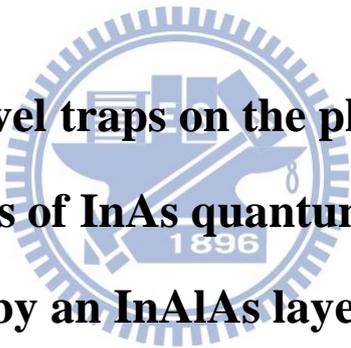


國立交通大學

電子物理學系

碩士論文

深層能階對覆蓋 InAlAs 層之 InAs 量子點  
的光電容特性分析



**Role of deep level traps on the photocapacitance  
characteristics of InAs quantum dots covered  
by an InAlAs layer**

研究生：楊家偉

指導教授：陳振芳 博士

中華民國一百零二年七月

深層能階對覆蓋 InAlAs 層之 InAs 量子點  
的光電容特性分析

Role of deep level traps on the photocapacitance characteristics of  
InAs quantum dots covered by an InAlAs layer

研究生：楊家偉

Student : Chia Wei Yang

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 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零二年七月

# 深層能階對覆蓋 InAlAs 層之 InAs 量子點 的光電容特性分析

研究生：楊家偉

指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學電子物理所

## 摘要

本論文主要是在討論在成長 2.4ML(monolayer, ML)的 InAs/GaAs 的量子點 (quantum dots, QDs)上再覆蓋一層不同厚度 In<sub>0.14</sub>AlAs (10 Å、20 Å、54 Å)的樣品。先透過光激發螢光(photoluminescence, PL)量測，探討基本的光性，找出量子點的基態跟第一激發態放射訊號所在的能量位置。在電容-電壓量測(Capacitance - voltage measurement, C-V)時，若改變電壓的掃動速率，在高溫時發現一個遠慢於量子點躍遷速度的躍遷機制，推測為缺陷所造成的。從變溫的 C-V 分析中，缺陷電子受熱激發躍遷至傳導帶，由於在 QDs 表面有覆蓋層 InAlAs/GaAs 形成的位障，電子將難以跨越 InAlAs 位障而被侷限在 QDs 與表面間的 top GaAs 層，中和此區的正電荷形成中性區(Neutral region)，造成空乏區回縮影響量測到的電容值。隨 InAlAs 層厚度增加，電容值會有更大的變化。在 C-V 量測時藉由改變電壓來回掃動的方向，亦可得到不一樣的 C-V 曲線，也就是所謂的電滯曲線(hysteresis loop)。藉由電滯曲線的量測亦可再度驗證缺陷載子躍遷的機制。再來，藉由能量 0.9 eV ~ 1.56 eV 的光電容發現在 1.3 eV 的能量會有最顯著的光電容抬升，推測為直接激發缺陷的能階造成的。從能量 1.36 eV 的 LED 為外加光源的 C-V 分析中發現，在打光下，整個系統分成 Schottky band (蕭基界面至 InAlAs 層的能帶結構)跟 Quantum band (量子點附近的能帶結構)兩部分；當中性區形成時，降低了 Schottky band 的壓降，為了維持整個系統

的電壓平衡，必須使 Quantum band 增加壓降，使費米能階調變到量子點內的載子，因此造成顯著的光電容抬升。此外，從能量 1.03 eV 和 1.16 eV 的 LED 為外加光源的 C-V 分析中，發現缺陷載子躍遷至量子點的可能性，並隨掃動偏壓速率的響應，也證明這樣的現象。藉由改變溫度、外加光源能量、掃動偏壓速率等條件，瞭解深層缺陷能階和 InAlAs 覆蓋層對 InAs 量子點光電特性的影響。



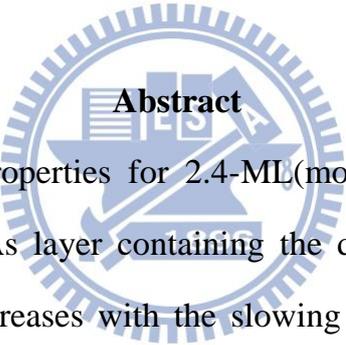
# **Role of deep level traps on the photocapacitance characteristics of InAs quantum dots covered by an InAlAs layer**

Student: Ming-Fang Hsieh

Advisor: Dr. Jenn-Fang Chen

Department of Electrophysics

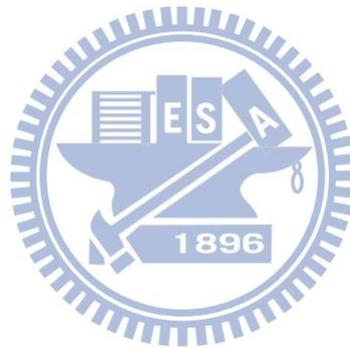
National Chiao Tung University



## **Abstract**

Electrical and optical properties for 2.4-ML(monolayer) InAs quantum dots (QDs) covered by an InAlAs layer containing the deep level traps is presented. Initially, the capacitance increases with the slowing sweeping rate of bias at the temperature of 280K by capacitance-voltage (C-V) measurement. It demonstrates the InAs QDs containing the deep level traps. The deep level traps are observed at the temperature dependence C-V profiling since the electrons emit easily at high temperature. The electrons from the deep level traps neutralize the positive charges on top GaAs due to the barrier of InAlAs capping layer. Because of the “neutral region”, the depletion region length change and the capacitance by C-V measurement increase. In addition, a phenomenon of electric hysteresis loop can be observed by C-V measurements under different bias sweeping direction. The measurements of electric hysteresis also support the mechanism of carriers transfer mentioned above. And then we investigate the photocapacitance with different

illuminating energy. For the illuminating energy of 1.3 eV, a large photocapacitance produces due to the deep level defects. In contrast with the illumination energy of 0.9 ~ 1.3 eV, an interaction between the QDs and the deep traps is found by the concentrations profiles. In summary, through the C-V profiling under different conditions, such as temperature, illumination, and the rate of sweeping, the role of the deep level traps and InAlAs capping layer on the opto-electrical properties of InAs QDs was studied.



# 致謝

畢業了！有點懶得打致謝，但不打一頁論文不讓我上傳。兩年前的七月來到了新竹這麼陌生的環境，大學路很長，太陽很大，在三顧茅廬後很幸運地進到了陳振芳老師實驗室，實驗室的大家打破了我對研究生的印象，每個人除了研究外也是多才多藝，籃球、棒球、游泳…等等。大家一起經歷了小旅遊、實驗室盃運動會、無數次的小咪、大咪、一起熬夜趕實驗，歡樂的氣氛讓我們忘記研究工作的辛苦，一起成長、進步。

另一個支持我碩士生涯最大的動力，就是”街舞”。在交大，認識了來自於大學部、研究所，不同科系的朋友們，因為擁有共同的興趣組成 Hip Hop 街舞團體”Rush Duck”，我們定期的聚會和團練，也去參加了大大小小的比賽，準備比賽過程中難免有衝突、意見不合，但這些反而讓我們更了解彼此，凝聚了彼此的感情。

接著馬上就要進入職場了，期望能在工作外能維持對街舞的熱情，更不能忘記這些陪我度過學生生涯的每一人、每一事。

家偉 於新竹交大

2013/08/05

# 目錄

中文摘要	i
英文摘要	iii
致謝	v
目錄	vi
圖目錄	viii
表目錄	xi

## 第 1 章 緒論

1-1 量子點材料簡介	1
1-2 研究動機	2
1-3 論文架構	2

## 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	3
2-2 蕭基界面及歐姆界面之電極製作	3
2-3 量測系統簡介	5
2-3-1 光激發螢光量測系統 (Photoluminescence, PL)	5
2-3-2 電容電壓量測 (Capacitance – voltage measurement, C-V)	6
2-3-3 電流電壓量測 (Current – voltage measurement, I-V)	7
2-3-4 暫態電容量測 (Transient measurement, C-t)	7
2-3-5 深層能階暫態頻譜量測(DLTS)	8
2-3-6 光激發電性量測系統	9

第 3 章	光電特性量測結果與分析	13
3-1	InAs/GaAs 量子點光性分析	13
3-2	確立缺陷存在於 InAs/GaAs 量子點中	14
3-2-1	變掃動偏壓速率 C-V 分析	14
3-2-2	變溫 C-V 分析	14
3-2-3	逆掃 C-V 量測	16
第 4 章	光激發電性量測結果與分析	36
4-1	Photocapacitance	36
4-2	照射光源對缺陷之影響	36
4-3	照射光源對於量子點和缺陷的交互作用	38
第五章	結論	50
	參考文獻	52



## 圖目錄

圖 2-1 樣品之結構圖	10
圖 2-2 樣品之能帶圖	11
圖 2-3 光激發螢光量測系統(PL)	12
圖 2-4 光激發量測架構	12
圖 3-1 (a) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )隨溫度變化之 PL 光譜圖	18
(b) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )隨溫度變化之 PL 光譜圖	
(c) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )隨溫度變化之 PL 光譜圖	
(d) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )隨溫度變化之 PL 光譜圖	
圖 3-2 各樣品 PL 發光能量位置之能帶圖	20
圖 3-3 (a) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )低溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖	21
(b) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )高溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖	
圖 3-4 (a) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )低溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖	22
(b) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )高溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖	
圖 3-5 (a) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )低溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖	23
(b) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )高溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖	
圖 3-6 (a) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )低溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖	24
(b) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )高溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖	
圖 3-7 (a) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )定頻率 100kHz 之變溫 C-V 圖	25
(b) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )定頻率 100kHz 之縱深分布圖	
圖 3-8 (a) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之變溫 C-V 圖	26
(b) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之縱深分布圖	
圖 3-9 (a) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之變溫 C-V 圖	27
(b) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之縱深分布圖	
圖 3-10 (a) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之變溫 C-V 圖	28

(b) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之縱深分布圖	
圖 3-11 缺陷訊號直流偏壓影響載子躍遷能帶圖	29
圖 3-12 (a)SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )之變溫 I-V 圖	30
(b)SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )之變溫 I-V 圖	
(c)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )之變溫 I-V 圖	
(d)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )之變溫 I-V 圖	
圖 3-13 (a) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )低溫 80K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖	32
(b) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )高溫 300K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖	
圖 3-14 (a) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )低溫 80K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖	33
(b) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )高溫 300K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖	
圖 3-15 (a) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )低溫 80K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖	34
(b) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )高溫 300K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖	
圖 3-16 SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )各溫度定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖	35
圖 4-1(a) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ ) 低溫 77K 變偏壓之光電容	39
(b) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ ) 低溫 77K 變偏壓之光電容	
(c) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ ) 低溫 77K 變偏壓之光電容	
(d) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 變偏壓之光電容	
圖 4-2(a) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ ) 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ )	41
變光強度之 C-V 圖	
(b) SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ ) 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ )	
變光強度之縱深分布圖	
圖 4-3(a) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ ) 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ )	42
變光強度之 C-V 圖	
(b) SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ ) 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ )	
變光強度之縱深分布圖	
圖 4-4(a) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ ) 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ )	43
變光強度之 C-V 圖	

(b) SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ ) 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ )

變光強度之縱深分布圖

圖 4-5(a) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ ) 44

變光強度之 C-V 圖

(b) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ )

變光強度之縱深分布圖

圖 4-6 照光下缺陷訊號直流偏壓影響載子躍遷能帶圖 45

圖 4-7(a) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.03\text{ eV}$ ) 46

變光強度之 C-V 圖縱深分布圖

(b) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.03\text{ eV}$ )

變光強度之 C-V 圖縱深分布圖

圖 4-8(a) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.16\text{ eV}$ ) 47

變光強度之 C-V 圖

(b) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.16\text{ eV}$ )

變光強度之縱深分布圖

圖 4-9(a) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.03\text{ eV}$ ) 48

變掃動偏壓速率之 C-V 圖

(b) SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.03\text{ eV}$ )

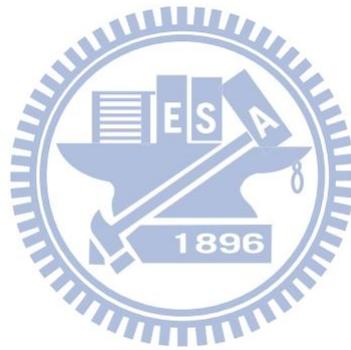
變掃動偏壓速率之縱深分布圖

圖 4-10 考慮缺陷躍遷之能帶圖 49

## 表目錄

表 2-1 各樣品對應之結構厚度

11



# 第1章 緒論

## 1-1 量子點材料簡介

量子點(quantum dot)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，由於量子點在能帶結構上的特殊性，目前許多研究團隊都它感到非常有興趣。至今已經有相當多的運用，例如以In(Ga)As為量子點材料，延長量子點的放射波長至 $1.3\mu\text{m}$ 甚至到 $1.55\mu\text{m}$ ，在通訊元件方面上有很大的貢獻[1]。其它運用像是量子點雷射[2,3]、紅外光偵測器[4,5]、光記憶體結構[6,7]、光二極體(LEDs)[8]...等等。

有鑑於以往利用蝕刻(Etching)來形成量子點的方法在過程中容易產生缺陷(trap)，影響品質，因而目前量子點長晶主要是利用應力誘發的方式，分成分子束磊晶(Molecular Beam Epitaxy, MBE)、有機金屬氣相沉積(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)兩種。而量子點的成長方式目前最常用的是層接而後島嶼(S-K mode, Stranski-Krastanow mode)[9]，以 S-K mode 成長的過程中，會先長成幾個單層，接下來會形成二維結構的沾濕層(wetting layer)，但是隨著沾濕層的厚度增加，由於晶格不匹配而應力持續上升，為釋放此應力，其會自我聚集成零維島嶼狀量子點，因此這種由二維轉三維的量子點型態又稱自聚式量子點 (self-assembled QDs) [10]，這種成長方式有效的提供高密度、高均勻度及無缺陷的量子點。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

近年來實驗室針對 InAs/GaAs 量子點的樣品做了許多探討與分析，在特定能量光源的照射下，隨著結構的差異，每個樣品有不同的光電容大小。這一系列在 InAs 量子點覆蓋不同 In<sub>0.14</sub>AlAs 厚度的樣品，會發現光電容的變化量和厚度成正相關的關係。因此，本論文使用不同能量和不同光強度的外加照射光源作為研究的主題，探討載子躍遷的機制、量子點和缺陷扮演的角色以及覆蓋不同 In<sub>0.14</sub>AlAs 厚度對載子侷限能力的影響。

## 1-3 論文架構

本論文主要是在討論在成長 2.4ML(monolayer, ML)的 InAs/GaAs 的量子點上再覆蓋一層不同厚度的 In<sub>0.14</sub>AlAs (10Å、20Å、54Å)，藉由光性和電性量測探討其基本特性，並藉由外加光源來了解其中載子躍遷的機制。

### 第一章 緒論

對量子點材料作基本的介紹，以及說明研究動機和論文架構。

### 第二章 實驗樣品製備與量測系統簡介

介紹本論文的樣品來源、做電性量測所需的正、負電極的製作過程以及各個實驗分析所需的儀器設備。

### 第三章 光電特性量測結果與分析

藉由基本的光電特性分析，確定缺陷的存在，並藉由改變量測溫度來了解缺陷載子躍遷受溫度的影響，進而比較不同 In<sub>0.14</sub>AlAs 厚度的樣品在侷限載子能力上的差異。

### 第四章 光激發電性量測結果與分析

透過改變照射光源能量(0.9 eV ~ 1.56eV)激發不同的能階，配合 C-V 電性量測觀察載子訊號的改變，進而推測量子點與缺陷的交互作用。

### 第五章 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 $600^{\circ}\text{C}$ ，之後依序成長 2.4ML InAs 的量子點(QD)，接著覆蓋不同厚度的  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ ，然後覆蓋一層  $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  量子井(QW)在  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  上面，活性層的長晶溫度約為  $480^{\circ}\text{C}$ ；最後再覆蓋  $0.3\ \mu\text{m}$  矽摻雜  $n$ -GaAs buffer layer，參考圖 2-1，圖 2-2。

樣品的長晶條件表：

編號	n-GaAs 層 摻雜濃度	InAs 長晶速率	$\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 層厚度
SH332	$5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$0.26\text{\AA}/\text{sec}$	$0\ \text{\AA}$
SH331	$8 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$0.26\text{\AA}/\text{sec}$	$10\ \text{\AA}$
SH337	$8 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$0.26\text{\AA}/\text{sec}$	$20\ \text{\AA}$
SH337	$5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$0.26\text{\AA}/\text{sec}$	$54\ \text{\AA}$

### 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，以高純度銦球(In ball)作為連接 GaAs 基板背面與佈滿材料銦(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。

詳細的蕭基接面的製備過程如下：

- (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  $H_2O:HCl = 1:1$  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) 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  $H_2O:H_2O_2:H_2SO_4 = 10:1:1$ 。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  $0.005024 \text{ cm}^2$  的 Mask，利用 Mask 決定了蕭基界面的大小。
- (9) 置入蒸鍍機內，使用機械幫浦(mechanical pump)粗抽至真空度為  $1 \times 10^{-2}$  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) 樣品完成蕭基界面後，再來會在樣品的 GaAs 基板背面點上約 4 個高純度的銦球(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  $10 \Omega$ ，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，可利用循環氬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)：

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{W} \quad (2-1)$$

$$N(W) = \frac{2}{q\varepsilon_0 A^2 [d(\frac{1}{C^2})/dV]} \quad (2-2)$$

其中  $W$  為空乏區寬度， $\varepsilon$  為半導體材料介電係數(permittivity)， $A$  為樣品的電極面積( $0.005024 \text{ cm}^2$ )， $N(W)$  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  $\tau_1$  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  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  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， $\Delta C$  變化幅度很小( $\Delta C \sim 0$ )，當溫度很高時， $\Delta C$  變化幅度又太快( $\Delta C \sim 0$ )，只有當溫度在特定範圍， $\Delta C$  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，外加光源包含鹵素燈(Halogen lamp)及 LED 燈兩種，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。鹵素燈(Halogen lamp)具有連續發光波段(可見光至紅外光，500 nm~2000 nm)，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，配合電性量測可得到一系列的趨勢變化，裝置系統如圖 2-4(a)所示。LED 燈為 THORLABS 公司生產，具有較鹵素燈大的發光強度(0.1mW ~ 1.5mW)，可針對特定波長照射光源的電性量測作更深一步的分析，裝置系統如圖 2-4(b)所示。

