

# 製作於圖形化藍寶石基板上的InGaN發光二極體之相關壽命測試及界面溫度量測分析

莊文魁

電機系暨微電子所

rwchuang@mail.ncku.edu.tw

IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 25, No. 2, pp. 591-596, February 2007

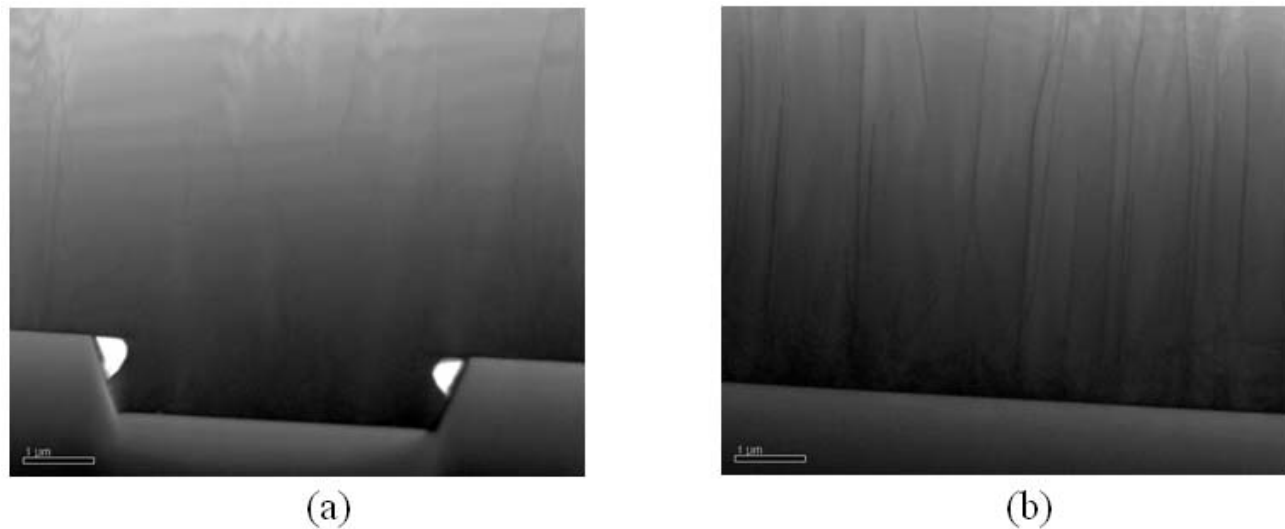
由於氮化鎵磊晶層與藍寶石基板的晶格常數(~13.5%)與熱膨脹係數(CTE)兩者之間所存在的大差異，因此，一個非常大的螺紋狀差排缺陷密度(threading dislocation density)通常會產生於氮化鎵磊晶層之內。而有關於此螺紋狀差排缺陷密度所發表過的數據大約在 $10^9$ - $10^{10}$ 的範圍之內。到目前為止，一些以降低差排缺陷密度而所開發的長晶技術，譬如像側向磊晶覆蓋成長技術[epitaxially lateral overgrowth (ELOG)]、空橋式側向磊晶成長技術[air-bridges lateral epitaxial growth (ABLEG)]及pendeopitaxy (PE)等，已發表於期刊之上。而類似ELOG、ABLEG與PE等長晶方法通常需要先利用金屬有機化學氣相沉積法[metal-organic vapor phase epitaxy (MOVPE)]去成長一層大約 $1\sim 2\text{-}\mu\text{m}$ 的GaN磊晶種子層(seed layer)於藍寶石基板之上，接著利用黃光與蝕刻的方式製作規則排列式之條狀溝槽於磊晶種子層之上，之後再利用MOVPE去成長我們要的元件磊晶結構。整體來說，如果與只需執行一次成長所需的磊晶結構於用圖形化藍寶石基板(patterned sapphire substrate或PSS)的方式相比較，前述的長晶技術分別需要執行兩次的MOVPE長晶去完成先前設計的元件結構。因此，此次實驗我們於是採用圖形化藍寶石基板之長晶方式去改善磊晶品質，進而有所地降低磊晶層內之差排缺陷密度。

