

國立交通大學
電子物理學系
碩士論文

深層能階缺陷對光激發載子於 GaAsN/GaAs 量子井

結構中的影響

The influence of deep-level traps on photo-carriers
in GaAsN/GaAs quantum wells

1896

研究 生：陳敬恩

指 導 教 授：陳 振 芳 博 士

中華民國一百零二年八月

深層能階缺陷對光激發載子於 GaAsN/GaAs 量子井

結構中的影響

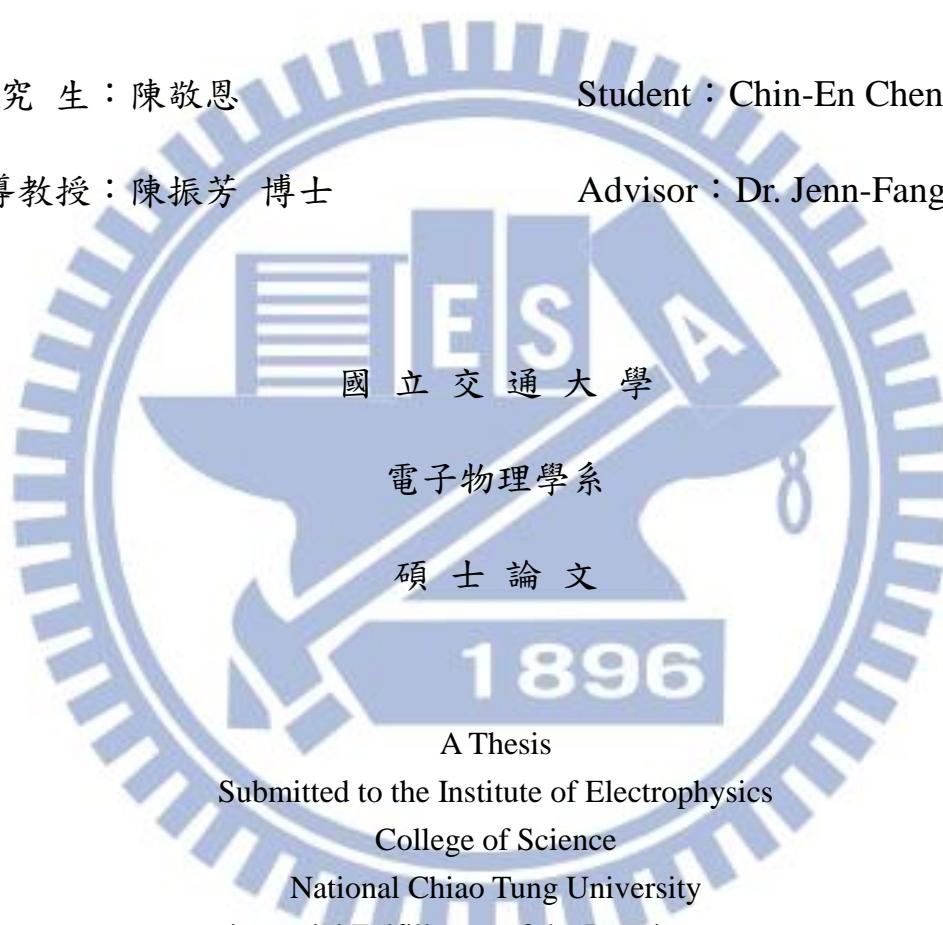
The influence of deep-level traps on photo-carriers
in GaAsN/GaAs quantum wells

研 究 生：陳敬恩

Student : Chin-En Chen

指導教授：陳振芳 博士

Advisor : Dr. Jenn-Fang Chen



Submitted to the Institute of Electrophysics

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Electrophysics

August 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 一 百 零 二 年 八 月

深層能階缺陷對光激發載子於 GaAsN/GaAs 量子井結構中的影響

研究生：陳敬恩

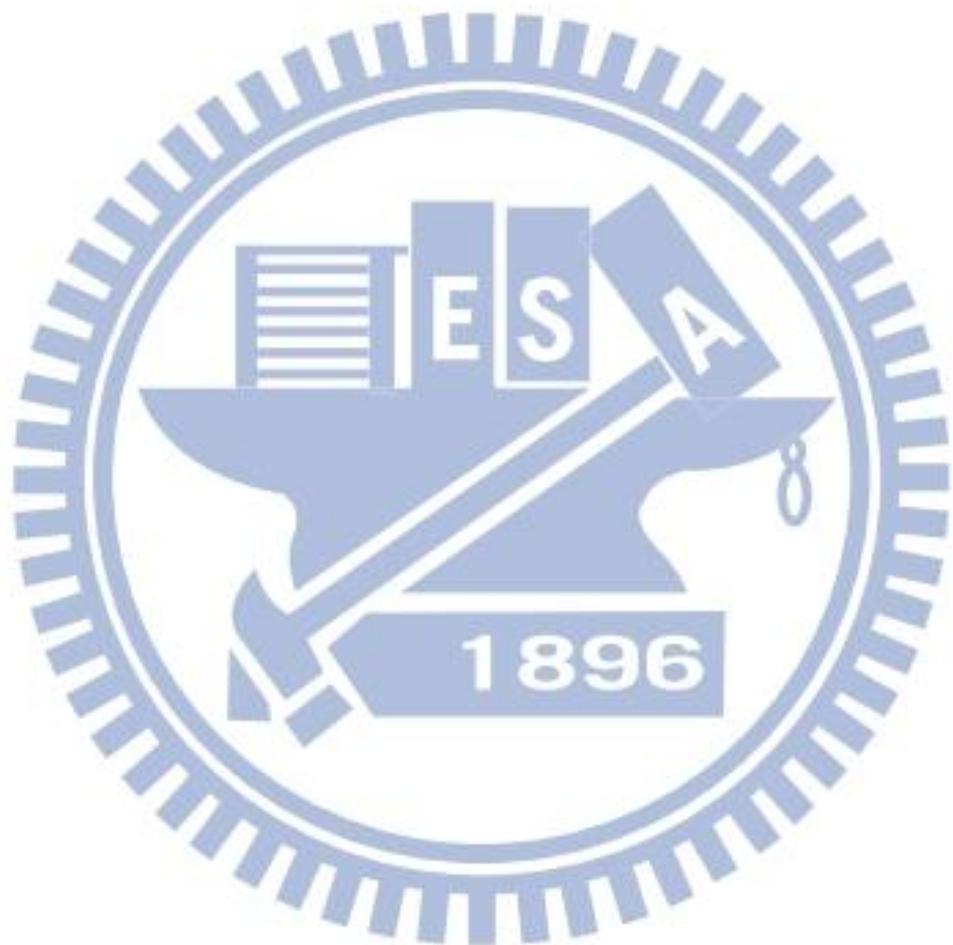
指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學電子物理學系

摘要

本篇論文主要研究 GaAsN/GaAs 結構中的缺陷與量子井之間的關係。經過 PL 證實，GaAsN 中存在一深層能階(deep level)的缺陷，此能階的濃度與摻雜 N 的濃度並無關係，且對照其能階的缺陷活化能(activation energy)，應與透過低溫成長的 GaAs 中的 V_{Ga} 為同一缺陷。當 GaAsN 受光激發時，其內部載子重新分布，使得量子井樣品的電容值上升，此即一般定義的光電容。為了解光電容的來源，我們將缺陷最多的樣品做了快速熱退火(rapid thermal annealing=RTA)的處理，RTA 可將樣品內的缺陷消除，藉此區別出量子井及缺陷對光電容的影響。除此之外，為了解釋量子井受光激發的載子分布，我們認為光激發電子有機會與 Top n-GaAs 中的 N_d 中和，產生中性區而改變能帶的結構，其光激發效應如同給予樣品一順向偏壓。此模型並非只對受光激發的量子結構適用，對於樣品表面有自生載子中心(generation center)而言，此結構也能提供合理的解釋。在一般情況下，由於量子井中已侷限許多電子，外加激發光源很難再將過量電子填入量子井中。因此我們再針對不同厚度的量子井做光激發的 C-V 量測，對於結構最厚的 250Å 而言，由於此厚度的量子效應已經非常微弱，幾乎沒有侷限任何電子，反而使得光激發電子有機會填入量子井中，在 C-V 量測中也能明顯看到隨激發光源功率的增加，量子井中的電子濃度逐漸達到飽和的現象。透過以上許多電性上的量測，

使得我們對於深層能階在光電容上扮演的腳色，以及光激發電子於 GaAsN/GaAs 量子井結構中的分佈有更完整的認識。



The influence of deep-level trap on photo-carriers in GaAsN/GaAs quantum well

Student: Chin-En Chen

Advisor: Dr. Jenn-Fang Chen

Department of Electrophysics

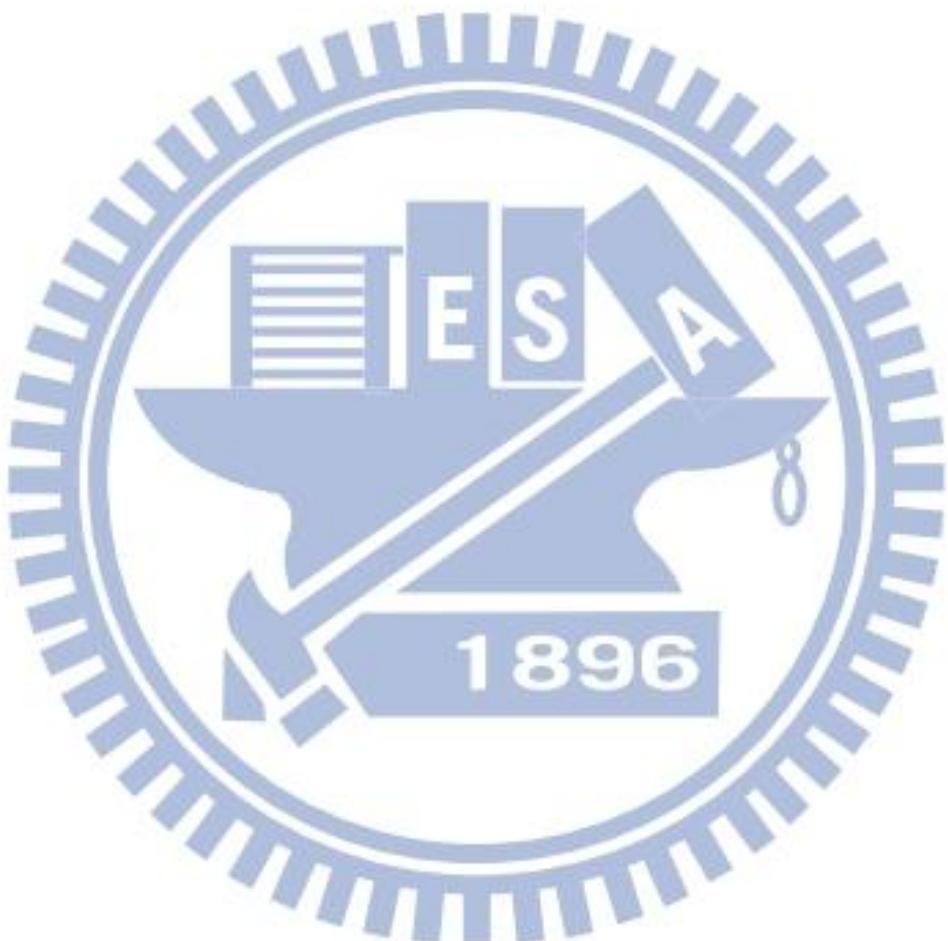
National Chiao Tung University

Abstract

Deep-level traps in the GaAsN/GaAs quantum well structure have been observed in our previous studies[4]. This trap, possibly Ga vacancy (V_{Ga}), is induced by a low-temperature growth of the GaAsN layer to suppress the composition fluctuation. The properties of these traps and their related emissions in this material system have been reported. However, the optical properties of the deep-level have seldom been reported.

This work investigates the photo-capacitance of the GaAsN/GaAs quantum well structure with various well thicknesses. To realize the origin of the photo-capacitance in GaAsN well, we study the 250 Å sample after annealing. In addition, the carriers excited by illumination or thermal emission from generation centers would neutralize N_d in Top n-GaAs. The carrier redistribution would change the energy band around the well, thus the differential capacitance characterizations would be affected on C-V measurement. In general, the quantum well is hardly filled with photo-carriers since many energy states in well are already occupied by electrons. However, for 250 Å, this would happen because of the quantum effect is so weak and the quantum levels are

empty before illumination. Through these optical and electrical measurements, we know more the role of deep-level on photo-capacitance and the distribution of photo-carriers in the GaAsN/GaAs quantum well structure.



致謝

Yes! 終於畢業了。在實驗室中發生的大小事將成為我人生中難忘的回憶。

首先，我要感謝我的家人，是你們一直在我的身旁支持我，成為我努力拚學業的動力。也要感謝我的指導老師，陳振芳教授，在老師身上我真正體會到了身為一個研究人應有的態度及氣魄！以下是這兩年來我非常感謝的人，當然要感謝的人真的太多了，若沒謝到就謝天吧！

- 我的好夥伴兼室友，蔡(哲倫)師父(外號：強打少年)：時光飛逝，已與您(因為是師父，所以要尊稱「您」)相識六年的時間了。說真的，能與您當同學真的是我的福氣，希望還有機會一起聊八卦(要聊師父的話也可以喔(^.<))聊到天亮喔！
- 我的好夥伴兼一晚的舞蹈老師，家偉(外號：熱舞金童)：實驗室中最潮的偉哥，祝你的舞技能一天比一天好、一年比一年 Hip Hop，未來也能成為像小黑這樣令人景仰的一代宗師哩。也多虧你讓我認識街舞這個運動，街舞真的很好玩喔！
- 打棒球的誰不認識峰哥？！家峰(外號：交大費德勒)：家峰，這一年來辛苦你了。一個人要扛起整個實驗室壓力真的很大，但研究之餘也要多多運動啊！Data 想不出來的時候就去游泳吧！我「交大飛魚」的稱號就由你來繼承吧！
- 行動 Google、BBO 辭典，揮哥(外號：太多了...)：謝謝揮哥總能在我 Data 想不出來時給予我致命性的突破！祝揮哥入伍時時能分到一個涼缺，退伍後找到一份好工作，與女朋友也能早日開花結果喔！
- 志斌、大樹、罐頭、咪咪：實驗室的未來就靠你們了。研究方面當然要加油，不過最重要的是，明年運動會一定要打爆對方啊！
- 隱藏人物，建至學長：說到令我及家峰暈頭轉向的 Circuit，幕後最大功臣當然就是說話霹靂無敵快的建至學長啦！謝謝阿至在電路上給了我許多寶貴

的建議，也讓我對不同領域的研究有了初步的認識，希望學長能早日找到心儀的對象，好讓老師抱孫子喔！

- 謙哥、亞青、俊泓、國豪：碩一的生活因為你們而變得多采多姿。也謝謝你們在我還是碩一菜鳥時，對於之後碩二研究生活會遇到的問題給予衷心的建議。希望大家都能夠有個美好的未來，並期待再有機會與大家吃熱炒、聊八卦！

