

國立交通大學

電子物理研究所
碩士論文

蕭特基紫外光偵測器製作於獨立式氮化
鎵基板上之研究

Schottky barrier photodetector on n-type
freestanding GaN substrates.

研究生:高郁婷

指導教授:李威儀 博士

中華民國壹佰年六月

蕭特基紫外光偵測器製作於獨立式氮化鎵基板上之研究

研究生:高郁婷

指導教授:李威儀博士

國立交通大學

電子物理系所

中文摘要

本實驗主要想探討的是，在不同基板上製作蕭特基紫外光偵測器的差別。本實驗使用兩種基板：一組是用 MOCVD 製作的約 2 微米厚的氮化鎵薄膜；以及利用 HVPE 成長 300 微米厚的獨立式氮化鎵基板，先量測此兩種基板的光學及電性與晶格品質差異性後，再探討製作於其上的元件有何不同的地方，包含了逆向偏壓下的漏電流大小以及光偵測器的鑑別度等。我們也利用同樣的獨立式氮化鎵基板，比較橫向與縱向電極蕭特基元件的差別。此外，對氮化鎵蕭特基元件，進行熱退火的研究，找出最適當的元件設計。

Schottky barrier photodetector on n-type freestanding GaN substrates.

Student: Yu-ting Kao

Advisor: Dr. Wei-i Lee

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

Abstract

In this thesis, the high quality thick GaN substrates had been grown and characterized by Hydride Vapor Phase Epitaxy (HVPE). Then, the Schottky barrier photodetectors with freestanding GaN substrates were fabricated.

This thesis is made up of two parts. In the first part, we focused on the difference between the schottky diodes prepared on the $2\mu\text{m}$ -thick GaN substrates by MOCVD and $300\mu\text{m}$ -thick GaN substrates by HVPE. It was found that leakage current of the PDs prepared on freestanding GaN substrate was significantly smaller due to the improved crystal quality.

In the second part, we reported the fabrication of verticle photodetectors (PDs) on freestanding GaN substrate. Compared with the lateral PD prepared on the same substrate, We found the vertical PDs had smaller leakage current. It was also found that we can reduce the photoconductive gain and enhance ultraviolet-to-visible rejection ratio by using the vertical PDs with freestanding GaN substrates.

致謝

時間過得真快，轉眼間又到了畢業的季節，將要結束數十年的學生生涯，開始上班了。在碩班這兩年裡，學到了很多專業知識以及人生體悟。首先我要感謝我的指導教授—李威儀博士，他的美式教育作風，讓學生們有無限的發揮空間，讓我們擁有獨立思考的訓練，也可以自由的找尋自己有興趣的東西。李老師是一位很聰明也很幽默的老師，能夠當他的學生我感到很榮幸。我也要特別感謝兩位教授—汪大輝以及趙書琦老師，因為在我的修課過程中，這兩位老師的上課內容非常豐富，讓我受益良多，也因此讓我更加了解自己的興趣所在。尤其是汪老師，讓我發自內心的敬佩他在半導體領域當中的專業以及授課態度。

在做實驗的部分，我一直在尋找許多人的協助，若不是有人願意幫忙，我也不可能完成這篇論文。首先我要感謝庚諺學長，總是不藏私的熱心為我解答理論方面的困惑，並且很有耐心的與我討論；我也要感謝仕傑學長，教導我光罩設計的構想以及量測時的注意事項；也謝謝 Just 以及 Joseph 學長，幫助我學習操作儀器，也幫我介紹其他幫助我的朋友。量測方面要特別感謝家華學長在百忙之中願意幫助我，還要謝謝天昱學長在凌晨時刻願意陪我去清大鍍金屬，真的很感謝你們大家。

也要謝謝實驗室的大學長奎銘、HVPE 的守護者彥顯學長以及當初幫我想到實驗题目的尹豪學長，實驗室因為有你們的努力，才可以運作那麼順利，學弟妹們也從你們身上得到不少的指導。也要謝謝碩一陪我修課的同學們川耘、祐任、諮宜、子諒對我的照顧。

我也想感謝我最好的朋友—琬琦，一直陪伴我度過所有的喜怒哀樂，我們總是有很多的人生感想與體悟可以跟對方分享，在修課方面，她也給了我很多寶貴的意見，我很珍惜這份難得的友誼，也希望它會一直存在著。我也要感謝我的家人，他們總是支持我的選擇，讓我沒有金錢方面的困擾，可以持續學習，尤其是我的姐姐—靖宜，常帶我出去體驗異國文化，當我迷失人生方向時，又會給我忠肯的建議。還要謝謝我的好朋友政彥，在這幾年裡的陪伴，讓我感到溫暖不孤單，也總是帶給我很多歡笑跟新鮮，和他在一起的時光很自在快樂。

我覺得人生的過程比結果更重要，沒有人可以預測下一秒會發生什麼事，所以我只要好好把握住此時此刻，放開心的盡情感受全世界。我要永遠記得，人生決不可以以追求金錢為中心，親朋好友以及身心靈上的財富才是最可貴的。

目錄

摘要	i
致謝	iii
目錄	iv
表目錄	vi
圖目錄	vi
第一章 導論	1
第二章 實驗原理與儀器裝置	3
2-1 蕭特基接觸原理	3
2-2 氫化物氣相磊晶系統	7
2-3 電子束蒸鍍系統	10
2-4 霍爾量測原理	11
2-5 光響應度量測系統	12
2-6 光致發光光譜量測系統 (PL)	14
2-7 X 射線繞射分析儀 (XRD)	16
2-8 二次離子質量光譜量測系統 (SIMS)	18
第三章 實驗步驟	20

3-1 基板處理與清潔	20
3-2 歐姆接觸之製作	20
3-3 蕭特基接觸之製作	21
3-4 快速熱退火	22
第四章 實驗結果與討論分析	24
4-1 不同基板之量測分析	24
4-1-1 基板之磊晶晶格品質討論	24
4-1-2 基板表面缺陷密度之討論	24
4-1-3 基板電性量測分析討論	24
4-2 元件電壓電流量測結果分析	25
4-3 側向與縱向電流之討論	25
4-4 熱退火處理之討論	26
4-5 光響應度量測結果分析	27
第五章 結論與未來發展	36
參考文獻	37

表目錄

表 3-3-1 側向蕭基二極體幾何說明表	22
表 4-1-1 氮化鎵基板之電性參數	25
表 4-3-1 蕭特基二極體之蕭機能障與理想因子	36
表 4-5-1 光偵測器之鑑別度與量子效率	37

圖目錄

圖 2-1 一孤立金屬靠近 n 型半導體能帶圖	5
圖 2-2 熱平衡時, 金半接觸能帶圖	5
圖 2-3 蕭特基位障在順向偏壓下的四種基本載子傳導機制示意圖	6
圖 2-4 熱離子發射	7
圖 2-5 熱游離場發射	7
圖 2-6 場發射	7
圖 2-2-1 HVPE 反應爐管示意圖	8
圖 2-2-2 HVPE 機台示意圖	10
圖 2-3-1 電子束蒸鍍系統簡易圖	11
圖 2-4-1 n-type 半導體霍爾量測簡易圖	11
圖 2-5-1 光檢測器簡示圖	13
圖 2-5-2 量測光響應度儀器示意圖	14
圖 2-6-1 電子躍遷圖	15
圖 2-6-2 放射結合路徑示意圖	15
圖 2-7-1 布拉格繞射示意圖	16
圖 2-7-2 X光繞射儀裝置示意圖	17
圖 2-7-3 搖擺曲線量測方式示意圖	18
圖 2-8-1 二次離子質譜儀系統簡示圖	18
圖 3-3-1 (a)~(h) 橫向蕭特基二極體	19
圖 3-3-2 縱向蕭特基二極體	23
圖 4-1-1 氮化鎵薄膜之 PL 量測圖	23
圖 4-1-2 氮化鎵厚膜之 PL 量測圖	28
圖 4-1-3 兩種不同基板之 XRD ω -curve 量測圖	28
圖 4-2-1 on sapphire 薄膜元件(a~d)之電流電壓圖	29
圖 4-2-2 on sapphire 薄膜元件(e~f)之電流電壓圖	29
圖 4-2-3 蕭特基電流電壓圖	30
圖 4-3-1 蕭特基電流電壓圖	30
圖 4-3-2 (a)橫向 (b)縱向 電流蕭特基二極體側視圖	31

圖 4-4-1 經過不同熱退火後的電流電壓圖-----	32
圖 4-4-2 蕭特基金屬之 SIMS 量測圖-----	32
圖 4-4-3 蕭特基接觸的 XRD 量測圖-----	33
圖 4-5-1 薄膜上的元件經過 RTA(500°C/30 秒)處理的光響應度量測圖-----	34
圖 4-5-2 厚膜上的縱向元件經 RTA(500°C/30 秒)處理的光響應度量測圖---	35
圖 4-5-3 元件經過 RTA(500°C/30 秒)處理的光響應度量測圖-----	35



第一章 導論

紫外光波段，從1801年由W. Ritter與W. H. Wollaston所發現後，相關研究與應用一直受到很大重視。太陽照射到地球為主要的紫外光來源，而紫外光一般可分為UV-A (400nm~320nm)、UV-B (320nm~280nm)、UV-C (280nm以下) 三個波段。由於地球外部有著一層臭氧層可以阻擋280nm以下的波長進入到地球，因此確實影響地球生態與人類健康為UV-A 和UV-B。現今紫外光偵測器被廣泛應用的範圍包括紫外光天文學、火焰偵測、飛彈偵測、燃燒技術、空對空通訊、高密度數位影音硬碟、飛行員降落濾光器、污染防治監控、生化醫學、殺菌及農業等，所以對於發展效率更好更穩定的紫外光偵測器的需求與日俱增。

目前主要是以矽系列(Si based)的光偵測器和光電倍增管較為常見，但是矽系列的光偵測器需要外加濾鏡來濾掉可見光和紅外光方可準確的偵測紫外光，再加上矽系列的材料較脆弱、退化的速度也相當快、且為非直接能隙的材料，所以轉換效率不及直接能隙的材料；而光電倍增管有著需要很大的電源供應器的限制條件，使得具有寬能隙的半導體材料，如氮化鎵受到相當大的注意。

氮化鎵(GaN)屬於直接能隙且為寬能隙($E_g = 3.4\text{eV}$)的半導體，這使它對於近可見光與紅外光有良好的穿透性而對紫外光仍保持著趨近於1的光電轉換效率，因此對於紫外光的鑑別率可大為提升。同時氮化鎵亦具有高崩潰電場(breakdown electrical field)、高飽和漂移速度(saturation drift velocity)、低電阻率(on-resistance)且不容易受到化學藥品的侵蝕並有良好的熱穩定性(thermal stability)等良好的特性，因此可成為於高頻操作或高溫下使用之高功率元件材料。

雖然氮化鎵材料有很多優良的特性以利作為光電或電子元件之應用，但是在異質磊晶成長氮化鎵的過程中，由於藍寶石基板與氮化鎵晶格常數(lattice constant)的不匹配以及熱膨脹係數不同，而易造成氮化鎵晶格錯位(lattice mismatch)以及延伸至表面的缺陷(defect or dislocation)數量很多，進而影響元件的品質與壽命。這些表面缺陷會成為蕭特基紫外光偵測器的電子電洞複合中心或散射中心等介面態(interface state or trap)，將產生較大的逆向偏壓漏電流，也會降低光電轉換效率及元件可靠度。為了降低氮化鎵基板的缺陷密度以及提高其品質，目前已有嘗試多種不同的磊晶方式[1-5]，其中，氮化物氣相磊晶法已經確實被證實可以藉由提高氮化鎵基板的厚度，使得表面缺陷密度降低；同時因為厚度夠厚，可借由簡單雷射技術將氮化鎵從藍寶石基板上剝離，使得氮化鎵基板被壓縮的應力得以釋放，翹曲程度大為下降。

本論文使用兩種不同的氮化鎵基板，一種是使用有機金屬化學氣相磊晶法成長的氮化鎵薄膜；另一種是利用氫化物氣相磊晶法成長的獨立式氮化鎵基板，分別於其上製作同樣的側向電極（lateral）蕭特基紫外光偵測器，再分析討論此兩種基板上的原件差異性。同時也在氮化鎵基板上製作側向（lateral）以及縱向（vertical）電極的蕭特基二極體，比較此兩種不同幾何結構對於元件的影響。最後也會探討蕭特基二極體經過不同溫度的快速熱退火後之影響與改變。



第二章 實驗原理與儀器裝置

2-1 蕭特基接觸原理

2-1-1 金屬-半導體界面理論

當金屬與半導體兩種材料緊密結合形成界面時，因兩者功函數的差異，和能量平衡的理論基礎，兩者的載子會重新分佈使得兩者間的能帶結構調整至同時滿足費米能階對齊及真空能階連續的原則[6-7]。以 n 型半導體為例，當金屬功函數大於半導體功函數時，則在金屬-半導體界面會產生一具有整流特性的蕭特基界面位障，反之，當金屬功函數小於半導體功函數時，則在金屬-半導體界面附近會形成外加偏壓與通過電流具有線性關係的歐姆界面；此兩種不同的金屬-半導體界面，在元件實際運用上，各有其相當重要的用途。