在改善磊晶品質的同時，另外一個與磊晶品質相關的重要議題是探討發光二極體(LED)本身的界面溫度，因為此重要參數與任何發光元件內部的量子效率、發光功率、發光波長及其可靠度是息息相關。由於商業式LED元件主要是以環氧樹脂(epoxy resin)作封裝，因此，選擇合適的環氧樹脂主要還是建立在於其玻璃軟化溫度[glass transition temperature或 $T_g$ ]的考量之上。通常來說，環氧樹脂本身的材料及機械特性可以從硬(hard)及易脆(brittle)的情況下，轉換至軟性(soft)及可撓性(pliable)。一個熱膨脹係數(CTE)的轉變主要還是與 $T_g$ 的改變有關。在溫度的改變之下，一個比較大的CTE可以很容易地造成環氧樹脂膨脹及收縮，最後導致接線的斷裂。為了避免造成其LED無可彌補的破損，經由界面溫度而產生的熱能應該要時常保持在環氧樹脂的 $T_g$ 之下。因此在與熱相關的議題方面，為了尋求更深一層的瞭解，我們將針對LED元件成長於PSS基板與無圖案化藍寶石基板(non-patterned sapphire substrate或NSS)作詳細的元件壽命及界面溫度之相關測試和比較。



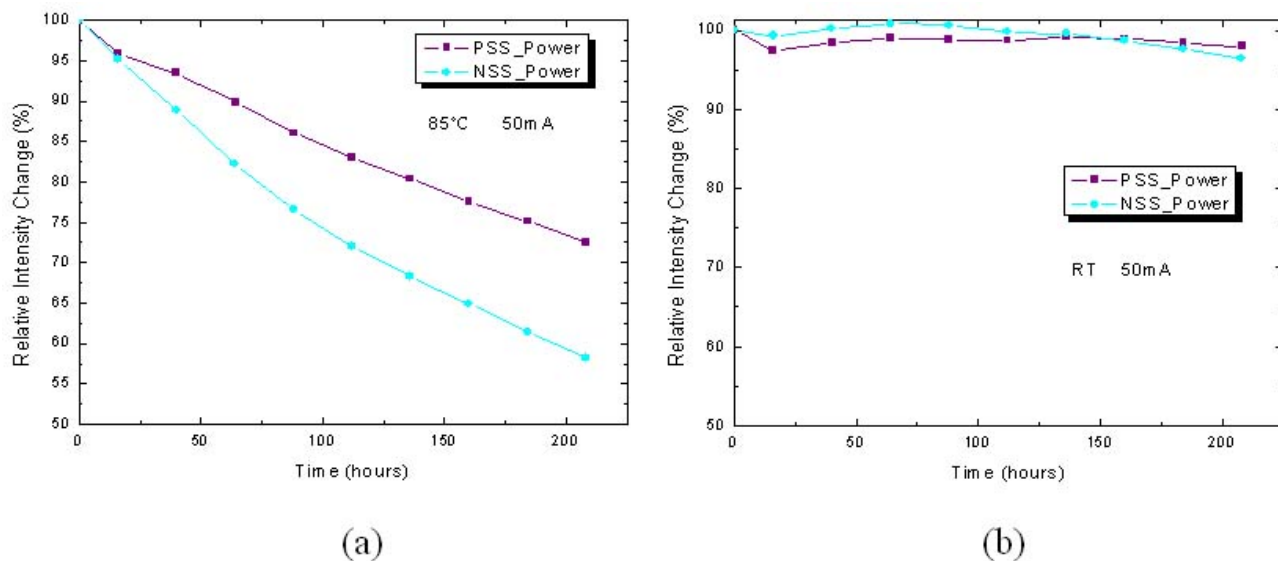
在製作圖案化藍寶石基板的細節方面，我們先以電子束蒸鍍的方式鍍上一層大約 $400\text{ nm}$ 厚的鎳(Ni)金屬層於藍寶石基板上。在PSS基板上經由黃光而產生的規則性排列之六角形圖案，其寬度是 $6\text{ }\mu\text{m}$ ，而其之間的距離是 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。接著，我們透過了電感耦合電漿蝕刻(inductively-coupled plasma etching或ICP)的方式，利用 $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$ 之氣體對PSS作蝕刻。而所蝕刻的溝槽深度為 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。之後，我們使用了鎳蝕刻液將剩餘的鎳蝕刻光罩去除，以完成最終的PSS結構。最後我們在大氣壓力的長晶情況下使用了MOVPE分別將LED元件結構成長於2英寸、c-面(0001)PSS及NSS藍寶石基板上。為了量測這兩種LEDs的界面溫度，我們利用了所量測到的元件順向偏壓(forward voltage)去評估LED本身的界面溫度。而元件順向偏壓壓降(forward voltage drop)與界面溫度之間的改變則是呈現了線性的關係。在界面溫度的量測過程當中，99%負載循環的驅動電流是被注入於元件內以造成熱化效應，而在這同時剩餘1%的脈衝電流時間之中，一個施