August 2013 敬恩



目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
致謝.....	V
目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機	1
1.2 論文架構	2
第二章 樣品成長與量測系統簡介	5
2.1 樣品成長	5
2.1.1 MOCVD 成長 $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x/\text{GaAs}$ 量子井	5
2.1.2 蕭基接面及歐姆接面之電極製作	5
2.2 量測系統簡介	6
2.2.1 光激發螢光量測系統 (Photoluminescence, PL).....	6
2.2.2 電流電壓量測 (Current-Voltage measurement, I-V)	8
2.2.3 電容電壓量測 (Capacitance-Voltage measurement, C-V).....	9
2.2.4 深層能階暫態頻譜量測 (Deep level transient spectroscopy, DLTS)	9
2.2.5 光激發電性量測系統	10
第三章 量子井內部能帶結構及缺陷分析	13
3.1 光激發螢光量測 (PL)	13
3.2 量子井 C-V 平台的位移	13
3.2.1 電容電壓量測 (C-V)	13
3.2.2 深層能階暫態頻譜量測(DLTS)及自生載子中心的存在	14
第四章 GaAsN 量子井光激發載子的來源與機制	25
4.1 GaAsN 量子井的光電容來源	25
4.2 GaAsN 量子井的光電容機制	26
第五章 總結	40
參考文獻	42

圖 目 錄

圖[1.1] 半導體材料晶格常數與能隙關係圖	4
圖[2.1] 樣品結構圖	11
圖[2.2] 光激發螢光量測系統示意圖	11
圖[2.3] 光激發電性量測系統示意圖	12
圖[3.1] 各厚度量子井 PL 圖	17
圖[3.2] 低能量 PL 訊號來源示意圖	17
圖[3.3] 250\AA as grown、RTA600 及 RTA700 的 PL 圖形	18
圖[3.4(a)] 60\AA 變溫 C-V 圖	19
圖[3.4(b)] 60\AA 變溫縱深分布圖	19
圖[3.5(a)] 120\AA 變溫 C-V 圖	20
圖[3.5(b)] 120\AA 變溫縱深分布圖	20
圖[3.6(a)] 250\AA 變溫 C-V 圖	21
圖[3.6(b)] 250\AA 變溫縱深分布圖	21
圖[3.7(a)] 120\AA 在低溫下，給定一固定逆向偏壓的能帶示意圖	22
圖[3.7(b)] 升溫時，generation center 產生電子至 Top n-GaAs 層	22
圖[3.8] 120\AA 在不同偏壓下的 DLTS 圖形	23
圖[3.9] 120\AA 在不同偏壓下的阿瑞尼士圖	24
圖[3.10] 120\AA 在不同偏壓下缺陷的活化能及捕捉截面積	24
圖[4.1] 照光時的 C-V 圖形	29
圖[4.2(a)] 60\AA 在不同偏壓下的光電容	29
圖[4.2(b)] 120\AA 在不同偏壓下的光電容	30
圖[4.2(c)] 250\AA 在不同偏壓下的光電容	30
圖[4.3(a)] 250\AA as grown 的照光 C-V 圖	31
圖[4.3(b)] 250\AA RTA600 的照光 C-V 圖	31

圖[4.3(c)] 250Å RTA700 的照光 C-V 圖	32
圖[4.4] 250Å as grown 的 PL 圖	32
圖[4.5] 250Å as grown 的 PL 圖與 1.16eV 的 LED 波長分布	33
圖[4.6(a)] 250Å as grown 的 1.16eV 光激發 C-V 圖	33
圖[4.6(b)] 250Å as grown 的 1.16eV 照光縱深分布圖	34
圖[4.7(a)] 250Å as grown 改變量測速率的照光 C-V 圖	34
圖[4.7(b)] 250Å as grown 改變量測速率的照光縱深分布圖	35
圖[4.8(a)] 250Å as grown 未照光時的能帶圖	35
圖[4.8(b)] 250Å as grown 照光時的能帶圖(還未調變到 QW 中的載子)	36
圖[4.8(c)] 250Å as grown 照光時的能帶圖(已調變到 QW 中的載子)	36
圖[4.9] 250Å as grown 的 PL 圖與 1.32eV 的 LED 波長分布	37
圖[4.10(a)] 250Å as grown 的 1.32eV 光激發 C-V 圖	37
圖[4.10(b)] 250Å as grown 的 1.32eV 照光縱深分布圖	38
圖[4.11(a)] 250Å as grown 照小功率的光時的能帶圖(還未調變到 QW 中的載子)	38
圖[4.11(b)] 250Å as grown 照大功率的光時的能帶圖(提早調變到 QW 中的載子)	39

第一章

緒論

1.1 研究動機

由於近年來的科技進步，奈米(nano-)或是次奈米(sub nano-)尺度的各類型半導體奈米結構紛紛問世，這也有賴於 MOCVD、MBE...等長晶技術的蓬勃發展。對於這些半導體奈米結構，各研究團隊也積極的投入其中，像是量子點(quantum dot, QD)、量子井(quantum well, QW)、量子線(quantum wire)等，針對這些新穎的異質接面的結構作深入的討論。而這些半導體奈米結構也在各應用層面上廣泛的被運用，例如雷射、記憶體的儲存、光感測元件、太陽能電池以及生物顯影應用等。然而，當這些半導體材料的成長尺寸相當於電子的物質波波長時，其所展現的特性與一般塊材是完全不同的，需要以量子力學來解釋。而就量子井而言，摻入少量的氮(N)元素(dilute-N)的 GaAs 化合物半導體在過去幾年中引起了相當大的注意。當摻入了少量的氮時，GaN 在室溫下的能隙為 3.4eV，而 GaAs 則為 1.42eV，所以依照一般對半導體物理的認知，三五族半導體 GaAsN 的能隙應在 1.42eV 及 3.4eV 之間。然而，M. Weyers [1]與 M. Kondow [2]等人經由實驗量測的結果，證實 GaAsN 材料在氮濃度小於 1.5% 時，能隙會小於 GaAs 的能隙：1% 的 N 加入 GaAs 中，能隙可降低約 150meV。此外，K. Uesugi [3]的實驗結果顯示當 GaAsN 材料中的氮成份達到 4.5% 時，GaAsN 在室溫下的能隙是 0.956eV，對應到的波長是 $1.3\mu\text{m}$ ，此正為光電元件所需要的通訊波長；而當 GaAs 摻入 20% 的 N 原子時， $\text{GaAs}_{0.8}\text{N}_{0.2}$ 可與 Si 基板達成晶格匹配，因此其也相當適合用來在 Si 基板上成長高品質的 III-V 族磊晶薄膜。由於有著可大量改變能隙和一般常用的基板保持晶格匹配的能力，GaAsN 材料能廣泛應用於光電與半導體元件上。

根據先前對於 GaAsN/GaAs 量子井結構的相關研究，於 N 摻入 GaAs 的材料中，可觀察到 N 相關之局部能階(localized states)及成分波動效應(compostion fluctuation)的存在。一般來說，利用低溫成長(low-temperature growth)的 GaAsN 層可有效降低摻雜 N 所產生的成分波動效應。^[4]然而，根據本團隊的研究，低溫成長雖然能降低成分波動效應，但卻會在材料中形成一深層能階，由其活化能來推斷，此缺陷能階應是一般利用低溫成長 GaAs 層而形成的 V_{Ga} 。

由於量子元件對於載子有極佳的侷限能力，如何將其延伸並應用在儲存電荷，並製作出更快速、高密度的記憶體元件便成為近年來許多團隊的研究課題。為了解電荷在元件結構中傳輸的路徑和儲存的方式，本論文先針對量子井元件初步做了電性上的量測，包括電容電壓量測(Capacitance – Voltage measurement, C-V)、深層能階暫態頻譜量測(Deep level transient spectroscopy, DLTS)並配合光激發螢光量測系統(Photoluminescence, PL)，確立了元件中的載子及缺陷的分布情形。之後，利用本實驗室自行架設的光激發電性量測系統，研究外照光源對於元件中的載子分布及電特性有何影響，並建立一套完整的模型來解釋，期望藉由光源控制電子傳輸機制而更進一步能應用於光電元件上。

1.2 論文架構

第一章為緒論的部分，內容為材料 GaAsN 的背景介紹以及此篇論文的研究動機。

第二章為樣品成長與量測系統簡介，我們針對樣品的製作及確保其導電性做了理想因子(ideal factor)的量測，然而關於樣品的製備並不適本篇論文的重點，因此細節部分並不會詳述。在這一章節中，我們也會提及論文中所有的量測系統及其基本原理。

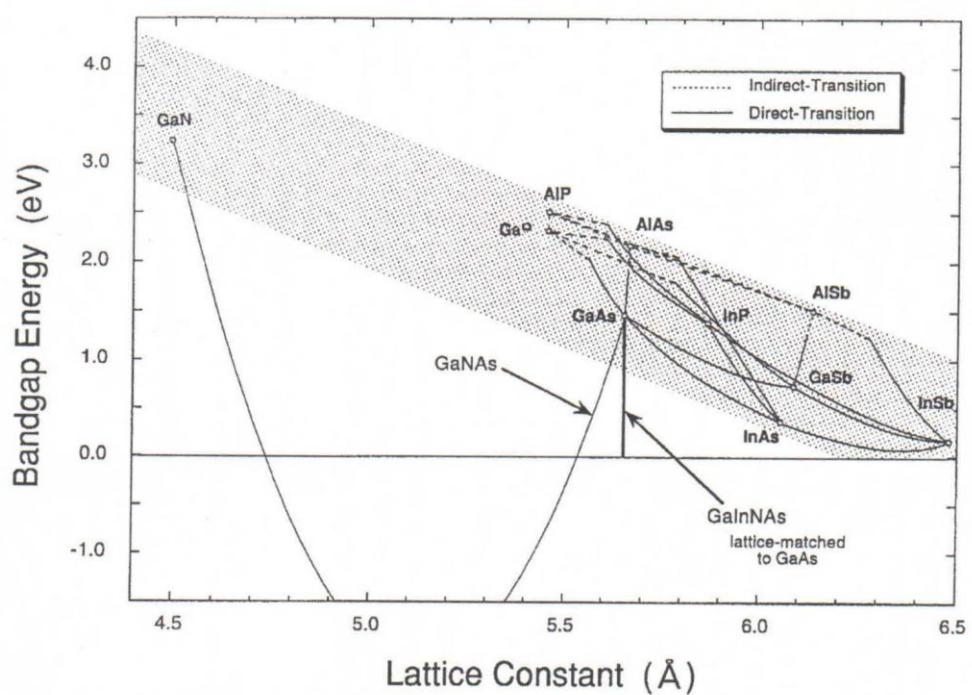
第三章為量子井內部能帶結構及缺陷分析，內容為未照光的 C-V 量測及縱

深分布圖，並利用 DLTS 找出缺陷的存在。利用以上量測結果推測出量子井的 C-V 平台隨著溫度升高而往小偏壓移動的原因。

第四章為 GaAsN 量子井光激發載子的來源與機制，在這章我們為了確認光電容的來源與機制，將樣品做了快速熱退火(rapid thermal annealing=RTA)的處理並做光激發的 C-V 量測；為了研究量子井與缺陷貢獻的光電容對 C-V 量測有何影響，我們分別用了 1.16eV 及 1.32eV 的 LED 光源作為激發光源，並由量測結果建立一套光電容的模型。

第五章為總結，我們將回顧整篇論文的內容並做出結論，希望對 GaAsN 量子井系統有更完整的認識。





圖[1.1] 半導體材料晶格常數與能隙關係圖

第二章

樣品成長與量測系統簡介

2.1 樣品成長

2.1.1 MOCVD 成長 $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ 量子井

本篇論文的量測樣品為李威儀老師實驗室所提供之成長方式為有機金屬化學氣相沉積法(MOCVD, Metal-organic Chemical Vapor Deposition)，長晶時的基板為(100)方向的 n^+ -GaAs，使用 Si 摻雜濃度約 $3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 至 $3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ，厚度約 $0.4\mu\text{m}$ ，成長溫度為 550°C 。成長 $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ 量子井的材料為 Ga 是使用 TEGa(triethylgallium)、As 為 arsine，N 使用 DMHy(dimethylhydrazine)。本篇論文中的量子井厚度為 60\AA 、 120\AA 、 250\AA ，氮濃度均為 1.8%($x=1.8\%$)。其中 250\AA 除了 as grown 的樣品外，還有經過快速熱退火(rapid thermal annealing=RTA)處理的樣品，分別為 600°C 及 700°C 時間 3min。樣品結構圖見圖[2.1]。其中 250\AA 的樣品其上層 GaAs 的厚度為 $0.2\mu\text{m}$ ，其餘的厚度均為 $0.3\mu\text{m}$ 。詳細的長晶細節請參考文獻[1]。

2.1.2 蕭基接面及歐姆接面之電極製作

在電性量測上，須對樣品加一逆向偏壓以調變空乏區的大小，藉以了解載子在樣品中的分布，於是有必要製作電極。電極的製作方法主要是利用熱蒸鍍將鋁(Al)鍍上樣品的表面形成蕭基接面(Schottky contact)，並在樣品的背面用銦(In)製作歐姆接面(Ohmic contact)，詳細的製作方法如下：

- (1) 使用超音波震洗器，將樣品與蒸鍍金屬 Al 沖泡去離子水(D.I. water)約 3 分鐘(去除表面雜質)，並用氮氣吹乾。
- (2) 將樣品浸泡於丙酮溶液(Acetone)中約 3~5 分鐘，除去表面油漬。

- (3) 沖泡去離子水約 3 分鐘，將殘留的 Acetone 去除。
- (4) 以 $H_2O:HCl = 1:1$ 比例調配將鹽酸稀釋，將樣品置入溶液中 15 秒，去除陽離子及氧化物。
- (5) 以同樣比例稀釋鹽酸將金屬 Al 表面的氧化層去除，使 Al 的表面成為乳白色。
- (6) 以去離子水沖泡約 3 分鐘，去除表面殘留的酸液，並用氮氣將其吹乾。
- (7) 將清洗完成的樣品以真空膠帶黏貼於載台上，覆蓋上所需要的 mask 來決定金屬接面的面積大小。本篇論文中所量測的最小面積為 0.005024cm^2 ，最大面積為 0.01767cm^2 。
- (8) 置入蒸鍍機內，使用機械幫浦(mechanical pump)粗抽至真空度為 1×10^{-2} torr 後再利用擴散幫浦(diffusion pump)將真空度達到 $2 \sim 3 \times 10^{-6}$ torr 以下，開始以熱蒸鍍的方式鍍上 Al。

詳細的歐姆接面的製備過程如下：

- (1) 樣品完成蕭基接面後，在樣品的 GaAs 基板背面點上約 3 個高純度的銦球(In ball)。
- (2) 接著將其送入高溫 330°C 的爐管裡加熱 3 分鐘，使 In ball 與基板的黏合性增加，透過電性量測確保 In ball 間的電阻值小於 10Ω ，具良好的歐姆特性。
- (3) 再將其與一表面有覆蓋一層均勻度很高的熔融狀 In 薄膜之矽基板相連接後即完成電性量測所需要的樣品製備。

2.2 量測系統簡介

2.2.1 光激發螢光量測系統 (Photoluminescence, PL)

本篇論文所使用的 PL 量測系統是由楊賜麟老師實驗室所提供之 PL 量測可以快速得知材料內部能階的結構，其原理為對實驗樣品入射一大於其能隙的雷射光，

使價電帶(valence band, VB)中的電子吸收雷射光的激發能量後被激發至導電帶(conduction band, CB)上，在價電帶上則產生了電洞，形成電子電洞對(electron-hole pair, E-H pair)，而受到庫倫力所吸引的電子電洞對則稱為激子(exciton)，激子在經過一段生命週期後電子落回價電帶與電洞複合，過程中可能是放出光子的輻射複合(radiative recombination)，或是熱輻射、放出聲子等非輻射複合(non-radiative recombination)。

