並不會在此非晶矽區域的能量密度下熔融，只有在針狀晶粒周圍的非晶矽才會熔融。如圖 4.10 所示，較早形成的結晶是從熔融區域先形成低凹區域，之後再形成突起區域[100]。結果發現非晶矽熔融的區域會隨著雷射能量密度增加而增加，所以造成突起的數量也會隨著雷射能量密度增加。除此之外，從圖 4.10 中發現被突起及凹陷所包圍起來的區域形狀為針狀。這也就是說在 NILC-ELA 膜中的非晶矽熔融所需要的雷射能量密度低於 $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。而當雷射能量較低時得到形成突起的區域為點 (spot) 狀而當雷射能量密度增加時就會形成線 (line) 狀的突起，這是由於當雷射能量增加時突起及凹陷的數目增加。

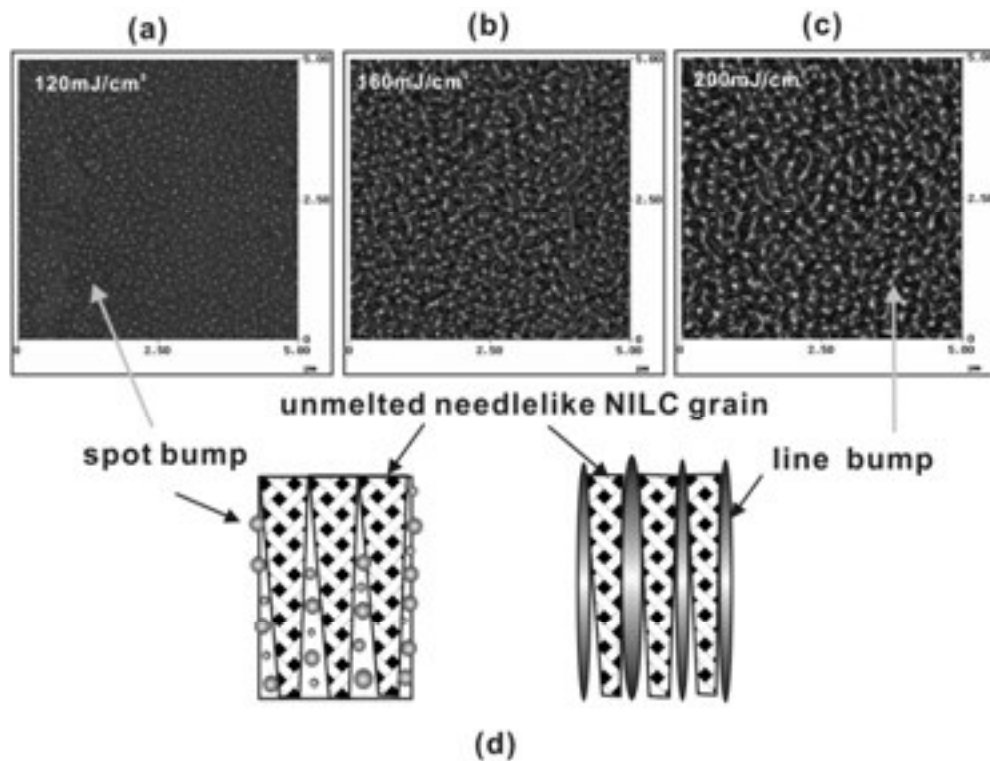


圖 4.10 NILC 多晶矽薄膜經由雷射能量密度 (a) $120\text{mJ}/\text{cm}^2$ (b) $160\text{mJ}/\text{cm}^2$ (c) $200\text{mJ}/\text{cm}^2$ 照射後的 AFM 影像及 (d) NILC-ELA 的多晶矽薄膜的表面型態的示意圖。雷射能量低時是點狀突起，當能量增加時變成連續的線狀突起

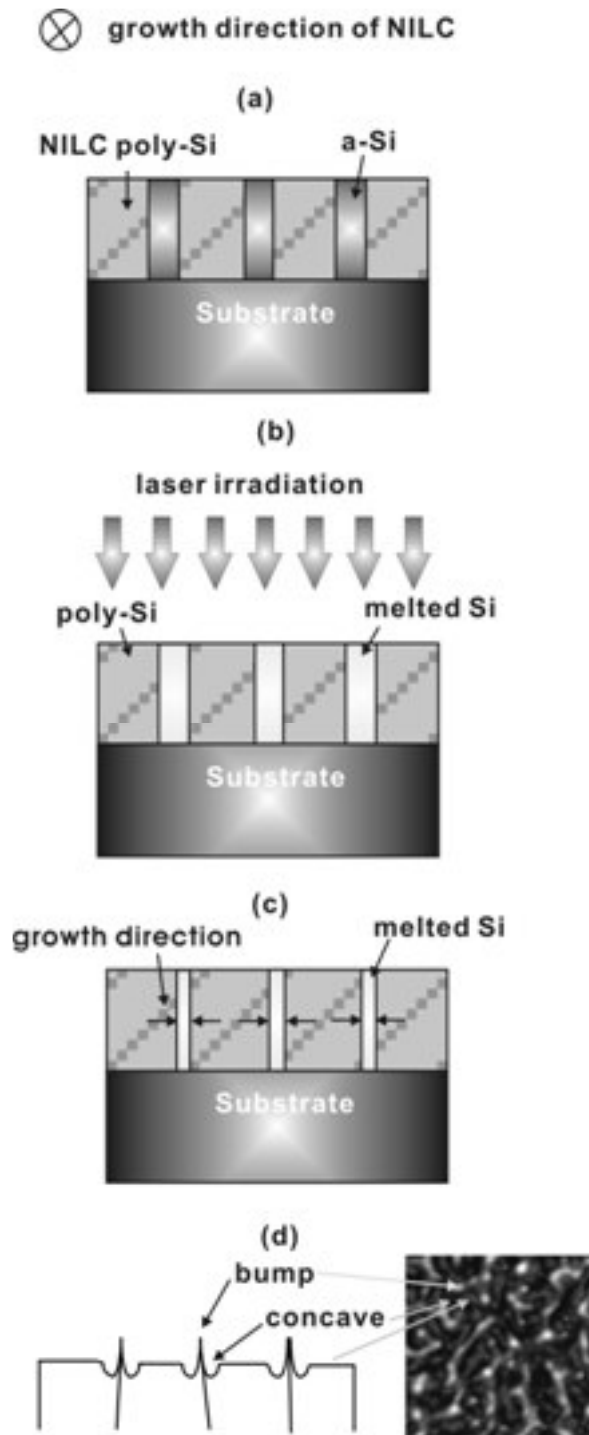


圖 4.11 在非晶矽熔融區域 NILC-ELA 薄膜成長示意圖。(a)雷射退火前的 NILC 薄膜，(b)雷射照射後在非晶矽熔融區域的針狀結晶周圍的非晶矽熔融，(c)熔融的非晶矽成長，(d)晶粒側視圖及其表面型態的 AFM 影像

(B)非晶矽及多晶矽熔融區

當雷射能量達到 230mJ/cm^2 時，非晶矽及多晶矽熔融區出現。此雷射能量密度已足夠讓非晶矽及多晶矽都熔融結晶，其結晶晶粒的 SEM 照片如圖 4.9(b)及 4.9(c)所示，由圖可很明顯看出來所得到的二次退火的晶粒和 NILC 結晶所得到的針狀晶粒是非常不同的。利用 SEM 及 TEM 分析此區域的結晶，結果發現在結晶機制上有很大的不同，因此從得到的結果中，可將此結晶區域分成 (1) 幾何合併 (geometrical coalescence) 區域 (2) 完全熔融(completemelting)區域。接下來將再更進一步的討論此區的結晶行為。

(1)幾何合併區域 (Geometrical coalescence regime)

當雷射能量密度介於 230mJ/cm^2 和 265mJ/cm^2 之間，觀察圖 4.12(b)雷射退火後的 SEM 照片中很明顯的看得出來，複晶矽晶粒的尺寸顯著的增加至 600nm ，但同時也發現晶粒中有一些不連續的晶界 (缺陷)。我們同時也利用 TEM 及其繞射圖形觀察此高品質的多晶矽薄膜，如圖 4.13 所示，結果發現此種大的多晶矽晶粒的確擁有很好的結晶性。

我們相信在此能量密度範圍，大部分的非晶矽及小的矽晶粒會被熔融再結晶，然而，較大的晶粒會部分熔融並且本身當作核而進行成長，如圖 4.12(a)的 NILC 多晶矽 SEM 照片中用點線所描繪的大的晶粒 (當作結晶核)，而其週遭的小晶粒及非晶矽的區域就會被熔融，而與原來當做結晶核的晶粒形成更大的結晶晶粒如圖 4.12 (b) 所示。如圖 4.14，表示在此雷射能量密度下結晶的成長行為示意圖。接下來解釋為什麼晶粒會合併成大的晶粒。

圖 4.13(a) 的 TEM 照片中尺寸為 600nm 的大晶粒是由於針狀結晶幾何合併所形成的。幾何合併簡單的解釋就是鄰近的兩個晶粒在晶粒成長過程中其相對的角度較小，兩個晶粒間的晶界會在成長過程中消失而且意外的發展成大的晶粒 [102]。這種幾何合併在晶粒具有強烈的優選取向 (preferred orientation) 時是一個很重要的現象。在我們的研究中，NILC 晶粒有一個 $\langle 111 \rangle$ 的優選取向而且 Si 和 NiSi_2 的晶格匹配 (misfit) 差異只有 0.4% [20]。當結晶時，任何移動較慢的 nodules 在移動一段很短的距離後會很快的被捕獲 (trapped) 在 Ni 鍍覆的區域邊，留下的只有在結晶前面快速移動的 nodules [103]，由於 NILC 晶粒擁有一個強烈的優選取向 $\langle 111 \rangle$ ，如圖 4.12(a)所示所以幾何合併很容易發生。然而 ELA 從熔融溫度到室溫的冷卻 (cooling) 速率是非常快的 [104]，並沒有足夠的時間進行平衡，因此，此 NILC-ELA 幾何合併的晶粒並不是很完美。在幾何合併所形成的晶粒中仍然會發現不連續的晶界如圖 4-12(b)所示，另外，此不連續晶界形成的另一

