

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

GaN/GaInN 量子結構及藍紫光雷射二極體研究(2/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2112-M-009-012-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立交通大學電子物理學系(所)

計畫主持人：李威儀

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 6 月 1 日

中文摘要

關鍵詞：氮化鎵，氮化銦鎵，雷射二極體

近年來因為下一代高密度光儲存應用的需求殷切下，波長380nm~470nm之藍紫光雷射二極體越顯重要。但因為材料缺陷密度高影響材料之發光效率、P型材料之阻值高及雷射共振腔所需之劈裂鏡面製作不易等問題，使得藍紫光雷射二極體之發展受到相當大之挑戰。

本研究主要目的是為了克服上述困難，針對解決材料缺陷密度、提升InGaN/GaN發光效率及劈裂鏡面製作等問題進行研究。本年度我們結合MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy)及HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy)磊晶技術研究製作低缺陷密度之GaN材料，作為藍紫光雷射二極體之磊晶基板。研究中我們先使用MOVPE成長約4 μ m之GaN Template材料，接下來我們使用HVPE及facer controlled epitaxially laterally overgrowth (FCELOG)之技術成長100~150 μ m之GaN材料，因為HVPE具有相當高的縱向及側向成長速率，所以我們可以利用此特性達成ELOG之成長。研究中我們藉由調整長晶溫度、壓力及V/III比控制成長晶面，因為不同晶面間之應力不同可以使得線缺陷轉折，所以可以進一步降低材料的缺陷密度。

本計畫目前已經成功在GaN template上成長150~200 μ m之GaN厚膜，並使缺陷密度由 10^9 cm⁻²降至 3.6×10^7 cm⁻²。我們將在此計畫中持續發展製作藍紫光雷射二極體之關鍵技術。

Abstract

Keyword : GaN , GaInN , Laser diode

AlGaInN system of materials has recently become extremely important because of the great potential of 380-470 UV/blue laser applications. However, due to the high densities of defects in epitaxially grown GaN, the high resistance of p-type GaN, along with the difficulties of manufacturing high quality cleaved facets, there are many challenges on the way to the mass production of AlGaInN lasers.

In this study we combine two kinds of epitaxy technology include MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) and HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) to reduce the threading dislocation density. First we use MOVPE to grow 4 μ m-thick GaN film as the template. On the GaN template we use lithography to make the strip patterns. Second HVPE technology was used to grow facet controlled epitaxially laterally overgrowth (FCELOG) thick film to improve the quality of the GaN material. Compare with normal ELOG technology, we controlled the facet of GaN crystal by change the growth temperature, growth pressure and V/III ratio. Because the strain at the interface of different facet is different, the threading dislocation will bend at the interface of different crystal facet. Then the threading dislocation density will reduce. The defect densities have been successfully reduced from 10^{10} cm⁻² to 3.6×10^7 cm⁻².

In summary, in the second year of this study, low defect density GaN films have been achieved. Other key technologies for manufacturing blue laser diodes, and the integration of these technologies, will be developed in the following years.

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中進度報告

GaN/GaInN 量子結構及藍紫光雷射二極體研究(2/3)

計畫編號：NSC 94-2112-M-009-012-

執行期限：94年08月01日至95年07月31日

主持人：李威儀 教授 國立交通大學電子物理研究所

一、前言

因為氮化物三五族半導體具有高能隙之優點，其發光波長可藉由調變 In 元素之組成使發光波長由 360nm~580nm 涵蓋波長範圍極廣，因此成為製作 LED 及 LD 元件最具潛力之材料之一。但是因為 InGaN/AlGaIn/GaN 材料缺乏晶格常數匹配之基板可以成長高品質之薄膜，因此材料中經常存在高密度之缺陷，此高密度之缺陷使得材料之發光效率降低，且因為缺陷之存在也使得光在材料中行進時容易被缺陷所吸收，在這些效應影響下，使得材料之發光效率不佳。

GaN 材料本身具有高缺陷密度，因為這些缺陷呈現 n 型摻雜之型態，所以使得 p-GaN 材料之製作不易，在製作 p 型 GaN 材料時 p-型摻雜必須克服材料本身之 n 型缺陷密度，因此高 p-型 GaN 材料之品質不佳且電阻值偏高，所以如何降低 p-GaN 材料之電阻值降低雷射之起振電流，成為製作 InGaIn/GaN 雷射之重要技術關鍵。

製作 InGaIn/GaN 雷射面臨之另外一個重要課題為如何製作品質良好的劈裂鏡面，因為 GaN 材料本身屬於高能隙的半導體材料，GaN 理論的折射係數為 $n=2.5$ ，因此即使在劈裂面之平整度非常完美的情況下，其反射率都只有 18%，因此其劈裂鏡面之平整度只要有 20nm 之粗糙度就會使的雷射模之反射率下降。但是目前被廣泛用來製作 GaInN/GaN 藍紫光雷射二極體之 GaN 材料其 Al_2O_3 基板為 (0001) 晶面，此一晶面之晶格劈