PL 量測系統所包含的儀器設備：

- (1) 固態雷射(solid-state laser)：為 Excel 公司生產，型號為 LOC-VENTUS 1000 SERIES，為 CW 雷射，波長 532 nm，最大輸出功率 1.3 mW，雷射穩定度在 1.9% 以內，RMS 平均雜訊為 0.7%，驅動電流 6 安培，主要利用此雷射來激發樣品發出螢光訊號。
- (2) 衰減濾光片組(Variable Neutral Density Filter)：利用衰減片來控制、調整實驗所需的雷射輸入功率。
- (3) 光遮斷器(Optical chopper)：目的在於使連續波的雷射形成方波的型式，所使用的型號為 NEW FOCUS 3501，7/5 孔型式，固定頻率在 500 Hz。
- (4) 聚焦透鏡(Focus Lens)：利用聚光透鏡將雷射光聚焦在樣品上。
- (5) 溫控裝置：主要為了量測低溫與變溫的光學特性而設置，包含真空腔體(chamber)、降溫用壓縮機(compressor)、機械幫浦(mechanical pump)、冷卻水系統以及溫控器(temperature controller)。系統的最低溫度約在 10 K，可利用循環氦的壓縮機與溫控器的加熱器相互配合以控制實驗所需的溫度進行量測。
- (6) 高通濾光片(Long-pass filter)：雷射光強度遠大於樣品所放射出的螢光，使用 695 nm 的濾光片將雷射光過濾掉，避免其進入光偵測器中干擾實驗結果。
- (7) 分光儀(monochromator)：型號為 ARC Spectro-275，聚焦長度為 27.5 cm，內部含有有三塊光柵，為 600 groove/mm(BLZ=1000 nm)，可根據實驗所需的波

段範圍來選擇。

- (8) 光偵測器(photodetector)：使用 Electro-Optical Systems 公司所生產的砷化銦鎵
(InGaAs)光偵測器，在 300 K 時所適用的波長為 800 nm 到 1800 nm。
- (9) 訊號放大器(multi-meter)：將光偵測器所接收到的訊號放大。
- (10) 鎖相放大器(Lock-in Amplifier)：儀器型號為 STANDFORD RESEARCH SYSTEM SR850，目的在量測微小的交流訊號。

PL 量測系統以圖[2.2]表示的方式進行架設，首先將發光波長 532 nm 固態雷射所發出的雷射光依照實驗的需要，利用不同衰減倍率的衰減片來降低雷射輸出功率。將雷射光經由光遮斷器調變為方波形式，並將光遮斷器的頻率送至鎖相放大器作為參考頻率。經過光遮斷器調變的雷射光先透過第一面透鏡後聚焦在樣品上，將樣品激發而使樣品放出螢光，再經由第二片透鏡將樣品放出的螢光作聚焦並通過一片 695 nm 的高通濾光片將雷射光濾掉(避免雷射光對最終訊號產生干擾)後進入分光儀的狹縫中進行分光，最後則是將光偵測器所偵測到的螢光訊號傳送至鎖相放大器將與光遮斷器相同頻率與相位的訊號加以放大，再傳回電腦存檔並讀出光激螢光光譜。

1896

2.2.2 電流電壓量測 (Current – Voltage measurement, I-V)

本論文所用到的電流電壓量測系統為 KEITHLEY 236。當電極(蕭基接面及歐姆接面)製備完成後，會利用 I-V 量測以了解樣品電性是否良好，以確保樣品適合後續其他電性方面的量測。主要是利用蕭基接面的電流特性，來擬合樣品的漏電流(leakage current)、串聯電阻 r_s (series resistance) 與理想因子 n (ideal factor)，Schottky 電流公式如下：

$$I = I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V - I r_s)}{n k T} \right] - 1 \right\} \quad (2-1)$$

上式中 I_s 為逆向飽和電流(saturation current)， V 為順向偏壓， k 為波茲曼常數(Boltzmann constant)。本篇論文的量測樣品其理想因子 n 大約在 1.5 之內，

2.2.3 電容電壓量測 (Capacitance – voltage measurement, C-V)

本論文所用到的電容電壓量測系統為 HP4194。在蕭基接面下可藉由調變量測樣品中的空乏區(Depletion region)及費米能階(Fermi level)以得知其反映出來的電容特性。接下來的量測都與樣品的電容與導納值有關。首先，C-V 量測主要是利用外加逆偏壓來空乏半導體內自由載子，配合交流頻率的調變做電容電導量測，不同直流偏壓下的電容值可得出各區域的載子濃度變化，再進一步利用縱深分佈圖(Depth profile)了解樣品是否存在載子侷限，或存有大量缺陷空乏大量載子。主要利用到的公式有平行板電容公式(2-2)與載子濃度隨空間分佈公式(2-3)：

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{W} \quad (2-2)$$

$$N(W) = \frac{2}{q \epsilon \epsilon_0 A^2 [d(\frac{1}{C^2})/dV]} \quad (2-3)$$

其中 W 為空乏區寬度， ϵ 為半導體材料介電係數(permittivity)， A 為樣品的電極面積， $N(W)$ 為空乏區為 W 時的載子濃度。

2.2.4 深層能階暫態頻譜量測 (Deep level transient spectroscopy, DLTS)

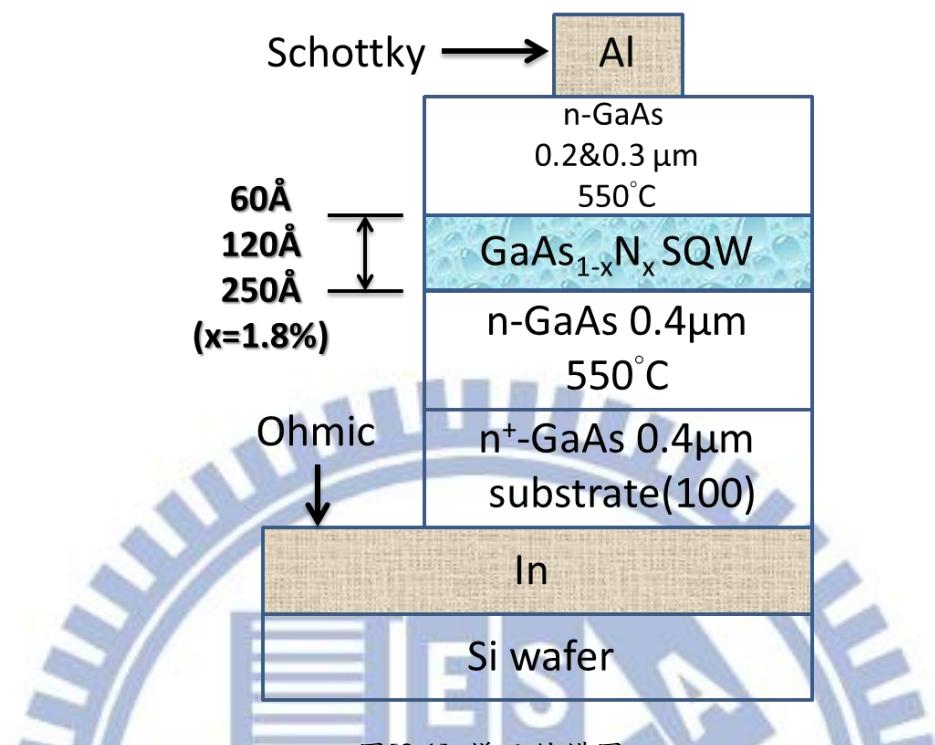
DLTS 技術在 1974 年首先由貝爾實驗室的 D. V. Lang 在 Journal of Applied Physics 提出。利用週期性變化電壓施加於樣品上，改變樣品空乏區的大小，在連續不斷的暫態電容量測(Transient measurement, C-t)中，找出隨溫度變化時的最大電容變化值的溫度，來獲得深層缺陷的資訊。優點：靈敏度高(可到 10^{10} cm^{-3} 之濃度偵測範圍)、能測量多數與少數載子、觀測缺陷能階範圍廣、尤其是較深層的缺陷能階(emission time 在毫秒等級)也能夠被精準量測到，提高信號對雜訊的比值(S/N ratio)等。DLTS 技術主要是給定兩時間 t_1 與 t_2 ，固定 t_2/ t_1 ，改變 t_1 與 t_2 來設定不同速率窗(rate window)，電子發射速率 e_n 隨著系統溫度變化而改變，只有當 e_n 剛好落在所設之速率窗中，量測系統才達到峰值，即有 $e_{n,\max} = \frac{\ln(t_2/t_1)}{t_2-t_1}$ 。當溫度很低時， ΔC 變化幅度很小($\Delta C \sim 0$)，當溫度很高時， ΔC 變化幅度又太快

($\Delta C \sim 0$)，只有當溫度在特定範圍， ΔC 變化才最大，與實驗時所設定的時間常數最接近。設定不同 t_1 與 t_2 來改變不同速率窗($e_{n,max}^{-1}$)，獲得多組不同 $e_{n,max}$ 與峰值溫度數據，即可畫出阿瑞尼士圖(Arrhenius plot)求出缺陷活化能(activation energy)與捕捉截面積(capture cross section)。

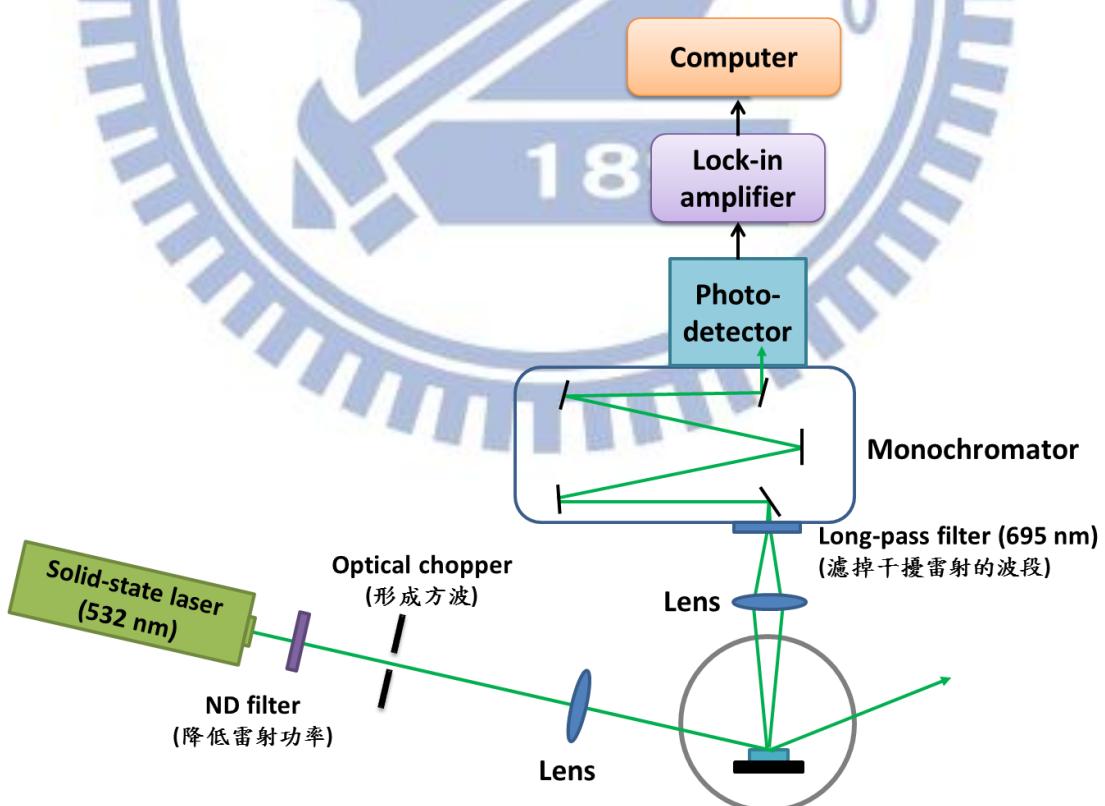
2.2.5 光激發電性量測系統

論文中所使用的光激發電性量測系統，為本實驗室自行架設，包含以鹵素燈作為外加光源，並配合電性量測系統(C-V, I-V 或 DLTS)，以了解樣品於外加光源時的電性特性。本論文中以具有連續發光波段(可見光至紅外光，500 nm~2000 nm)的鹵素燈(Halogen lamp)作為光源，並透過分光儀使輸出光源為單一波長光源(半高寬為 10nm)，再利用透鏡聚焦至真空腔體中的樣品上。在照射光源的同時並配合電性量測系統的分析。光激發量測裝置系統如圖[2.3]所示。

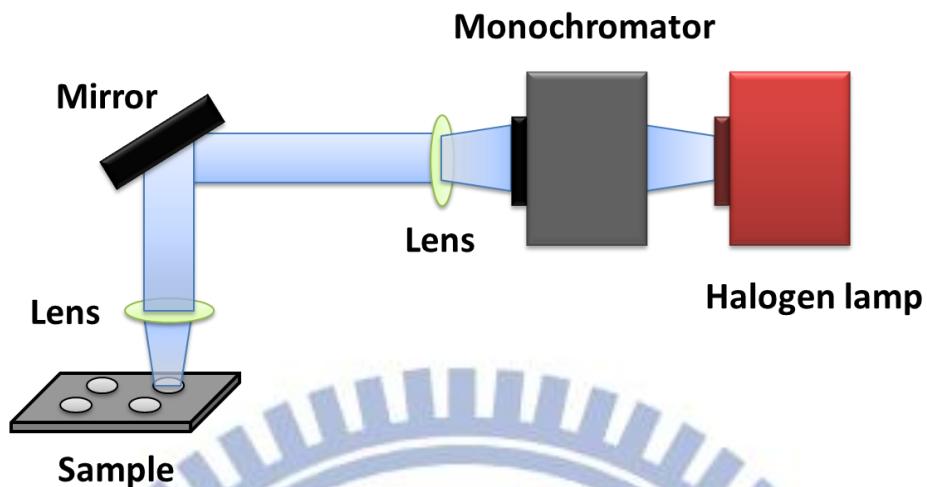




圖[2.1] 樣品結構圖



圖[2.2] 光激發螢光量測系統示意圖



圖[2.3] 光激發電性量測系統示意圖



第三章

量子井內部能帶結構及缺陷分析

3.1 光激發螢光量測 (PL)

為了得知不同厚度 GaAsN 量子井的內部結構，本團隊先前對其做了 PL 量測。圖[3.1]為 60\AA 、 120\AA 、 250\AA 在低溫 30K 下的 PL 圖形，可發現除了高能量的量子井訊號(quantum emission)外，在低能量也出現了一個分布較廣、較胖的訊號[5][6][7]，這個訊號在許多低溫成長下 Liquid Encapsulated Czochralski (LEC) 的 GaAs 基板都能觀察到，根據先前的研究[8][9][10]，其來源為 GaAs 本身 V_{Ga} 的點缺陷(point defect)：量子井中侷限的電子躍遷到價帶(valance band)上方的缺陷能階所產生的訊號，圖[3.2]為其 PL 訊號來源示意圖。此缺陷在量子井樣品受光激發而表現的電容-電壓特性占了非常重要的地位，論文第四章會再詳述。除了 as grown 的樣品之外，為了釐清光電容在量子井中產生的來源，我們將厚度 250\AA 的量子井樣品作快速熱退火(rapid thermal annealing=RTA)的處理，目的是將樣品中的缺陷消除。圖[3.3]為 250\AA as grown、RTA600 及 RTA700 的 PL 圖形。由圖中可明顯觀察到，經過熱退火處理的樣品，在低能量的 PL 訊號(點缺陷 V_{Ga})明顯下降，且量子井的 PL 訊號隨著熱退火的溫度上升而變好。

3.2 量子井 C-V 平台的位移

3.2.1 電容電壓量測 (C-V)