個原因也許是在熔融固化過程中 NiSi_2 的聚集所造成的缺陷。

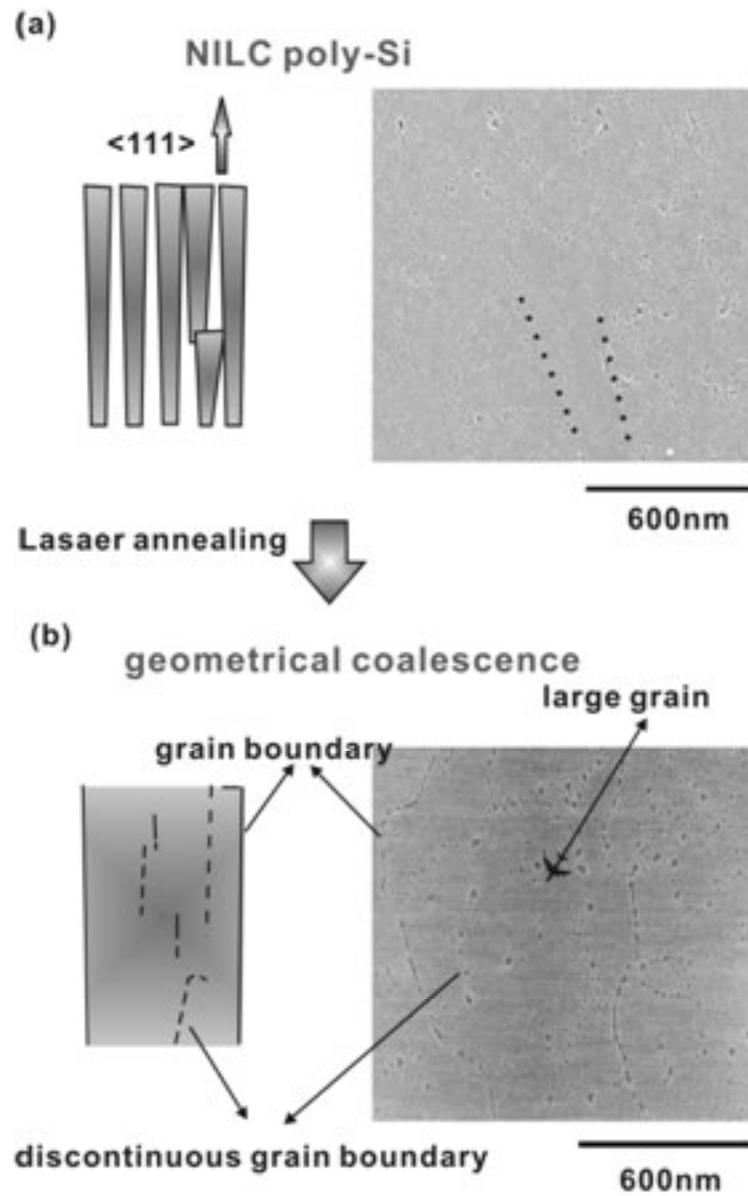
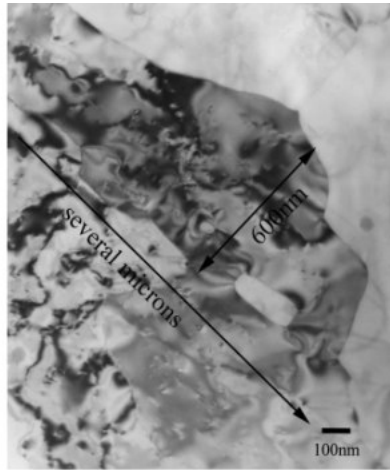
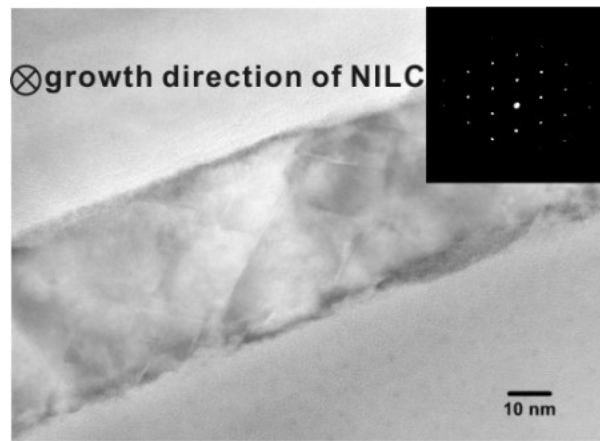


圖 4.12 幾何合併形成說明的示意圖及其晶粒合併的 SEM 影像



(a)



(b)

圖 4.13 幾何合併晶粒的(a)TEM 影像及(b)其截面圖和繞射圖形。此圖說明了幾何合併晶粒具有好的結晶性

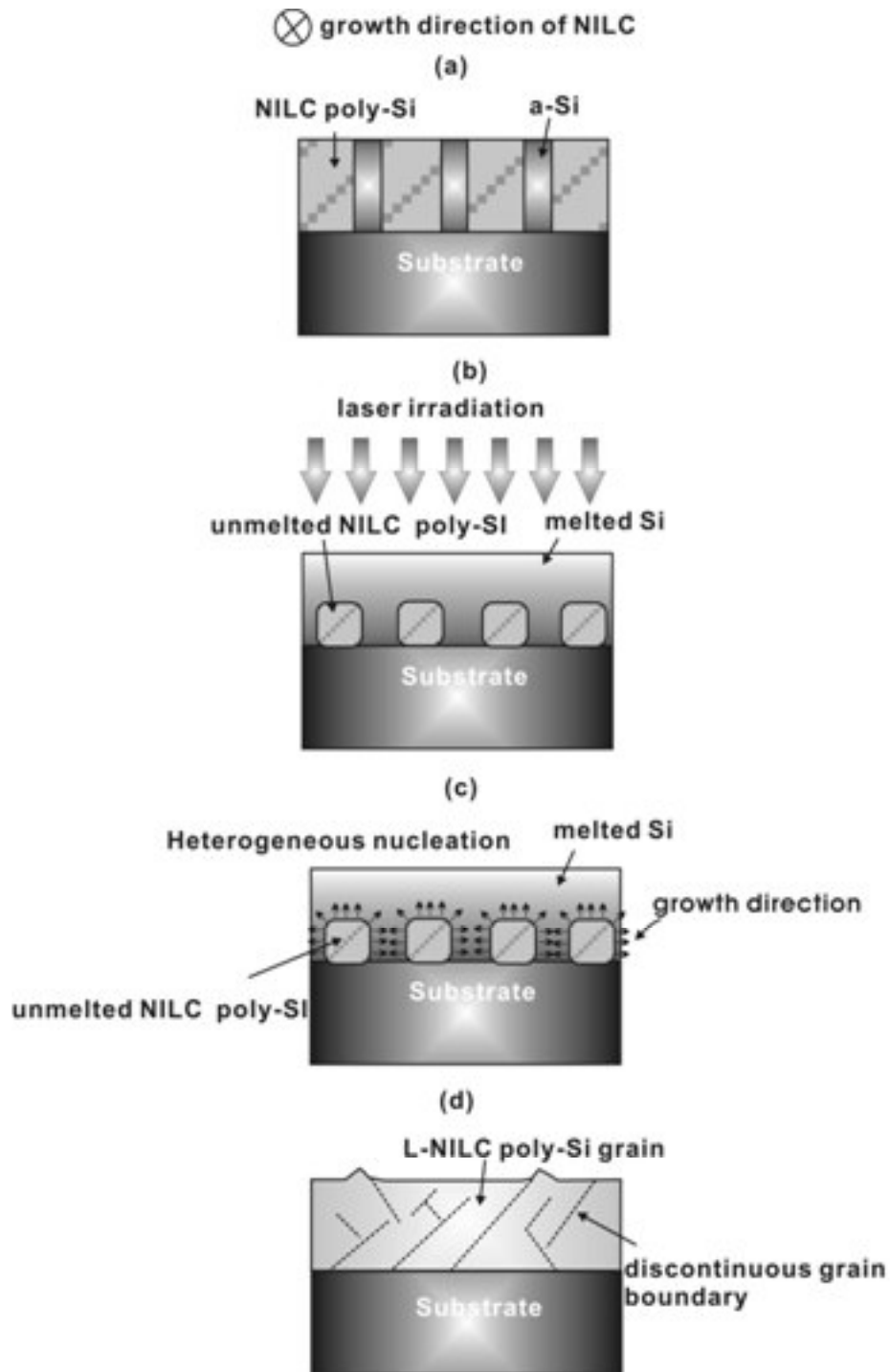


圖 4.14 NILC-ELA 在幾何合併區域的晶粒成長過程 (a)雷射退火前的 NILC 薄膜，(b)雷射照射後非晶矽熔融及小晶粒完全熔融，而大晶粒則部分熔融，(c)以大晶粒為核向外成長，(d)幾何合併晶粒形成，晶粒內有些不連續晶界產生

(2) 完全熔融區域 (Complete melting regime)

然而，當雷射能量密度超過 295mJ/cm^2 時，晶粒形狀變成等向性而且晶粒較小 如圖 4.15 所示，這是因為原來的 NILC 晶粒已完全被熔融，所以結晶方式是以均質成核 (homogeneous nucleation) 的方式形成並成長，示意圖如圖 4.16 所示。

