

國立交通大學

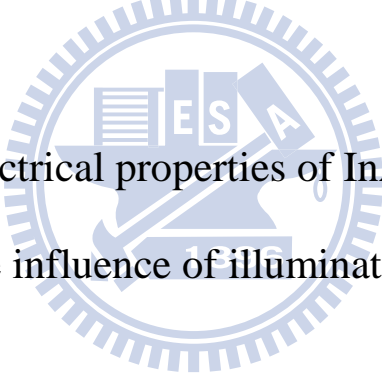
電子物理學系

碩士論文

EL2 缺陷對於 InAs/GaAs 量子點的電子放射

特性分析：照光的影響

Role of EL2 on the electrical properties of InAs/GaAs quantum dots:
the influence of illumination



研究生：紀亞青

指導教授：陳振芳 博士

中華民國一百零一年七月

EL2 缺陷對於 InAs/GaAs 量子點的電子放射

特性分析：照光的影響

Role of EL2 on the electrical properties of InAs/GaAs quantum dots:
the influence of illumination

研究生：紀亞青

Student : Ya-Ching Chi

指導教授：陳振芳 博士

Advisor : Dr. Jenn-Fang Chen



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 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年七月

EL2 缺陷對於 InAs/GaAs 量子點的電子放射

特性分析：照光的影響

研究生：紀亞青

指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學電子物理學系

摘 要

本論文主要探討含有 EL2 缺陷能階之分子束磊晶成長厚度 2.2 ML InAs/GaAs 單一量子點，藉由有無照射光源下瞭解 EL2 缺陷對於其電子放射特性的影響。首先，利用電容電壓(C-V)、深層能階暫態頻譜(DLTS)和光激發螢光頻譜(PL)分析探討其基本光電特性，並藉由 C-V 與暫態電容頻譜(C-t)分析中觀察到缺陷訊號的電容值貢獻。此缺陷訊號受熱激發主導，在高溫時電子躍遷速率變快，使直流偏壓掃過時能貢獻於電容值。進一步以 DLTS 量測確認此為低溫成長 GaAs 時易形成的 EL2 缺陷，接著針對 DLTS 分析之缺陷訊號，估算出局部侷限能階缺陷濃度，其濃度值相當高接近於長晶時摻雜之背景濃度。再來，藉由照光能量 0.8 eV 激發 EL2 缺陷能階，觀察到大量電容值抬升，並引入光強度及光激發之捕捉截面積，說明照光對於缺陷能階及量子點態的影響，其與電子躍遷速率成正比。另外，也從載子濃度分佈中觀察出量子點態受照光影響，電子佔據機率改變的現象。除此之外，從照光的 DLTS 量測中可直接觀察到載子速率變快的情形。最後，利用照光光源能量的不同(0.7 eV ~ 1.56 eV)，藉此了解光電容、光電流和輻射復合三者的關係，並加入 rate equation 作進一步描述。

Role of EL2 on the electrical properties of InAs/GaAs quantum dots: the influence of illumination

Student: Ya-Ching Chi

Advisor: Dr. Jenn-Fang Chen

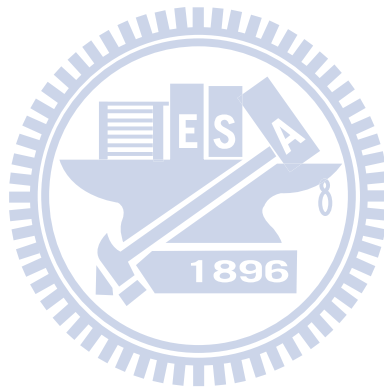
Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

Abstract

The electron emission properties of the EL2 defect state with (without) illumination in 2.2-ML(monolayer) InAs self-assembled quantum dots (QDs) containing an EL2 defect state is presented. Initially, the defect state is observed at the temperature dependence capacitance-voltage (C-V) profiling, leading to the faster electron emission rate with temperature increasing. The source of the EL2 defect state is studied by deep-level transient spectroscopy (DLTS) measurements. Moreover, we calculate the concentration of the EL2 defect state, which is compared with the doping background concentration of top GaAs layer.

Under an energy illumination of 0.8 eV, the large capacitance produces, suggesting the electron emission rate of the EL2 defect state increasing. An expression of electron emission rate is dependent with the intensity of the excited light source and optical cross section. Furthermore, the electron occupancy probability is changed upon illumination. The DLTS measurement under illumination also shows the electron emission rate increasing. Finally, the electron-hole pairs produce in the QDs and defect states under illumination energy of 0.7-1.56 eV can explain the relationship between photocapacitance,

photocurrent, and carrier radiative recombination. Furthermore, a simple rate equation can describe this phenomenon.



致謝

兩年，我畢業了。這一路的求學歷程及人生的逗點，非常感謝相伴的家人朋友，無可言喻的感動，以這篇感謝回饋給你們。

我的指導老師 陳振芳老師，感謝您這兩年的引領指導，給予在研究中最大的支持與溝通，每每的討論中總是在重要的關頭指點我們所遇到的困難，從老師身上學習到對於研究無比的熱誠及堅持，了解對於研究應有的態度及專精。大學期間的專題老師 余昌峰老師，對於在懵懂迷惘的未來時，非常慶幸自己能進入 308 Lab，在開心的實作與討論的氛圍中，解開我對於無知未來的結。感謝 廖文毅老師帶領我進入物理科學，很懷念大家一起同聚在討論間，天南地北的談論自己的想法。

最重要的兩年回憶，博班學長們與我的好同學。感謝政鴻學長永遠都不嫌我煩，在每次的研究討論中都很有耐心，換了無數種講解方式讓我理解。孟謙學長的刀子嘴豆腐心，相信大家都能感受到此對於實驗室大小事的關心是我們好。感謝家峰學長在繁瑣的實驗事務中如此辛勞。感謝振豪學長在我們碩一時給予我們生活與研究上的關懷。俞授學長、建至學長所提供的實驗寶貴建議，對於研究上很受用。學長姐妍君、紀瑩、茂益、彥寧，感謝你們在我進入實驗室時大小事的叮嚀與關心。我的好同學，國豪、俊泓，謝謝國豪這兩年的陪伴和每次的鬥嘴，謝謝俊泓的貼心與逗人開心的笑話。陪伴我六年的珮晴、蓉霏，最懷念我們碩一住一起煮東西的時光。學弟們哲倫、家偉、敬恩，感謝你們處理實驗室的事務，祝福你們研究順心。

這一路的求學歷程，最辛苦的是我的家人，感謝爸爸媽媽的包容及無條件的支持。從小到大的陪伴與鼓勵，非常非常的感恩。終於，我畢業了，可以暫時放下一點點擔心。謝謝您們！

亞青 於新竹交大

2012.08.06

目錄

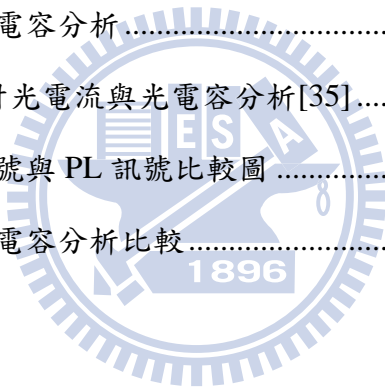
中文摘要	I
英文摘要	II
致謝	IV
目錄	V
圖目錄	VII
表目錄	IX
第 1 章 緒論	1
1-1 量子點材料簡介	1
1-2 研究動機	2
1-3 論文架構	3
第 2 章 實驗樣品製備與量測系統簡介	4
2-1 InAs/GaAs 量子點磊晶樣品之製備	4
2-2 蕭基界面及歐姆界面之電極製作	4
2-3 量測系統簡介	6
2-3-1 光激發螢光量測系統 (Photoluminescence, PL)	6
2-3-2 電容電壓量測 (Capacitance – voltage measurement, C-V)	7
2-3-3 電流電壓量測 (Current – voltage measurement, I-V)	8
2-3-4 暫態電容量測 (Transient measurement, C-t).....	8
2-3-5 深層能階暫態頻譜量測(Dep level transient spectroscopy, DLTS).....	9
2-3-6 光激發電性量測系統.....	10
第 3 章 InAs/ GaAs 量子點的光電特性	13
3-1 InAs/GaAs 量子點光性分析	13
3-2 確立 EL2 缺陷存在於 InAs/GaAs 量子點中	13
3-2-1 C-V 分析	13

3-2-2 變溫 C-V 分析	14
3-2-3 C-t 分析	16
3-2-4 DLTS 分析	16
3-3 缺陷濃度與缺陷存在位置估計	17
3-3-1 缺陷濃度估計	17
3-3-2 缺陷存在位置估計	19
第 4 章 EL2 缺陷能階受照光之影響	30
4-1 照射光源對於 EL2 缺陷之影響	30
4-2 照射光源對於量子點之影響	33
4-2-1 量子點佔據機率改變	33
4-2-2 空乏區位置誤判	34
4-3 照射光源下之變溫 C-V 分析	35
第 5 章 光激發電性量測	47
5-1 光激發電性量測原理	47
5-2 Photocurrent 分析	48
5-3 Photocapacitance 分析	49
第 6 章 結論	58
參考文獻	60

圖目錄

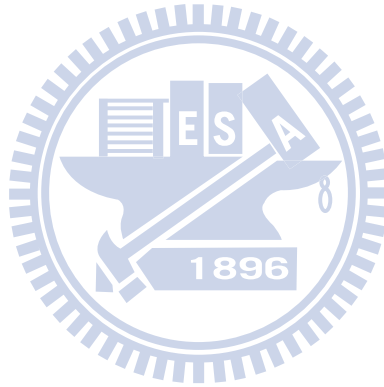
圖 2-1	樣品結構及所對應之能帶圖	11
圖 2-2	光激發螢光量測系統(PL).....	12
圖 2-3	光激發量測架構.....	12
圖 3-1	InAs 量子點隨溫度變化關係之 PL 光譜圖	20
圖 3-2	各溫度下變頻率 C-V 圖	21
圖 3-3	定量測頻率 200 kHz 之變溫 C-V 圖	22
圖 3-4	定量測頻率 200 kHz 之變溫縱深分佈圖	22
圖 3-5	缺陷訊號受直流偏壓影響載子躍遷的能帶圖	23
圖 3-6	量測 C-t 分析之外加偏壓與時間關係示意圖.....	24
圖 3-7	溫度 300K 之量測頻率 1 MHz C-t 圖.....	24
圖 3-8	各偏壓下載子放射之 DLTS 量測	25
圖 3-9	各偏壓下之阿瑞尼士圖	26
圖 3-10	缺陷活化能與 PL 發光能量位置之能帶圖	27
圖 3-11	DLTS 觀點之缺陷濃度估計示意圖	27
圖 3-12	C-V 觀點之缺陷濃度估計示意圖	28
圖 3-13	缺陷濃度與缺陷位置估計關係圖	29
圖 4-1	改變照光功率下之 C-V 變溫圖	37
圖 4-2	77 K 下變光源功率之 C-V 關係圖	37
圖 4-3	照光 C-V 量測類似於 DLTS 量測之能帶示意圖	38
圖 4-4	EL2 缺陷能階載子躍遷示意圖	39
圖 4-5	受照光影響之阿瑞尼士圖示意圖	39
圖 4-6	照光 DLTS 量測	40
圖 4-7	N_t^+ 與時間變化量之關係圖	41
圖 4-8	各光源功率下 N_t^+/N_d 之數據	41

圖 4-9	載子受照光之影響躍遷示意圖	42
圖 4-10	77 K 下變光源功率之縱深分佈圖	42
圖 4-11	量子點能態訊號受照光影響其電子佔據機率改變之示意圖	43
圖 4-12	量子點能階載子躍遷示意圖	43
圖 4-13	加入 dQ_{GaAs} 之能帶示意圖	44
圖 4-14	照射光源下之變溫 C-V 圖	45
圖 4-15	照射光源下之變溫縱深分佈圖	46
圖 4-16	濃度訊號積分與溫度之關係圖	46
圖 5-1	光激發電性量測原理	50
圖 5-2	變溫之光電流分析	52
圖 5-3	變溫之光電容分析	55
圖 5-4	GaAs 塊材光電流與光電容分析[35]	56
圖 5-5	光電容訊號與 PL 訊號比較圖	56
圖 5-6	變溫之光電容分析比較	57



表目錄

表 3-1	各偏壓下之缺陷的活化能以及捕獲截面積	26
表 3-2	缺陷存在位置(L_{trap})估計	29



第1章 緒論

1-1 量子點材料簡介

量子點(quantum dot)是所謂的「零維」結構，因內部電子在三維方向的位能均被束縛住，所以擁有顯著的量子侷限效應(quantum confinement effect)，此侷限效應造成能量的量子化，因此顯示出一個類似原子，具有電子能階不連續的特性。基於量子點能帶結構上的特殊性與在半導體技術方面的貢獻，吸引許多團隊對於其在理論及實驗上的研究興趣，例如以 In(Ga)As 為量子點材料，延長量子點的放射波長至 1.3 μm 甚至到 1.55 μm ，對於在光纖通訊上以及量子點雷射的發展有很重要的貢獻 [1-3]。另外，在面對現今作資訊儲存時，要求的存取位元量越來越大而封裝的元件體積則日益縮小，所以量子點資訊儲存的相關研究變成為提供元件開發重要的一環 [4,5]。此外，其他像是量子運算[6,7]、紅外光偵測器[8]等也是量子點重要的應用方向。

成長量子點的材料，以 II-VI 和 III-V 族半導體為主，例如:In(Ga)As、InP、GaN、CdSe[9-13]...等，不同材料所成長的量子點特性差異很大。此外，磊晶厚度、成長溫度、材料間元素的比例等磊晶條件不同，也會造成量子點大小、形狀、密度和光電特性的差異。目前量子點的長晶方式多是利用應力誘發的原理，主要以分子束磊晶(Molecular Beam Epitaxy, MBE)與有機金屬氣相磊晶(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)兩種機台為主。在眾多量子點成長方式，最為廣泛使用的方法為「層接而後島嶼式」(Stranski-Krastanow mode, S-K mode)[14]，利用沉積材料與基板間的晶格常數差異來成長。當沉積材料時在成長幾個單層後，會先成長一層二維結構，沾濕層(wetting layer)，由於材料之間的晶格常數不匹配，影響 wetting layer 的厚度，當 wetting layer 厚度增加，應力持續堆積，當應力累積到一臨界厚度時，會藉由形成零維量子點的島狀結構來達到應力釋放的效果，這種由二維轉三維自我聚集形成的量子點又稱為自聚式量子點(self-assembled QDs)[9,15]。此成長方式的優點:有

效提供高密度、高均勻度、少缺陷的量子點。以 GaAs 為基板成長 InAs 量子點為例，利用分子束磊晶機台並以 Stranski-Krastanow mode 方式成長，因 InAs 的晶格常數大於 GaAs，所以 InAs 成長在 GaAs 材料上時，會因為晶格不匹配產生壓縮應變 (compressive strain)，因此在適當的磊晶厚度下，就可以形成三維島嶼式的長晶模式。

1-2 研究動機

早期，量子點的研究大多是針對延長量子點放射波長至 $1.3\ \mu\text{m} \sim 1.5\ \mu\text{m}$ ，以便於應用在光通訊上，而提出以 In(Ga)As 等材料作為量子點[2,3]，專精於研究其光性特性。另一大部分研究團隊則是針對量子點的電性特性分析，以了解載子在量子點中的傳輸機制[16-18]。以文獻[16]為例，Kapteyn 等人提出在 InAs/GaAs 量子點中，電子躍遷是以兩段式過程作躍遷：首先，以熱能作為能量來源，將電子從量子點基態 (ground state, GS) 激發至第一激發態 (first excited state, FES)，再來藉由穿隧 (tunneling) 方式，穿隧至 GaAs 的傳導帶 (conduction band, CB)。此研究對於量子點的傳輸機制貢獻是非常重要的。

近年來，針對量子點具有極佳的量子侷限效應，並將其特點延伸應用在如何儲存電荷，進而使用在記憶體元件裡。對於現今所追求更高密度、快速的記憶體元件，以及各元件尺寸的微縮的問題，了解電荷在元件結構中傳輸的路徑，及儲存的方式便成為重要的課題。為能更進一步了解電荷在量子點結構中的傳輸方式，本論文研究針對量子點在有無照射光源下的電性量測，包含以電容電壓量測 (Capacitance – voltage measurement, C-V)、暫態電容量測 (Transient measurement, C-t)、深層能階暫態頻譜量測 (Deep level transient spectroscopy, DLTS)，確立在無照射光源下的缺陷發現；並藉由直接照射光源於樣品上，增加缺陷的躍遷速率。本論文中認為未照射光源量測時所發現的缺陷訊號，在照射光源下會影響載子訊號出現在電容電壓圖上的位置。針對這部分的系列研究，會在本論文中作一系統的探討。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。

1-3 論文架構

本論文主要是研究成長厚度 2.2 ML(monolayer, ML)的 InAs/GaAs 單一量子點，利用光性(PL)和電性(C-V、C-t、DLTS 等)量測探討其基本特性，並藉由照射外加光源配合電性量測來探討電子的躍遷機制。

以下為本論文的章節安排:

第一章 緒論。量子點材料基本介紹，包含成長方式及相關延伸應用，並說明本論文研究動機與論文架構。

第二章 實驗樣品製備與量測系統簡介。介紹本論文實驗樣品來源與電性量測時所需的正、負電極之製作;以及介紹實驗分析所需要的儀器設備，包含光性量測：光激發螢光量測系統，電性量測：電容電壓量測、暫態電容量測、深層能階暫態頻譜量測設備和光激發電性量測裝置系統。

第三章 InAs/GaAs 量子點的光電特性。藉由基本光電特性分析，確立 EL2 缺陷存在，並藉由缺陷濃度估算，了解 EL2 缺陷濃度。

第四章 EL2 缺陷能階受照光之影響。選擇光源能量 $E = 0.8 \text{ eV}$ 以足以激發 EL2 缺陷，藉由改變光源功率與環境溫度，並作 C-V 電性量測的分析，從中觀察載子訊號的調變。

第五章 光激發電性量測。改變照光光源能量(0.7 eV ~ 1.56 eV)，藉此了解光電容、光電流和輻射復合三者的關係，並加入 rate equation 作進一步描述。

第六章 結論。

第2章 實驗樣品製備與量測系統簡介

2-1 InAs/GaAs 量子點磊晶樣品之製備

本論文中使用之樣品為工研院所提供，並以分子束磊晶(Molecular beam epitaxy)系統所成長。成長於(100)方向的 n^+ -GaAs 基板，基板成長溫度固定在 640°C ，而量子點、量子井的長晶溫度則設定為 $485^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 。成長步驟如下：

- (1) 首先將基板溫度固定在 640°C ，並在 GaAs 基板上成長一層 $0.3\ \mu\text{m}$ n-GaAs (Si doping : $8\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$)緩衝層(buffer layer)。
- (2) 之後將基板溫度降低至 $485^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，成長 InAs 量子點，厚度為 2.2ML。
- (3) 接著再以相同溫度覆蓋一層厚度為 60\AA 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 量子井。
- (4) 再來中斷成長(Growth interruption, GI)40 秒，同時將基板溫度升回 640°C ，最後覆蓋 $0.3\ \mu\text{m}$ n-GaAs (Si doping : $8\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$)覆蓋層(cap layer)。

本論文成長之樣品結構圖及所對應的能帶圖如圖 2-1 所示。

2-2 蕭基界面及歐姆界面之電極製作

以 MBE 系統所成長的樣品可直接用於光性分析 PL 量測時所需要。而在電性量測方面則需要製作正負電極，藉由外加逆向偏壓於正負電極上，調變樣品中空乏區大小，以了解量子點之電性特性。正電極部分，主要利用熱蒸鍍方式以鋁(Al)金屬為材料製成蕭基界面(Schottky contact)於樣品磊晶面上；負電極部分，以高純度錫球(In ball)作為連接 GaAs 基板背面與佈滿材料錫(In)金屬薄膜的矽基板，使正負電極製作於同一平面上，方便實驗時三點探針機台的量測。

詳細的蕭基界面的製備過程如下：

- (1) 首先為確保蒸鍍完成的蕭基界面有良好的品質，將樣品與蒸鍍金屬 Al 進行清潔。將其沖泡於去離子水(D.I water)中約 3 分鐘，並配合使用超音波震洗機，以去除表面的一般雜質。