為了研究量子井中載子受光激發的電性機制，我們有必要先對樣品做基本的電容電壓量測(C-V)，以了解其內部各區域的載子濃度分布。圖[3.4(a)]、圖[3.4(b)]、圖[3.5(a)]、圖[3.5(b)]、圖[3.6(a)]、圖[3.6(b)]分別為量子井厚度 60\AA 、 120\AA 、 250\AA 未受光激發時的變溫 C-V 圖及縱深分布圖。由縱深分布圖可看出，三塊樣品的

背景濃度約在 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 至 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 左右，大致符合長晶時的 Si 摻雜濃度；另一方面，可看出樣品內部存有載子侷限，侷限的位置便是量子井的成長位置，由於量子井將周圍的載子侷限於其中，便在周圍形成一下凹的空乏區。由厚度 60\AA 可明顯觀察到，樣品的溫度愈高，侷限在量子井中的載子濃度就愈低：這是由於載子在溫度較高的環境下，可獲得較高的熱動能，如此便有能力可以跳出量子井的侷限位勢，使得縱深分布圖中侷限載子的濃度隨著溫度升高而降低；且因著量子井的侷限能力下降，周圍空乏區的載子濃度便隨著溫度升高而回升。然而 120\AA 的情況較為複雜，我們之後會再討論。

250\AA 的縱深分布圖與 60\AA 有很大的不同：在低溫 77K 時，從樣品表面到內部約 $0.4\mu\text{m}$ 存在一個很大的空乏區，但卻看不到侷限載子的高濃度區域；一直要到 220K 時，才在約 $0.47\mu\text{m}$ 處看到載子堆積的現象。關於樣品內部存在如此大的空乏區域的原因，本團隊先前的研究已探討過，[11]其來源為 250\AA 的 GaAsN 量子井成長時間(growth time)較長，使得摻雜的 N 原子的成分波動效應(N-composition fluctuation)及群聚效應(N clusters)較嚴重，因而樣品內存有大量的缺陷空乏掉原本應該侷限於量子井的載子。而在 220K 時看到的載子堆積現象，是由於 N 摻雜的關係導致周圍能帶改變，使得在低溫 77K 下，載子從量子井中跳出的時間較長，無法跟上儀器的掃動頻率，因此無法被調變到；然而當溫度升高到 220K 時，載子跳出量子井的速率已經可以跟得上儀器的掃動頻率，因此縱深分布圖上便能看出載子侷限的現象。

3.2.2 深層能階暫態頻譜量測(DLTS)及自生載子中心的存在

圖[3.8] 各別為 120\AA 樣品在不同偏壓下固定 filling pulse 及速率窗(rate window)的 DLTS 圖形；圖[3.9]及圖[3.10]為不同偏壓下的阿瑞尼士圖(Arrhenius plot)及對應的缺陷活化能(activation energy)和捕捉截面積(capture cross section)。在此阿瑞尼士圖中我們參考了陳乃權學長在 1998 年發表的一篇 paper，文中提到

在低溫成長的 GaAs 中量測到一群缺陷，其電子與電洞的活化能分別為 0.66eV 及 0.77eV，加起來正好是 GaAs 的能隙，因此認為這群缺陷為自生載子中心 (generation center)。由 120Å 的阿瑞尼士圖可發現，樣品中的缺陷與 paper 中的缺陷屬於同一群，因此 120Å 中也存在自生載子中心。

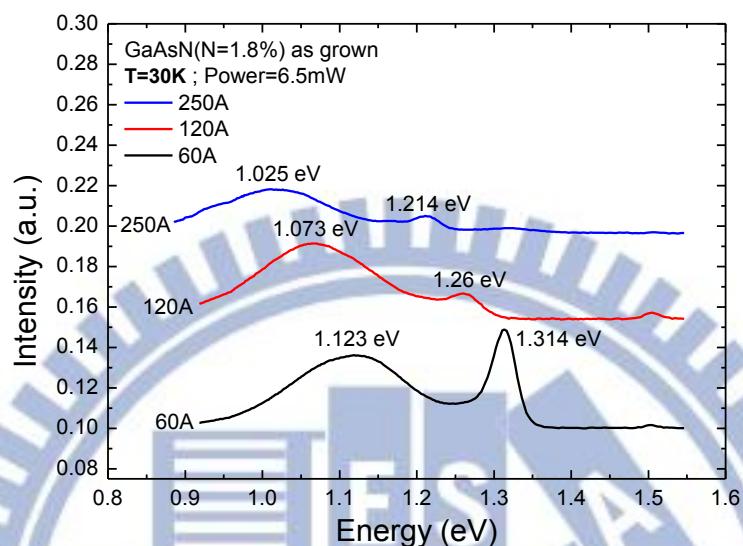
現在，讓我們回到 120Å 的 C-V 圖。120Å 的 C-V 圖和 60 及 250Å 有很大的不同：隨著溫度的升高，量子井所產生的平台一直往小偏壓移動，且 120Å 的 C-V 曲線的斜率轉折處(量子井平台)也出現在電容值越大的地方，由公式(2-3)可知，縱深分布圖中的 peak 將會因此往樣品表面移動。此現象可用圖[3.7]的模型來解釋：首先在低溫 77K 時，GaAsN 量子井中已經侷限了一些載子(圖[3.7(a)])，而當溫度升高時，Top n-GaAs 層中作為自生載子中心(generation center)的缺陷便會產生電子-電洞對(electron-hole pair)。電洞會被電場掃至樣品表面，因此可忽略其造成的電位差；而電子會在量子井前的 Top n-GaAs 層中與 N_d 中和，產生中性區(neutral region)，使得 Top n-GaAs 層的空乏區回縮，在固定偏壓下，量子井後的能帶將會傾斜而在空乏區邊緣及量子井間形成多餘的正電荷以維持樣品內部的電場平衡(圖[3.7(b)])，因此費米能階便會提早調變到量子井中的電子而在電容-電壓量測中形成平台。

在此，我們進一步利用帕松方程式(Poisson's equation)來說明：在儀器還未加任何偏壓給樣品的情況下，若自生載子中心隨著溫度升高而產生多餘的電子累積在 Top n-GaAs 層造成電位差 $\Delta V = (q/\varepsilon)p_t L$ ，其中 p_t 為自生載子中心的濃度，而 L 為空乏區的寬度，可表示為 $L = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_{bi}+V_R)}{qN_D}}$ ，此電位差會造成量子井前的空乏區寬度 $L(t)$ 隨著時間下降，而下降的速率與自生載子中心產生電子電洞對的速率有關；由於在固定偏壓下，為了維持電場平衡，量子井後的能帶將會傾斜產生多餘的正電荷以補足 Top n-GaAs 層中多餘電子造成電位差

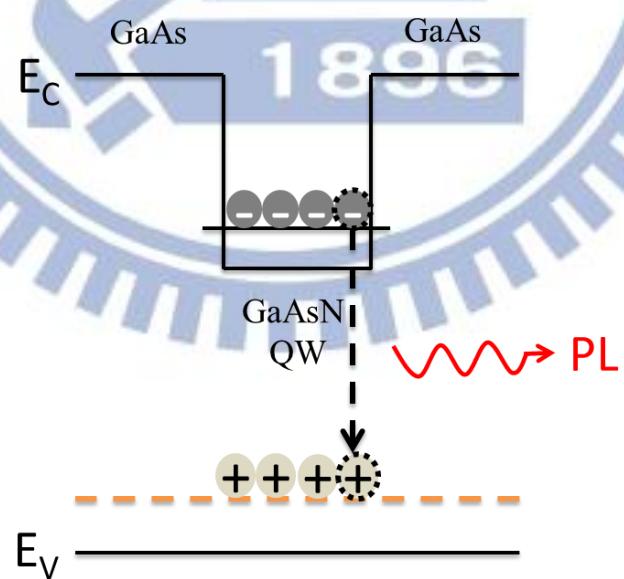
$$\Delta V + \frac{q}{2\varepsilon}N_DL^2(t) = V_{bi} + V_R$$

其中 ΔV 為量子井後產生的電位差；其中 N_D 為n-GaAs的摻雜濃度(#/Area³)； V_{bi} 與 V_R 為金屬-半導體接面的內建電位障(built-in potential barrier)與儀器所給的外加逆向偏壓。由上式可觀察到，隨著 $L(t)$ 逐漸縮短， ΔV 會逐漸變大，因此費米能階便會提早調變到量子井中的電子而在電容-電壓量測中形成平台。

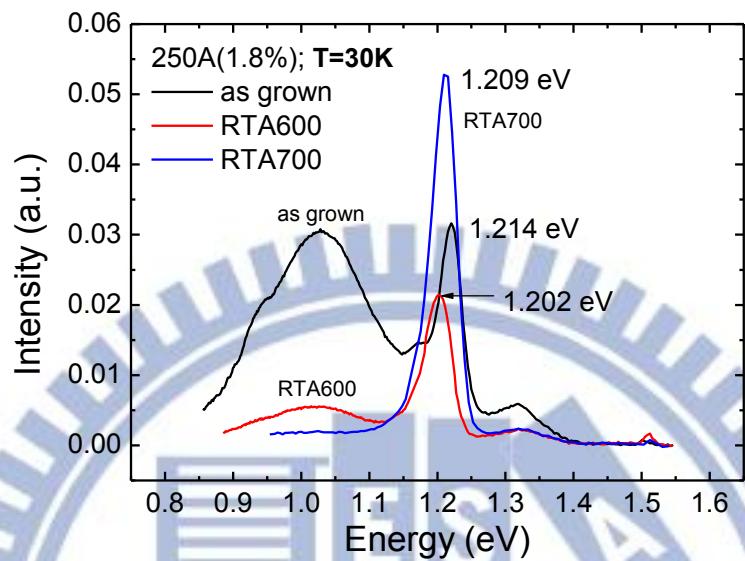




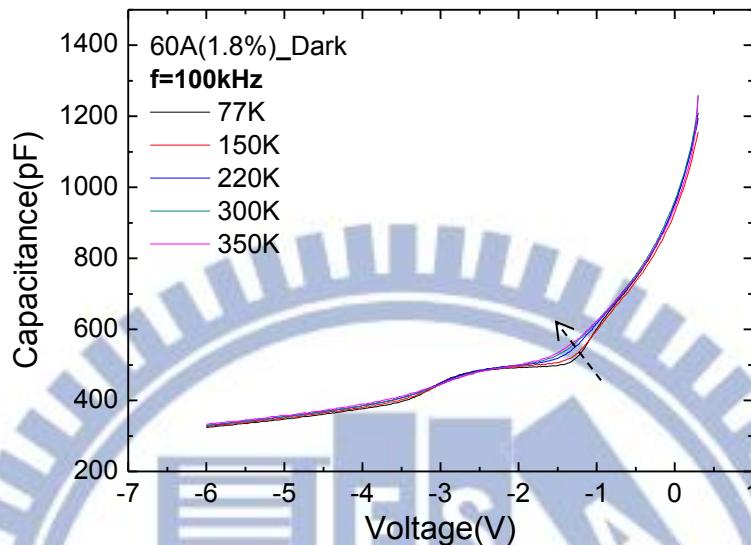
圖[3.1] 各厚度量子井 PL 圖



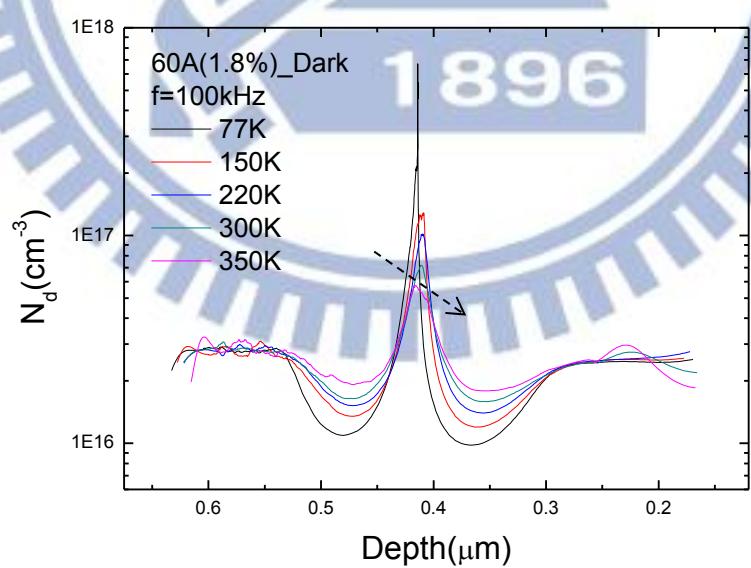
圖[3.2] 低能量 PL 訊號來源示意圖



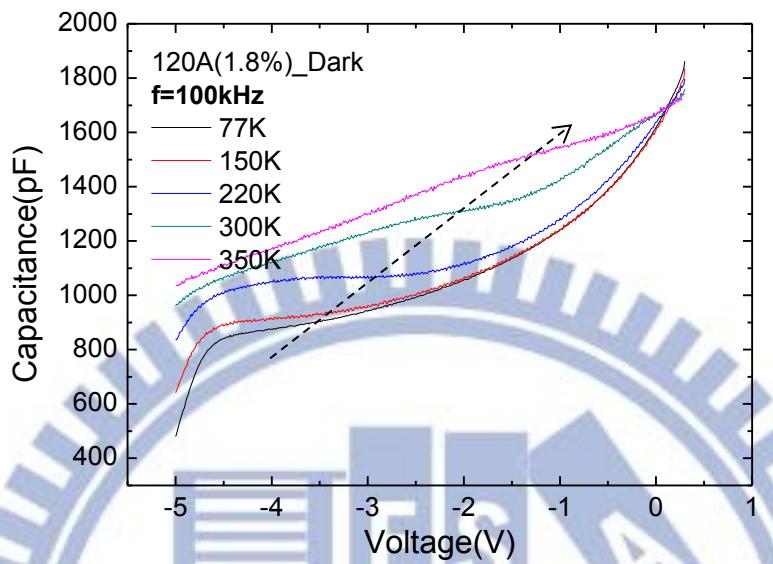
圖[3.3] 250Å as grown、RTA600 及 RTA700 的 PL 圖形