2-1-2 蕭特基接觸原理

1938 年，Schottky 提出其整流作用可能是由半導體中穩定的空間電荷所產生之電位障礙所引起。利用此觀念所建立的模型，即稱為蕭特基能障(Schottky barrier)。以 n 型半導體為例，假設金屬跟半導體一開始為電中性而且彼此分開，而金屬的功函數大於半導體功函數時，能帶圖如圖2-1所示， $q\Phi_m$ 和 $q\Phi_s$ 分別為金屬和半導體功函數，其定義為費米能階(Fermi level)和真空能階(vacuum level)之間的差。 $q\chi$ 為半導體的電子親和力(electrical affinity)，它是半導體能帶與真空能階之間的能量差。當金屬與半導體接觸，在熱平衡時，兩種不同材料的費米能階應該相等，而且真空能階也必須是連續的。在理想的狀態下，其能帶圖如圖2-2所示。能障高度 $q\Phi_b$ 為金屬功函數與半導體電子親和力之間的差 ($q\Phi_b = q\Phi_m - q\chi$)，此即為蕭特基能障(Schottky barrier)。

能障的形狀是由空乏區(depletion region)的電荷分佈所決定的。如果半導體的電子密度約減小一個等級，則導電帶將從原本位置提高了 $3KT/q$ 。在金屬-半導體界面處，空間電荷(space charge)主要是為了補償的施體(donor)或是受體(acceptor)。此一特殊的電荷分佈造成了金屬與半導體間一內建電位 V_{bi} 。蕭特基能障中，電流傳輸主要是藉由多數載子(majority carrier)來完成。

在蕭特基界面處於順向偏壓下，金屬中的電子受到能量激發而進入半導體的電流，主要有四種機制，如圖2-3：

- (1) 熱離子放射(thermionic emission)，即能量高於蕭特基位障的載子越過界面位障所產生的電流。
- (2) 電子經由量子穿隧(tunnelling)機制，穿透能障，而進入半導體內。
- (3) 在半導體空乏區(depletion region)內的電子電洞藉由復合(recombination)機制所產生的復合電流。
- (4) 在半導體中性區(neutral region)內的電子電洞藉由復合機制所產生的復合電流。

相反的，在逆向偏壓時，這些傳輸過程會反向進行；在室溫下，對於未摻雜的理想蕭特基半導體而言，其電流傳導機制主要是以熱離子放射為主，後三項機制對於電流影響甚小，故在計算蕭特基接面的電流傳輸大小時，以熱離子放射機制為主考量，此蕭特基二極體的外加電壓與通過電流密度的關係可由下式表示：

$$J = J_s [\exp(-qV/nkT) - 1]$$

及

$$J_s = A^* T^2 \exp(-q\Phi_B/kT)$$

其中

J_s ：飽和電流密度 (saturation current density)

n ：理想因子 (ideality factor)

A^* ：有效理查生常數 (effective Richardson constant)

k ：波茲曼常數 (Boltzmann's constant)

T ：絕對溫度 (the absolute temperature)

上式中的理想因子 n 值大小介於 1 和 2 之間，此與界面電流傳輸的機制有關，若 n 值趨近於 1，則表示此二極體的界面電流符合理想模型，完全由熱離子放射所主導，若 n 值接近 2，則表示此元件的金半界面間可能有氧化層或表面能階 (surface state) 等效應的影響存在，使得電流傳導機制不全為熱離子放射，藉由實際製作及量測蕭特基二極體的電流-電壓特性曲線並作圖，即可由其斜率與截距計算出此二極體的理想因子 n 及蕭特基位障 Φ_B 。

蕭特基二極體依據金屬與半導體之間的主要電流流動機制分為三種類型：

(1) 熱離子發射 (Thermionic emission, TE)

如圖 2-4，主要濃度約在摻雜濃度 $N_D < (\sim 10^{16} \text{cm}^{-3})$ ，在界面處的空乏區相當寬，電子較難穿透位障。當位障較低時電子可經由熱離子發射克服能障而形成電流。

(2) 熱游離場發射 (Thermionic-field emission, TFE)

如圖 2-5，應用在 $(\sim 10^{16} \text{cm}^{-3}) < N_D < (\sim 10^{18} \text{cm}^{-3})$ 時，電子的能量略低於蕭特基能障，由於穿隧效應，電子仍有機會穿透過能障而進入金屬，此時電子可經由熱游離或者是穿隧效應來完成電子的移動形成電流。

(3) 場發射 (Field emission, FE)

如圖 2-6，在高摻雜之情況， $N_D > (\sim 10^{19} \text{cm}^{-3})$ ，此時界面區的空乏區非常狹窄，雖然電子的能量不足以克服蕭特基能障，但是經由穿隧效應，電子不論從金屬穿隧至半導體或是由半導體穿隧至金屬都非常容易，此時電子主要都是利用穿隧效應來移動。

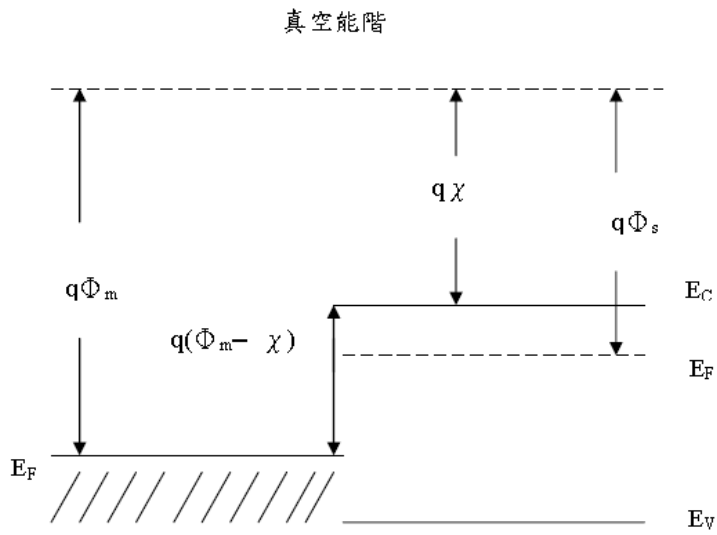


圖 2-1 一孤立金屬靠近 n 型半導體能帶圖

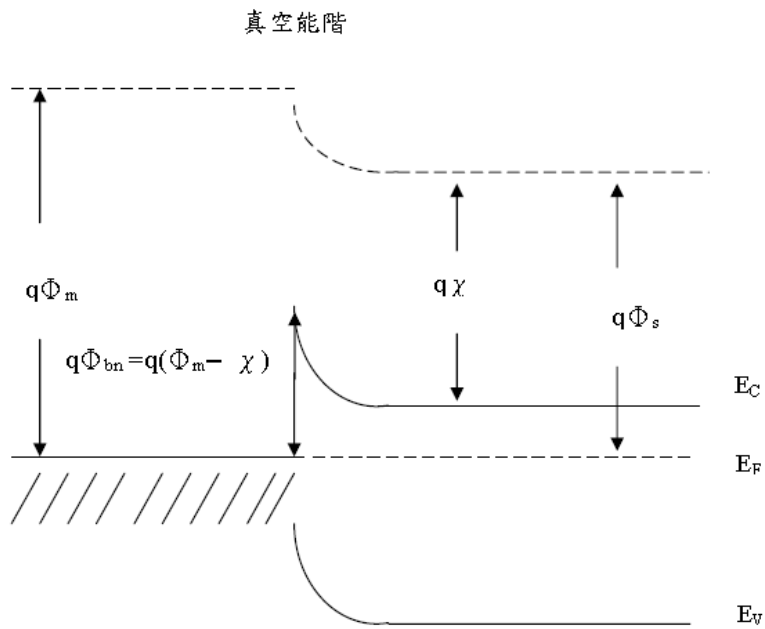


圖 2-2 熱平衡時，金半接觸能帶圖 [5]

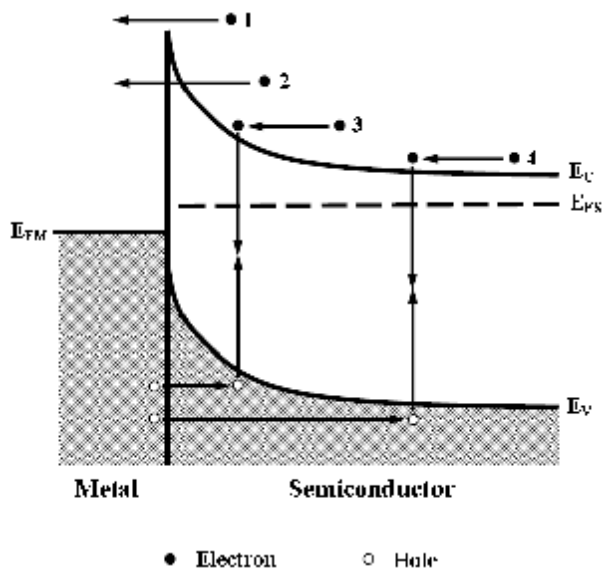


圖2-3 蕭特基位障在順向偏壓下的四種基本載子傳導機制示意圖



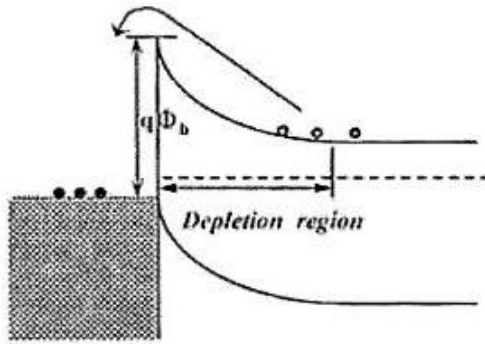


圖2-4 熱離子發射

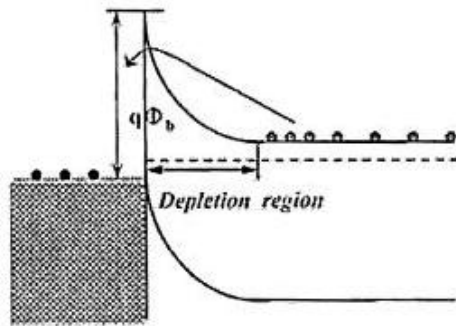


圖2-5 熱游離場發射

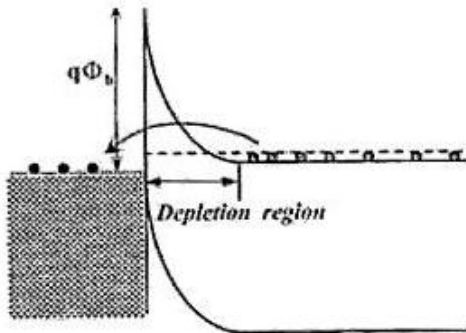


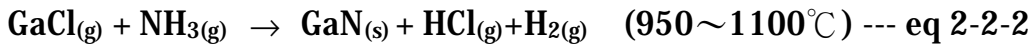
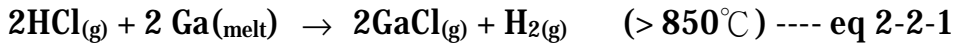
圖2-6 場發射

2-2 氮化物氣相磊晶系統

2-2-1 磊晶原理

氮化物氣相磊晶法(Hydride Vapor Phase Epitaxy：HVPE)成長氮化鎵材料時，由於鎵(Ga)與氨氣(NH₃)無法直接反應形成氮化鎵，故主要是利用氯化氫(HCl)氣體在高溫時通過液態鎵金屬反應生成氯化鎵(GaCl)，接著氯化鎵分子隨著氣流帶至位於反應爐中央近基板的位置，並與氨氣進行反應，在反應區結合成氮化鎵後沉積至基板上。

其主要反應式如下：



其爐體反應區如圖2-2-1所示為一水平式反應腔體，相對垂直式反應腔體的最大優點在於生長過程中不易有微粒(particle)沉積至晶片上且溫度比較得以控制，因加熱爐本身可分割成多重加熱區有利於溫度的穩定。

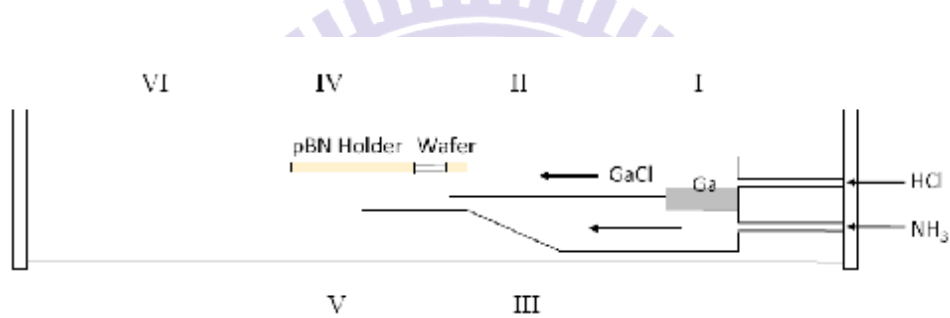
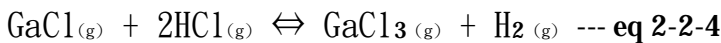
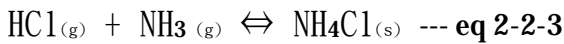