加於LED的小感應電流則是用來量測元件的順向偏壓壓降。在量測過程中，我們將感應電流之值控制在最小的範圍之內，以確保元件不會產生自我熱化(self-heating)的效應。



圖一 GaN磊晶層成長於(a) PSS與(b) NSS基板之TEM剖面圖。

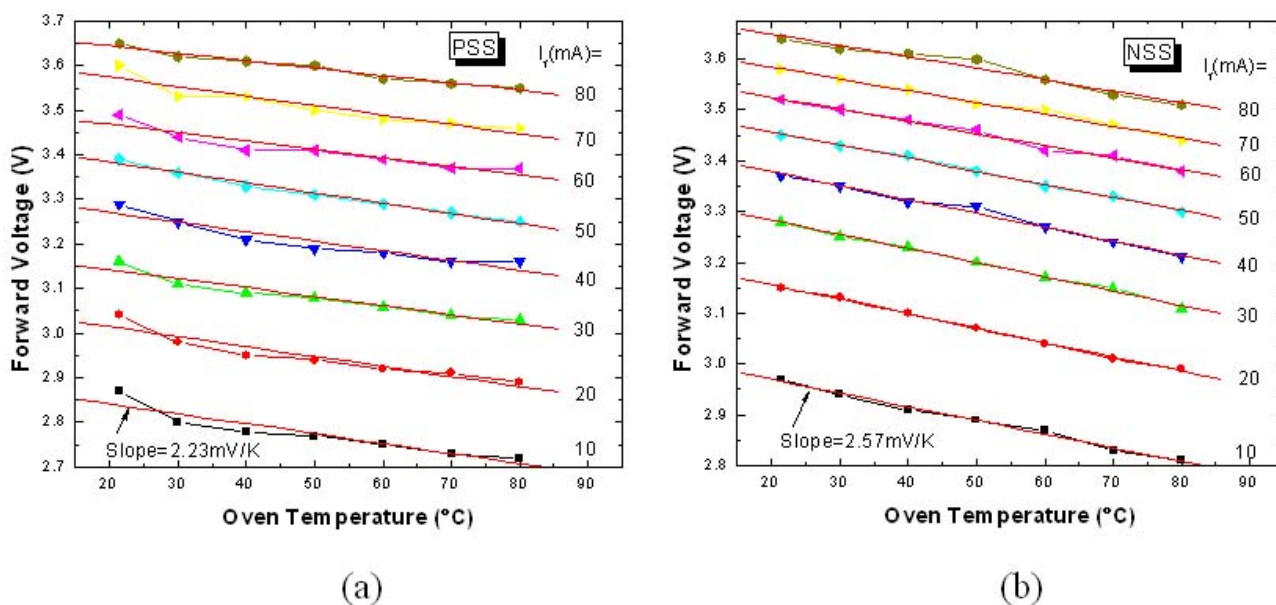
圖一(a)和圖一(b)為GaN磊晶層分別成長於PSS與NSS基板之TEM剖面圖。如圖一(a)所示，由於相當大的晶格常數不匹配的關係，許多螺紋狀差排(threading dislocations)主要從GaN緩衝層與NSS藍寶石基板的界面區域產生。另外，如圖一(b)所示，在PSS磊晶層內，一個空隙間隔區主要在脊狀結構邊緣之上方而產生。而大部份的螺紋狀差排從脊狀結構上方，加上其少部份從溝槽地區，直線延伸至氮化鎵磊晶層，但是幾乎沒有任何缺陷是從空隙間隔區的正上方延伸上去。事實上，空隙間隔區的存在有效地阻止了差排延伸進入氮化鎵磊晶層。氮化鎵磊晶層成長於PSS和NSS基板，其大約的差排密度分別估算為 $5.6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 及 $1.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。