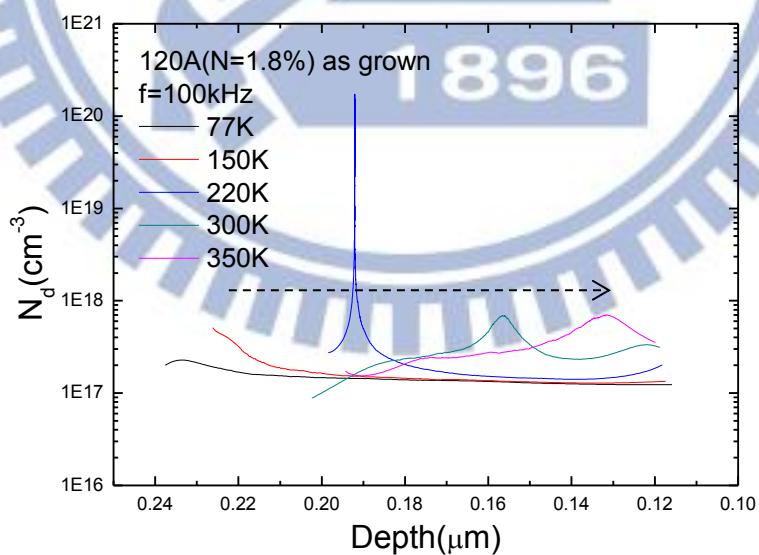
圖[3.4(a)] 60 \AA 變溫 C-V 圖



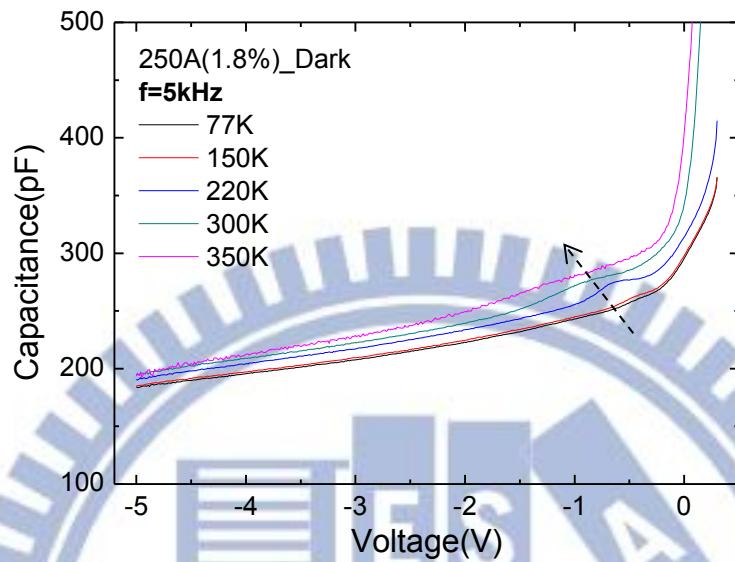
圖[3.4(b)] 60 \AA 變溫縱深分布圖



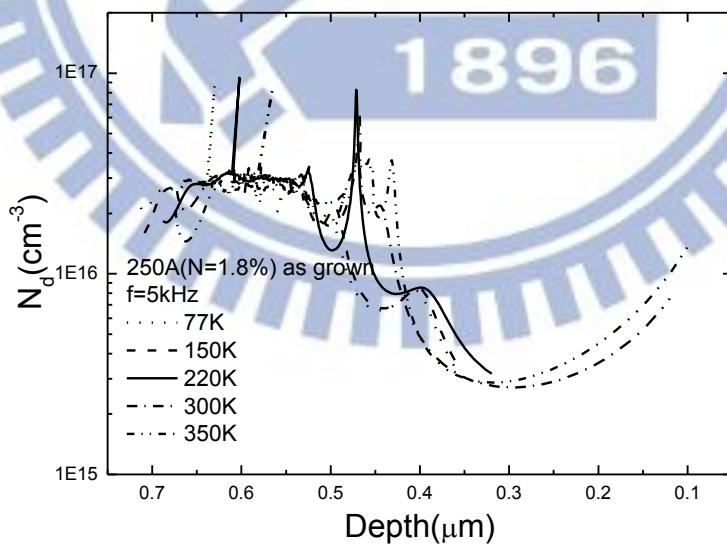
圖[3.5(a)] 120\AA 變溫 C-V 圖



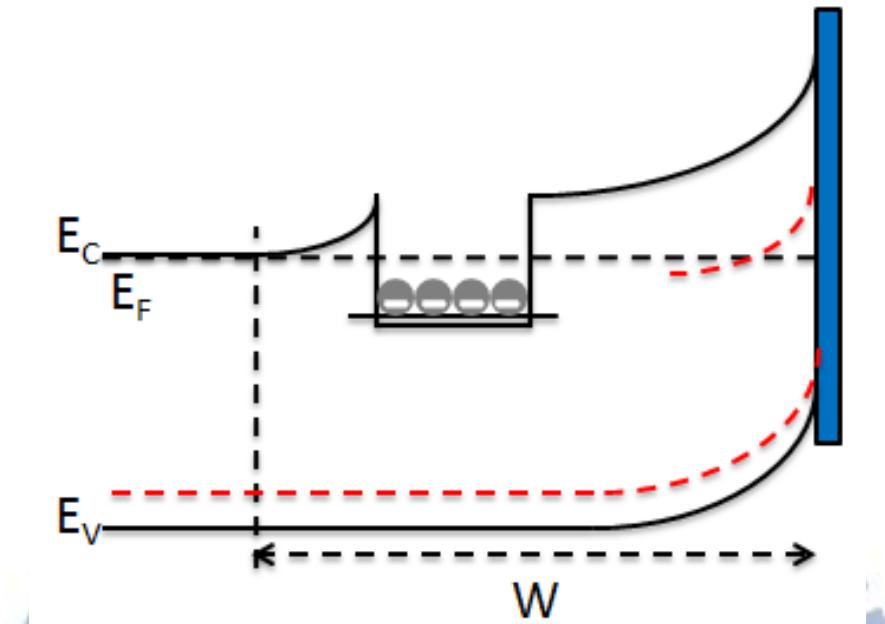
圖[3.5(b)] 120\AA 變溫縱深分布圖



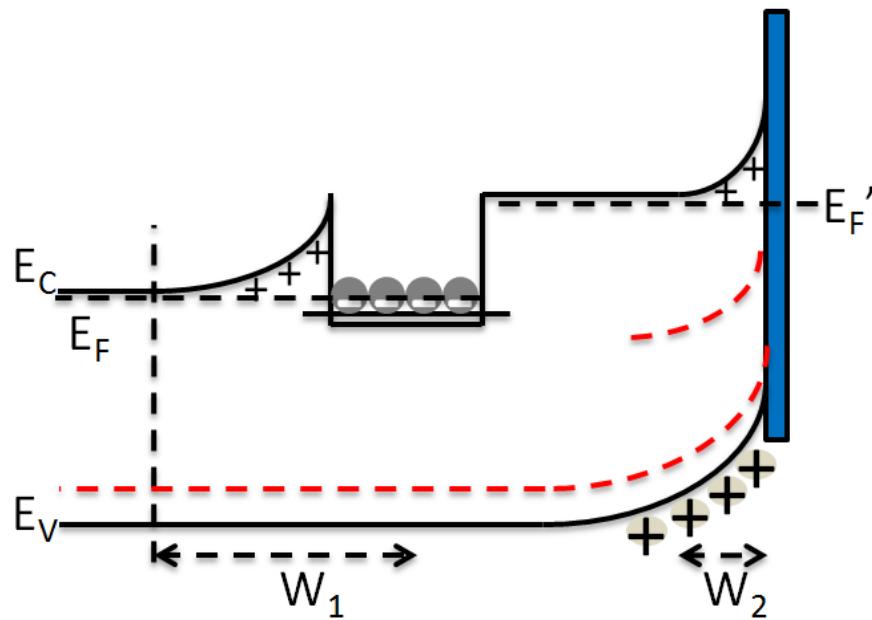
圖[3.6(a)] 250 \AA 變溫 C-V 圖



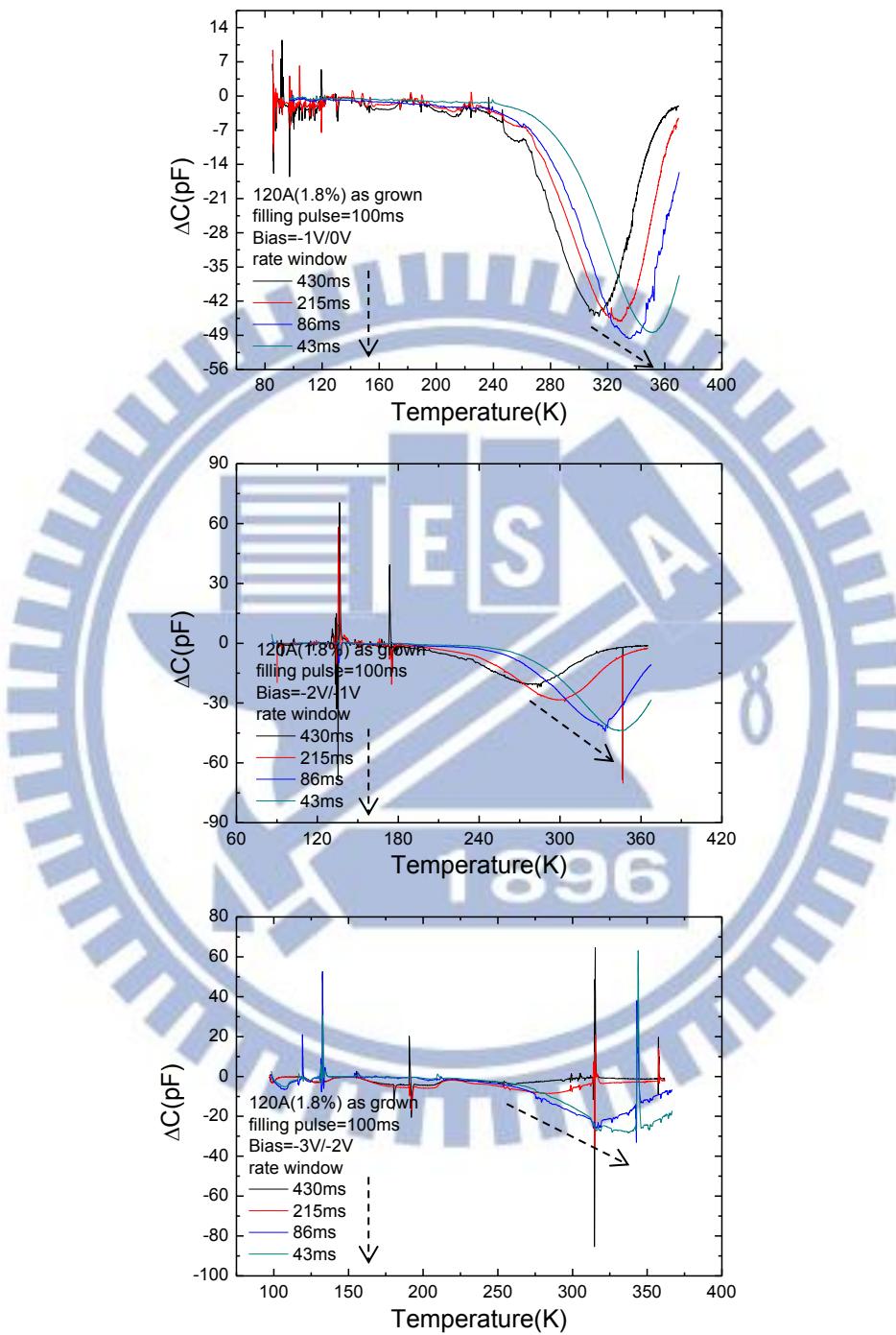
圖[3.6(b)] 250 \AA 變溫縱深分布圖



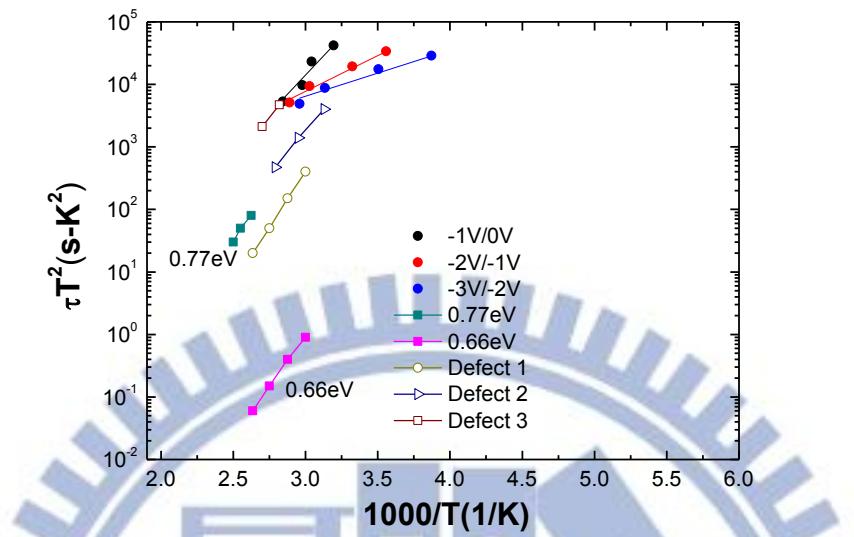
圖[3.7(a)] 120Å 在低溫下，給定一固定逆向偏壓的能帶示意圖



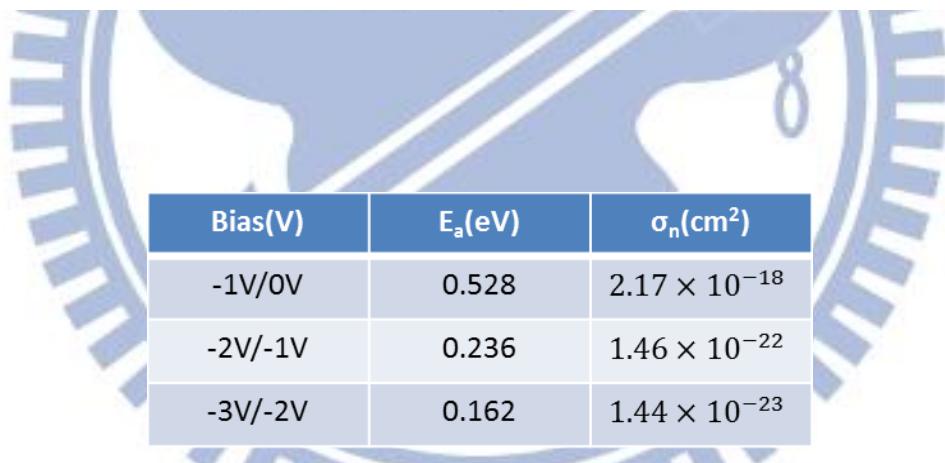
圖[3.7(b)] 升溫時，generation center 產生電子至 Top n-GaAs 層



圖[3.8] 120\AA 在不同偏壓下的 DLTS 圖形



圖[3.9] 120Å 在不同偏壓下的阿瑞尼士圖



圖[3.10] 120Å 在不同偏壓下缺陷的活化能及捕捉截面積

第四章

GaAsN 量子井光激發載子的來源與機制

4.1 GaAsN 量子井的光電容來源

在瞭解了量子井 C-V 平台往小偏壓座移動的原因之後，我們開始進入本篇論文的核心議題「GaAsN 量子井光激發載子的特性與傳輸行為」。在第二章及第三章中，我們已經介紹了 C-V 量測的原理：利用儀器給定的外加逆向偏壓來改變樣品的空乏區大小，以量測空間中各區域的載子濃度變化。然而，若對量子井樣品做 C-V 量測時，同時給予樣品做照光的動作，C-V 曲線會有向上抬升的現象，此即光電容 ΔC 的貢獻，如圖[4.1]所示。為了研究不同厚度的量子井結構與光電容之間的關係，我們利用「光激發電性量測系統」(如圖[2.3])對樣品做變波長的光激發電性量測。圖[4.2(a)]、圖[4.2(b)]、圖[4.2(c)]各為厚度 60\AA 、 120\AA 、 250\AA 的 GaAsN 量子井樣品在低溫 78K 下的光電容(ΔC)量測。由圖中可觀察到：在不同偏壓下，發生光電容的激發光波長十分一致；然而，不同於 60\AA 和 120\AA ，其發生光電容的激發光波長在 1.3eV 以上， 250\AA 則是在 1.2eV

在第三章中，我們已從不同厚度的量子井樣品的 PL 及 C-V 量測中得知， 250\AA 內存在最多的缺陷。在本篇論文撰寫之前，對於光電容的來源一直是個未解的謎題：其來源究竟是量子井又或者是缺陷？為了解決這個問題，我們對缺陷最多的 250\AA 做快速熱退火(rapid thermal annealing=RTA)的處理。眾所皆知，快速熱退火可消除樣品中的缺陷，這樣一來，我們就能將光電容的來源於量子井和缺陷之間做出區隔。於圖[3.3]可觀察到經過熱退火處理的樣品，在低能量的 PL 訊號(V_{Ga} 的點缺陷)明顯下降，而量子井的 PL 訊號也隨著熱退火的溫度上升而變好。我們將 250\AA as grown(未作熱退火)、RTA600(熱退火溫度 600°C , 3min)及 RTA700(熱退火溫度 700°C , 3min)作光激發的 C-V 量測，激發光源為 LED 燈，波