- (2) 接著將樣品浸泡於丙酮溶液(Acetone)中約 3~5 分鐘，除去表面油漬。
- (3) 再來利用去離子水沖泡約 3 分鐘，將殘留的 Acetone 去除。
- (4) 以 $\text{H}_2\text{O}:\text{HCl} = 1:1$ 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) 針對本實驗樣品，為了避免其過大的漏電流在大負偏壓時影響電性量測準確性，這邊利用稀釋過後的硫酸與過氧化氫混合液，其調配比例為 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{SO}_4 = 10:1:1$ 。將樣品浸泡約 75 秒，蝕刻掉表面的 GaAs 約 90 nm。
- (7) 最後以去離子水沖泡約 3 分鐘，去除表面殘留的酸液，並用氮氣將其吹乾。
- (8) 將清洗完成的樣品以真空膠帶黏貼於載台上，覆蓋上圓形面積 0.005024 cm^2 的 Mask，利用 Mask 決定了蕭基接面的大小。
- (9) 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，再來會在樣品的 GaAs 基板背面點上約 4 個高純度的錫球(In ball)。
- (2) 接著將其送入高溫 $330 \text{ }^\circ\text{C}$ 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。

2-3 量測系統簡介

2-3-1 光激發螢光量測系統 (Photoluminescence, PL)

本論文使用的 PL (Photoluminescence) 量測設備由電物所楊賜麟老師實驗室提供，而 PL 量測是一種非破壞性且可快速得知半導體材料能階結構的一種量測方式，所利用的原理為對實驗樣品入射一大於或等於其能隙值的短波長雷射光，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復合，過程中可能是放出光子的輻射復合 (radiative recombination)，或是熱輻射、放出聲子等非輻射復合 (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)。系統的最低溫度約在 10 K，可利用循環氮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 STANFORD 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。

2-3-2 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。在蕭基界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，不同直流偏壓下的電容值可得出各區域的載子濃度變化，再利用縱深分佈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(2-1)與載子濃度隨空間分佈公式(2-2)：

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{W} \quad (2-1)$$

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

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 (0.005024 cm^2)， $N(W)$ 為空乏區為 W 時的載子濃度。

2-3-3 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。當將電性量測所需的電極利用蒸鍍的方式製備完成後，會初步利用 I-V 量測以了解樣品特性是否良好，以確保樣品適合後續其他電性發面的量測。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：

$$I = I_s \left\{ \exp \left[\frac{q(V - I r_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2-3)$$

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)。

2-3-4 暫態電容量測 (Transient measurement, C-t)

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 量測將呈現對數的圖形。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：

$$y = y_0 + A_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \quad (2-4)$$

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。暫態電容量測以 HP4194 儀器做量測。

2-3-5 深層能階暫態頻譜量測(Deep level transient spectroscopy, DLTS)

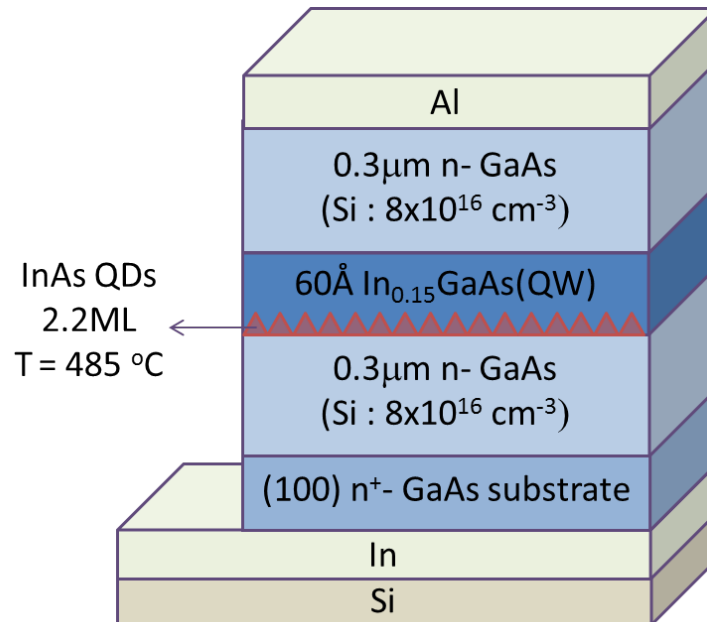
DLTS 技術在 1974 年首先由貝爾實驗室的 D. V. Lang 在 Journal of Applied Physics 提出[19]。利用週期性變化電壓施加於樣品上，改變樣品空乏區的大小，在連續不斷的暫態電容量測中，找出隨溫度變化時的最大電容變化值的溫度，來獲得深層缺陷的資訊[20]。優點：靈敏度高(可到 10^{10} cm^{-3} 之濃度偵測範圍)、能測多數與少數載子、觀測 defect 能階範圍廣、尤其是較深層的缺陷能階(emission time 在毫秒等級的)也能夠被精準量測到，提高信號對雜訊的比值(S/N ratio)等。DLTS 技術主要是給定兩時間 t_1 與 t_2 ，固定 t_2/t_1 ，改變 t_1 與 t_2 來設定不同速率窗(利用雙閘訊號平均器設定)，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(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。

2-3-6 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。在先前的研究中[21]，以紅外光 932nm LED 作為激發光源照射於樣品，可觀察到量子平台的延伸，電容值增加與缺陷訊號出現，推測在照光之後使缺陷中的載子躍遷速率加快，使之可以利用頻率加以調變。在本論文中將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 10 nm)，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。





Band structure :

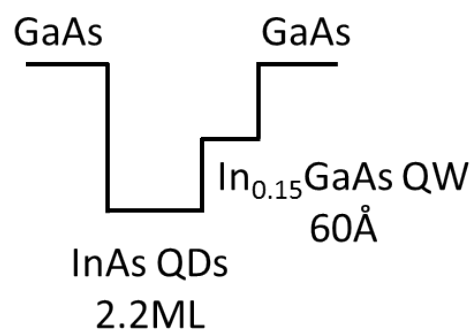


圖 2-1 樣品結構及所對應之能帶圖

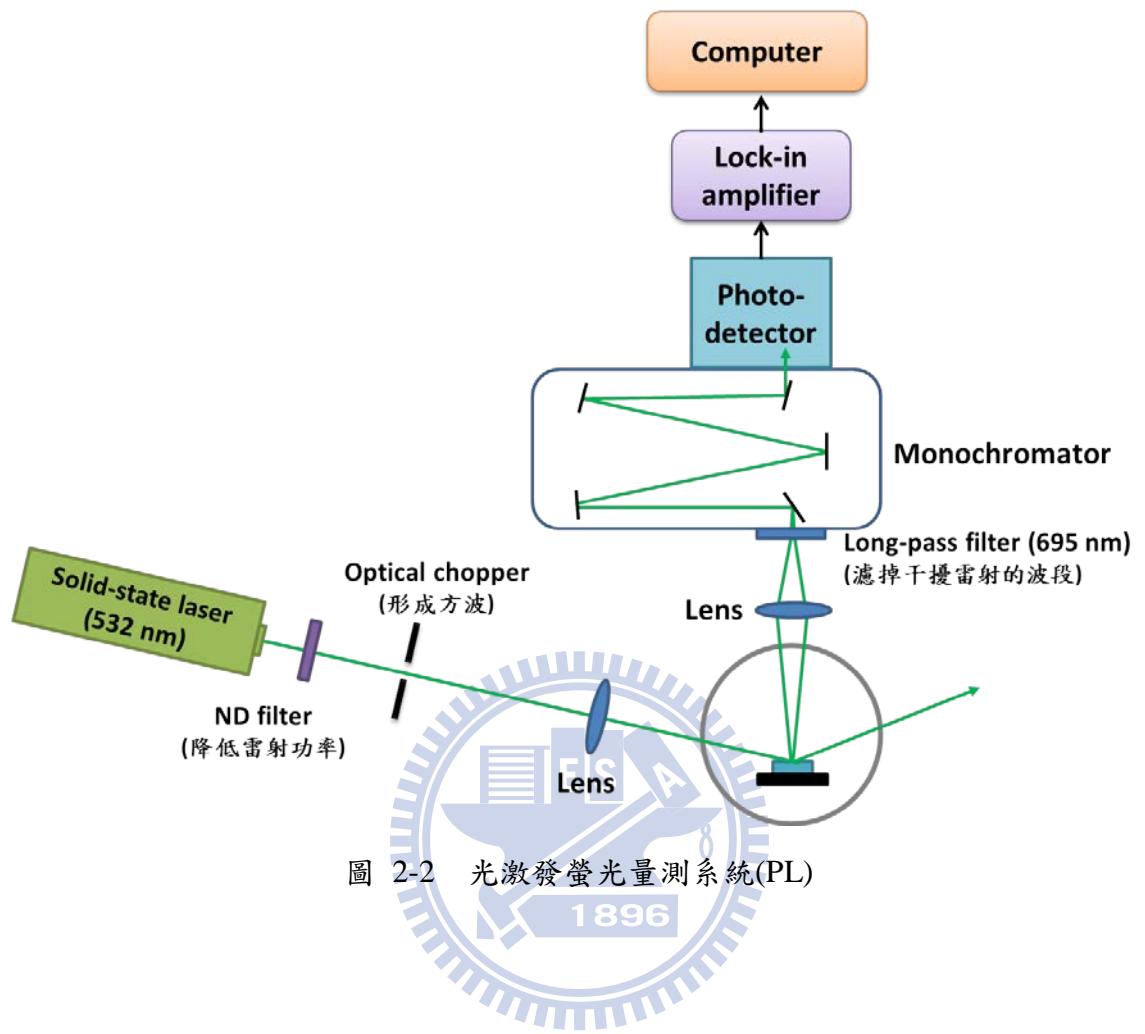


圖 2-2 光激發螢光量測系統(PL)

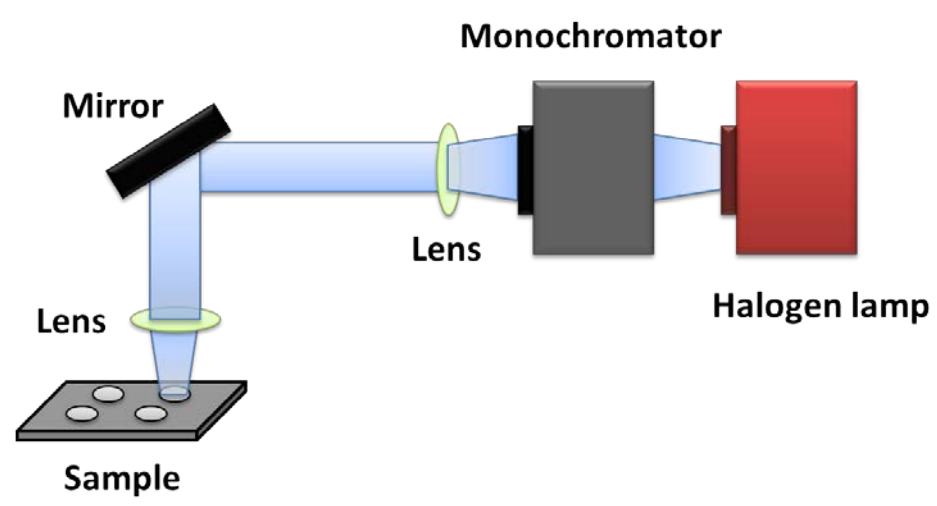


圖 2-3 光激發量測架構

第3章 InAs/ GaAs 量子點的光電特性

本章節重點在於基本的 InAs/GaAs 量子點的光電特性分析。首先，先介紹樣品的 PL 光性分析，再來藉由未照射光源下，量測量子點的 C-V、C-t 和 DLTS 之電性量測，確立 EL2 缺陷的存在，並藉由缺陷濃度的估算，了解樣品中存在很高的缺陷濃度。

3-1 InAs/GaAs 量子點光性分析

圖 3-1 為溫度從 80 K 升溫至 300 K，固定激發能量 10 mW 的 PL 隨溫度變化關係圖。由圖中可發現，PL 訊號強度隨溫度上升而減弱，且訊號峰值(peak)逐漸往長波長方向移動，有明顯的紅移(redshift)現象。PL 訊號強度隨溫度上升而減弱的原因為，當溫度上升量子侷限效應變差，能形成輻射復合的電子電洞對則相對變少，反應在 PL 的強度上因此減弱。另外，還可以發現圖中有兩個明顯的訊號峰值，在先前的研究中[22]可以得知此為 InAs 量子點的訊號，在低溫 80 K 時低能階訊號，基態(ground state, GS)出現在 1215 nm，第一激發態訊號(First excited state, FES)出現在 1155 nm，隨溫度上升至 300 K，GS 以及 FES 訊號會紅移至 1294 nm 和 1200 nm 的位置。此樣品所呈現出訊號峰值的放射能量與溫度的關係是遵守 Varshni rule[23]的變化。

3-2 確立 EL2 缺陷存在於 InAs/GaAs 量子點中

3-2-1 C-V 分析

一開始先觀察從低溫 77 K 至高溫 350 K，各溫度下改變頻率的 C-V 圖，如圖 3-2(a)-(c)。平台的位置(-1 V 至 -3.5 V)表示量測到 InAs 量子點訊號的偏壓範圍。在低溫 77 K 至 200 K 時，改變交流調變頻率 1 kHz 到 500 kHz，C-V 訊號沒有隨交流訊號而改變，亦即無頻率響應，表示量子點中的載子躍遷速率遠超過實驗中的量測

頻率，因此量子點的平台位置都存在，這與先前的研究結果相同[24]。接著當量測溫度升高至 300 K 和 350 K 時，則發現有頻率響應的現象，發生位置在偏壓為-1 V 至-3.5 V 之間，代表載子躍遷會隨實驗中改變量測頻率而被調變到。其中，一般認知量子點載子躍遷速率的範圍是高頻程級[16]。然而，在這裡的實驗數據中觀察到頻率響應的範圍為低頻 (1 kHz ~ 5 kHz)，因此推測造成此頻率響應的原因應該是來自於缺陷(defect)的訊號。

3-2-2 變溫 C-V 分析

從章節 3-2-1 C-V 分析中可以看出在低溫量測變頻 C-V 圖時，無頻率響應現象；高溫 300 K 和 350 K 量測時，有頻率響應現象，並猜測頻率響應的原因是缺陷的影響，在此小節進而以定頻率改變溫度的量測做觀察。圖 3-3 為定量測頻率 200 kHz 作變溫度的 C-V 圖，從圖中可以發現在溫度 77 K 至 200 K 時 C-V 圖的變化不大，溫度上升至 250 K 時可發現電容值略有向上抬升的現象，當溫度升高至 300 K 時，可以發現在偏壓-0.5 V 至-1.5 V，有一明顯增加的平台。接著將圖 3-3 C-V 變溫圖轉成縱深分佈圖更能看出載子堆積的情形，如圖 3-4。低溫 77 K 時在 0.23 μm ~ 0.25 μm 有一明顯電荷堆積的峰值，依先前 PL 光譜的研究[22]，量測到 GS 和 FES 的訊號，並且對應於樣品長晶結構的 InAs 位置，因此我們認為在 0.24 μm 的峰值為 InAs 量子點第一激發態(FES)的訊號，而在 0.25 μm 略出現的峰值為基態(GS)的訊號。量子訊號出現於縱深圖的位置小於結構中的位置原因為，在製作 Schottky 接面前有先將樣品做蝕刻的動作，以便於電性量測可觀察到量子點的訊號。此外，載子堆積的峰值有隨溫度上升而下降的趨勢，尤其是 FES 的訊號。在低溫時量子侷限效應極佳，載子容易侷限於量子點中，因此外加逆向偏壓時，電子受到場的影響而會躍遷出，貢獻在電容的平台上和縱深分佈圖的電荷累積訊號；而當溫度上升時量子侷限效應變差，所以侷限的載子量也相對變少，反映在電荷累積上也減小，因此同時也可以看到在 0.2 μm 附近背景摻雜濃度(background doping concentration)的提升。再來，隨溫

度升高至 350 K 時，也能在 0.15 μm 的位置發現電荷堆積的現象，這裡是對應到 C-V 圖偏壓- 0.5 V 至- 1.5 V 之間位置的平台抬升。這裡推測造成升溫時出現電荷累積訊號是由缺陷訊號貢獻而成的，呼應於章節 3-2-1 C-V 分析在高溫時觀察到頻率響應的現象。

此缺陷訊號在高溫才能被調變的原因，這裡先排除是交流訊號調變的影響。在前一小節中，可以觀察到缺陷訊號的調變是在低頻時(1 kHz ~ 5 kHz)才能觀察到，而在圖 3-3，這裡的量測頻率為 200 kHz，因此足以說明此交流訊號頻率並不會調變此缺陷的躍遷，間接也說明缺陷訊號是受到直流偏壓的影響而躍遷出來。這裡以圖 3-5(a)-(c)來作缺陷訊號受直流偏壓影響載子躍遷的能帶圖說明，在此假設缺陷能階 (E_{trap})是中性能階(neutral trap)，C-V 量測時是量測電子躍遷出的訊號。圖 3-5 (a)為在未加逆向偏壓時的情形，即能帶彎曲僅與內建電位有關，此時費米能階(E_F)調變的位置是 C-V 圖中的 0V 位置。圖 3-5 (b)為低溫量測時的示意圖，此為逆向偏壓未調變到量子點時情況，由圖可觀察到雖然費米能階跨在缺陷能階的位置上，但因缺陷訊號在低溫時，躍遷速率非常緩慢，因此雖然直流偏壓掃動到缺陷，仍無法量測到其訊號值。再來，溫度升至高溫時(圖 3-5 (c))，與圖 3-5 (b)為相同量測偏壓情況，缺陷訊號原在低溫時因躍遷速率太慢以致於測量不到訊號，在溫度升至高溫後，根據 3-1 式缺陷訊號受升溫(T 增加)的關係使得載子受熱激發主導的躍遷速率加快，

$$e_{th}(T) = \gamma T^2 \sigma_n \exp\left(\frac{-E_{\text{trap}}}{k \cdot T}\right) \quad (3-1)$$

其中， γ 為一常數，對 n-type GaAs 而言其值為 $2.28 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-2}$ ， σ_n 為捕捉截面積， E_{trap} 為缺陷能階活化能。因此，在升溫的過程中，缺陷能階的載子能藉由熱激發的關係在直流偏壓掃過之後而躍遷出來，(即費米能階之上的載子有機會藉由熱激發而跳出)而能在 C-V 圖中看到平台的貢獻及縱深圖載子堆積的現象。

3-2-3 C-t 分析

這裡進而以 C-t 量測方式，再次確認缺陷訊號的存在。量測的方式如圖 3-6 示意圖所表示，一開始在量測之前($t < 0$)是不加任何偏壓，即沒有偏壓狀態，當開始量測之後($t > 0$)，外加連續相同的逆向偏壓直到量測結束，藉由量測時間逐漸增加，加以觀察電容值的變化。圖 3-7 為溫度 300K，量測頻率為 1 MHz 的 C-t 圖，實驗觀察出當外加偏壓 -2 V 和 -3 V 時，皆可以觀察到隨時間變化電容值呈現一個指數型態的增加，這表示有一載子躍遷隨所加偏壓的時間增加，而躍遷出來貢獻於電容值。從 C-t 圖中可以看出電容值抬升是隨著秒的程級而逐漸上升，我們一般認為只有缺陷訊號的躍遷速率才會以秒的範圍作傳輸，所以確認此為缺陷的訊號。這與 C-V 分析中所得的推測相互呼應，這邊認為 C-V 分析與 C-t 分析所得的缺陷來源為同一個。

3-2-4 DLTS 分析

從 3-2-1 到 3-2-3 C-V 分析和 C-t 分析中可以看出有一缺陷訊號存在於樣品裡，為了確立這缺陷的來源，進一步以 DLTS 分析來做確認。圖 3-8(a)-(g)為各偏壓下量測載子放射(emission)的 DLTS 量測結果，量測偏壓為逆向偏壓(0 V / - 0.5 V ~ - 3.0 V / - 3.5 V)，不同量測偏壓範圍表示探測樣品深度的不同，各偏壓下 filling pulse 為 10 ms，rate window 分別為 430 ms、215 ms、86 ms 和 43 ms。可以發現在各偏壓下均有量測到在高溫 300 K 至 350 K 範圍的缺陷訊號，

