

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

氮化銦鎵/氮化鎵量子井及量子點結構製備及光電物理性質研究

Epitaxy and Characterizations of InGaN/GaN Quantum Well and Dot Structures

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC89-2112-M-009-061-

執行期間： 89年 8月 1日至 90年 10月 31日

計畫主持人：陳衛國

共同主持人：李明知

黃柏仁

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：

中華民國 91年 1月 31日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

氮銦化鎵/氮化鎵量子井及量子點結構製備及光電物理性質研究

Epitaxy and Characterizations of InGaN/GaN Quantum Well and Dot Structures

計畫編號：NSC 89-2112-M-009-061

執行期限：89年8月1日至90年10月31日

主持人：陳衛國

國立交通大學電子物理學系

共同主持人：李明知

國立交通大學電子物理學系

黃柏仁

國立雲林科技大學電子與資訊工程研究所

一、中文摘要

本計畫利用電容量測的方式探討氮化銦鎵-氮化鎵多重量子井結構中的界面缺陷。在量子井結構附近，我們發現一個缺陷，能階位置電導帶下 100 meV，濃度在 10^{18} cm^{-3} 以上，捕捉截面積為 10^{-20} cm^2 。當實驗溫度降低至 110K 時，於 0~2.5V 處之電容呈現明顯變化，我們認為與缺陷之空間分佈有關。另外一方面，在頻率大於 8MHz 時，會出現累積電容和負電容，原因可能是有很大的淨電感存在，淨值為 31~45 μH 。除了外部線路所貢獻之串聯電感值為 5.4 μH 外，主要皆由元件本身所貢獻。我們懷疑造成元件存有如此大寄生串聯電感之原因，可能是元件本身之量子井結構所造成。

關鍵詞： InGaN、MQW、MOCVD、C-V

Abstract

We have studied the electrical properties of InGaN/GaN multi-quantum-well blue light-emitting diode by capacitance and admittance measurements. A defect with an energy level of 100 meV and capture cross-section of 10^{-20} cm^2 was found to locate in the region of quantum-well. Additionally, we have also found a large value of inductance in the device, which conceivably responses for the observed accumulation capacitance and the large negative capacitance at high frequencies. Its value ranges from 31 to 45 μH . Since the external wire can only contribute a value of 5.4 μH for this device, we believe such a large value of inductance is closely related to the quantum-well structure in this device.

Keywords: InGaN, MQW, MOCVD, C-V

二、緣由與目的

在光電元件結構中，通常我們都以單一量子井(SQW)、多重量子井(MQW)或量子點(QD)結構來降

低操作電流並改善發光二極體或雷射的光電轉換效率，當然在氮化鎵的光電元件中亦以上述結構為主要的元件結構。然而，目前世界上在 InGaN/GaN 量子井結構的異質介面光電物理機制，似乎仍有諸多問題仍未釐清，薄膜製備中似乎都遭遇到相當困難問題。

本計畫所用的樣品是以有機金屬汽相沈積法來成長，採用的基板為(0001)面的 sapphire，分別以 TMGa、 NH_3 及 TMIIn，作為鎵(Ga)、氮(N)及銦(In)的反應源。在藍寶石基板上先成長一層約 20nm 的低溫(550 $^\circ\text{C}$)氮化鎵緩衝層，再於 1050 $^\circ\text{C}$ 成長 4 μm 氮化鎵薄膜，然後再降溫至 800 $^\circ\text{C}$ 成長氮化鎵-氮化鎵的多重量子井。量子井的氮化鎵 barrier 厚度為 5nm，氮化銦鎵位能井的厚度則為 1.5nm，然後接著成長 20nm 的 p 型氮化鎵層，最後成長 p 型氮化鎵。至於電極的部份，p 型氮化鎵的歐姆電極為鎳金合金；n 型的歐姆金屬為鈦鋁合金。

對於元件物理特性的探討，我們所使用的儀器是惠普(HP)公司的 4194a 增益/阻抗相位分析儀，量測頻率從 100~15MHz，外加的直流偏壓從 -4V 到 +2.5V，交流訊號為 0.1V。我們所採用的方式分別為電容頻率響應分析、導納頻譜分析及變溫的電容-電壓量測分析。

缺陷的激發速率和溫度有以下的關係[1]：

$$\tau T^2 = \frac{\exp\left(\frac{E_c - E_t}{kT}\right)}{\gamma\sigma} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{e} \quad (2)$$