長為 1.32eV 。使用發光波長為 1.32eV 的 LED 燈當激發光源的原因為：LED 的功率(power)較大，且 1.32eV 包含量子井的發光能隙及 1.3eV 的 V_{Ga} 缺陷；如此一來，便能看到存在大量缺陷的 as grown 樣品與缺陷大量降低的 RTA600 和 RTA700 在作光激發的 C-V 量測時的差異。其量測結果如圖[4.3(a)]、圖[4.3(a)]及圖[4.3(a)]。由圖中可明顯發現到，隨著熱退火的溫度升高，光電容也跟著下降，RTA700 更是幾乎看不到光電容的貢獻。此一結果顯示，光電容的成因，與樣品中的 V_{Ga} 缺陷有很大的關係。

4.2 GaAsN 量子井的光電容機制

在上一節中，我們對不同厚度的量子井樣品作光電容的量測，發現 250\AA 不同於 60\AA 和 120\AA ，其發生光電容的光激發能量始於 1.2eV 。然而，由 250\AA 經過熱退火處理的樣品得知，光電容的來源為樣品中的 V_{Ga} 缺陷。既然如此，為何 250\AA 的光電容抬升位置不是在 1.3eV 呢？在此節，我們針對 250\AA 這片樣品作更深入的探討。

圖[4.4]為 250\AA 在低溫(30K 至 120K)的 PL 圖。由圖中可觀察到，其量子井的發光波長為 1.21eV ，正好接近其發生光電容的光激發能量 1.2eV ，這一結果顯示：雖然光電容的來源為樣品中的 V_{Ga} 缺陷，但在 250\AA 這片樣品中，量子井也和光電容存在某種關係。為了區別出量子井與缺陷對光電容的貢獻，我們拿 1.16eV 的 LED 當激發光源作光激發 C-V 量測。圖[4.5]是 250\AA as grown 在低溫 80K 時的 PL 圖與 1.16eV 的 LED 波長分布比較。由圖中可看出， 1.16eV 的 LED 燈波長分布涵蓋了大部分的量子井 PL 訊號，且低於 1.3eV ，如此一來，便能做僅激發量子井發光能隙的電性量測。圖[4.6(a)]及圖[4.6(b)]為 78K 時， 250\AA as grown 樣品用 1.16eV 作激發光源的 C-V 量測及縱深分布圖的結果。由圖中可觀察到，當激發光源的功率達到 0.3mW (驅動 LED 的電流= 2.6mA)時，C-V 的量子井平台已明顯飽和；縱深分布圖也顯示，當激發光源的功率大於 0.3mW 以上，

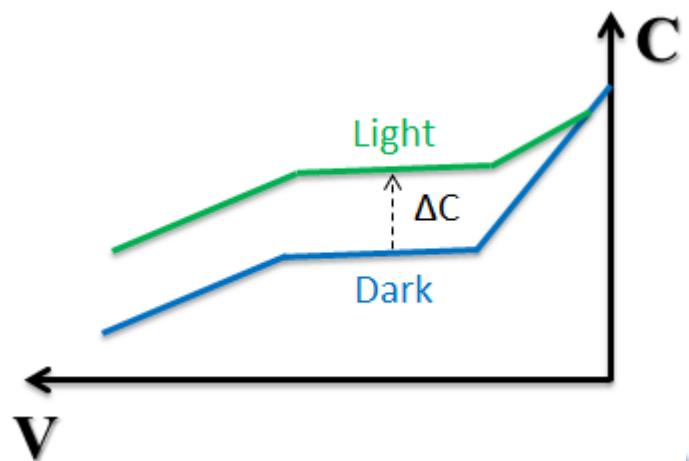
載子侷限的濃度已達定值，改變的只是載子侷限的空間位置。關於縱深分布圖上載子侷限位置的移動，留待之後討論，我們現在著重於量子井中載子濃度變高的議題上。既然 1.16eV 的激發光源能夠使得量子井中的載子濃度增加，我們更進一步利用不同的量測速率作 C-V 量測。圖[4.7(a)]及圖[4.7(b)]為激發光源為 0.3mW (驅動 LED 的電流 = 2.6mA)時，不同量測速率的 C-V 圖及縱深分布圖：可觀察到，若量測的速率越快，受調變的載子越少—這是缺陷的一項重要特徵。此一量測結果更加證實了 250\AA 的量子井結構確實與光電容的來源—缺陷間存在強烈的交互作用。此一特殊現象，我們利用圖[4.8]的能帶示意圖來解釋。圖[4.8(a)]為未照光時的能帶圖，由第三章的討論已知， 250\AA 的量子井結構由於太厚，其量子侷限的能階幾乎在 GaAsN 的導帶上，所以此時的量子井可以說是沒有侷限任何載子。然而，當此樣品受到光激發時，會將 V_{Ga} 缺陷中的電子激發到量子井中，留下正電荷在缺陷，如圖[4.8(b)]。由於費米能階還未調變到量子井中的載子，僅調變到 GaAs 內的自由電子，因此 C-V 曲線的前段幾乎重合。隨著外加逆向偏壓的增加，當費米能階調變到量子井中的載子時，量子井平台開始出現，如圖[4.8(c)]。因為缺陷中的電子躍遷所需的時間較長，甚至接近 C-V 量測的速率，這也能夠解釋為何 C-V 量測的越快，量子井平台越不明顯。

1.16eV 的 LED 光源只能激發缺陷中的電子到量子井中，若是用更高能量的激發光源會發生甚麼事呢？接下來，我們用 1.32eV 的 LED 光源作光激發的 C-V 量測。圖[4.9] 是 250\AA as grown 在低溫 80K 時的 PL 圖與 1.32eV 的 LED 波長分布比較。由圖中可看出， 1.32eV 的 LED 波長不僅涵蓋了量子井的發光波長，也包含了可激發 V_{Ga} 缺陷中的電子至 GaAs 導帶上的能量 1.3eV 。圖[4.10(a)]及圖[4.10(b)]為 250\AA as grown 的 1.32eV 光激發 C-V 圖與縱深分布圖。由圖中可觀察到，當驅動 LED 的電流達到 0.2mA 後，量子井的平台長度已不再隨 LED 的功率而增加，意即量子井中的電子已達飽和；然而，由縱深分布圖發現，與圖[4.6(b)](1.16eV 的激發光源)明顯不同的是，隨著激發光源功率的增加，其侷限載子的空

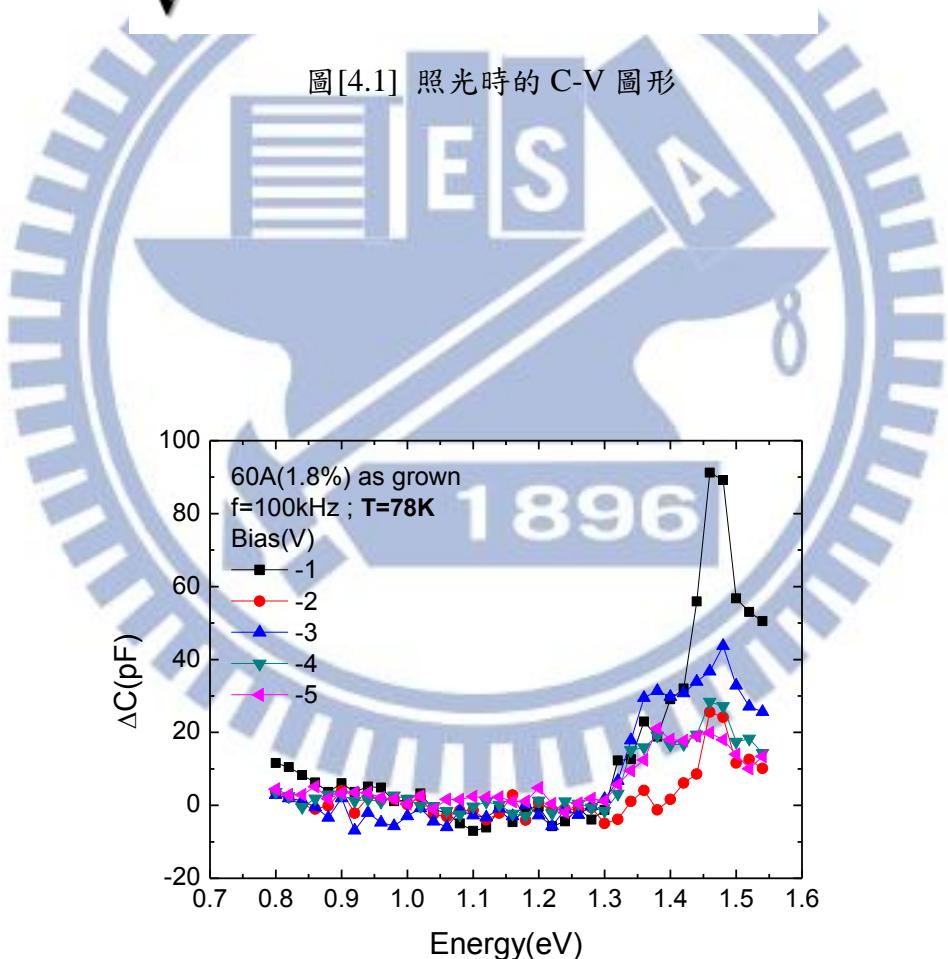
間位置一直往樣品表面靠近。我們利用第三章推測的模型來解釋這一特殊現象。

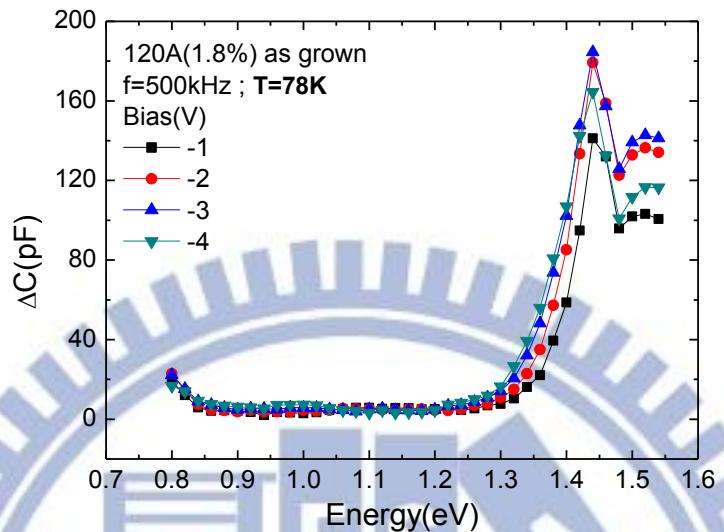
圖[4.11(a)] 為 250\AA as grown 照小功率的 1.32eV 激發光時的能帶圖，此時的費米能階還未調變到量子井中的載子；隨著逆向偏壓的增加，費米能階將會調變到量子井中的電子，於是 C-V 的量子平台便會產生，如圖[4.6(a)]。然而，量子井中的狀態密度是有限的，當量子井中各能態位階都被電子佔據時，量子井的侷限能力就會達到飽和，而平台長度也達到了最大值。當 LED 的功率繼續加大時，由缺陷產生的電子已經無法再繼續填入量子井中，便會填入 Top n-GaAs 層中，使得量子井前的空乏區縮短，產生中性區；在定偏壓下，量子井後方的能帶便會傾斜形成多於的正電荷以維持電場平衡，因此費米能階便會提早調變到量子井中的電子，使得 C-V 平台提早出現，而縱深分布圖中載子侷限的位置變會一直往樣品表面靠近，如圖[4.11(b)]。

在上節的第一段有提到， 250\AA 不同於 60\AA 及 120\AA ，其發生光電容的位置始於 1.2eV ，也就是量子井的發光波長。造成此差異的原因為， 250\AA 的量子井結構太厚，其量子能階幾乎在 GaAsN 導帶底部，因此在未照光時，量子井中幾乎沒有侷限任何電子，光激發電子才有機會躍遷至量子井中；至於 60\AA 及 120\AA 的量子井因為在未照光時已侷限了許多電子，因此光激發電子便無法填入量子井中。