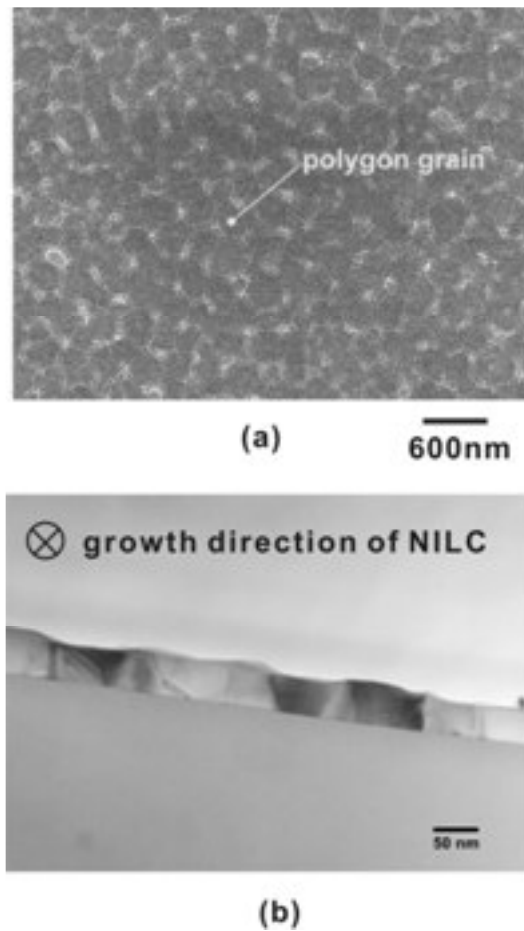


圖 4.15 在完全熔融區域的多邊形晶粒影像(a)SEM 照片 (b)橫截面的 TEM 照片。晶粒變成等向性而且尺寸較小

⊗ growth direction of NILC

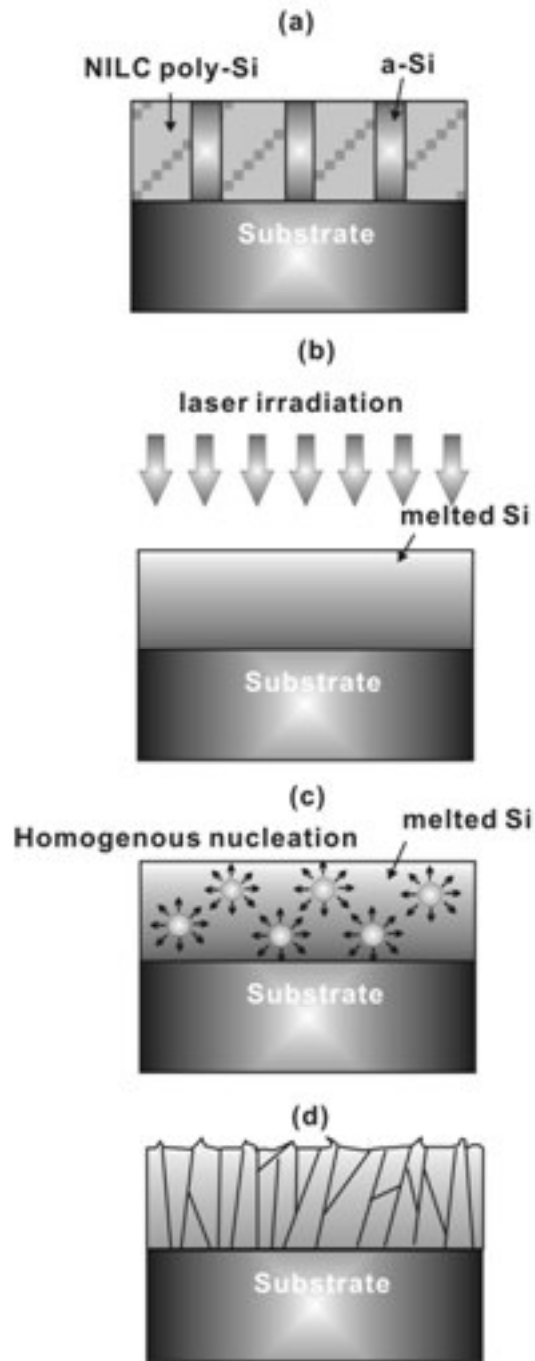


圖 4.16 NILC-ELA 在熔融區域成長過程的示意圖 (a)雷射退火前的 NILC 薄膜 (b) 在雷射照射下全部的膜都熔融 (c) 小的晶粒經由均質成核形成 (d) 晶粒形成的側視圖

4.3.2.2 結論

在此先做個小小的結論，利用 SEM、TEM 及 AFM 來觀察鐳誘發結晶 (NILC) 結合雷射修補技術的複晶矽膜的結晶成長機制，將討論的結果以圖 3.16 的示意圖表示。從不同的雷射能量密度對複晶矽膜再結晶的影響發現兩個結晶機制。(A)非晶矽熔融區域及(B)非晶矽和多晶矽熔融區域。當能量低於 200mJ/cm^2 ，NILC-ELA 膜位於非晶矽熔融區域，此區域只有非晶矽會被熔融結晶。而得到的多晶矽晶粒形狀和 NILC 的晶粒相似仍為針狀。

當能量密度達到 230mJ/cm^2 以上，非晶矽及多晶矽都會被熔融，所以達到了 a-Si/poly-Si 區域。由此區域所得到的結晶情形又可將此區域分成兩個結晶範圍。(1) 幾何合併區域 (geometrical coalescence regime) 及(2)完全熔融區域。當雷射能量密度介於 230mJ/cm^2 and 265mJ/cm^2 時，大部分的非晶矽會被熔融及一些較小的晶粒會被熔融，而較大的晶粒就當作核，而從此大晶粒向外成長。此能量密度區域所形成的晶粒尺寸顯著的增加，晶粒的大小約為 600nm 。然而當能量大於 295mJ/cm^2 時，到了會讓 NILC 膜完全熔融區域。這時多晶矽膜的再結晶就是利用均質成核的方式結晶成長，因而此區得到晶粒是等向的 (isotropic) 而且較小。

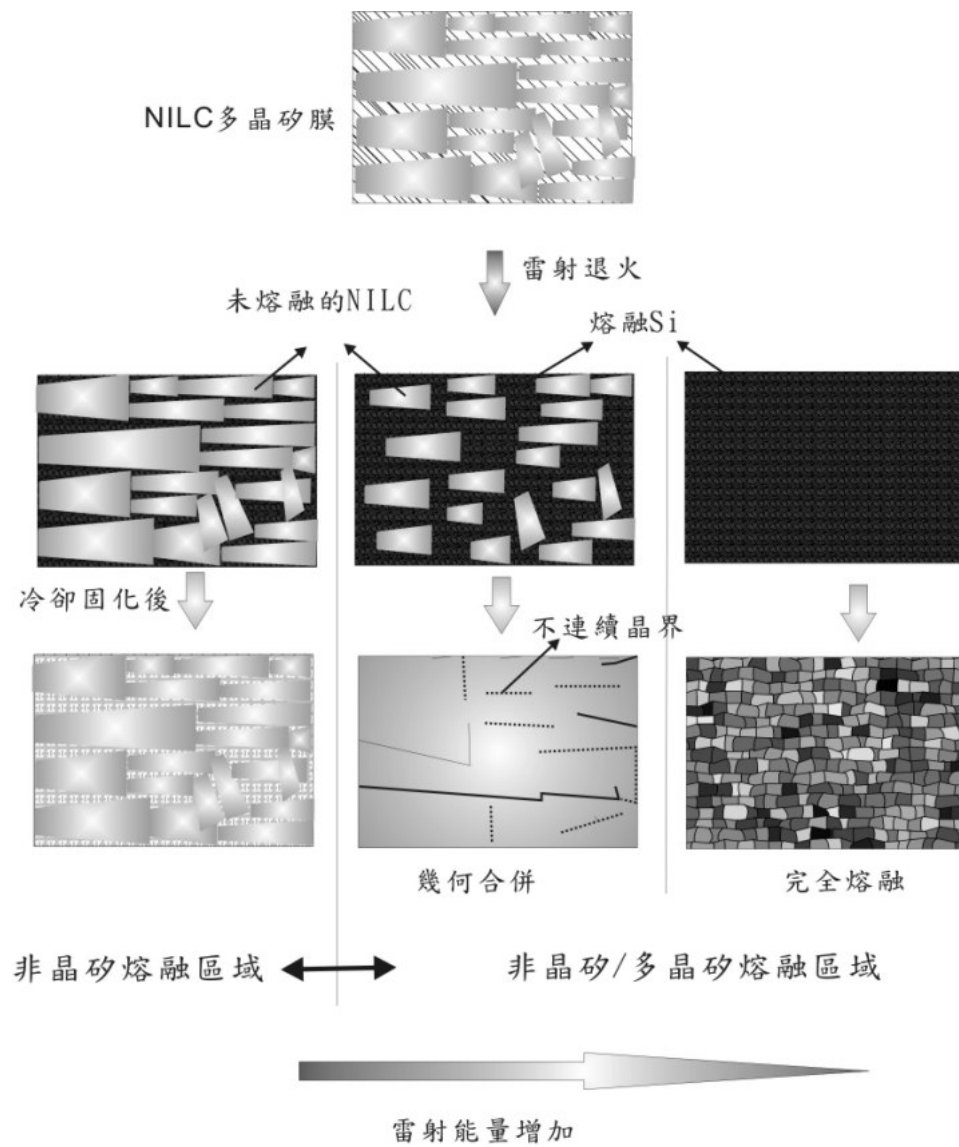


圖 4.17 500Å 的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的結晶機制整理示意圖

4.3.2.3 NILC 多晶矽厚度 1000Å

圖 4.18~4.24 的 SEM 照片是膜厚 1000Å 的 NILC poly-Si 經由 laser 退火後的結果，雷射能量範圍 $280\text{mJ/cm}^2 \sim 380\text{mJ/cm}^2$ 。由圖 4.19~4.20 的 SEM 照片中可以看的出來，晶粒的尺寸明顯的增加，但是晶粒中仍有些不連續的晶界存在，這表示已經到了幾何合併大晶粒的能量範圍。如前面 NILC poly-Si 為 500Å 所討論的，此能量密度範圍的結晶機制為較小的晶粒及非晶矽區會完全熔融，而大晶粒會部分熔融，由此大晶粒當作核進行晶粒成長。由圖中觀察到其晶粒尺寸隨著能量密度增加而增加，能量密度為 300mJ/cm^2 時，晶粒寬度增加到 $1.2\mu\text{m}$ 左右，而當能量增加到 320mJ/cm^2 ，晶粒寬度到達 $1.5\mu\text{m}$ 。但是雷射能量到了 340mJ/cm^2 以上時，晶粒尺寸及型態明顯改變，由圖 4.21 發現晶粒寬度驟降到 300nm 左右，也同時有較小的晶粒產生，這是因為已經到了完全熔融區域，而此時是利用均質成核的方式進行結晶成長。

接下來觀察一下這些 NILC-ELA poly-Si 膜的表面型態，圖 4.24 及 4.25 為不同能量密度的 NILC-ELA 多晶矽膜的 AFM 影像及 3D 圖，由圖中可明顯的比較出來其晶粒型態，在 280mJ/cm^2 能量密度範圍，其晶粒形狀仍然是針狀，能量在 $300\text{mJ/cm}^2 \sim 320\text{mJ/cm}^2$ 時，一些角度相近的針狀晶粒合併成大晶粒，而形成幾何合併的大晶粒。但是能量到達 340mJ/cm^2 時，這時的能量密度已經會造成部分區域完全熔融，而形成許多的小晶粒，所以晶粒大小不均勻，而能量到達 360mJ/cm^2 以上時，晶粒呈現多邊形狀的小晶粒，表示此能量已使 NILC poly-Si 完全熔融。而將每個 NILC-ELA 多晶矽膜的 Rms 整理如圖 3.24 所示，其隨著雷射能量密度增加，Rms 跟著增加，尤其在完全熔融區域的 Rms 明顯的增加，這是因為此區域以均質成核的方式結晶成長，所以晶粒較小而造成晶界較多，所以 NILC-ELA 膜的表面平均粗糙度提高，而表面粗糙度最低的是在幾何合併區，即雷射能量 300mJ/cm^2 時所得到的結晶。