裂面並不與晶片表面垂直，因此無法利用自然劈裂之方法製作成長在 (0001) Sapphire 上之 GaN 劈裂面，因此如何製作品質良好的劈裂鏡面也是相當重要且有待突破的技術瓶頸。

二、研究目的

本研究之目的在克服 InGaIn/GaN 藍紫光雷射二極體製作上之困難，期望在計畫執行後其研究成果可以建立下列關鍵技術。

- (1) 開發低缺陷密度之 GaN 材料之磊晶技術。
- (2) InGaIn/GaN 量子結構之成長技術及形成機制。
- (3) InGaIn/GaN 共振腔之劈裂鏡面製作技術開發。

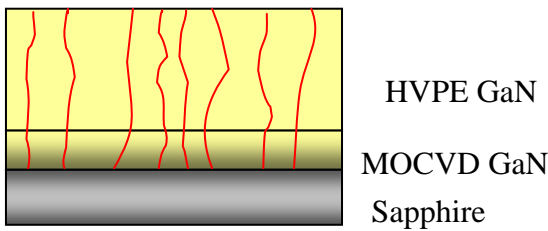
因為我們必須將雷射結構建置在 GaN 材料上，所以獲得低缺陷密度的 GaN 材料為所有關鍵技術之基礎，因此我們今年度之研究重點均著重如何成長低缺陷密度之 GaN 材料上。我們利用 MOCVD 良好的厚度控制性及 HVPE 擁有縱向及側向的高成長速率，兩種磊晶技術的交錯使用，先以 MOCVD 成長高品質之 GaN Template，再利用 HVPE 之高成長速率進行 ELOG 研究。所以本年度之計畫目的期望利用磊晶技術之改良製作出缺陷密度低於 10^7 cm^{-2} 之材料。此一低缺陷密度之 GaN 材料將在下一年度計畫中，使用 MOCVD 來成長 InGaIn/GaN 藍紫光雷射結構。此外此一低缺陷密度之材料亦可用來提升元件之發光效率、可靠性及開發高品質 InGaIn / AlGaIn /

GaN電子元件使用。

三、文獻探討

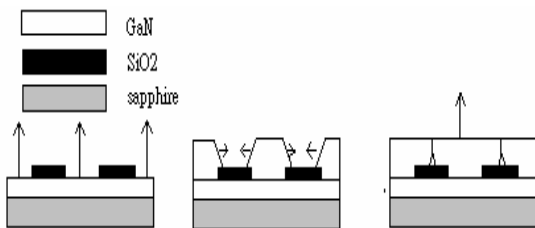
(1) 成長低缺陷密度 GaN 薄膜材料

在異質磊晶下，使得兩介面處的晶格常數不匹配，造成缺陷自界面向上延伸，如圖一所示，在表面產生大量的缺陷濃度，在製作元件時，對於元件的特性及壽命均有相當程度的影響。

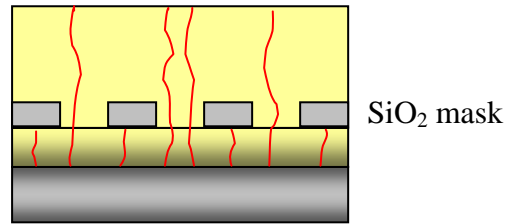


圖一、Dislocation 由 sapphire 與 GaN template 界面處向上延伸

為了有效解決缺陷濃度過大，導入一種利用選擇性成長來限制成長方向，控制側向成長主導的長晶方式，此為Epitaxial Lateral Overgrowth 簡稱ELOG。ELOG成長就是在MOCVD GaN template上利用SiO₂製作條狀或點狀的圖形，此時HVPE在矽化物上就不會成長GaN，而產生磊晶選擇性，利用選擇性成長的特性讓GaN從MOCVD GaN template上往上成長，並且側向成長覆蓋矽化物，如圖二所示。部份缺陷因為矽化物的阻擋，無法向上延伸，如圖三所示，元件壽命自然可以增加，前日亞化學研究員中村修二先生在1997年發表室溫壽命一萬小時的雷射結構便是成長在ELOG製作的基板下。



