

國立交通大學

電子物理學系

碩士論文

InGaAs(N)/GaAs多層量子井的電光性研究

A study of optical and electrical properties in
InGaAs(N)/GaAs multiple quantum well

1896
研究生：曾淳俊

指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學

電子物理學系

InGaAs(N)/GaAs多層量子井的電光性研究

A study of optical and electrical properties in
InGaAs(N)/GaAs multiple quantum well

研究生：曾淳俊

Student : Chun-Chun Tseng

指導教授：陳振芳 博士

Advisor : Dr. Jenn-Fang Chen

國立交通大學

電子物理學系

碩士論文

A Thesis
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

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

InGaAs(N)/GaAs 多層量子井的電光性研究

研究生：曾淳俊

指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學電子物理學系

摘 要

本論文主要是利用光性電性的量測，包括光激發螢光頻譜 (PL)、電容電壓 (C-V)、導納頻譜 (C-F&G-F)、及深層能階暫態頻譜儀 (DLTS)，去探討 InGaAs/GaAs 多層量子井結構的光電特性，主要著重在多層量子井摻入少量的氮後對於樣品會產生什麼樣的影響。

由 PL 得知摻入少量的氮後，量子井的發光波長會明顯的有紅移的現象，並且量子井的侷限能力以及強度都有增強。並且摻氮的樣品，在更長波長會形成一個 In-N 群聚的一個能階，而且在電性跟光性都看得出他有一個較廣的能量分佈。在摻氮以及不摻氮的樣品我們皆可以在 1000nm 觀測到一個尖峰，並且藉由變功率得知是來自中隙底下的一個缺陷。當我們量測 InGaAs/GaAs 不摻氮的樣品時，我們利用 C-V 量測發現在 -3V 低頻的時候有一個劇烈的負電容現象。在 DLTS 的量測下，我們也可以在 -3V 範圍量測可以量到一個電洞放射的現象。利用一些模擬以及比較摻氮不摻氮樣品 hole emission 的 time constant，我們可以判斷 C-V、C-F 所量測到的負電容的現象是來自中隙底下的電洞放射照成的。

A study of optical and electrical properties in InGaAs(N) multiple quantum well

Student: Chun-Chun Tseng

Advisor: Dr. Jenn-Fang Chen

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

Abstract

We investigate the properties of InGaAsN/GaAs multiple quantum well (MQW) by optical and electrical measurement. This research emphasizes the properties difference between InGaAs/GaAs and InGaAsN/GaAs samples. (N incorporation)

We can observe a distinct redshift , a better confinement and stronger intensity in N incorporation InGaAsN/GaAs multiple quantum well sample. We can observe a peak at 1000nm in both InGaAs/GaAs and InGaAsN/GaAs samples, and estimate it as a trap under the mid-gap by vary the laser's power. In InGaAs/GaAs MQW sample, a phenomenon of NC (negative capacitance) is found from the C-V measurement under -3V and low frequency . Using some simple formulas , we know that a phenomenon of NC(negative capacitance) comes from an opposite direction of current. We can still observe a minority carrier emission under DLTS emission measurement at the same voltage, and found that it's a trap under the midgap and it's E_a (activation energy) just fit the 1000nm peak from

v

PL measurement . Under some simulation and compare the N-incorporated and N-free

samples we can find the phenomenon of NC (negative capacitance) is a hole emission below the mid-gap.



致 謝

二年的碩士時光匆匆得過去，在這不算長不算短的學習過程，卻遠比我大學學到的東西多很多。從對半導體一無所知開始獨立研究，選擇自己研究方向以及克服問題，碩士班生活真的充實。

在這二年的時光，最感謝的就是我的指導教授陳振芳教授，在我不知從何研究的時候總是提供給我很多思考的方向，訓練我的思維。接下來要感謝我的博班學長以及碩班學長他們總是耐心的指導我很多方向，以及我同屆的同學陪我一起思考研究的方向，學弟妹以及專題生都幫助我許多，在我的碩士班生活真是很多貴人相助，不然應該不會那麼順利。

以及要感謝陪伴我二年的樂團，卡七以及MB樂團，碩士生活其實很苦悶的，多虧有自己的興趣不然會很難熬過。

目 錄

中文摘要.....	iii
英文摘要.....	iv
致謝.....	vi
目錄.....	vii
圖表目錄.....	ix
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究動機.....	1
1-3 InGaAsN/GaA 材料簡介.....	2
1-4 章節概要.....	3
第二章 樣品製備與量測系統簡介.....	6
2-1 樣品製備.....	6
2-1-1 樣品成長.....	6
2-1-2 電極製作.....	6
2-2 量測系統簡介.....	7
2-2-1 光激發螢光量測系統(PL).....	7
2-2-2 電流電壓量測(I-V).....	8
2-2-3 電容電壓量測(C-V).....	9
2-2-4 導納頻譜量測(C-F & G-F).....	10
2-2-5 暫態電容量測(C(t) measurement).....	10
2-2-6 深層能階暫態頻譜量測(DLTS).....	11
第三章 PL 量測對摻氮以及不摻氮的樣品做分析.....	13
3-1 不含氮樣品 PL 光譜.....	13
3-2 摻氮樣品 PL 光譜的分析.....	15

3-3 摻氮與不摻氮樣品 PL 光譜.....	16
第四章 摻氮樣品以及不摻氮樣品的電性分析.....	23
4-1 不摻氮樣品的電性分析.....	23
4-2 摻氮與不摻氮樣品的比較.....	28
第五章 總結.....	45
參考文獻.....	46

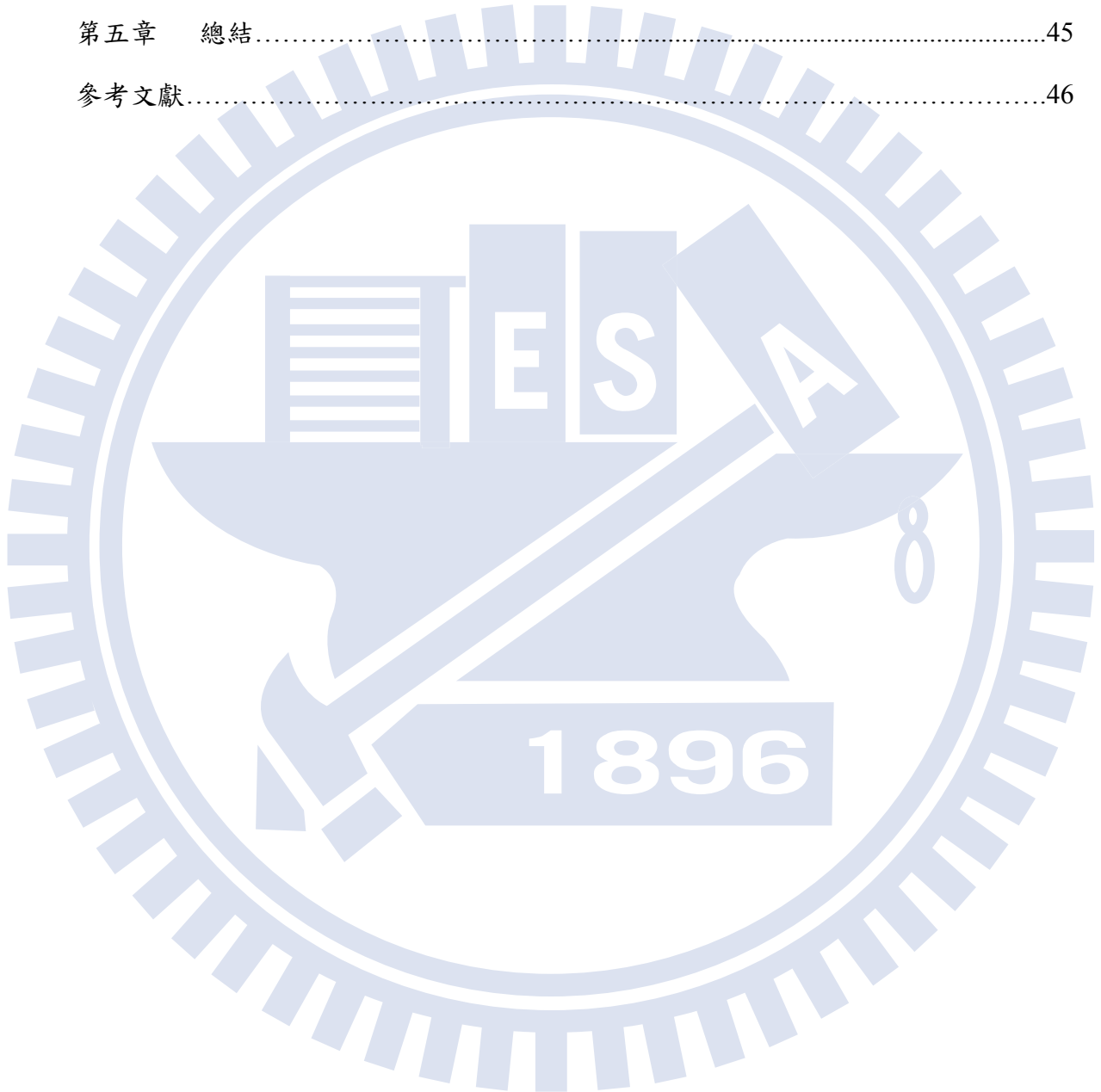


圖 表 目 錄

圖 1-1 圖 1-1 量子結構 (a)量子井(b)量子線(c)量子.....	5
圖 2-1 樣品結構及.....	12
圖 2-2 PL 系統架構圖.....	12
圖 3-1(a) 不摻氮樣品在 40K 的 PL 變功率圖形.....	17
圖 3-1 (b) 不摻氮樣品在 40K 的 PL 變功率圖形.....	17
圖 3-1 (c) 蝕刻九十秒後不摻氮在 40K 的變功率圖形.....	18
圖 3-1 (d) 蝕刻九十秒後不摻氮樣品 40K 1.3mW 高斯擬合.....	18
圖 3-1 (e) 不摻氮樣品功率在 13mw 的變溫圖形.....	19
圖 3-1 (f) 不摻氮樣品功率在 500mw 的變溫圖形.....	19
圖 3-2(a)摻氮樣品在功率 5mW 的變溫 PL 圖.....	20
圖 3-2(b) 摻氮樣品在 40k 的變功率 PL 圖形.....	20
圖 3-3(a)不摻氮樣品在功率 10mW 的變溫 PL 圖形.....	21
圖 3-3(b)摻氮樣品在功率 10mW 的變溫 PL 圖形.....	21
圖 3-3(c)摻氮樣品以及不摻氮樣品對功率 10mW 溫度 40K 的 PL 比較圖形.....	22
圖 4-1 (a)不摻氮樣品在室溫 300K 的 CV 變頻圖形.....	30
圖 4-1 (b)不摻氮樣品在室溫 300K 的 CV 變頻圖形.....	30
圖 4-1(c)不摻氮樣品在溫度 140K 頻率 300k 的 CV 圖形.....	31
圖 4-1(d)不摻氮樣品在溫度 140K 頻率 300k 的轉縱深圖.....	31
圖 4-1(e)不摻氮樣品在溫度 280K 的變頻 CV 圖形.....	32
圖 4-1(f)不摻氮樣品在溫度 290K 的變頻 CV 圖形.....	32
圖 4-1(g)不摻氮樣品在 280K 高低中頻的分析.....	33
圖 4-1(h)不摻氮樣品在 310K 高低中頻的分析.....	33
圖 4-1(i)不摻氮樣品在 350K 高低中頻的分析.....	34
圖 4-1(j)不摻氮樣品在室溫 300K 的變偏壓 CF 圖形.....	35

圖 4-1(k)不摻氮樣品在 3V 的變溫 CF 圖形.....	35
圖 4-1(l)負電容原理.....	36
圖 4-1(m)不摻氮樣品在-2.5V/-2V 的 DLTS 圖形.....	37
圖 4-1(n)不摻氮樣品在-3V/-2.5V 的 DLTS 圖形.....	37
圖 4-1(o)不摻氮樣品在-3.5V/-3V 的 DLTS 圖形.....	38
圖 4-1(p)不摻氮樣品在-4V/-3.5V 的 DLTS 圖形.....	38
圖 4-1(q)不摻氮樣品在-4.5/-4V 的 DLTS 圖形.....	39
圖 4-1(r)少數載子放射的示意圖.....	40
圖 4-1(s)少數載子放射的示意圖.....	40
圖 4-2(a)不摻氮樣品在室溫的 CV 變頻率圖形.....	41
圖 4-2(b)不摻氮樣品在室溫的 CV 變頻率圖形.....	41
圖 4-2(c)不摻氮樣品在室溫 300K 的變偏壓 CF.....	42
圖 4-2(d)摻氮樣品在 340K 的變偏壓 CF.....	42
圖 4-2(e)摻氮樣品在-2/-1.5DLTS 的圖形.....	43
圖 4-2(f)摻氮樣品在-2.5/-2 DLTS 的圖形.....	43
圖 4-2(g)摻氮樣品在-3/-2.5 DLTS 的圖形.....	44
圖 4-2(g)摻氮及不摻氮樣品 hole emission 的阿瑞尼士圖.....	44

第一章

緒論

1-1 前言

在物質純化的技術日新月異的進步之下，材料的研究開始從微米進入了奈米時代，並且各式各樣的量子理論開始被學者提出，加上分子束磊晶 (Moleculum beam epitaxy, MBE)、有機金屬化學氣相沉積 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)... 等製程日益精進，量子井 (quantum well)、量子線 (quantum wire)、量子點 (quantum dot) 等量子結構不斷的發展以及改良。此相對於零維、一維、二維尺度空間，如圖 1.1(a)、(b)、(c)[1] 所示。一般所謂奈米結構尺寸指在 1nm 至 30nm 之間，此尺寸遠小於古典物理所描述之巨觀世界的大小，而進入近代量子力學研究的範疇，量子侷限的效應造成能階的量子化，導致載子運動時在某些方向受到限制，而束縛的維度增加因載子被侷限象現也愈益明顯，其量化位移所產生的效應則更加顯著，呈現出不同於一般宏觀物體的現象。