，其中 E_t 是缺陷能階， τ 是缺陷的激發時間常數， e 是激發速率， T 是絕對溫度， σ 是缺陷的捕捉截面積， γ 是一個常數，與載子的等效質量有關。我們可以改變量測的交流訊號頻率及實驗溫度去

研究缺陷的響應，進而量取缺陷的活化能。

三、結果與討論

一般我們量測的電容是包含空乏區內缺陷的響應和帶電雜質，簡單的來說就是包含了空乏區內的所有有效電荷數(effective charge)，然而缺陷貢獻的電容跟外加訊號的頻率及量測的溫度有關。圖一是在不同溫度下，當外加偏壓為 0V 時，電容對不同頻率的響應。當量測頻率從 100Hz 改變到 15MHz 時，我們可以看到，電容在低頻時幾乎是不變的，當頻率越來越高，電容就跟著下降，因為在比較高的頻率，缺陷會來不及釋放捕捉的載子，所以造成電容下降。在頻率約為 300 kHz 的地方，電容很明顯地開始下降，可以知道這是因為缺陷跟不上調變的頻率，使得缺陷捕捉之載子固定於缺陷中心，造成交流(a. c.)有效電荷數減少，這種現象與元件裡的淺層雜質或深層缺陷有關[2-4]，但也可能與量子井之侷限效應有關[5]。

除此之外，在頻率大於 3 MHz 處，有累積電容 (accumulation capacitance) 和負電容 (negative capacitance) 存在，造成這兩種現象的原因，主要是由於元件結構中的淨電感所造成 [5, 6]，類似的狀況在 Polishchuk [7] 等人研究金氧半導體(MOS)時也發現過，在頻率大於 300 kHz 時，會有累積電容，他指出造成這種現象的可能為外部線路電感與金氧半導體電容的交互作用。經過我們利用電磁學及等效電路的模擬，若串聯電感值為 57 μ H 時，則在約為 1MHz 以上的頻率下，會出現累積電容和負電容的效應。

另外，我們在 300 kHz 處發現有反曲點的存在，顯示空乏區內有缺陷存在。事實上我們在不同偏壓下，亦即在不同程度的空乏狀態，都可以觀察到這個缺陷的響應，這個缺陷的分佈可能是在氮化鎵-氮化銦鎵量子井處，而且訊號十分明顯。此外，當量測溫度從 350K 下降至 110K 時，缺陷的激發時間也從 1.15 μ s 增加至 5.508 μ s，也就是說缺陷的激發速率變慢了，這與(1)式中的缺陷激發時間與溫度的關係相符合，其激發時間隨著溫度的下降而變慢，故此發現的缺陷並非雜訊。

圖二為室溫的導納頻譜圖，在 300 kHz 的地方，我們可以在譜圖上發現有一類似肩形(shoulder-like)的訊號。與電容色散不同的是，導納頻譜上之缺陷相關訊號並不是由反曲點來判斷，而是由波峰值(peak)而定。在這裡看到的訊號並不是一個完美的波峰，可能是受到其他訊號影響而產生重疊效應。所以這一肩形為與缺陷相關的訊號，把它標記為 H1。對於 H1 而言，我們認為應和電容色散所觀察到的是同一個缺陷能階。因為響應的頻率是在同一個位置上，並且在這兩種量測方式，於高頻處只看到一個不會隨著量測溫度而改變的訊號，這是由累積電容與負電容所造成的。當量

測溫度降低時，H1 的訊號就越往低頻移動，這表示缺陷的激發速率也隨之變長，此結果與電容色散的量測結果相符，由此我們可以確定 H1 的確是缺陷之響應而非量測之雜訊。

圖三是在不同溫度下的電容對電壓的關係。我們可以看到電容-電壓的曲線有兩段變化。第一段是在偏壓從 -4V 到 -1V，可以看到在不同的溫度下這一區域的電容曲線是彼此平行的，所以在這一區域出現的電荷濃度是均於分佈的，倘若缺陷分布不均勻或是有一特別的缺陷，則隨著溫度變化，勢必在某一段的偏壓下，量測電容會特別的突出或是變弱。當外加偏壓從逆向偏壓的 -1V 轉向正向偏壓的 +1V 時，由於能帶漸漸被拉平，有載子注入，這時候所量測到的電容值是由擴散電容(diffusion capacitance)所主導[8]。而當溫度降低至 110K 時，在外加偏壓為 0.5V~2V 的範圍內，其電容值較其他量測溫度下更有明顯變化，這是由於當量測溫度降低時，整個空乏區的寬度會變寬，電荷濃度也會跟著下降[9, 10]。