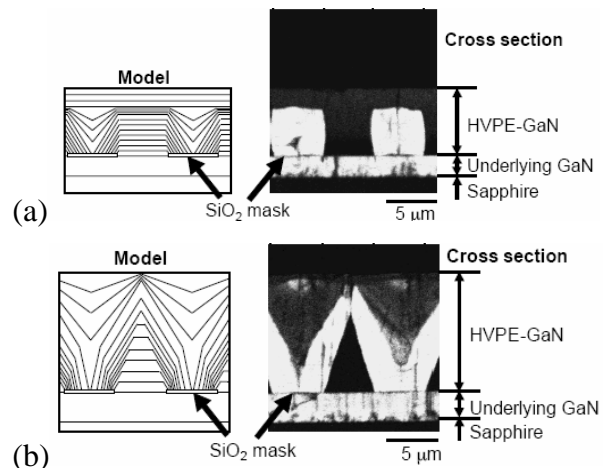
圖二、GaN 先向上成長後，側向覆蓋矽化物，填平後再向上成長



圖三、ELOG 成長後，矽化物能有效阻擋 dislocation 向上延伸

國外其他研究團隊使用MOCVD或HVPE成長GaN，其量測所得之缺陷濃度約超過 10^8cm^{-2} 以上，則有部分團隊使用ELOG法成長GaN厚膜可得低於 10^8cm^{-2} 之缺陷濃度。

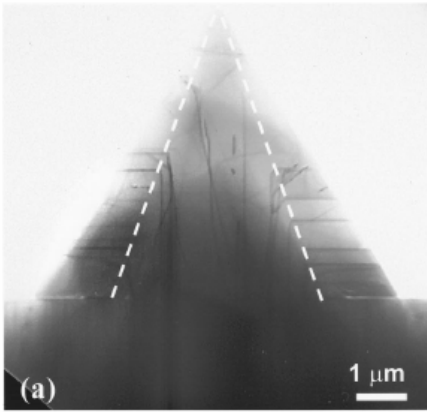
在Mie University的論文裡得知該團隊使用HVPE與ELOG法成長GaN，ELOG條紋mask與window寬度皆為 $5\mu\text{m}$ ，載氣分別為純氮氣與 $\text{H}_2:\text{N}_2=1:1$ ，成長機制如圖四(a)、圖四(b)



圖四、(a)載氣為純氮氣下成長。(b) 載氣為 $\text{H}_2:\text{N}_2=1:1$ 下成長

此實驗結果可得知在純氮氣下成長的缺陷濃度約為 $1.74 \times 10^8\text{cm}^{-2}$ ，而在 $\text{H}_2:\text{N}_2=1:1$ 下成長的缺陷濃度約為 $2.4 \times 10^7\text{cm}^{-2}$ 。

傳統之ELOG僅使用SiO₂或SiN_x作為遮罩，而產生選擇性之磊晶成長，在本計畫中我們加入晶面控制的ELOG成長方式，藉由磊晶參數的調變使得晶體之成長機制改變，進而使得線缺陷在晶體介面形成轉折（如圖五所示），不至於使覆蓋SiO₂及SiN_x遮罩的部分之線缺陷直接延伸至表面，如此更可降低缺陷密度，提昇材料品質。



圖五、使用 FCELOG 方式磊晶，線缺陷會在晶面處轉折，ref：Vennegues et al. J. Appl. Phys. Vol.87, N0.9 (2000)

四、研究方法

在本計畫中我們結合不同之磊晶技術包括氫化物氣相磊晶(Hydride Vapor Phase Epitaxy, HVPE)及有機金屬氣相磊晶(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE)以獲得低缺陷密度的高品質 GaN 材料，以提昇藍紫光雷射元件之特性表現。因此本年度計畫之執行重點著重在結合 HVPE 及 MOCVD 磊晶技術降低材料之缺陷密度，其研究方法敘述於下：

(1) HVPE 成長低缺陷密之 GaN 材料。

因為 MOCVD 成長速率較慢適合成長需精確控制厚度之結構，若要達成 ELOG 完全覆蓋將需成長 5~10 μm 厚度之 GaN 薄膜，因此將耗費相當高之成本。因此本計畫使用 HVPE (氫化物氣相磊晶技術) 磊晶技術，利用 HVPE 成長速度可達 60~100 $\mu\text{m}/\text{hr}$ 之特性，可以快速使具有 ELOG 圖形之晶片表面接合，所以我們將研究不同磊晶方式以減少材料之缺陷密度。

其主要方法及步驟為先利用 MOCVD 磊晶成長約 4 μm 厚之 Template，再利用 HVPE 做晶面控制橫向成長(FCELOG, facet controlled epitaxially laterally overgrowth) 100~

200 μm 厚度之 GaN 材料。此方法除了因為 SiO_2 遮罩會阻隔 GaN 材料之線缺陷延伸至表面外，我們更利用晶面控制磊晶成長方式讓 SiO_2 以外之區域的線缺陷在晶面控制成長之界面區形成轉折，因此降低線缺陷延伸至材料表面之機率，所以可以有效降低材料中之缺陷密度。

有別於傳統的 ELOG 成長方式，本計畫中在 GaN 橫向成長時，利用長晶參數的控制，包括長晶溫度、壓力及 V/III 比的控制，使 GaN 晶體在成長過程之晶面獲得控制。因為磊晶機制的不同將導致晶格不匹配所產生之應力可以在界面區域獲得釋放，造成缺陷產生轉折，因此延伸至材料表面之線缺陷密度將大幅減少，所以可以有效改善 GaN 材料之品質。