圖二 PSS與NSS的LED在經過208個小時及在(a) 85 °C和(b)室溫下的測試所得到的相對輸出功率的改變。

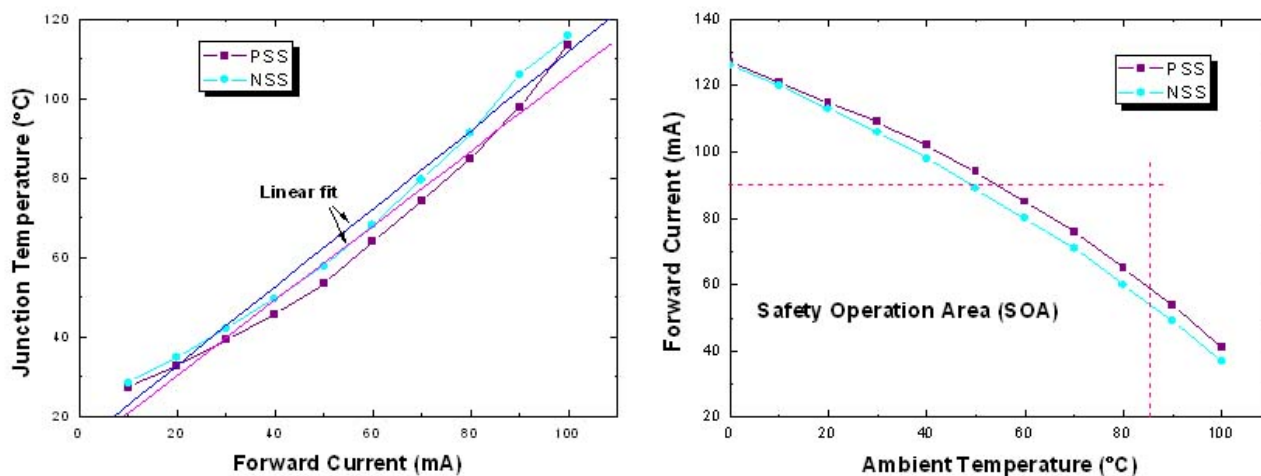
為了探討元件退化現象，加速老化測試主要的重點是分別在高溫(85 °C)及室溫底下，對LED元件施加比平常大上2.5倍的工作電流的情況下進行相關量測。圖二(a)為LED成長於PSS或NSS基板所得到的壽命測試結果，其結果主要包含了在85 °C與施加50 mA驅動電流的情況下所量測到的相對輸出功率；而此相對質