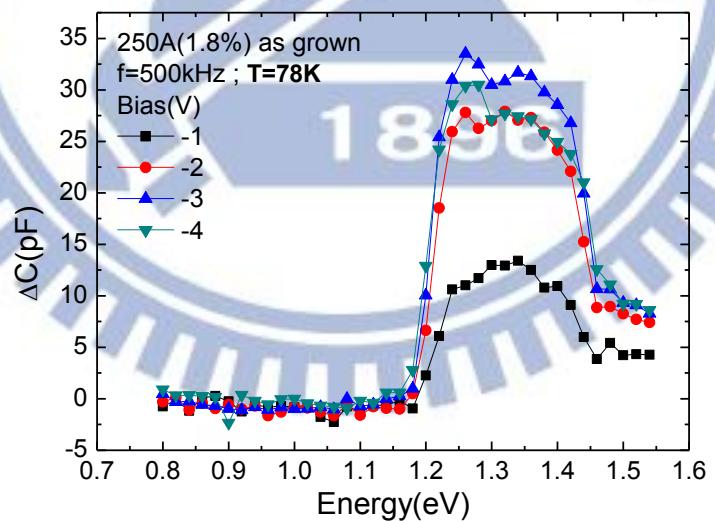


圖[4.1] 照光時的 C-V 圖形

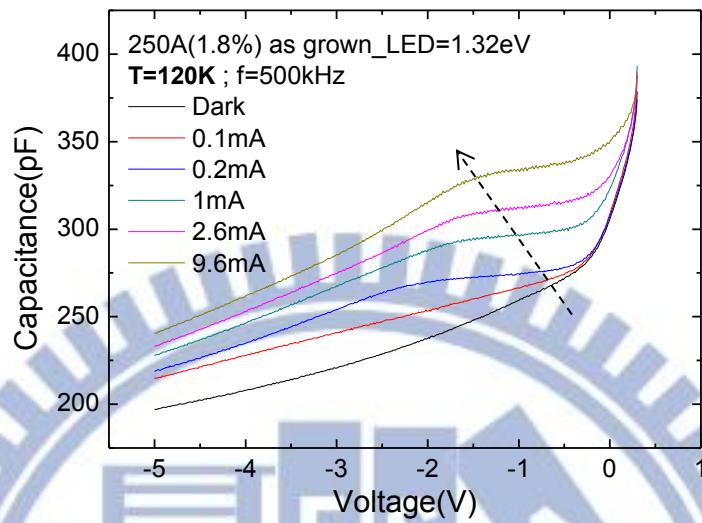




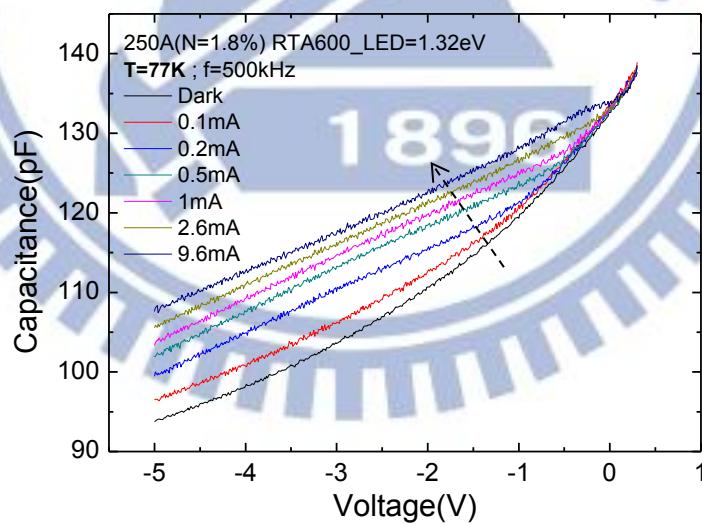
圖[4.2(b)] 120Å 在不同偏壓下的光電容



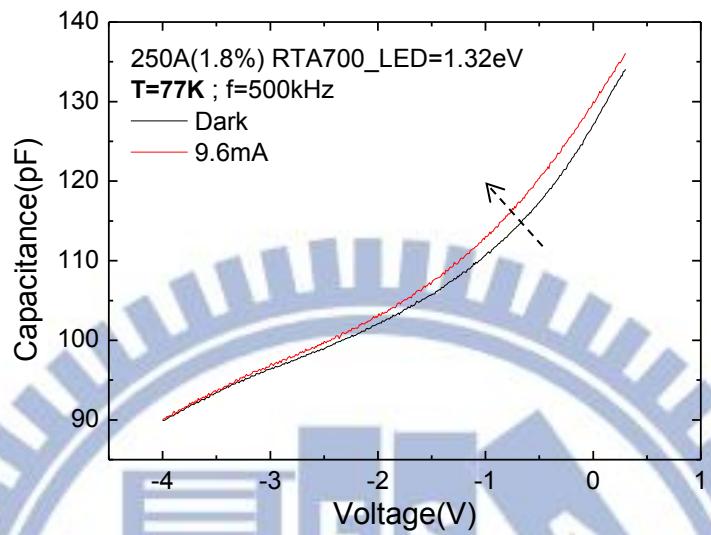
圖[4.2(c)] 250Å 在不同偏壓下的光電容



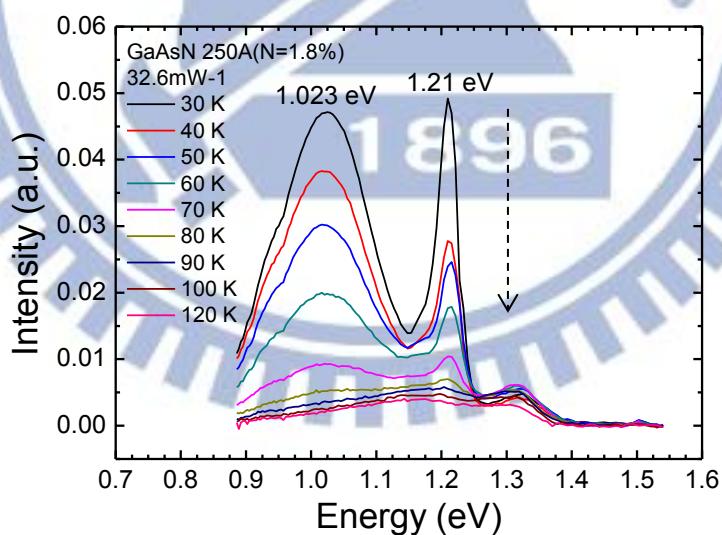
圖[4.3(a)] 250 \AA as grown 的照光 C-V 圖



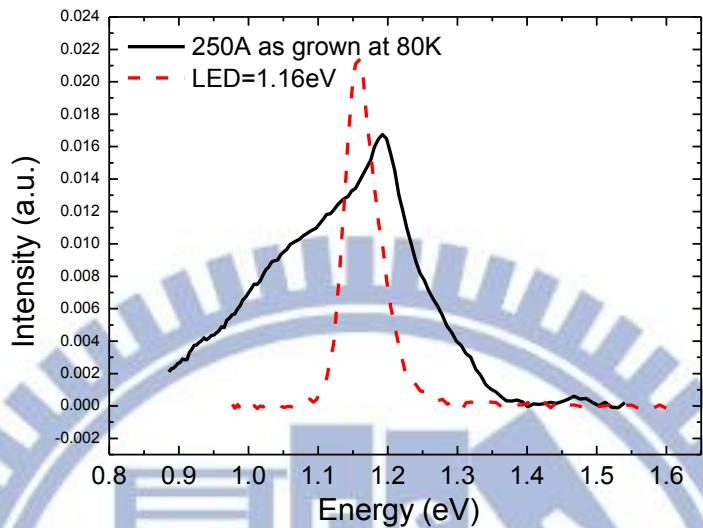
圖[4.3(b)] 250 \AA RTA600 的照光 C-V 圖



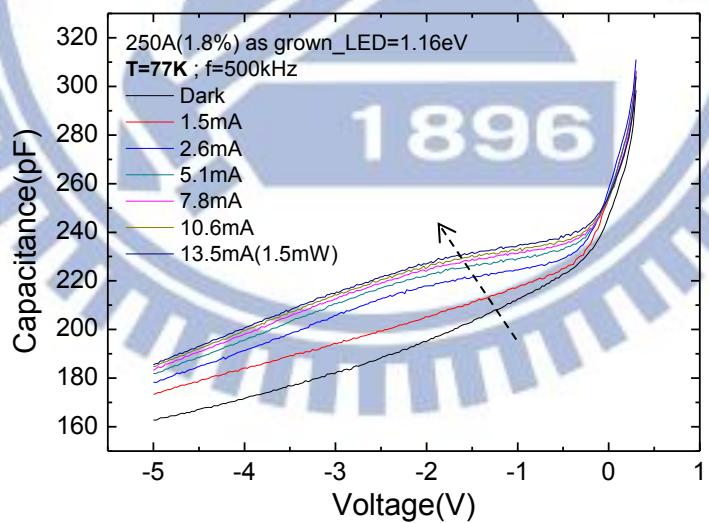
圖[4.3(c)] 250Å RTA700 的照光 C-V 圖



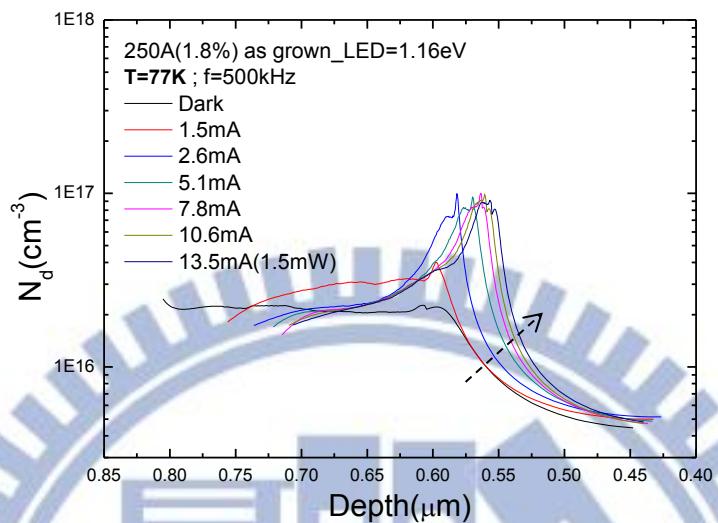
圖[4.4] 250Å as grown 的 PL 圖



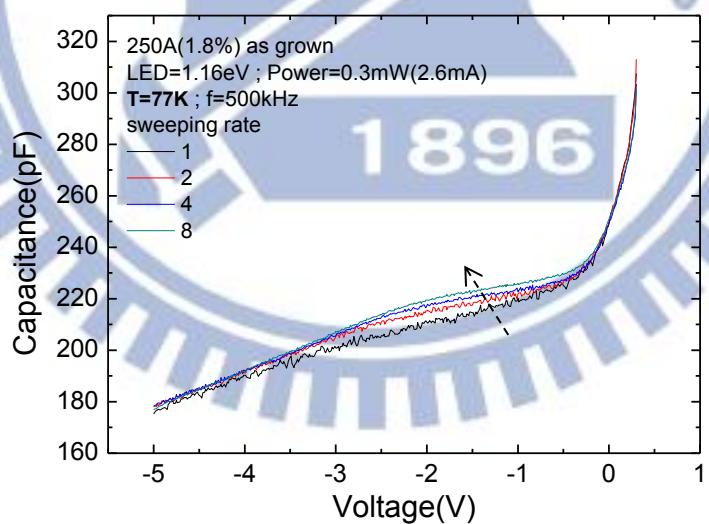
圖[4.5] 250Å as grown 的 PL 圖與 1.16eV 的 LED 波長分布



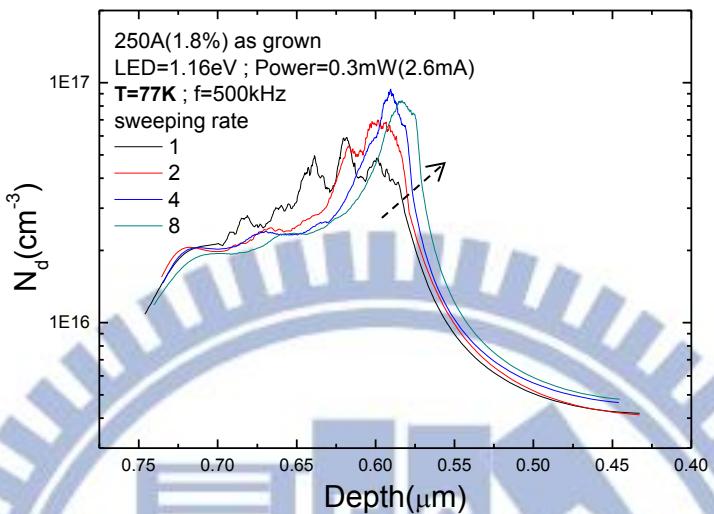
圖[4.6(a)] 250Å as grown 的 1.16eV 光激發 C-V 圖



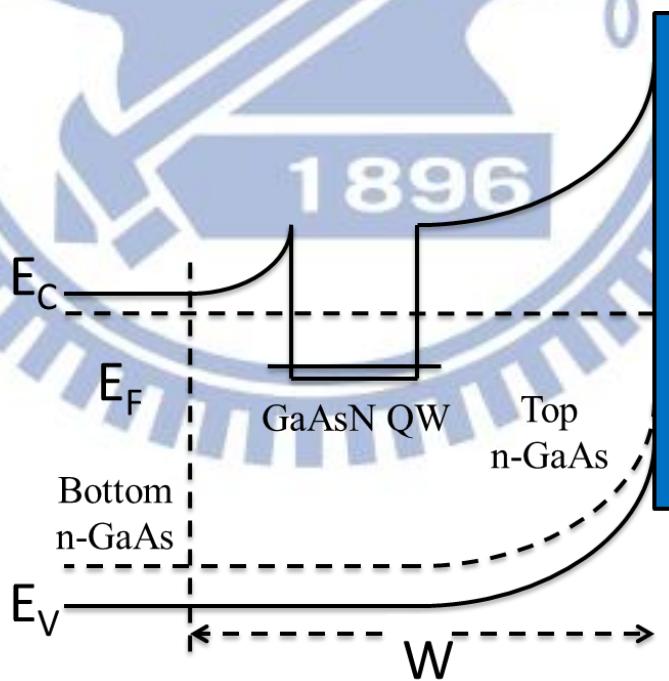
圖[4.6(b)] 250Å as grown 的 1.16eV 照光縱深分布圖



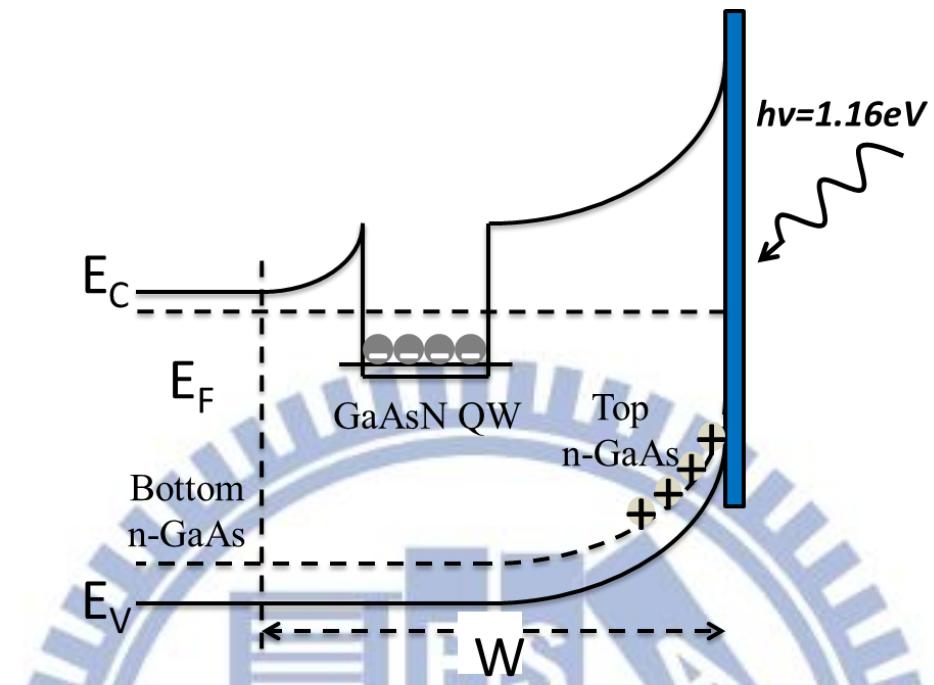
圖[4.7(a)] 250Å as grown 改變量測速率的照光 C-V 圖



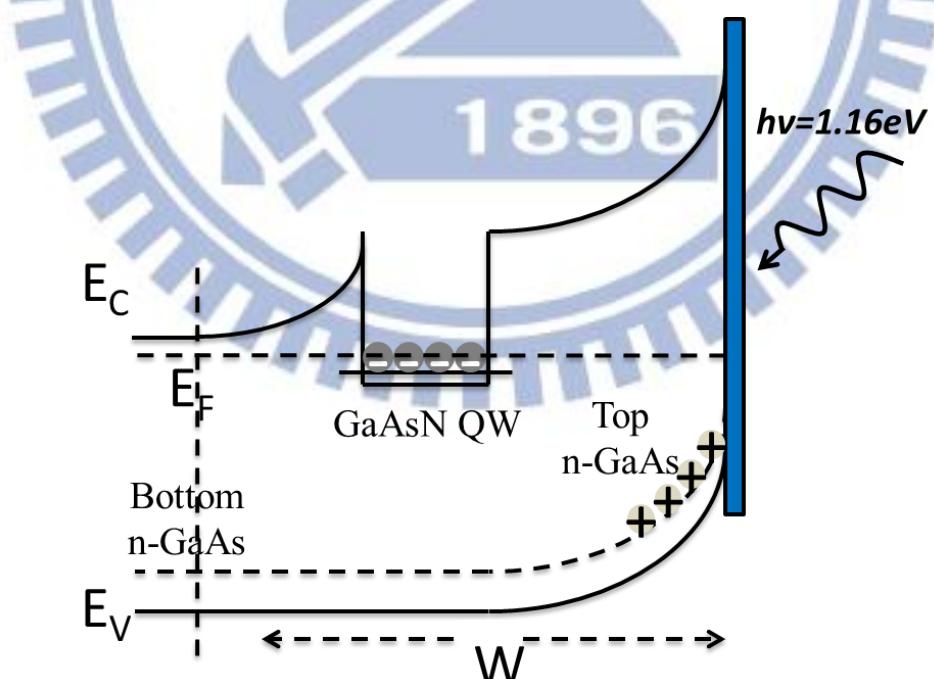
圖[4.7(b)] 250\AA as grown 改變量測速率的照光縱深分布圖