我們對於不同空乏區內之位置計算缺陷的特性，其活化能變化範圍在 68~92 meV，濃度為 10^{18} cm⁻³ 以上，捕捉截面積為 10^{-17} ~ 10^{-21} cm²。為了比較在不同空乏區深度所得的數據，我們把所得之缺陷激發速率與溫度的關係一起擺在 Arrhenius Plot 上，如圖四所示，結果發現在不同空乏區深度所得之數據在 Arrhenius Plot 上幾乎完全重疊。缺陷的激發速率在對溫度的關係上，不同的缺陷應有不同的激發速率，所以不同組成的缺陷的激發速率在同一溫度下對應至 Arrhenius Plot 不同位置上。從所得之結果，在不同深度下所得之缺陷應該是相同之組成。對於我們發現在不同深度下所得之缺陷可能是同一組成之原因，簡單的推論如下所說：

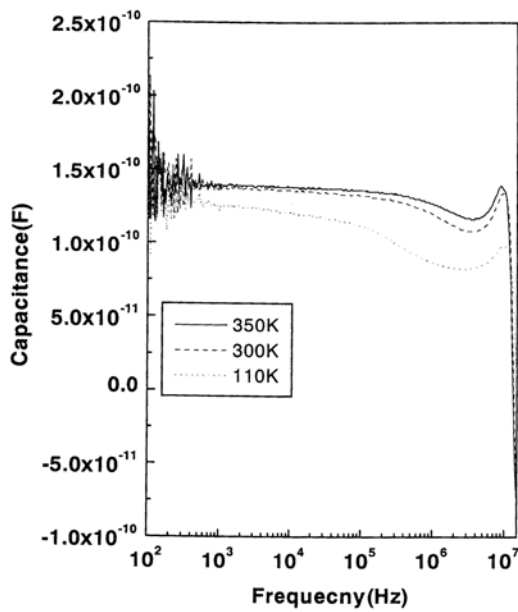
- (1) 量測範圍的限制：我們實際上所得之缺陷特性只侷限在 17~50nm 的範圍內，與元件大小比較，量測範圍太小。
- (2) 在不同深度所得之缺陷也許是材料本身即有的，以往之所以沒有被旁人所發表，可能的原因即在元件結構上及量測方式的不同，受限於這麼淺的缺陷能階，儀器因而無法解析。

四、計畫成果自評

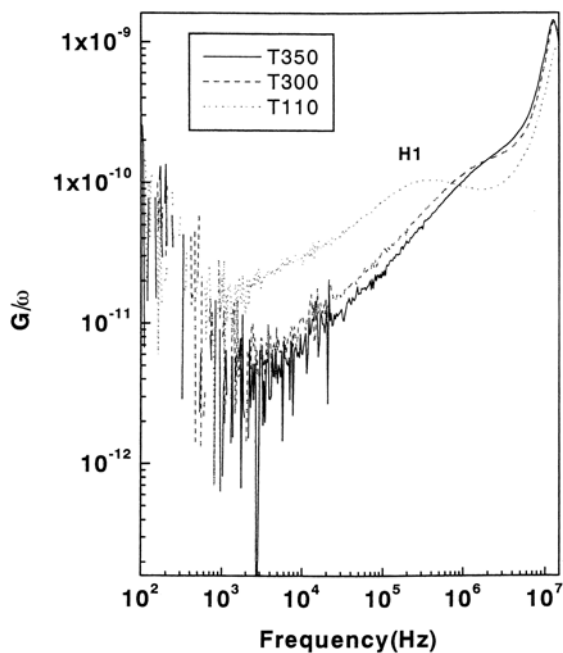
在本計畫中，我們在對於氮化銦鎵-氮化鎵多重量子井發光二極體量測中，于量子井結構及 n 型氮化鎵區域，發現了一個缺陷(H1)，這個缺陷的物理特性如下所述：活化能約 100 meV，缺陷濃度在 10^{18} cm⁻³ 以上，而捕捉截面積約為 10^{-21} ~ 10^{-17} cm²。電荷濃度分佈縱深圖上 30~40 nm 處，亦即電荷空乏之波谷區。造成空乏的原因除了因偏壓作用載子擴散至量子井外，亦可能與異質界面處及其周圍的缺陷 H1 相關。形成缺陷的原因，我們認為是由於氮化銦鎵和氮化鎵薄膜晶格常數的不匹配所引