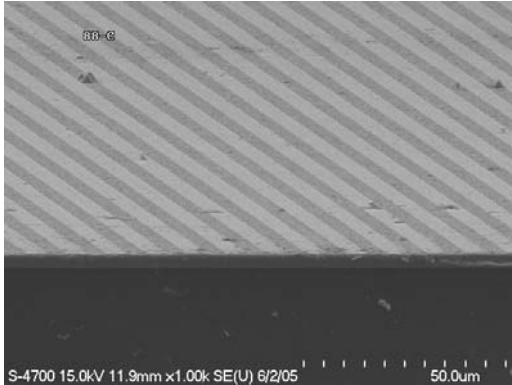
Mie University 的這項實驗可以發現 ELOG 能明顯降低缺陷濃度，且載氣 $\text{H}_2:\text{N}_2=1:1$ 比純氮氣成長的缺陷濃度能夠降低一個 order，這結果給我們一個疑問，如果在純氫氣下成長缺陷濃度能否再下降一個 order？

以下列出本計畫的詳細實驗步驟：

ELOG 圖形，如圖六所示其製作程序如下：

- (a). MOCVD 成長約 4mm 之 GaN 樣版，利用 PECVD 沈積一層約 300nm 的 SiO_2 。
- (b). 塗布 HMDS: 以增加 SiO_2 對於光阻的黏著性。
- (c). 上光阻 (AZ1500): 前段轉速 1500rpm, 5 sec 控制光阻厚度; 後段轉速 5000rpm, 25sec 控制光阻均勻性。
- (d). 軟烤 90°C, 30sec。
- (e). 曝光 5sec。

- (f). 顯影: 顯影液(D35):H₂O= 1:3 搖晃 20sec。
- (g). 定影: DI water。
- (h). 硬烤 2min。
- (i). 蝕刻SiO₂:純BOE 超音波震盪器 1min。
- (j). 去光阻: 丙酮。



圖六、光學顯微鏡下的ELOG條狀圖形

HVPE 成長主要流程如下:

- (a) 把有 ELOG 圖形的基板放置石英 holder 上，送入 500°C 的爐管中
- (b) 通氮氣做 10 分鐘清潔。
- (c) 調整實驗所需參數，載氣全為氫氣，將溫度升至 1050°C。
- (d) 升溫至 1050°C 後，通入 HCl
- (e) 成長時間到後，關閉 HCl，降溫至 500°C 後取晶片。

在研究中我們分別設計不同之實驗，藉以研究在不同的長晶溫度、壓力及 V/III 比下 GaN 的成長機制，以找出最佳的磊晶參數，降低線缺陷密度。

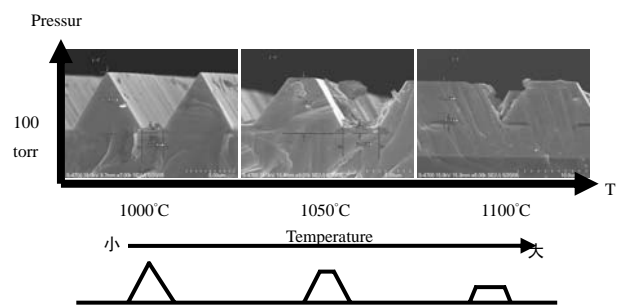
五、實驗與結果

- (1) HVPE 成長低缺陷密之 GaN 材料
在本研究中我們設計不同的成長溫度、壓力及 V/III 比，藉以研究在不同的成長條件下 GaN 材料成長的機制，以找出最佳的晶面控制成長的條件，實現晶面控制成長的 ELOG，其結果討論如下：
 - (a). 變更 GaN 成長溫度

在變更成長溫度的實驗中我們分別固定成長壓力 300 torr 及 100 torr，研究結果中我們發現在相同的成長壓力下，隨著成長溫度的上升，(0001)面的成長逐漸增強，因此在溫度 1100°C 會開始產生(0001)面的平台，如圖七所示。

由此研究結果我們推論在相同成長壓力下高溫的條件因為原子具有較高的動能，因此在磊晶的過程中擁有足夠的能量可以尋找較適合晶格位置，所以橫向成長的速度較快。

我們也嘗試由晶體模型來推論成長機制，因為(11-22)晶面為 N-polarity，在成長溫度較低的條件下 N-polarity 較為穩定，所以易形成(11-22)晶面。當長晶溫度升高時，N-polarity 變得相當不穩定，使得(11-22)較不易維持，所以易形成(0001)晶片，進而產生(0001)晶面的平台。