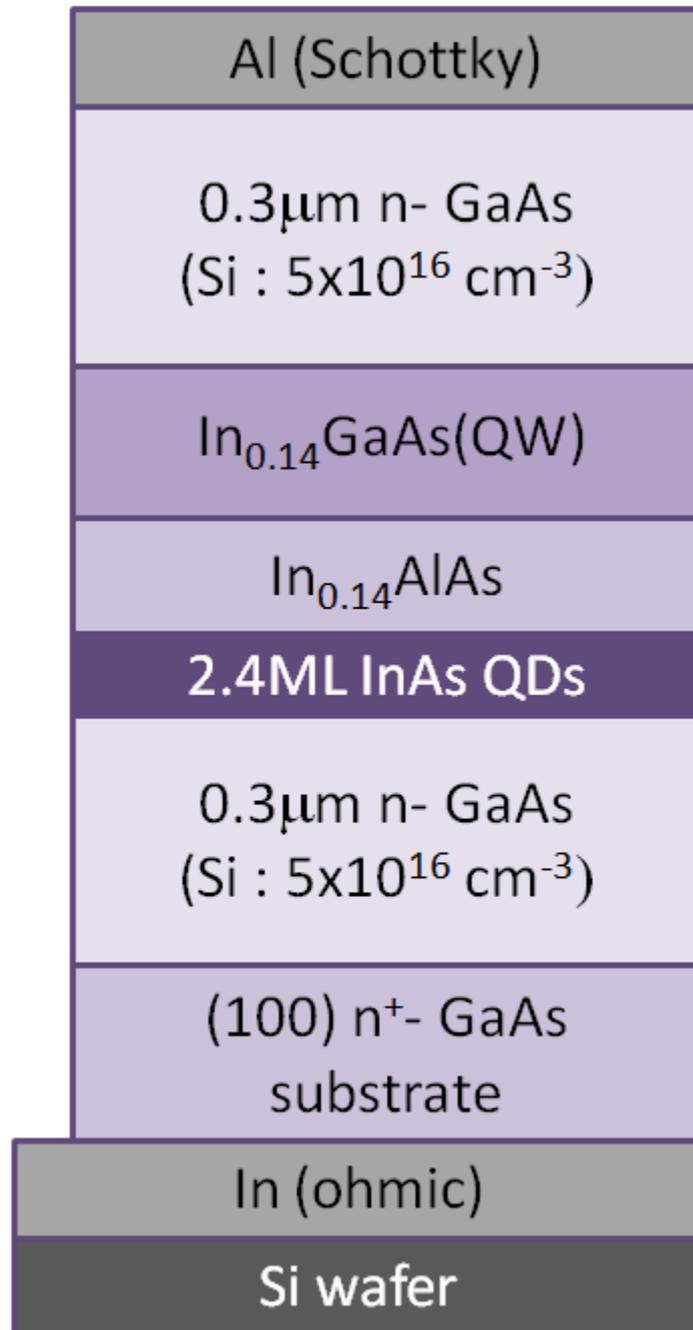


圖 2-1 樣品之結構圖

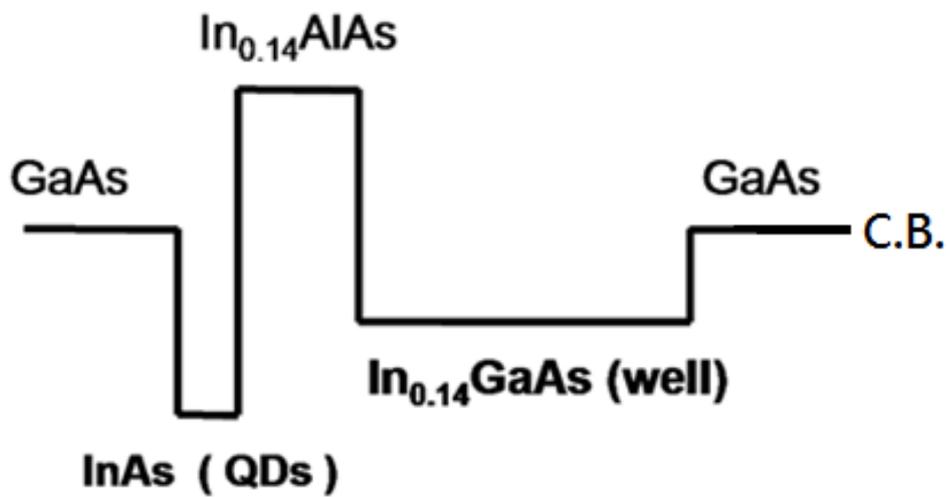


圖 2-2 樣品之能帶圖

表 2-1 各樣品對應之結構厚度

	$\text{InAlAs}$	$\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$
SH332	0Å	54Å
SH331	10Å	44Å
SH337	20Å	44Å
SH335	54Å	0Å

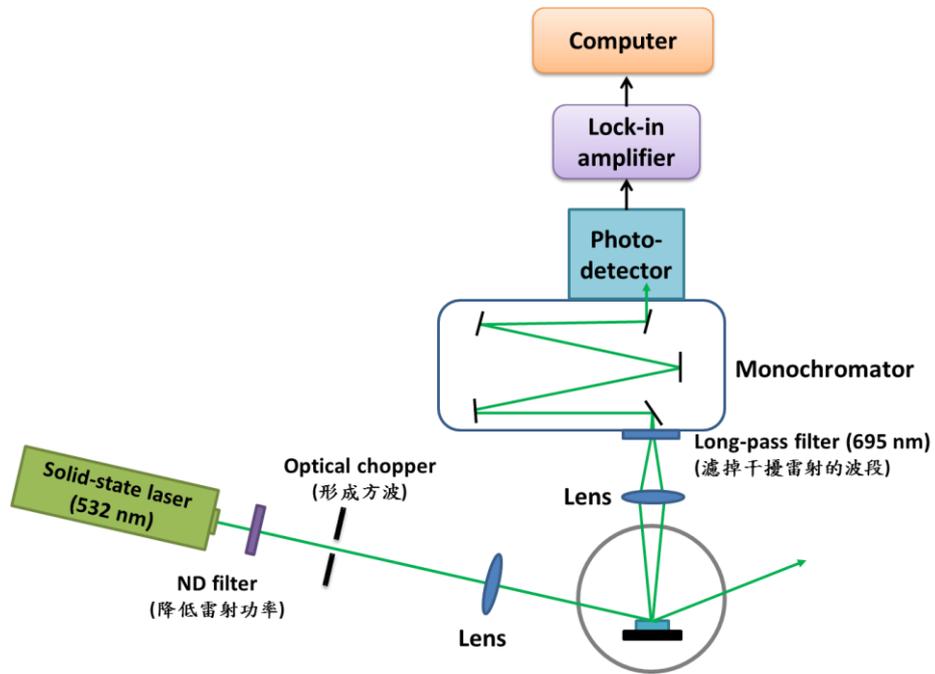


圖 2-3 光激發螢光量測系統(PL)

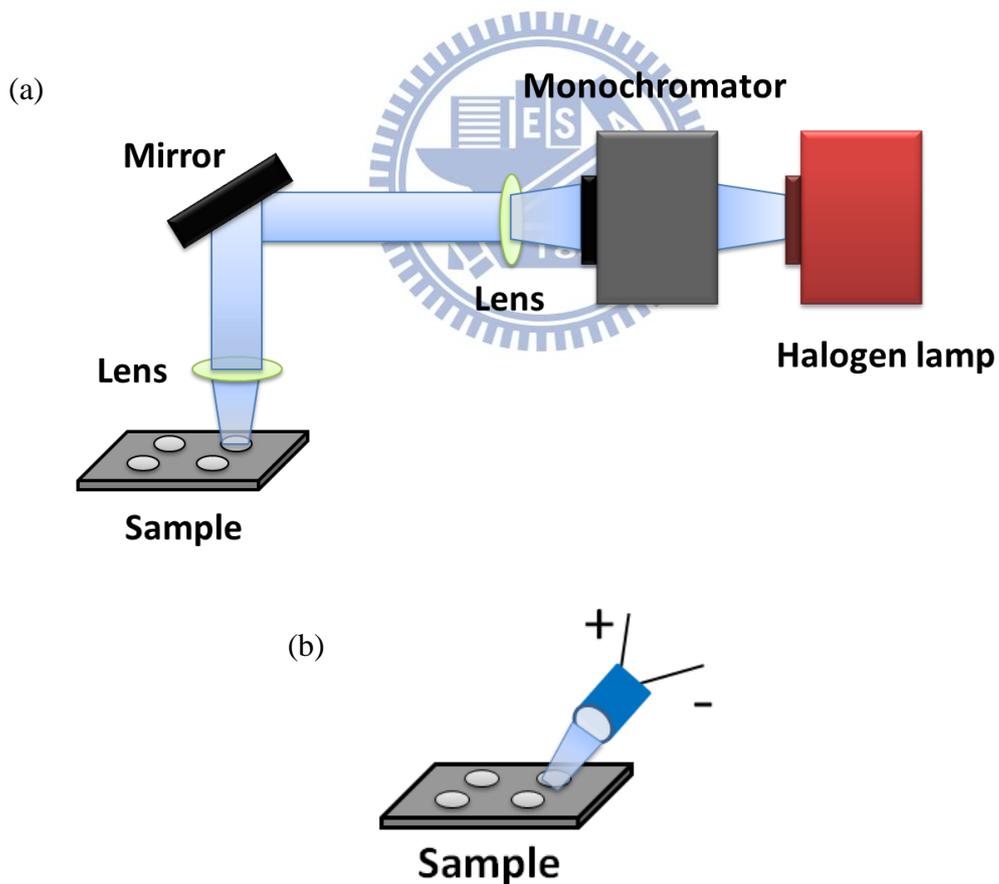


圖 2-4 光激發量測架構

## 第3章光電特性量測結果與分析

本章的重點在基本的 InAs/GaAs 量子點的光電特性分析。先介紹四片樣品的 PL 光性分析，再來在未照射光源下，藉由不同溫度下的 C-V 分析，確立了缺陷的存在，並發現成長越厚的 InAlAs 層會造成更明顯的電容值變化。

### 3-1 InAs/GaAs 量子點光性分析

圖 3-1(a)-(d) 為溫度從 25K 升溫至 300K，各樣品固定激發能量之 PL 隨溫度變化關係圖。整體而言，PL 訊號強度隨溫度上升而減弱，而峰值往低能量的方向移動，有明顯的紅移(redshift)現象。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。對於 SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )，圖中明顯的兩個峰值訊號為 InAs 量子點的訊號。低溫 25K 時，基態(Ground State, GS)位置出現在 1.01eV，激發態(Excited state)位置出現在 1.07eV，隨溫度上升到 300K 後，GS 和 ES 的位置紅移到 0.95eV 和 1.03eV。但在 SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )、SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )的 PL 圖中，可以發現在低溫時有一個半高寬較寬的峰值訊號(1.2eV)，在溫度升高後就消失了，只看到 GS 和 ES 峰值訊號。這峰值訊號(1.2eV)推測為 QW，上升至超過 200K 的溫度後，就幾乎無法侷限住載子，因此無法在 PL 上看到訊號。而成長  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  層也使得 QW 的量子侷限效應變好，因此相對於 SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )，這兩片樣品能看到明顯的 QW 訊號。而 SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )沒有 QW 的結構，自然無法看到 QW 的訊號。圖 3-2(a)-(c) 為根據 PL 圖所繪製的各樣品能帶示意圖。

## 3-2 確立缺陷存在於 InAs/GaAs 量子點中

### 3-2-1 變掃動偏壓速率 C-V 分析

圖 3-3~3-7 為四片樣品分別在高低溫改變掃動偏壓速率(Sweep rate) (532mV/s~27mV/s)所做的 C-V 圖，發現 SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )高低溫的 C-V 訊號都不隨掃動偏壓速率變化，而 SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )、SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )、SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )在高溫時的 C-V 訊號隨掃動偏壓速率改變而影響，其中以 SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )最為明顯。而這樣有掃動偏壓速率響應的現象，證明了有一個載子躍遷的現象被調變到，一般量子點載子躍遷速率的範圍都是在高頻程級，而此量測的掃動偏壓速率是在秒(s)的等級，遠慢於一般量子點載子躍遷速率，再加上需要在高溫才會看到此現象，推測造成這樣的影響是來自於缺陷(defect)的訊號。此外，從圖中發現隨著掃動偏壓速率越慢，電容值會有更大的變化量，是由於加偏壓的時間夠長，載子有足夠的時間躍遷出來，才會造成較大的電容變化量。而 SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )會有最大的響應，推測成長越厚的  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  層，會對電容變化量產生的機制有影響，後面的章節將做進一步的確認。

### 3-2-2 變溫 C-V 分析

從 3-1-1 節中，發現在高溫時有掃動偏壓速率響應的現象，因此做了從低溫 77K 到高溫 350K 的變溫 C-V 分析，實驗結果如圖 3-7~3-10。從圖 3-7(a)中發現 SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )的 C-V 訊號隨溫度變化不大，轉成縱深分布圖如圖 3-7(b)，發現在  $0.23\mu\text{m}\sim 0.24\mu\text{m}$  有明顯的電荷堆積訊號，配合圖 3-2(a)的 PL 量測和 InAs 的長晶結構位置，推測為 G. S. 和 E. S. 的訊號。而訊號出現在比長晶結構  $0.3\mu\text{m}$  還小的位置，是因為在製作 Schottky 接面時有做蝕刻的動作，

方便電性量測觀察量子點的訊號。另外，載子堆積訊號隨溫度會有下降的趨勢。載子侷限在量子點中，外加逆向偏壓時，電子受到場的影響會躍遷出，貢獻在 C-V 圖上的電容平台，經過轉換之後就是縱深分布圖上的電荷堆積訊號。在高溫時量子侷限效應較差，自然而然對應到電荷堆積訊號也會變小。圖 3-8(a)~(b) 顯示 SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ ) 也有相似的現象。但隨著成長  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  層的厚度增加，發現如圖 3-9(a)、圖 3-10(a)，SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )、SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 的 C-V 訊號提升至 280K 後在 -0.5V 至 -1.0V 的位置會出現一個平台的抬升，從縱深分布圖上可以明顯的看到在較淺的位置會多出一個電荷堆積訊號，而發生掃動偏壓速率響應的溫度也在 280K 後，因此推測造成升溫時出現電荷堆積訊號是由缺陷訊號所造成的。

圖 3-11(a)~(b) 說明了缺陷訊號受直流偏壓影響載子躍遷的能帶圖。假設缺陷能階( $E_{\text{trap}}$ )是中性能階(neutral trap)，圖 3-11(a) 為低溫 77K 時外加小偏壓時的能帶圖，此時費米能階還沒調變到量子點的位置，但已經調變到缺陷能階，不過由於低溫下缺陷躍遷的速度很慢，無法量到訊號的變化。如果將溫度升高至高溫 350K 如圖 3-11(b)，使得缺陷載子躍遷速度加快，缺陷訊號受升溫影響的躍遷速率如式 3-1

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

其中， $\gamma$  為一常數，對 n-type GaAs 而言其值為  $2.28 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-2}$ ， $\sigma_n$  為捕捉截面積， $E_{\text{trap}}$  為缺陷能階活化能。電子躍遷至傳導帶後，受場的影響往量子點方向移動，但是受到  $\text{InAlAs}/\text{GaAs}$  位障的阻擋，因而堆積在  $\text{InAlAs}$  層和 top GaAs 層的接面處，中和此區的正電荷形成中性區(Neutral region)，造成空乏區回縮導致電容值抬升產生一個 C-V 平台，轉成縱深分布圖後才會看到在較淺的位置會多出一個電荷堆積訊號。而 SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 的 C-V 訊號會有隨溫度最大的響應，是因為成長越厚的  $\text{InAlAs}$  層提供了較大的位障而有利於電子堆積在  $\text{InAlAs}$  層和 GaAs 層的接面處，形成較寬的中性區，增加空乏區的

回縮量，導致較大的電容變化量。從圖 3-12(a)-(b)各樣品在不同溫度下的 I-V 圖可發現，在低溫時，比起 SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )外加-0.5 的逆向偏壓就有明顯的電流抬升，其他三片樣品的 I-V 訊號需要外加到-3.0 的逆向偏壓或是提升到較大的溫度才會有明顯的電流抬升，證明了成長 InAlAs 層的確會有阻擋載子通過的效果。

### 3-2-3 逆掃 C-V 量測

為了驗證前面缺陷載子躍遷的模型，提出一個不一樣的量測方法。通常 C-V 量測偏壓從 0V 掃到-4V 作為一次量測，此時，不關掉外加偏壓下(將電壓定在-4V)，從-4V 再掃到 0V 再作一次量測，整個過程的掃動偏壓速率(Sweep rate)都維持定值 54 mV/s，四片樣品在高、低溫的實驗結果如圖 3-13~3-16。發現 SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )無論在高、低溫作順掃(Sweep down)(0V  $\rightarrow$  -4V)跟逆掃(Sweep up) (-4V  $\rightarrow$  0V)的結果都一樣。成長 In<sub>0.14</sub>AlAs 層的樣品像是 SH331 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )和 SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )在低溫時無變化，高溫逆掃時有些許的電容值抬升。而 SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )在 77K 時無變化，然而在 200K 後逆掃開始有電容值的抬升，再提升至 300K 後會更明顯。會造成這樣類似電滯曲線(Hysteresis)的現象，是來自於當逆掃時，仍有一些電子從缺陷躍遷出來如式 3-2

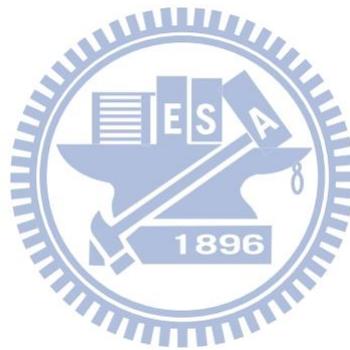
$$\frac{q}{2\epsilon} N_D L^2 + \frac{q}{\epsilon} p_t(t)L = V_R + V_{bi} \quad (3-2)$$

而缺陷載子躍遷隨時間的關係如式 3-3

$$p_t(t) = p_{t0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right), \quad t = \frac{V_R}{r_{sw}} \quad (3-3)$$

$N_D$  為掃動偏壓時對應之空乏區的背景參雜濃度(即長晶時的參雜濃度 n-GaAs 層參雜濃度)， $L$  為空乏區寬度， $p_t(t)$  為缺陷中殘留的正電荷量，等同於從缺陷躍遷至空乏區邊緣的負電荷量， $t$  為進行 C-V 量測經過的時間， $r_p$  為缺陷內

正電荷的生命期， $r_{sw}$  為掃動偏壓速率， $V_R$  為外加逆向偏壓， $V_{bi}$  為製作蕭基界面產生的內建電位。由 3-2-2 節提到缺陷載子躍遷會造成空乏區回縮而導致電容抬升，因此逆掃時的 C-V 曲線不與順掃的 C-V 曲線重合，而形成像是電滯曲線的圖形，呼應了上一節提出的缺陷載子躍遷模型。而且，時間會影響缺陷載子躍遷量的多寡，由式 3-2 可知量測時間  $t$  跟掃動偏壓速率  $r_{sw}$  的關係式，而 Hysteresis 的現象跟掃動偏壓速率的響應都有隨溫度的正相關趨勢，證明了成長 InAlAs 層的樣品中確實存在缺陷，而且是造成電容值變化的主要原因。