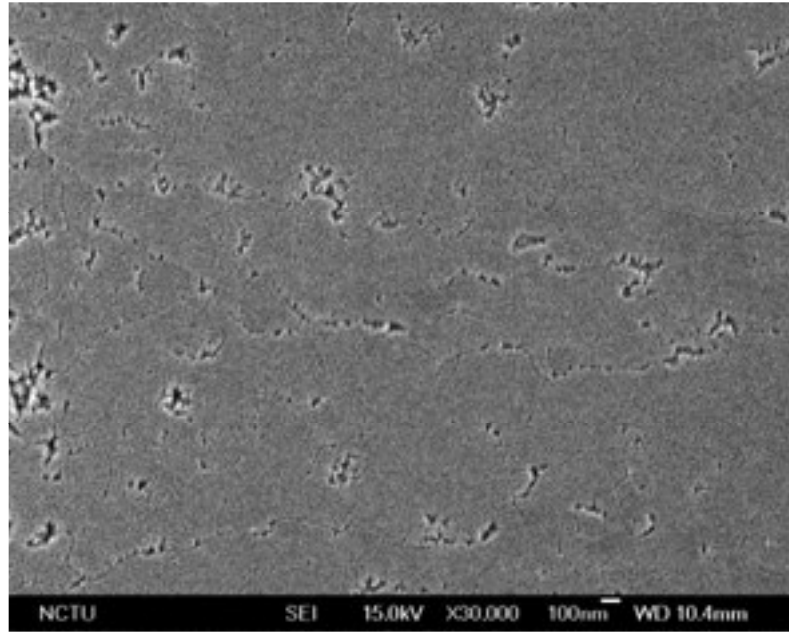


圖 4.18 NILC-ELA 多晶矽薄膜 (雷射能量密度 $280\text{mJ}/\text{cm}^2$)

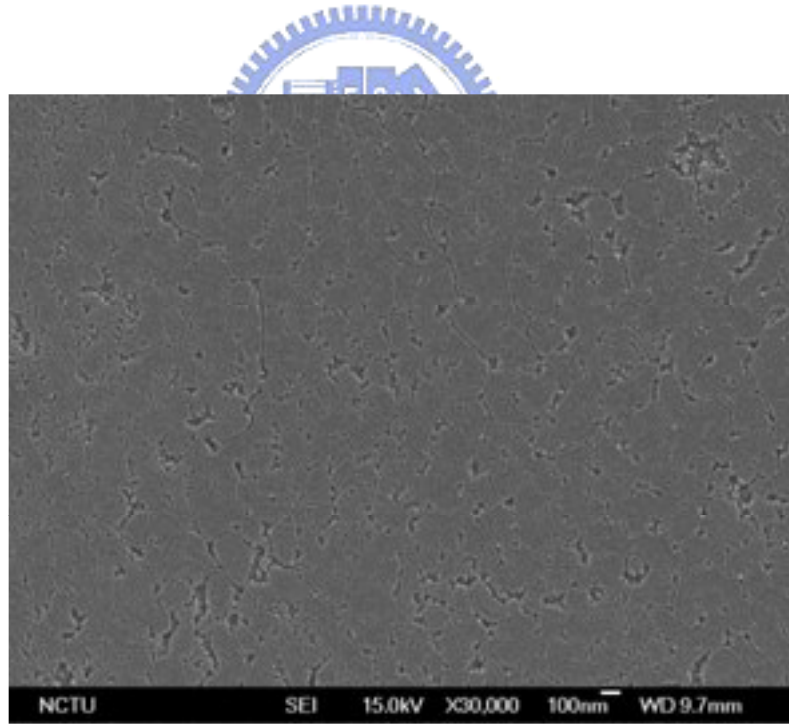


圖 4.19 NILC-ELA 多晶矽薄膜 (雷射能量密度 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$)

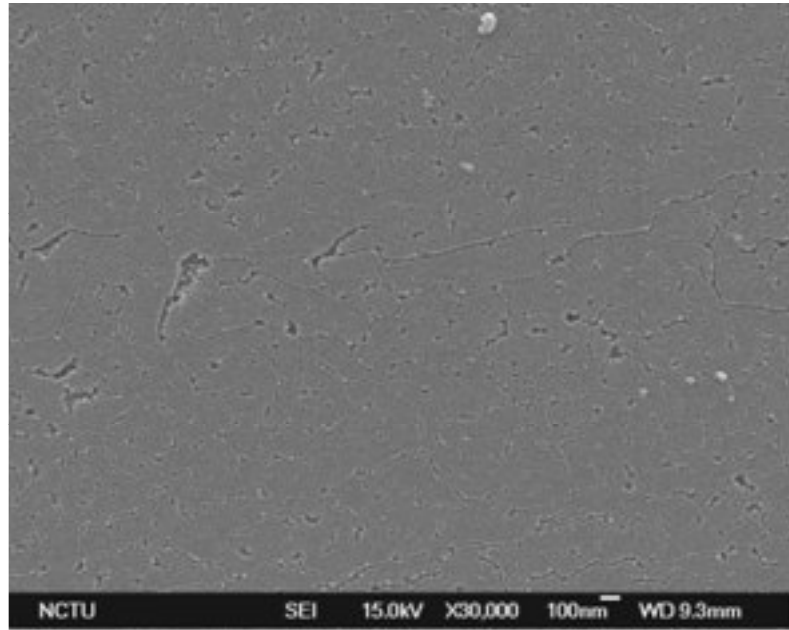


圖 4.20 NILC-ELA 多晶矽薄膜 (雷射能量密度 $320\text{mJ}/\text{cm}^2$)

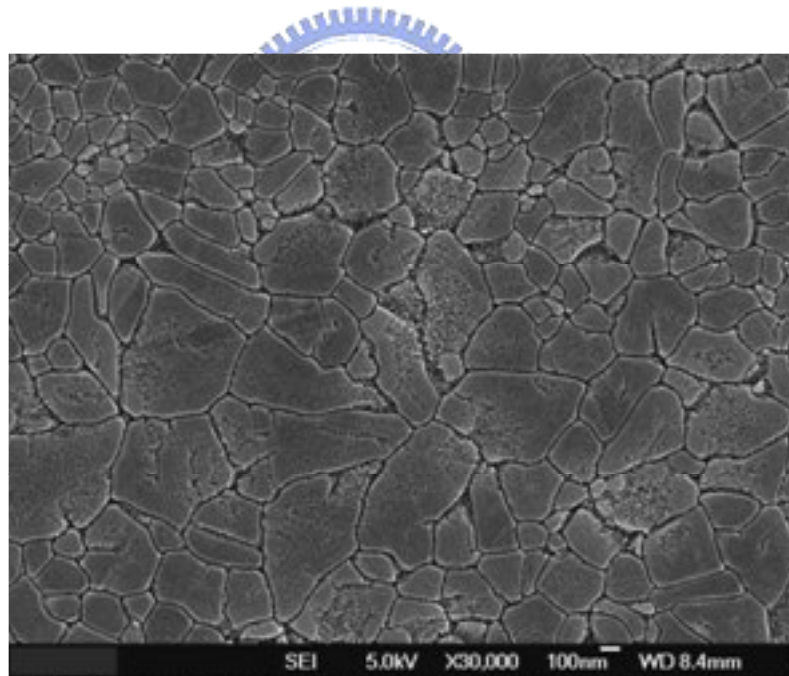


圖 4.21 NILC-ELA 多晶矽薄膜 (雷射能量密度 $340\text{mJ}/\text{cm}^2$)

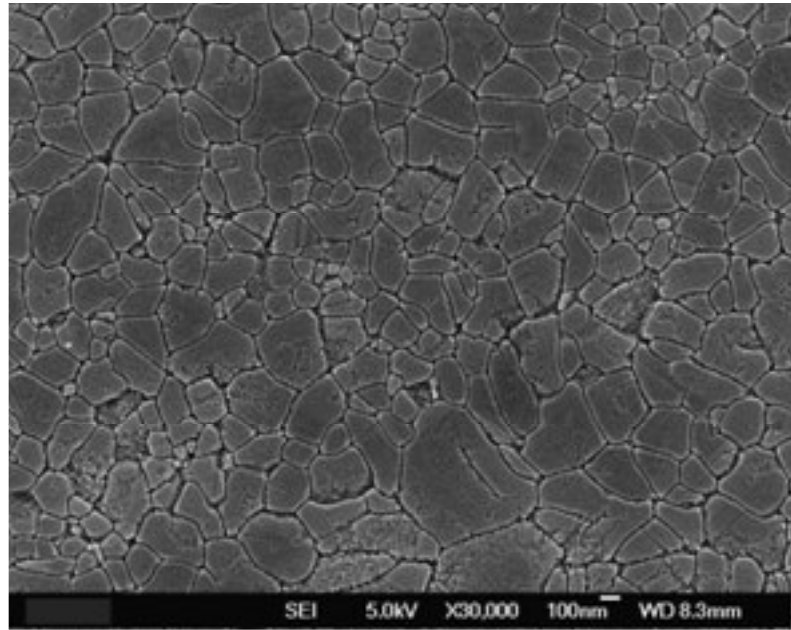


圖 4.22 NILC-ELA 多晶矽薄膜 (雷射能量密度 360mJ/cm²)

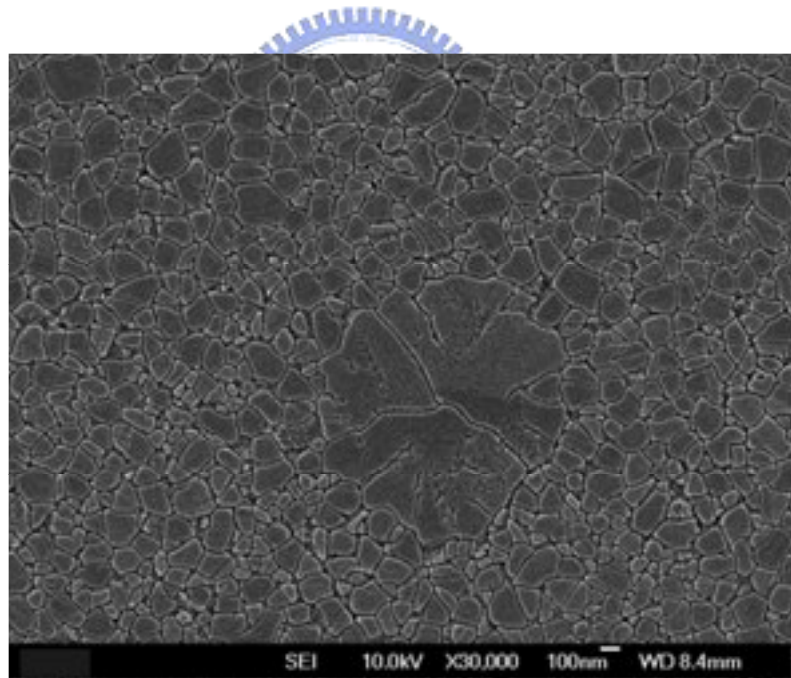


圖 4.23 NILC-ELA 多晶矽薄膜 (雷射能量密度 380mJ/cm²)