1-2 研究動機

隨著網際網路普及使得人們透過網路存取資料大量劇增，造成對光通訊頻寬的需求量越來越大；因此，增加頻寬提高上網效率以及降低光通訊元件成本是相當重要的研究議題。但由於目前光纖通訊元件成本高昂，主要因素是元件基板材料為 InP(磷化銦)所製成，其材料成本高、尺寸小且易破裂；所以，使用特性較佳的 GaAs(砷化鎵)基板，可用積體電路(IC)製造技術來大量的製造降低生產成本及縮小元件尺寸；有鑑於此，能成長在砷化鎵板上的量子結構元件，遂成為開發奈米光纖通訊主要的元件。

而通訊元件材料也因量子結構的光電特性引起相當多學術界研究群的注意，其具

有相當窄的增益頻譜(gain spectrum)和不連續的能量頻譜(energy spectrum)等特性；由於量子結構內彼此能階的能量差距通常大於熱能量(thermal energy) kT ，因此能降低溫度對元件特性的影響，而提高元件的工作溫度[2]。另外，量子結構亦可拉長以GaAs為基底元件的放射波長，以達到光通訊所需的波長範圍1.3~1.55 μm (註:此範圍為符合光纖透明視窗，而1.3 μm 為最小散射的波長，1.55 μm 為最小吸收的波長[3])。除此之外，量子結構還擁有較低臨界電流(threshold current)、較高飽和材料增益(saturation material gain)和增額增益(differential gain)等優點[2]。也因為這些特性已經被廣泛開發在電子或光電元件上，像是半導體雷射[4]、發光二極體(LEDs)[5]、電晶體[6]、量子點記憶元件(Quantum dot memory device)等。

1-3 InGaAsN/GaAs 材料簡介

光電半導體在光纖通訊所需要之光源具有極重要的地位，而中長程光纖的光源發光通常使用在1.3 μm 或1.55 μm 雷射波長，傳統元件結構大多為在磷化銦(InP)的基板上成長磷砷化銦鎵(InGaAsP)半導體薄膜，為了控制雷射特性使用時需加上恆溫器來加以控溫，而且用磷化銦(InP)基板只能長出3吋的磊晶片使用上成本偏高。因此，選擇以低價位的GaAs基板成長氮砷化鎵銦(InGaAsN)半導體材料，所製出的雷射元件，在製程操作上能長出6吋以上的的磊晶片且不需要冷卻，亦可以將電子IC集成在同一基板上，以降低成本及提升元件的功能之優勢[7]。M. Kondow[8]於1995年提出四元化合物材料InGaAsN便可以使光纖通訊光源達到1.3 μm 到1.55 μm 的波段，利用調變其中的材料參數便可以調整其發光波段，而且InGaAsN與GaAs基板晶格匹配；目前III-V族半導體中的 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ 是最新穎材料之一，且當在 $y\sim 3x$ 時其與GaAs基板晶格有很好的匹配，研究領域範圍也相當很廣泛。另外，由於氮和砷原子之間的差異性非常大，因此較難成長出品質比較好的砷化氮半導體化合物，又半導體的能隙與晶格常數的大小成反比，我們由Vegard's law可以得到這樣的結

果，當晶格常數增加對應的半導體能隙便隨之下降，且當加入少量的氮時會大幅度的改變化合物的光學特性以及能帶結構。我們發現四元的材料InGaAsN可有效拉長波長，並且可從文獻中得知也嘗試把氮再加入GaAs barrier 和InGaAs層中[9]，由此可了解大家無非就是想成功地拉長波長能達到光纖通訊的波段。

以往InGaAsP在長程光纖通訊的光源材料被大量的運用，但近來新興的InGaAsN與AlGaInAs二種材料被研發出運用在高頻通訊元件上有更多的優勢廣泛引起注意。然而以InGaAsNSb材料系統以高特性溫度與相當大的band offset ratio($\Delta E_c : \Delta E_v = 7:3$ 到 $6:4$)，對熱的敏感度低和電子溢流的情況有很大的改善，其電子與重電洞有效質量特性也很適合發展成光圓點、體積小的面射型雷射(vertical-cavity surface emitting laser，簡稱VCSEL)之優勢[10]。

光通訊系統中穩定性的光源是光通訊傳輸必需條件，其中長波長面射型雷射是備受重視的雷射光源，而成長在GaAs 的長波長雷射最大的優點為溫度穩定性佳及運作電流低，此技術製成之1300nm VCSEL 可廣泛應用於標準的單模及多模光通訊元件，是相當具有價值及潛力的關鍵元件。

1-4 章節概要

本研究論文架構主要是對 InGaAs/GaAs 多層量子井分析光性以及電性的一些特性，藉由 PL、CV、CF、DLTS 量測，可以先分析不摻氮的多層量子井的特性然後再對摻氮的量子井去做比較。論文的章節安排如下：

第一章：說明研究動機合實驗樣品 InGaAsN/GaAs 材料發展背景概述與基本的知識。

第二章：敘述樣品成長的結構以及成長條件已及光性電性原理以及量測系統的介紹。

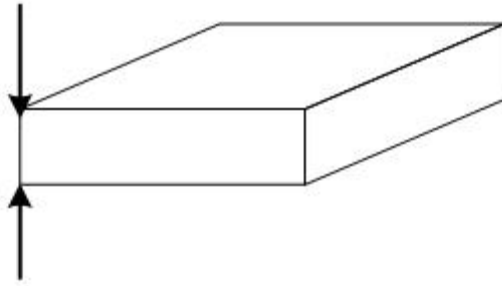
第三章：利用 PL 量測對摻氮以及不摻氮的樣品做分析。

第四章：利用 CV，CF，DLTS 對摻氮以及不摻氮的樣品做分析。

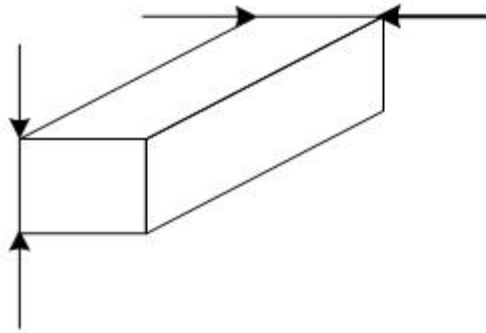
第五章：總結實驗量測的結果



(a)



(b)



(c)

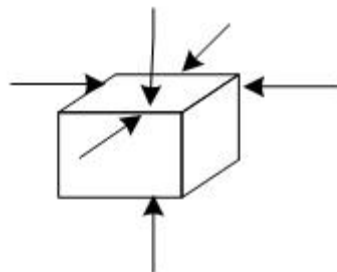


圖 1-1 量子結構 (a)量子井(b)量子線(c)量子點

第二章 樣品製備與量測系統簡介

2-1 樣品製備

樣品製備分為量子點樣品的成長與正極蕭基界面(Schottky contact)及負極歐姆界面(Ohmic contact)的電極製作

2-1-1 樣品成長

樣品是由工研院所提供，由分子束磊晶(Molecular beam epitaxy)成長的，長晶所使用的基板為(100)方向的 n^+ -GaAs($1.3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)，基板成長溫度固定在 600°C ，而 QD、QW 的長晶溫度則設定為 $485\sim 500^\circ\text{C}$ 。成長的步驟：

- (1). 先在 GaAs 基板上成長一層 AlGaAs 的 blocking layer 30nm
- (2). 之後成長一層 GaAs 的 buffer layer 50nm
- (3). 接著成長三層 InGaAs(N)/GaAs 多層量子井 45nm
- (4). 之後成長一層 GaAs buffer layer 40nm
- (5). 之後成長一層 AlGaAs 的 blocking layer 30nm
- (6). 最後成長一層 GaAs 的 surface 33.6nm

結構圖可參閱圖 2-1

2-1-2 電極製作

成長完的樣品由於電性量測的需求，有製作電極的必要。主要是利用熱蒸鍍方法在樣品的正面鍍上 Al 形成蕭基界面，利用逆偏壓來調變蕭基界面所形成的空乏區，來量測樣品不同區域的特性。除此之外仍然需要在樣品的背面製作歐姆界面，以便做訊號的量測。另外在製作電極前還需要一連串清理的步驟，以免影響半導體與金屬的界面，造成實驗的誤判。主要步驟如下：

- (1). 配合使用石英震盪器，沖泡去離子水(D.I water)約 3 分鐘(去除表面一般雜質)，

並用氮氣吹乾。

- (2). 將試片浸泡於丙酮溶液(Acetone)中約 2~3 分鐘，去除表面油漬。
- (3). 沖泡去離子水，約 3 分鐘(去除殘留之 Acetone)，並用氮氣吹乾。
- (4). 置入稀釋過的鹽酸溶液(HCl : H₂O = 1 : 1)中約 2~3 分鐘(去除陽離子及氧化層)。
- (5). 沖泡去離子水約 3 分鐘(去除殘留的酸液)，並用氮氣吹乾。
- (6). 經過清理後的樣品，於其上覆蓋所需要的 mask 來決定金屬接面的面積大小。(本篇論文中所量測的面積大小為 0.005024 cm²)
- (7). 置入蒸鍍機內，使用機械幫浦(mechanical pump)及擴散幫浦(diffusion pump)，待抽真空至 2~3x10⁻⁶ torr 以下，再開始以熱蒸鍍的方式鍍上 Al。
- (8). 另外歐姆接面則是使用 In，先在樣品的背面上點上兩個 In ball，經過高溫爐管約 300 °C 的加熱後，量測兩個 In ball 間的電阻值使低於 10 Ω，具有歐姆特性，再將之置於均勻塗滿 In 的 Si 基板上。以上為電性量測所需的樣品製備。

2-2 量測系統簡介

本研究主要分為光性量測與電性量測，分別在 2-1-1 節及 2-2-2 節以後做介紹。

2-2-1 光激發螢光量測系統(PL)

本論文使用的 PL (Photoluminescence)量測系統是楊賜麟老師實驗室所提供的，其中依實驗需求所使用的儀器設備包含：

- (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而偵測。
- (2). 衰減濾光片組(Variable Neutral Density Filter)：利用衰減片來控制、調整想要的雷射輸入功率。
- (3). 光遮斷器(Optical chopper)：目的在於使連續波的雷射形成方波的形式，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)。系統的最低溫約在 10 K，可利用循環 He 的壓縮機與溫控器的加熱器相互配合以便控制所想要的溫度進行量測。
- (6). 高通濾光片(Long-pass filter)：我們所使用的是 695 nm 的濾光片，目的為濾掉雷射光，避免其進入光偵測器中(因為螢光相較於雷射光是屬於非常微弱的光)。
- (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)，主要是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 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 STANFORD RESEARCH SYSTEM SR850，目的在量測微小的交流訊號。

PL 設備架設如圖 2.2 所示，首先由固態雷射發射波長為 532 nm 的雷射光，經由實驗需要調整好倍率的衰減片，來降低雷射輸出功率，然後經由光遮斷器對雷射光進行調變，並將光遮斷器的頻率送至鎖相放大器作為參考頻率，經過光遮斷器的雷射光經由第一面透鏡聚焦在樣品上，進而激發樣品放射出螢光，再經由第二片透鏡聚焦在分光儀的狹縫中進行分光，且在光進入狹縫前，另外使用一片 695 nm 的高通濾光片以濾掉雷射光，以避免其對訊號產生干擾，之後螢光再經由光偵測器去接收，傳送至鎖相放大器處理後再傳回電腦而存檔。利用 PL 系統在各溫度下可以針對我們的樣品做量測，也可以利用不同衰減倍率的濾光片針對不同的雷射激發強度做量測。

2-2-2 電流電壓量測(I-V)

以下介紹本研究的電性量測系統。首先，樣品的電流與電壓特性是電性量測實驗中的首要步驟，可利用 I-V 特性的量測了解我們樣品在成長與經過熱蒸鍍等電極製備後其特性是否良好，作為其他電性量測的參考依據。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：

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

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's constant)。本篇論文利用 KEITHLEY 236 作 I-V 量測，本量測的樣品其理想因子大約在 1.0~1.4 之間，Schottky 特性算不錯，而漏電流大約在 10^{-10} mA，串聯電阻約在 100~500 Ω 。

2-2-3 電容電壓量測(C-V)

在蕭基接面下可以藉由調變其空乏區，控制樣品的費米能階(Fermi level)去量測樣品所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 DC 偏壓下的電容值可得出各區域的載子濃度變化，再利用縱深變化圖初步了解樣品是否存在有載子侷限，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)：

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

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

其中 W 為空乏區寬度， ϵ 為半導體介電係數(permittivity)， A 為元件面積(0.005024 cm^2)， $N(W)$ 為空乏區為 W 時的載子濃度。

2-2-4 導納頻譜量測(C-F & G-F)

若由 C-V 量測發現某逆偏下載子對不同頻率有不同電容值的響應，則可進一步

作 C-F 與 G-F 量測，更深入去探討被侷限的載子對外加偏壓的反應時間。調變 ac 的頻率由 100 Hz 到 15 MHz，理論上不同的溫度之下，載子的反應時間常數也不同(與其熱動能有關)，因此可藉由量測 C-F 與 G-F 頻譜，針對不同偏壓(對應到不同區域)的量測，進而畫出阿瑞尼斯圖(Arrhenius plot)，由圖中的斜率與截距，推算缺陷或侷限能階的活化能(activation energy)及捕捉截面積(capture cross section)。根據數學推導的結果，電容及電導對應頻率的公式如下[27,28]：

$$C_p = \frac{\epsilon\epsilon_0}{x_d} + (2e_n)^2 C_0 \left[\frac{1}{\omega^2 + (2e_n)^2} \right] \quad (2-4)$$

$$G_p(\omega) = 2e_n C_0 \left[\frac{\omega^2}{\omega^2 + (2e_n)^2} \right] \quad (2-5)$$