起，而且這個缺陷的濃度大於一般在薄膜裡所觀察的缺陷濃度，因此在一般的異質界面元件裡，如發光二極體、雷射二極體，的確會影響到整個元件的壽命和效能。

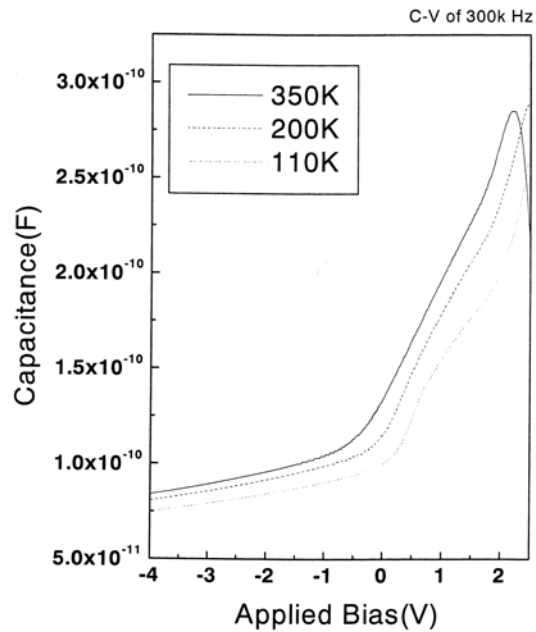
另外一方面，我們在電容散射的實驗也發現到於高頻時，有累積電容和負電容的出現，造成量測電容的差值，形成這兩種現象的原因，是因為在元件及量測系統有一很大的淨電感存在，其中一部份來自於寄生於量測系統的電感，並不受元件電容之影響；除此之外，其餘皆來自元件本身所有，會隨著元件電容大小而改變，懷疑是結構之量子效應所造成。



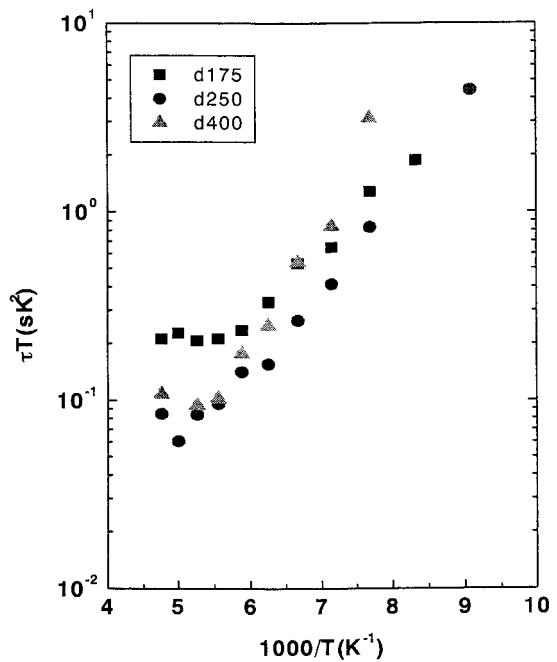
圖一、在偏壓為 0V 時，不同量測溫度下的電容色散圖



圖二、在偏壓為 0V 時，不同量測溫度下的導納能譜圖



圖三、不同溫度下的 C-V 量測圖



圖四、不同深度及溫度下所得的激發速率畫成 Arrhenius Plot 來比較

五、参考文献

- [1] Dieter K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization 2nd edition* (1998), p.279
- [2] S. Kugler, K. Steiner, U. Seiler, and K. Heime, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 111 (1988)
- [3] Peter Kozodoy, Steven P. DenBaars, and Umesh K. Mishra, *J. Appl. Phys.* **87**, 770 (2000)
- [4] M. Shmeits, N. D. Nguyen, and M. Germain, *J. Appl. Phys.* **89**, 1890 (2001)
- [5] M. Ershov, *Appl. Phys. Lett* **70**, 1828 (1997)
- [6] K. S. A. Butcher, T. L. Tansley, and D. Alexiev, *Sol. Stat. Electron.* **39**, 333 (1996)
- [7] Igor Polishchuk, *Rev. Sci. Instru.* **71**, 3962 (2000)
- [8] Donald A. Neamen, *Semiconductor Physics & Devices 2nd ed.* (1997), p.258
- [9] K. Kazmierski, P. Philippe, P. Poulain, and B. de Cremoux, *J. Appl. Phys.* **61**, 1941 (1987)
- [10] S. R. Forrest and O. K. Kim, *J. Appl. Phys.* **52**, 5738 (1982)