接著將各偏壓下所對應到的峰值溫度繪製成阿瑞尼士圖(Arrhenius plot)，如圖 3-9，可由此得到缺陷的活化能(activation energy, E_a)以及捕獲截面積(capture cross section, σ_n)，所得之數據整理在表 3-1。活化能值大約介於 580 meV 至 810 meV 之間，捕獲截面積則在 10^{-13} cm^2 到 10^{-15} cm^2 之間，將此活化能對照於 PL 所得之 GS 和 FES 發光能量位置繪成能帶圖，如圖 3-10 所示。對照文獻依據[25,26]，我們認為此活化能與捕獲截面積所對應的缺陷應該是 EL2 的缺陷。然而，造成此缺陷產生原因是：在成長 InAs/GaAs 量子點時，一般以低溫(480 °C)成長量子點，以助於銦有效聚集，

再蓋上 GaAs layer，然而，GaAs 的長晶溫度通常在高溫 600 °C 左右，在這溫度下原子具有足夠的動能，此時磊晶層的狀態則屬於熔融不穩定的情況，若直接在 InAs 量子點上覆蓋高溫成長的 GaAs，將發生銻/鎵內部擴散(In/Ga interdiffusion)及量子點蒸發消失的問題，因此在蓋上 GaAs 時會先以低溫的方式先成長薄薄一層，最後再蓋上一般溫度的 GaAs layer[27,28]。在許多文獻中說明此低溫成長 GaAs layer 的方式，由於 As 會取代 Ga (As_{Ga} anti-site)，容易形成 EL2 的缺陷[29]，這與本論文相同。因此在量測中也發現大量的 EL2 缺陷造成的量測影響，由此可知，從 C-V 分析、C-t 分析在溫度為高溫時容易量測到缺陷訊號，在變溫 C-V 的縱深圖中(圖 3-3)，位在 0.15 μm 電荷堆積的來源也是來自於 top GaAs layer 的 EL2 缺陷所貢獻。

此外，在表 3-1 中，不僅可以觀察到典型的 EL2 活化能(0.75 eV ~ 0.8 eV)[25]，也能發現偏小(~ 0.6 eV)以及偏大的活化能值(~ 1.0 eV)。對應於文獻的探討，許多研究團隊針對 EL2 缺陷去做分析，在 P. Leyral 等人的研究中[30]，發現 EL2 缺陷具有 metastable state 的特性，在 PL 量測上得到 0.65 eV 的放射訊號；另外在 T. Wosinski 的研究中[31]，則發現 EL2 有兩種形態的能階訊號，一是在 0.75 eV，另外則是在 1.05 eV。皆能對應於本論文的實驗結果。

3-3 缺陷濃度與缺陷存在位置估計

3-3-1 缺陷濃度估計

針對所量測到的 EL2 缺陷，進一步以 DLTS 量測和 C-V 量測估計各區段偏壓下缺陷濃度以及所對應的缺陷深度。先以 DLTS 量測觀點做說明，在做 DLTS 分析時，主要是利用週期性變化電壓施加於樣品上，以改變樣品中空乏區大小，進而獲得訊號值。藉由 DLTS 量測的結果，可得知其量測範圍內局部侷限能階的缺陷濃度(trap concentration, N_t)。一般常見的缺陷濃度轉換方式，是建立在缺陷濃度遠小於背景摻雜濃度(background doping concentration, N_d)的假設之下，即 $N_t \ll N_d$ ，並且假設缺陷濃度是均勻分佈於結構之中。然而，對於本研究的實驗方式，其假設不適用於估算

空間中局部分佈的缺陷濃度，因此這裡重新推導適用於局部侷限能階的缺陷濃度轉換方式。首先，由 DLTS 原理得知，當缺陷能階所捕捉之電子得到足夠熱能後，其可由缺陷能階躍遷出至空乏區邊緣(E_{od})，而造成空乏區寬度改變(ΔX)，產生 DLTS 的訊號值ΔC_{DLTS}，如圖 3-11(a)所示。並得到缺陷能階所放出之電子量Δn = N_d ΔX 滿足下式：

$$\Delta n = N_d \cdot \varepsilon A \left(\frac{1}{C_0 - \Delta C_{DLTS}} - \frac{1}{C_0} \right) \quad (3-2)$$

其中，N_d 為掃動電壓時對應之空乏區的背景摻雜濃度(即長晶時的摻雜濃度，8 x 10¹⁶ cm⁻³)，ε 為半導體材料介電係數，A 為樣品的電極面積，ΔC_{DLTS} 為 DLTS 量測的訊號值(如圖 3-11(b))，C₀ 為在 t₂ 秒時的暫態電容值，C(t₂)，且 DLTS 量測儀器讀取的電容差值(ΔC_{DLTS} = C(t₂) - C(t₁))之時間比例為 r = t₂/ t₁ = 11.5。因此，局部侷限能階的最大訊號值ΔC_{max} 即可對應於其所躍遷出最大電子量Δn_{max}，並滿足下式：

$$\Delta n_{max} = N_d \cdot \varepsilon A \left(\frac{1}{C_0 - \Delta C_{max}} - \frac{1}{C_0} \right) \quad (3-3)$$

再來，從 C-V 量測觀點做說明，與 DLTS 量測相同的偏壓作對應，假設局部侷限能階的缺陷濃度是均勻分佈於此空乏區空間中，當在 C-V 量測時掃動此偏壓範圍的空乏區ΔL，如圖 3-12(a)，總共捕捉ΔN_t的電子量，根據 Schottky 空乏理論可得知，捕捉的總電子量ΔN_t滿足下式：

$$\Delta N_t = N_t \Delta L = N_t (L_2 - L_1) = N_t \cdot \varepsilon A \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) \quad (3-4)$$

其中，N_t 為量測局部侷限能階之空乏區中的缺陷濃度，ε 為半導體材料介電係數，A 為樣品的電極面積，C₁ 和 C₂ 為能量測到此最大缺陷濃度時的溫度對應之電壓 V₁、V₂ 的高頻電容值(如圖 3-12(b))。接著，假設從 DLTS 量測到最大訊號值ΔC_{max} 所對應的最大電子量Δn_{max} 與 C-V 量測時所得之侷限能階的缺陷濃度ΔN_t(這裡假設 C-V 量測時局部空乏區內的缺陷電子皆放出至空乏區邊緣)為相等，因此可得到局部侷限能階的缺陷濃度 N_t 滿足下式：

$$N_t = N_d \cdot \frac{\Delta C_{max}}{C_0(C_0 - \Delta C_{max})} \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 - C_2} \quad (3-5)$$

而當 DLTS 量測的局部侷限之缺陷能階所捕捉的電子皆放出空乏區邊緣時，在 t_2 秒時的暫態電容值 C_0 即可近似成 C-V 量測時的高頻電容值 C_2 ，所以可把(3-5)式簡化成為下式：

$$N_t = N_d \cdot \frac{\Delta C_{max}}{(C_2 - \Delta C_{max})} \cdot \frac{C_1}{C_1 - C_2} \quad (3-6)$$

因此，藉由此公式，可得知 DLTS 所量測的各 rate window、各偏壓下所掃出的局部侷限之缺陷濃度，如圖 3-13。

3-3-2 缺陷存在位置估計

在前一小節中，估算出 DLTS 各偏壓量測下之局部侷限能階的缺陷濃度，在此小節將藉由各逆向偏壓下所掃動的空乏區位置，去對應缺陷存在的位置。由圖 3-11(a) 來做說明，在偏壓為 V_2 時，因局部侷限之缺陷能階上的電子掃出，而貢獻在空乏區的微縮(ΔX)，此時的 V_2 偏壓所對應的費米能階(E_F)位置，不僅是對應於空乏區邊緣的位置(E_{od})，亦相對應於在缺陷能階上的位置(L_{trap})，在此假設其缺陷能階在整個結構中的位置皆相等的情況下，利用下面式子，計算各偏壓量測下之缺陷位置(L_{trap})：

$$E_{trap} = \frac{q \cdot N_d}{2\epsilon} (W^2 - L_{trap}^2) \quad (3-7)$$

其中， E_{trap} 為缺陷活化能(在這裡以 EL2 缺陷之活化能做計算[25]， $E_{trap} = 0.8 \text{ eV}$)， N_d 為掃動偏壓時對應之空乏區的背景摻雜濃度， ϵ 為半導體材料介電係數， W 為在 V_2 偏壓時所對應的高頻測量之 C 值轉換成的空乏區大小。推算出的缺陷位置(L_{trap}) 將其整理如表 3-2 所表示。

將 3-3-1 缺陷濃度估計與 3-3-2 小節缺陷位置估計的數據繪製成圖 3-13，將局部侷限之缺陷能階濃度($\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)與長晶時的背景摻雜濃度相比($8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)，觀察出缺陷濃度佔有很高的比例。在這裡如此高濃度的缺陷濃度將會影響到後面章節照光之電性量測分析。