其中 ω 為量測頻率， e_n 為電子放射率(emission rate)，由式子看出當 $\omega \ll e_n$ 時，缺陷可隨交流偏壓來捕捉或放射電子，缺陷對電容便有貢獻；當 $\omega \gg e_n$ 時，則對量測頻率無響應。另外由(2-4)式電容對 $\log(\omega)$ 的關係圖中，反曲點會落在 $\omega = 2e_n$ 上，(2-5)式 $\omega = 2e_n$ 時也會得到最大的 $G(\omega)/\omega$ 值 $C_0/2$ ，可藉此得出不同溫度的 e_n 。使用 HP4194 阻抗/增益相位分析儀做以上的量測，C(t) measurement 的量測也是使用此分析儀。

2-2-5 暫態電容量測(C(t) measurement)

暫態電容量測的原理：利用調變蕭基的空乏區，來控制載子進出缺陷，以量測缺陷釋放載子或捕捉載子的時間。例如量測缺陷放射載子時：

1. 首先樣品處於一逆向偏壓，建立一段空乏區。
2. 加入一順向脈衝(減小逆向偏壓值)，注入載子，空乏區減小，電容變大，載子被空乏區內的缺陷捕捉住。
3. 經過一段填充時間(filling pulse width)後，恢復原先的逆偏，被捕捉的載子還來不及被激發，因此為了維持電中性電場平衡，空乏區會比原先大，電容也因而更小。
4. 足夠時間後，多數載子由於熱激發慢慢被釋放，電容也隨之增加，慢慢飽和呈現指數變化(point defect 的特性)。

但如果缺陷濃度極高如 dislocation...等，則電容值將不會飽和而 C(t) measurement 將呈現對數的圖形。另一方面量測缺陷捕抓載子時，只需將前面所加的偏壓交換即可。藉由量測完的圖形則利用下面的公式去擬合缺陷放射與捕捉時間：

$$y = y_0 + A_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \quad (2-6)$$

上式中 τ_1 是量測到的時間常數，當缺陷放射載子時 $A_1 < 0$ ，反之當其捕抓載子時 $A_1 > 0$ 。當存在不只單一個缺陷被量測到時，可以增加後面的指數項，代表著同時有兩個時間常數被量測到。

2-2-6 深層能階暫態頻譜量測(DLTS)

DLTS 技術在 1974 年首先由貝爾實驗室的 D. V. Lang 在 J. A. P. 提出[29]，主要機制與 C(t) measurement 相同：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[30]。優點：靈敏度高(可到 10^{10}cm^{-3} 之濃度偵測範圍)、能測多數與少數載子、觀測 defect 能階範圍廣、尤其是較深層的缺陷能階(emission time 在毫秒等級的)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(利用雙開訊號平均器設定)，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，與我們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(rate window，即 $e_{n,\max}^{-1}$)，獲得多組不同 $e_{n,\max}$ 與峰值溫度數據，可同樣求出缺陷活化能與捕捉截面積。

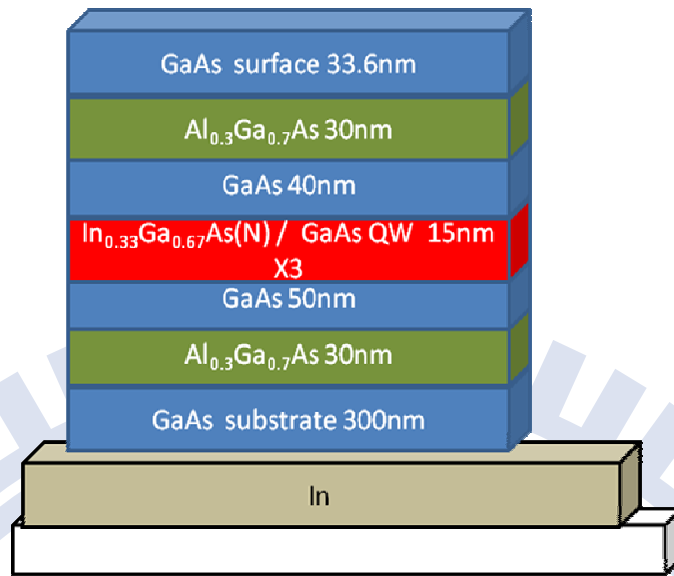


圖 2-1 樣品結構圖

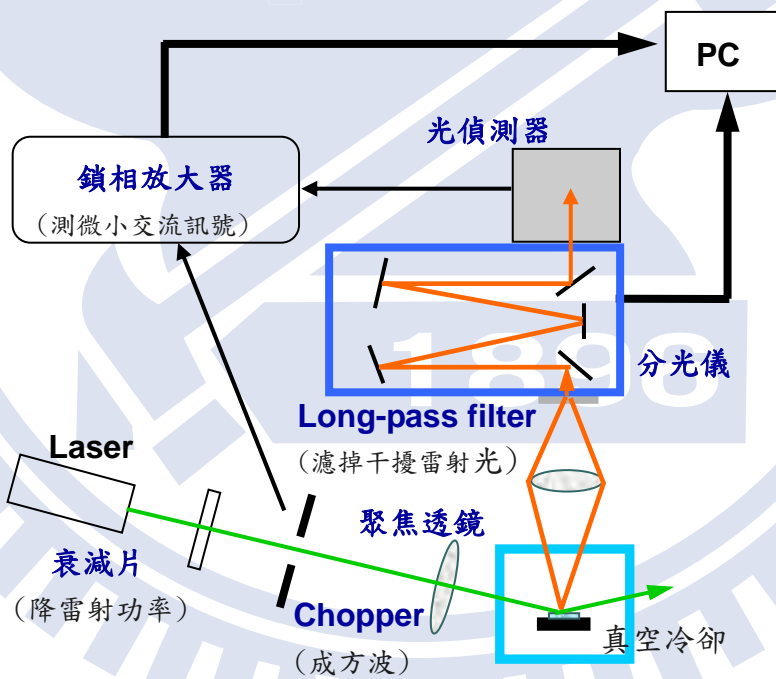


圖 2-2 PL 系統架構圖

第三章

PL 量測對摻氮以及不摻氮的樣品做分析

首先，我們利用 photoluminescence(PL)系統量測有參雜氮以及沒有參雜氮的量子井樣品，並且加以分析討論；量測樣品條件依長晶日誌所記載的參數以及實驗數據後可得知摻氮的比例；之後我們再以低溫的激發強度變化（power dependence）與固定激發強度而變化溫度(temperature dependence)的二種量測技術對樣品結構做進一步的討論。

3-1 不含氮樣品 PL 光譜的分析

圖 3.1 (a)為不摻氮樣品在 40K 溫度下的的變 power 的 PL 光譜，可以明顯的看到有二個明顯的波包分為在 1000 nm 以及 1200 nm，隨著雷射功率由 1.3 mw 提升到 13 mw 會發現二個波包的強度都有慢慢上升的趨勢。13 mw 時，在 1160 nm 有一窄半高寬的波包凸起。在 1160 nm 以及 1200nm 就 sample 結構來說應該是量子井 (quantum well) 產生的發光波長。而 1000 nm 可能是位於中隙 (mid-gap) 底下的缺陷。

圖 3.1(b) 是由 13 mw 再繼續把功率提高到 500 mw 會發現 1160 nm 以及 1200nm 的波包逐漸趨近飽和，而 1000 nm 左右的波包強度持續的變大，更可以確定 1000 nm 是中隙以下的缺陷照成的。

由於 1160 nm 的尖峰訊號不是很明顯，為了確定此一訊號，利用蝕刻 (etching) 大約九十秒將表面的砷化鉀 (GaAs) 弄薄使的透光性提高。圖 3.2 (c) 為蝕刻九十秒後不摻氮樣品在 40K 變 power 圖形。可將 1160 nm 以及 1200 nm 的二個發光波常區分開來，並且隨著雷射功率的改變，二個波包似乎有些微的消長的改變，為了更加確定 1160 nm 以及 1200 nm 到底是否是量子井 (quantum well) 貢獻的發光波長。圖 3.2 (d) 是取固定 40k 以及功率 13mW 的高斯擬合圖形 (Gauss Fitting Graph) 可以發現發光波長分為在 1012, 1154, 1209 nm; 半高寬分為是 57, 37, 125 nm。1209 nm 的發光波長可能是來自於 In 群聚產生量子井底層的一個能階。

為了要更加確定三個波包的特性，分別取了 13 mW 以及 500 mW 一個小功率一個大功率做變溫的 PL 圖形。取大功率小功率變溫的主要原因是因為我們在圖 3-1(d) 可看到距離非常接近的二個波包，1160 nm 的波包在大的 power 的時候會比較明顯而較長波長的 1200 nm 的波包會在大功率的時候比較明顯，這樣可以觀察二個不同波包對溫度的響應。圖 3-1 (e) 為 13 mW 的變溫 PL 圖形，可以發現在 1000 nm 的波包並沒有隨溫度上升有移動的現象隨著溫度上升逐漸消失，而 1200 nm 的波包隨著溫度上升有明顯的紅移的現象，可以由此圖更確定 1200 nm 是來自於量子井的貢獻。圖 3-1 (f) 為 500 mW 的變溫 PL 圖形，可以發現同樣的現象在 1000 nm 的波包也並未隨著溫度有所改變，反之在 1160 nm 的波包卻也有一個明顯的紅移的現象。這二個變溫的圖可以發現在 1160, 以及 1200nm 的波包是均由結構中量子井產生的貢獻，而沒有移動的 1000 nm 的波段可能來自於中隙下的缺陷能階。

3-2 摻氮樣品 PL 光譜的分析

圖 3.2 (a) 是摻氮多層量子井在 10mw 得變溫 PL 光譜，可以很明顯的看到在更長波長，在 1300 nm 的地方有一個發光波長，他是來自於摻氮後 In 與 N 會結合在量子井的下方會產生一個氮的成分不均勻(N composition fluctuation) 。1200 nm 的發光波長是來自於量子井的發光波長，可以從圖 4.2 (a) 看到在變溫的 500mW 光譜下，隨著溫度變高至室溫時 1200nm 有一個明顯的紅移 (red shift) 現象。

圖 3.2 (b)是摻氮多層量子井在低溫的變功率 PL 光譜，可以明顯的看到在 1000 nm，也有著與不摻氮一樣的特性，隨著功率變大強度持續變強。判斷他也是來自中隙以下的一個電洞井。

3-3 摻氮與不摻氮樣品 PL 光譜

圖 4-3 (a) 是不摻氮的多層量子井在 10mW 的變溫 PL 光譜圖形。在圖 4-3 (a) 中可以發現溫度升高至 80K 左右時，量子井的訊號已經幾乎看不到了，只看的到位於量子井更深的 In 群聚的訊號以及 1000 nm 來自與底層的 defect 訊號。

圖 4-3(b) 是 RT 23 摻氮多層量子井在 10 mW 的變溫 PL 光譜可以發現隨著溫度升高至 140K 仍可清楚的看見來自量子井的訊號，比較起圖 4-3 (a) 很明顯得摻入氮的多層量子井的侷限能力變好許多。

圖 4-3(c) 是將不摻氮的多層量子井與摻氮的多層量子井在低溫 10 mW 畫在一起，可以明顯的發現摻氮的發光強度較不摻氮強度大上許多，可以明顯看出摻得氮的發光效率比較好。並且摻入了氮之後，量子井有一個明顯的紅移的現象。