圖2-2-1 HVPE反應爐管示意圖

而反應物除了氮化鎵外，在成長過程中也會產生許多的副產物，如氯化銨(NH₄Cl)、氯化鎵(GaCl₃)、還有氨氣(NH₃)等，這些副產物中以氯化銨最容易影響機台的真空度，因為氯化銨為白色粉末，容易沉積在反應爐管壁或末端管口上，以下為副產物的反應式：



由上面反應式可得知副產物三氯化鎵也會與氨氣反應形成氮化鎵，但是高溫下三氯化鎵極不穩定，所以在磊晶過程中，此反應不是主導氮化鎵磊晶的來源。

2-2-2 磊晶機台簡介

本實驗採用的磊晶機台為自行組裝水平式HVPE，整個系統架構如圖2-2-2所

示，自組式(home-made)磊晶基台優點在於花費不高，且更改設計有著較大的空間；但缺點在於時常會發生不可預期的故障問題，零件故障後等待維修的時間較長，需要較多耐心處理。機台主要架構可分為五大部分：

(1) 溫控系統：

使用 SiC 加熱棒，雖然壽命較短，但是升溫速率極高，最高溫度也可達到 1200°C，此溫度已符合該機台操作溫度範圍，加熱區共分為六個溫控區如圖3.1 所示，第I區為金屬鎵與氯化氫反應區，溫度通常操作在850°C；第II、III、IV、V 區為成長反應區，操作溫度約在1050°C 分為四個溫控區最大原因是希望能夠有效地將溫度均勻控制在成長溫度；第VI 區為銜接石英爐管與不銹鋼部分為非反應區，故溫度僅操作在950°C，各區的溫控器誤差值約在5°C 左右。待機狀態下，各區的溫度皆控制在500°C，以避免水氣滲入反應腔體中。

(2) 蒸空系統：

因氫化物氣相磊晶成長氯化鎵之真空度要求不高，通常待機下能維持在 10mBar 以下即可，故僅使用一台機械幫浦(mechanical pump)進行抽氣；長晶的溫度大約為950°C~1100°C，需要利用冷卻吸附器(cold trap)來降低氣體溫度；成長氯化鎵時會產生大量的副產物氯化銻，所以在爐管至機械幫浦間加裝微塵吸附器(particle trap)來收集長晶所留下的副產物；爐管壓力的調整則藉由節流閥(throttle valve)的閥開關程度準確的控制壓力。封真空用O型環(O-ring)均使用可抗酸耐高溫的氟化橡膠(viton)材質。但是Viton材質遇火會產生致命的氫氟酸(HF)，因此在接觸viton o-ring時需穿戴手套處理。

(3) 爐管：

本實驗機台之爐管採用水平式設計，溫度分布相對於垂直式較容易控制。爐管材料為石英管，其兩端與不銹鋼端蓋(endcap)接合處使用抗酸、耐高溫之氟化橡膠(viton)材質O 型環(o-ring)以於封真空。

(4) 氣體管路：

本機台中，共有三條管路輸入爐管內，分別為外管、上管、下管。外管是直接通入石英爐管，主要通入氮氣使爐管內氣體流場穩定。輸入內管則有兩條管路，一條為上管，將氯化氫氣體與載氣(carrier gas)送入與液態鎵反應生成氯化鎵(GaCl)，另一條則為下管，將氮氣與載氣送入後在反應區與上管氣體反應生成氯化鎵。待機狀態時，皆通入氮氣以避免管路水氣凝結污染氣體管路，也可使爐管維持潔淨。氣體流量則使用質流控制器(Mass Flow Controller: MFC)來準確控制氣體流量。

(5) 冷卻水系統:

由於成長溫度高約1050°C，石英爐管可以承受此高溫，但不銹鋼則需要靠冷卻水管路冷卻，冷卻水為一般自來水非去離子水(DI-water)，冷卻水由源頭流入後經過20 μ m 的濾芯以過濾水中漂浮物，避免冷卻水路堵塞。

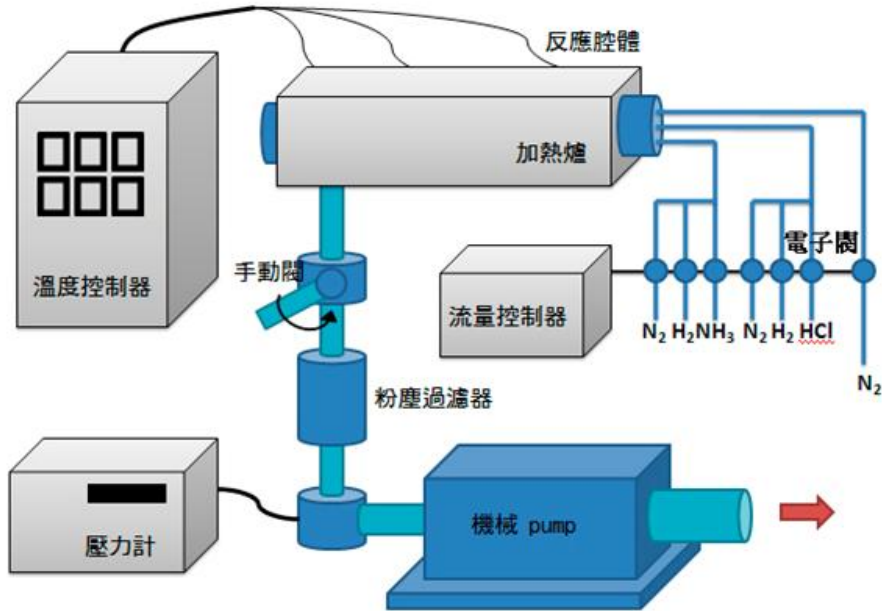


圖2-2-2 HVPE機台示意圖

2-3 電子束蒸鍍系統

傳統的熱蒸鍍系統必須對整個蒸鍍源加熱，易使能量的應用效率降低，且易將整個乾鍋內的雜質同時鍍到元件上面，故發展出電子束蒸鍍系統(electron gun evaporation)。電子束蒸鍍法是一種物理製程，利用電子槍所射出之電子數轟擊待鍍材料，將高能電子數的動能轉為融化待鍍材料的熱能，此法擁有較佳之熱轉換率，同時也可得到較高鍍膜速率，且可利用改變電流大小來控制熱電子數目，以調控其蒸鍍速率。

電子束蒸鍍示意圖如圖2-3-1所示，蒸鍍靶材是置於有充份冷卻之乘載坩鍋中，電子數以熱電子形式離開加熱燈絲，自下方一端高電壓陰極的電壓差加速射出，在外加磁場的作用下，電子束迴旋270度後撞擊上方坩鍋蒸鍍源，高熱熔融區僅限於被電子束直接打擊的材料表面附近有限區域，其他部份是屬於相對低溫的狀態，這是一種直接加熱的方法，熱熔融區的材料與坩鍋可被低溫同質材料間接隔離離開來。

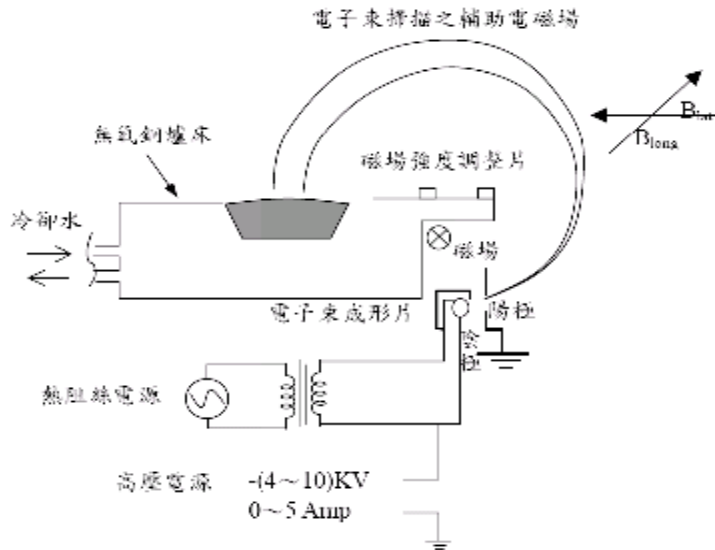


圖2-3-1 電子束蒸鍍系統簡易圖

2-4 霍爾量測原理

在1879年，霍爾(Edwin H. Hall)利用於導體中導入電流，將導體置於外加磁場中量測其感應霍爾電壓(Hall Voltage)來判斷傳導載子的極性與濃度，稱為霍爾效應(Hall effect)。此方式廣泛的被利用於半導體中參雜載子性質的量測上。

量測原理如圖2-4-1所示，以n-type半導體為例，於材料左右端施加一偏壓，因此材料內的載子會順著偏壓流動，此時再施加一與載子流動方向垂直之磁場 B ，流動中的載子因受磁力($F=qVd \times B$)的影響，而產生一與偏壓及磁場方向皆垂直的電壓 V_H ，此電壓即為霍爾電壓。此時可藉由量測電壓之正負與大小，加上一些數學式推得半導體的參雜載子性質、濃度與電子遷移率等。

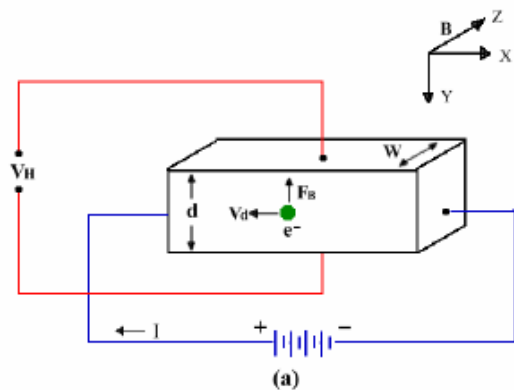


圖2-4-1 n-type 半導體霍爾量測簡易圖

2-5 光響應度量測系統

2-5-1 光偵測器工作原理

光檢測器的作用在於將輸入光能量轉換成電流並輸出(如圖2-5-1)，半導體光檢測器的作用可分成三個過程[14-15]：(1) 光入射吸收區並產生電子-電洞對
(2) 電子-電洞對在吸收區內受電場作用分離並穿越半導體分別往兩電極移動
(3) 電子及電洞分別被電極所收集並流經外部迴路形成光電流。

2-5-2 光偵測器重要參數

(1) 光響應度 (Responsivity, R)

光響應度的定義為在特定波長下，輸出的電流與輸入光強度的比值：

$$R \equiv \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = \frac{\text{輸出的電流}}{\text{輸入光強度}} = \frac{\text{量測到的光電流}}{\text{光照射到元件的功率}} \quad (\text{A/W})$$

其主要是代表元件對此一波長下光照時的反應。

(2) 量子效率 (Quantum Efficiency, η_{ext})

光偵測器的外部量子效率定義如下：

$$\eta_{ph} = \frac{\left(\frac{I_{photo}}{q} \right)}{\left(\frac{P_{inc}}{h\nu} \right)} \cdot 100(\%)$$

其中 I_{photo} 為因入射光產生的光電流， q 為電子電荷量， P_{inc} 為光照射到元件的能量， h 為普郎克常數， ν 是入射光子的頻率，量子效率代表著此元件在該波長將光轉換成電效率的高低。

(3) 鑑別率

鑑別率指的是不同波長的響應度比值，以紫外光-可見光的鑑別率來說為紫外光響應度與可見光響應度的比值：

$$\text{Rejection Ratio}_{\text{紫外光-可見光}} = \frac{R_{\text{紫外光}}}{R_{\text{可見光}}}$$

$R_{\text{可見光}}$ 是可見光的響應度，我們選擇400nm的響應度， $R_{\text{紫外光}}$ 是紫外光的響應度，我們則選擇截止波長(pinch off處)的響應度。紫外光-可見光鑑別率越高代表越不容易受到可見光波段的干擾。

2-5-3 光偵測器量測系統

我們主要的量測系統結構如圖2-5-2，組成儀器有下面幾個重要元件：

- A、半導體參數分析儀 (Agilent 4156C)
- B、AST PE300BF 300W 氙燈 (200~1100nm)
- C、紫外光高穿透率透鏡 (Plano-convex lenses)
- D、單色分光儀 (Monochromator, Triax series 180MS2)
- E、矽光功率偵測器 (PowerMeter, Duma OctaPower P038)
- F、高解析度頻譜分析儀 (Ocean Optics, HR2000CG-UV-NIR)

如圖2-5-2所示，量測前我們已對單色分光儀所分出的光利用高解析度頻譜分析儀作波長校對，每個波段的光能量也已用光功率偵測器記錄下。光源由氙燈放射出去後經透鏡收集後進入單色分光儀，單色分光儀將光源分成單一波長之光後導入光纖，光纖再將光導出並照射至元件，此時元件即可吸收入射光之能量產生電子電洞對並由半導體參數分析儀的探針量測，即為照光時的電壓－電流曲線圖 (I-V curve)，而此電流即所謂的光電流。