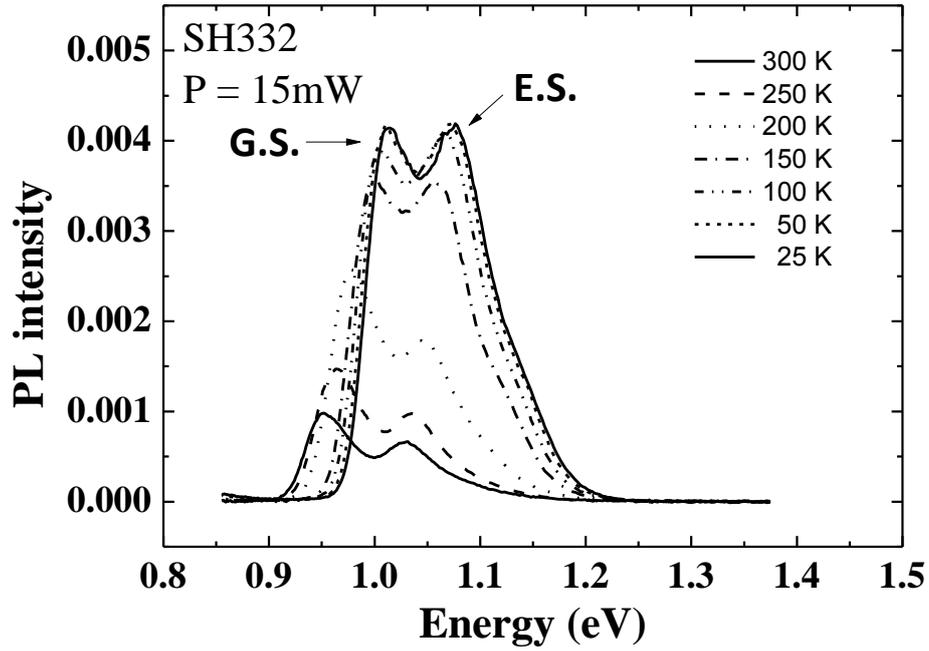


圖 3-1(a)SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0\text{\AA}$ )隨溫度變化之 PL 光譜圖

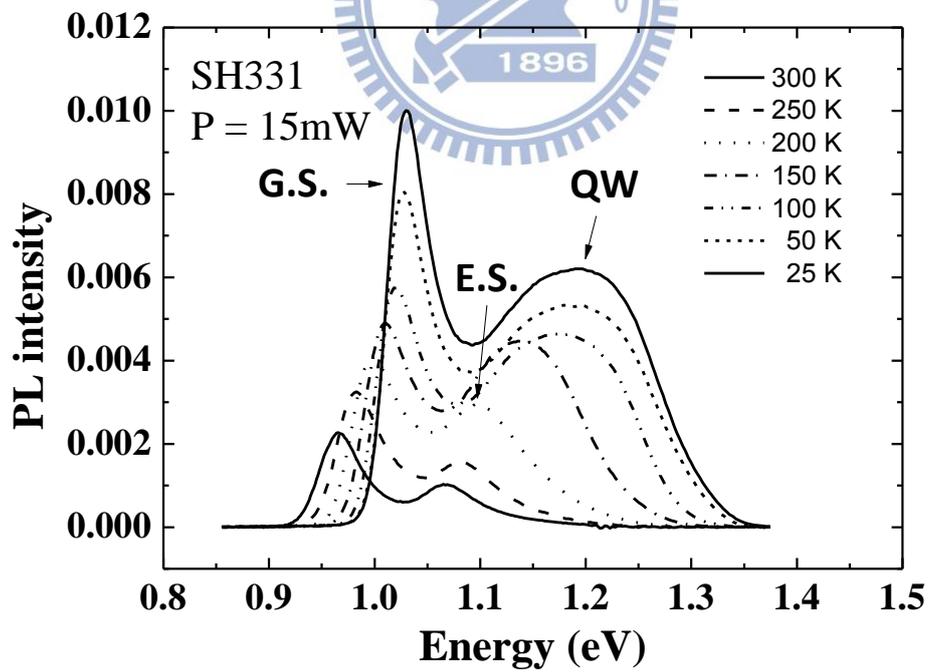


圖 3-1(b)SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10\text{\AA}$ )隨溫度變化之 PL 光譜圖

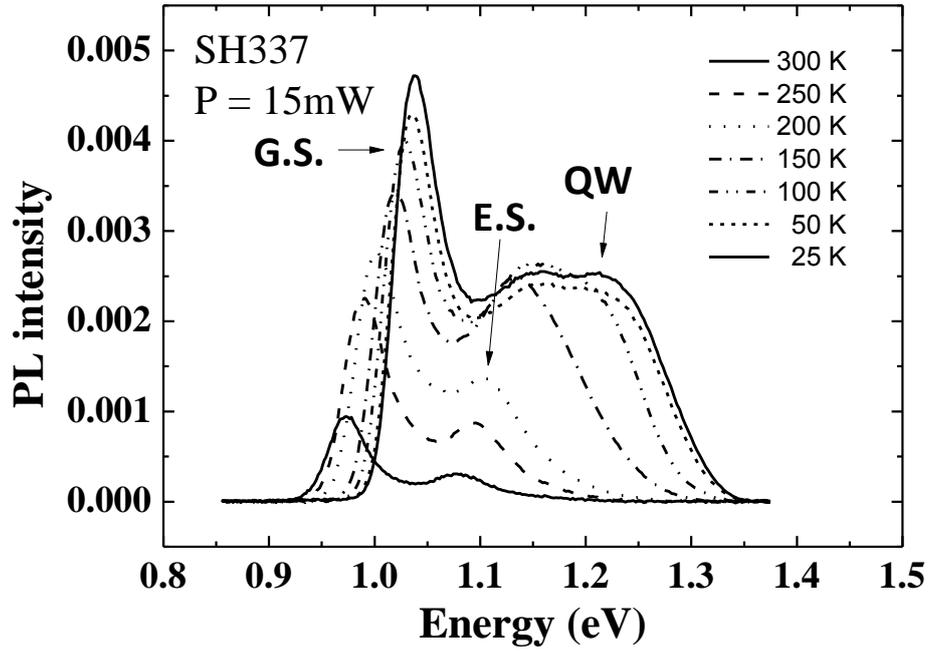


圖 3-1(c) SH337 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ ) 隨溫度變化之 PL 光譜圖

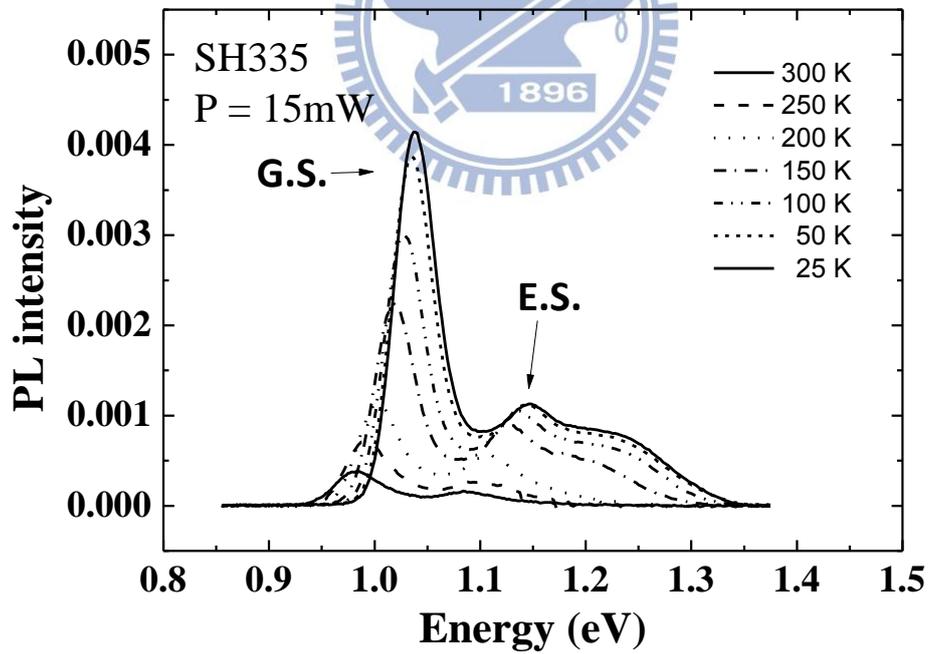
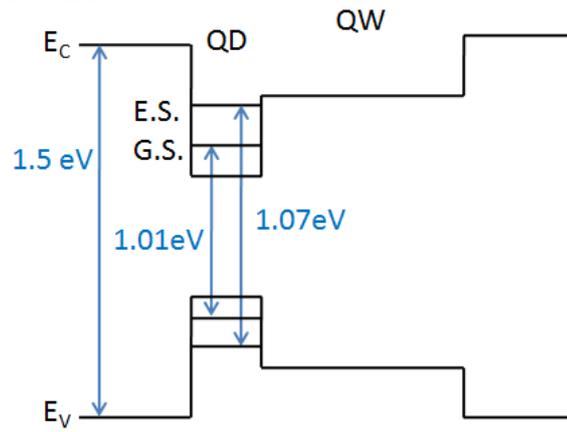
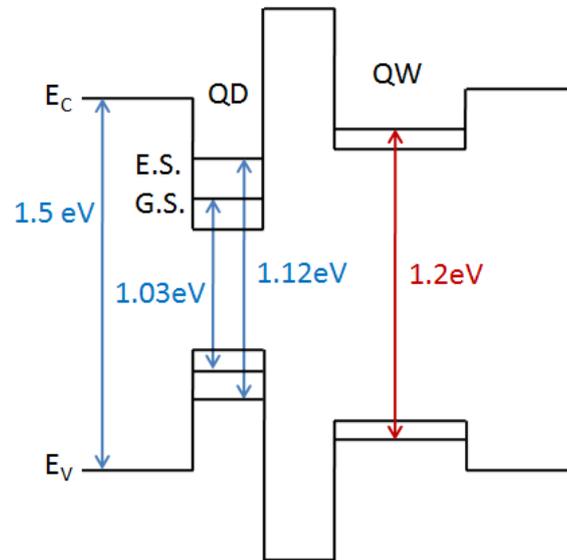


圖 3-1(d) SH335 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 隨溫度變化之 PL 光譜圖

(a) SH332 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0 \text{ \AA}$ )



(a) SH331 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0 \text{ \AA}$ )、SH337 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10 \text{ \AA}$ )



(c) SH335 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54 \text{ \AA}$ )

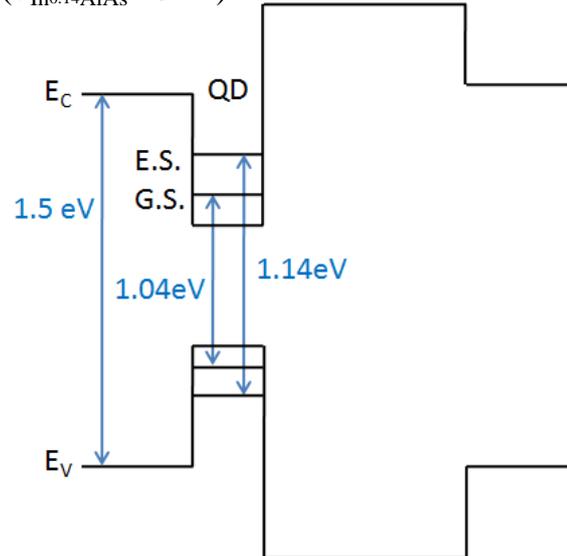


圖 3-2 各樣品 PL 發光能量位置之能帶圖

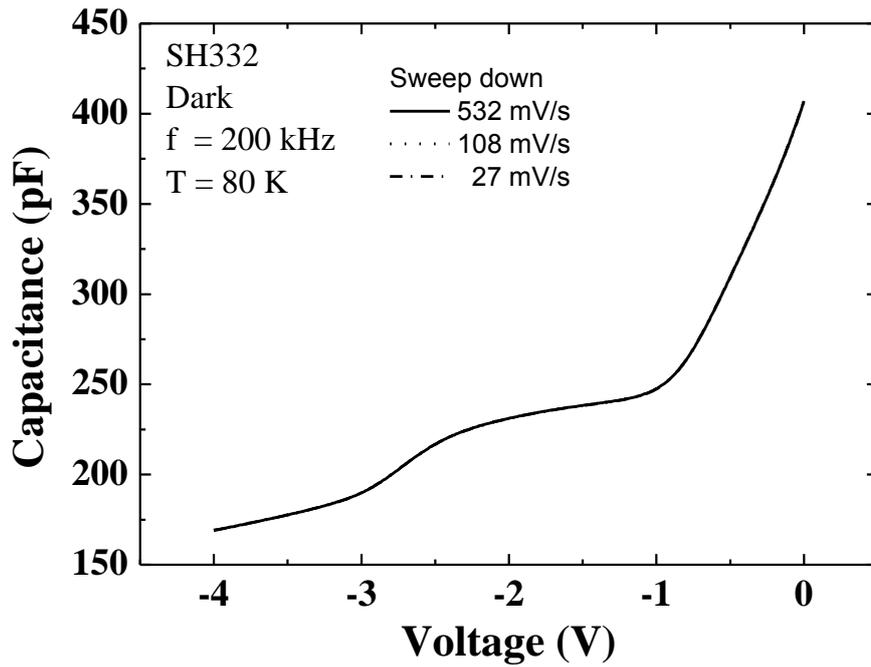


圖 3-3(a)SH332( $d_{\text{In}0.14\text{AlAs}}=0\text{\AA}$ )低溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖

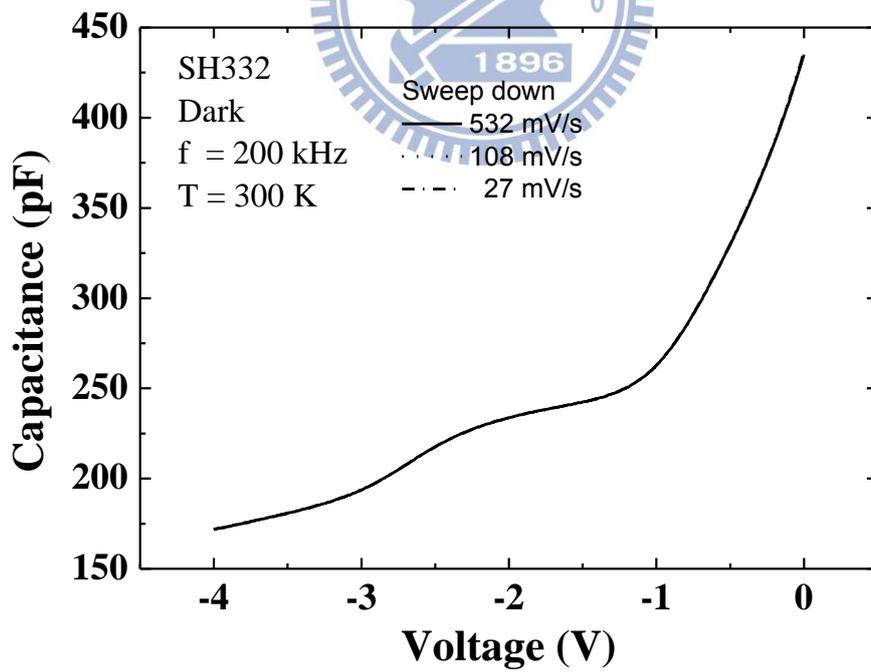


圖 3-3(b)SH332( $d_{\text{In}0.14\text{AlAs}}=0\text{\AA}$ )高溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖

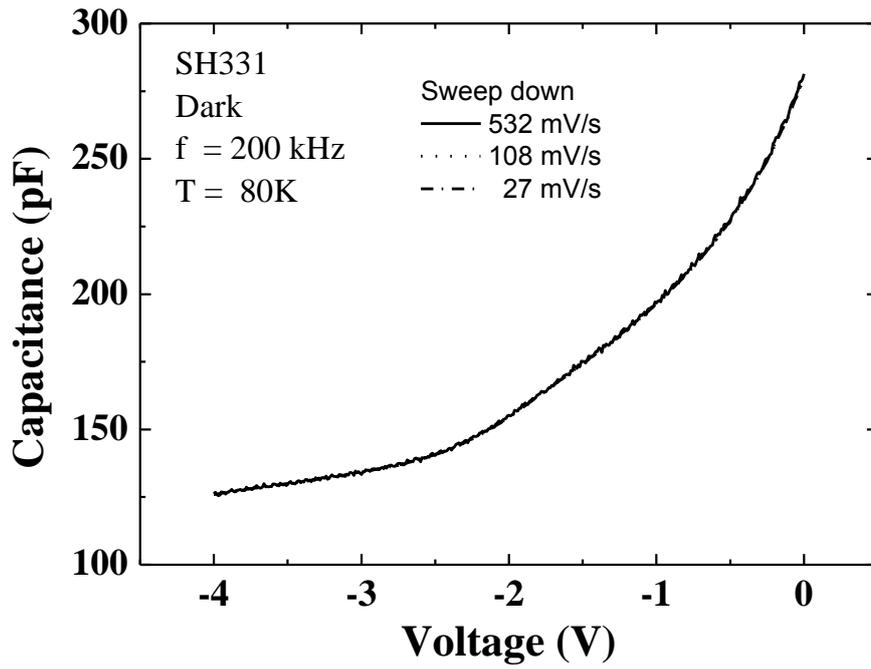


圖 3-4(a)SH331( $d_{\text{In}0.14\text{AlAs}}=10\text{\AA}$ )低溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖

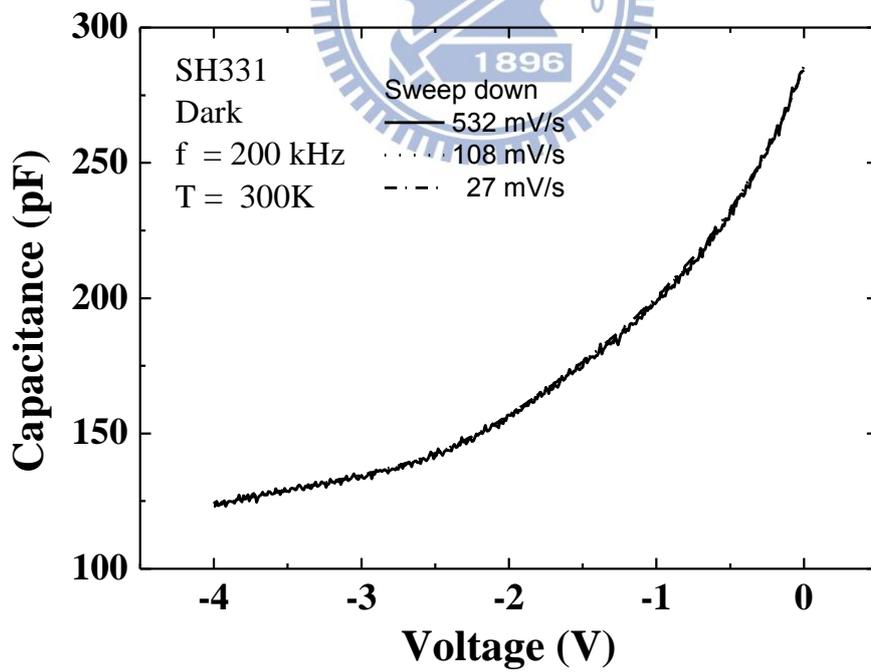


圖 3-4(b)SH331( $d_{\text{In}0.14\text{AlAs}}=10\text{\AA}$ )高溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖

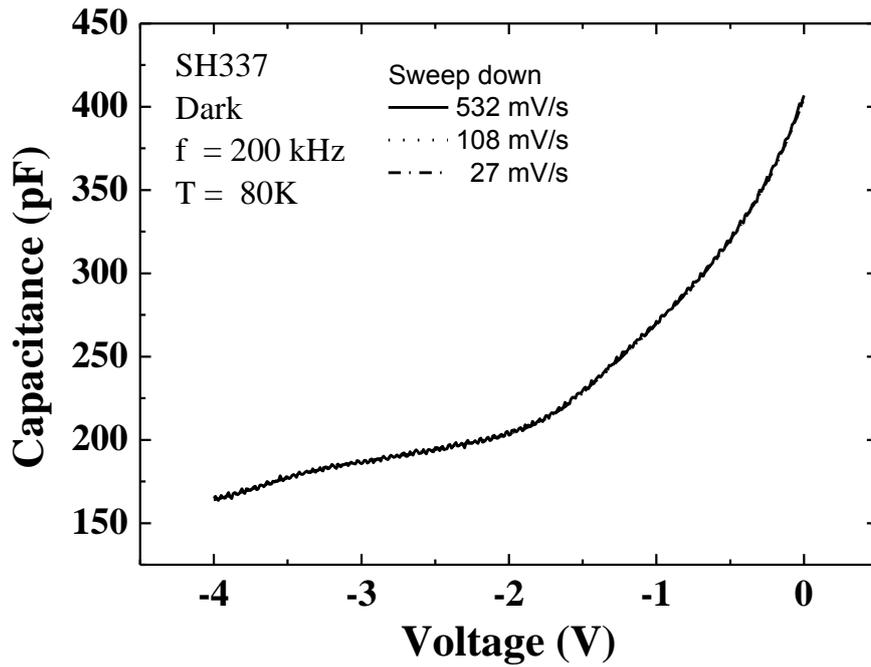


圖 3-5(a)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20\text{\AA}$ )低溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖

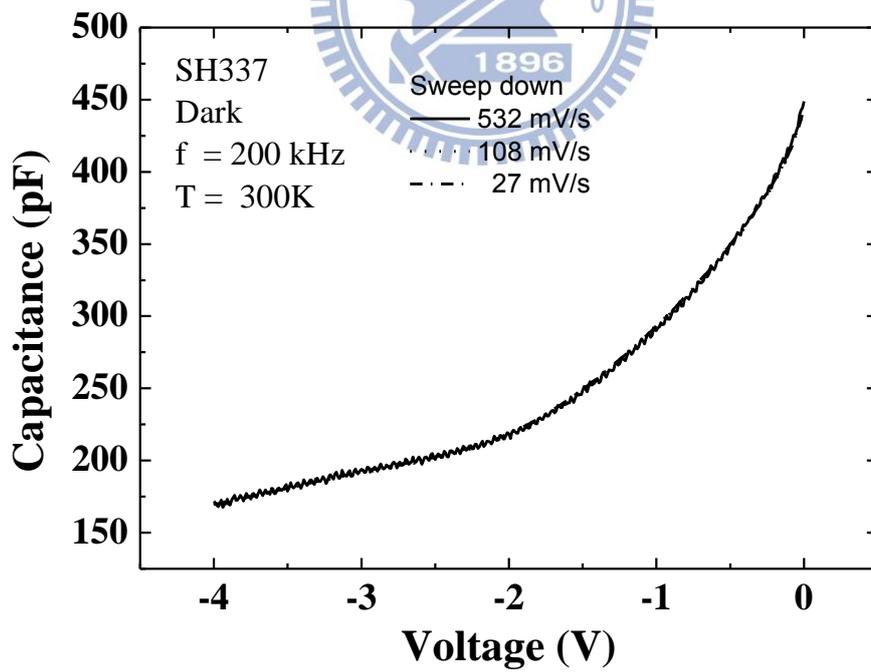


圖 3-5(b)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20\text{\AA}$ )高溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖

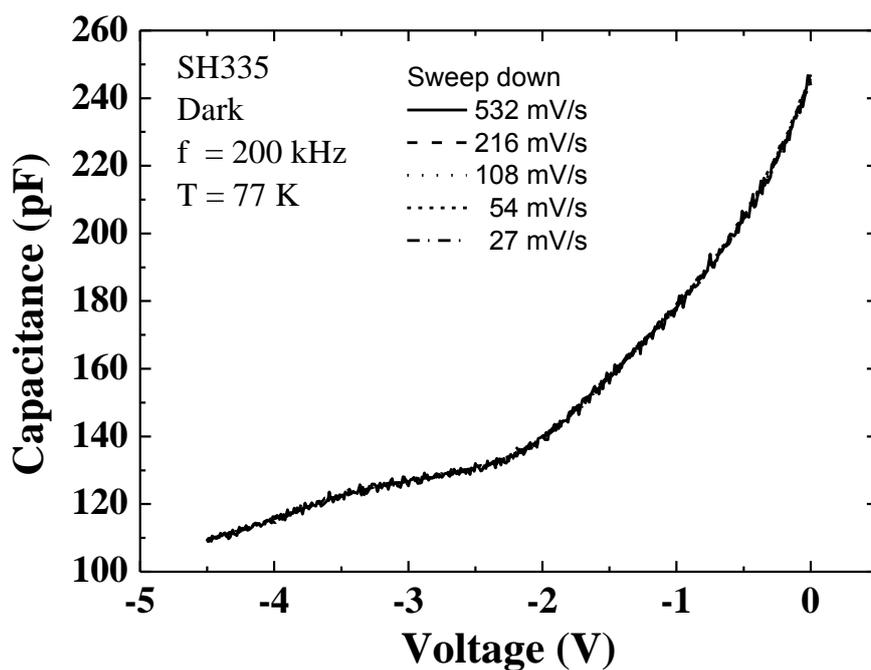


圖 3-6(a)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=54\text{\AA}$ )低溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖

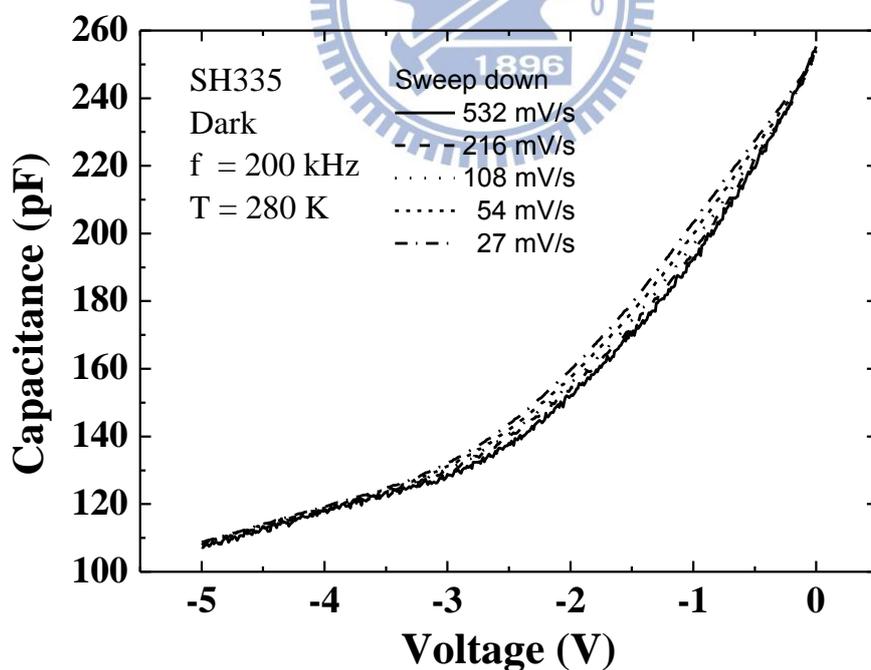


圖 3-6(b)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=54\text{\AA}$ )高溫下改變掃動偏壓速率 C-V 圖

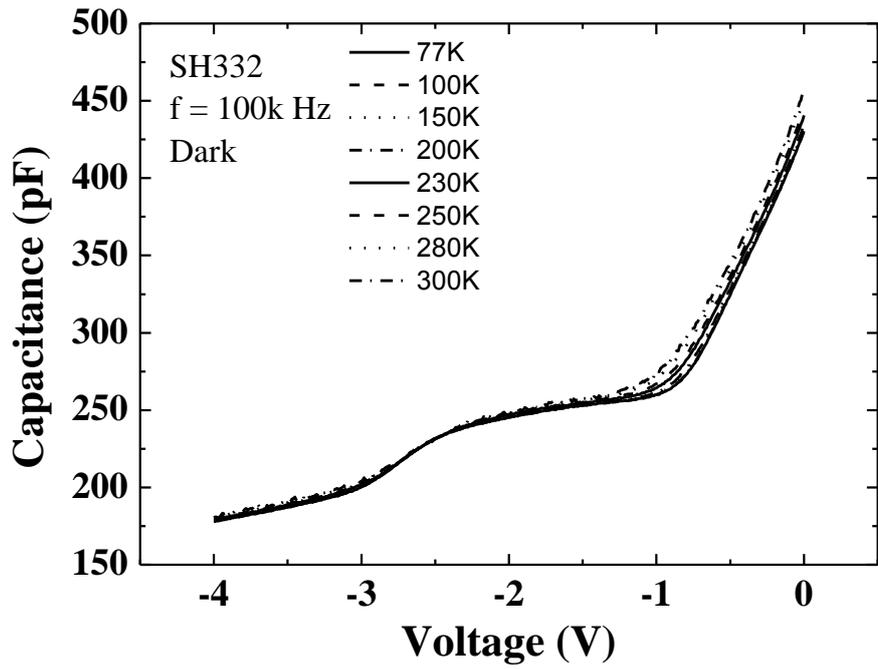


圖 3-7(a)SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0\text{\AA}$ )定頻率 100kHz 之變溫 C-V 圖

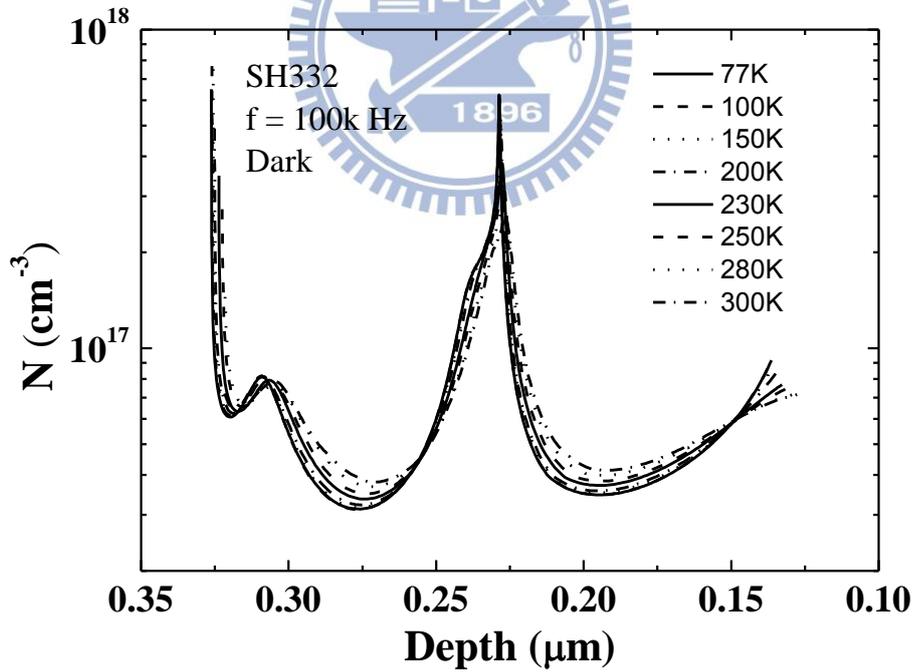


圖 3-7(b)SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0\text{\AA}$ )定頻率 100kHz 之縱深分布圖