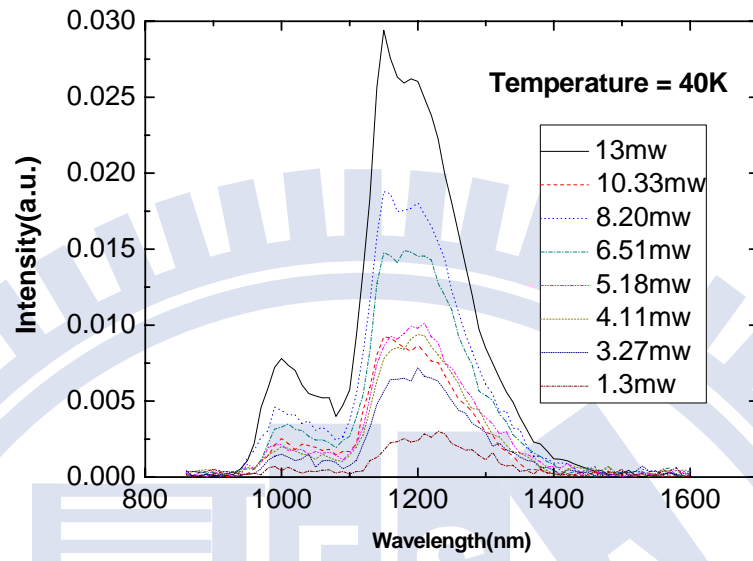


圖 3-1(a) 不摻氮樣品在 40K 的 PL 變功率圖形

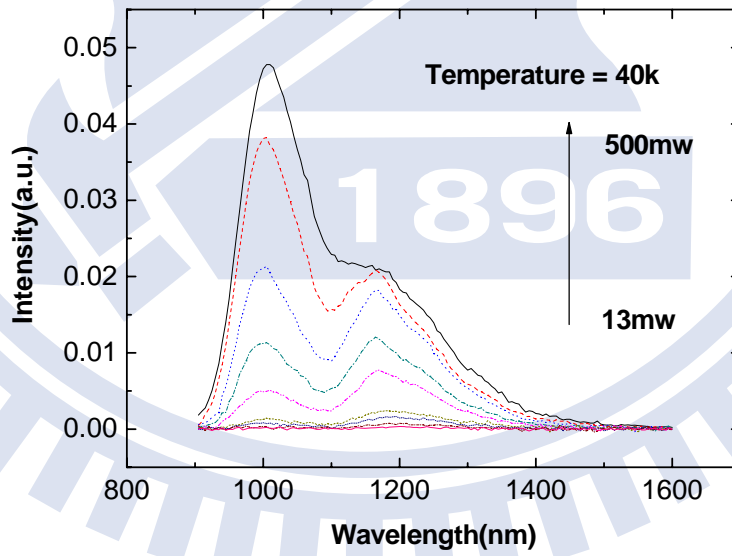


圖 3-1(b) 不摻氮樣品在 40K 的 PL 變功率圖形

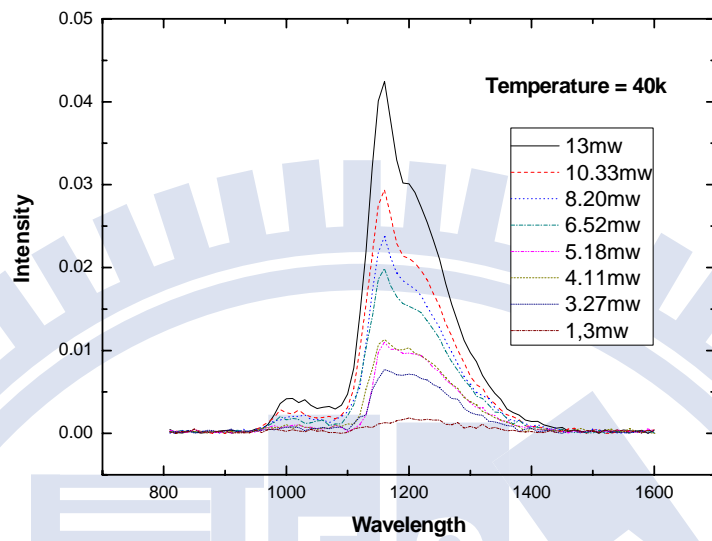


圖 3-1 (c) 蝕刻九十秒後不摻氮在 40K 的變功率圖形

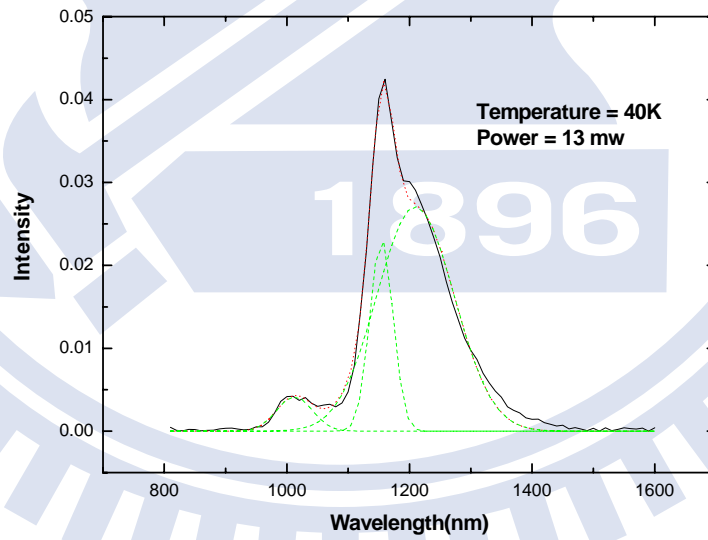


圖 3-1 (d) 蝕刻九十秒後不摻氮樣品 40K 1.3mW 高斯擬合

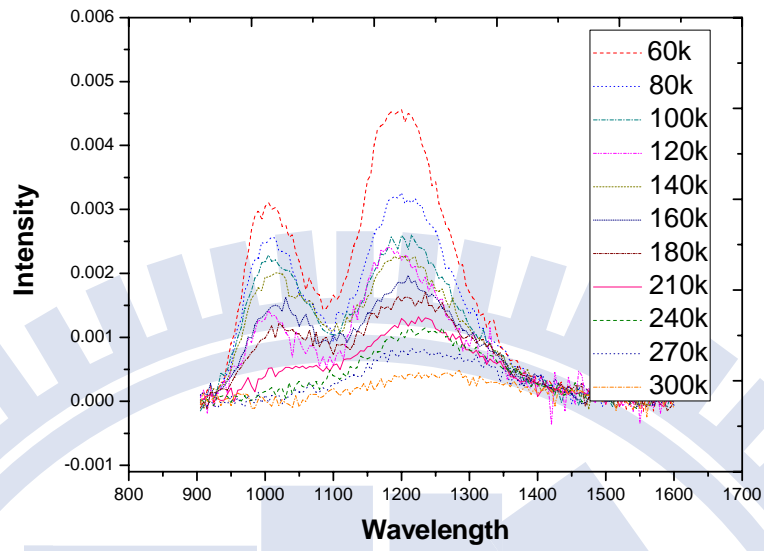


圖 3-1 (e) 功率在 13mw 的變溫圖形

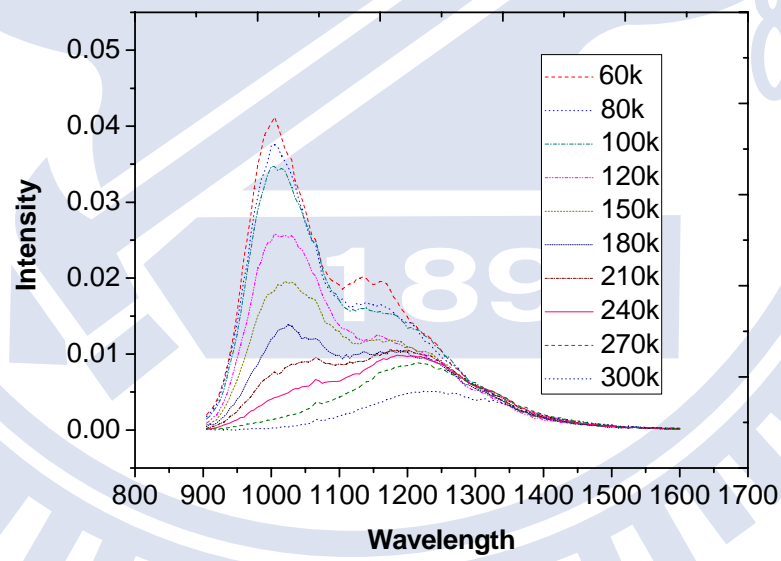


圖 3-1 (f) 不摻氮樣品功率在 500mw 的變溫圖形

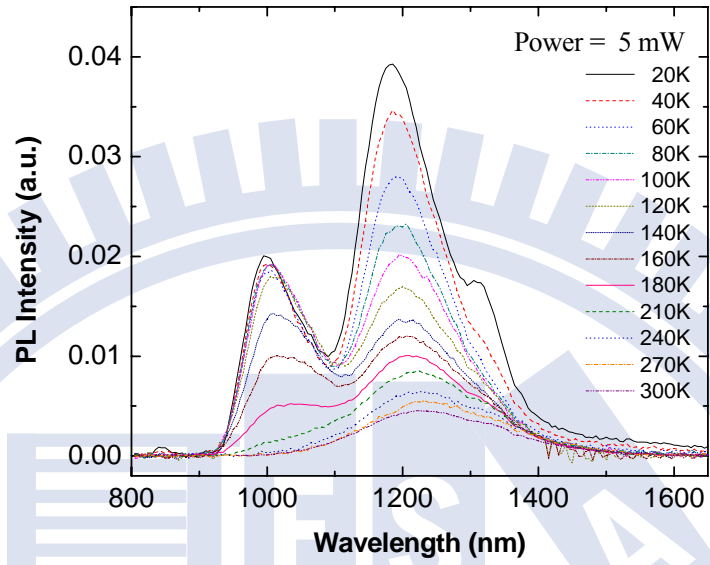


圖 3-2(a) 摻氮樣品在功率 5mW 的變溫 PL 圖形

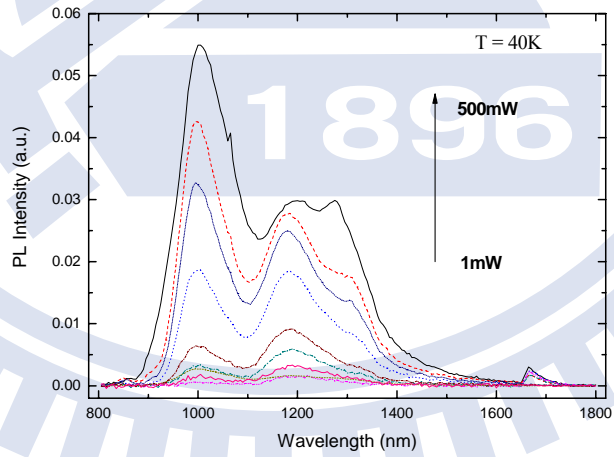


圖 3-2 (b) 摻氮樣品在 40k 的變功率 PL 圖形

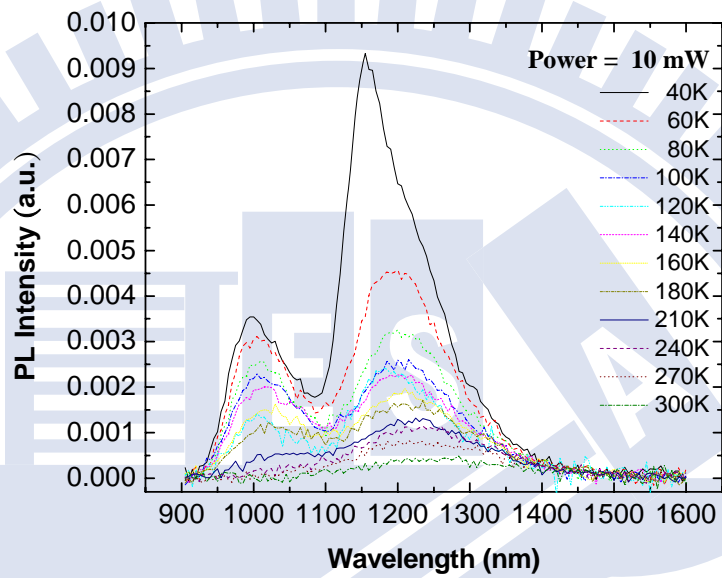


圖 3-3(a) 不摻氮樣品在功率 10mW 的變溫 PL 圖形

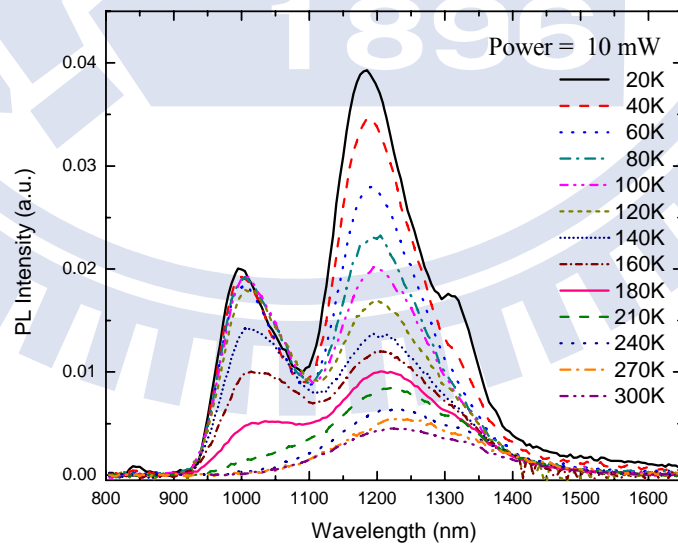


圖 3-3(b) 摻氮樣品在功率 10mW 的變溫 PL 圖形

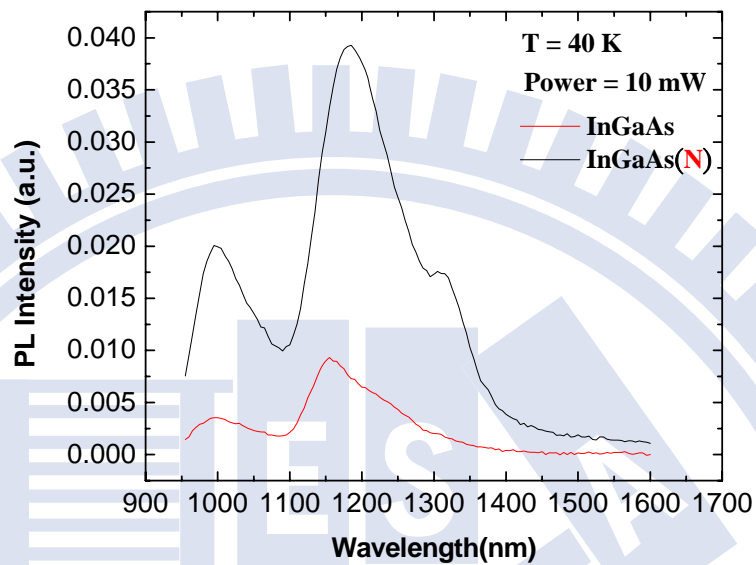


圖 3-3(c) 摻氮樣品以及不摻氮樣品對功率 10mW 溫度 40K 的 PL 比較圖形

第四章 摻氮樣品以及不摻氮樣品的電性分析

本章主要是利用 CV，CF，DLTS 的量測結果去討論樣品結構的電性特性，會把電性量測量測到的結果與光性做一個連結。並且比較摻入了氮的樣品與不摻氮樣品在物理特性上有什麼差異。

4-1 不摻氮樣品的電性分析

圖 4-1 (a)是不摻氮多層量子井在 300K 的變頻 CV 曲線，可以發現在-2V 到-5V 的偏壓範圍有一個很大的負微分電容。由電容值去做判斷可以發現在 0V 的電容值已經對應到結構的基板的地方了並且沒有一個一般蕭特基界面電容值往上拉的現象。推測可能是表面太薄使的一開始 shockley barrier height 貢獻得空乏區已經超過結構了

為了對這片樣品的結構有一個更深入的探討，我們將偏壓加至正偏壓的範圍。圖 4-1 (b)可以發現在正偏壓電容值有一個很明顯被 shockley 拉起來的趨勢。但是在室溫底下仍然都有很嚴重的負微分電容的現象，我們發現在正偏以及負偏都有一個很明顯的頻率響應。為了能夠分析是結構的哪一個部分導致頻率響應，我們將樣品降至一個低溫去觀察他的 CV 圖型的變化。