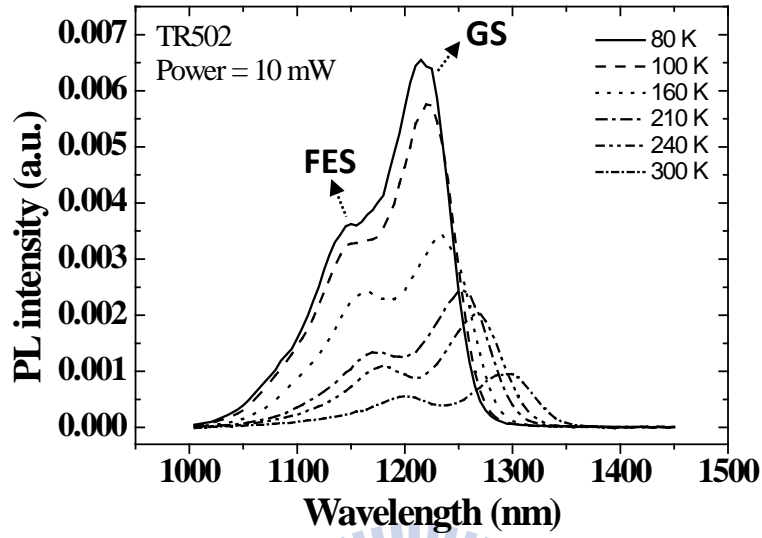


圖 3-1 InAs 量子點隨溫度變化關係之 PL 光譜圖

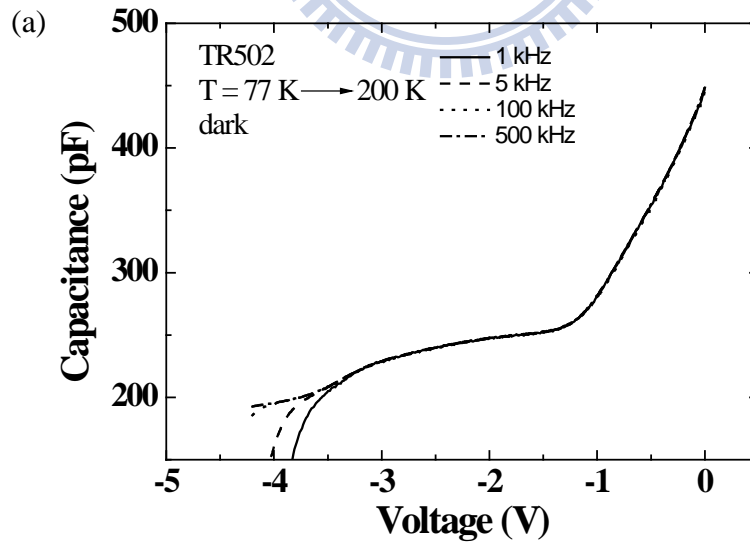


圖 3-2(a) 各溫度下變頻率 C-V 圖

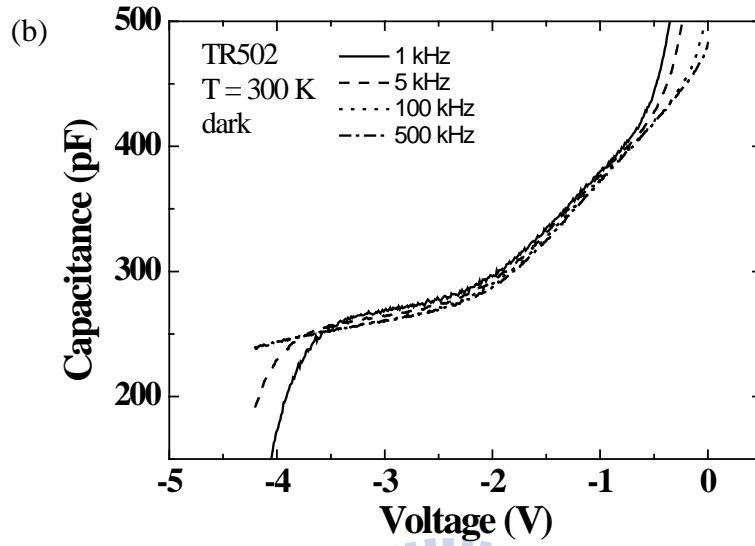


圖 3-2(b) 各溫度下變頻率 C-V 圖

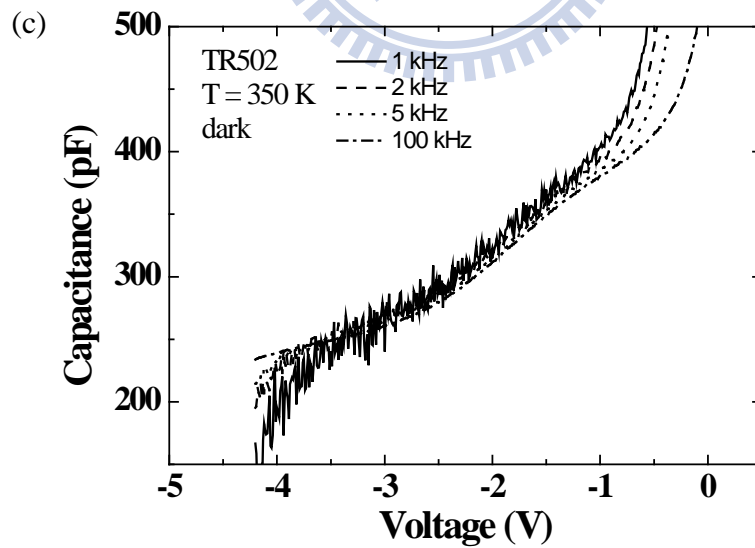


圖 3-2(c) 各溫度下變頻率 C-V 圖

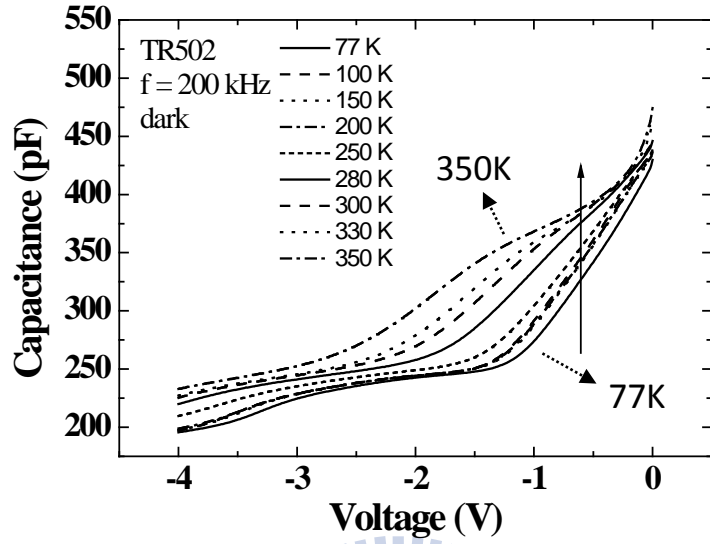


圖 3-3 定量測頻率 200 kHz 之變溫 C-V 圖

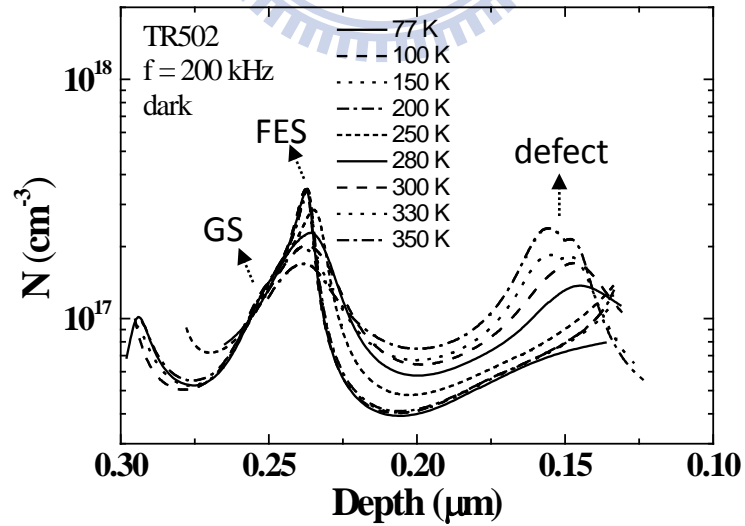


圖 3-4 定量測頻率 200 kHz 之變溫縱深分佈圖

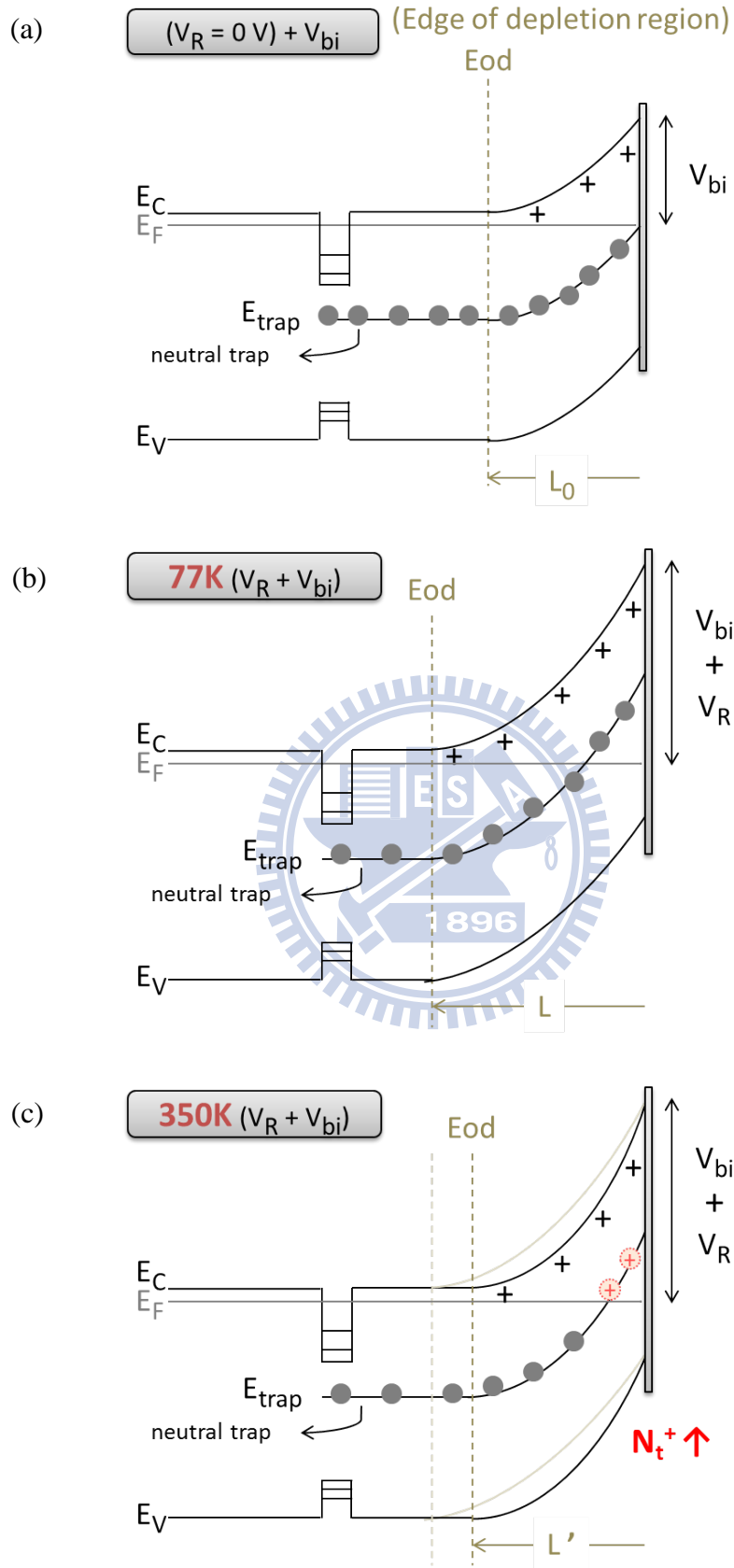


圖 3-5 缺陷訊號受直流偏壓影響載子躍遷的能帶圖

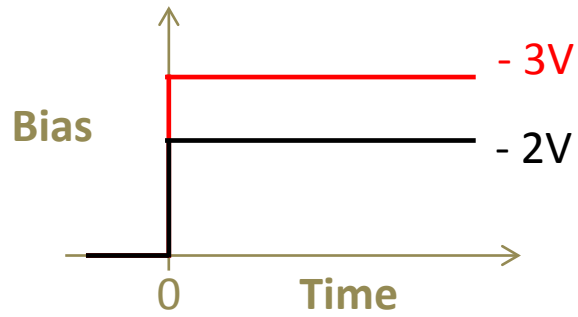


圖 3-6 量測 C-t 分析之外加偏壓與時間關係示意圖

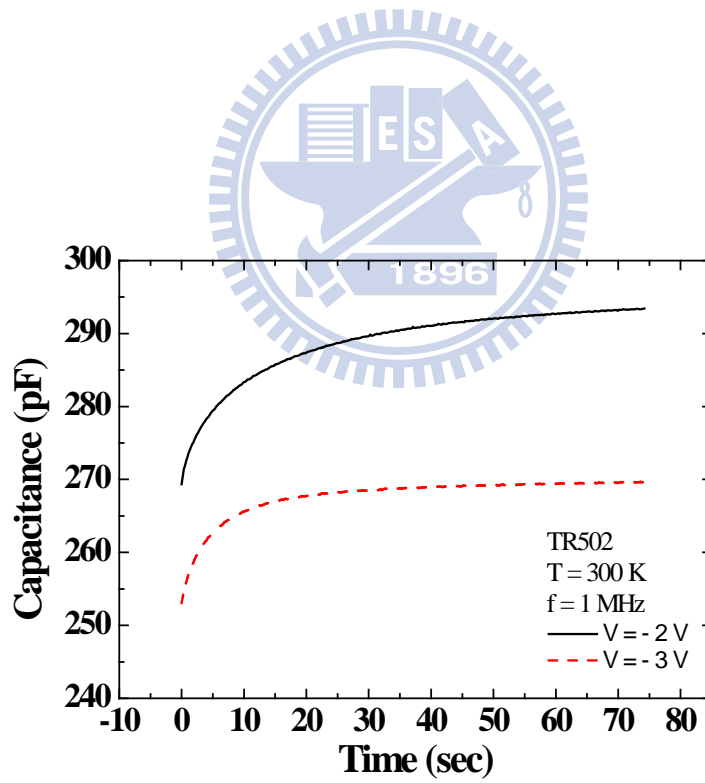


圖 3-7 溫度 300K 之量測頻率 1 MHz C-t 圖

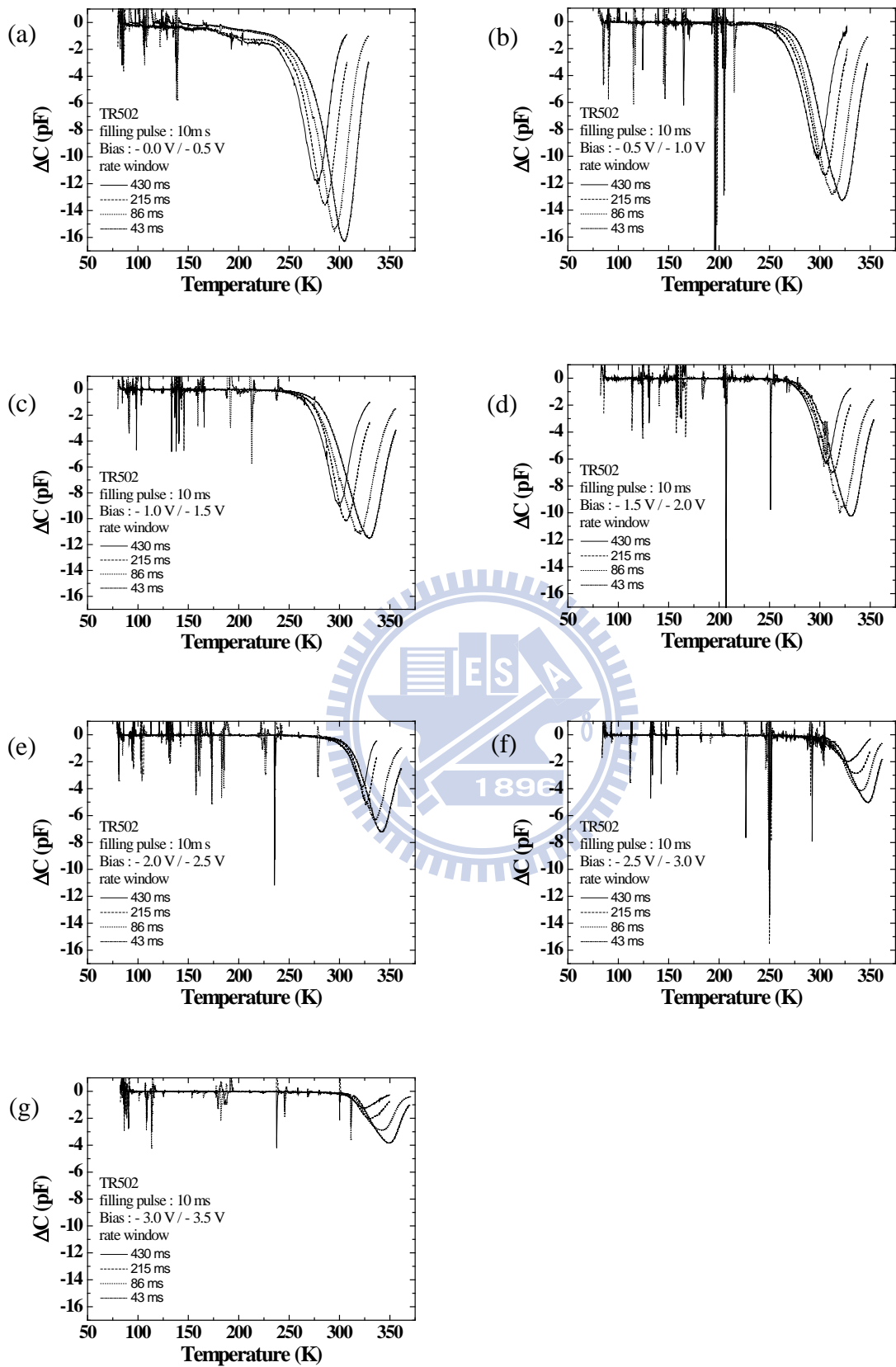


圖 3-8 各偏壓下載子放射之 DLTS 量測

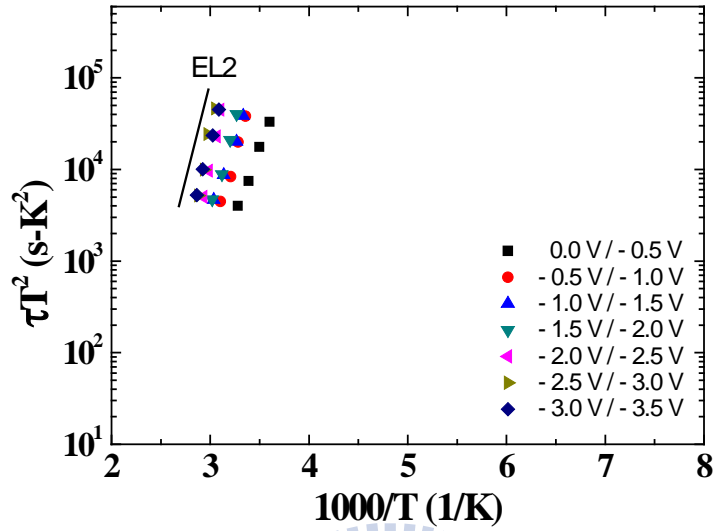


圖 3-9 各偏壓下之阿瑞尼士圖

表 3-1 各偏壓下之缺陷的活化能以及捕獲截面積

Bias (V)	E_a (eV)	σ_n (cm ²)
- 0.0 V / - 0.5 V	0.580	4.517×10^{-15}
- 0.5 V / - 1.0 V	0.749	5.877×10^{-13}
- 1.0 V / - 1.5 V	0.599	1.476×10^{-15}
- 1.5 V / - 2.0 V	0.761	4.096×10^{-13}
- 2.0 V / - 2.5 V	1.079	7.982×10^{-9}
- 2.5 V / - 3.0 V	1.146	3.666×10^{-8}
- 3.0 V / - 3.5 V	0.810	4.142×10^{-13}

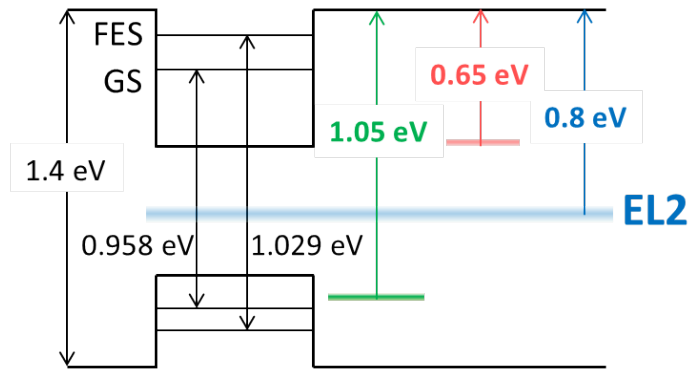


圖 3-10 缺陷活化能與 PL 發光能量位置之能帶圖

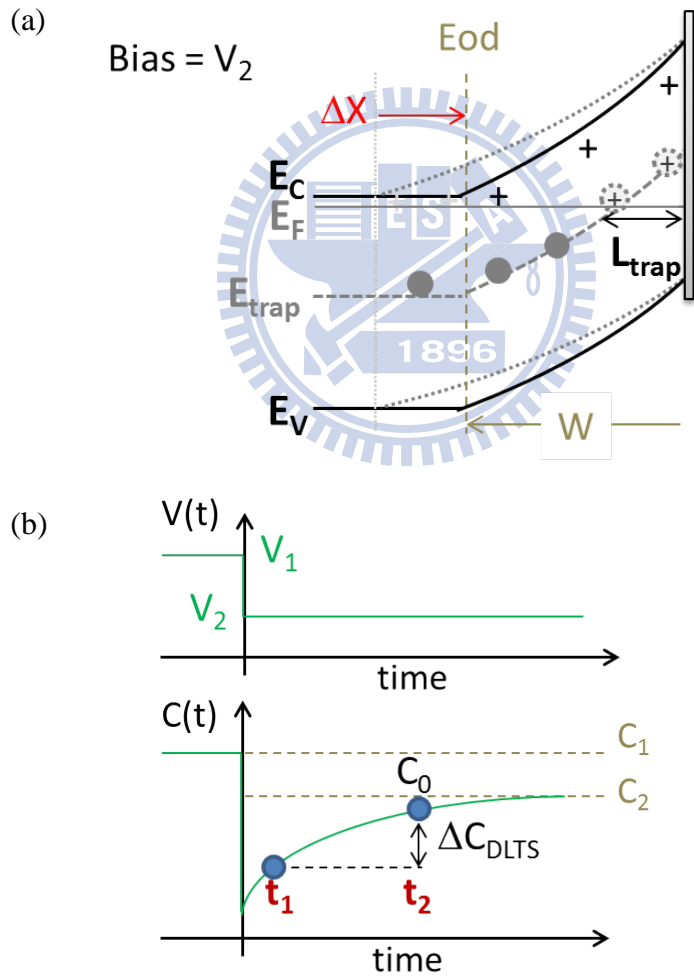


圖 3-11 DLTS 觀點之缺陷濃度估計示意圖

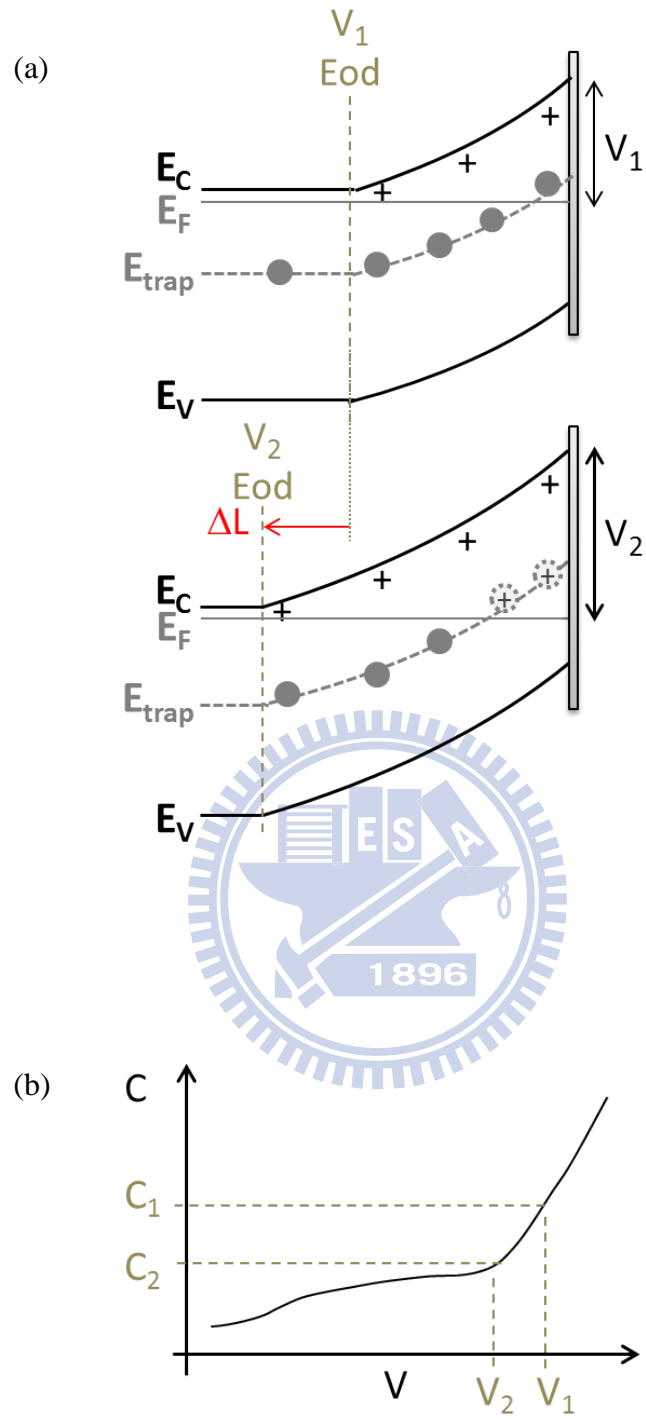


圖 3-12 C-V 觀點之缺陷濃度估計示意圖

表 3-2 缺陷存在位置(L_{trap})估計

Bias (V)	W (nm)	E_a (eV)	L_{trap} (nm)
- 0.5	161.96	0	91.623
- 1.0	203.453	0	153.483
- 1.5	223.395	0.26	179.079
- 2.0	234.07	0.479	192.23
- 2.5	245.816	0.732	206.372
- 3.0	258.803	1.026	221.682
- 3.5	273.239	1.371	238.377

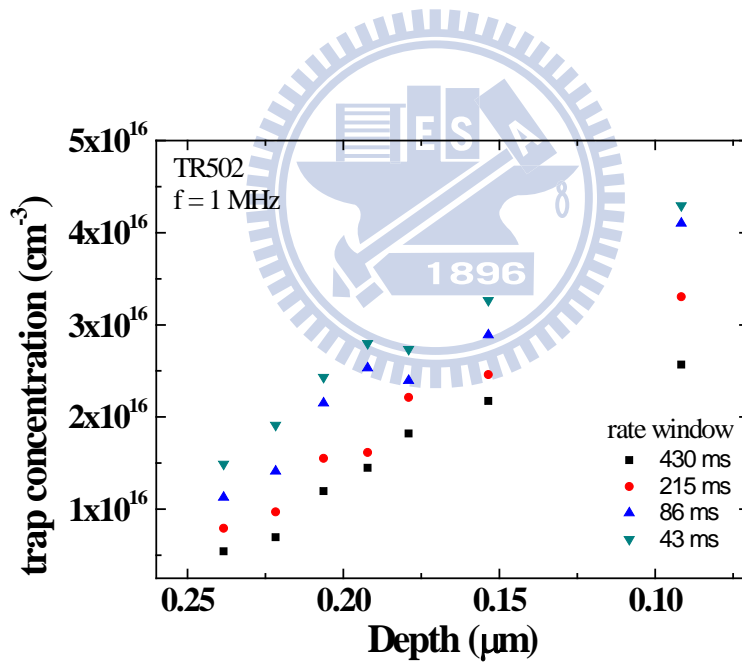


圖 3-13 缺陷濃度與缺陷位置估計關係圖

第4章 EL2 缺陷能階受照光之影響

在第四章中將探討 EL2 缺陷受照射光源於 InAs/GaAs 量子點中的影響，在此選擇照射光源能量為 0.8 eV (1550 nm) 以足於激發 EL2 缺陷能階，藉由光源功率的改變，以及環境溫度的狀態，並作 C-V 電性量測的分析，從中觀察載子訊號的調變。

圖 4-1(a)-(e) 表示改變照光功率下 C-V 變溫圖，照光功率分別為 30 W、60 W、120 W、180 W 與 210 W。從各圖低溫部分可觀察出，隨著光源功率增加，在逆向偏壓 -2 V 至 -3.5 V 之間有顯著的電容平台抬升，在 210 W 時有最大的電容抬升量；高溫部分，則隨著光源功率增加，無明顯的改變量。因此，接下來將先探討低溫下改變照光功率對於 EL2 缺陷與量子點之影響，再來加入溫度的討論作呼應。

4-1 照射光源對於 EL2 缺陷之影響

圖 4-2 為環境溫度 77 K 下改變照射光源功率之 C-V 關係圖。照射光源波段為 0.8 eV (1550 nm)，量測頻率為 200 kHz，以 30W 為間隔，改變光源功率 30 W 至 210 W 之間的量測分析。圖中不照光(dark)到照光 210 W 之電容值訊號，能發現到隨著光源功率逐漸增加，電容值有很明顯的增加量，在 210 W 時之抬升量將近有 80 pF 的量值，而在各光源功率下也皆能看到受量子侷限的平台訊號，在此先探討照光對於 EL2 缺陷的影響，即逆向偏壓 0 V 至 -1 V 之間。

這裡認為在低溫並照光下，對於 EL2 缺陷作 C-V 量測，此改變逆向偏壓使之測量到缺陷訊號的行為類似於 DLTS 之量測，如圖 4-3(a)-(c) 所示。圖 4-3(a) 為未加偏壓下之能帶圖，能帶彎曲為內建電位(V_{bi}) 影響，而 EL2 缺陷能階近似於內建電位值，此時費米能階恰沒有調變到缺陷能階。圖 4-3(b) 為低溫時未照光下外加偏壓能帶圖，在第 3 章已說明在低溫下掃動缺陷能階，因缺陷載子躍遷速率緩慢，因此不會貢獻電容訊號。圖 4-3(c) 為與圖 4-3(b) 同偏壓下照光之能帶圖，缺陷載子受照光影響其躍遷速率加快，因此外加偏壓下能躍遷出貢獻電容值訊號。由圖 4-3(a) 到圖 4-3(c) 之過

程，電子從未躍遷出到受照光使電子躍遷出的行為就像是 DLTS 放射(emission)量測掃出電子訊號。

再來，將引入照射光源下光激發之捕捉截面積 σ_n^0 (optical cross section)[30]及照光強度 ϕ 與躍遷時間常數的關係，進一步描述載子的躍遷機制。由圖 4-4 可知，在能隙內有一帶有濃度為 N_t 的 EL2 缺陷能階存在，並僅考慮電子放射情形。根據 Shockley-Read-Hall 復合理論，以 N_t 隨時間的變化率描述在有無照射光源下之 EL2 缺陷能階的電子濃度變化量。在未照光下，電子受熱激發影響的放射速率以 R_{en} 作表示，當照射光源下，電子躍遷將與光源有關，以 R_n^0 作表示，而在缺陷能階位置 N_t 隨時間的變化量則滿足下式：

$$\frac{d(N_t f(t))}{dt} = -R_{en} - R_n^0 = -C_n n' N_t f(t) - \sigma_n^0 \phi N_t f(t) \quad (4-1)$$