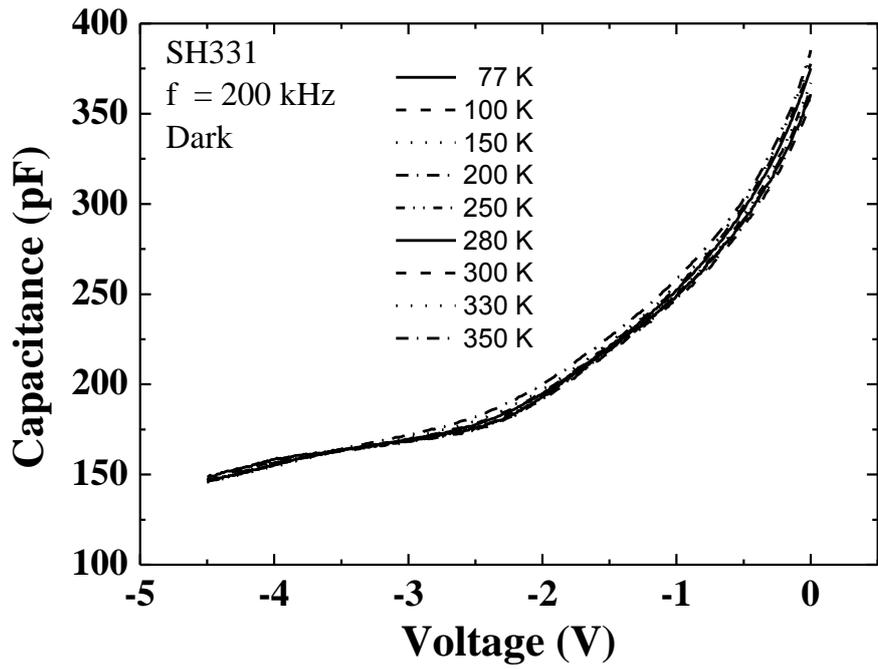


圖 3-8(a)SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之變溫 C-V 圖

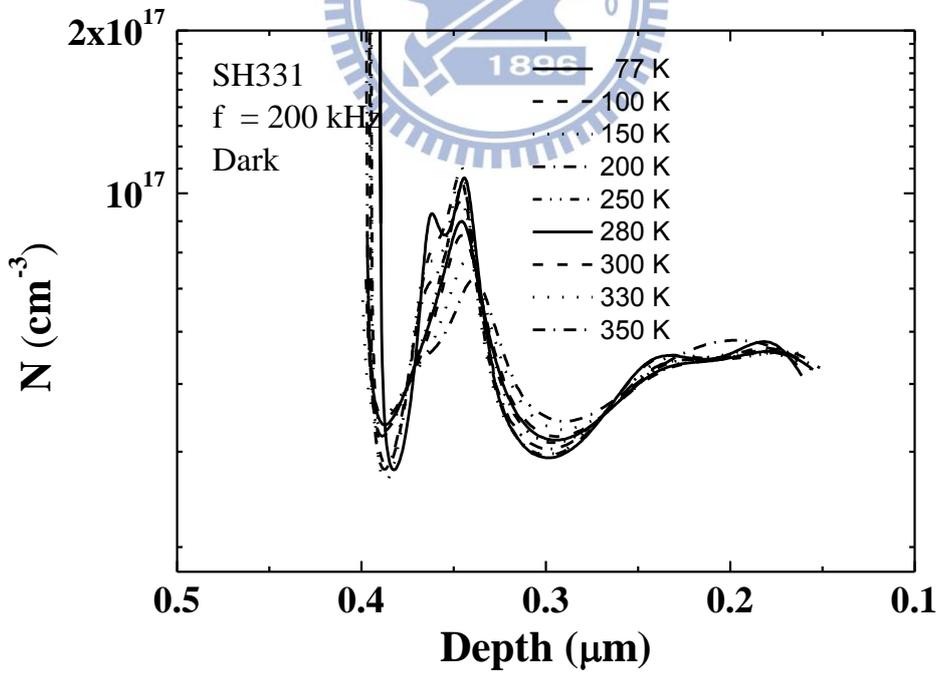


圖 3-8(b)SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之縱深分布圖

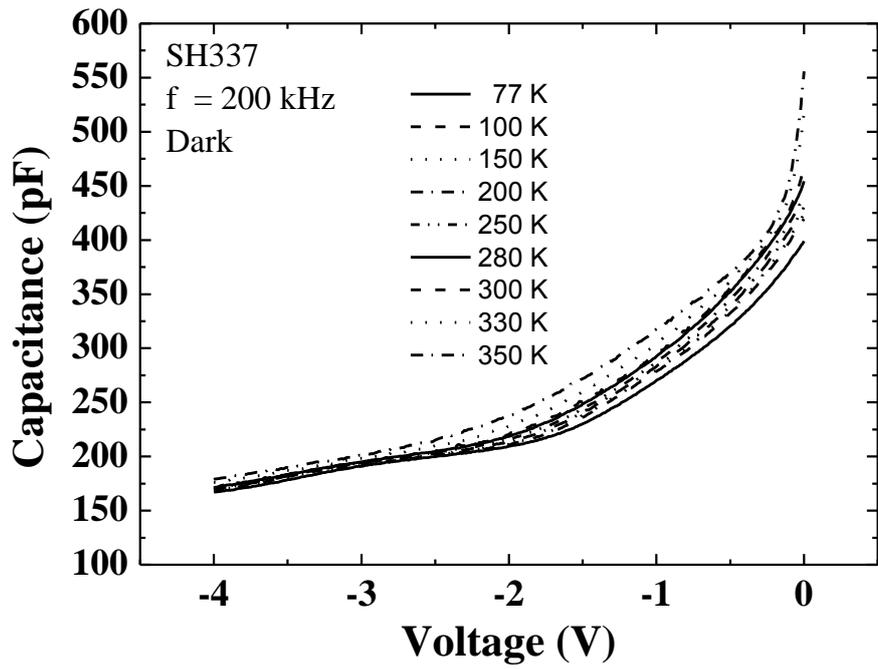


圖 3-9(a)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之變溫 C-V 圖

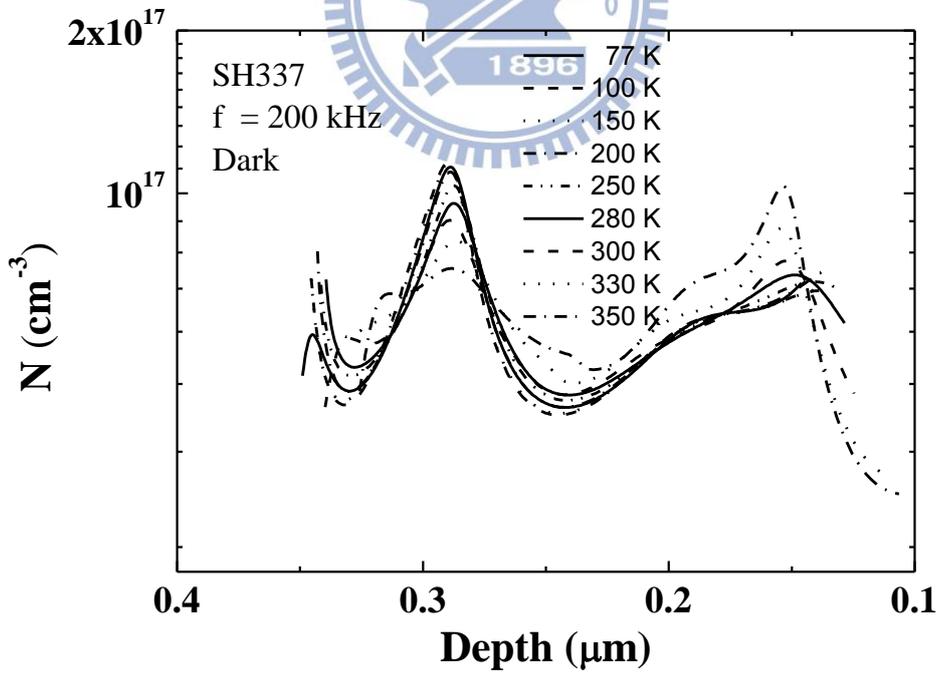


圖 3-9(b)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之縱深分布圖

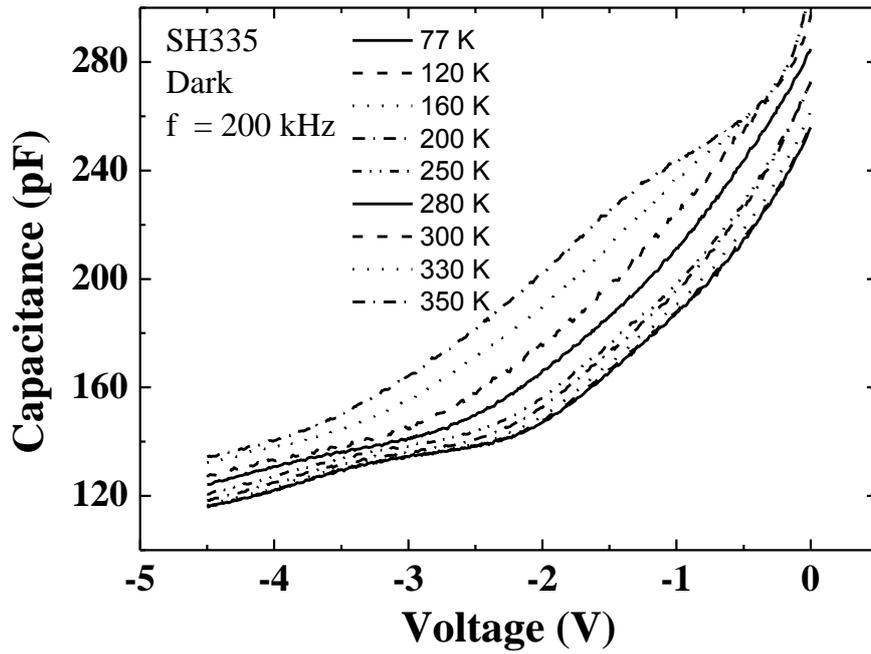


圖 3-10(a)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之變溫 C-V 圖

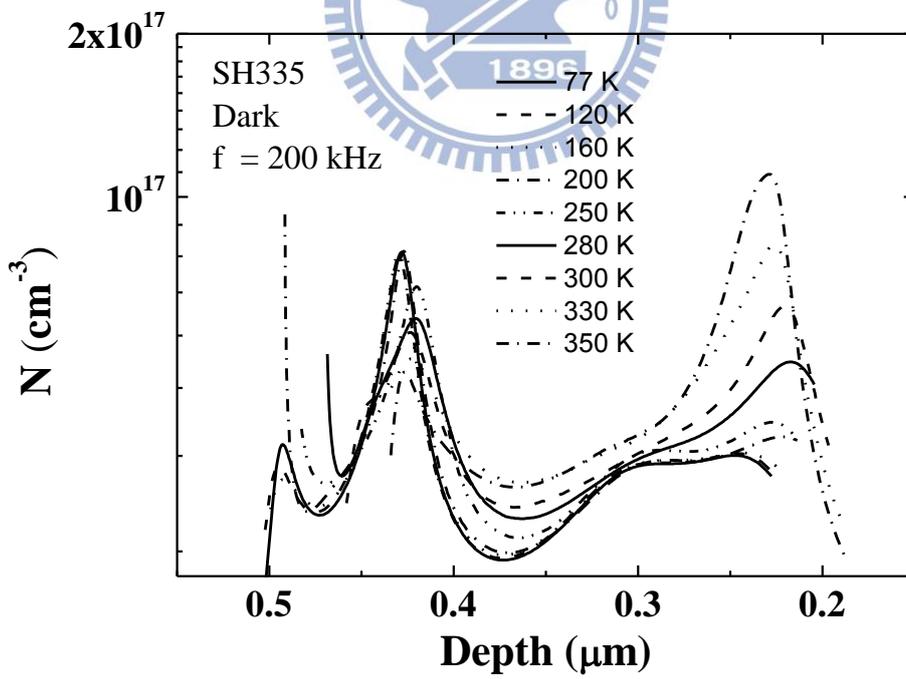


圖 3-10(b)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )定頻率 200kHz 之縱深分布圖

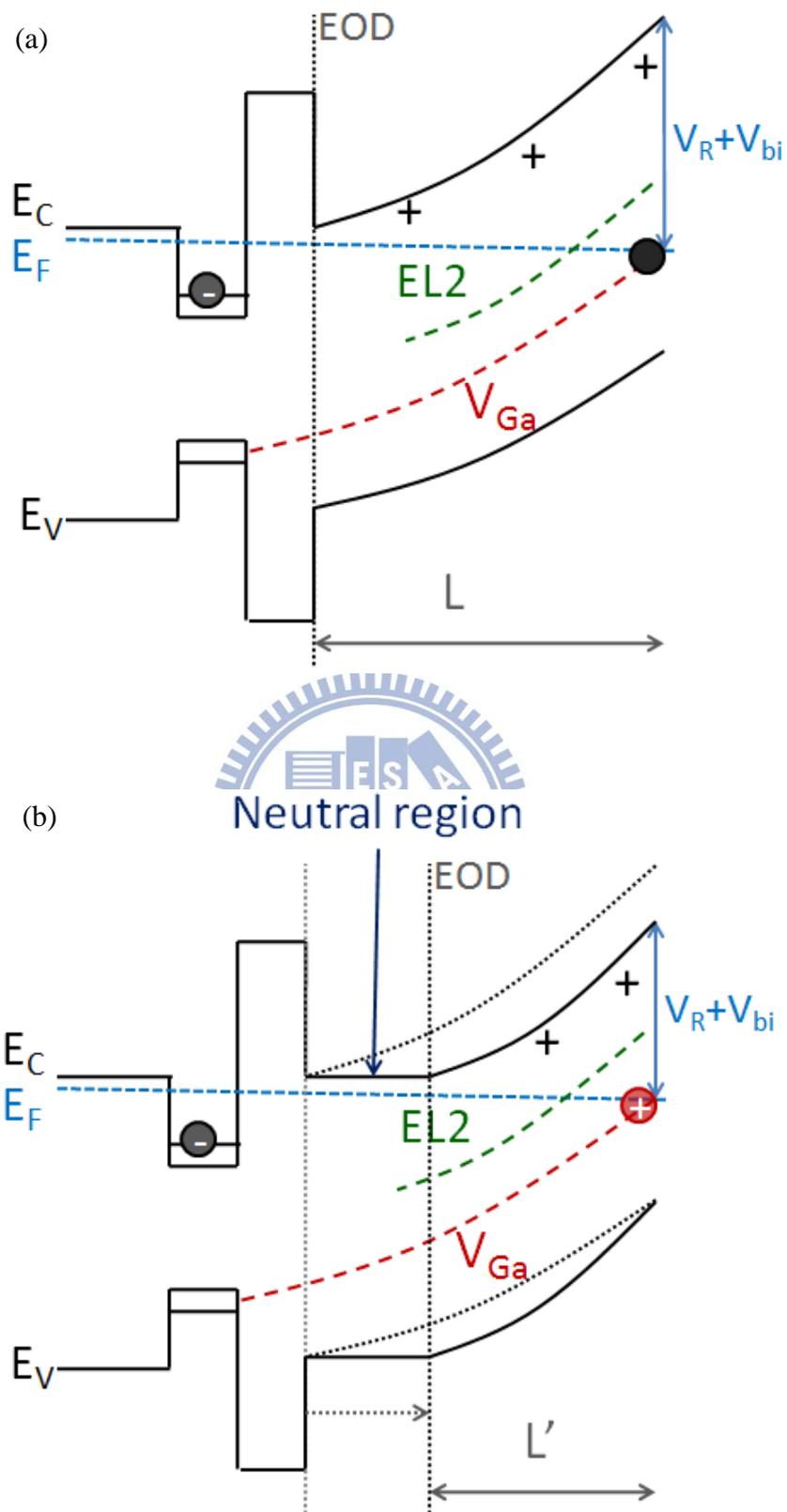


圖 3-11 缺陷訊號直流偏壓影響載子躍遷能帶圖

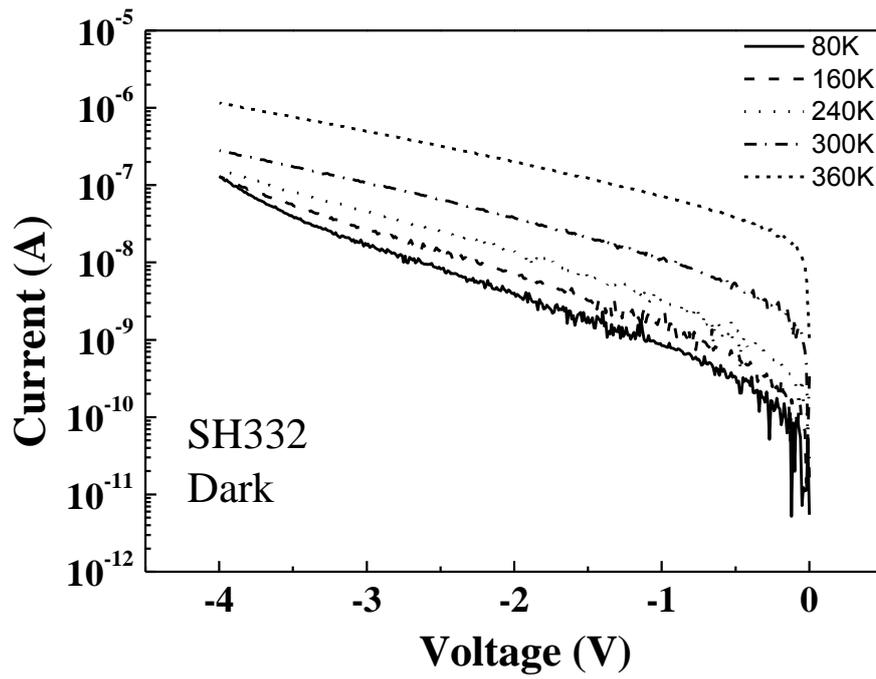


圖 3-12(a) SH332 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ ) 之變溫 I-V 圖

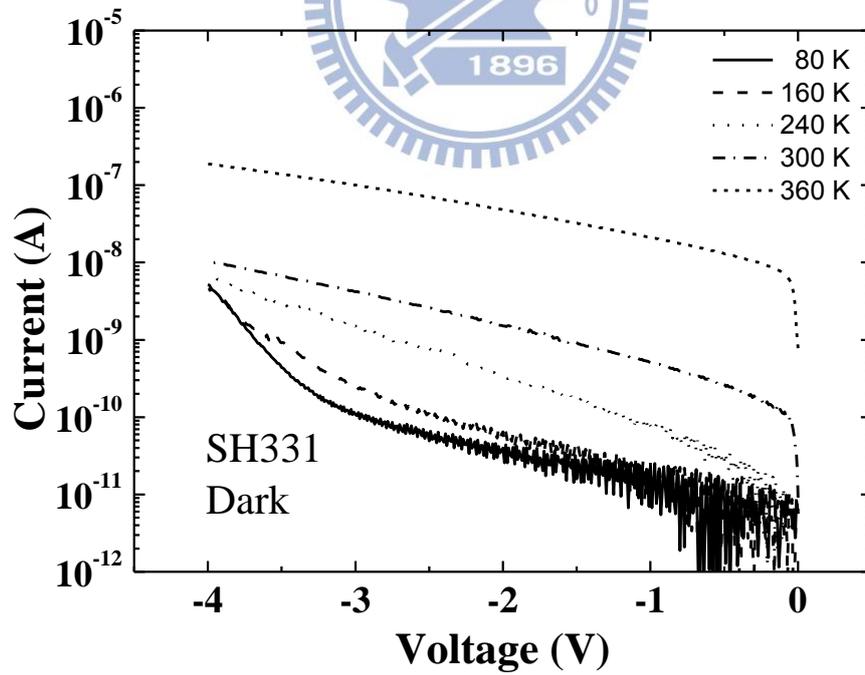


圖 3-12(b) SH331 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ ) 之變溫 I-V 圖

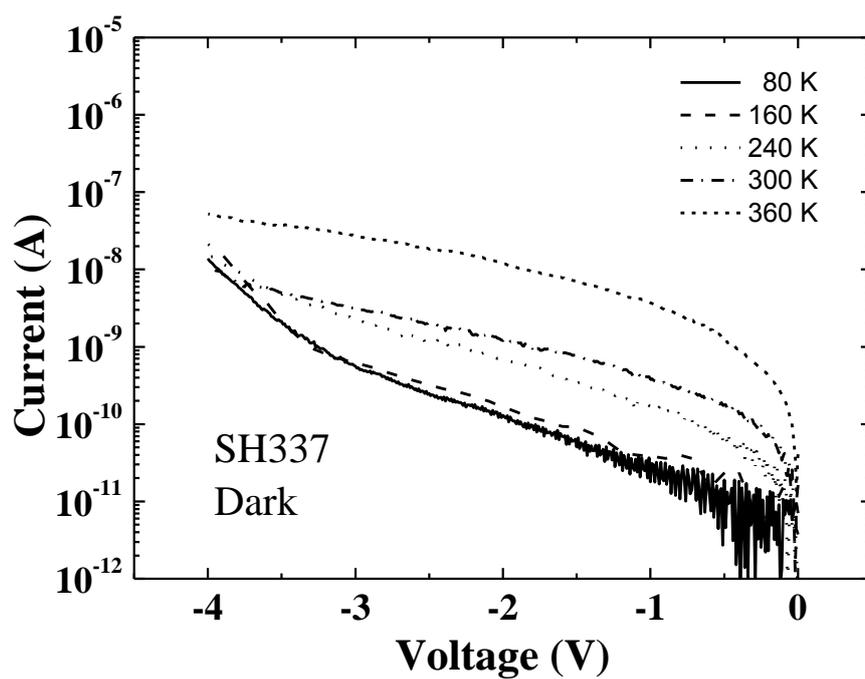


圖 3-12(c) SH337 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ ) 之變溫 I-V 圖

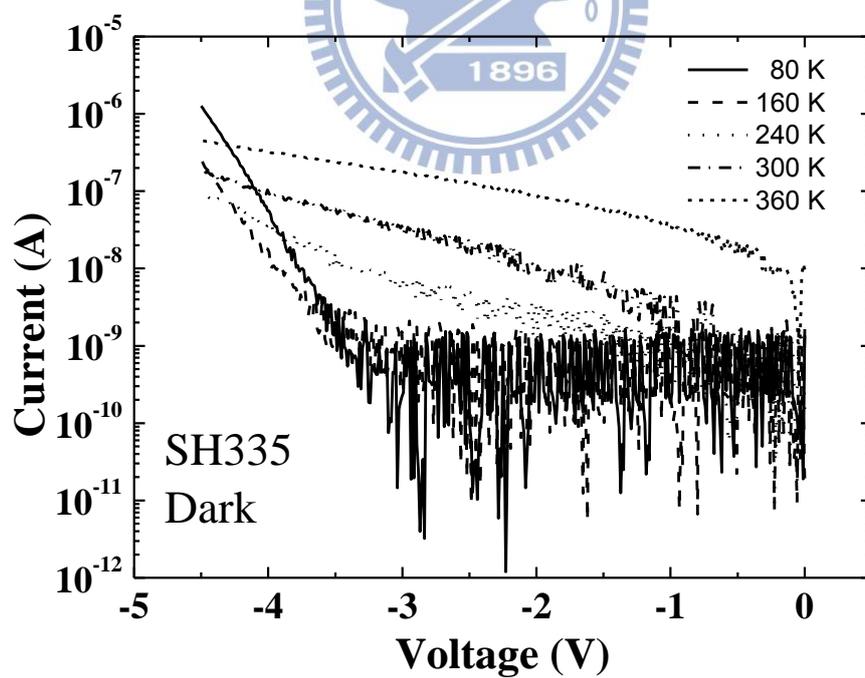


圖 3-12(d) SH335 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 之變溫 I-V 圖

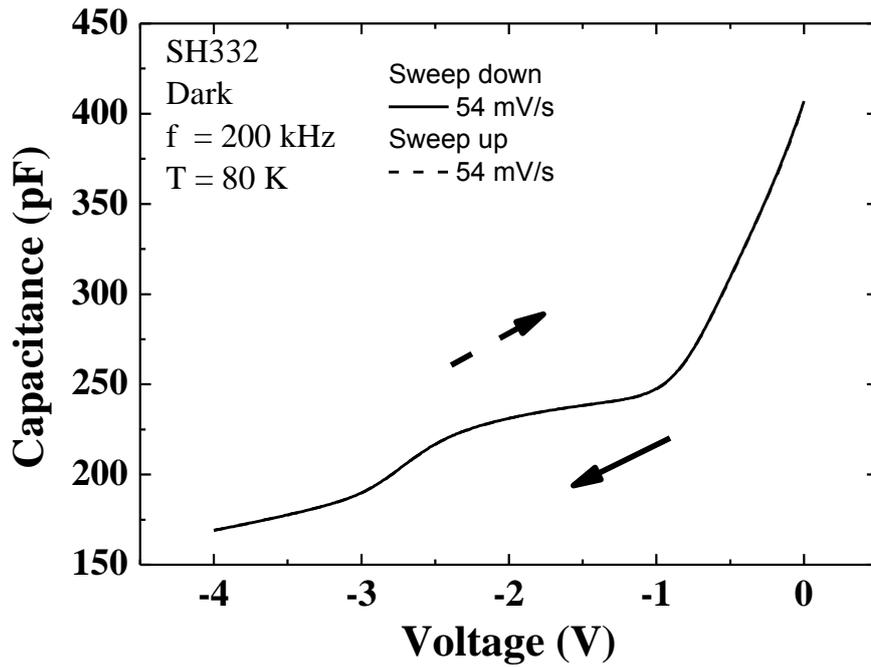


圖 3-13(a) SH332 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0 \text{ \AA}$ ) 低溫 80K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖

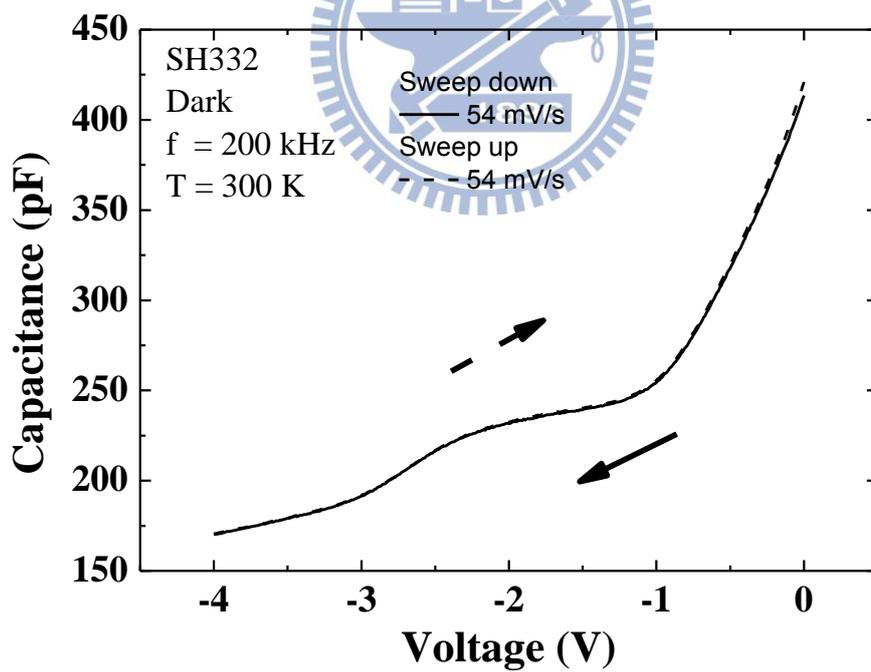


圖 3-13(b) SH332 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0 \text{ \AA}$ ) 高溫 300K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖

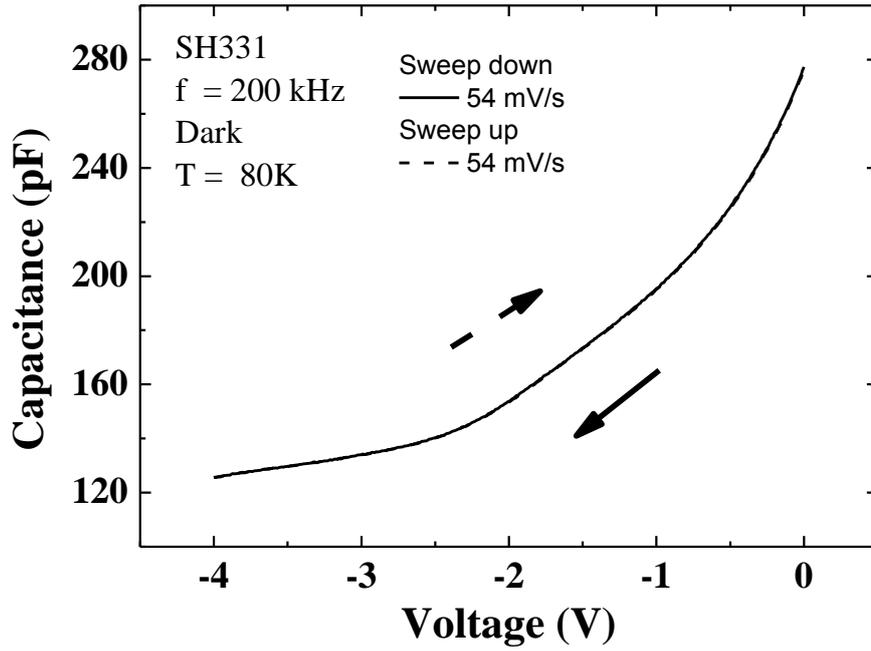


圖 3-14(a)SH331( $d_{\text{In}0.14\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )低溫 80K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖

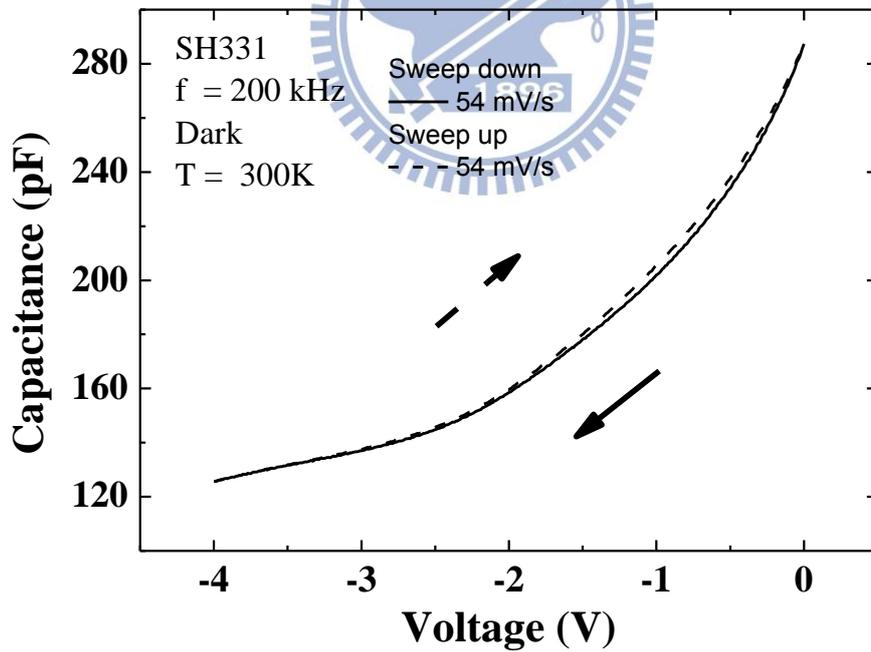


圖 3-14(b)SH331( $d_{\text{In}0.14\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )高溫 300K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖

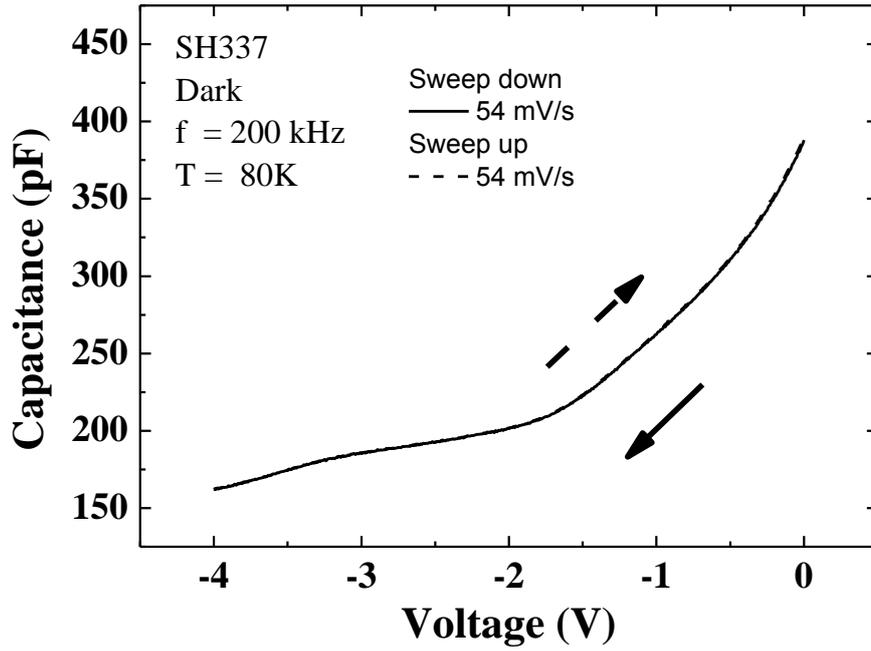


圖 3-15(a)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20 \text{ \AA}$ )低溫 80K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖

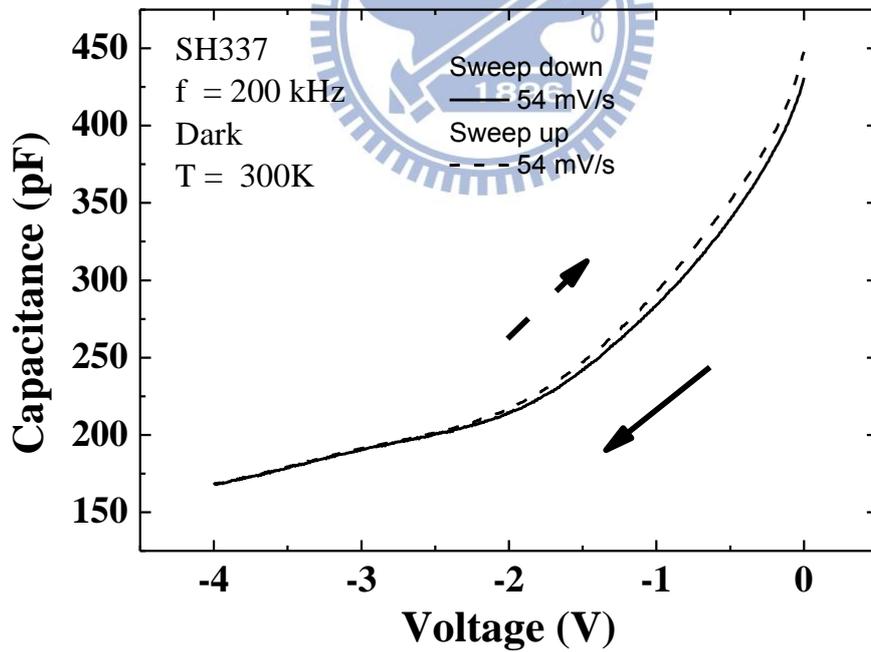


圖 3-15(b)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20 \text{ \AA}$ )高溫 300K 定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖

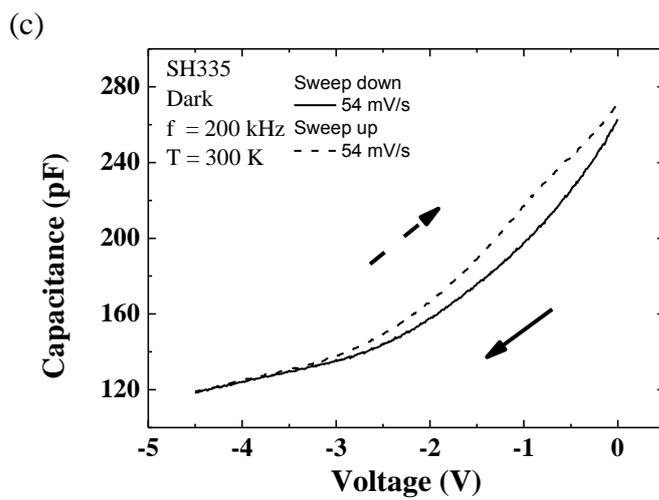
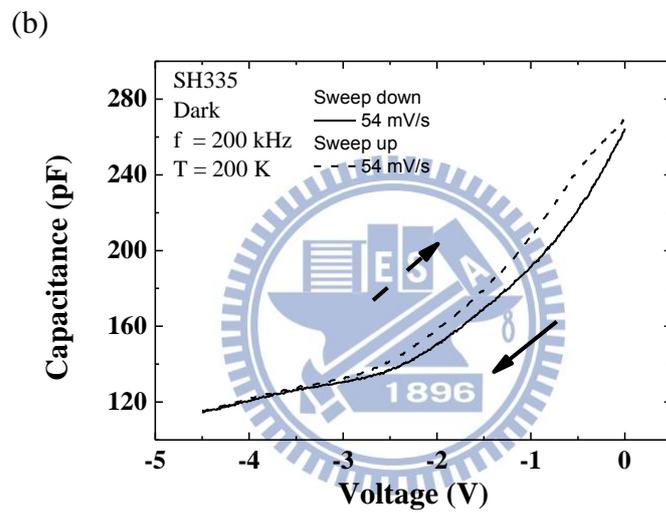
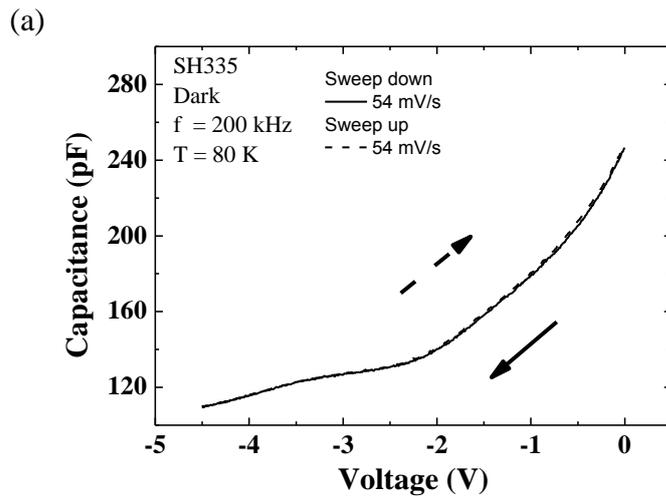


圖 3-16 SH335 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54 \text{ \AA}$ ) 各溫度定 Sweep rate 之回掃 C-V 圖

## 第4章光激發電性量測結果與分析

在第四章將探討缺陷受照射光源於 InAs/GaAs 量子點中的影響。由於鹵素燈(Halogen lamp)具有連續發光波段，一開始先使用鹵素燈作為激發光源，選擇照射光源能量 0.86eV 至 1.56eV，觀察一系列不同照射光能量的光電容變化。接著使用 LED 為照射光源，針對特定能量(1.03eV、1.16eV、1.36eV)作變光強度的 C-V 電性量測，觀察載子訊號的調變，發現成長越厚的 InAlAs 層會造成更明顯的光電容值。

### 4-1 光電容 Photocapacitance

在此章的分析中，固定照射光源強度為 0.1mW，能量從 0.9 eV (1378 nm) 至 1.56 eV (795nm)下，以 20meV 為間隔作 C-V 量測，再將所得照光之電容值在相同偏壓下減掉不照光之電容值，所得之電容差值即為光電容(Photo-capacitance)。為了排除掉溫度對載子躍遷的影響，照射光源的實驗皆在低溫下進行，圖 4-1(a)~(b)為四片樣品在低溫下的光電容圖。發現成長 In<sub>0.14</sub>AlAs 層的樣品在照射光源強度超過 1.3 eV 後，光電容值會大幅的提升，推測為缺陷的影響。

### 4-2 照射光源對缺陷之影響

從 4-1 節中，推測照射光源強度超過 1.3 eV 後大幅提升的光電容值來自於缺陷的貢獻，本節使用照射光強度更強 LED 為照射光源，做變光強度的 C-V 量測，圖 4-2~4-5 為低溫下照射光能量為 1.3 eV 的變光強度 C-V 圖。發現 SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0\text{\AA}$ )的 C-V 訊號照射光源後幾乎沒有變化。而成長 In<sub>0.14</sub>AlAs

層的樣品如 SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ ) 的 C-V 訊號如圖 4-8(a)，會發現原本在 -2.5 V ~ -3.5 V 的平台會隨光強度漸漸向淺偏壓移動，在最大光強度(1.5 mW)時，會移動到 -0.5 V ~ -1.5V 的位置。轉成縱深分布圖如圖 4-8(b)，發現原本峰值在 0.47 $\mu\text{m}$  的電荷堆積訊號，在光強度 0.15 mW 時，峰值位置移到 0.32 $\mu\text{m}$  的位置，之後隨光強度增強，峰值從 0.32 $\mu\text{m}$  移至 0.22 $\mu\text{m}$  的位置，當光強度超過 0.9 mW 後，圖形即無太大變化。由 3-2 節可知，低溫 77K 時外加小偏壓時，費米能階還沒調變到量子點的位置，但已經調變到缺陷能階，不過由於低溫下缺陷躍遷的速度很慢，無法量到訊號的變化。此時若外加一個照射光光源，加速缺陷載子躍遷的速率使載子躍遷至傳導帶，受場的影響往量子點方向移動，但是受到 InAlAs/GaAs 位障的阻擋，因而堆積在 InAlAs 層和 top GaAs 層的界面處，中和此區的正電荷形成中性區(Neutral region)，造成 Schottky band (蕭基界面至 InAlAs 層的能帶結構)空乏區回縮。外加固定逆向偏壓時，整個系統分成兩個部份如圖 4-6，為了維持整個系統的電壓平衡，必須使 Quantum band (量子點附近的能帶結構)增加 $\Delta V$  的壓降如式 4-1，促使費米能階調變到量子點的載子。

$$\frac{q}{2e} N_D L(t)^2 + \Delta V = V_R + V_{bi} \quad (4-1)$$

$N_D$  為掃動偏壓時對應之空乏區的背景參雜濃度(即長晶時的參雜濃度 n-GaAs 層參雜濃度)， $L(t)$  為受缺陷載子躍遷的影響，與時間相關的空乏區寬度， $V_R$  為外加逆向偏壓， $V_{bi}$  為製作蕭基界面產生的內建電位。當照射光源光強度越大時，更多的電子從缺陷躍遷至傳導帶，受 InAlAs 層的阻擋，跟正電荷中和形成較寬的中性區，此時量子點後面的能帶就有增加更大的壓降，使得費米能階調變量子點的載子，因此隨著光強度越強，圖 4-8(b)的量子點訊號會往較淺的位置移動。而比較圖 4-2~4-5 四片樣品的光電容值變化，也呼應了 3-2-2 節，成長 InAlAs 層會增加的阻擋載子的能力，形成較大的光電容變化。

### 4-3 照射光源對於量子點和缺陷的交互作用

由圖 4-1(a)~(b)得知，除了照光能量超過 1.3eV 外，介於 0.9 eV 至 1.3 eV 也會有小幅度的光電容抬升，推測與量子點相關。於是選了兩個能量(1.03eV、1.16eV)的 LED 為照射光源做低溫下的 C-V 量測。1.03eV 的 LED 恰好可以激發 G.S.的能階但不足以激發 E.S，而 1.16eV 的 LED 可以激發 G.S.跟 E.S.但能量不超過 1.3eV。量測結果如圖 4-7~4-8，發現使用 1.03eV 的 LED 為照射光源，C-V 曲線在  $V = -3.5 \text{ V} \sim -4 \text{ V}$  的位置有電容值的抬升，轉換成縱深分布圖，發現在不打光時電荷累積訊號位置較深的地方，隨光強度變強有一個隆起的電荷累積訊號，推測為 G.S.的訊號。接著使用 1.16eV 的 LED 為照射光源，從 C-V 曲線發現有更明顯的電容值抬升，轉換成縱深分布圖，發現在不打光時電荷累積訊號位置附近，隨光強度變強，有兩個電荷累積訊號在增加，推測為 G.S.和 E.S.的訊號。為了確定此現象是否跟缺陷有關，使用 1.03eV 的 LED 為照射光源，做變掃動偏壓速率的 C-V 量測，固定光強度為 0.1mW 改變掃動偏壓速率(532mV/s~27mV/s)。量測結果如圖 4-9，隨著掃動偏壓速率越慢，電容值會有更大的變化量，比照圖 4-7 發現會得到相似的圖形，是因為增加光強度也是增加載子躍遷的機率，跟放慢掃動偏壓速率一樣都是增加從缺陷躍遷出來的載子量。而這樣有掃動偏壓速率響應的現象，由 3-1 節可知，一般量子點載子躍遷速率的範圍都是在高頻程級，因此排除了是量子點能階本身吸光造成的影響，而應該是來自於缺陷的載子躍遷所造成的現象，考慮缺陷能階重新繪製能帶圖如圖 4-10。當外加足夠的電壓( $-3.5 \text{ V} \sim -4 \text{ V}$ )，量子點的電子受場的影響被掃了出去，使得能階上有了空缺，這時缺陷的電子就能激發至量子點的能階(G.S.、E.S.)上，而缺陷殘留的正電荷導致空乏區回縮，造成電子回填(Refilling)至量子點，因此從圖 4-7 和 4-8 的縱深分布圖可以看到量子點的電荷累積訊號隨光強度而增加的現象。