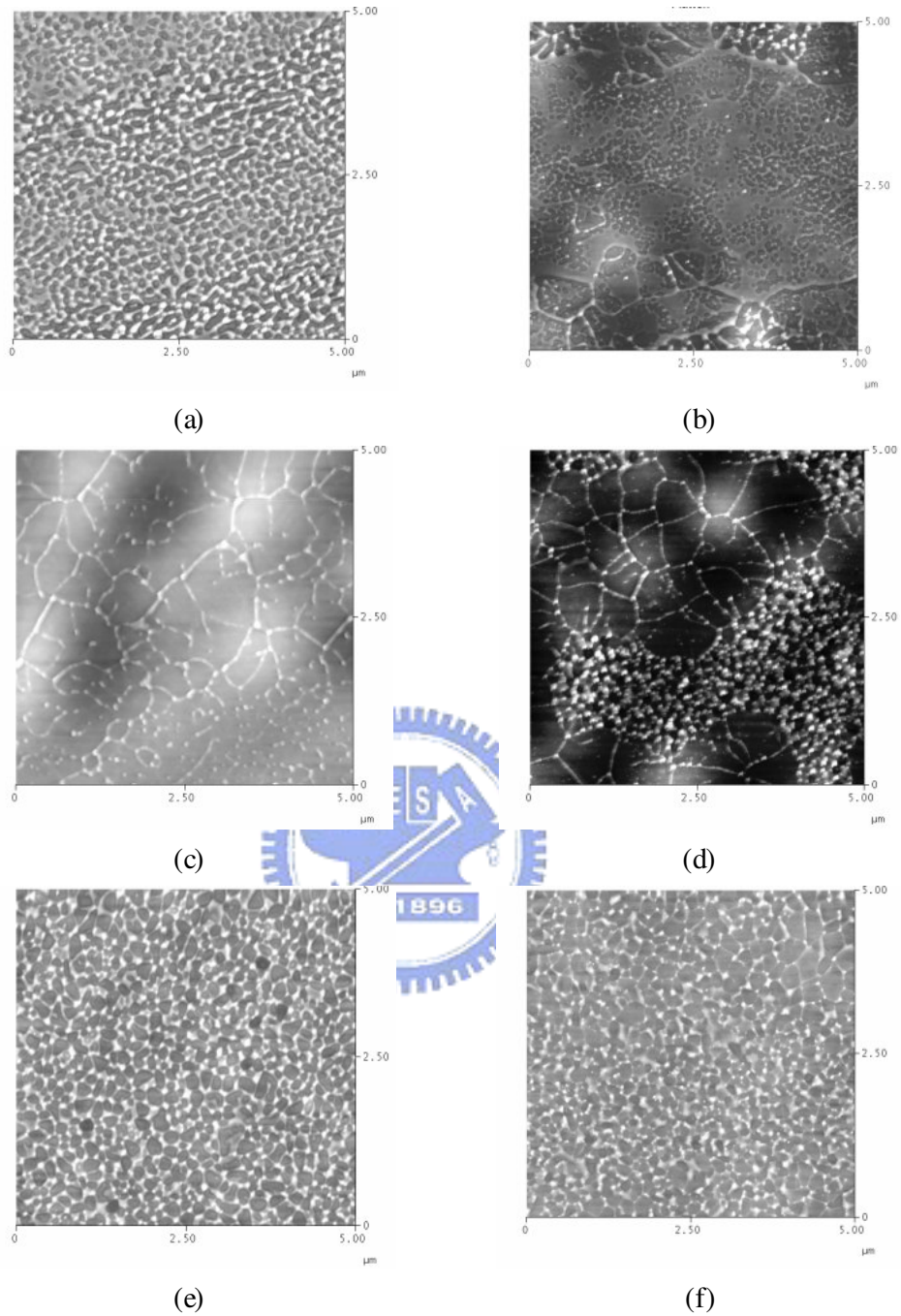


圖 4.24 1000Å 的 NILC-ELA 多晶矽薄膜表面的 AFM 影像，雷射能量為(a)280 mJ/cm^2 ，(b)300 mJ/cm^2 ，(c)320 mJ/cm^2 ，(d)340 mJ/cm^2 ，(e)360 mJ/cm^2 ，(f)380 mJ/cm^2

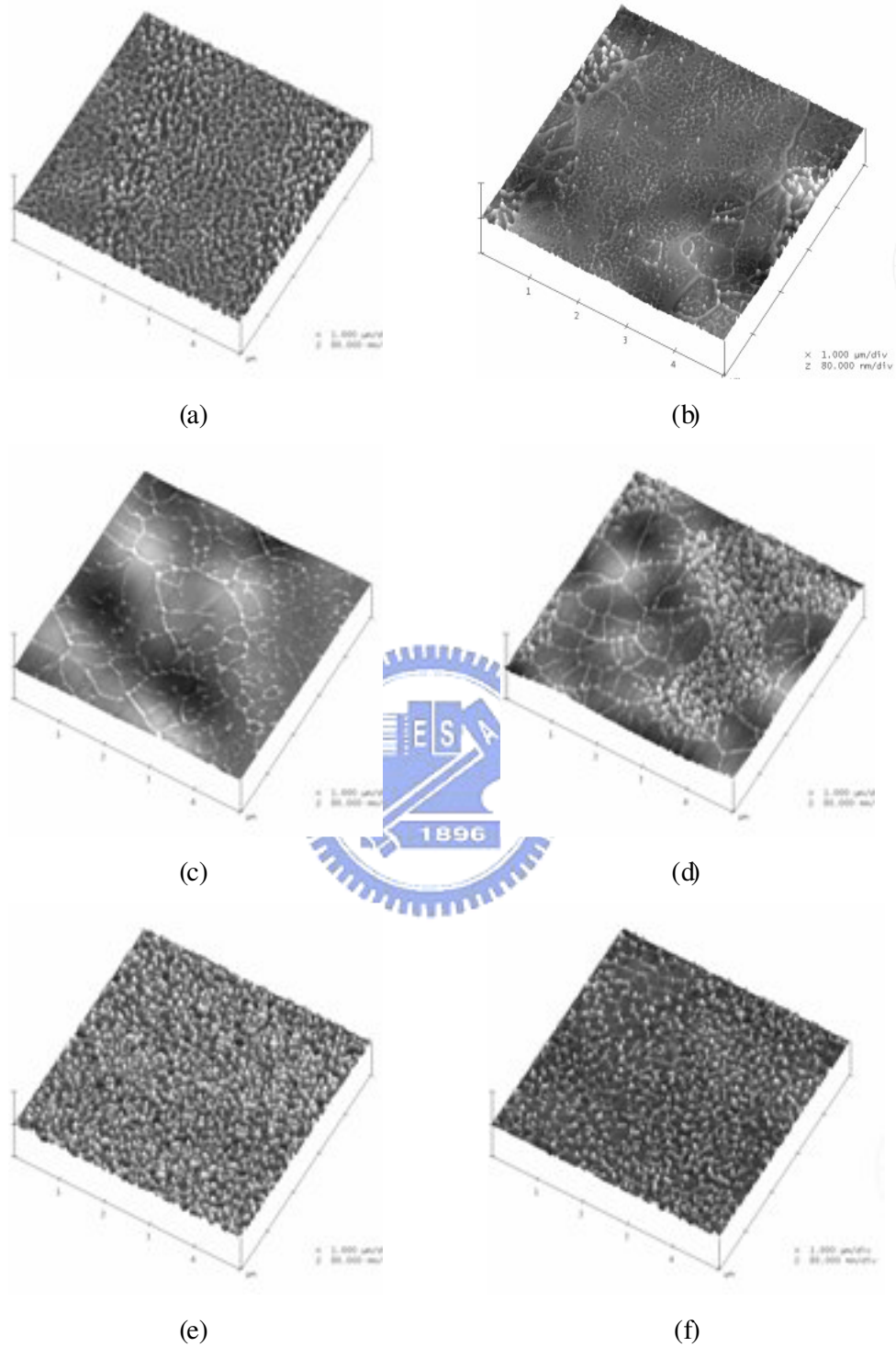


圖 4.25 為 1000Å 的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的表面型態的 3D 立體圖，(a)280 mJ/cm²，(b)300 mJ/cm²，(c)320 mJ/cm²，(d)340 mJ/cm²，(e)360 mJ/cm²，(f)380 mJ/cm²

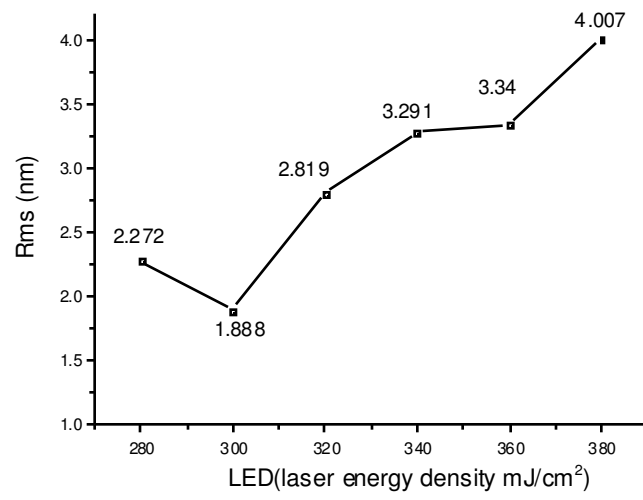


圖 4.26 不同雷射能量密度的 1000\AA NILC-ELA poly-Si 膜的表面粗糙度



4.3.2.4 NILC 複晶矽厚度 1500Å

圖 4.27~4.32 為 1500Å 厚的 NILC-ELA 膜的 SEM 照片，其雷射能量密度範圍從 $330\text{mJ/cm}^2 \sim 430\text{mJ/cm}^2$ ，由圖中可發現其結晶機制在能量密度為 330mJ/cm^2 以下時為非晶矽熔融區域，只有針狀結晶周圍的非晶矽會在此區熔融而結晶成長。幾何合併區域開始的能量密度為 350mJ/cm^2 ，如圖 4.28，晶粒明顯的變大。而能量增加到 370mJ/cm^2 時，其已有完全熔融的小晶粒產生，而能量到達 390mJ/cm^2 時，其幾何合併晶粒內的不連續晶界大部份已被消除，而且晶粒尺寸已經達到 super lateral growth 的大小，但是有些細小的晶粒出現。當能量增加到 410mJ/cm^2 時，晶粒已經變成多邊形形狀的晶粒，晶粒尺寸明顯變小，如圖 4.31 所示，此時能量已可讓整個 NILC 膜熔融而以均質成核的方式結晶，而當能量增加到 430mJ/cm^2 ，晶粒又更小，這表示成核點太多，讓每一個晶粒成長空間受限。

圖 4.33 是 1500Å 的 NILC-ELA 膜在不同雷射能量密度下的 AFM 表面型態，而圖 4.34 為 3-D 立體圖，由圖中可明顯的看出來雷射能量較低時，晶粒較大且表面較平整，尤其到了幾何合併區域表面粗糙度明顯降低。而能量增加到 390mJ/cm^2 時有細小晶粒出現，當能量到達 410mJ/cm^2 時晶粒變為多邊形小晶粒，表面的粗糙度增加。圖 3.34 為不同雷射能量的 NILC-ELA 膜的表面粗糙度的統計圖，由圖中可以看得出來在幾何合併階段時的表面粗糙度最小，而在幾何合併區之後，表面粗糙度會隨著能量密度增加而增加。