其中 N_t 為缺陷能階的電子濃度， $f(t)$ 為在缺陷能階的佔據機率。 R_{en} 表示放射到傳導帶的速率並與缺陷電子數目成正比，因此 R_{en} 能寫成 $C_n n' N_t f(t)$ ；而 R_n^0 是與照光強度 ϕ 與光激發之捕捉截面積 σ_n^0 成正比，寫成 $\sigma_n^0 \phi N_t f(t)$ 。經由微分方程式解可知 $f(t)$ 滿足下式：

$$f(t) = f(\infty) + [f(0) - f(\infty)]e^{-t/\tau^0}, \quad \tau^0 = \frac{1}{C_n n' + \sigma_n^0 \phi} \quad (4-2)$$

其中 τ^0 為電子躍遷的時間常數。由邊界條件可知，在 $f(\infty)$ 時，表示在無窮長時間下($t = \infty$)，即穩態情形，電子的佔據機率為零，在 $f(0)$ 則表示在時間為零時($t = 0$)電子佔據機率為 1，因此可將(4-2)式整理為下式：

$$f(t) = e^{-t/\tau^0}, \quad \tau^0 = \frac{1}{C_n n' + \sigma_n^0 \phi} \quad (4-3)$$

這裡以圖 4-5 表示加入照光影響之阿瑞尼士圖示意圖，實線表示未照光下之示意，時間常數隨溫度改變為線性變化；隨著光源加入，時間常數在低溫部分為不隨溫度改變而影響其變化量。接著，以照光 DLTS 量測，如圖 4-6 所示，能直接觀察到在高低溫下受照光影響之電子躍遷時間常數變化情形。從圖中可觀察出未照光低溫時，並無看見電子躍遷貢獻的電容變化量(ΔC)，僅能觀察到在高溫時因熱激發之電容變化情形。而在照射光源下，則能發現在低溫 80 K 至 200 K 時看見一與溫度無關的 ΔC

變化，此印證在低溫照射光源下載子躍遷時間常數(τ^0)變快，並以照光項為主導，電子躍遷速率($1/\tau^0$)與光激發之捕捉截面積及光強度乘積成正比關係($1/\tau^0 = \sigma_n^0 \phi$)；在高溫部分則須同時考慮熱激發及照光所影響之電子躍遷速率($1/\tau^0 = C_n n' + \sigma_n^0 \phi$)。

當缺陷能階上的電子訊號放射時，則能留下帶正電濃度 N_t^+ ，藉由(4-3)式可知， N_t^+ 隨時間的變化量能寫成下式，

$$N_t^+ = N_t(1 - f(t)) = N_t(1 - e^{-t/\tau^0}) \quad (4-4)$$

並依據擬合可知 N_t^+ 與時間變化量成指數的關係，如圖 4-7。當時間呈穩態時， N_t^+ 濃度量會接近於 N_t 量值。

接著，將此缺陷濃度與電子躍遷時間常數的關係帶入實驗數據中(圖 4-2)。藉由有無照光下之壓降關係式，可推得出在各光源功率下帶正電濃度 N_t^+ 與背景摻雜濃度之比例。未照光下之壓降關係式為：

$$\frac{q}{2\varepsilon} N_d L_{dark}^2 = V_{bi} + V_R \quad (4-5)$$

照光下之壓降關係式為：

$$\frac{q}{2\varepsilon} N_d L_{photo}^2 - \frac{q}{2\varepsilon} N_t^+ (L_{photo} - L_0)^2 = V_{bi} + V_R \quad (4-6)$$

經由整理之後得出帶正電濃度 N_t^+ 與背景摻雜濃度之比例，如下所示：

$$\frac{N_t^+}{N_d} = \frac{L_{dark}^2 - L_{photo}^2}{(L_{dark} - L_0)^2} \quad (4-7)$$

其中， L_0 為未加偏壓時之空乏區寬度， L_{dark} 為加逆向偏壓並未照光下之空乏區寬度， L_{photo} 為加逆向偏壓且照光下之空乏區寬度。藉此可繪出各光源功率下之 N_t^+/N_d 之數據，如圖 4-8 所示。擬合線為滿足(4-4)式所繪，藉由擬合出的公式，可知在照光光源能量 0.8 eV 的光激發之捕捉截面積值為 5.02×10^{-4} (a.u.)。

由上述描述可知，照射光源能使得缺陷訊號躍遷速率加快，並且隨著照射光源強度增加，躍遷速率則增加，貢獻於電容訊號則越多，載子受照光之影響躍遷示意圖如圖 4-9 所示。

4-2 照射光源對於量子點之影響

4-2-1 量子點佔據機率改變

從圖 4-2 中逆向偏壓-1 V 至-3.5 V 間可觀察出改變照光功率對於量子點的影響。將 C-V 圖轉成縱深分佈圖(圖 4-10)，並先觀察小功率(30 W ~ 90 W)的變化，可發現到載子堆積峰值隨光源功率增加而有下降的趨勢，並且往淺位置方向移動。這裡認為量子點態訊號受照光影響其電子佔據機率改變，如圖 4-11 所示，當未照光下電子佔據機率較集中，而隨著光源強度增加電子佔據機率會往高能階方向移動，因此在縱深圖上可看到在小功率部分隨光源功率逐漸增加，GS 與 ES 愈分離的現象。

上述過程，同樣也能引入照射光源下光激發之捕捉截面積 σ_n^o (optical cross section)[30]及照光強度 ϕ 與躍遷時間常數的關係，描述載子的躍遷機制。在討論量子點態需考慮電子捕捉及放射情形，如圖 4-12 所示，根據 Shockley-Read-Hall 復合理論，以 N_{QD} 隨時間的變化率描述在有無照射光源下之量子點態的電子濃度變化量。在未照光下，電子受熱激發影響的放射速率以 R_{en} 作表示，捕捉速率以 R_{cn} 作表示，當照射光源下，電子躍遷與光源有關，以 R_n^o 作表示，在量子點態位置 N_{QD} 隨時間的變化量則滿足下式：

$$\begin{aligned} \frac{d(N_{QD} \cdot f(t))}{dt} &= R_{cn} - R_{en} - R_n^o \\ &= C_n n N_{QD} (1 - f(t)) - C_n n' N_{QD} f(t) - \sigma_n^o \phi N_{QD} f(t) \end{aligned} \quad (4-8)$$

其中， N_{QD} 為量子點態電子濃度， $f(t)$ 為在量子點態的佔據機率。 R_{cn} 表示從傳導帶捕捉至量子點態的速率，寫成 $C_n n N_{QD} (1 - f(t))$ ； R_{en} 表示從量子點態放射到傳導帶的速率，因此 R_{en} 能寫成 $C_n n' N_{QD} f(t)$ ；而 R_n^o 是與照光強度 ϕ 與光激發之捕捉截面積 σ_n^o 成正比，寫成 $\sigma_n^o \phi N_{QD} f(t)$ 。經由微分方程式解可知 $f(t)$ 滿足下式：

$$f(t) = f(\infty) + [f(0) - f(\infty)] e^{-t/\tau^o} \quad , \quad \tau^o = \frac{1}{C_n(n+n') + \sigma_n^o \phi} \quad (4-9)$$

其中 τ^o 為電子躍遷的時間常數。由邊界條件可知，在 $f(0)$ 則表示在時間為零時($t=0$)電子佔據機率為 1；在 $f(\infty)$ 時，即穩態狀態，為 $C_n n / [C_n(n + n') + \sigma_n^o \phi]$ 。由 $f(\infty)$ 可

知，當加入光源後電子佔據機率會隨著照射光源功率增加而佔據機率下降。藉此可說明縱深圖中從未照光到照光功率 90 W 的電荷累積情形，有電子佔據機率改變的狀況。

4-2-2 空乏區位置誤判

再來，繼續觀察圖 4-10 大功率下的變化(120 W ~ 210 W)，從圖中可發現電荷累積峰值隨著光源功率增加有更往淺位置移動的趨勢，這裡懷疑這樣的電荷累積峰值在淺空乏區出現的正確性。藉由圖 4-13 可知，當偏壓調變到量子點時必須考慮 InAs/GaAs 異質界面處的位能障，從 4-1 節可知缺陷能階之電子受照光影響其躍遷速率加快，因此當外加偏壓時，缺陷能階電子能躍遷至傳導帶。然而，當量測溫度在低溫下及外加偏壓還不足以使躍遷至傳導帶的缺陷電子跑至空乏區邊緣處(Eod)，在傳導帶的自由電子則會待在 InAs/GaAs 異質界面處的位能障之前，即 dQ_{GaAs} 的位置，而 dQ_{GaAs} 量值是隨著照光強度增加而增加，因此留在此處的電子愈多，造成的能帶彎曲現象則愈嚴重，而可能會在費米能階加交流訊號時被調變到。因此在計算交流調變的電容值($C = dQ/dV$)時，除了須考慮到空乏區邊緣 dQ_1 的調變，另外也不能忽略 dQ_{GaAs} 造成的影響。這裡假設在做交流訊號調變時恰無掃到量子點態訊號，因此只先考慮 dQ_1 與 dQ_{GaAs} 貢獻的電容並聯情形。整體掃出的電荷量為 $dQ_1 + dQ_{\text{GaAs}}$ ，並滿足下式：

$$C = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ_1 + dQ_{\text{GaAs}}}{\frac{dQ_1}{\varepsilon A} L + \frac{dQ_{\text{GaAs}}}{\varepsilon A} L_s} \quad (4-10)$$

經由整理之後，可成為(4-11)：

$$C = \frac{\varepsilon A}{L_s \frac{dQ_{\text{GaAs}}}{dQ_1 + dQ_{\text{GaAs}}} + L \frac{dQ_1}{dQ_1 + dQ_{\text{GaAs}}}} \quad (4-11)$$

由(4-11)式可知，當照光功率小，即 dQ_{GaAs} 貢獻量小時，所呈現在縱深圖上的空乏區寬度為 L 所主導；當照光功率大時， dQ_{GaAs} 貢獻的電荷量增加， L_s 將會主導縱深圖上所觀察到的空乏區位置。因此，可了解圖 4-10 中大功率的部分，觀察到電荷峰值訊號隨著功率增加，而往淺位置移動的趨勢，其為轉成縱深分佈圖時掃動費米能階

對於空乏區寬度的誤判，此向淺位置移動的訊號峰值仍為量子點激發態的態訊號。

4-3 照射光源下之變溫 C-V 分析

在此節將探討固定光源功率 210 W 下，做改變溫度 180 K 至 350 K 的 C-V 量測，如圖 4-14(a)-(c)所示。從圖 4-14 (b)中能明顯觀察到當溫度 180 K 升溫至 270 K 時，逆向偏壓 0 V 至 -1.5 V 之間的電容值是幾乎不動的，而在偏壓 -1.5 V 至 -3.5 V 間，則隨著溫度上升至 270 K 電容值隨之遞減；然而，當溫度從 280 K 上升至 350 K 時(圖 4-14 (c))，在逆向偏壓 -2 V 至 -4 V 之間的電容值幾乎沒改變，0 V 至 -2 V 之間則隨著溫度升高而抬升，在圖 4-14 (b)與圖 4-14 (c)中能看見明顯的兩個不同訊號的消長關係。接著，將 C-V 轉成縱深分佈圖更能觀察出電荷堆積訊號的消長情形，如圖 4-15 所示。圖中能觀察到明顯三個電荷堆積峰值，量子點訊號、受缺陷能階訊號所影響的量子點 ES 峰值以及 EL2 缺陷訊號，在此量子點訊號和受缺陷能階訊號所影響的量子點 ES 峰值出現原因已在前面小節作過說明，這裡將針對溫度導致受缺陷能階訊號所影響的量子點 ES 峰值之影響與 EL2 缺陷訊號的產生作說明。

從縱深圖中可以觀察到，當溫度從 180 K 上升至 270 K 時，ES 電荷堆積訊號隨之減小且半高寬逐漸變寬。針對 ES 峰值，這裡將此訊號作一固定範圍的訊號積分，如圖 4-16，能發現隨著溫度上升其面積的大小隨之下降，這表示 ES 受溫度影響侷限能力下降，因此在溫度高於 280 K 時將無侷限能力貢獻電容訊號值。接著，觀察溫度 280 K 至 350 K，能發現在 0.15 μm 位置另有一額外出現的電荷堆積訊號。這裡將此訊號對應於圖 3-4 變溫縱深分佈圖(未照光)，在圖 3-4 中也能發現在 0.15 μm 位置的電荷堆積訊號，在第三章的探討中已確認其訊號來源為 top GaAs layer 的 EL2 缺陷能階訊號。因此，圖 4-15 溫度 280 K 至 350 K，在 0.15 μm 位置逐漸增加的訊號，認為也是來自於 top GaAs layer 的 EL2 缺陷能階訊號。

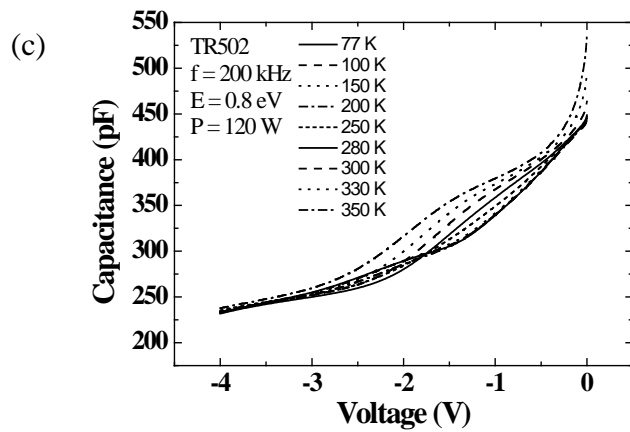
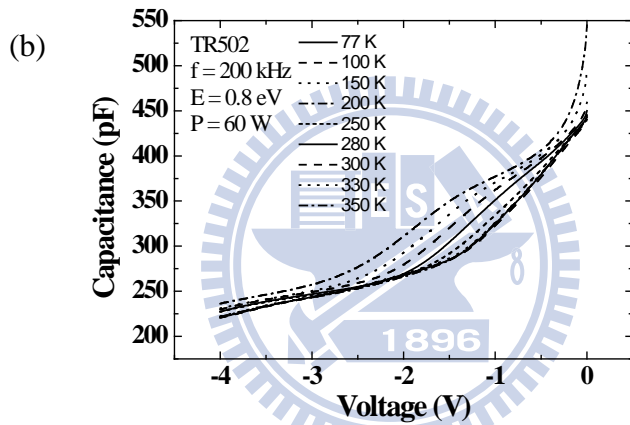
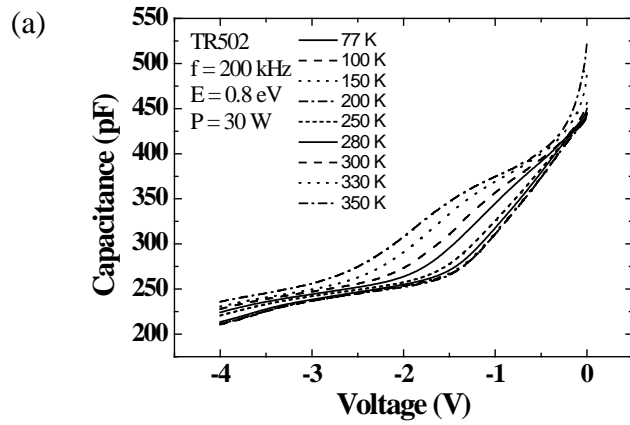


圖 4-1 改變照光功率下之 C-V 變溫圖

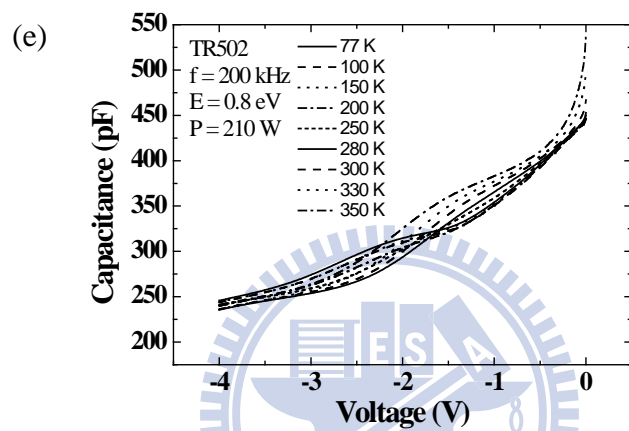
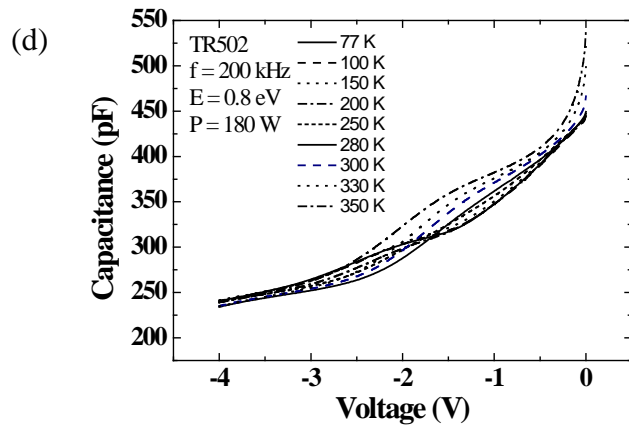