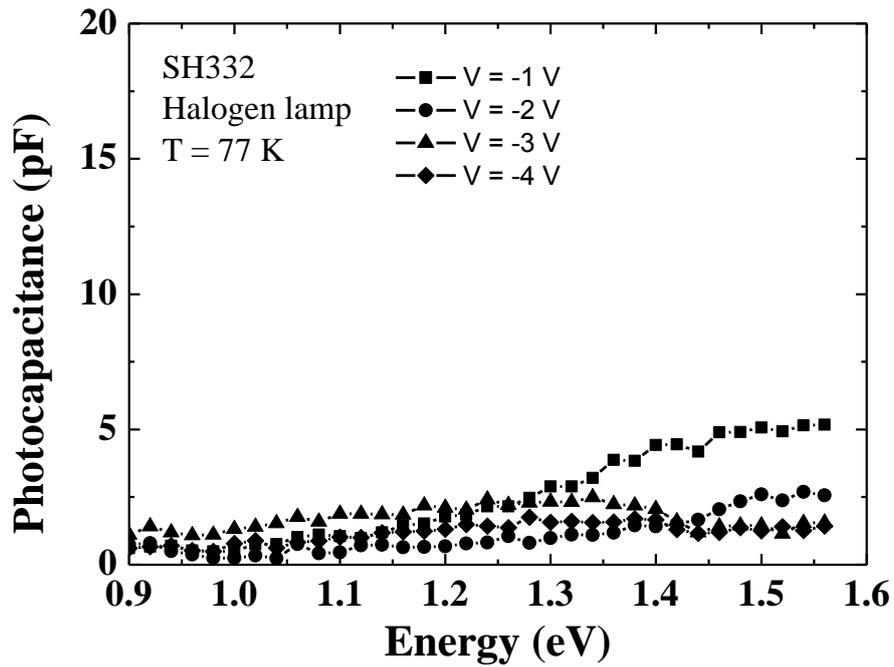


圖 4-1(a)SH332( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 0 \text{ \AA}$ )低溫 77K 變偏壓之光電容

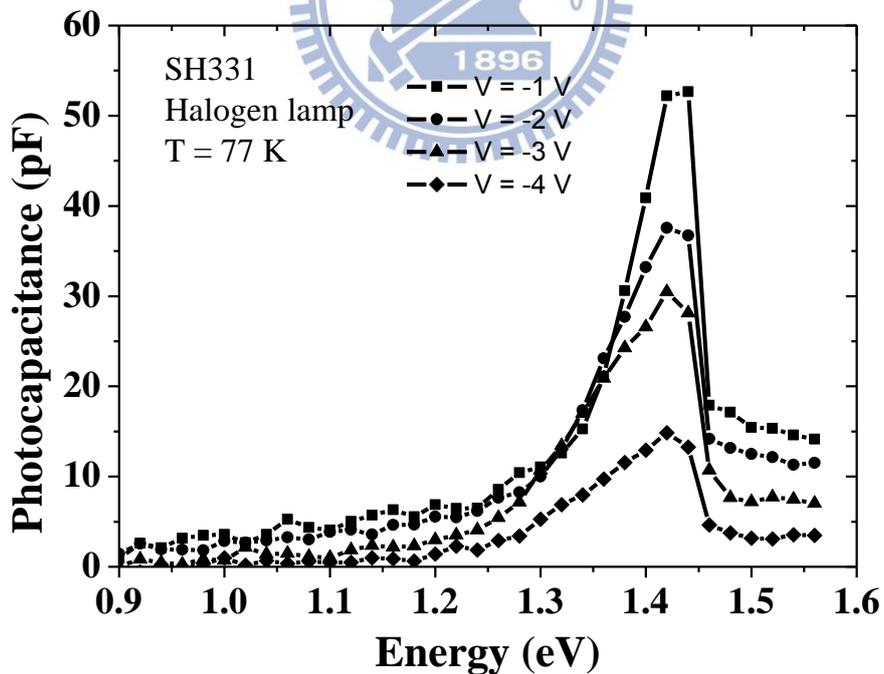


圖 4-1(b)SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10 \text{ \AA}$ )低溫 77K 變偏壓之光電容

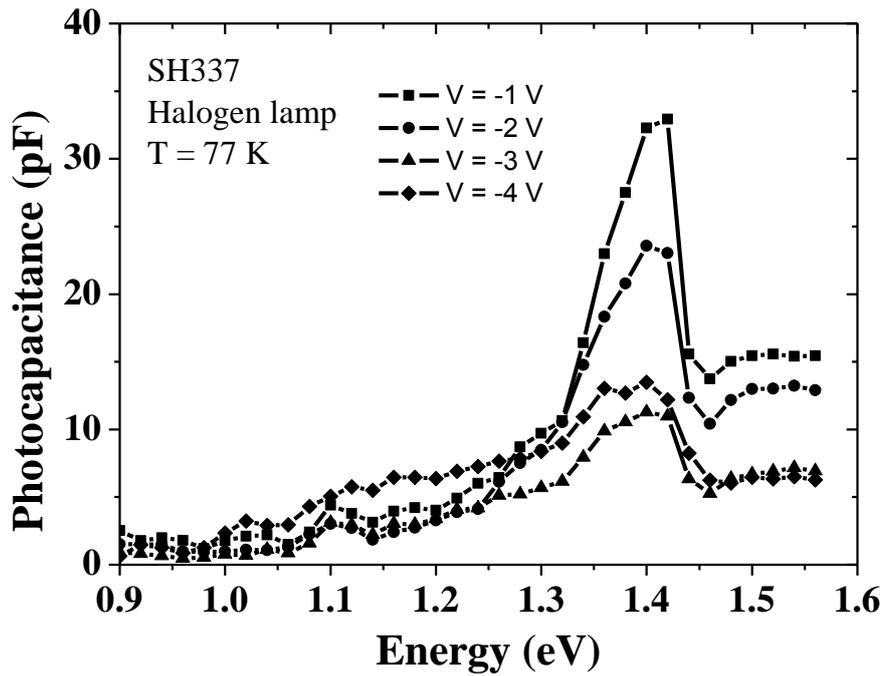


圖 4-1(c) SH337 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20 \text{ \AA}$ ) 低溫 77K 變偏壓之光電容

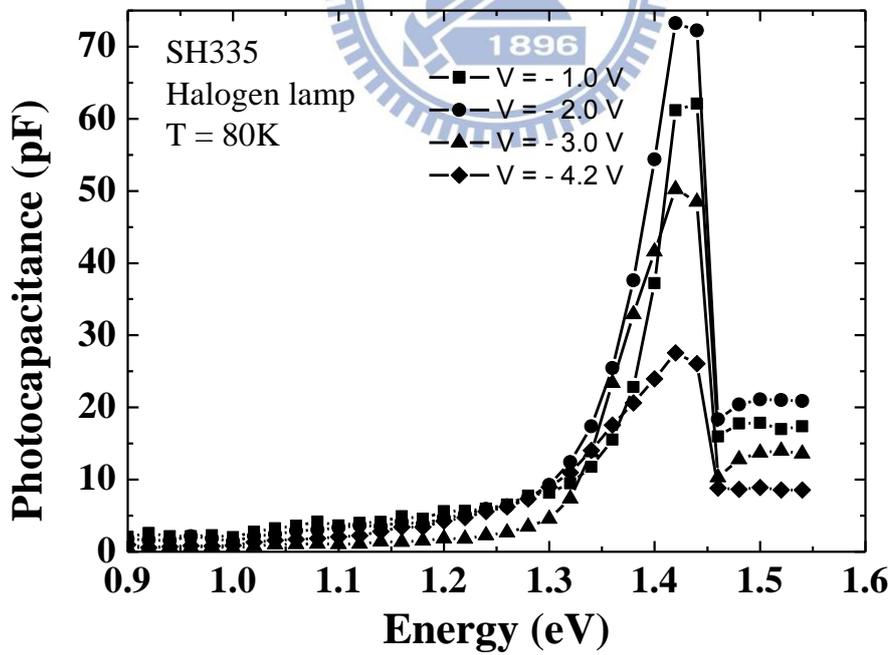


圖 4-1(d) SH335 ( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54 \text{ \AA}$ ) 低溫 77K 變偏壓之光電容

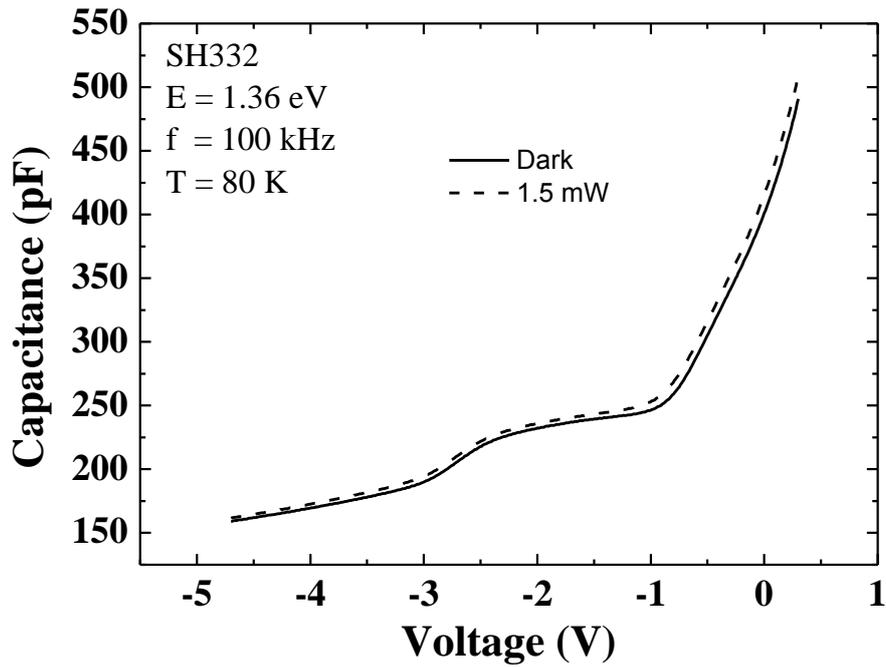


圖 4-2(a)SH332( $d_{\text{In}0.14\text{AlAs}} = 0 \text{ \AA}$ )  
 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36 \text{ eV}$ ) 變光強度之 C-V 圖

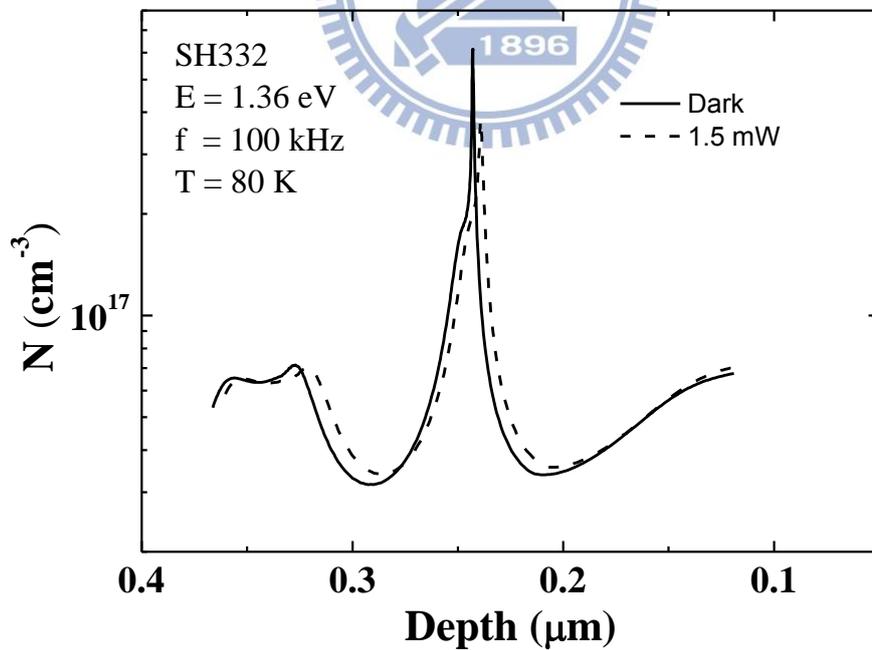


圖 4-2(b)SH332( $d_{\text{In}0.14\text{AlAs}} = 0 \text{ \AA}$ )  
 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36 \text{ eV}$ ) 變光強度之縱深分布圖

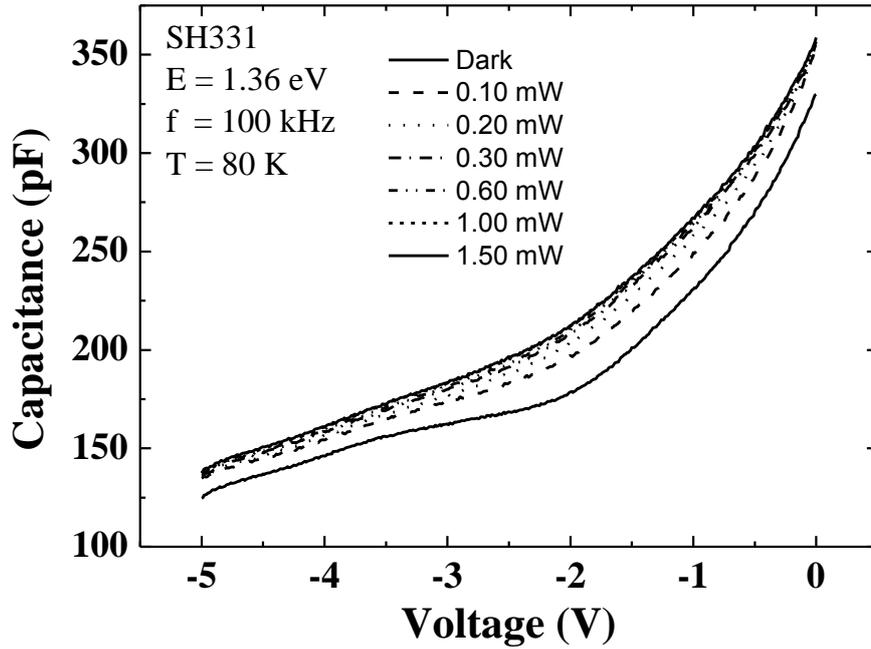


圖 4-3(a)SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )  
 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36 \text{ eV}$ ) 變光強度之 C-V 圖

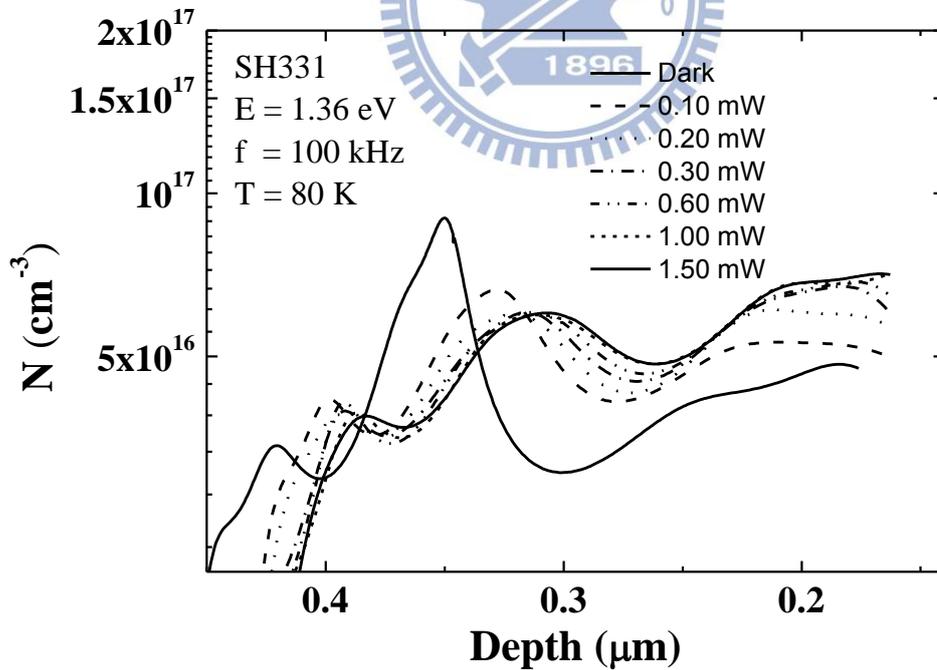


圖 4-3(b)SH331( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 10\text{\AA}$ )  
 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36 \text{ eV}$ ) 變光強度之縱深分布圖

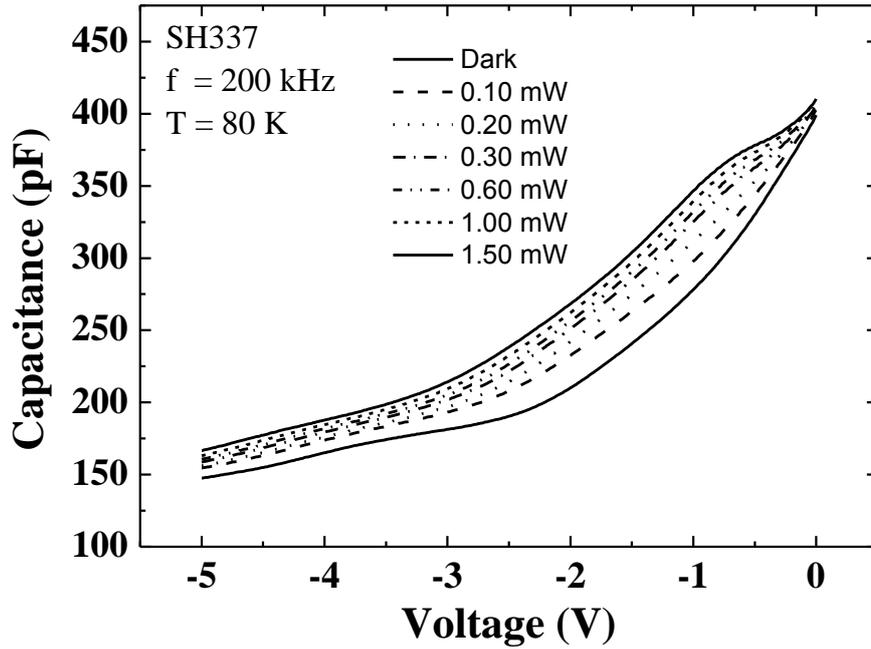


圖 4-4(a)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )  
 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ ) 變光強度之 C-V 圖