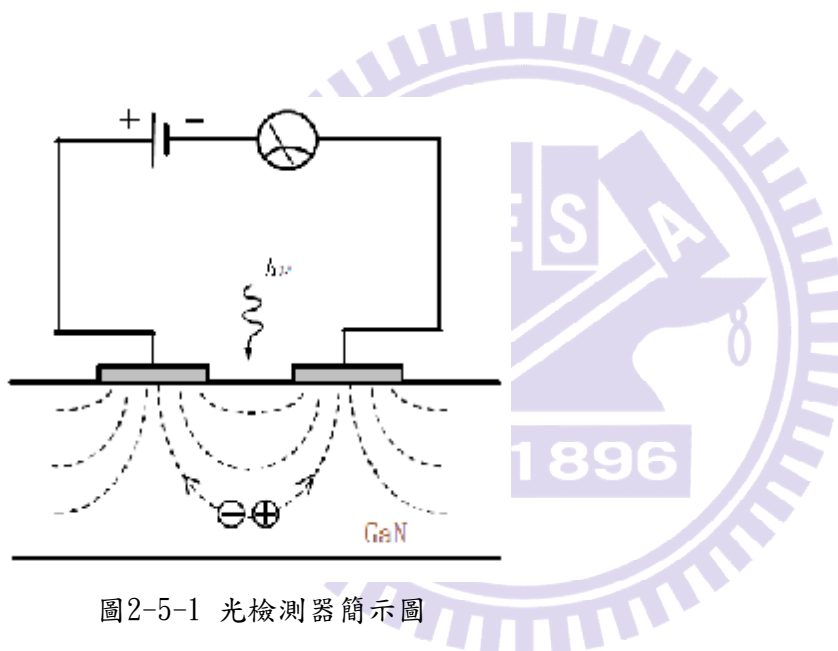


圖2-5-1 光檢測器簡示圖

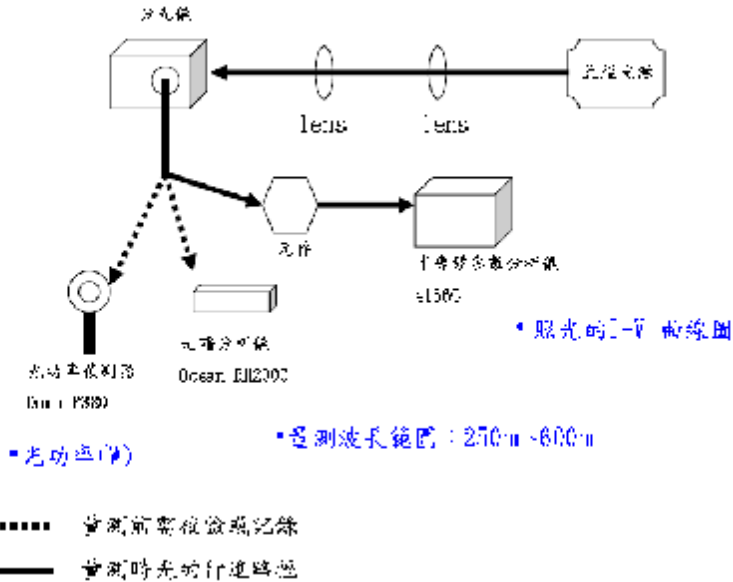


圖2-5-2 量測光響應度儀器示意圖

2-6 光致發光光譜量測系統 (PL)

光激發螢光(Photoluminescence Spectrometer, PL) 光譜對於檢測發光半導體材料的光特性是一個有力又無破壞的技術，而且藉由分析光激發螢光資料，可以由光譜中的特徵可以得知摻雜雜質種類、能隙大小、雜質活化能等等。從發光光譜峰能量可以估算出化合物中的組成成分，由半高寬可得知其材料品質。

螢光(Luminescence) 是物理系統由於過度熱輻射或白熱化後產生電磁輻射放射的一種現象。對於發光半導體而言，入射光子的能量等於或是超過能隙時，會激發價帶電子跨過能隙到達導帶，然後當半導體由激發狀態回復到基態時便會產生輻射放射。吸收的現象同樣會發生在一個電子從中性的受子能階激發到更高的能態，亦可從價帶，遷至離子化的施子能階或是從離子化的受子能階躍遷至導帶。這些現象可以很有成效地反映出半導體中的能帶或是雜質的現象。發光過程典型包含三個步驟：(1)激發，(2)熱平衡，(3)再復合。

入射光產生的電子電洞對(electron-holepairs)，經由熱平衡分布後會再結合然後產生光子。雜質與缺陷會在能隙之中形成各種能階，而其對應的能量會由輻射再復合過程產生放射或者是經由非輻射再復合過程產生吸收。當入射光(電

磁輻射) 照射在試片上時，導致電子被升高至激發態，典型的能帶躍遷過程(如圖2-6-1所示)。

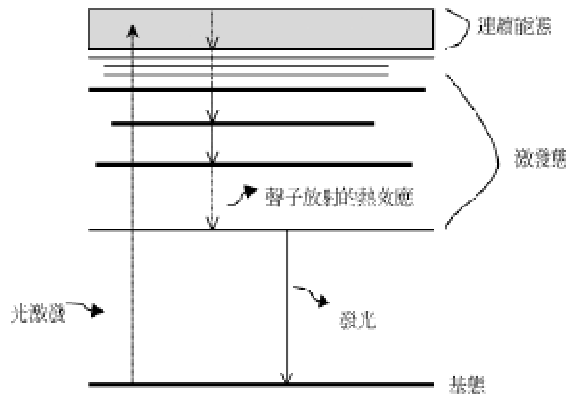


圖2-6-1 電子躍遷圖

以下是放射性結合路徑的種類與圖2-6-2 放射結合路徑示意圖：

- (a) 導電帶電子與價帶電洞再結合躍遷
- (b) 在施子能階(donor level)的電子與價帶電洞再結合躍遷
- (c) 在導電帶的電子與授子能階(acceptor level)的電洞再結合躍遷
- (d) 在施子能階的電子與授子能階的電洞再結合躍遷
- (e) 自由激子(free exciton)的再結合躍遷等方式

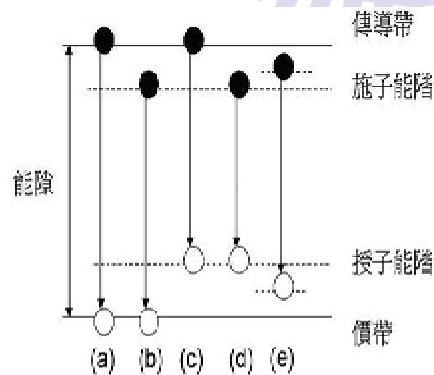


圖 2-6-2 放射結合路徑示意圖

一旦吸收了入射光之後將電子激發到更高的能態，電子將會釋放到較低的能態。在釋放中帶有不同的過程，可被分類為輻射過程(如光激發螢光)，或非輻射過程(如聲子放射，缺陷捕捉，或歐傑效應)。一般而言，在發光產生之前，較高能量(較短波長) 激發的光子導致較多的聲子射出。同樣地，較低的激發能量傾向導致較少的聲子射出。如果激發的能量小於基態和第一激發態之間的能量差時，將沒有光被吸收，也就沒有光激發螢光。放射必需是電子從導帶的最小值移動到價帶的最大值。當激發的能量小於能隙的能量時，光吸收情況將不會發生。

常見的光激發螢光系統(如圖2-6-3所示)，所使用的激發光源為連續藍光氦鎘雷射(Helium-Cadmium Laser)，其主要波長為325nm，無特殊極化方向的多模態雷射，雷射平均輸出功率為30mW，雷射光經由三面雷射反射鏡的反射後，以焦距為5公分的聚焦透鏡，正向聚焦到樣品上，經聚焦後的光點直徑約為0.3mm，樣品表面的功率密度可達21W/cm²，樣品被激發出的螢光同樣藉著此聚焦透鏡收光，與光譜儀入光口前的另一個焦距為15公分的聚焦透鏡，形成共焦的光學路徑。

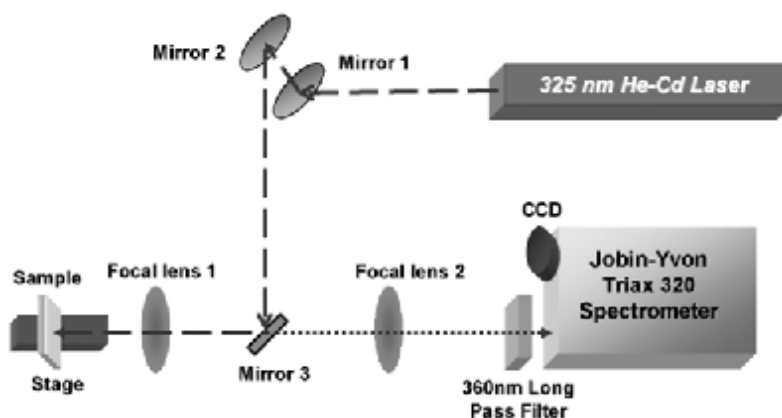


圖2-6-2 PL系統架構

2-7 X射線繞射分析儀 (XRD)

1913年W. L. Bragg父子在從事晶體結構分析實驗中，從散射X光的分布情形，他們認為可以將繞射現象視為入射光被晶面反射。此種反射如同鏡面反射，入射角等於反射角。在某些散射角下，從相鄰晶面散射之波彼此相位相同，光程差為波長的整數倍，因而產生建設性干涉，滿足此條件便可產生繞射，稱為布拉格定律。X射線的波長在 10^{-8} cm (1\AA)附近，穿透力大，空間解析度高。利用此光源可以做各種的分析，小至分子中原子的距離、鍵結型態，大至人體各部位的透視，可廣泛應用於材料結晶構造鑑定、醫學及非破壞檢測實務上。由於在材料晶體中，各結晶面間的距離與X光的波長的數量級相當，當X光源照射在一組

平行結晶面(hkl)上時，兩鄰近面在入射及繞射光之光程差為波長的整數倍時，會呈現加乘效應，即符合布拉格公式(Bragg's law)的關係；

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

其中，d為鄰近平行結晶面(hkl)兩平行面間的距離， θ 為入射光與平面的夾角， λ 為X光源的波長，n為任意整數。圖2-7-1是一個單晶繞射的示意簡圖。當光程差是 λ 的整數倍時，呈現加成效應；而若光程差非 λ 之整數倍時，視為削減效應。由此，可預期繞射峰另在特定的 θ 產生。為滿足Bragg繞射公式，必須滿足下列兩個條件。第一、入射光、繞射光與晶體平行面之法線這三個向量需在同一平面。第二、欲測面的法線平分入射光與繞射光的夾角。

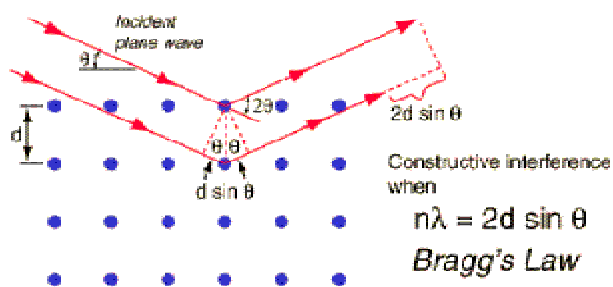


圖2-7-1 布拉格繞射示意圖

單晶繞射分析儀的構造(如圖 2-7-2)大致上可分為 X 光光源、電源產生器、測向旋轉裝置、X 光射線偵測器(detector)及電腦自動控制等部份。測向旋轉裝置主要有三軸旋轉機制，可以利用三個方向的旋轉到各晶格面(hkl)的法線向量(n_{hkl})是與入射光及繞射光在同一平面上(滿足第一個條件)。X 光射線偵測器的位置，必須設計一個與 ω 軸共圓心的 2θ 環。每當 ω 軸旋轉 θ 角時，偵測器就必須旋轉 2θ 的角度。電荷耦合極偵測器(CCD)是利用金屬氧化半導體電容物質造成電荷儲存的能力，X 光光子經由鈹窗進入，經由尖錐光纖聚焦而傳送到 CCD 晶片中。在 CCD 晶片中，光子就轉換成電子訊號儲存起來。最後的曝光過程中，CCD 晶片區域內的電荷就會被依序讀出、處理，並顯示出來，其好處是收集數據速度快，且測向裝置不再需要三個軸，單軸或是雙軸均可。

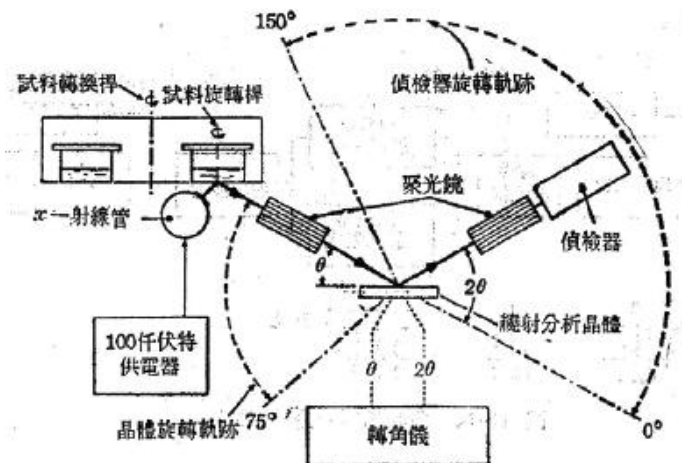


圖2-7-2 X光繞射儀裝置示意圖

X-ray的量測最主要有兩種模式分別為 $\theta-2\theta$ scan以及 ω -scan，分別能提供成長材料中每個晶面的晶格常數以及該晶面的成長品質。藉由 $\theta-2\theta$ 掃描，可以得到晶體的晶格常數。而 ω -掃描，亦稱為搖擺曲線(Rocking Curve)，其量測方式示意圖如圖2-7-3所示。藉由此方式之測，可以由半高寬決定晶體的品質。