圖七、在長晶壓力 100 torr 下，改變不同溫度其晶面成長情形之 SEM 圖。

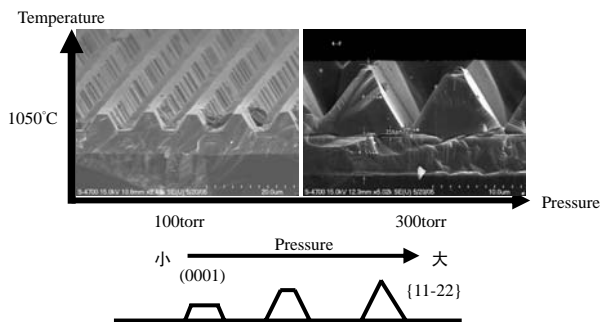
- (b). 變更 GaN 成長的壓力

在變更成長壓力的實驗中，我們固定 1050°C 的成長溫度，變更不同長晶壓力 100 torr 及 300 torr。在這組實驗中，比較 300 torr 與 100 torr 的 SEM

圖形發現，在較低壓力的長晶條件中會形成(0001)晶面的梯形結晶，若將成長壓力提高，因為橫向成長的速率減低，所以只形成錐狀的結晶，如圖八所示。

由此趨勢我們可以得知，在較高的成長壓力下(0001)晶格方向的成長速率高於(11-22)的成長速率，所以形成角錐形狀的結構。若將成長壓力降低，則因為(0001)晶面與(11-22)晶面的速率改變所以形成具有平台的結構。

因為(11-22)晶面為 N-polarity，當成長壓力處於高壓狀況時，因為 N 原子較不易揮發離開晶體表面，所以 N-polarity 較為穩定，(11-22)晶面較易存在。



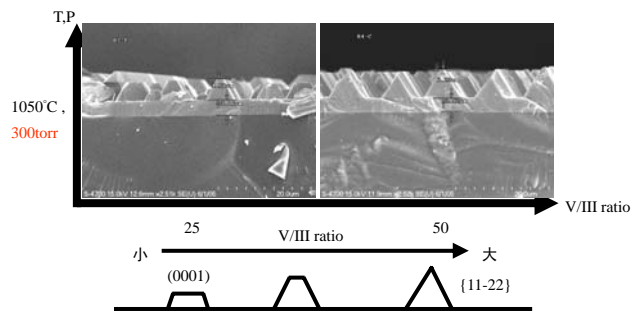
圖八、在長晶溫度 1050 °C 下，改變不同長晶壓力其晶面成長情形之 SEM 圖。

(c). 變更 GaN 成長 V/III 比

影響長晶品質及速率的另外一個重要參數是五族元素三族元素的氣氛比值，所以在本研究中我們也設計一組實驗改變不同的 V/III 比，觀察其晶體成長機制變化。實驗中我們固定成長溫度為 1050 °C、壓力為 300 torr，改變不同的 V/III 比 25 與 50。

如圖九所示 SEM 的圖

片，我們發現 V/III 比 25 時，除了(11-22)晶面產生外，同時也形成(0001)面的結構。但是 V/III 比 50 時，則因為縱向成長的速率高於橫向成長的速率，所以僅有(11-22)的晶面形成。此結果的產生主要是因為較高的 V/III 比使得 N-polarity 更加穩定，因此使得(11-22)面較易形成。