由之前的討論，不論是 NILC poly-Si 膜厚 1000Å 或是 1500Å，其經過雷射退火的結晶成長機制都和 500Å 的一致，接下來要看看膜厚的不同在 TFT 電性上影響。

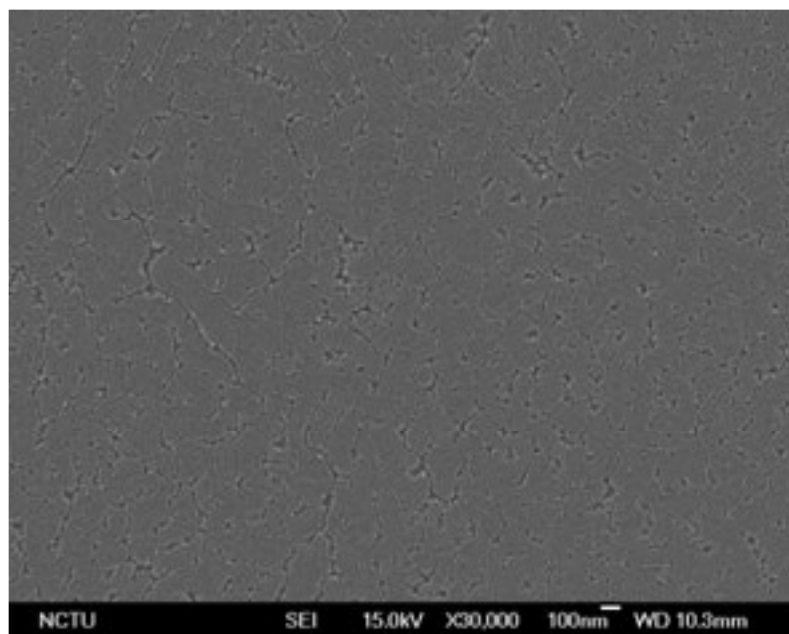


圖 4.27 1500Å 厚的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的 SEM 照片 (雷射能量密度 $330\text{mJ}/\text{cm}^2$)

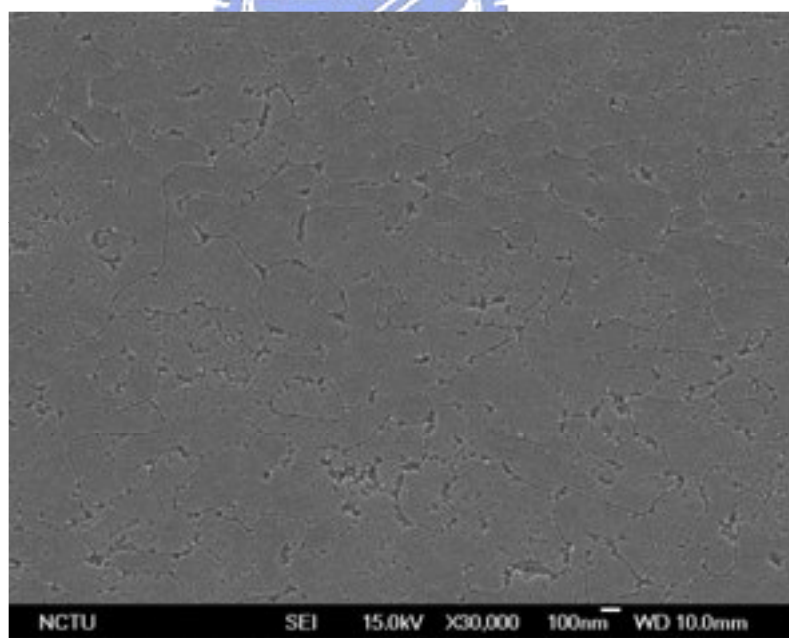


圖 4.28 1500Å 厚的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的 SEM 照片 (雷射能量密度 $350\text{mJ}/\text{cm}^2$)

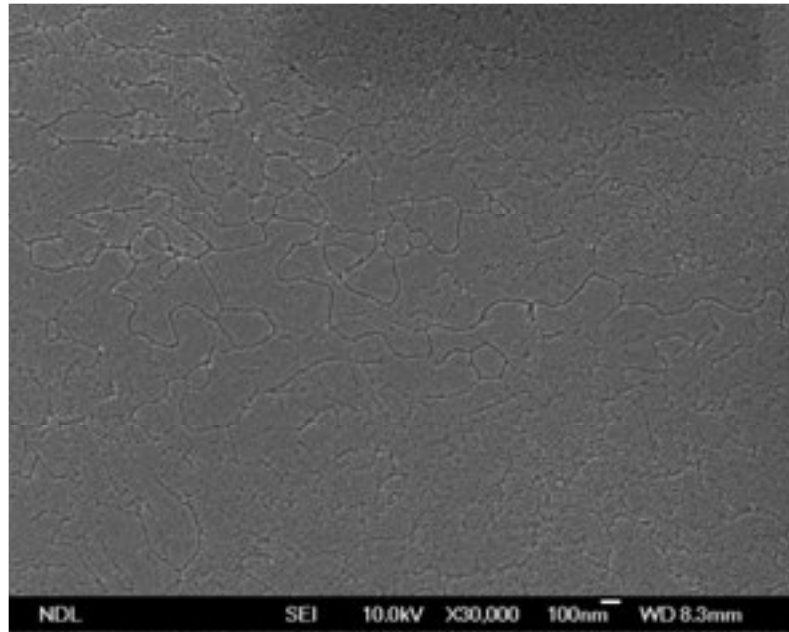


圖 4.29 1500Å 厚的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的 SEM 照片 (雷射能量密度 $370\text{mJ}/\text{cm}^2$)

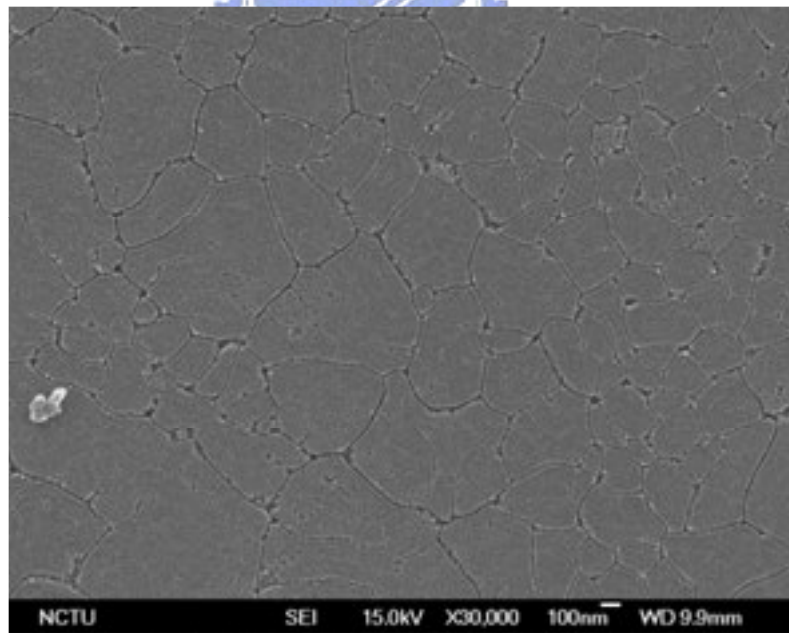


圖 4.30 1500Å 厚的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的 SEM 照片 (雷射能量密度 $390\text{mJ}/\text{cm}^2$)

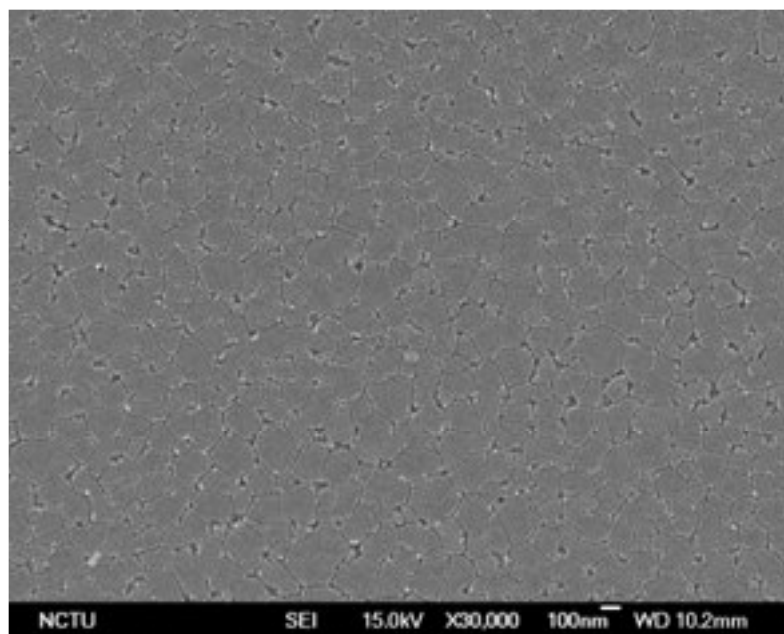


圖 4.31 1500Å 厚的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的 SEM 照片 (雷射能量密度 $410\text{mJ}/\text{cm}^2$)

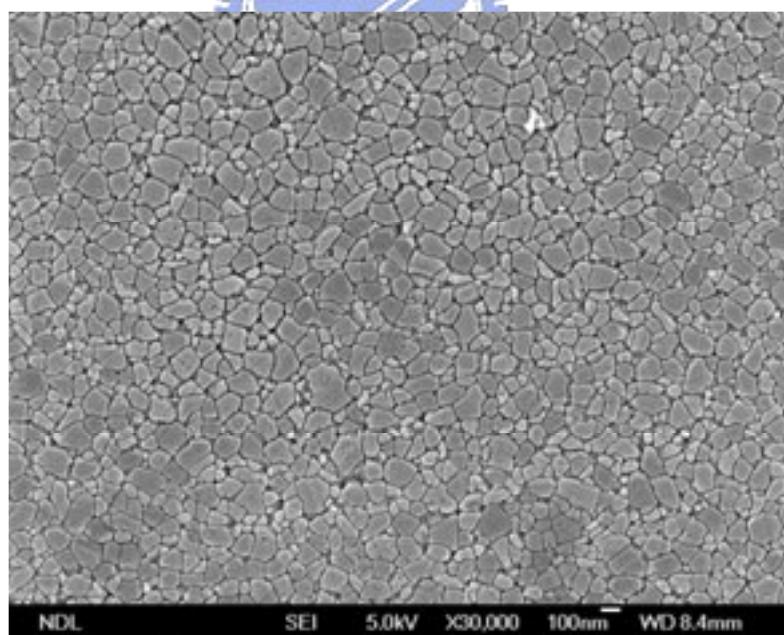


圖 4.32 1500Å 厚的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的 SEM 照片 (雷射能量密度 $430\text{mJ}/\text{cm}^2$)