圖 4-1 改變照光功率下之 C-V 變溫圖

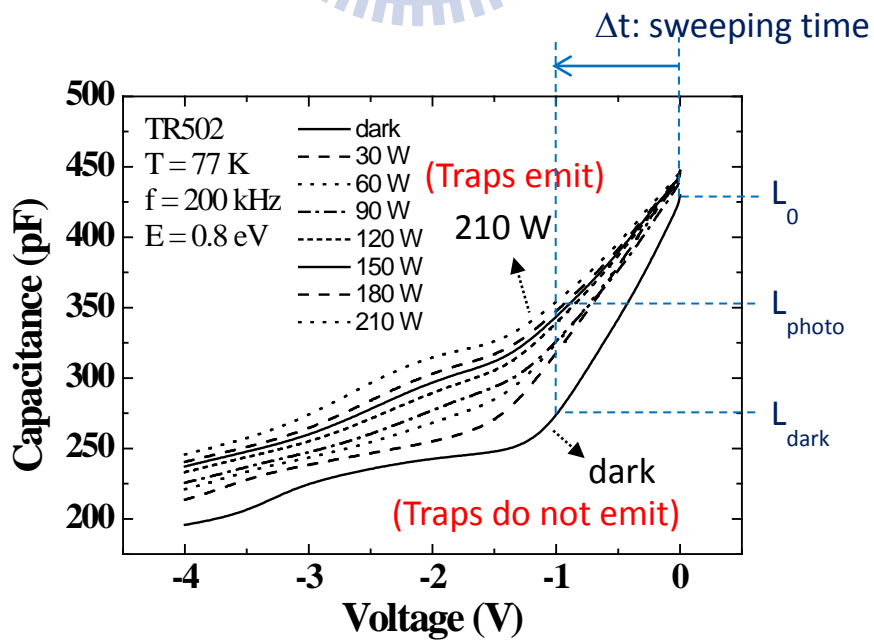


圖 4-2 77 K 下變光源功率之 C-V 關係圖

77K

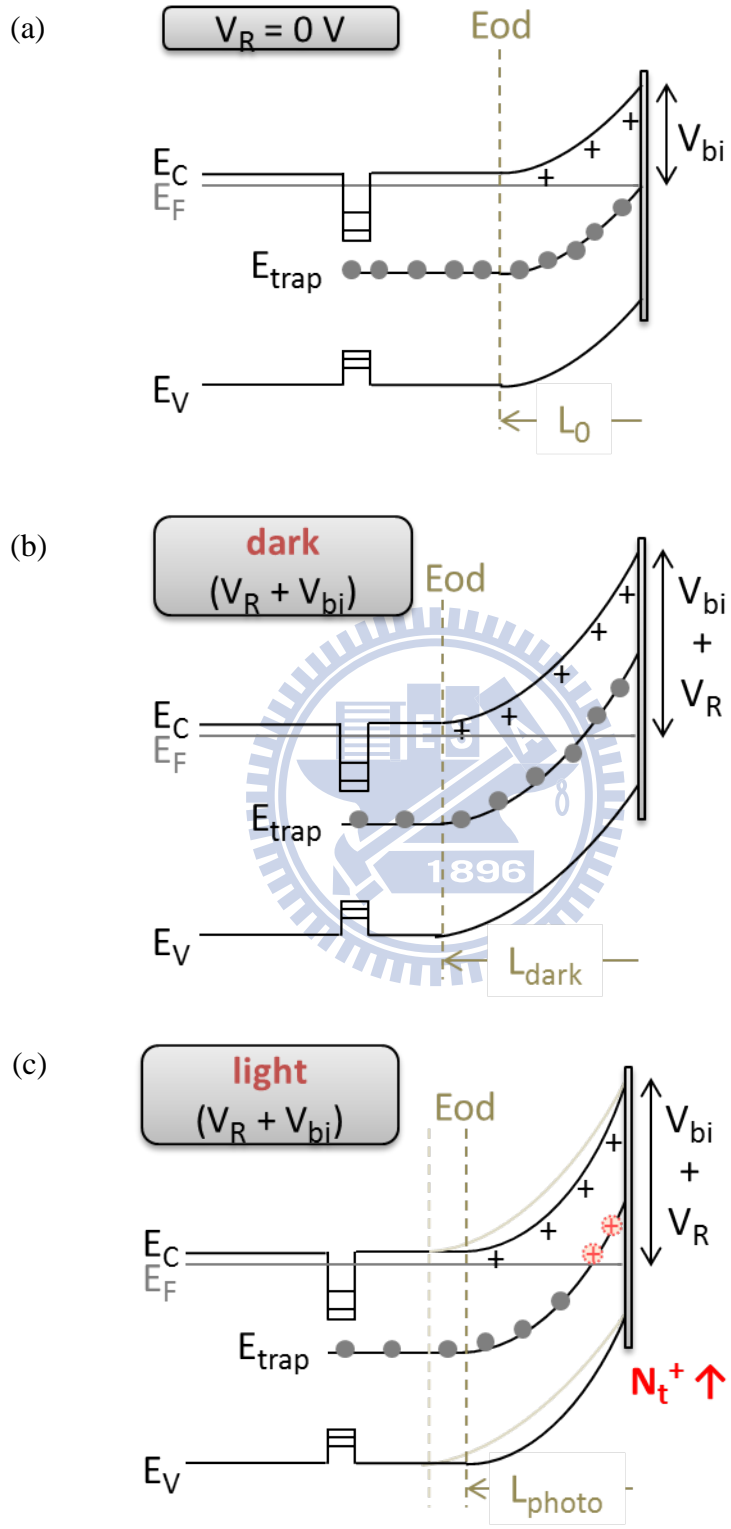


圖 4-3 照光 C-V 量測類似於 DLTS 量測之能帶示意圖

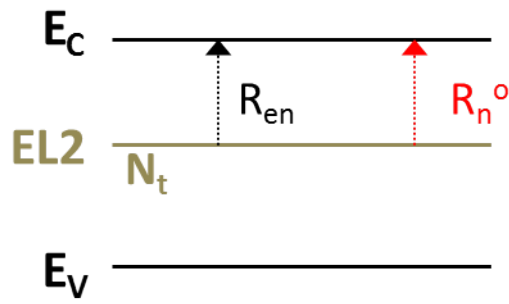


圖 4-4 EL2 缺陷能階載子躍遷示意圖

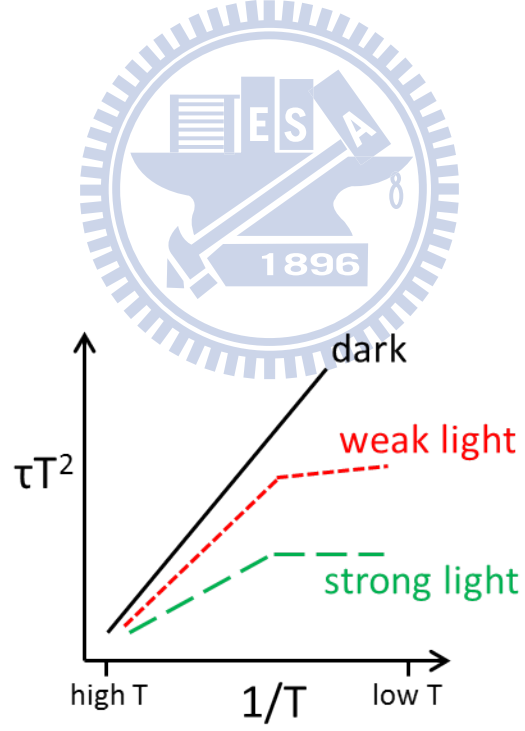
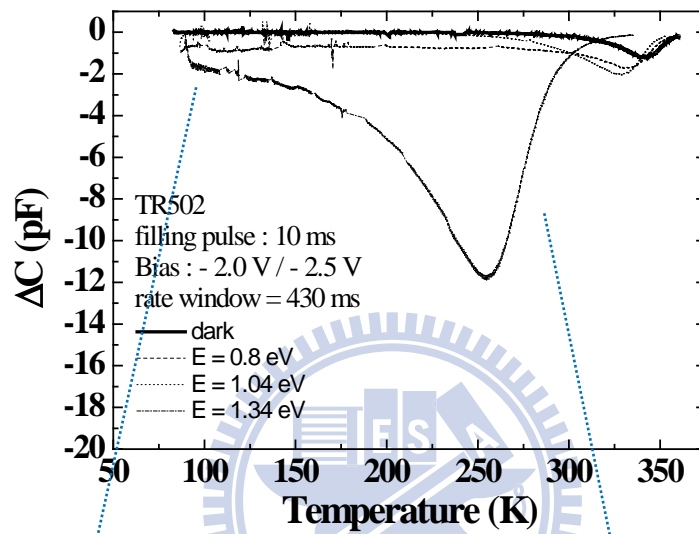


圖 4-5 受照光影響之阿瑞尼士圖示意圖



At low temperature
 → optical term dominated
 → $\frac{1}{\tau^o} = \sigma_n^o \varphi$

At high temperature
 → $\frac{1}{\tau^o} = C_n n' + \sigma_n^o \varphi$

圖 4-6 照光 DLTS 量測

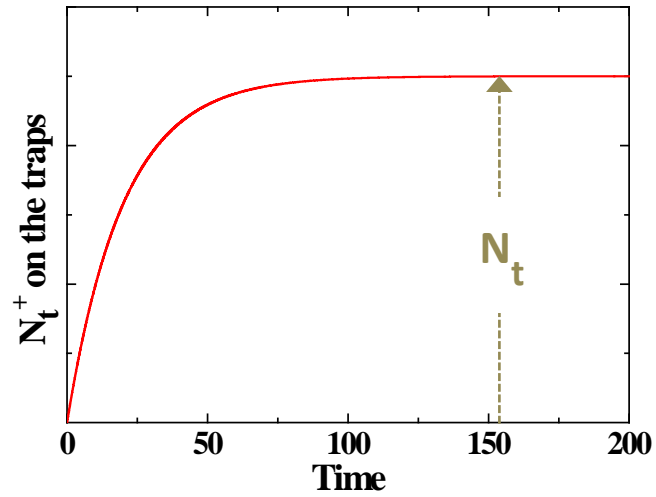


圖 4-7 N_t^+ 與時間變化量之關係圖

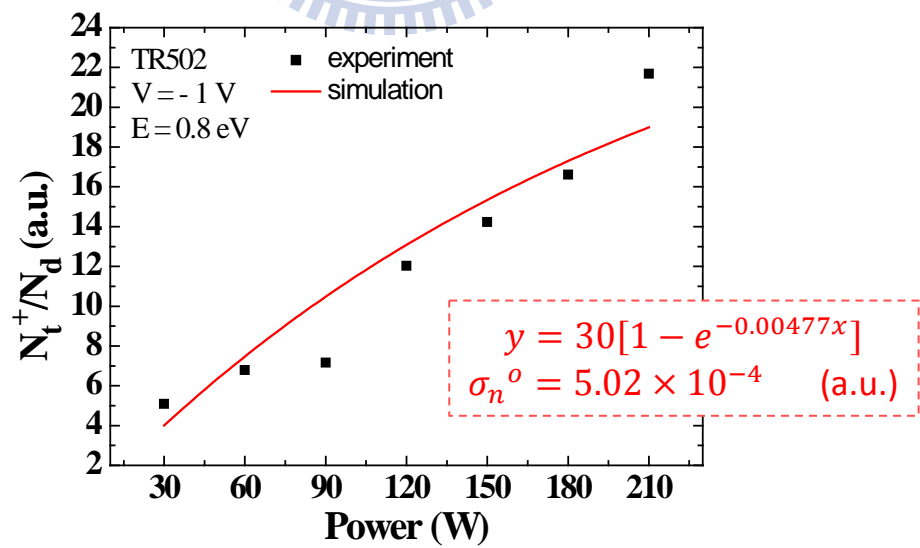


圖 4-8 各光源功率下 N_t^+/N_d 之數據

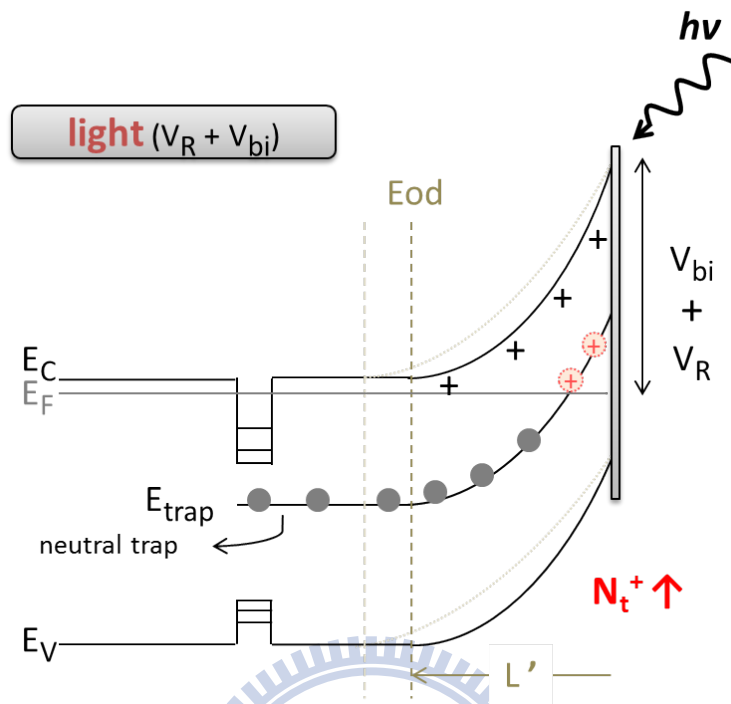


圖 4-9 載子受照光之影響躍遷示意圖

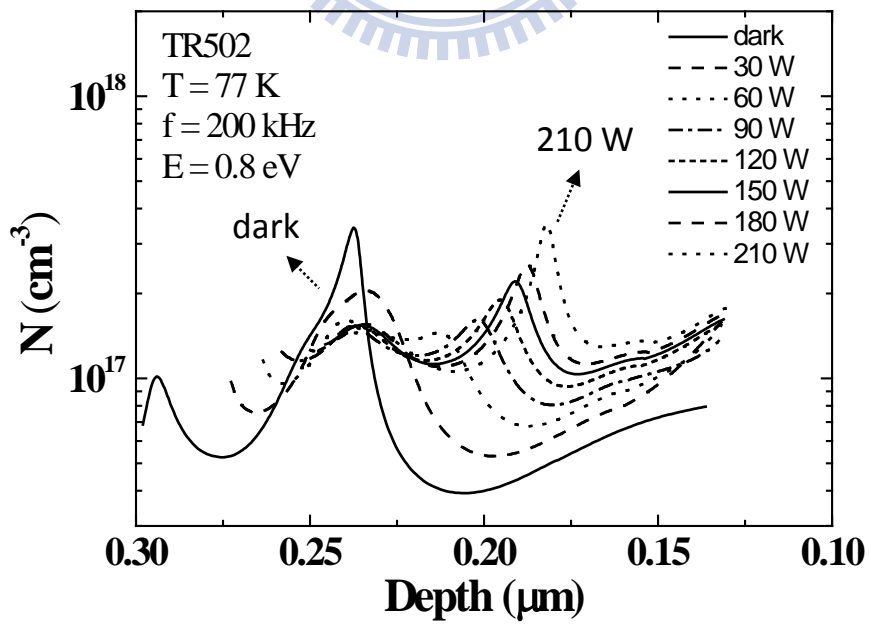


圖 4-10 77 K 下變光源功率之縱深分佈圖

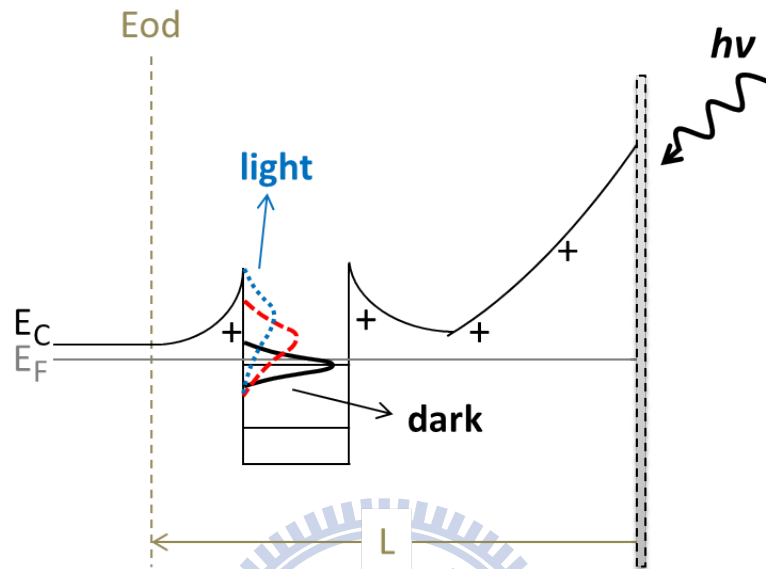


圖 4-11 量子點能態訊號受照光影響其電子佔據機率改變之示意圖

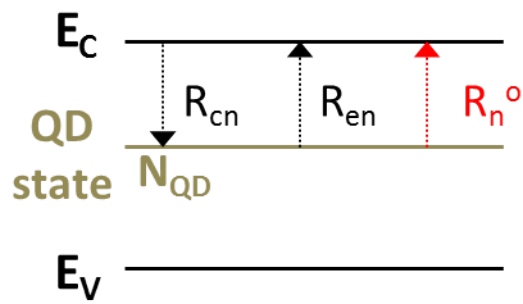


圖 4-12 量子點能階載子躍遷示意圖

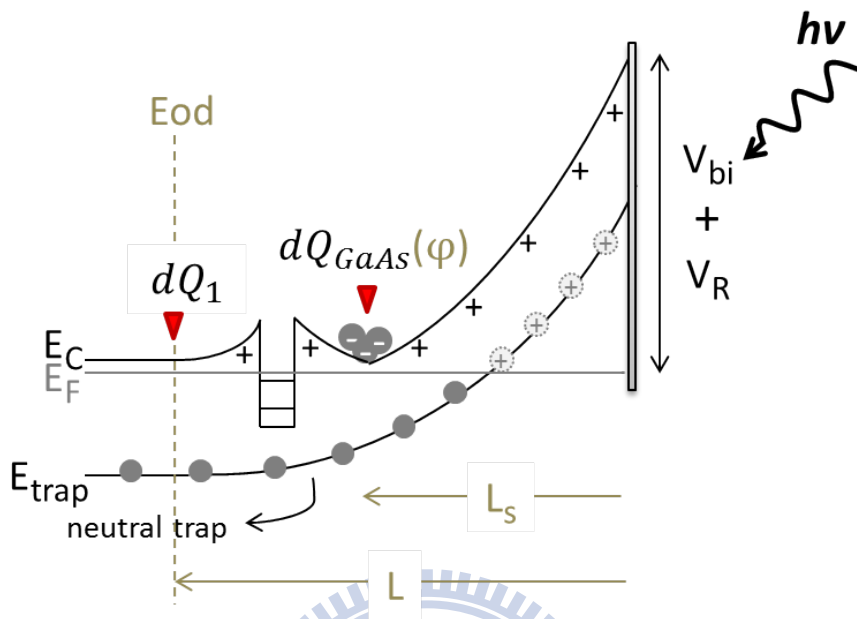


圖 4-13 加入 dQ_{GaAs} 之能帶示意圖

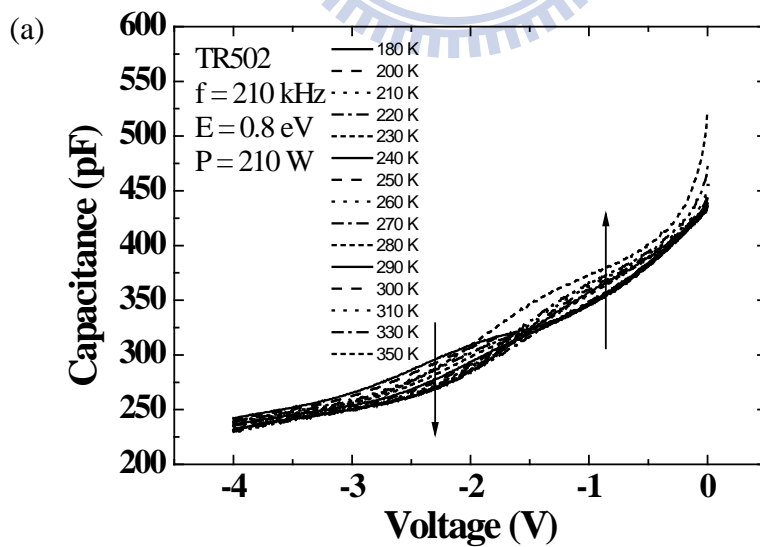


圖 4-14 照射光源下之變溫 C-V 圖

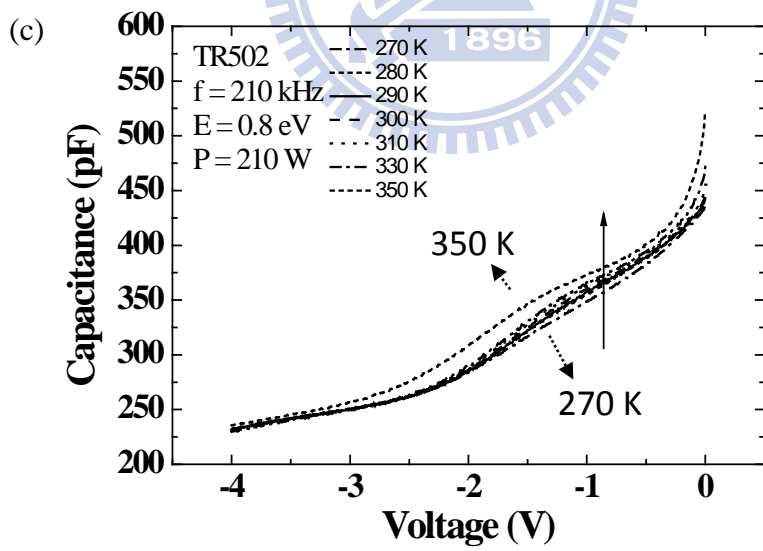
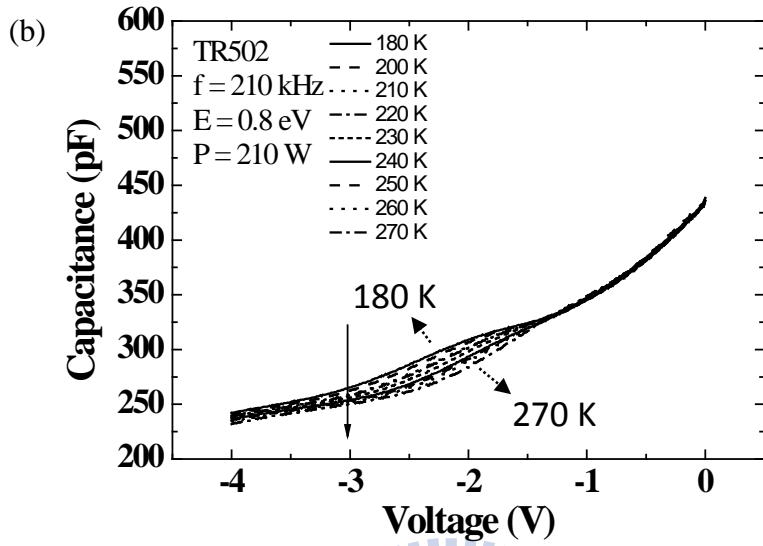