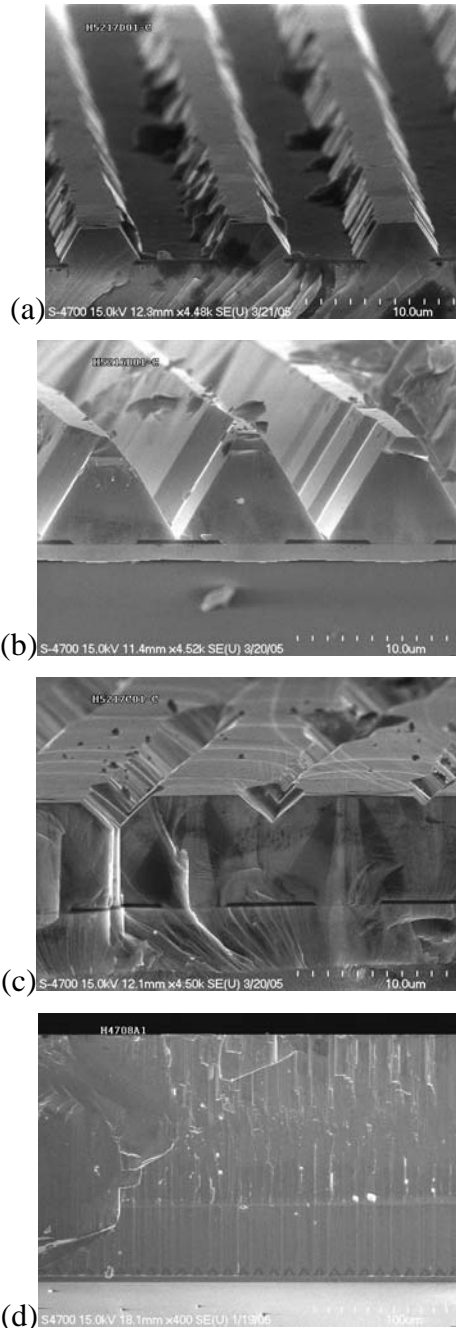


圖九、在長晶壓力 300 torr 及溫度 1050 °C 下，改變不同 V/III 比其晶面成長情形之 SEM 圖。

(2) Facet Controlled ELOG

Facet Controlled ELOG 成長主要分為三階段，我們利用上述研究所得知之條件控制長晶時之晶面改變，藉以達成晶面控制 ELOG 的目的。但由於 HVPE 成長速率極高，所以必須先抓取 GaN 覆蓋 SiO₂ 與 GaN 兩側接合時間，如圖十(a)所示，為成長 30sec，主導 GaN 成長方向為 (0001) 與 (11-22) 斜面，此時 GaN 已有部份覆蓋 SiO₂ mask，而成長 5 分鐘後，GaN 會於 SiO₂ mask 上中點處接合，如圖十(b)，以上產生角錐狀 GaN 步驟為第一階段。第二階段調變壓力與溫度，GaN 向 (11-22) 斜面成長，側向成長速率高於縱向成長速率，使得 GaN 完全填平角錐部分，如圖十(c)所示，後進

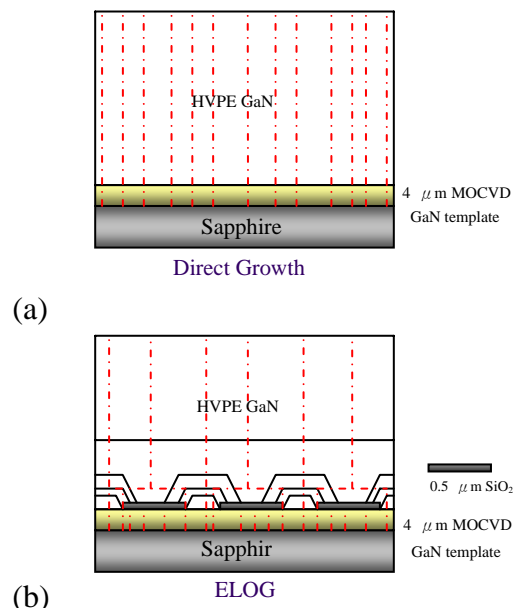
入第三階段，升高壓力，降低V/III ratio 使縱向成長速率遠高於側向成長速率，成長速率提升至 90 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以利於成長厚膜，由圖十(d)所示，可看出兩個小時約成長 180 μm 。

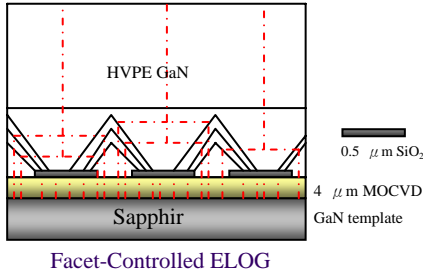


圖十、使用HVPE三階段成長Ga_N薄膜。其中(a)第一階段使用SiO₂ Strip在 1050 $^{\circ}\text{C}$ 成長 30se，Ga_N形成三角椎狀平台。(b)為成長約 5 分鐘後，Ga_N開始接合。(c)第二階段使Ga_N填平角錐部分。(d)完成三階段ELOG成長

圖十一為使用不同磊晶技術

成長Ga_N材料其線缺陷密度延伸的示意圖，因為Ga_N材料與Sapphire基板晶格常數差異達 16%，所以MOCVD成長之材料會有密度高達 10⁹ cm⁻² 的缺陷。一般直接在Template上成長Ga_N材料的方式會使得線缺陷由底部直接延伸製材料表面，因此缺陷密度並不會減少如圖十一(a)所示。圖十一(b)為一般ELOG成長之示意圖，因為SiO₂遮罩的關係，所以在SiO₂底下之線缺陷不會延伸製材料表面，所以可以獲得局部低缺陷密度之區域，這些區域可以用來製作高品質之元件。另一種ELOG之改良方式為FCELOG，如圖十一(c)所示，利用改變磊晶時之溫度、壓力及V/III比，就可以控制不同晶面之成長，所以適時改變磊晶條件就可以在晶面之界面上因為應力方向不同而使得線缺陷轉折，所以更少之線缺陷會延伸製材料表面，因此可以獲得缺陷密度更少之材料。



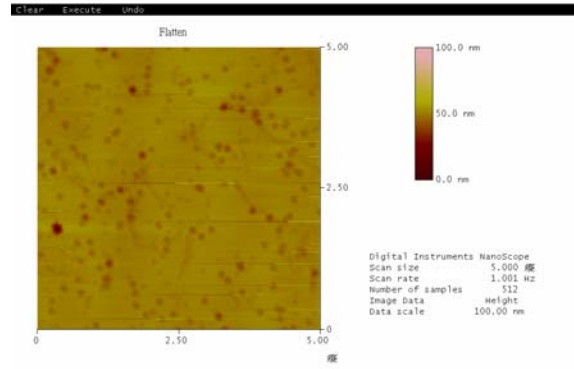


(c)