圖 4-1(c)是不摻氮樣品在低溫 140 K 頻率 300k 的 CV 特性曲線，可以發現低溫底下負微分電容的現象變得比較不明顯，而會褪變成像平台一樣的圖譜。可以發現在 5V，2V，-1V，-3V 皆有一個很明顯的平台。為了瞭解平台對應到 sample 結構的位置。

圖 4-1 (d) 是不摻氮樣品在低溫 140K 頻率 300k 對 CV 特性曲線對應到的轉縱深。從縱深圖對應到的深度可以發現 CV 圖形的電容值對應到的電壓已經空乏至樣品的基板了。但是仍然可以從縱深圖看到明顯的幾個尖峰。其中 5V, 2V, -1V, -3V, 對應到縱深的尖峰分別是 0.413, 0.421, 0.430, 0.441 μm 可以推測這三個尖峰應該是對應到量子井的載子侷限, 而 0.441 μm 的尖峰可能來自於量子井底下更深的 In dot-like state 的侷限。很明顯他比起量子井稍微寬廣一些, 為了去證明這二的尖峰的來源我們去對 -5V 到 0V 去做頻率更廣的 CV 圖形量測。

圖 4-1(e) 是不摻氮樣品在溫度 280K 頻率的範圍從 300Hz 至 2000k Hz 的 CV 特性曲線。可以明顯的發現隨著頻率減小在較小逆偏壓的頻率響應逐漸得變大而隨著頻率低於 30K 後在較深偏壓也有一個較弱的頻率響應。較小偏壓的頻率響應是圖 4-1 (d) 對應到的 0.430 μm 也就是第三個量子井照成的頻率響應, 而較深偏壓的頻率響應是位於圖 4-1 (d) 0.440 μm 也就是 In dot-like state 照成的。

圖 4-1 (f) 是不摻氮樣品在溫度 290K 頻率範圍從 300Hz 至 2000kHz 的 CV 特性曲線。可以發現溫度升至 290K 後明顯的看到隨著頻率下降較低逆偏壓的頻率響應有漸漸飽和的趨勢, 而較高逆偏壓的頻率卻持續的拉高他的電容值。可以發現 In dot-like state 位於更高偏壓更低頻的位置。由圖 4-1(e), 以及 4-1 (f) 皆可以看到量子井以及 In dot-like state 位於不同深度的頻率響應可以發現量子井頻率響應的範圍大概是位於 30k~2000kHz 而 In dot-like state 大概是位於 300~30KHz。

為了對這二個頻率響應去做更深入的分析, 我定義了三種電容值的貢獻。 C_{total} 為 CV 曲線在最低頻(300Hz) 去減最高頻 (2000kHz), C_{qw} 是 CV 曲線中頻率 (30kHz) 去減最高頻, C_{in} 是 CV 區校最低頻去減掉中頻率。圖 4-1 (g), (h), (i) 分為是 C_{total} C_{qw} C_{in} 在溫度 280K, 310k, 350k 比較的圖。發現在隨著溫度上升至 350k, C_{qw} 逐漸有飽和的趨勢但是 C_{in} 的訊號卻持續的增強, 並且在較深的偏壓發現

C_{total} 與 C_{in} 有一個負電容 (negative capacitance) 的現象。理論上來說位於低頻的電容值應該較高的，但是卻發現較高偏壓低頻電容減去高頻電容會有負值。

為了更深入去探討這段偏壓電容值發生改變的原因，我們對不摻氮的樣品去做 CF 頻譜的量測。圖 4-1(j) 是不摻氮樣品在室溫 300K 的 CF 的變偏壓量測，我們可以明顯到看到再隨著偏壓從 0V 調變到 -3V 可以看到 CF 頻譜出現了二個平台，由 CV 判斷第一個平台應該是來自 QW 的貢獻而第二個平台則是來自於 In dot-like state 的貢獻。我們首先對第一個平台的反曲點對應不同的溫度去計算他的活化能，大約估計是 0.35 eV 跟我們從 PL 頻譜估計的量子井深度大約符合所以可以更確定第一個平台的確是來自於量子井的貢獻。

圖 4-1(k) 是 CF 在偏壓條件是 3V 對不同溫度做的圖，可以隨著溫度由 200K 上升至 400K 在第二的平台較低頻的位置有一個劇烈的 NC 的現象，與之前 CV 圖觀測到的負電容有一樣的趨勢皆是在較低頻的時候會發生負電容以及較低偏壓會發生一個負電容的現象。

在這裡為了繼續分析負電容的現象我們先簡介一些負電容的原理。我們在做電容值量測的時候，可以知道電容的公式 $C(\omega) = C_0 + \frac{1}{\omega \Delta V} \int_0^{\infty} \left[-\frac{d\delta(t)}{dt} \right] \sin \omega t dt$

C_0 : 幾何電容 (Geometry capacitance), $C_0 = \epsilon \frac{A}{L}$ $\delta(t)$: 鬆弛電流 (relaxation component)。

圖 4-1(l) 是上式考慮到半導體實際的情形，一般我們鬆弛電流初始會是一個定值然後慢慢呈指數的衰減到零值。將其負微分後與一交流訊號相乘可以獲得 AC 訊號貢獻的電容值。這時候在前半周期會得到一個正電容的貢獻，但當有一個反方向

的鬆弛電流的話，就會在前半周期有一個負電容的貢獻，這樣在前半周期就會可能會將整個電容值拉到負值。

我們由上面的推導可以知道負電容是來自於一個不同方向電流的貢獻，對於交流電流量測電容值，一般照成貢獻的都是來自於電子的放射以及電洞的捕捉。我們發現在-3V 偏壓附近可以觀測到明顯的負電容的現象，所以為了對於這個不同電流方向的貢獻去做討論，我們對不摻氮的樣品去做-3V 附近的 DLTS 分析。

我們這邊對樣品去打一個 emission 的脈衝，也就是在空乏區大的時候去量測載子跳出缺陷的訊號。圖 4-1 (m)、(n)、(o)、(p)、(q) 分為是-2.5/-2、-3/-2.5、-3.5/-3、-4/-3.5、-4.5/-4 可以發現隨著偏壓打深有一明顯的向上的尖峰出現。通常我們打 emission 的 pulse 應該不會量到向上的尖峰，向上的尖峰通常來自於少數載子的放射。

我們對向上的尖峰去做阿瑞尼斯圖的分析可以發現活化能大約是 0.25eV，也就是在該偏壓中有來自於少數載子的放射，在此時我們藉由 CV 圖判斷費米能階可能是位於量子井的附近，所以在該偏壓費米能階不太可能會掃到少數載子的來源，所以我們必須去尋求其他少數載子放射的途徑。

首先我們先從 DLTS emission 的機制開始討論起，一般 DLTS 在量測 emission 時候會先灌入載子也就是加一個較正的偏壓，縮小他的空乏區，之後在較負的偏壓，空乏區大時量測載子跳出的現象，此時空乏區逐漸縮小會形成一個一般我們容易觀測到的多數載子的尖峰。

當我們加偏壓時，此時過量的電荷會使得費米能階要分成二個 quasi-fermi level 討論如圖 4-1(r)，通常我們只考慮多數載子的費米能階 E_{fn} 然後少數載子的費米能階 E_{fp} 視為與金屬的能階 E_{fm} 同樣的位置。但是要是此時在 mid-bandgap 以下有一個很濃的電

洞缺陷，此時 E_{fp} 就有機率掃到位於 mid-bandgap 以下的能階，使的在缺陷裡的少數載子電洞往能帶移動，此時原本的縮小的空乏區會開始擴大，使的 DLTS 圖形會出現一個向上的尖峰。

由我們剛剛有提到跳躍出結構的電子可以視為一個電流的來源使的電容值有額外的貢獻。而我們在-3V 的 CV 也可以量到一個負電容的現象，此時可以推測這個劇烈的負電容的現象可能就是來自於一個濃度很濃的電洞缺陷照成的。

回顧不摻氮樣品以及摻氮樣品在 PL 皆可以在 1.24 eV 觀察到一個尖峰，那時候利用變功率可以知道他是來自於 GaAs 底下的一個缺陷，而我們在 DLTS 也可以量到一個大約是 0.25eV 的活化能剛好可以對應起來。

但是就我們的量測結果去分析，這個模型可能會有些不符合的地方，所以我們將 model 稍微修正成如圖 4-1(s)。此時也會有機率掃到少數載子電洞的跳出行為。同時這個 model 也可以解釋為什麼加大逆偏壓才會機率會掃到 hole trap 的位置。

4-2 摻氮與不摻氮樣品的比較

接下來我們對於不摻氮以及摻氮的樣品去做比較，圖 4.2(a)是不摻氮的樣品在室溫 300K 的變頻 CV 圖，圖 4.2 (b)是摻氮樣品在室溫 300K 的變頻 CV 圖。可以發現在室溫 300K 的時候，不摻氮位於正偏壓的頻率響應已經由一個明顯的尖峰褪變成平台，而摻了氮的量子井卻仍然有一個很明顯的尖峰，可以明顯的由這二個圖看出，摻了氮的量子載子的侷限能力明顯的變好很多。這與量測到的 PL 也可以對應起來，而我們取第一個 QW 已經第三個 QW 對應到的偏壓，去做比較，發現相同的深度，摻氮的量子井對到的偏壓範圍明顯的變低很多，可以發現摻氮量子井侷限的載子使的摻雜濃度有一個明顯的下降的現象

接下來我們對 CF 圖去做比較，圖 4-2(c)是 300K 不摻氮樣品 CF 變偏壓頻譜，可以發現將偏壓加至 3V 左右開始有負電容。圖 4-2(d)是摻氮樣品在 340K 的 CF 變偏壓頻譜，我們發現在 1.8V 開始有負電容。摻氮的樣品在升高溫度至 340K 才開始會有負電容的現象，而是否這也意味著摻了氮之後 hole emission 的現象也會在比較高溫的產生。

為了探討這個現象我們對摻氮樣品去做 DLTS 的 emission 分析，圖 4-2(e)、(f)、(g)，分別是對摻氮樣品在 2/1.5、2.5/2、3/2.5 的 DLTS 頻譜，可以發現隨著偏壓越打越負偏會有一個明顯得向上的尖峰。我們對此向上的尖峰去做活化能的分析可以大約估計活化能大概是 0.3eV 左右，大致上也可以跟摻氮的 PL 1000nm 的 hole trap 對起來。

圖 4-2 (h)是對不同偏壓畫的阿瑞尼士圖，我們可以看到摻氮與不摻氮的樣品皆隨便著偏壓打深，有一個很明顯向低溫移動的趨勢。一般在考慮一個 localize state 所照成的電子電洞的跳動應該不會往更深或是更淺移動，所以這時候在接近表面的

電洞有可能藉由穿隧的方是跳到金屬，加大偏壓時在介面的電場變大使得穿隧的效應變得更劇烈使的 hole emission 的行為在更低溫的時候才會產生。摻氮的樣品同樣也有隨著偏壓加大，hole emission 的現象產生在較低的地方。我們也可以發現摻的氮之後，hole emission 的現象也會在比較高溫的時候發生，我們從 CV 圖上可觀察到，摻了氮之後會使的摻雜濃度降低，這時候相較於不摻氮的樣品他在表面受到電場的影響也會降低，使得穿隧的機率會變低，此時就會使他在比較高溫的時候才會出現 hole emission 的現象。