圖 4-14 照射光源下之變溫 C-V 圖

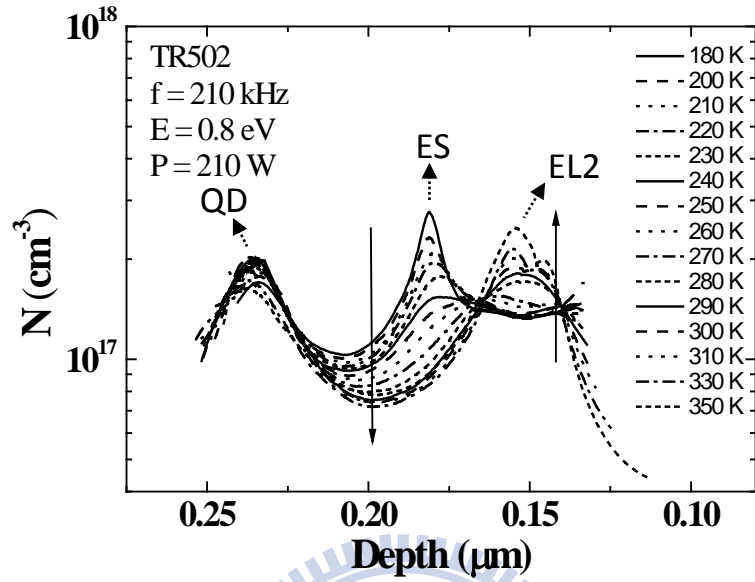


圖 4-15 照射光源下之變溫縱深分佈圖

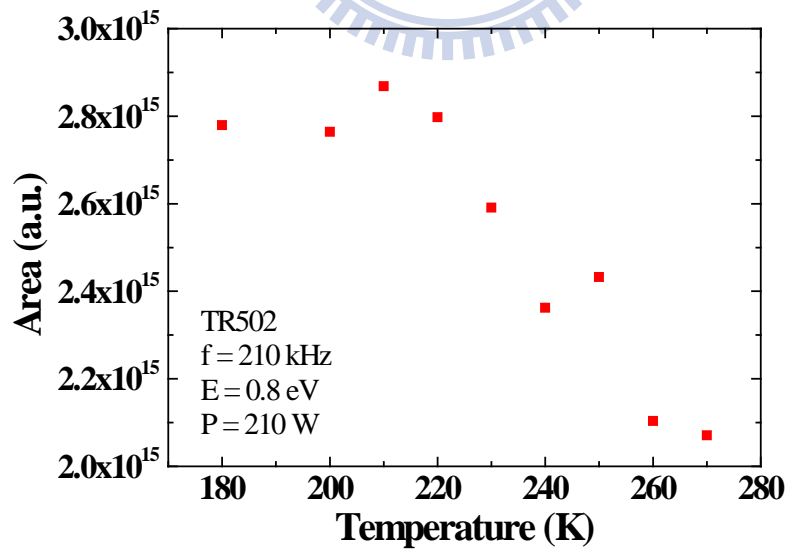


圖 4-16 濃度訊號積分與溫度之關係圖

第5章 光激發電性量測

此章節將在進行電性量測的同時，外加連續光源於樣品，利用照光光源能量的不同(0.7 eV ~ 1.56 eV)，藉此了解光電容、光電流和輻射復合三者的關係，並加入 rate equation 作進一步描述。

5-1 光激發電性量測原理

以圖 5-1 來作光激發電性量測原理的說明。在電性量測同時照射一連續光源($h\nu$)，並在足以被光源激發的能階位置中，產生成對的電子電洞對(電子的濃度= Δn ，電洞的濃度= Δp)，此時施加逆向偏壓於結構中，由於 quantum confined stark effect[32]效應顯著，使得電子和電洞波函數重疊率降低，造成輻射復合的機率下降，進而使電子、電洞從結構中躍遷出來。因電子與電洞分別的有效質量(effective mass)不同，進而影響兩者的躍遷時間的大小($\tau_{p,esc} > \tau_{n,esc}$)，這裡以 $\tau_{n,esc}$ 、 $\tau_{p,esc}$ 分別表示電子、電洞的躍遷時間常數(time constant)。照射光源產生的電子電洞濃度與時間的變化關係可以下式的 rate equation 作表示：

$$\frac{\partial(\Delta n)}{\partial t} = G - \frac{\Delta n}{\tau_{n,esc}} - \frac{\Delta n \Delta p}{\tau_{rec}} \quad (5-1)$$

$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial t} = G - \frac{\Delta p}{\tau_{p,esc}} - \frac{\Delta n \Delta p}{\tau_{rec}} \quad (5-2)$$

其中， $\partial(\Delta n)/\partial t$ 與 $\partial(\Delta p)/\partial t$ 表示在單位時間內電子與電洞的濃度改變量， G 為照光時產生電子電洞對的速率， $\Delta n/\tau_{n,esc}$ 、 $\Delta p/\tau_{p,esc}$ 分別為電子與電洞的躍遷速率， $(\Delta n \Delta p)/\tau_{rec}$ 為電子電洞對輻射復合的速率。在此章節中，將以在穩態($t = 0$)的情形作分析探討，因此將 rate equation 簡化成以下關係式：

$$G = \frac{\Delta n}{\tau_{n,esc}} + \frac{\Delta n \Delta p}{\tau_{rec}} \quad (5-3)$$

$$G = \frac{\Delta p}{\tau_{p,esc}} + \frac{\Delta n \Delta p}{\tau_{rec}} \quad (5-4)$$

這兩個式子代表在一個固定的照射光源下，亦即產生速率(G)固定，會等於電子、電

洞躍遷速率加上電子電洞對形成輻射復合的速率。當環境達穩態時(即固定量測偏壓下作探討)，電子、電洞躍遷速率受各逆向偏壓改變而改變，能讓電性量測得到光電流訊號(photocurrent, I_{PC})以及光電容訊號(photocapacitance, C_{PC})的不同。此時，電洞的躍遷速率($\Delta p/\tau_{p,esc}$)主導光電流訊號的產生，即當外加場的大小使電子電洞躍遷出來的量是成對的，電子、電洞分別往正極和負極流動，則會形成電流迴路貢獻成光電流的訊號；然而，當結構中有淨電荷存在時(即 $\Delta n/\tau_{n,esc} - \Delta p/\tau_{p,esc}$)，電子的躍遷速率則會主導光電容訊號的產生；最後，不因外加偏壓躍遷出的電子電洞對，則會形成輻射復合貢獻於光性量測時的 PL 訊號。

5-2 Photocurrent 分析

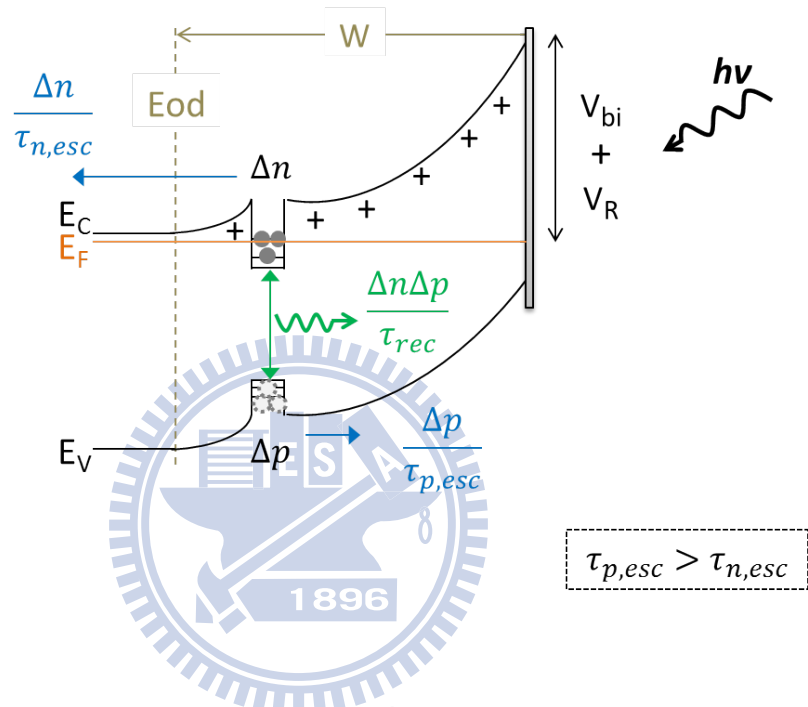
這裡以 20 meV 為間隔，照射光源外加功率為 180 W，能量範圍從 0.7 eV (1771 nm) 至 1.56 eV (795 nm)之間，做 I-V 量測，藉著不同逆向偏壓改變，觀察低溫至高溫(77 K、100 K、200 K 和 300 K)光電流變化情形。這裡將照光時的電流訊號相扣於不照光時的電流訊號，而得到光電流的訊號，如圖 5-2(a)-(d)。從溫度的變化來觀察，可發現隨著溫度的上升，光電流強度隨之上升，至 300K 時強度為最大，這是由於在低溫時電子電洞受侷限能力較佳，而不易於載子躍遷形成電流迴路；在高溫時量測，因熱使得載子躍遷速率變快，電子、電洞更容易躍遷出結構，當電子與電洞躍遷出的量值相等時，則能形成電流迴路。從偏壓的觀點觀察定溫度下的量測(如圖 5-2(d))，也能發現到隨逆向偏壓越大光電流訊號強度越大，這是由於偏壓加越大，能帶彎曲狀況越明顯，使得電子電洞更容易躍遷出來。由此可說明，利用提升溫度以及改變逆向偏壓大小的方式皆能控制載子躍遷速率，光電流隨溫度及逆向偏壓的變化也在文獻中可觀察到[33,34]，文獻也提及載子躍遷機制能藉由熱激發和穿隧的機制來做引證[34]。

5-3 Photocapacitance 分析

在光電容的分析中，同樣以 20 meV 為間隔，照射光源外加功率為 180 W，能量範圍從 0.7 eV (1771 nm)至 1.56 eV (795 nm)之間，做 C-V 量測，並將照光的電容值與不照光的電容實驗值在相同逆向偏壓下作相減，而得到圖 5-3(a)-(f)。圖 5-3(a)-(f)分別代表的是量測溫度從低溫(77 K)至高溫(300 K)環境溫度的改變，並定量測頻率為 100 kHz。從圖中可以觀察到隨著溫度升高，整體的光電容值有下降的趨勢，這是由於電子、電洞受溫度上升的影響，其受侷限的能力隨之下降，因此在高溫量測時，電子與電洞容易躍遷出結構。然而，在前一小節已說明，當電子電洞躍遷出的量值相等時，會貢獻成光電流的訊號，所以在高溫時量測光電容的訊號則會相對減弱。

另外，在文獻中觀察到，在 GaAs 的塊材(bulk)中可以知道，含有 EL2 缺陷的塊材中，所呈現的光電容訊號會隨著光源能量的增加而上升[35]，如圖 5-4。然而，在本研究的低溫量測觀察中，特別可以發現在 1.0 eV 至 1.2 eV 之間電容值的訊號有下降的現象。這裡推測下降的原因為，照射 1.0 eV 至 1.2 eV 之間的光源，會被結構中 InAs 量子點所吸收，然而，在低溫時量子點中載子輻射復合的速率是遠快於載子躍遷的速率[34]，因此對於光電容的訊號貢獻是相對減弱的，如圖 5-5。再來，取偏壓為 -2 V 之下各溫度的光電容量測(圖 5-6 所示)，同樣觀察 1.0 eV 至 1.2 eV 之間能量範圍，雖然在整體的光電容值是隨溫度上升而下降的，但在這區間(1.0 eV ~ 1.2 eV)的光電容值是隨著溫度上升而上升的。這是由於在量子點中輻射復合速率隨著溫度增加而逐漸變慢，在 PL 的量測中(圖 3-1)可以觀察到 PL 訊號強度隨溫度上升而減弱，這也證明在量子點在高溫時的輻射復合能力較差。因此在光電容貢獻上，隨溫度升高，其訊號強度也隨之增加。

At constant Bias



$$\begin{cases}
 I_{PC} : \text{Photocurrent} \rightarrow \frac{\Delta p}{\tau_{p,esc}} \\
 C_{PC} : \text{Photocapacitance} \rightarrow \frac{\Delta n}{\tau_{n,esc}} - \frac{\Delta p}{\tau_{p,esc}}
 \end{cases}$$