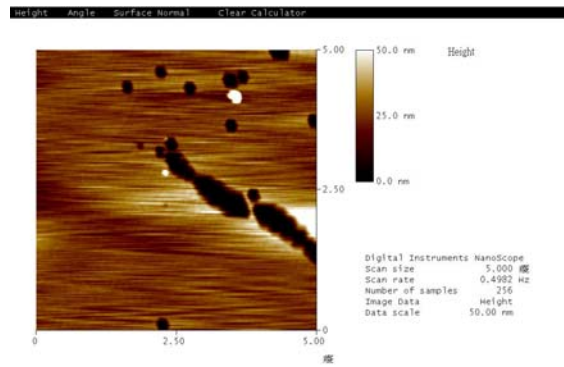
圖十一、不同磊晶技術在 MOCVD GaN template 上成長 GaN 材料，其線缺陷密度延伸狀況(a)直接成長 GaN 材料。(b)利用傳統 ELOG 方式成長 GaN 材料。(c)利用 FCELOG 成長 GaN 材料。

(3) Etching Pit Density

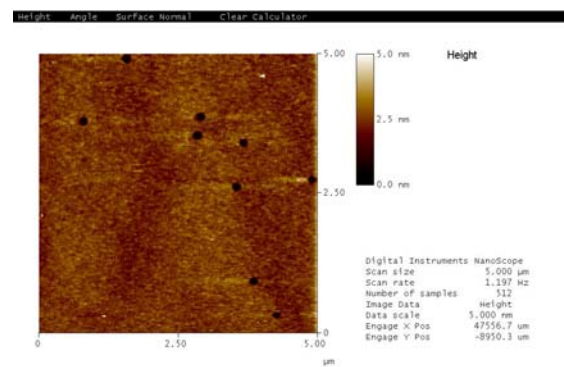
在此研究中我們利用 Etching Pit Density 來計算缺陷濃度的方法 [7]，並比較使用不同的長晶方式所取得的材料其缺陷密度的改善情形。在此我們比較了三種不同的長晶方式所獲得的材料之 EPD，分別為 (a) MOCVD directly growth；(b) ELOG；(c) Facet Controlled ELOG。我們使用 $H_2SO_4:H_3PO_4=3:1$ 加熱至 $200^\circ C$ ，將 GaN 置入 10 分鐘後，延伸至表面處的缺陷會被蝕刻出洞，圖十二為 AFM 觀察經由 HVPE 成長 ELOG 法的 EPD，所換算出來的缺陷數量單位為每平方公分的洞數 (pits/cm²)。由實驗資料顯示樣品 (a) 其缺陷密度 EPD 約 10^9 cm⁻²。樣品 (b) 其缺陷密度約 1.2×10^8 cm⁻² 樣品 (c) 其缺陷密度約為 5.6×10^7 cm⁻²，由此可以得知 facet Controlled ELOG 相較傳統 ELOG 與 MOCVD 成長的 GaN 材料而言可以有效降低缺陷濃度。



(a)



(b)



(c)

圖十二、經由 AFM 量測 $5\mu m \times 5\mu m$ 面積可得 Dislocation density (a) MOCVD 直接成長之材料其 EPD 約 10^9 cm⁻²。(b) 傳統 ELOG 方式成長之 GaN 材料其 EPD 約 1.2×10^8 cm⁻²。(c) Facet Controlled ELOG 方式成長之 GaN 材料其 EPD 約 5.6×10^7 cm⁻²

六、結論

在本研究中對於 InGaN/GaN 藍紫光雷射二極體之關鍵技術進行研究，本年度獲得以下結果。(1) 研究不同長晶溫度、壓力及 V/III 比下之晶體成長方向，藉此研究結果可以在長晶過程中，利用長晶溫度、壓力及 V/III 比

之調整控制晶面之形成，用以降低缺陷密度。將來更可利用此一技術控制材料表面之結晶狀況，結合元件結構之設計，用以提昇元件效能。(2) 我們結合MOCVD與HVPE兩種磊晶技術及Facet Controlled ELOG橫向磊晶技術將GaN薄膜之缺陷密度由 10^9 cm^{-2} 降至 $5.6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 。將來我們將使用HVPE所成長之低缺陷密度GaN材料並利用MOCVD磊晶技術在低缺陷密度材料上成長元件結構，藉以驗證材料特性。