等同於每一個絕對功率質除以最初的輸出功率質。成長於PSS與NSS的LED在20 mA順向電流及室溫的情況下所得到的最初輸出功率大約等於11.24和8.89 mW。測試結果顯示，成長於PSS與NSS的LED，經過208小時的元件老化，其輸出功率強度分別衰減了大約27.5% (8.15 mW)及41.8% (5.17 mW)。經過590和305小時的元件老化，PSS與NSS LED的輸出功率強度大約衰減了超過50%。如眾所周知，經由缺陷與差排所產生的載子復合是一種非輻射(nonradiative)的現象，也是熱耗散的主要原因。與NSS相比較，PSS LED的輸出功率強度也相對地比較大，同時也能忍受比較大的注入電流。因此，NSS的壽命也比較短。圖二(b)顯示了PSS與NSS的LED在室溫下所得到的壽命測試的結果。驅動電流也設定在50 mA。而PSS與NSS的LED所呈現的輸出功率衰減都有相似的趨勢。我們發現，經過了112個小時的測試，NSS的輸出功率呈現了一個漸進式衰退的趨勢。但是，PSS幾乎沒有呈現衰退的趨勢，反而維持了一個持平的現象。經過了208個小時的測試，PSS與NSS分別呈現了2.1%與3.6%的老化衰退，而兩種LED在分別經過了3424與1984小時的測試，其輸出功率皆呈現了超過50%的衰減。



圖三 在不同的施加脈衝電流的情況下所取得的順向電壓對烤箱溫度的趨勢圖。

圖三為量測到的順向電壓對界面溫度的趨勢圖。在量測過程裡，兩種LEDs分別放置入溫控的烤箱，同時再將一個小電流注入於元件內以取得與烤箱之間的熱平衡。在校準的過程當中，我們將一個脈衝電流作每10 mA的增加，而電流範圍則設在10與80 mA之間。實驗結果顯示，界面電壓與周遭溫度是呈現一個線性的關係。如圖三所示，PSS與NSS LED的溫度係數大約分別估算為-2.23和-2.57 mV/K。前述之線性關係可以用此式子 $T_j = (V_f - A)/B$ 表示，A與B是相關配合參數(fitting parameters)，而 $T_j$ 則是界面溫度。



圖四 (a) PSS與NSS的界面溫度對順向電流的曲線圖，(b) PSS與NSS LED的derating曲線。

圖四(a)為PSS與NSS LED的界面溫度對順向電流的趨勢圖。PSS與NSS LED的兩個曲線都是大約呈現一個線性的關係。與PSS相比較，NSS的界面溫度則是比較大。如果利用 $T_j = (V_f - A)/B$ 式子內的線性配合參數 (linear-fitting parameters)，藉由界面溫度的質，一個所謂的derating則可以很簡單地被計算出來。相關計算結果如圖四(b)所示，與NSS LED作比較，PSS LED擁有比較大的安全操作區域[safety-operation area (SOA)]，此現象代表了PSS LED對操作電流及周遭溫度擁有比較大的容忍度。這也表示了PSS LED可以在比較惡劣的環境下操作，譬如像戶外的顯示器等等。再者，一個CTE的顯著改變與 $T_g$ 是息息相關的。在比較高的界面溫度之下，環氧樹脂本身可以從硬(hard)轉換至軟性(soft)。一個比較大的CTE可以造成環氧樹脂的膨脹，而最後導致電連接線過於早熟的斷裂。所以，為了防止對LED造成無可彌補的損害，因界面溫度所引發的熱能則應該控制在環氧樹脂之 $T_g$ 以下。

我們在此作一個總結，氮化鎵磊晶層的品質與LED元件的壽命與界面溫度是息息相關的。由於經由缺陷與差排所產生的載子復合是一種非輻射的現象，所以，此復合機制是導致熱能產生的最主要原因。而由於PSS的磊晶品質相對地來得好，因此發光元件製作於PSS基板上也相對地擁有比較良好的光電特性。