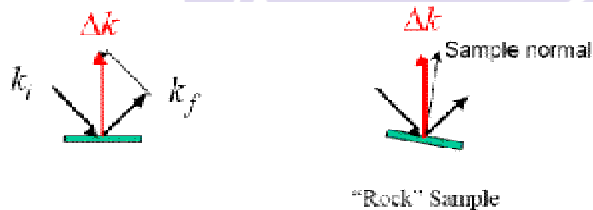


圖2-7-3 搖擺曲線量測方式示意圖

2-8 二次離子質量光譜量測系統

二次離子質譜儀(Secondary Ion Mass Spectrometer)具有足夠能量的一次離子(primary ions)撞擊到試樣的表面，經與固體作用後，然後將表面的原子或分子撞擊出來，呈離子狀態的二次離子(secondary ions)，收集至質譜儀(mass spectrometer)，經質譜之分析，而達到試品表面成份元素之定性及定量分析之研究。另外，由於一次入射離子可以適當的聚焦至微小點，並且可掃描試片表面，因此方可利用SIMS作顯微影像分析之觀察。二次離子質譜儀主要用來分析固體表面及表面以下30微米(mm)深度內的區域和部份液體樣品的表面。此技術乃以一帶能量(0.5-20 kV)的離子束撞擊試片表面，產生離子化的二次粒子，再用質量分析儀加以偵測。

系統主要分為四個部份(如圖 2-8-1)：

- (1) 一次離子：提供 SIMS 分析之主要激發源
- (2) 透鏡磁組(調校離子束路徑)與離子束行進真空腔體
- (3) 磁偏式質譜儀：將樣品被撞擊出之二次離子依不同質荷比分開
- (4) 訊號偵測與轉換處理：偵測不同元素之離子強度。

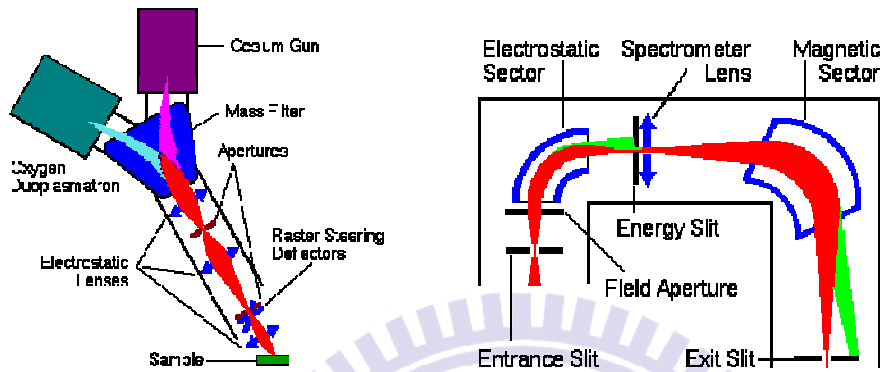


圖2-8-1 二次離子質譜儀系統簡示圖

SIMS不但可作表面及整體之分析，又可直接作影像觀察，其靈敏度及解析能力甚高，由最小的氫至原子量很大的元素均可偵測，尤其對於同位素的分析更是有效。常見的研究應用領域包括：(1) 表面研究：利用SIMS影像可以觀察試片表面所含有之元素，由適當的縱面元素之分析，可以瞭解污染之深度。(2) 縱深元素分佈：SIMS之縱深解析力 $<50\text{\AA}$ ，而靈敏度 $<10^{17}$ atoms/cm³，可利用SIMS研究經擴散及離子佈植後之不純物或同位素之縱深分佈情形。(3) 結合離子佈植技術在IC或其他半導體元件之應用。

第三章 實驗步驟

3-1 基板處理與清潔

實驗使用的氮化鎵基板分為兩組。一為使用MOCVD成長，在藍寶石(Al_2O_3)基板上先成長一層低溫氮化鎵緩衝層以獲得較佳磊晶品質，再於其上成長一層厚度 $2\mu m$ 之無摻雜氮化鎵；另一組基板是利用 HVPE 機台，在上述 $2\mu m$ 厚的氮化鎵薄膜上再成長約 $300\mu m$ 厚的氮化鎵厚膜，再利用雷射將氮化鎵厚膜與藍寶石基板分離，因此熱膨脹不匹配所造成的翹曲程度將大為改善。

在清潔的部分，將基板分別浸泡入丙酮(ACE)、IPA等溶液與D-I water，利用超音波震盪器震盪 3 分鐘後，再用氮氣吹乾。

3-2 歐姆接觸之製作

A. MOCVD 成長之氮化鎵薄膜

在此種類型的厚膜上，我們分別製作一種側向(lateral)蕭特基二極體，也就是將歐姆接觸與蕭特基接觸製作於同一面(Ga 面)上，

- a. 光罩設計：
歐姆結構為一圓環，外直徑較內直徑長 $300\mu m$ 。
- b. 曝光微影(lithography)：
 - (1) 使用光阻塗佈機，將正光阻均勻塗上，轉速 1000 rpm 初轉 10 秒後，再以轉速 4000 rpm 轉 40 秒。
 - (2) 利用棉棒沾丙酮將試片邊緣多於光阻去除以利提升曝光對準時的精準度，試片上完光阻後軟烤的條件為 $90^\circ C$ ， 1 分鐘。
 - (3) 使用光罩對準機 (Aligner) 曝光，曝光光源為 DUV 波段，曝光時間約為 25 秒。
 - (4) 曝光完成後，將試片置入顯影液(AZ300)約 40 秒。
 - (5) 當完成光阻形狀完成後，將試片置入 $120^\circ C$ 的烤箱，硬烤兩分鐘。
- c. 蒸鍍金屬電極(E-gun)：
 - (1) 將試片表面利用電子槍蒸鍍機，真空度為 2×10^{-6} torr 下，鍍上四層金屬：鈦、鋁、鎳、金，其厚度分別為 $30/120/50/30\text{ nm}$ 。
 - (2) 將試片置入丙酮溶液中，使用震盪器將光阻去除。
- d. 快速熱退火：
將試片置入快速熱退火腔裡，條件為 $750^\circ C/60$ 秒。

B. HVPE 成長之氮化鎵厚膜

在此種類型的厚膜上，我們分別製作兩種不同幾何結構的蕭特基二極體，一種是側向蕭特基元件，也就是將歐姆接觸與蕭特基接觸製作於同一面(Ga-face)上，其與MOCVD成長之薄膜上的元件結構一樣；另一種為縱向(vertical)蕭特基元件，其歐姆金屬鍍在氮化鎵基板背面(N-face)，與蕭特基接觸處在不同面上。厚膜上的側向元件之歐姆接觸製作方式與薄膜元件相同，就不再介紹；縱向元件的歐姆接觸製作過程如下：

將試片置入電子槍蒸鍍機內，在氮化鎵背面，即N面，鍍上整面金屬：Ti/Al/Ni/Au，其厚度分別為30/120/50/30 nm。

3-3 蕭特基接觸之製作

A. MOCVD 成長之氮化鎵薄膜

- a. 光罩設計：
蕭特基接觸為直徑100~400 μm 的圓，位於歐姆圓環中心，直徑較歐姆圓環之內直徑小20或100 μm 。
- b. 曝光微影(lithography)：
 - (1) 使用光阻塗佈機，將正光阻均勻塗上，轉速1000 rpm 初轉10秒後，再以轉速4000 rpm 轉40秒。
 - (2) 利用棉棒沾丙酮將試片邊緣多於光阻去除以利提升曝光對準時的精準度，試片上完光阻後軟烤的條件為90°C，1分鐘。
 - (3) 使用光罩對準機(Aligner)曝光，曝光光源為DUV波段，曝光時間約為25秒。
 - (4) 曝光完成後，將試片置入顯影液(AZ300)約40秒。
 - (5) 當完成光阻形狀完成後，將試片置入120°C的烤箱，硬烤兩分鐘。
- c. 蒸鍍金屬電極(E-gun)：
 - (1) 將試片表面利用電子槍蒸鍍機，真空度為 2×10^{-6} torr下，鍍上四層金屬：鈦、鋁、鎳、金，其厚度分別為30/120/50/30 nm。
 - (2) 將試片置入丙酮溶液中，使用震盪器將光阻去除。元件構造圖請參考圖3-3-1。

B. HVPE 成長之氮化鎵厚膜

厚膜上的側向元件之蕭特基接觸製作方式與薄膜元件相同，就不再介紹；縱向元件的歐姆接觸製作過程如下：

- a. 光罩設計：
蕭特基接觸為直徑 400 μm 的圓。
- b. 曝光微影(lithography)：
- (1) 使用光阻塗佈機，將正光阻均勻塗上，轉速 1000 rpm 初轉 10 秒後，再以轉速 4000 rpm 轉 40 秒。
 - (2) 利用棉棒沾丙酮將試片邊緣多於光阻去除以利提升曝光對準時的精準度，試片上完光阻後軟烤的條件為 90°C，1 分鐘。
 - (3) 使用光罩對準機 (Aligner) 曝光，曝光光源為 DUV 波段，曝光時間約為 25 秒。
 - (4) 曝光完成後，將試片置入顯影液(AZ300)約 40 秒。
 - (5) 當完成光阻形狀完成後，將試片置入 120°C 的烤箱，硬烤兩分鐘。
- c. 蒸鍍金屬電極(E-gun)：
- (1) 將試片置入電子槍蒸鍍機內，在氮化鎵正面，即 Ga 面，鍍上整面金屬：Ni/Au，其厚度分別為 20/1000 nm。
 - (2) 將試片置入丙酮溶液中，使用震盪器將光阻去除。元件結構圖請參考表 3-3-1 及圖 3-3-2。

3-4 快速熱退火

本實驗同時也有討論快速熱退火對於蕭特基二極體的影響。此熱退火研究主要採用 MOCVD 成長的薄膜之側向原件為樣品，將試片置入快速熱退火腔裡，條件為 300、400、500°C/30 秒，再將其與未經熱退火的元件做比較；在厚膜部分，我們直接採用熱退火條件為 500°C/30 秒。

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	unit
內圓蕭基直徑	100	200	300	400	100	200	300	400	μm
歐姆圓環內直徑	120	220	320	420	200	300	400	500	μm
歐姆圓環外直徑	420	520	620	720	500	600	700	800	μm

表 3-3-1 側向蕭特基二極體幾何說明表

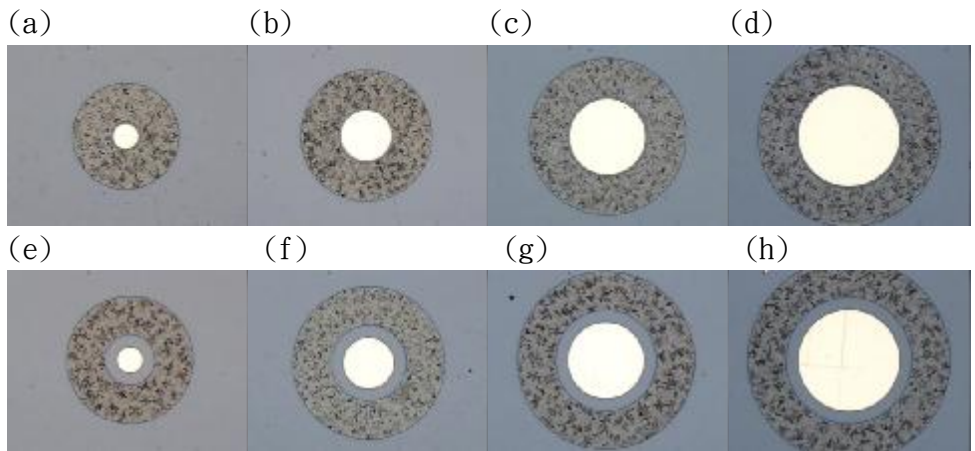


圖 3-3-1 (a)~(h) 橫向蕭特基二極體



圖 3-3-2 縱向蕭特基二極體

第四章 實驗結果與討論分析

4-1 不同基板之量測分析

實驗使用的氮化鎵基板分為兩組。一為使用 MOCVD 成長，在藍寶石(A1203)基板上先成長一層低溫氮化鎵緩衝層以獲得較佳磊晶品質，再於其上成長一層厚度 $2\mu\text{m}$ 之無摻雜氮化鎵薄膜；另一組基板是利用 HVPE 機台，在上述 $2\mu\text{m}$ 厚的氮化鎵薄膜上再成長約 $300\mu\text{m}$ 厚的氮化鎵厚膜，再利用雷射將氮化鎵厚膜與藍寶石基板分離，因此熱膨脹不匹配所造成的翹曲程度將大為改善。我們在基板上製作元件之前，先利用 XRD、PL 等量測來得知兩種基板的磊晶品質、霍爾效應求得其電性方面的差異。