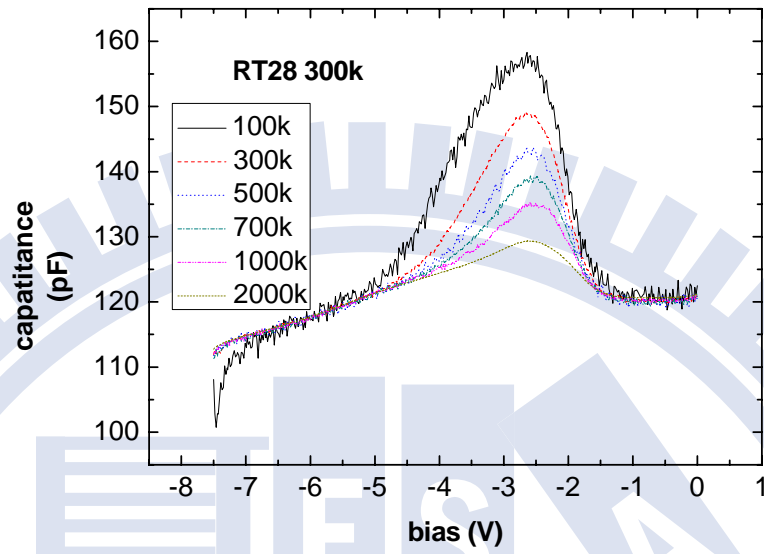


圖 4-1 (a)不摻氮樣品在室溫 300K 的 CV 變頻圖形

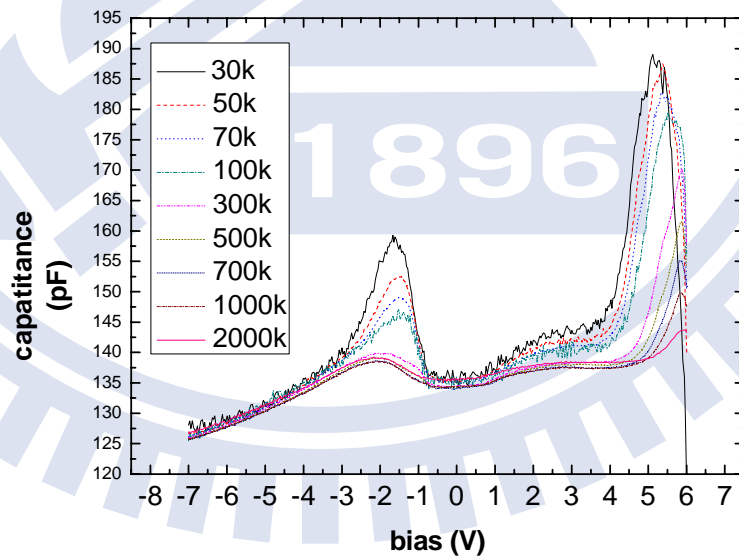


圖 4-1 (b)不摻氮樣品在室溫 300K 的 CV 變頻圖形

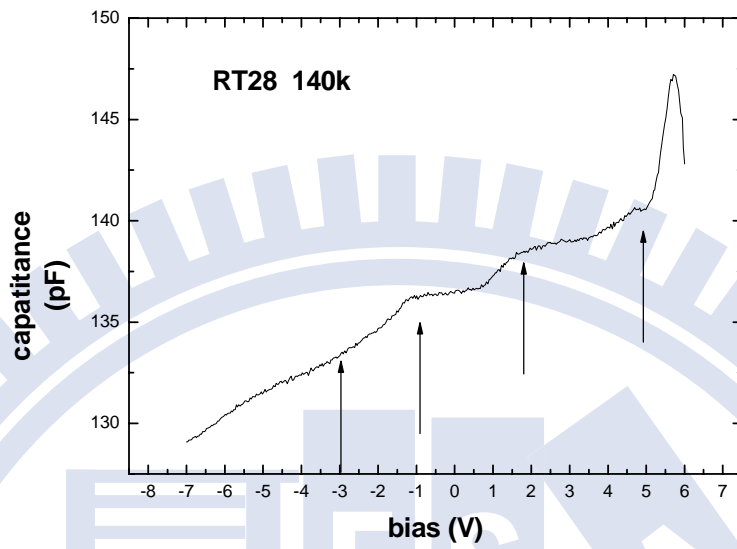


圖 4-1(c)不摻氮樣品在溫度 140K 頻率 300k 的 CV 圖形

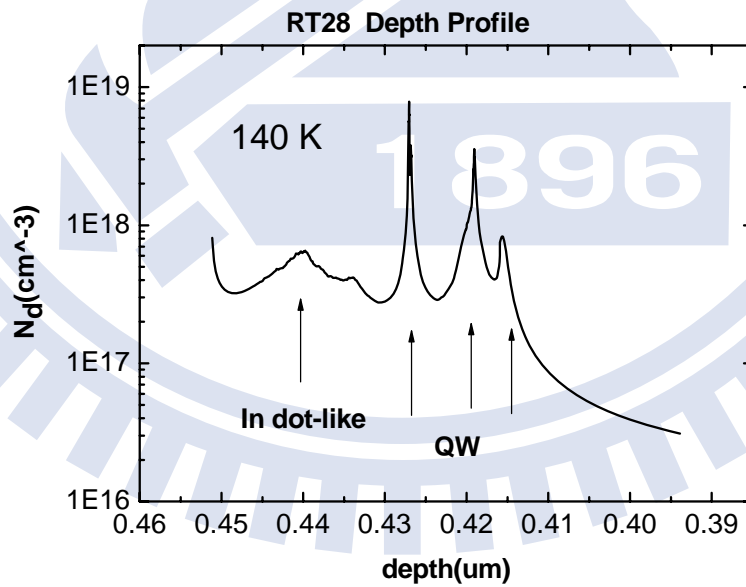


圖 4-1(d)不摻氮樣品在溫度 140K 頻率 300k 的轉縱深圖形

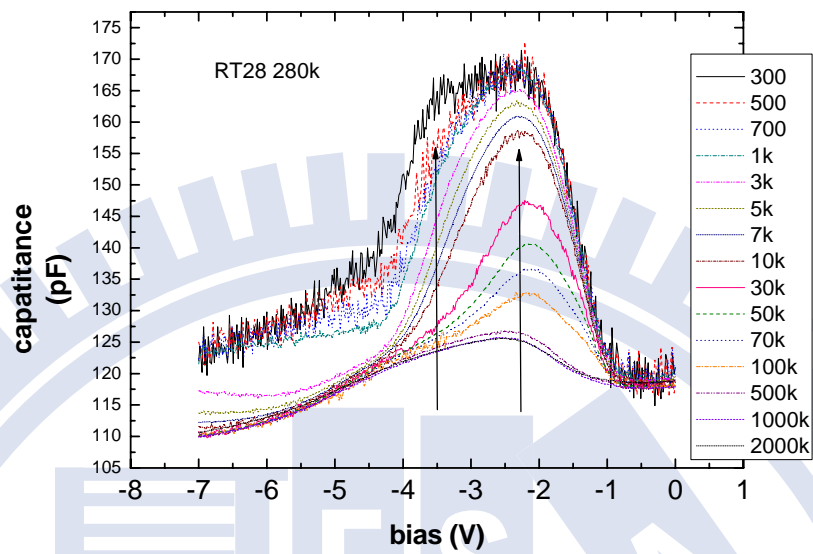


圖 4-1(e)不摻氮樣品在溫度 280K 的變頻 CV 圖形

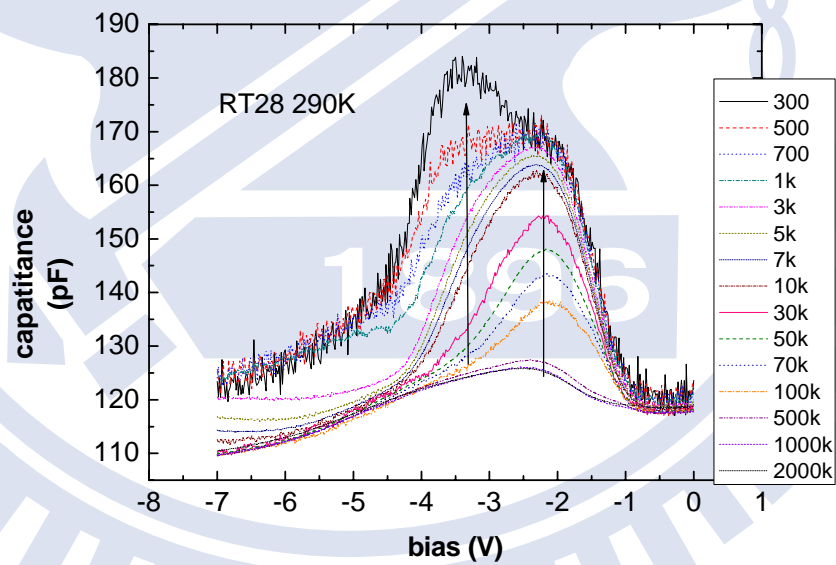


圖 4-1(f)不摻氮樣品在溫度 290K 的變頻 CV 圖形

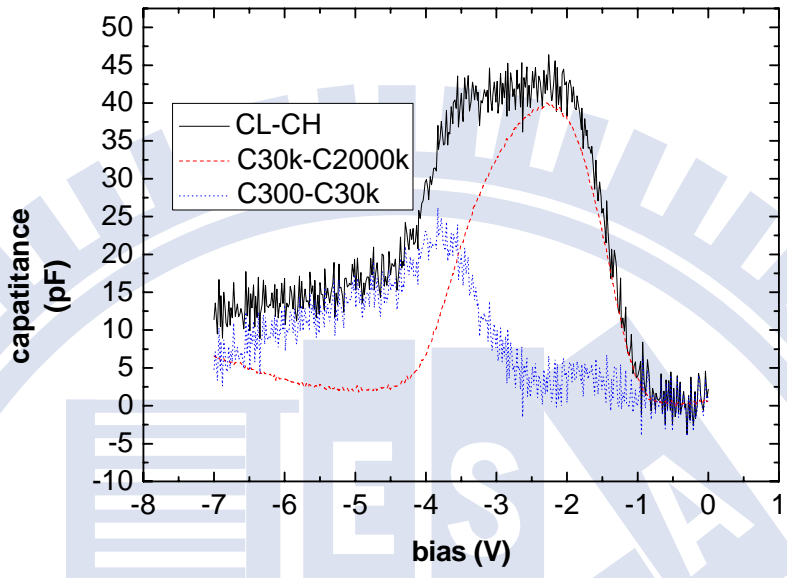


圖 4-1(g)不摻氮樣品在 280K 高低中頻的分析

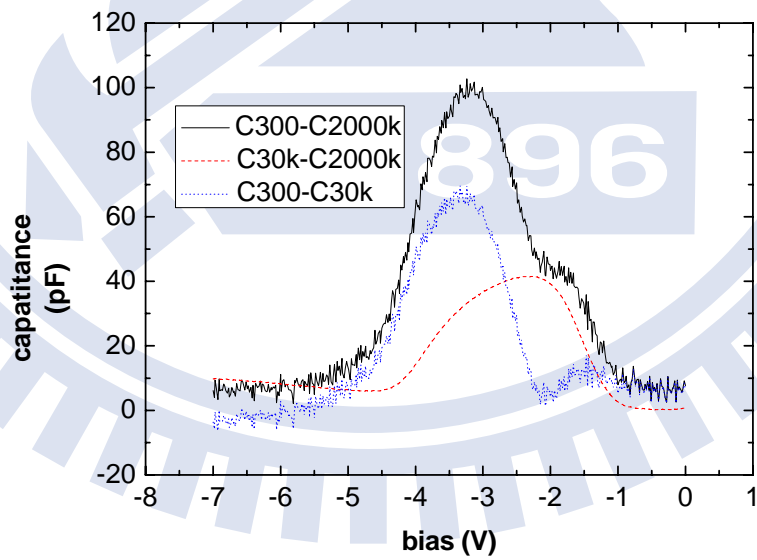


圖 4-1(h)不摻氮樣品在 310K 高低中頻的分析

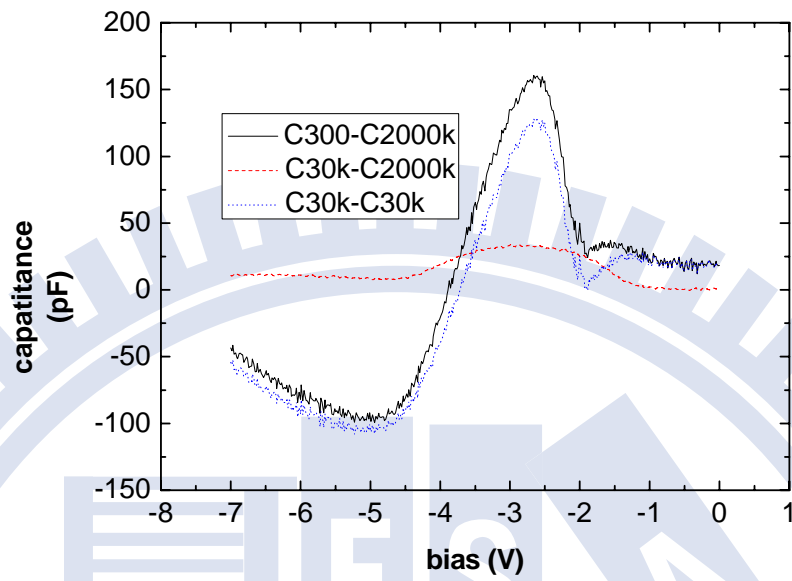


圖 4-1(i)不摻氮樣品在 350K 高低中頻的分析

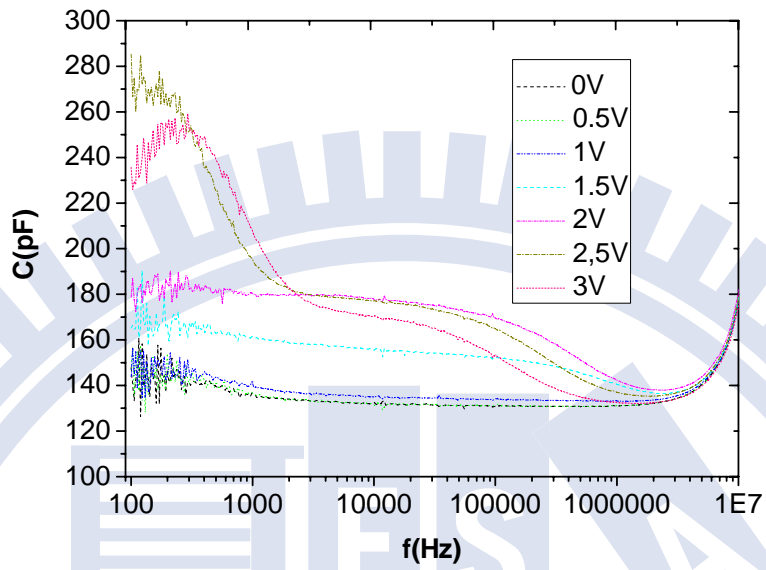


圖 4-1(j)不摻氮樣品在室溫 300K 的變偏壓 CF 圖形

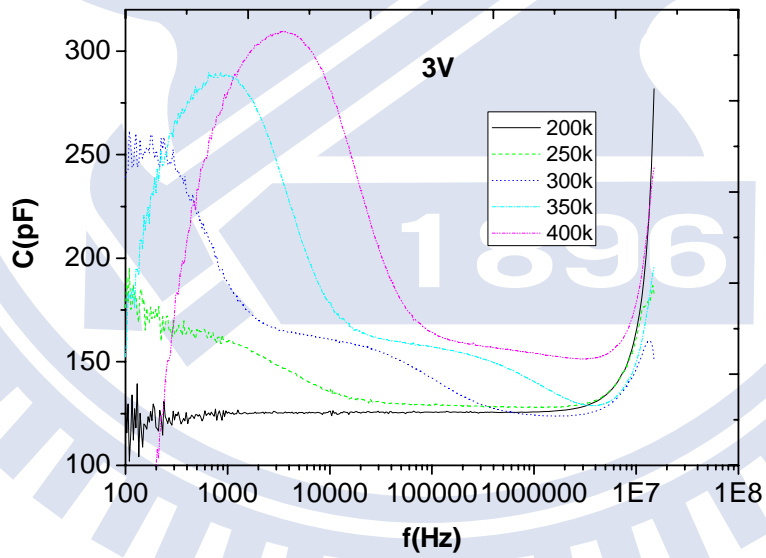
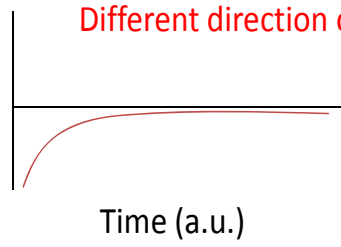
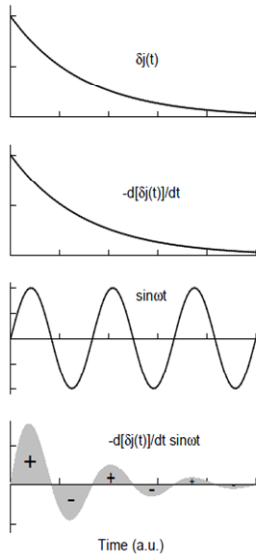