圖 5-1 光激發電性量測原理

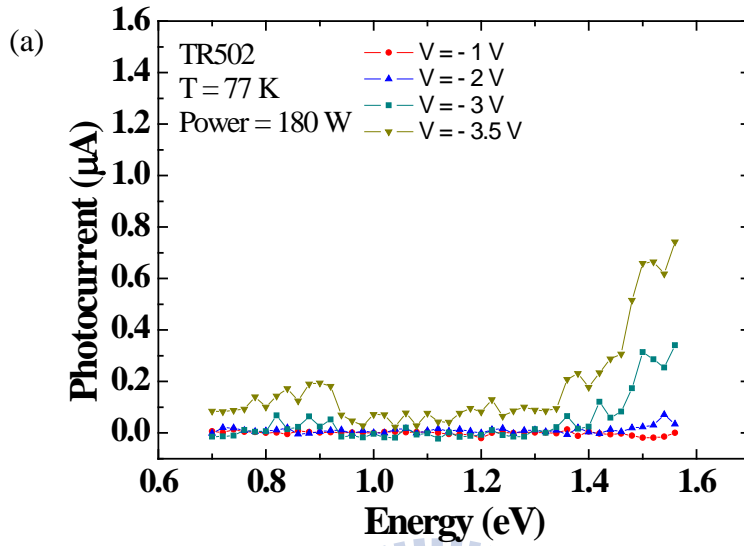


圖 5-2(a) 變溫之光電流分析

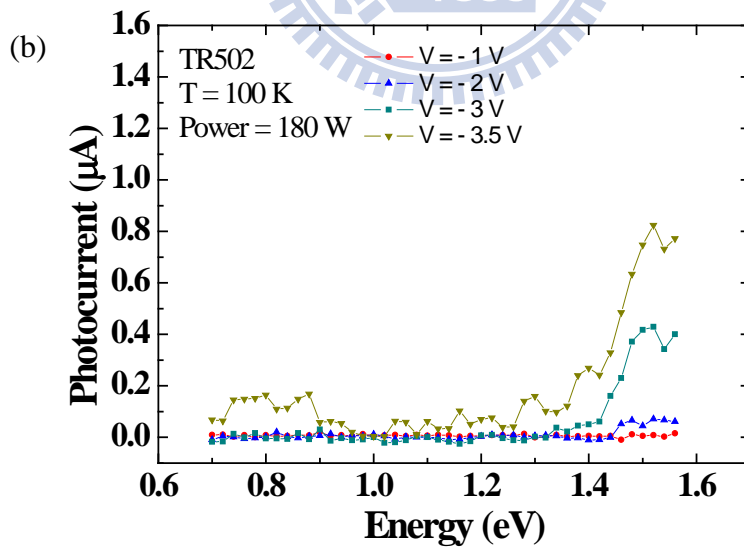


圖 5-2(b) 變溫之光電流分析

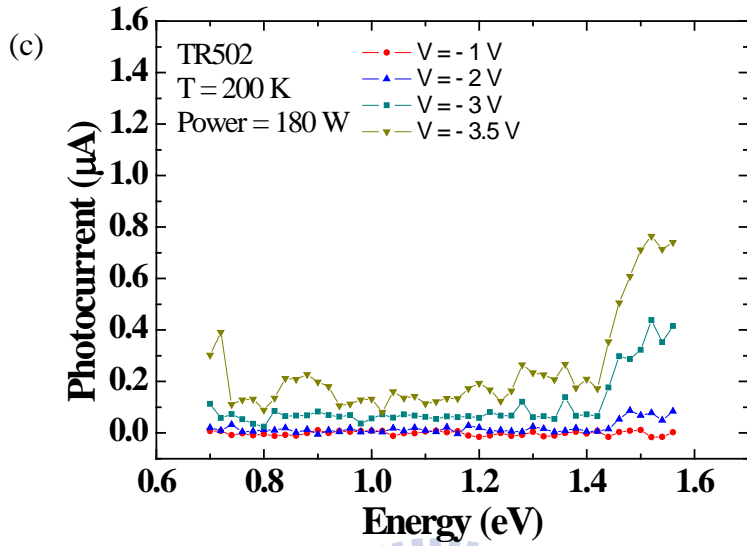


圖 5-2(c) 變溫之光電流分析

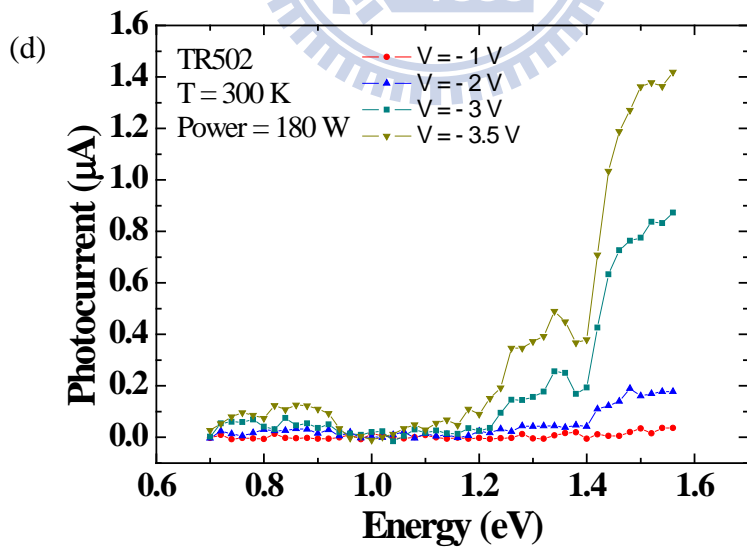


圖 5-2(d) 變溫之光電流分析

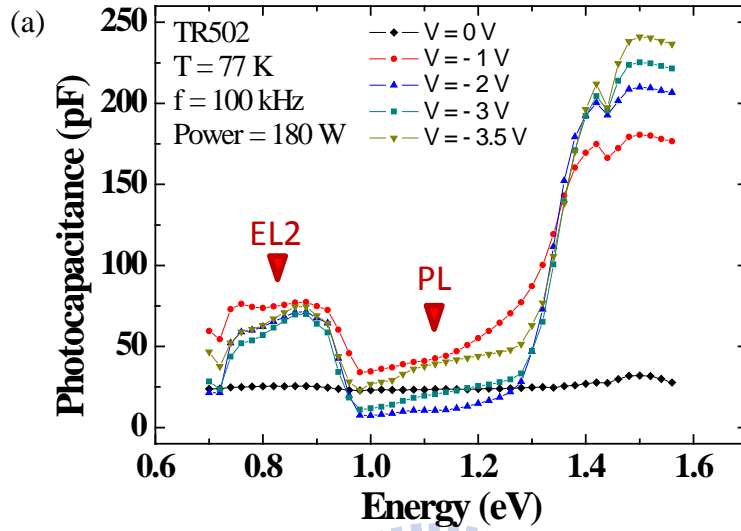


圖 5-3(a) 變溫之光電容分析

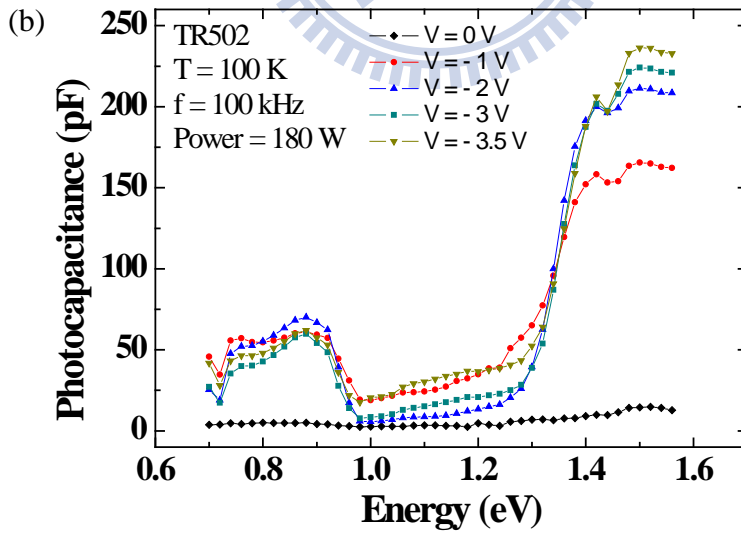


圖 5-3(b) 變溫之光電容分析

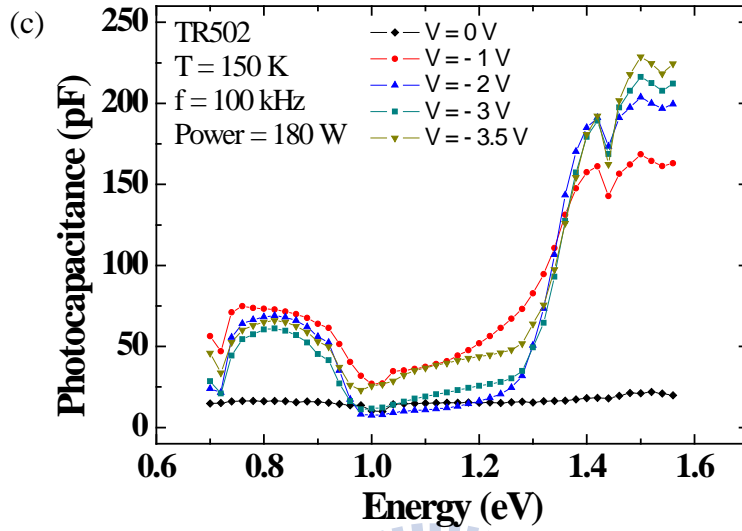


圖 5-3(c) 變溫之光電容分析

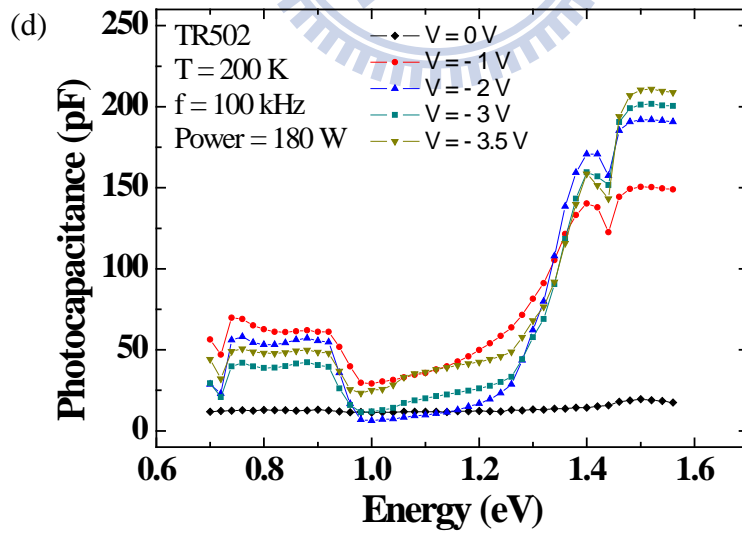


圖 5-3(d) 變溫之光電容分析

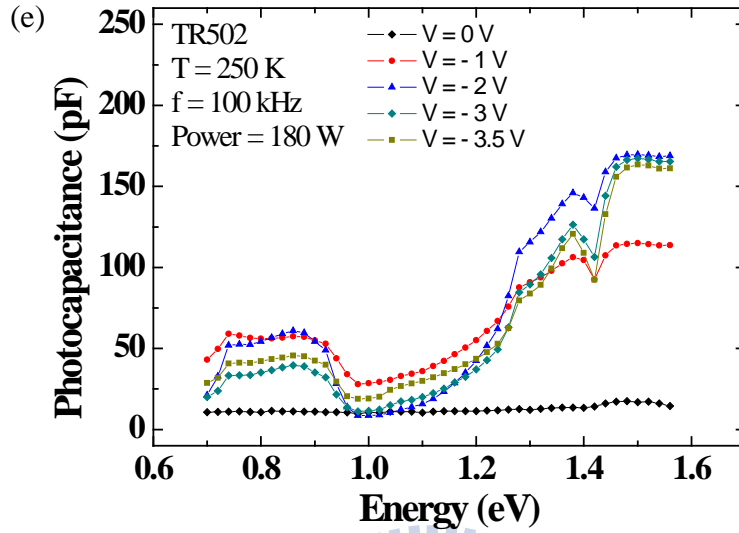


圖 5-3(e) 變溫之光電容分析

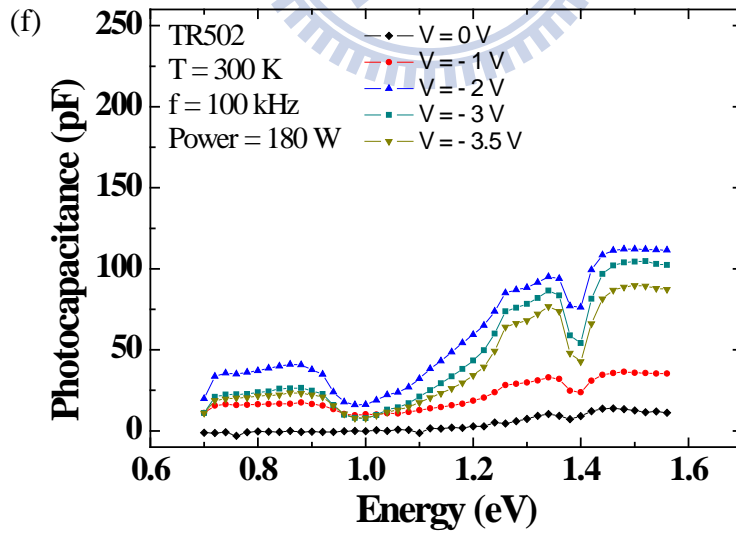


圖 5-3(f) 變溫之光電容分析

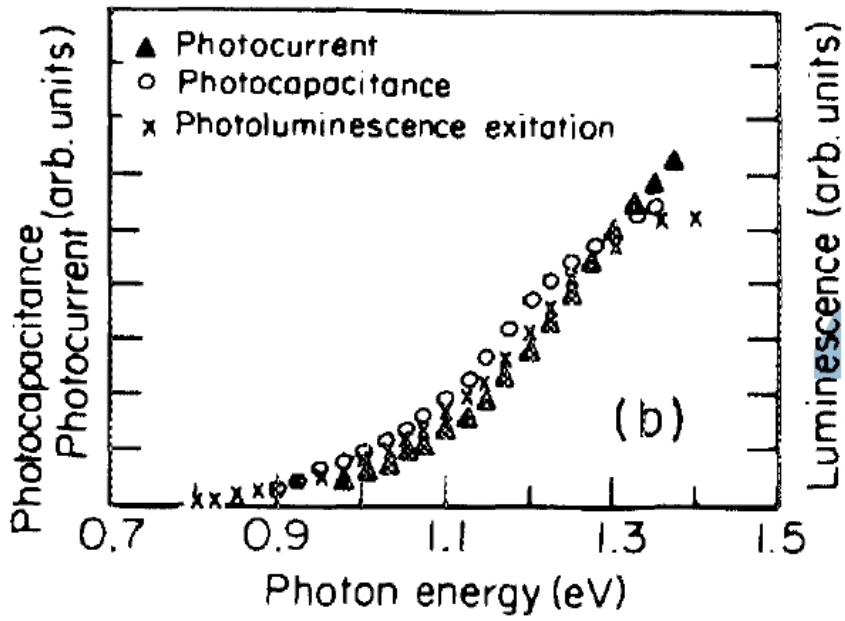


圖 5-4 GaAs 塊材光電流與光電容分析[35]

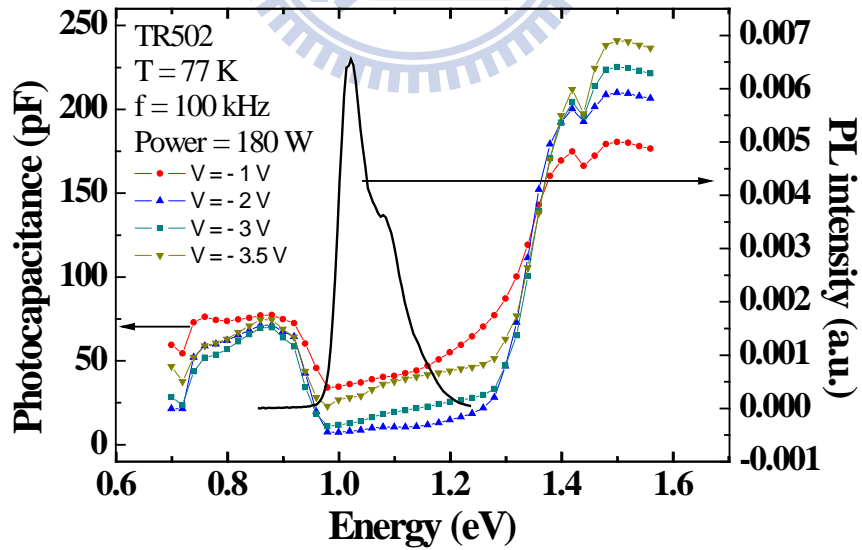


圖 5-5 光電容訊號與 PL 訊號比較圖

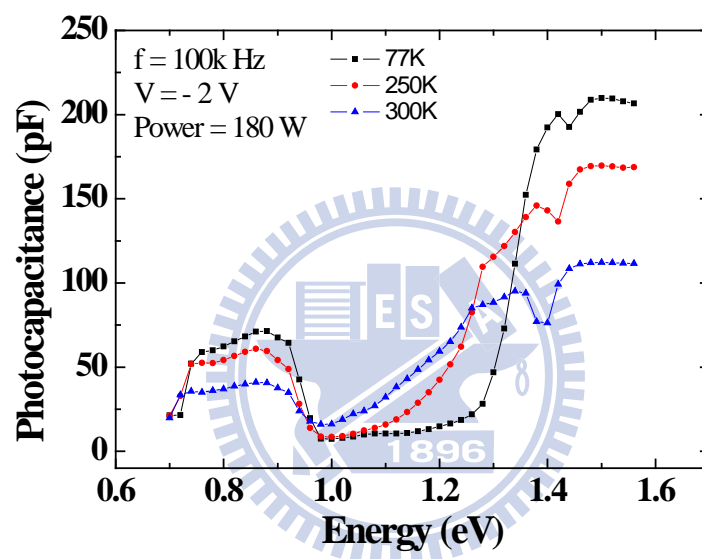


圖 5-6 變溫之光電容分析比較

第6章 結論

本論文主要研究長晶厚度 2.2 ML InAs/GaAs 單一量子點，藉由有無照射光源下瞭解樣品中 EL2 缺陷的影響。一開始透過光性分析了解低溫時，樣品中量子點基態及第一激發態放射訊號波長分別位於 1.02 eV 與 1.07 eV 處。藉由變頻率 C-V 分析、變溫 C-V 分析與 C-t 分析中觀察到缺陷訊號的電容值貢獻。並從變溫 C-V 分析中觀察到此缺陷能階訊號受熱激發之直流偏壓量測影響，在低溫時，因缺陷訊號躍遷速率緩慢，以至於在直流偏壓調變時量測不到其訊號；當溫度升至高溫時，缺陷訊號受熱激發主導而躍遷速率加快，因此當直流偏壓掃過缺陷能階時，在費米能階之上的電子則會躍遷出至空乏區邊緣，使結構中的背景濃度提升，導致電容值訊號增加。再來，進一步以 DLTS 分析確認樣品中缺陷來源：為在成長 top GaAs layer 時，以低溫方式磊晶，而 As 會取代 Ga (As_{Ga} anti-site)，則容易形成 EL2 的缺陷。在此針對 DLTS 分析之缺陷訊號作缺陷濃度計算，與 C-V 分析作結合，整理出局部侷限能階之缺陷濃度估計，並發現缺陷濃度相當高接近於長晶時摻雜之背景濃度。

接著，利用照射光源能量 0.8 eV 以足於激發 EL2 缺陷能階。在低溫下改變光源功率作 C-V 分析，可觀察出大量的電容值抬升，這裡認為電容值抬升為缺陷訊號所影響，改變逆向偏壓使之測量到缺陷訊號的行為類似於 DLTS 之量測。在此也根據 Shockley-Read-Hall 復合理論，引入照射光源下光激發之捕捉截面積及照光強度與躍遷時間常數的關係，進一步描述載子的躍遷機制。重新整理之電子躍遷時間常數的關係與照光項有關，能有效說明缺陷訊號及量子點訊號受照光影響其電子躍遷速率變快的情形。並且也能從照光的 DLTS 量測中可以直接觀察到此現象。除此之外，照光對於量子點的影響，能改變其電子佔據機率，當照光強度愈強時，電子佔據能態的機率有下降的趨勢，這從縱深分佈圖中能明顯看到其現象。而當逆向偏壓調變到量子點時，必須考慮 InAs/GaAs 異質界面處的位能障，缺陷能階之電子受照光影響躍遷至傳導帶，則會阻擋於此位能障前的位置，當費米能階交流頻率調變時，需考慮其對於電容值的貢獻。然而，當照光功率大時，此電荷訊號會造成在縱深分佈

圖上，載子堆積訊號位置的誤判，因此需重新檢視縱深分佈圖的意義。

最後，利用照光光源能量的不同(0.7 eV ~ 1.56 eV)，藉此了解光電容、光電流和輻射復合三者的關係，並加入 rate equation 作進一步描述。因電子與電洞有效質量不同，導致電子躍遷時間會快於電洞躍遷時間。在穩態下，電洞躍遷速率主導光電流訊號產生，電子躍遷速率主導光電容訊號產生，而不因外加偏壓躍遷出的電子電洞對，則會形成輻射復合貢獻於光性量測時的 PL 訊號。比較光電流與光電容的訊號，在低溫下，因電洞躍遷速率很慢，結構中產生大量淨電荷，主導光電容的訊號量；隨溫度逐漸增加至高溫，受熱激發影響，電洞躍遷速率增加，電子、電洞分別往正、負極流動，則形成光電流訊號；而在量子點能吸收的光源波段下，因電子電洞對輻射復合速率主導，因此在此波段下，光電流及光電容訊號強度皆為較弱。



參考文獻

- [1] D. Bimberg, N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, Zh. I. Alferov, P. S. Kop'ev, and V. M. Ustinov, *IEEE Journal of selected Topics in Quantum Electronic* **3**, 196 (1997).
- [2] D. L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O. B. Shchekin, and D. G. Deppe, *Applied Physics Letters* **73**, 2564 (1998).
- [3] H. Z. Song, T. Usuki, S. Hirose, K. Takemoto, Y. Nakata, N. Yokoyama and Y. Sakuma, *Applied Physics Letters* **86**, 113118 (2005).
- [4] T. Lundstrom, W. Schoenfeld, H. Lee and P. M. Petroff, *Science* **286**, 2312 (1999).
- [5] Miro Kroutvar, Yann Ducommun, Dominik Heiss, Max Bichler, Dieter Schuh, Gerhard Abstreiter and Jonathan J. Finley, *Nature* **432**, 81 (2004).
- [6] Daniel Loss and David P. DiVincenzo, *Physical Review A* **57**, 120 (1998).
- [7] Mark S. Sherwin, Atac Imamoglu, and Thomas Montroy, *Physical Review A* **60**, 3508 (1999).
- [8] S. Maimon, E. Finkman, G. Bahir, S. E. Schacham, J. M. Garcia and P. M. Petroff, *Applied Physics Letters* **73**, 2003 (1998).
- [9] J.-Y. Marzin, J.-M. Gerard, A. Izrael, and D. Barrier, *Physical Review Letters* **73**, 716 (1994).
- [10] D. Leonard, M. Krishnamurthy, S. Fafard, J. I. Merz, and P. M. Petroff, *Journal of Vacuum Science and Technology B* **12**, 1063 (1994)
- [11] B. Daudin, F. Widmann, G. Feuillet, Y. Samson, M. Arlery, and J. L. Rouvière, *Physical Review B* **56**, 7069 (1997).
- [12] Olga I. Mičić, Julian Sprague, Zhenghao Lu, and Arthur J. Nozik, *Applied Physics Letters* **68**, 3150 (1996).
- [13] A. I. Ekimov, F. Hache, M. C. Schanne-Klein, D. Ricard, C. Flytzanis, I. A. Kudryavtsev, T. V. Yazeva, A. V. Rodina, and Al. L. Efros, *Journal of the Optical*

- Society of America B* **10**, 100 (1993).
- [14] I. N. Stranski, L. Krastanow, Akad. der Wiss. Wien, Mathem. Naturwiss. Kl. IIb Chemie **146**, 797 (1937).
- [15] Y. Nakata, K. Mukai, M. Sugawara, K. Ohtsubo, H. Ishikawa and N. Yokoyama, *Journal of Crystal Growth* **208**, 93 (2000).
- [16] C. M. A. Kapteyn, F. Heinrichsdorff, O. Stier, R. Heitz, M. Grundmann, N. D. Zakharov and D. Bimberg, *Physical Review B* **60**, 14265 (1999).
- [17] C. M. A. Kapteyn, M. Lion, R. Heitz, D. Bimberg, P. N. Brunkov, B. V. Volovik, S. G. Konnikov, A. R. Kovsh, and V. M. Ustinov, *Applied Physics Letters* **76**, 1573 (2000).
- [18] R. J. Luyken, A. Lorke, A. O. Govorov, J. P. Kotthaus, G. Medeiros-Ribeiro and P. M. Petroff, *Applied Physics Letters* **74**, 2486 (1999).
- [19] D.V. Lang, *Journal of Applied Physics* **45**, 3023 (1974).
- [20] Dieter K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization"-2nd. (New York :Wiley 1998).
- [21] 張佑誠, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "應力鬆弛對 InAs/InGaAs 量子點特性之影響" (2010).
- [22] 陳宜屏, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "氮含量與砷化銦厚度對砷化銦/砷化鎵量子點光性影響" (2003).
- [23] Y. P. Varshni, *Physica* **34**, 149 (1967).
- [24] 陳育志, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "摻雜不同氮含量的 InAs/InGaAs 量子點與不同長晶速率的 InGaAsN 單一量子井之電性研究" (2003).
- [25] G. M. Martin, A. Mitonneau and A. Mircea, *Electronics Letters* **13**, 191 (1977).
- [26] A. C. Irvine and D. W. Palmer, *Physical Review Letters* **68**, 2168 (1992).
- [27] Mikhail V. Maximov, Igor V. Kochnev, Yuri M. Shernyakov, Sergei V. Zaitsev, Nikita Yu. Gordeev, Andrew F. Tsatsul'nikov, Alexey V. Sakharov, Igor L.

- Krestnikov, Petr S. Kop'ev, Zhores I. Alferov, Nikolai N. Ledentsov, Dieter Bimberg, Alexander O. Kosogov, Peter Werner and Ulrich Gösele, *Japanese Journal of Applied Physics* **36**, 4221 (1997).
- [28] Ming-Chin Chen, Hao-Hsiung Lin, and Chih-Wei Shie, *Journal of Applied Physics* **83**, 3061 (1997).
- [29] M. O. Manasreh, D. C. Look, K. R. Evans and C. E. Stutz, *Physical Review B* **41**, 10272 (1990).
- [30] P. Leyral, G. Vincent, A. Nouailhat, G. Guillot, *Solid State Communications* **42**, 67 (1982).
- [31] T. Wosinski, *Applied Physics A* **36**, 213 (1985).
- [32] Shu-Shen Li and Jian-Bai Xia, *Journal of Applied Physics* **88**, 7171 (2000).
- [33] A. F. G. Monte and Fanyao Qu, *Journal of Applied Physics* **109**, 053722 (2011).
- [34] W.-H. Chang, T. M. Hsu, C. C. Huang, S. L. Hsu, C. Y. Lai, N. T. Yeh, T. E. Nee, and J.-I. Chyi, *Physical Review B* **62**, 6959 (2000).
- [35] M. Skowronski, J. Lagowski, and H. C. Gatos, *Journal of Applied Physics* **59**, 2451 (1986).