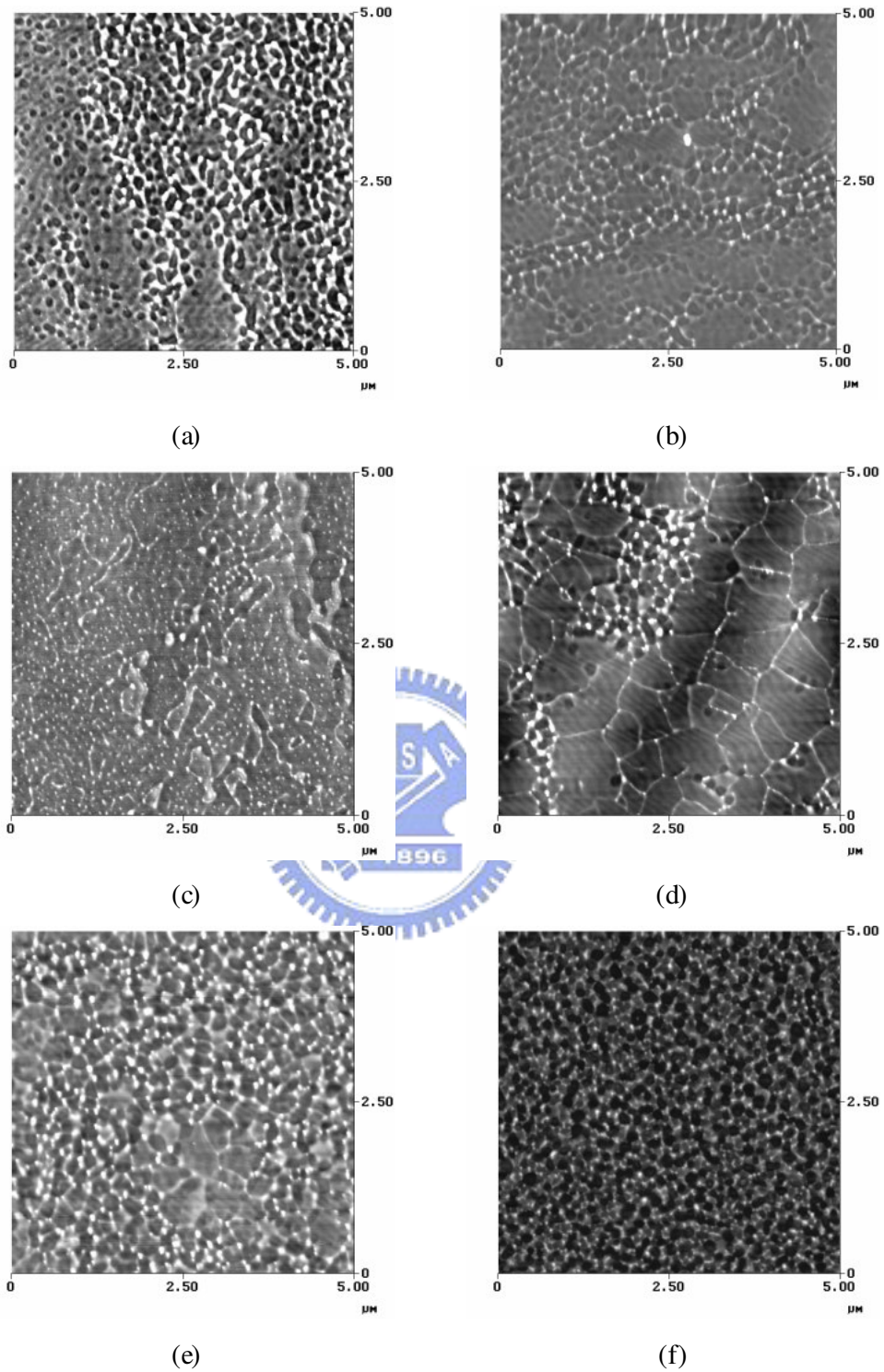


圖 4.33 1500Å 的 NILC-ELA 多晶矽薄膜表面的 AFM 影像，雷射能量為(a)330 mJ/cm^2 ，(b)350 mJ/cm^2 ，(c)370 mJ/cm^2 ，(d)390 mJ/cm^2 ，(e)410 mJ/cm^2 ，(f)430 mJ/cm^2

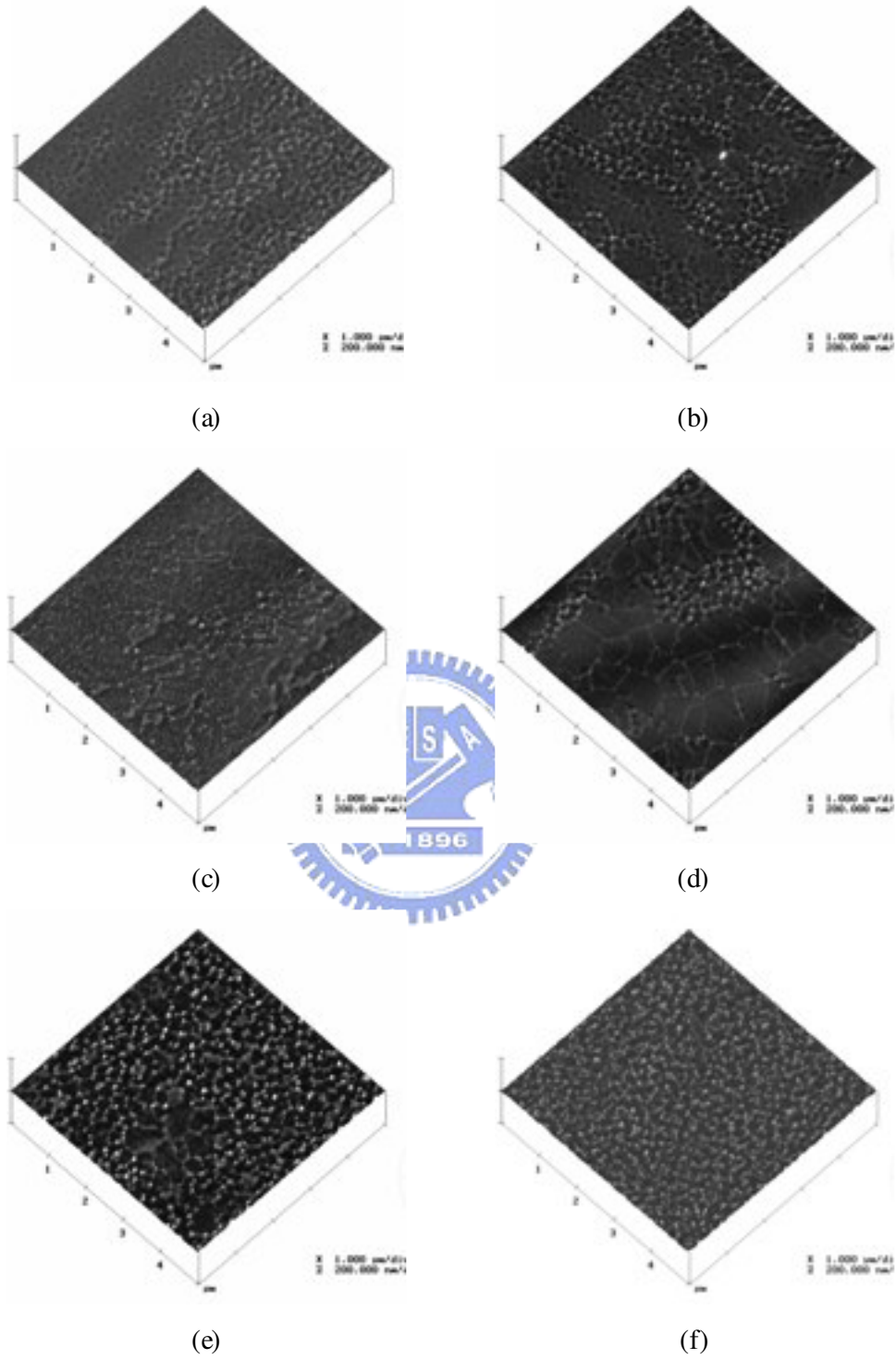


圖 4.34 為 1500\AA 的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的表面型態的 3D 立體圖，(a) 330 mJ/cm^2 ，(b) 350 mJ/cm^2 ，(c) 370 mJ/cm^2 ，(d) 390 mJ/cm^2 ，(e) 410 mJ/cm^2 ，(f) 430 mJ/cm^2

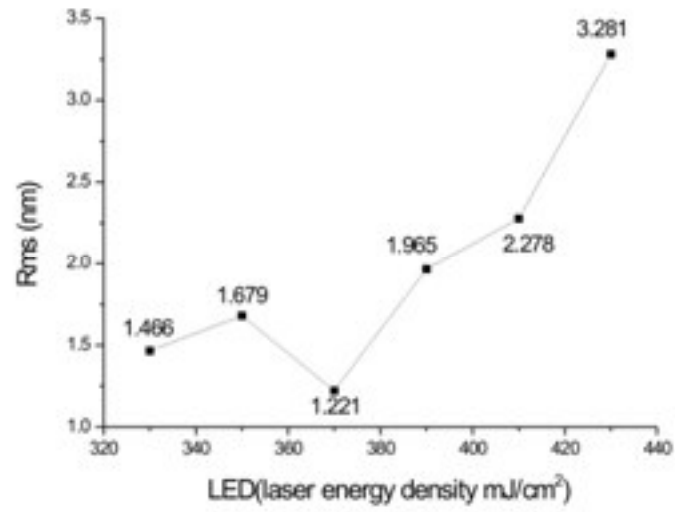


圖 4.35 不同雷射能量密度的 1500Å NILC-ELA poly-Si 膜的表面粗糙度



4.3.3 TFT 元件特性探討

圖 4.36、4.37 是 NILC-ELA 膜厚度為 1000Å 的 TFT 元件的 mobility 及 subthreshold slope 的特性分佈圖，由圖中發現在雷射能量在 300mJ/cm² 時其 mobility 及 subthreshold slope 的分佈較集中，這表示此雷射能量密度所形成的晶粒大小較一致，前面有討論到在能量密度 300mJ/cm²~320 mJ/cm² 都為幾何合併區域，因此晶粒較大，而在能量為 320 mJ/cm²，到達最大，所以在圖 4.36 中可看到此能量密度可得到最大的 mobility，但是分佈蠻分散的，這是因為雖然此能量密度可使晶粒增大，但也足以使部分區域被完全熔融而產生細小的多邊行晶粒，因此造成此區域的晶粒大小差異太大，而造成電性上的不均勻。而當能量大到讓整個膜都熔融時，整個晶粒尺寸都變小，這時因為有太多的晶界存在，而影響載子的傳輸，所以會造成 mobility 變小，而我們也可從圖 4.36 中可看到雷射能量大於 340mJ/cm² 以上時，觀察到 mobility 變小的趨勢。