圖 4-1(k)不摻氮樣品在 3V 的變溫 CF 圖形

NC(Negative capacitance)



$$C(\omega) = C_0 + \frac{1}{\omega \Delta V} \int_0^{\infty} \left[-\frac{d\delta j(t)}{dt} \right] \sin \omega t dt.$$

$\delta j(t)$ Relaxation component (cause by electron transport, Trapping, impact ionization)

$C - \epsilon \frac{A}{L}$ Geometry capacitance

圖 4-1(1)負電容原理

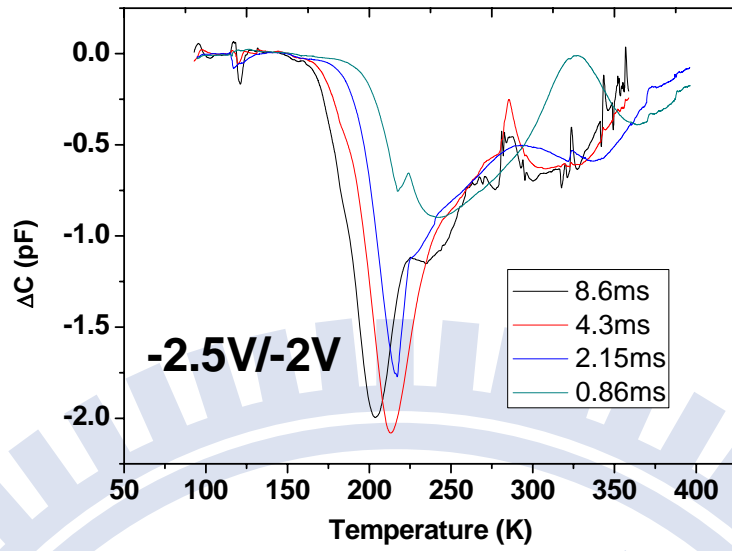


圖 4-1(m) 不摻氮樣品在 -2.5V/-2V 的 DLTS 圖形

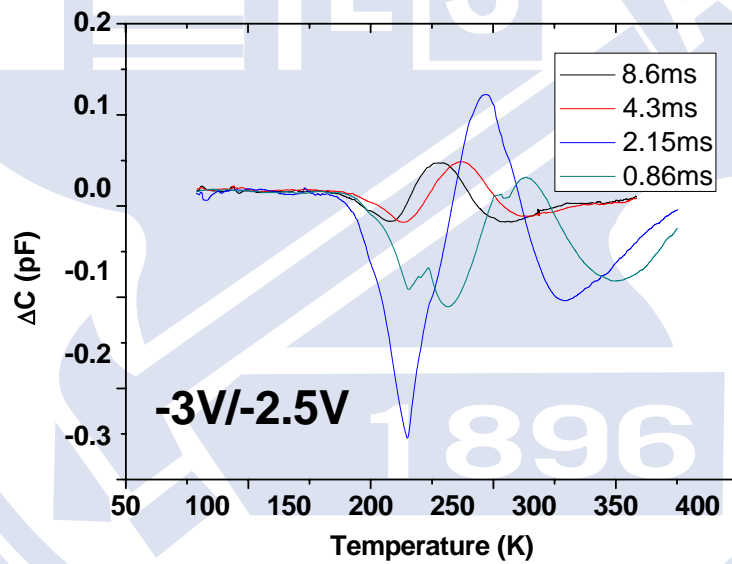


圖 4-1(n) 不摻氮樣品在 -3V/-2.5V 的 DLTS 圖形

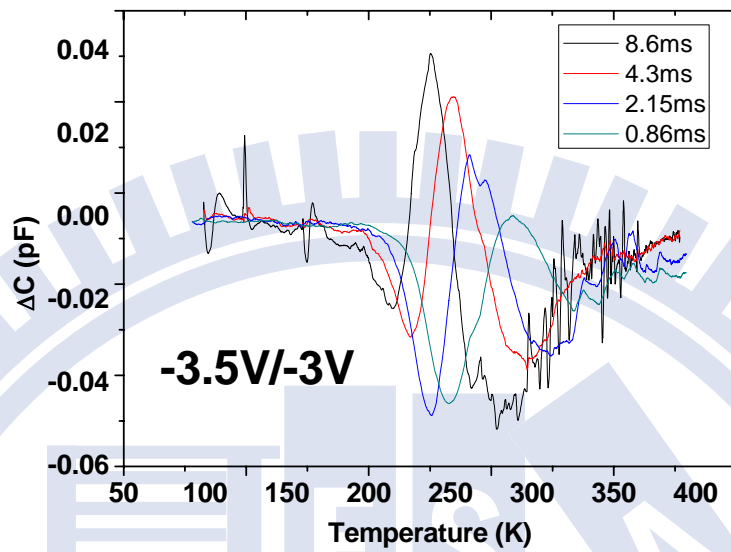


圖 4-1(o)不摻氮樣品在-3.5V/-3V 的 DLTS 圖形

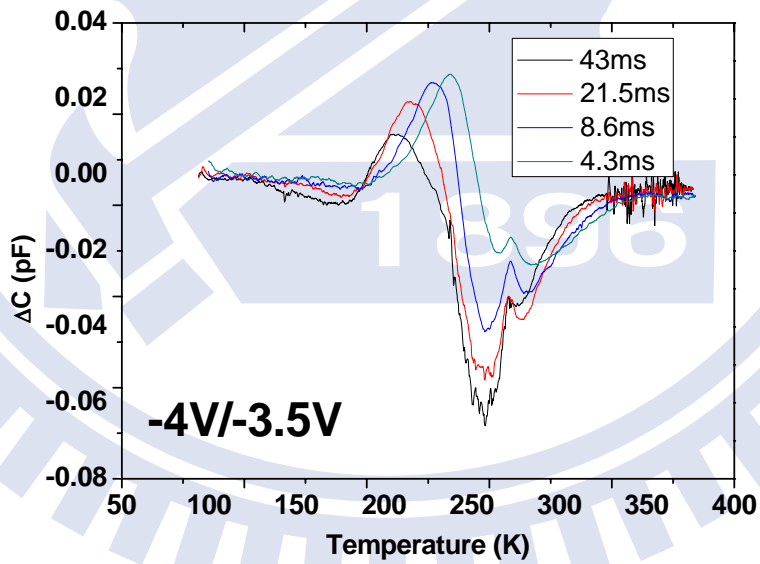


圖 4-1(p)不摻氮樣品在-4V/-3.5V 的 DLTS 圖形

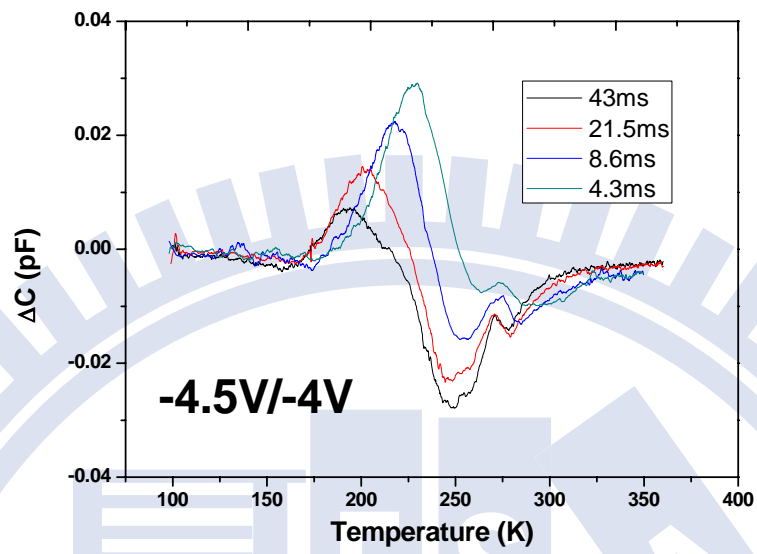


圖 4-1(q) 不摻氮樣品在 -4.5V/-4V 的 DLTS 圖形

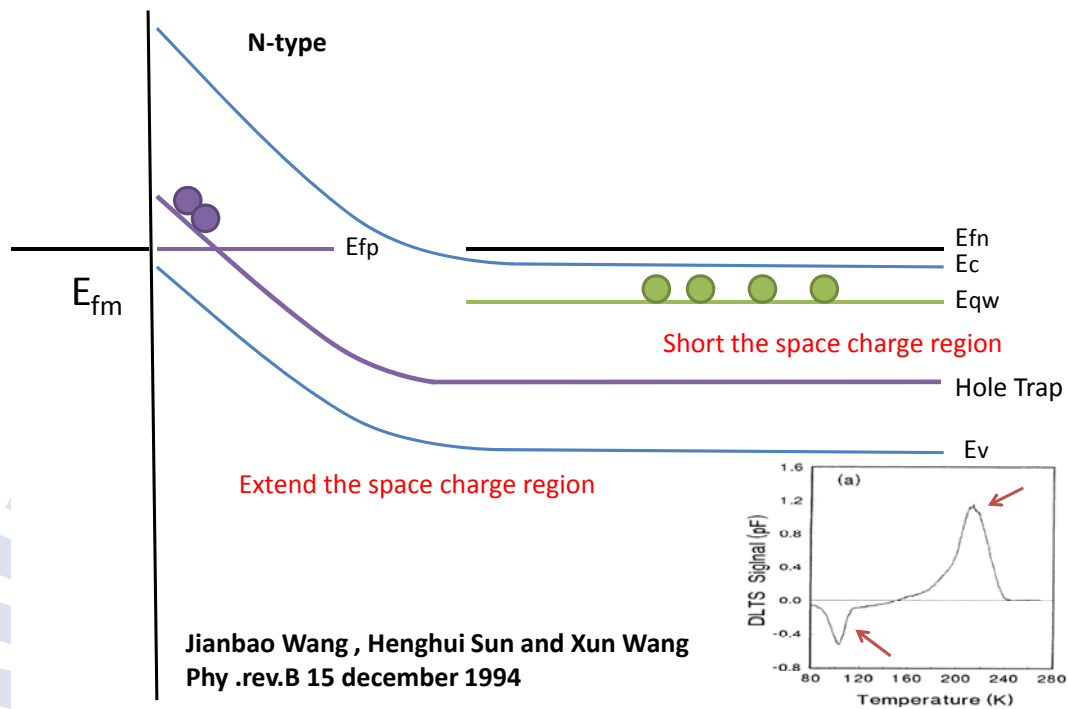


圖 4-1(r)少數載子放射的示意圖

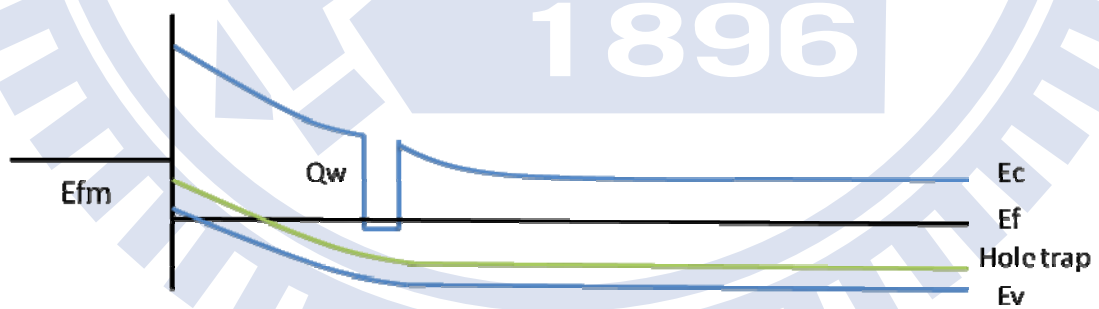


圖 4-1(s)少數載子放射的示意圖

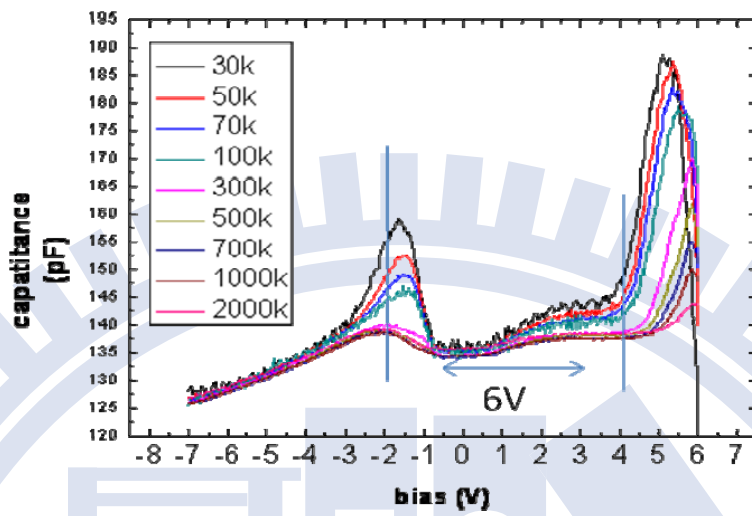


圖 4-2(a)不摻氮樣品在室溫的 CV 變頻率圖形

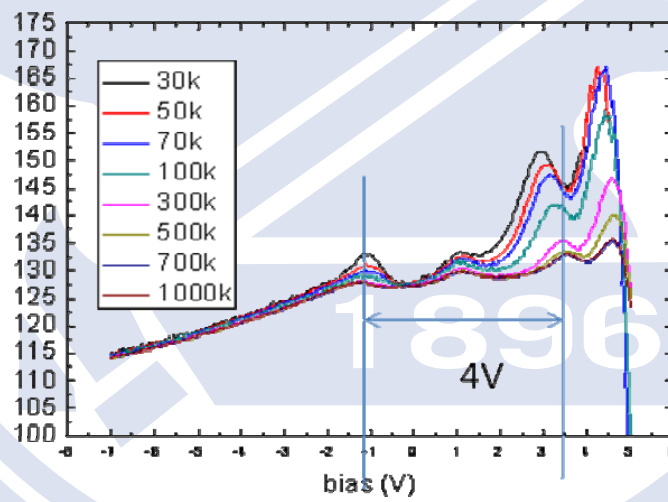


圖 4-2(b)不摻氮樣品在室溫的 CV 變頻率圖形

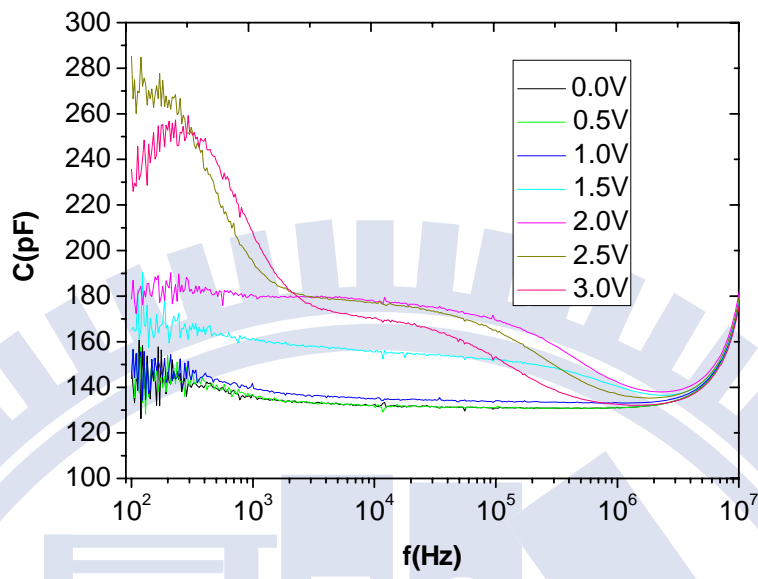


圖 4-2(c) 不摻氮樣品在室溫 300K 的變偏壓 CF

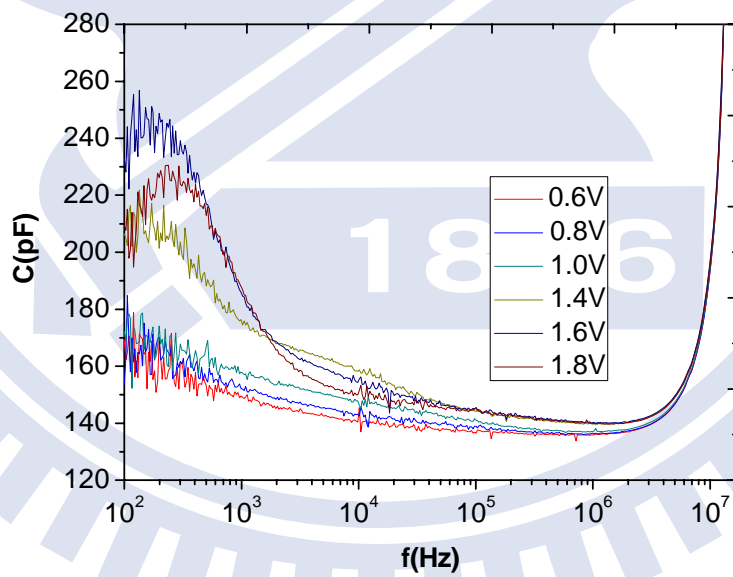


圖 4-2(d) 摻氮樣品在 340K 的變偏壓 CF

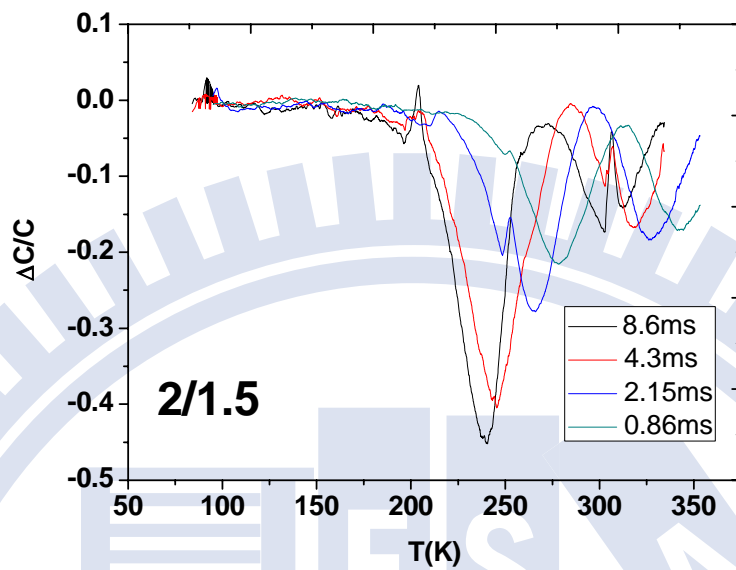


圖 4-2(e) 摻氮樣品在 -2/-1.5 DLTS 的圖形

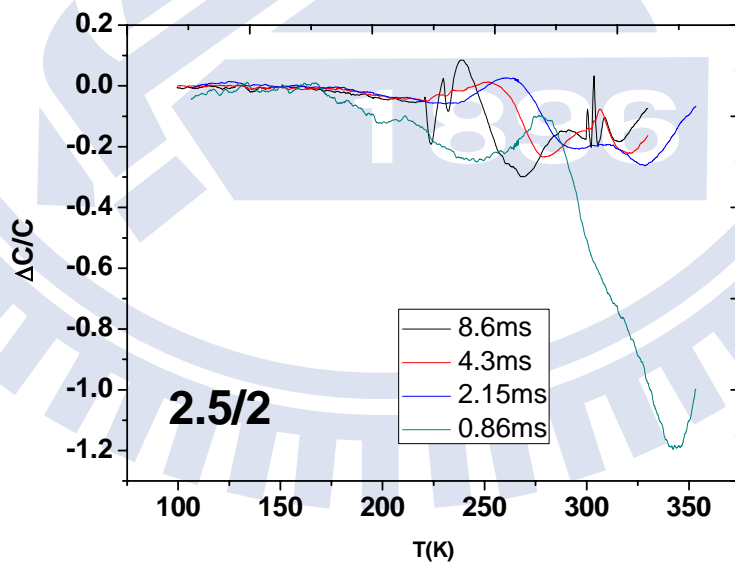


圖 4-2(f) 摻氮樣品在 -2.5/-2 DLTS 的圖形

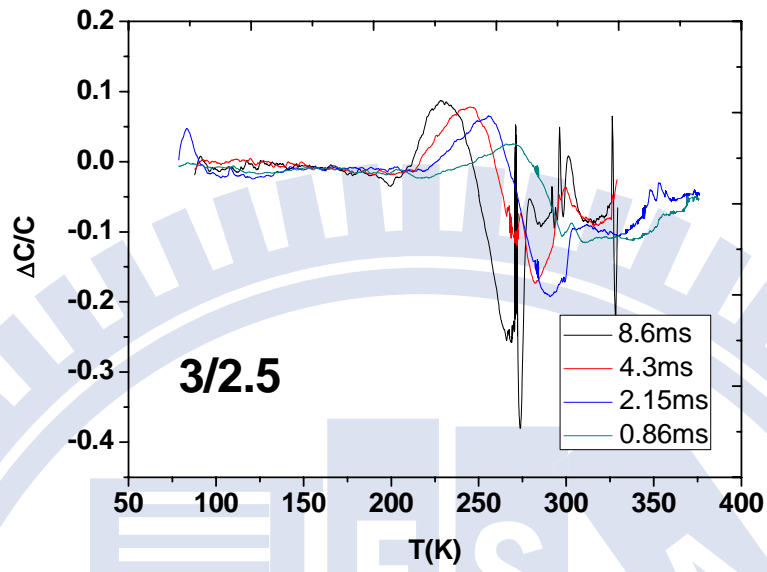


圖 4-2(g) 摻氮樣品在 -3/-2.5 DLTS 的圖形

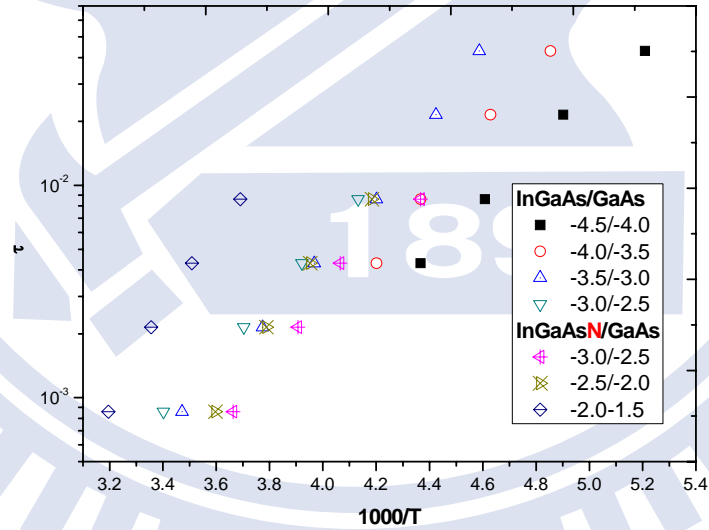


圖 4-2(h) 摻氮及不摻氮樣品 hole emission 的阿瑞尼士圖

第五章 總結

我們經常利用摻入氮來拉長量子結構的發光波長，但是常常因為摻入了氮使的量子結構的發光特性變差。在本論文，發現適量的氮摻入 InGaAs 的系統可以有效的將發光波長拉長並且使的發光強度明顯的增加。並且隨著溫度升高，摻氮的樣品都有比較好的載子侷限能力。

在本論文中無論摻氮以及不摻氮的樣品都有一個 NC 以及明顯的 NDC 的現象，使的當樣品量測環境溫度升高後會影響到量測。多層量子井的樣品的 NDC 現象比較起其他樣品更明顯，一個好的量子侷限也會使的背景濃度下降，進而影響到 NC 的效應。在之前的研究，我們常常把 NC 的效應當作是儀器量測的問題，但是由本論文可以明顯的看出 NC 的來源是一個來自中隙以下的電洞缺陷，一個少數子子的放射貢獻了一個逆向的電流。

在光性跟電性上，我們都可以明顯的發現摻氮後對於多層量子井的影響，總結以上的量測結果可以發現好的量子侷限也會影響到少數載子的放射現象。

參考文獻

1. 陳宜屏, 交通大學電子物理研究所, “氮含量與砷化銦厚度對砷化銦/砷化鎵量子點光性影響”, 2001.
2. C. K. Kim and Y. H. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, pp. 3038–3040, 2001.
3. M. O. Fischer, M. Reinhardt, and A. Forchel, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 7, pp. 149–151, 2001.