七、參考文獻：

- [1] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto, "InGaN-Based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes," *Japanese Journal of Applied Physics (Part 2)*, vol. 35, pp. L74-L76, 1996.
- [2] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, and H. Kiyoku, "Room temperature continuous-wave operation of 35 InGaN multi-quantum-well structure laser diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 69, pp. 4056-4058, 1996.
- [3] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano, and K. Chocho, "InGaN/GaN/AlGaIn-based laser diodes with cleaved facets grown on GaN substrates," *Applied Physics Letters*, vol. 73, pp. 832-834, 1998.
- [4] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sang, and K. Chocho, "Highpower, long-lifetime InGaN/GaN/AlGaIn-based laser diodes grown on pure GaN substrates," *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2 (Letters)*, vol. 37, pp. L309-312, 1998.
- [5] M. Asif Khan, C. J. Sun, J. W. Yang, Q. Chen, B. W. Lim, M. Zubair Anwar, A. Osinsky, and H. Temkin, "Cleaved cavity optically pumped InGaN-GaN laser grown on spinel substrates," *Applied Physics Letters*, vol. 69, pp. 2418-2420, 1996.
- [6] D. A. Stocker, E. F. Schubert, W. Grieshaber, K. S. Boutros, and J. M. Redwing, "Facet roughness analysis for InGaN/GaN lasers with cleaved facets," *Applied Physics Letters*, vol. 73, pp. 1925-1927, 1998.
- [7] A. Alemu, B. Gil, M. Julier, and S. Nakamura, "Optical properties of wurtzite GaN epilayers grown on A-plane sapphire," *Physical Review B (Condensed Matter)*, vol. 57, pp. 3761-3764, 1998.
- [8] S. Nakamura, M. Senoh, S. I. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, I. Umemoto, M. Sano, and K. Chocho, "InGaN/GaN/AlGaIn-based laser diodes grown on GaN substrates with a fundamental transverse mode," *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2 (Letters)*, vol. 37, pp. L1020-1022, 1998.
- [9] Z. L. Liao and D. E. Mull, "Wafer fusion: A novel technique for optoelectronic device fabrication and monolithic integration," *Applied Physics Letters*, vol. 56, pp. 737-739, 1991.
- [10] A. T. Ping, I. Adesida, and M. A. Khan, "Study of chemically assisted ion beam etching of GaN using HCl gas," *Applied Physics Letters*, vol. 67, pp. 1250-1252, 1995.
- [11] I. Adesida, A. T. Ping, C. Youtsey, T. Dow, M. Asif Khan, D. T. Olson, and J. N. Kuznia, "Characteristics of chemically assisted ion beam etching of gallium nitride," *Applied Physics Letters*, vol. 65, pp. 889-891, 1994.
- [12] M. P. Mack, G. D. Via, A. C. Abare, M. Hansen, P. K. Kozodoy, S. Keller, J. S. Speck, U. K. Mishra, L. A. Coldren, and S. P. DenBaars, "Improvement of GaN-based laser diode facets by FIB polishing," *Electronics Letters*, vol. 34, pp. 1315-1316, 1998.
- [13] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto, "InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes with cleaved mirror cavity facets," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 35, pp. L217-L220, 1996.
- [14] R. K. Sink, A. C. Abare, P. Kozodoy, M. P. Mack, S. Keller, L. A. Coldren, S. P. DenBaars, and J. E. Bowers, "Pulsed Operation of Cleaved-Facet InGaN Laser 39 Diodes," presented at Materials Research Society Fall Meeting 1997, Boston, MA, 1997.
- [15] A. C. Abare, M. P. Mack, M. Hansen, R. K. Sink, P. Kozodoy, S. Keller, J. S. Speck, J. E. Bowers, U. K. Mishra, L. A. Coldren, and S. P. DenBaars, "Cleaved and Etched Facet Nitride Laser Diodes," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 4, pp. 505-509, 1998.
- [16] 史光國編著"現代半導體發光及雷射二極體材料技術",全華科技圖書 (2001)
- [17] Wu et al. "Defect structure of metal-organic chemical vapor deposition-grown epitaxial (0001) GaN/Al₂O₃", *Japanese Journal of*

Applied Physics, 80 (6) , 15 September 1996

- [18] Lester et al. “High dislocation densities in high efficiency GaN-based light-emitting diodes”, *Applied Physics Letters*, 66 (10), 6 March 1995
- [19] P. Venegues et al. “Influence of in situ sapphire surface preparation and carrier gas on the growth mode of GaN in MOVPE”, *Journal of Crystal Growth*, 187 (1998) 167-177
- [20] Go tz et al. “Electronic and structural properties of GaN grown by hydride vapor phase epitaxy”, *Applied Physics Letters*, 69 (2) , 8 July 1996
- [21] S. BOHYAMA et al. “Distribution of Threading Dislocations in Epitaxial Lateral Overgrowth GaN by Hydride Vapor-Phase Epitaxy Using Mixed Carrier Gas of H₂ and N₂”, *Japanese Journal of Applied Physics* , Vol. 41 (2002) pp. 75–76
- [22] S. K. Hong et al. “Origin of hexagonal-shaped etch pit formed in (0001) GaN films”, *Applied Physics Letters*, Vol 77 pp. 82~84(2000)