由前面討論的結果我們得到 1000Å 的 NILC-ELA 複晶矽薄膜的最佳雷射能量密度為 300mJ/cm²，其平均的 mobility 約為 200 cm²/Vs，而其 Id-Vg 曲線如圖 3.37 所示，其一些主要特性整理如表 4.5，起始電壓(Vth)的定義為在 Vds=0.1V 下，|(W/L)×10⁻⁸A| 對應到的匣極電壓 (gate voltage)，而 mobility 則是由在 |Vds|=0.1V 的線性曲線上的 Gm=ΔIds/ΔVgs 所計算而來，在沒有電漿鈍化處理下，可得到 mobility =300 cm²/Vs，Ion/Ioff =3.3×10⁷ 的高效能的 TFT 元件。

表 4-6、4-7 為 500Å 及 1500Å 的 NILC-ELATFT 元件特性，由表中看出能量密度大於 290mJ/cm²(500Å 的 NILC-ELA 多晶矽膜)及 410mJ/cm² (1500Å 的 NILC-ELA 複多晶矽膜) 即到達完全熔融區域之後，元件特性都有下降的趨勢，尤其 mobility，這是因為在此區域的晶粒變小，而造成晶界變多，而晶界處會造成電子的散射 (scattering center)，會阻礙電子的傳輸。而在晶粒幾何合併區域的 TFT 特性是比較好的。但 1500Å 的 NILC-ELATFT 的 Ion/Ioff 都較低，及 subthreshold slope 都較大，這表示其 NILC-ELA 的結晶性較差，漏電流較大，這是因為膜較厚時需較大雷射能量才能進行缺陷修補的動作，而雷射在較高能量下輸出更不易控制，也比較不穩定，因此 1500Å 的 NILC-ELA 多晶矽膜並不適用於 TFT 的製作。

而從 500Å NILC-ELA TFT 元件特性中發現 Vth 偏大(能量密度在 250mJ/cm² 以上)，這表示晶粒缺陷較多，因為當通道缺陷多時需要較大的匣極電壓才能夠填補大量的 traps，而使元件能夠開啟 (turn on)。另外 500Å 的膜厚雷射操作範圍(window)較小不易控制。因此 1000Å 的 NILC 薄膜最適合用來搭配雷射修補以製作高品質的 TFT。

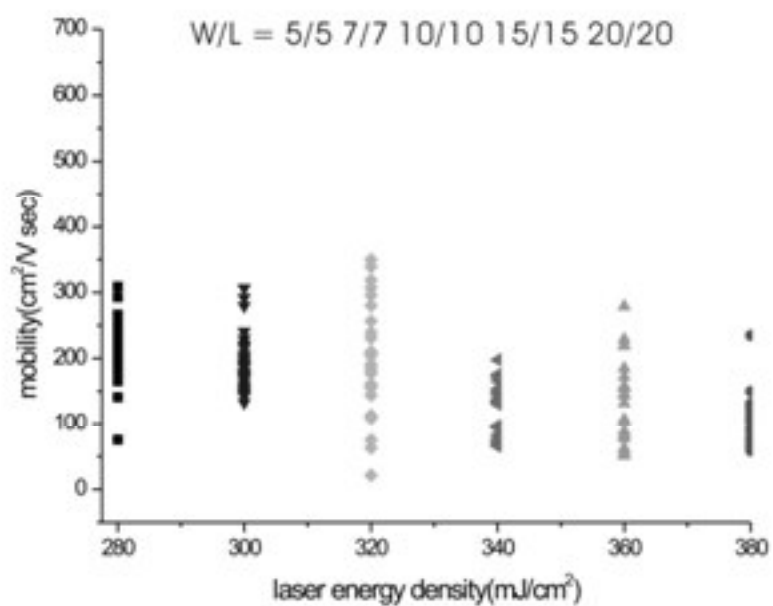


圖 4.36 1000Å 的 NLC-ELA TFT 元件的 mobility 統計圖

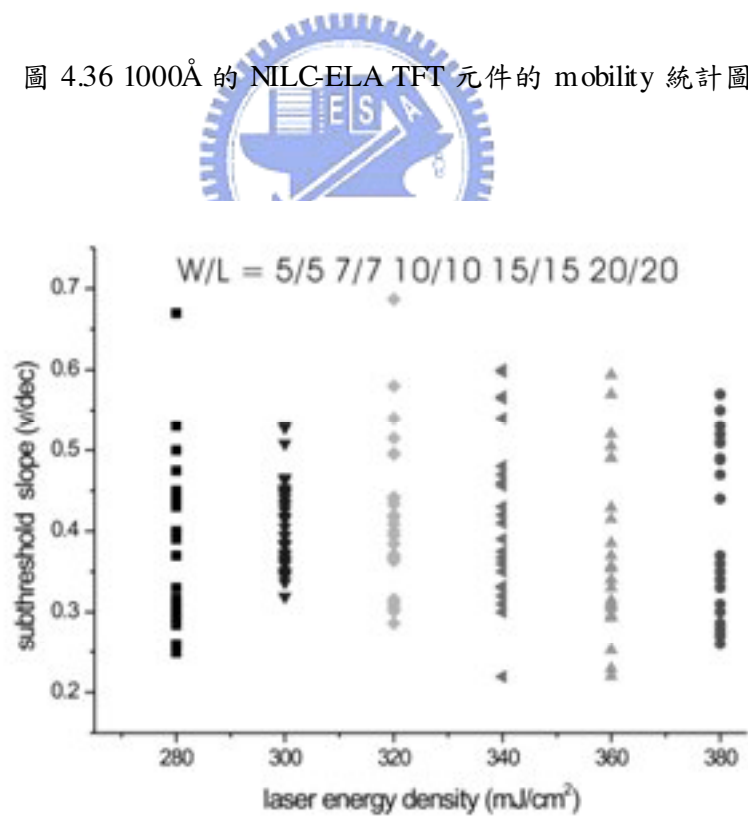


圖 4.37 subthreshold slope 分佈

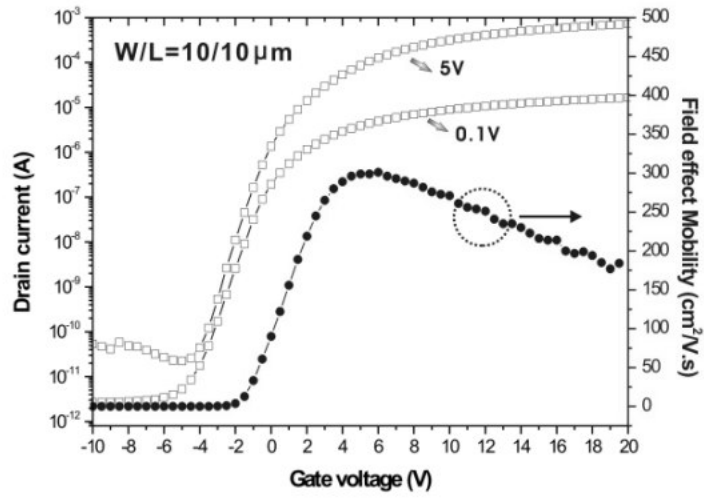


圖 4.38 汲極電流-匣極電壓 (I_d - V_g) 曲線 ($300\text{mJ}/\text{cm}^2$)



表 4.5 雷射能量為 $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ 的 NILC-ELA 多晶矽薄膜的 TFT 特性

W/L=10/10 μm	V_{th} (V)	μ_{FE} ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	S.S (V/dec)	I_{on}/I_{off} ($I_{off, min}$)
$300\text{mJ}/\text{cm}^2$	-1.5	301	0.377	3.3×10^7

表 4-6 厚度為 500Å 不同能量密度的 NILC-ELA TFT 元件特性

W/L=10/10 μm	Vth (V)	μ_{FE} ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	S.S (V/dec)	Ion/Ioff (Ioff,min)
230 mJ/cm^2	0.4	133.69	0.152	5.1×10^6
250 mJ/cm^2	2.7	116.3	0.275	1.9×10^6
270 mJ/cm^2	3.6	128.18	0.39	1.5×10^6
290 mJ/cm^2	5.4	48.14	0.415	9.7×10^6
310 mJ/cm^2	5.4	10.4	0.415	1.9×10^6
330 mJ/cm^2	3.6	11.9	0.3	1.9×10^6

表 4-7 厚度為 1500Å 不同能量密度的 NILC-ELA TFT 元件特性

W/L=10/10 μm	Vth (V)	μ_{FE} ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	S.S (V/dec)	Ion/Ioff (Ioff,min)
330 mJ/cm^2	-2.5	151	0.503	9.1×10^3
350 mJ/cm^2	-2.4	252	0.62	3.7×10^4
370 mJ/cm^2	-2.4	181	0.429	1.8×10^4
390 mJ/cm^2	4.1	117.4	0.677	1.7×10^5
410 mJ/cm^2	3.6	82	0.7	7.5×10^4
430 mJ/cm^2	5.5	50.17	0.676	6.3×10^5

4.4 結論

從不同的雷射能量密度對多晶矽膜再結晶的影響發現兩個結晶機制。(A)非晶矽熔融區域及(B)非晶矽和複晶矽熔融區域。對於 NILC 膜厚為 500\AA 的薄膜來說，當能量低於 200mJ/cm^2 ，NILC-ELA 膜位於非晶矽熔融區域，此區域只有非晶矽會被熔融結晶。而得到的複晶矽晶粒形狀和 NILC 的晶粒相似仍為針狀。

當能量密度達到 230mJ/cm^2 以上，非晶矽及複晶矽都會被熔融，所以達到了 a-Si/poly-Si 熔融區域。由此區域所得到的結晶情形又可將此區域分成兩個結晶範圍。(1)幾何合併區域 (geometrical coalescence regime) 及(2)完全熔融區域。當雷射能量密度介於 230mJ/cm^2 and 265mJ/cm^2 時，大部分的非晶矽會被熔融及一些較小的複晶矽晶粒會被熔融，而較大的複晶矽就當作核而從此大晶粒向外成長。此能量密度區域所形成的晶粒尺寸顯著的增加，晶粒的大小約為 600nm 。然而當能量大於 295mJ/cm^2 時，到了會讓 NILC 膜完全熔融區域。這時複晶矽膜的再結晶就是利用均質成核的方式結晶成長，因而此區得到晶粒是等向的 (isotropic) 而且較小。

NILC 膜厚為 1000\AA 及 1500\AA 時也同時得到和 500\AA 的結晶機制一樣的結果，而且從元件的製造結果發現， 1000\AA 的 NILC-ELA 薄膜電晶體擁有極佳的特性，並且找到最佳雷射能量密度 300mJ/cm^2 ，在雷射能量密度為 300mJ/cm^2 時，不管是 Mobility 或是 subthreshold slop 都可得到較均勻的特性。而 mobility 達到 $301\text{cm}^2/\text{Vs}$ ， $I_{\text{on}}/I_{\text{off}}=3.3\times 10^7$ 。