4. Y. Arakawa and K. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, pp. 939–941, 1982.
5. D. L. Huffaker and D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, pp. 520–522, 1998.
6. H. Drexler, D. Leonard, W. Hansen, J. P. Kotthaus, and P. M. Petroff, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 73, pp. 2252–2255, 1994.
7. G. Lin and C. P. Lee, *Opt. Quantum Electron.*, vol. 34, pp. 1191–1200, 2002.
8. M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, and Y. Yazawa, in *Proc. 1995 Solid State Device and Mater.*, Osaka Japan, 1995, pp. 1016–1018.
9. V. A. Odnoblyudov, A. Yu. Egorov, N. V. Kryzhanovskaya, A. G. Gladyshev, V. V. Mamutin, A. F. Tsatsul, and V. M. Ustinov, *Technical Physics Letters*, vol. 28, pp. 964–966, 2002.
10. Gh. Dumitras and H. Riechert, *J. Appl. Phys.*, vol. 94, pp. 3955–3959, 2003.
11. H. P. Xin, K. L. Kavanagh, Z. Q. Zhu, and C. W. Tu, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, pp. 2337, 1999.
12. X. Yang, J. B. Heroux, L. F. Mei, and W. I. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, pp. 2525, 2001.
13. J. Miguel-Sanchez, A. Guzman, J. M. Uloa, A. Hiero, and E. Euno, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, pp. 2524–2526, 2004.

14. A. J. Chiquito,* Yu. A. Pusep, S. Mergulhaõ, and J. C. Galzerani , *Phy.Rev.B.* 61, 8 ,1999
15. V V Ilchenko, V V Marin, S D Lin, K Y Panarinı, A A Buyaninı and O V Tretyak J. *Phys. D: Appl. Phys.* 41 (2008) 235107 43
16. Feng Lie-fen, Wang Jun, Zhu chuan-yun, Cong Hong-xia, Chen Young and Wang Cun-da, *Optoelectronics let.*, 2, 15, 2005
17. H.C.Liu, L.Li, M.Buchanan, and Z.R. Wasilewski, *Appl.Phys.Lett.* 70(14), 1997
18. H.C.Liu , L.Li, M.Buchanan *IEEE Transactions on Electron Devices*, cond-mat/9806154v1, 1998 *Devices*, cond-mat/9806154v1, 1998
19. R.J.Kaplar and S.S.Ringel, *Appl.Phys.Lett.*, 80, 25, 2002
20. K Zdansky, V Gorody, J Kosikova, A Rudram, E Kapon and Fekete, *semiconductor science and technology*, 19, 897-901, 2004
21. Jianbao Wang , Henghui Sun and Xun Wang *Phy .rev.B*, 50, 24, 1994