4-1-1 基板之磊晶晶格品質討論

首先我們先利用 PL 量測來分析這兩種基板的差異性。量測結果如圖 4-1-1 及 4-1-2 所示，可明顯看到氮化鎵厚膜的主峰值相較於薄膜，大了將近三倍，可見厚膜的缺陷較薄膜不嚴重，光子才可有效得將電子激發後再釋放出光子，不會被大量缺陷所吸收而釋放出非光電轉換的輻射。也可以看到薄膜的曲線上有藍光放射 (blue band)，而厚膜並沒有，blue band 主要是由點缺陷(point defect)造成的，由此可知氮化鎵厚膜的點缺陷密度較薄膜的少很多。同時也發現這兩個曲線的最大峰值位置不一樣，主要是因為氮化鎵與藍寶石的晶格常數不一樣，當氮化鎵薄膜成長在藍寶石上時，晶格會被壓縮，導致能帶間隙(energy bandgap)變大，釋放出來的光波長變短；而獨立式氮化鎵基板已經藉由雷射從藍寶石基板上剝離下來了，厚膜的壓縮應力被釋放了，導致能帶間隙變小，釋放出的光波長變長。

由 XRD (002) 繞射量測結果(圖 4-1-3)可求得，兩者的半高寬分別是 271 以及 135 arcsec，由此可知厚膜的晶格品質相較於薄膜好很多，也比較整齊。因為(002)方向的 XRD ω -curve 的半高寬越寬表示 screw dislocation 量越大，所以由這張圖也可以看出厚膜的 screw dislocation 較薄膜的少。

4-1-2 基板表面缺陷密度之討論

本實驗是採用 EPD (etching pits density) 濕式蝕刻法將缺陷形狀放大，再利用原子力顯微鏡觀察其缺陷密度的大小。實驗結果顯示用 MOCVD 成長之薄膜的表面缺陷密度為 $3 \times 10^8 (1/\text{cm}^2)$ ；HVPE 再成長之厚膜的表面缺陷密度為 $9 \times 10^6 (1/\text{cm}^2)$ ，由此可知薄膜之表面缺陷密度為厚膜的 34 倍左右。

4-1-3 基板電性量測分析討論

我們利用霍爾量測法可得以下電性參數：

	on sapphire	freestanding	unit
mobility	208	269	cm ² /V-s
carrier con.	7.11*10 ¹⁶	1.334*10 ¹⁸	cm ⁻³

表 4-1-1 氮化鎵基板之電性參數

獨立式氮化鎵基板的電子遷移率比在藍寶石上的薄膜還要高，主要是因為 HVPE 成長之厚膜的晶格較薄膜整齊，即晶格錯位的情形較不嚴重，所以聲子散射(phonon scattering)的現象較小，因此電子遷移率(mobility)較大。在載子濃度(carrier concentration)方面，HVPE 再成長之厚膜較薄膜的高，我們推測這是磊晶過程中的雜質濃度與點缺陷產生。

4-2 不同基板的蕭特基元件電壓電流量測結果分析

實驗一開始，我先在 MOCVD 成長的薄膜上，製作八種不同幾何結構的蕭特基二極體，想找出較理想的幾何設計。但在圖 4-2-1 及 4-2-2 中可以發現，那一點些微的幾何差異，對電流的影響非常小，不過倒是有發現蕭特基直徑為 400 μ m 的二極體，量測結果較穩定，因此我接下來一律採用元件設計為第三章之表 3-3-1(d)的參數條件來做不同基板的元件比較。

圖 4-2-3 為兩種不同基板的元件比較。我們先看在逆偏壓-5V 下的漏電流部分，薄膜元件的電流值大約是 5×10^{-6} 安培，而厚膜元件的電流值約為 10^{-8} 安培，在這裡我們就可以很明顯的發現薄膜的漏電流為厚膜的 500 倍，會造成如此大的差異，主要原因為厚膜的缺陷密度比薄膜的小很多[8-9]。而在正偏壓的部分，由於厚膜的電子遷移率較大及載子濃度較多，所以在同樣正偏壓下，可以擁有較大電流。

4-3 橫向與縱向電流之討論

我們在獨立式氮化鎵基板上，分別製作兩種不同的結構，圖 4-3-1 為其電壓電流圖，我們可以發現在逆偏壓-5V 的地方，縱向蕭特基二極體的漏電流值比橫向的小，這主要是因為電流流向不同所造成，請見圖 4-3-2，橫向元件的電流主要從金屬的邊緣沿著氮化鎵表面流進歐姆金屬的邊緣，由於基板表面的表面狀態(interface state or trap)會比較多，所以漏電流較容易產生，而且元件的最大電場通常會發生在金屬電極的邊緣，因此最大電場將發生在狀態(trap)比較多的氮化鎵基板表面，因此崩潰電壓(breakdown voltage)會比較小；反觀縱向

元件，電流是由上往下穿過氮化鎵基板，比較不會受到表面狀態的影響，且元件的最大電場也比較不貼近表面，可得到較大的崩潰電壓。在元件製作上，縱向電流元件的步驟較側向的精簡，也可以節省氮化鎵基板的空間，元件間可以比較密集，成本比較低。若是應用在吸光元件上，因為歐姆金屬在下面，因此可以減少光源被金屬接觸反射的面積，及吸光面積增加了。在正偏壓下，橫向元件的電流，主要由蕭特基的圓形邊緣貢獻的，但縱向元件的電流是由蕭基金屬整個面流出的，因此可流出電流的金屬面積變大了，所以縱向元件的電流較側向的大。由電流電壓圖及 2-1-2 的推導公式：

$$J_s = A^* T^2 \exp(-q\Phi_B/kT)$$

$$n = \left(\frac{q}{kT} \right) \left[\frac{dV}{d(\ln J)} \right]$$

可求得三種元件的蕭特基能障(schottky barrier height)及理想因子(ideality factor)，其值為下表所示：

	Sapphire(L)	free(L)	free(V)
SBH	0.75	0.79	0.87
n	1.47	1.34	1.21

表 4-3-1 蕭特基二極體之蕭特基能障與理想因子

我們可以發現在獨立式氮化鎵基板上製作的縱向蕭特基二極體擁有最高的蕭特基能障以及最小的理想因子，主要原因如我們前面所討論的，因為獨立式氮化鎵基板較氮化鎵薄膜擁有較少的表面缺陷，磊晶品質較優，且縱向元件的電流流向不是沿著表面流動，可減少受缺陷影響。

4-4 熱退火處理之討論

本章節主要在探討快速熱退火對於蕭特基原件有什麼影響，我們一律採用 MOCVD 成長之薄膜上的橫向電流原件(d)來做討論。圖 4-4-1 為元件經過不同熱退火後的電流電壓量測結果，我們可以發現隨著熱退火溫度的提高，逆向偏壓下的漏電流將會下降。

我們利用 SIMS 的量測結果來了解各個元素的分布情形，從圖 4-4-2，可發現經過快速熱退火 500°C/30 秒後的蕭特基金屬與氮化鎵接面處，元素會受高溫影響而有熱擴散的現象：鎳元素的分佈峰值下降了，而向內外側擴散，深度也從 200nm 擴散到 250nm；金元素分部也從原本界線分明變成雙峰面貌，在 100~130nm 的部分也有高含量的金元素與鎳、氮、鎵等元素重疊。

我們再利用 XRD $\theta-2\theta$ 的量測來了解介面處的元素間的鍵結情況(圖 4-4-3), 我們可以發現氮化鎵與金屬接觸的介面, 經過快速熱退火 500°C 之後, 產生一些新的 Ni-Ga 的鍵結, 使得蕭特基位能障變高, 漏電流也可有效降低[10-11]。快速熱退火不只可以產生新的鍵結, 也會將金屬與半導體的接觸面重新安排, 減少介面狀態(interface state), 此現象也會使逆向偏壓下的漏電流下降許多。

4-5 光響應度量測結果分析

綜合以上的分析討論, 我們已經得知蕭特基元件的最佳條件是將製作於獨立是氮化鎵厚膜上的元件作熱退火處理 (500°C/30 秒), 所以我們直接將前述元件與在薄膜上製作的元件, 做光響應度的比較。圖 4-5-1 及 4-5-2 分別為薄膜上橫向電流元件及厚膜上縱向電流元件的光響應對波長的反應圖, 我們可以發現薄膜元件之電流隨偏壓增加而變大的趨勢有稍微比厚膜的嚴重, 主要是因為薄膜元件的光電導吸收(photoconductive gain)較多, 也就是表面有較多的狀態(trap)成為電子通過蕭特基能障的踏板, 這些 trap 大部份都是由缺陷(dislocation)所造成的。

圖 4-5-3 為以上兩種元件在外加偏壓 -2V 下的光響應度比較圖, 再利用 2-5 的觀念與公式, 求得以下參數:

	sapphire	free
UV to visible	8.2×10^2	2.3×10^3
QE at 360nm	9%	12%

表 4-5-1 光偵測器之鑑別度與量子效率

由上表我們可以發現在鑑別度方面, 厚膜元件是薄膜元件的三倍, 且量子效率(QE)也比較大, 這主要跟幾個因素有關: (1) 缺陷密度較少, 光子可有效轉換成電子電洞對 (2) 電子遷移率較大, 可安全將電子傳送到電路上。[12-15]