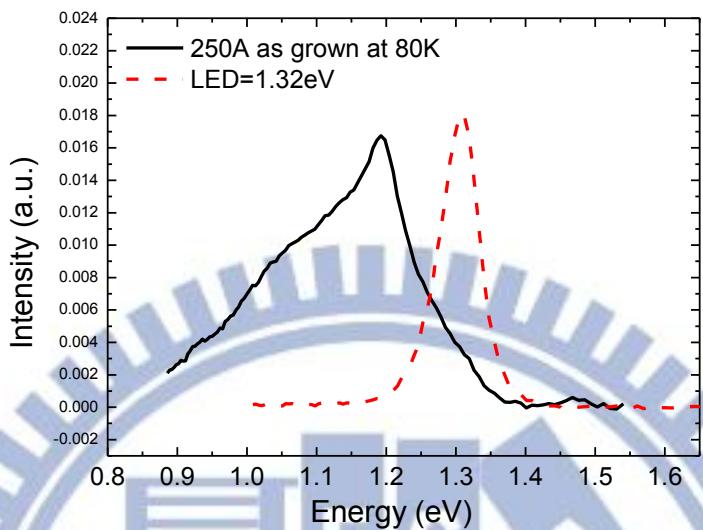
圖[4.8(a)] 250\AA as grown 未照光時的能帶圖



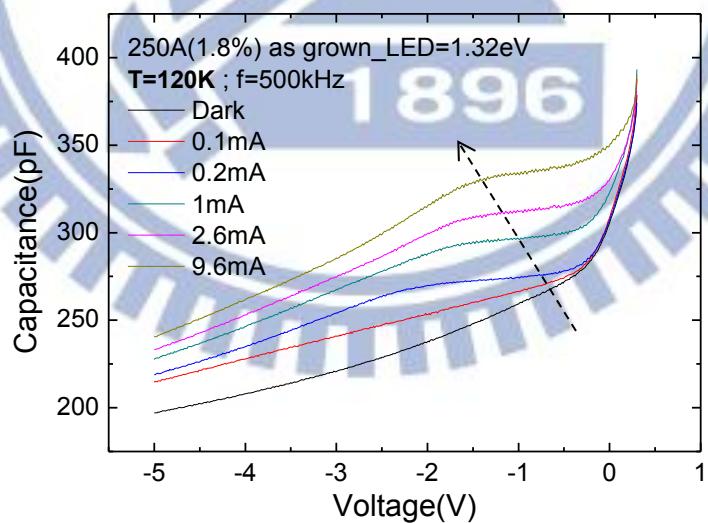
圖[4.8(b)] 250\AA as grown 照光時的能帶圖(還未調變到 QW 中的載子)



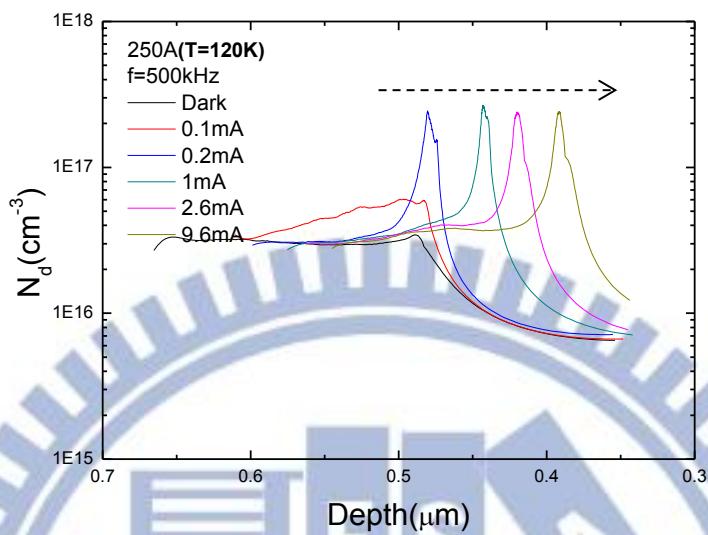
圖[4.8(c)] 250\AA as grown 照光時的能帶圖(已調變到 QW 中的載子)



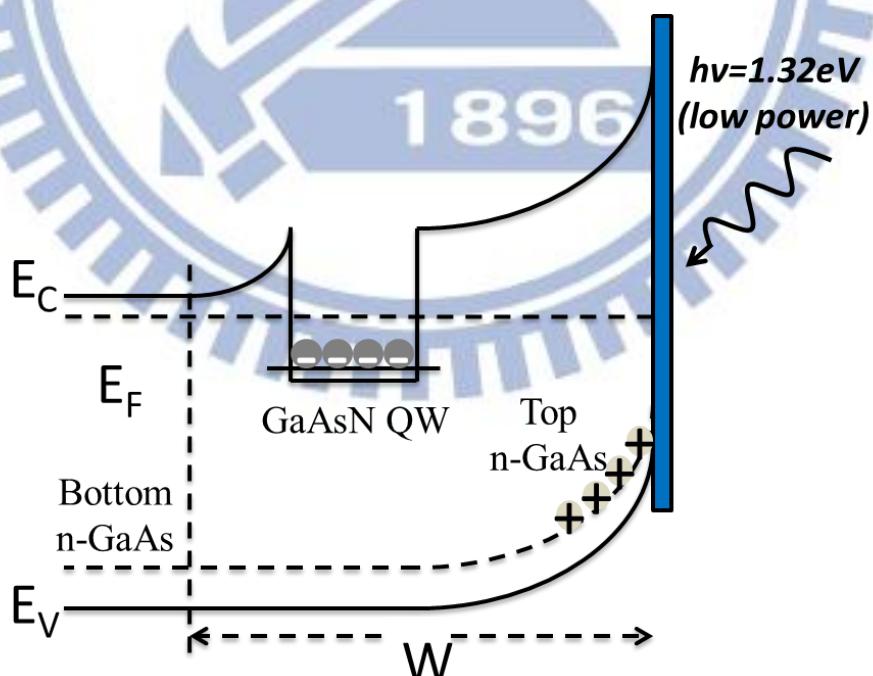
圖[4.9] 250\AA as grown 的 PL 圖與 1.32eV 的 LED 波長分布



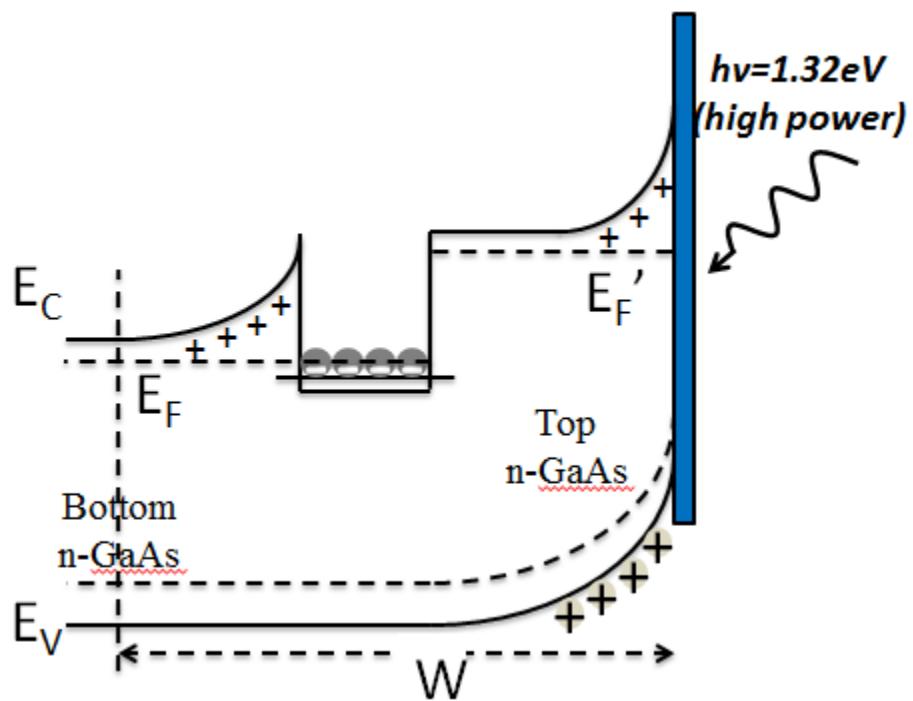
圖[4.10(a)] 250\AA as grown 的 1.32eV 光激發 C-V 圖



圖[4.10(b)] 250\AA as grown 的 1.32V 照光縱深分布圖



圖[4.11(a)] 250\AA as grown 照小功率的光時的能帶圖(還未調變到 QW 中的載子)



圖[4.11(b)] 250Å as grown 照大功率的光時的能帶圖(提早調變到 QW 中的載子)

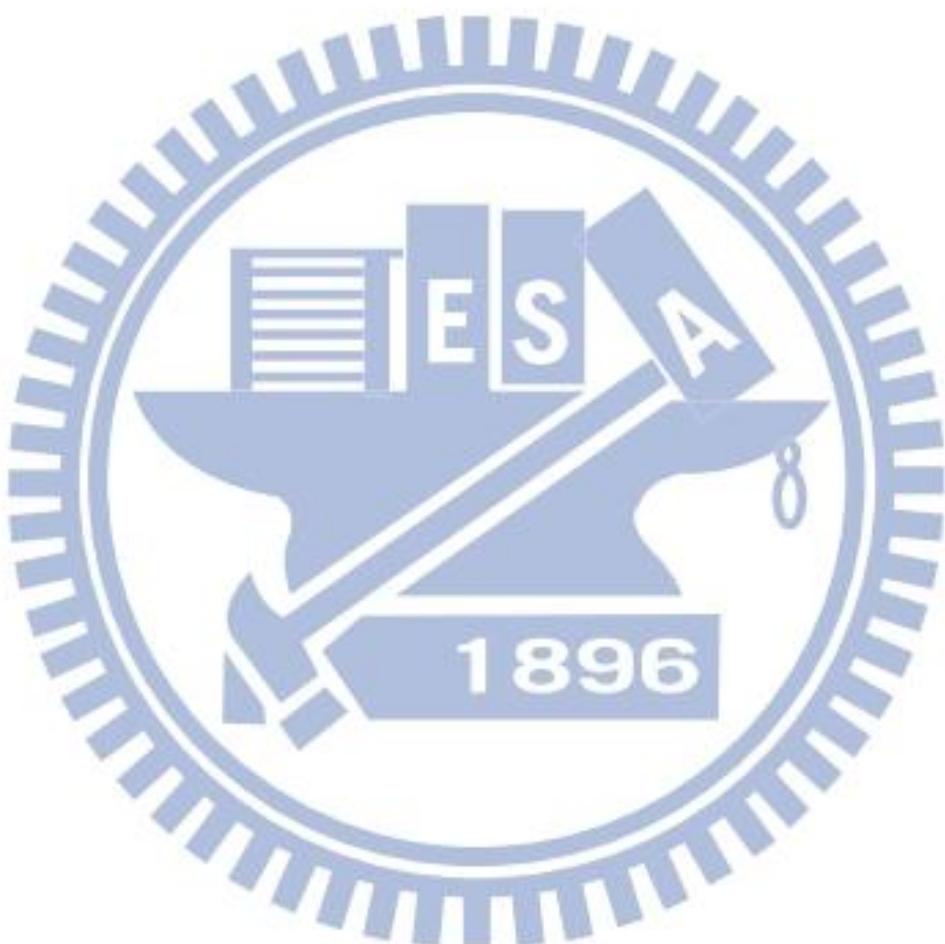


第五章

總結

本篇論文主要講述的內容為 GaAsN 量子井結構中的載子分布變化及特性。其分為兩個部份討論：未照光及照光後(受光激發)的 C-V 圖形。首先，我們對 60\AA 、 120\AA 、 250\AA 三片不同厚度的 GaAsN 量子井樣品做了未照光時的 C-V 量測。由量測結果發現 120\AA 的量子井平台會隨著樣品溫度的升高而往小偏壓做移動。於是我們對此樣品做了 DLTS 量測，並算出其缺陷訊號的活化能(activation energy)和捕捉截面積(capture cross section)，結果顯示在樣品表面附近存在許多自生載子中心(generation center)。由於自生載子中心隨著溫度的升高會產生電子電洞對，產生的電子會與量子井前的 N_d 中和，產生中性區，使得量子井前的空乏區縮短；為了達成電場平衡，量子井後的能帶便會傾斜而使得費米能階提早調變到量子井中受侷限的載子，因此 C-V 量子井平台便會提早出現。瞭解了量子井平台往小偏壓移動的原因後，我們便開始做光激發的電性量測。照光時的電容值會比未照光時大，此即光電容。為了確認光電容的來源是缺陷或量子井本身，我們將缺陷最多的樣品(250\AA)作快速熱退火(rapid thermal annealing=RTA)處理，目的在於將樣品中的缺陷消除。用 1.32eV 的 LED 光源對 250\AA as grown、RTA600、RTA700 作光激發的 C-V 量測，結果顯示樣品中的 V_{Ga} 缺陷越少，光電容越小。也就是說，光電容的來源為樣品中的 V_{Ga} 缺陷。激發 V_{Ga} 缺陷中的電子至 GaAs 導帶上所需的能量需大於 1.3eV ，然而， 250\AA 的光電容發生於激發光源 1.2eV ，而此能量正巧與量子井的 PL 發光訊號十分接近。於是，為了區分出量子井及缺陷貢獻的光電容如何影響量子結構中的載子分布，我們分別用 1.16eV 及 1.32eV 的 LED 作激發光源量測 C-V。結果顯示，其中最大的不同為，同時能激發量子井發光能隙及 V_{Ga} 缺陷的 1.32eV 在大功率的情況下，其量子井中各能量位階已

被電子所佔據而達飽和，此時更多的電子會中和量子井前的 Top n-GaAs，使得中性區拉長，因此費米能階能夠提早調變到量子井中的電子。另外，造成 250\AA 量子井能填入光激發電子的因素為， 250\AA 的量子井結構太厚，其量子能階幾乎在 GaAsN 導帶底部，因此在未照光時，量子井中幾乎沒有侷限任何電子，光激發電子才有機會躍遷至量子井中。



參考文獻

- [1] M. Weyers, M. Sato, and H. Ando, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2 31, L853 (1992).
- [2] M. Kondow, K. Uomi, K. Hosomi, and T. Mozume, Jpn. J. Appl. Phys., Part2 33, L1056 (1994).
- [3] K. Uesugi, N. Morooka, and I. Suemune, Appl. Phys. Lett. 74, 1254 (1999).
- [4] J. F. Chen, C. T. Ke, P. C. Hsieh, C. H. Chiang, W. I. Lee, and S. C. Lee, J. Appl. Phys. 101, 123515 (2007)
- [5] B. Q. Sun, D. S. Jiang, X. D. Luo, Z. Y. Xu, Z. Pan, L. H. Li, and R. H. Wu, Appl. Phys. Lett. 76, 2862 (2000).
- [6] M. Weyers and M. Sato, Appl. Phys. Lett. 62, 1396 (1993).
- [7] M. Weyers, M. Sato, and H. Ando, Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 31, L853 (1992).
- [8] P. W. Yu, G. D. Robinson, J. R. Sizelove, and C. E. Stutz, Phys. Rev. B 49, 4689 (1994).
- [9] S. Y. Chiang, and G. E. Pearson, J. Lumin. 10, 313 (1975).
- [10] I. Ohbu, M. Takahama, and K. Hiruma, Appl. Phys. Lett. 61, 1679 (1992).
- [11] 謝孟謙, “The formation mechanism and electrical characteristics of N-related localized states in (In)GaAsN/GaAs quantum wells” (2012)
- [12] N. C. Chen, P. Y. Wang, and J. F. Chen, J. Appl. Phys. 83 (3), 1 February 1998