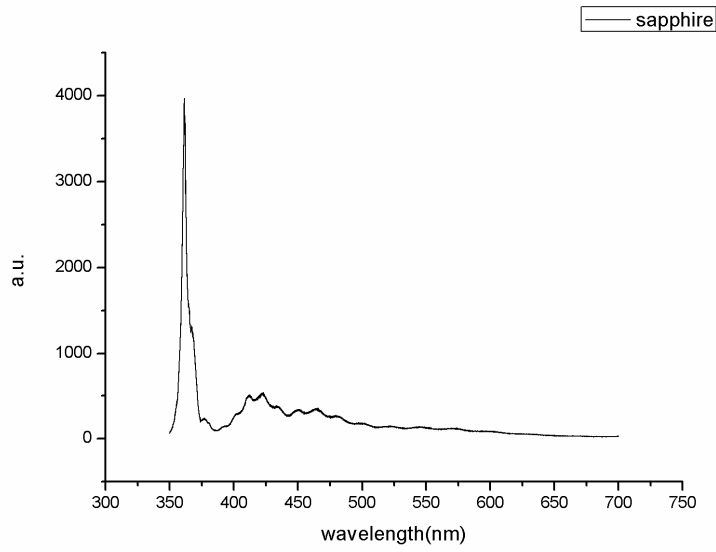


圖 4-1-1 氮化鎵薄膜之 PL 量測圖

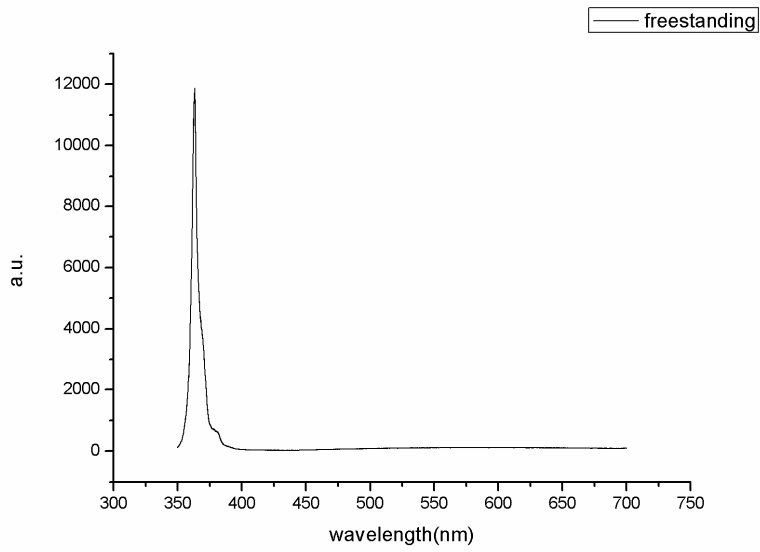


圖 4-1-2 氮化鎵厚膜之 PL 量測圖

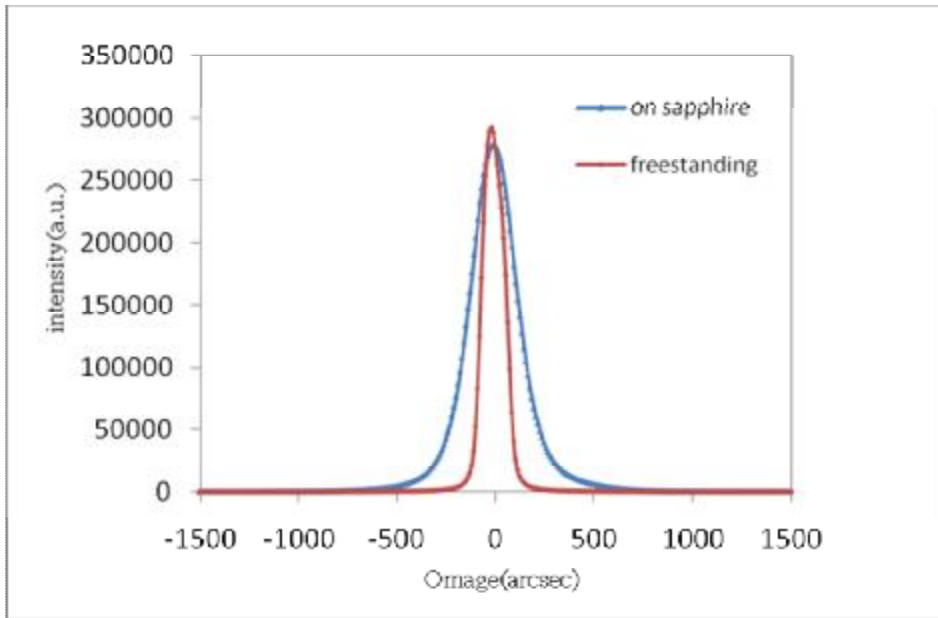


圖 4-1-3 兩種不同基板之 XRD ω -curve 量測圖

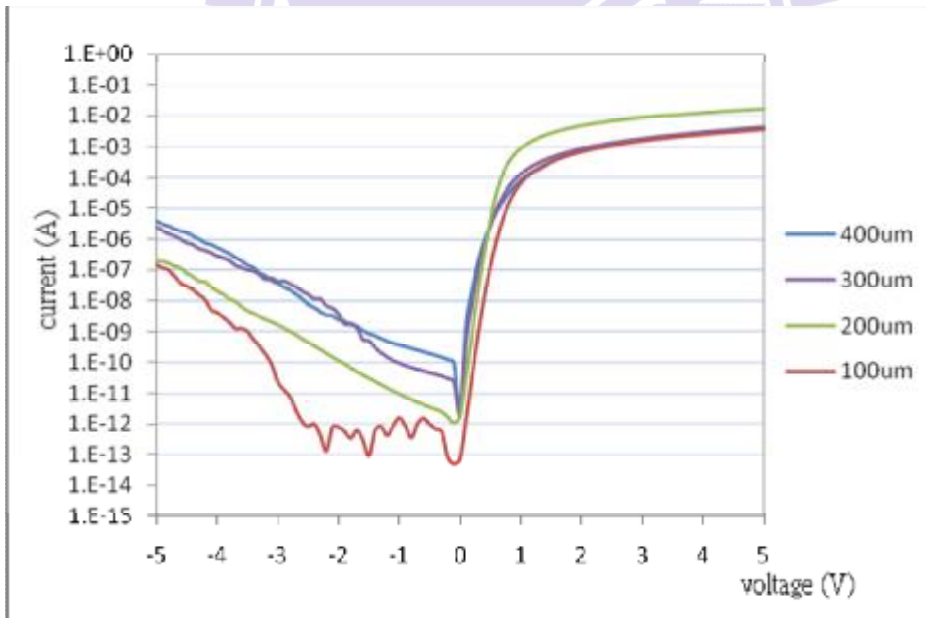


圖 4-2-1 on sapphire 薄膜元件(a~d)之電流電壓圖

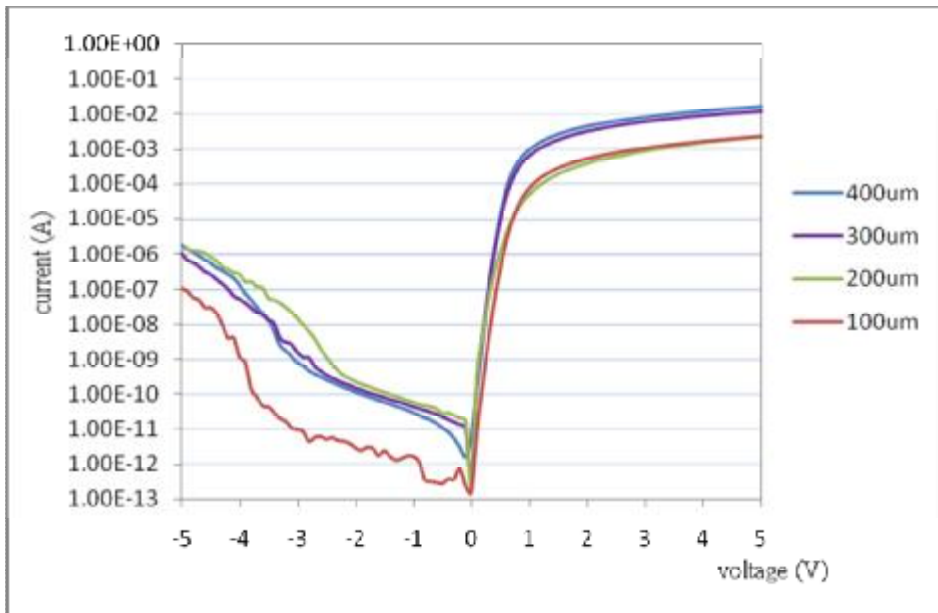


圖 4-2-2 on sapphire 薄膜元件(e~f)之電流電壓圖

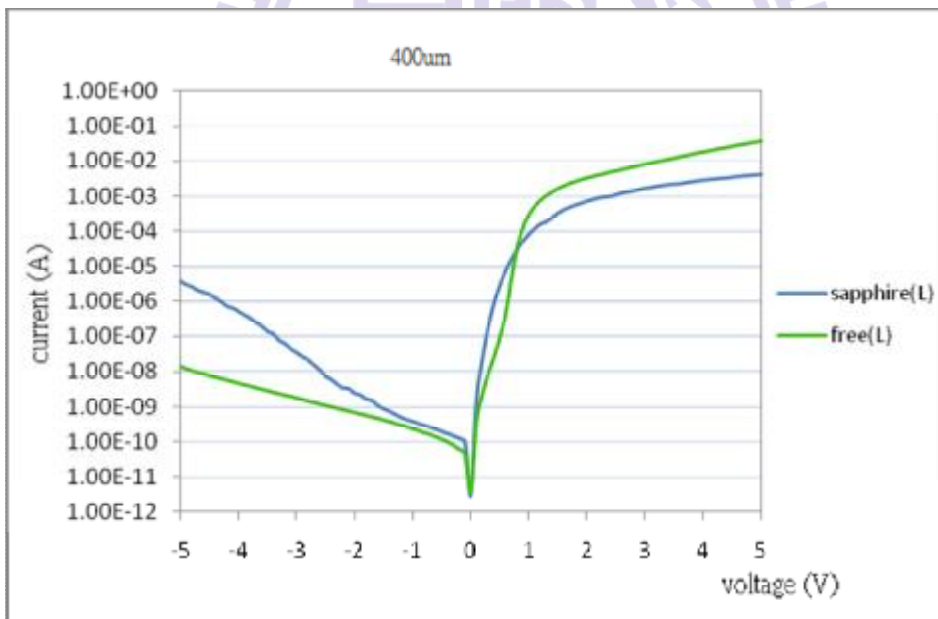


圖 4-2-3 蕭特基電流電壓圖 (1)藍色線:薄膜上的側向元件
(2)綠色線:厚膜上的側向元件

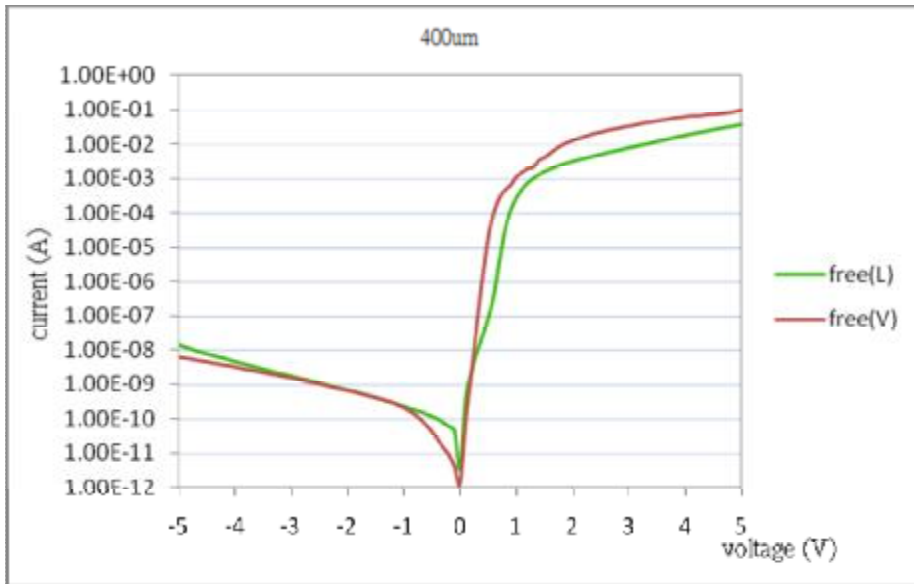


圖 4-3-1 蕭特基電流電壓圖 (1)綠色線:橫向電流元件(lateral)
 (2)紅色線:縱向電流元件(vertical)

(a)

(b)

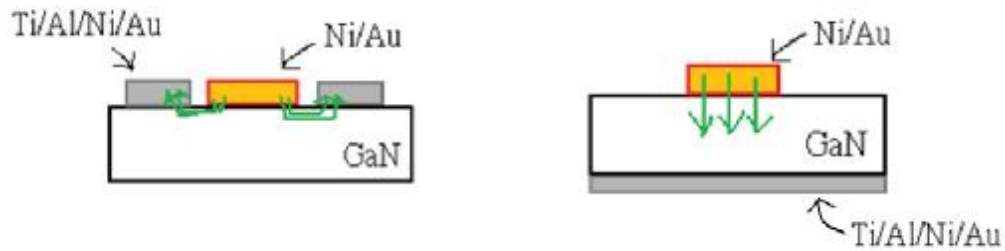


圖 4-3-2 (a)橫向 (b)縱向 電流蕭特基二極體側視圖

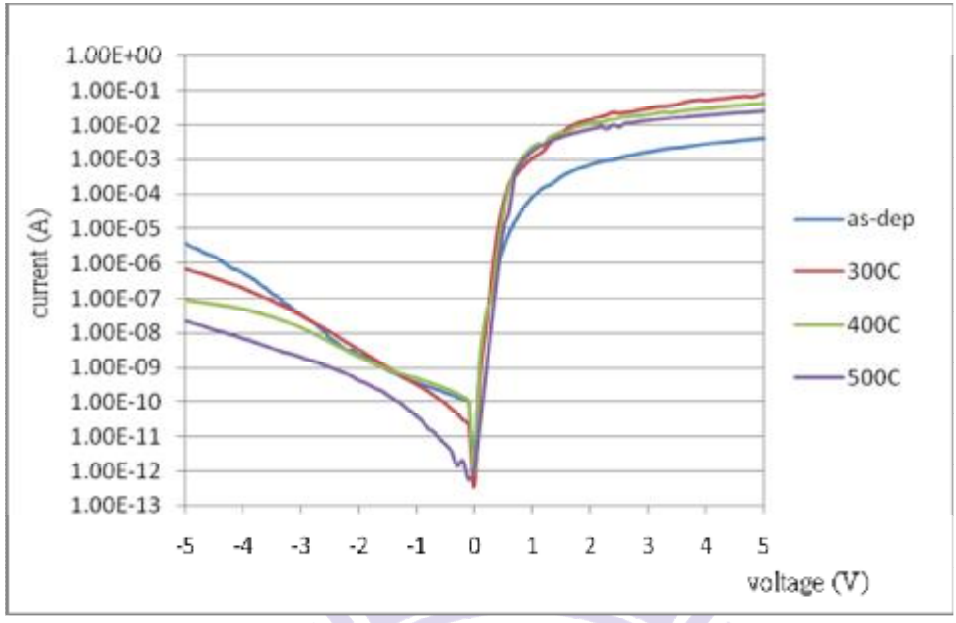
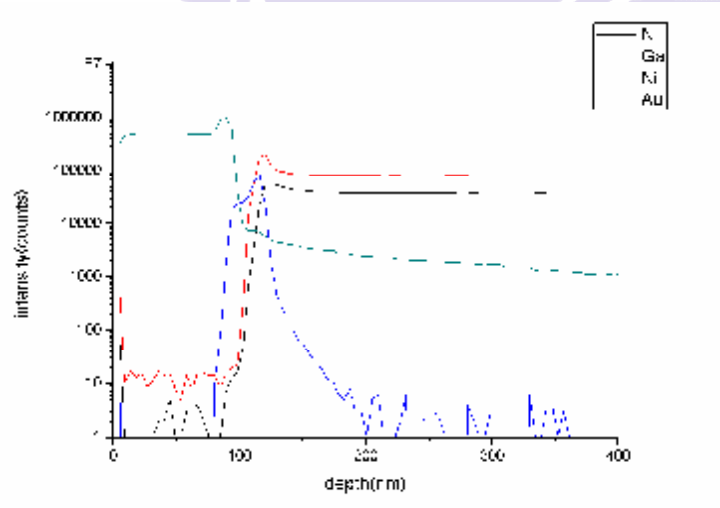


圖 4-4-1 經過不同熱退火後的電流電壓圖

(a)



(b)

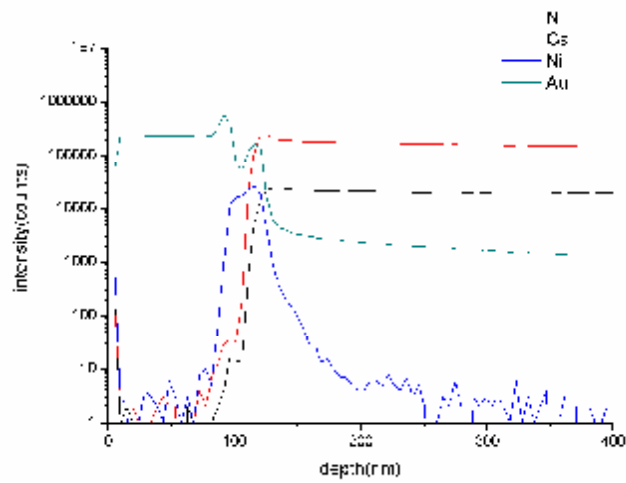
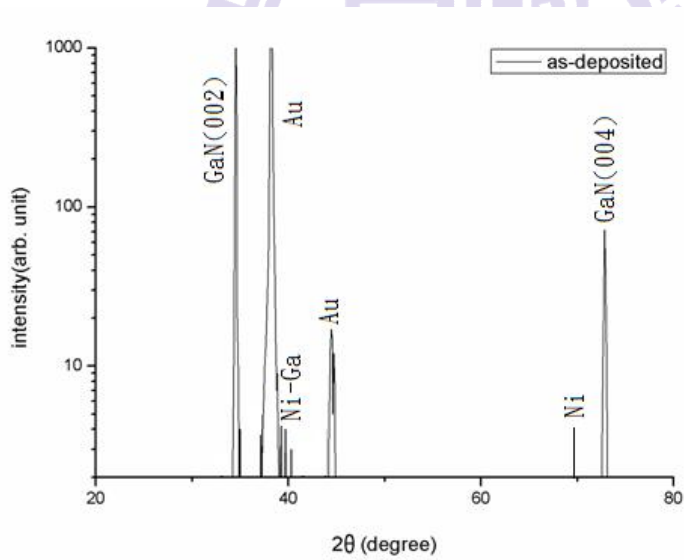


圖 4-4-2 蕭特基金屬(a)無熱退火 (b)熱退火 500°C/30s 之 SIMS 量測圖

(a)



(b)

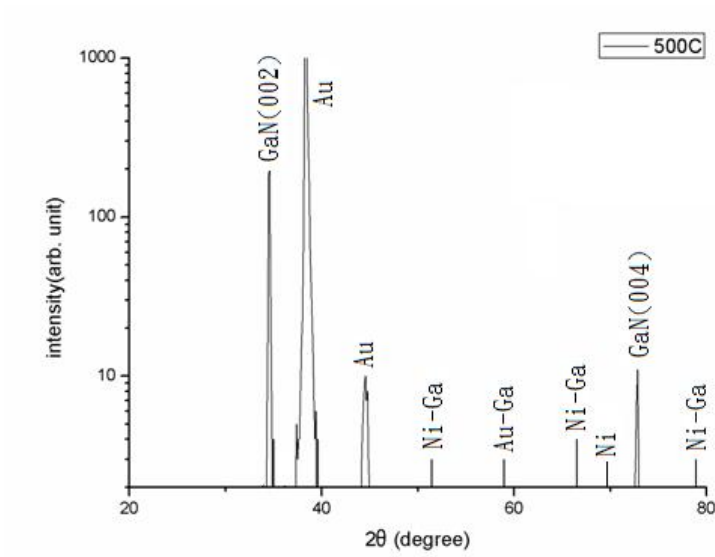


圖 4-4-3 分別為 (a)無 RTA 處理以及 (b)RTA 後蕭特基接觸的 XRD 量測圖

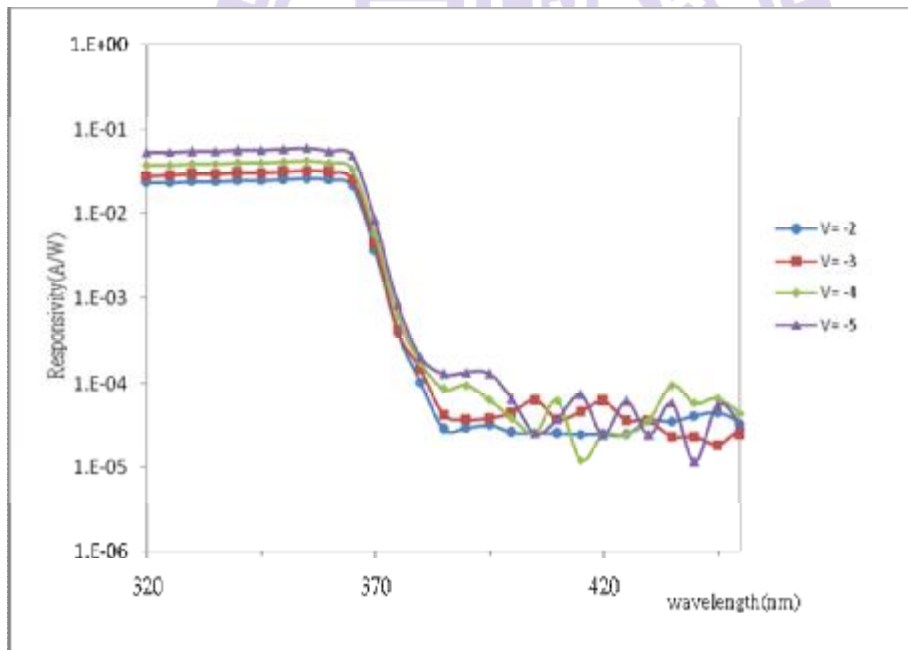


圖 4-5-1 薄膜上的元件經過 RTA(500°C/30 秒)處理的光響應度量測圖

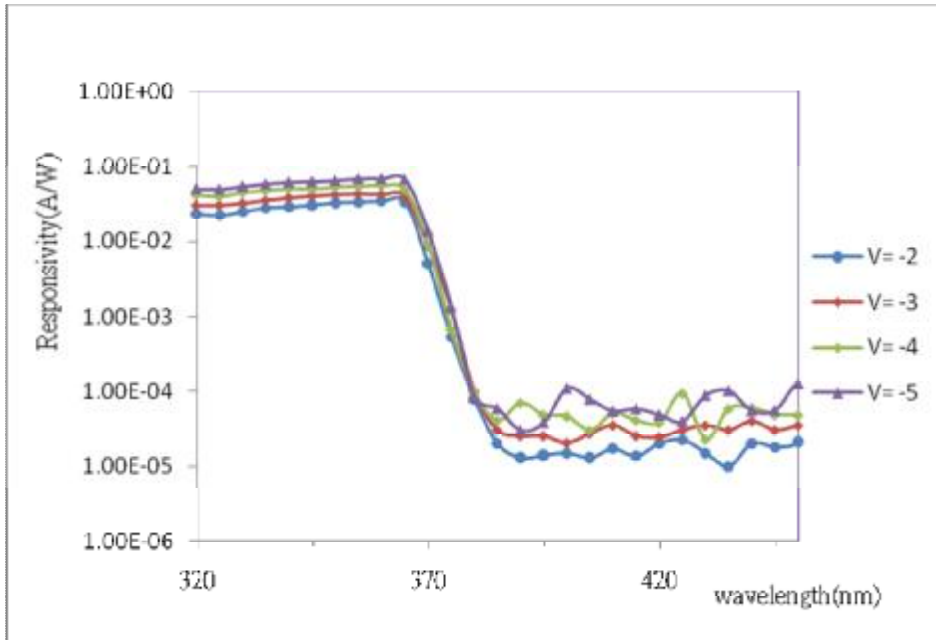


圖 4-5-2 厚膜上的縱向元件經 RTA(500°C/30 秒)處理的光響應度量測圖

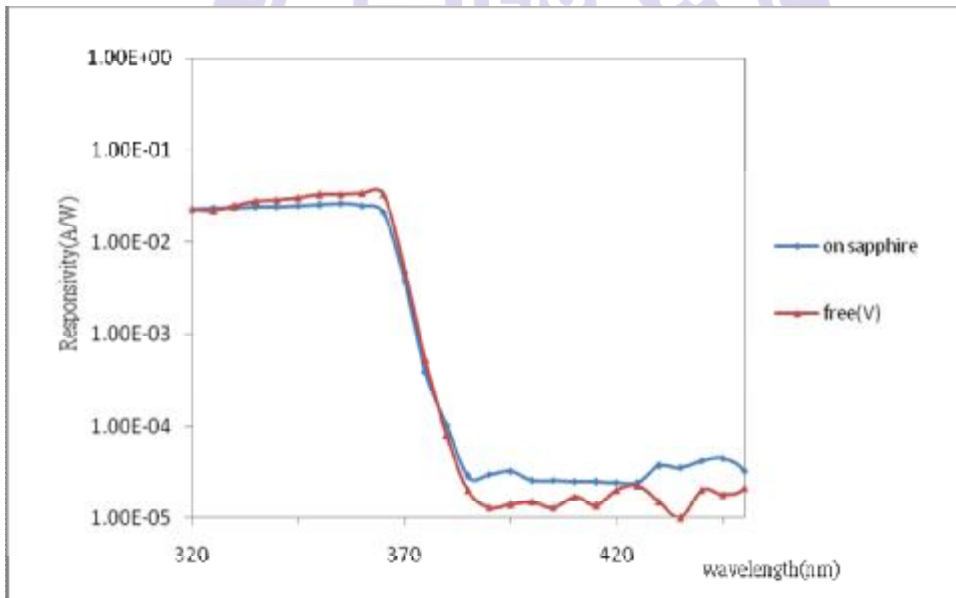


圖 4-5-3 (1)藍線:薄膜 (2)紅線:厚膜 上的元件經過 RTA(500°C/30 秒)處理的光響應度量測圖

第五章 結論與未來發展

氮化鎵材料因為異質磊晶的關係，在磊晶品質這方面一直是大家努力的一大部分，本實驗已成功利用HVPE製作出獨立式氮化鎵基板，且在基板上製作蕭特基紫外光偵測器，同時也研究橫向與縱向蕭特基二極體的差別。相較於薄膜氮化鎵基板上的蕭特基二極體，製作於獨立式氮化鎵基板上的蕭特基二極體的漏電流有明顯下降的現象，這主要跟基板表面的缺陷密度以及磊晶品質有關。透過量測分析，我們發現縱向蕭特基二極體較橫向元件擁有較小的漏電流，製作步驟較少，也可有效節省基板消耗的面積，這是薄膜(on sapphire)無法製作的元件類型。後續我們也發現蕭特基二極體可藉由適當的快速熱退火來減少逆向偏壓漏電流的大小。

將來有機會的話，我們可以試著在HVPE成長的厚膜上，利用MOCVD再成長2~8微米的高品質氮化鎵，或是將厚膜做一些表面處理，浸泡高溫KOH等溶液，以降低逆向偏壓漏電流，提高蕭特基能障。



參考文獻

- [1] S. Porowski: MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 4S1 (1999) G1.3.
- [2] T. Inoue, Y. Seki, O. Oda, S. Kurai, Y. Yamada, and T. Taguchi: Phys. Status Solidi B 223 (2001) 15.
- [3] F. Kawamura, M. Morishita, K. Omae, M. Yoshimura, Y. Mori, and T. Sasaki: Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) L879.
- [4] T. Hashimoto, F. Wu, J. S. Speck, and S. Nakamura: Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) L889.
- [5] K. Fujito, S. Kubo, H. Nagaoka, T. Mochizuki, H. Namita, and S. Nagao: J. Cryst. Growth 311 (2009) 3011.
- [6] E. H. Rhoderick, R. H. Williams, Metal-Semiconductor Contacts, Clarendon Press. Oxford (1998)
- [7] S. M. Sze, Semiconductor Device Physics and Technology, pp. 160 (1985)
- [8] J. Suda, K. Yamajiri, Y. Hayashi, T. Kimoto;2, Applied Physics Express 3 (2010) 101003
- [9] K. Fujito, S. Kubo, H. Nagaoka, T. Mochizuki, H. Namita, and S. Nagao: J. Cryst. Growth 311 (2009) 3011.
- [10] H. S. Venugopalan, S. E. Mohny, B. P. Luther, S. D. Wolter, J. M. Redwing, J. Appl. Phys. 82 (1997) 650.
- [11] M. Ki, C. Li, F. Wang, W. Zhang, Mater. Sci. Eng. A 422 (2006) 316.
- [12] M. Siva Pratap Reddy, V. Rajagopal Reddy, Chel-Jong Choi Journal of Alloys and Compounds 503 (2010) 186 - 191
- [13] S. J. Chang, S. M. Wang, P. C. Chang, C. H. Kuo, S. J. Young, T. P. Chen, S. IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 10, NO. 10, OCTOBER 2010
- [14] O. Katz, V. Garber, B. Meyler, G. Bahir, and J. Salzman, Appl. Phys. Lett., vol. 79, pp. 1417 - 1419, 2001.
- [15] S. J. Chang, K. H. Lee, P. C. Chang, Y. C. Wang, C. L. Yu, C. H. Kuo, and S. L. Wu, IEEE J. Quantum Electron., vol. 44, pp. 916 - 921, 2008.
- [16] Y. Saitoh, K. Sumiyoshi, M. Okada, T. Horii, T. Miyazaki, H. Shiomi, Applied Physics Express 3 (2010) 081001