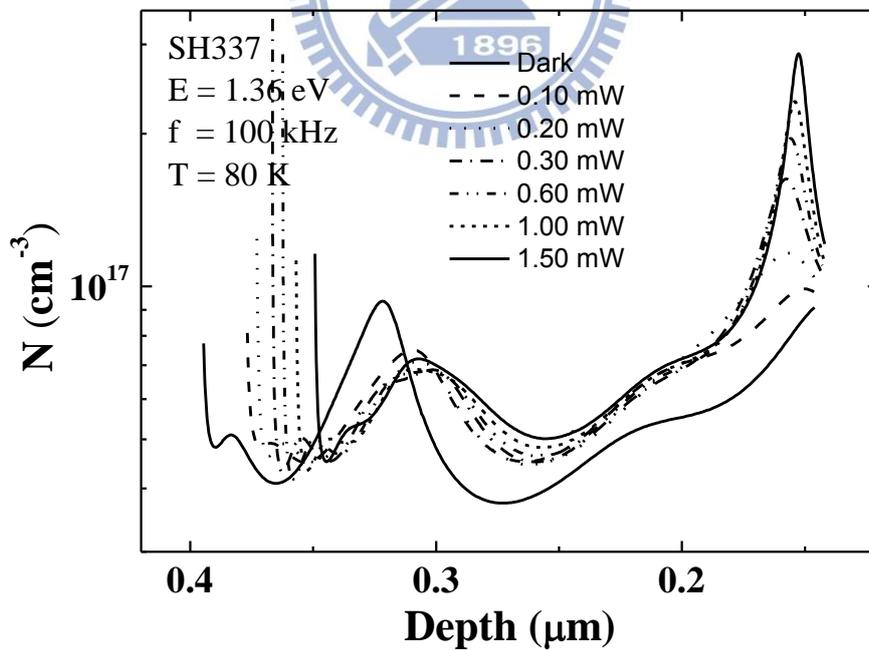


圖 4-4(b)SH337( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 20\text{\AA}$ )  
 低溫 80K 照射 LED ( $E = 1.36\text{ eV}$ ) 變光強度之縱深分布圖

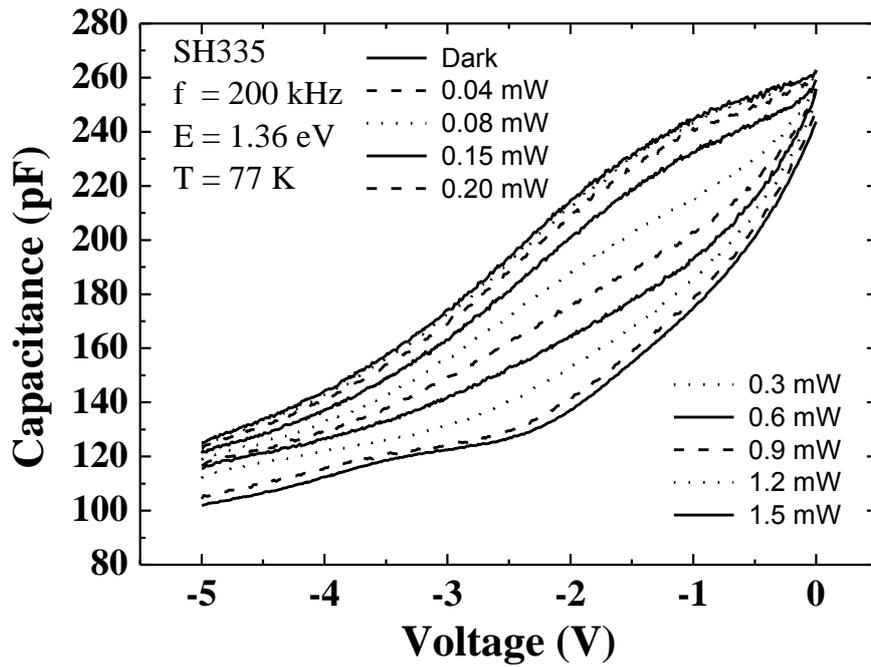


圖 4-5(a)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )  
 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.36 \text{ eV}$ ) 變光強度之 C-V 圖

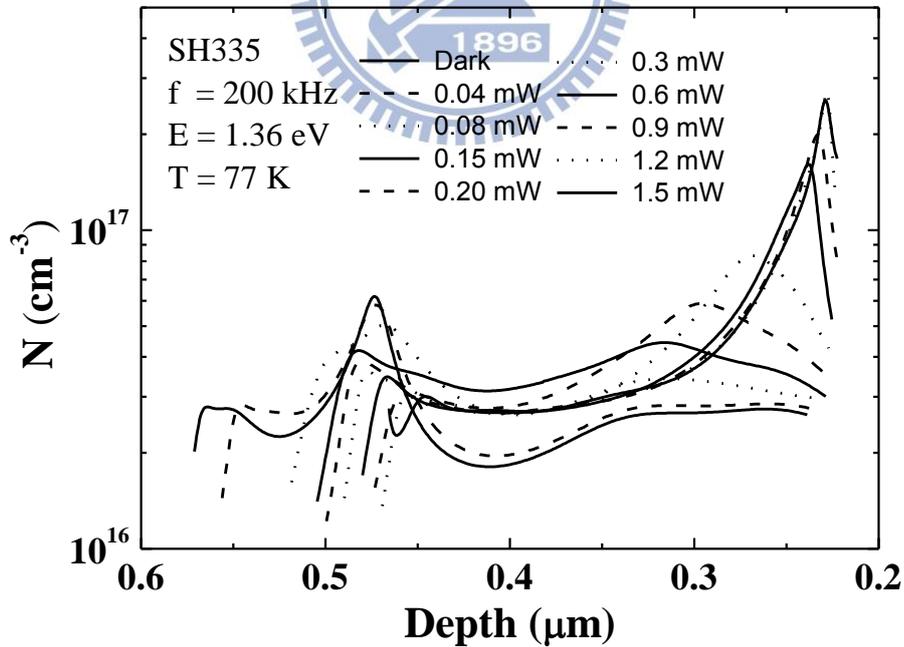


圖 4-5(b)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )  
 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.36 \text{ eV}$ ) 變光強度之縱深分布圖

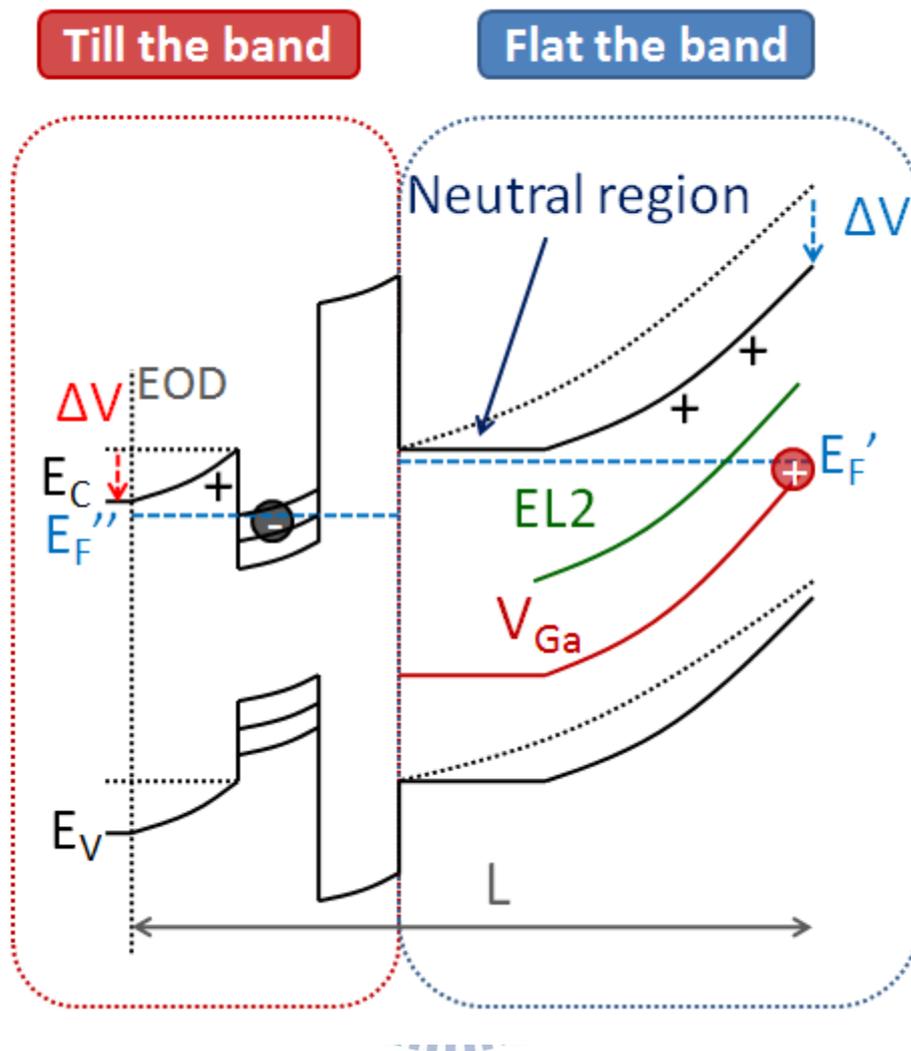


圖 4-6 照光下缺陷訊號直流偏壓影響載子躍遷能帶圖

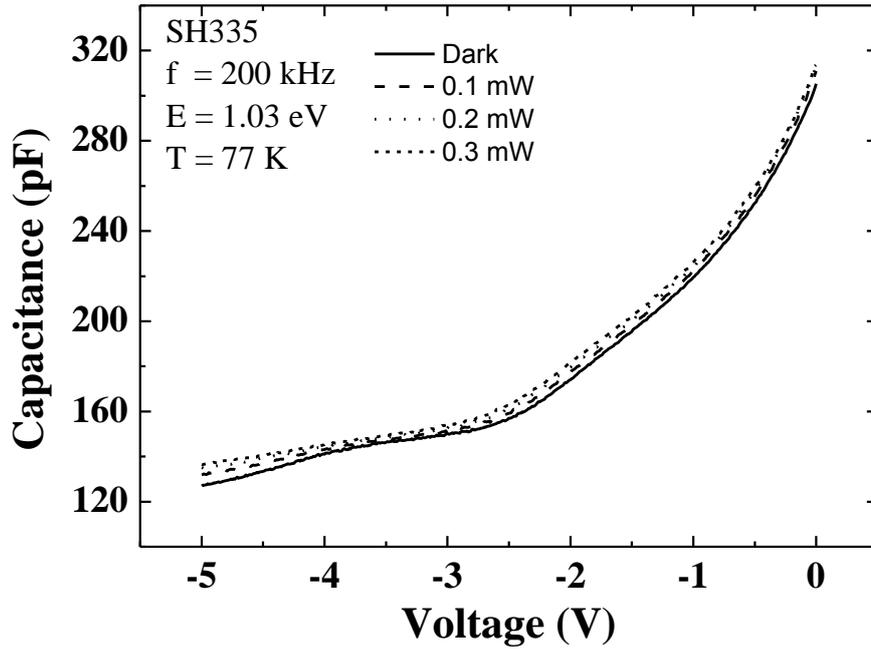


圖 4-7(a)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54 \text{ \AA}$ )  
 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.03 \text{ eV}$ ) 變光強度之 C-V 圖縱深分布圖

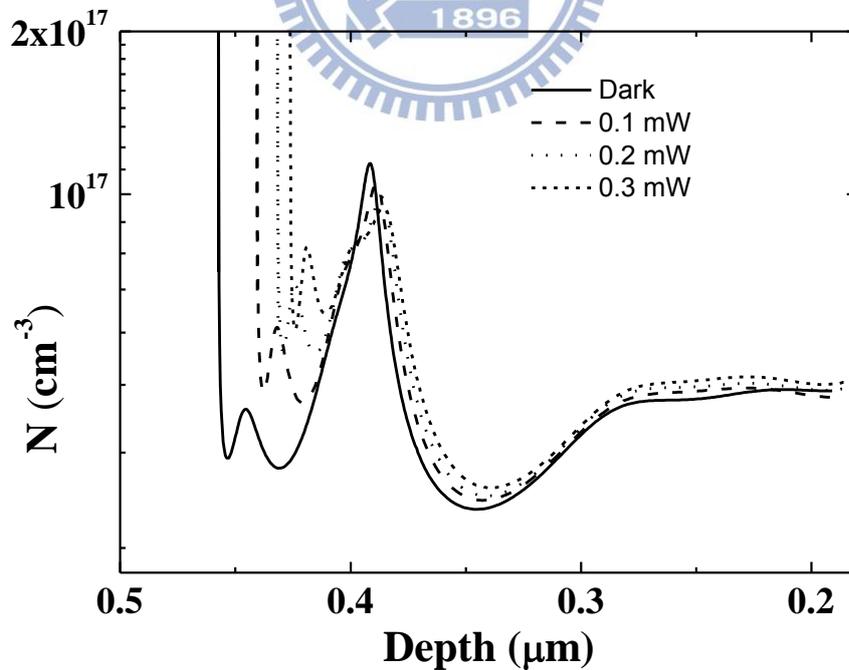


圖 4-7(b)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54 \text{ \AA}$ )  
 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.03 \text{ eV}$ ) 變光強度之 C-V 圖縱深分布圖

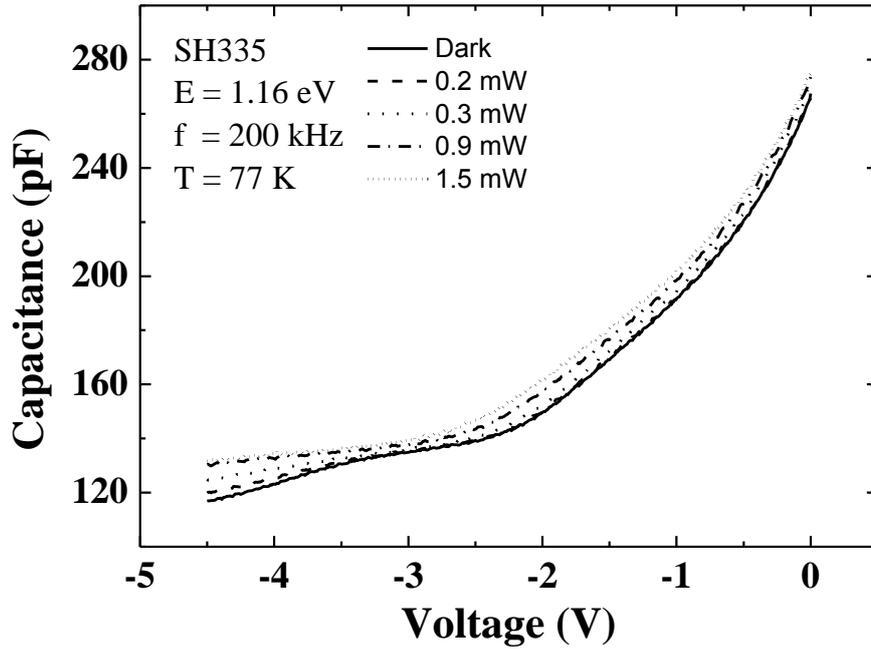


圖 4-8(a)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )  
 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.16\text{ eV}$ ) 變光強度之 C-V 圖

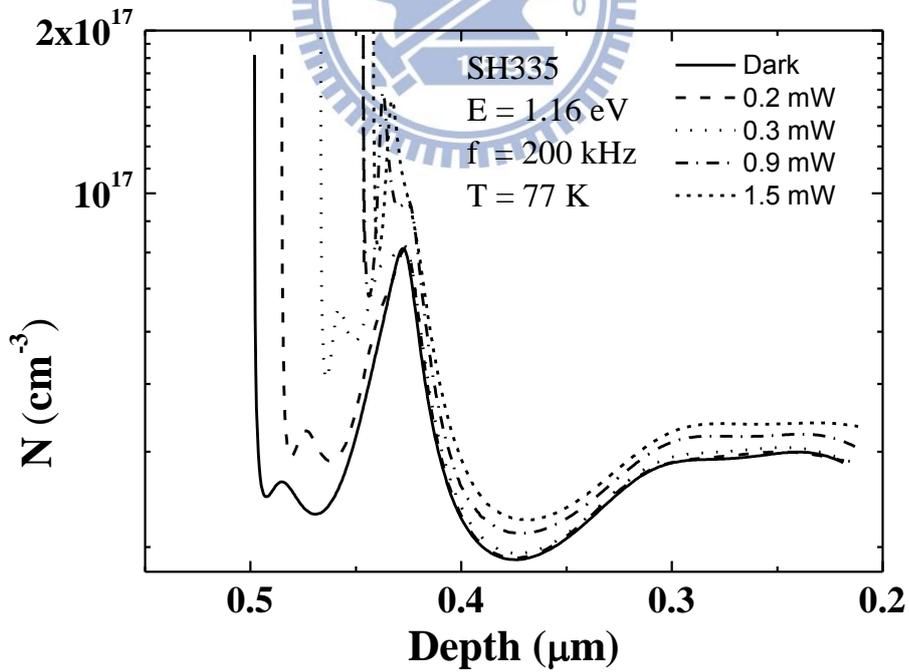


圖 4-8(b)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54\text{\AA}$ )  
 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.16\text{ eV}$ ) 變光強度之縱深分布圖

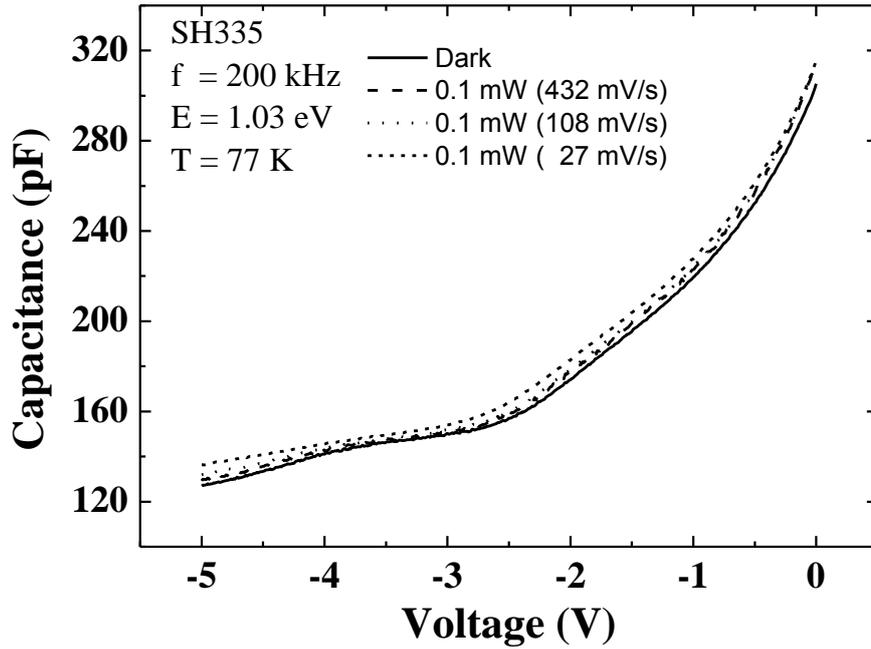


圖 4-9(a)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54 \text{ \AA}$ )  
 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.03 \text{ eV}$ )變掃動偏壓速率之 C-V 圖

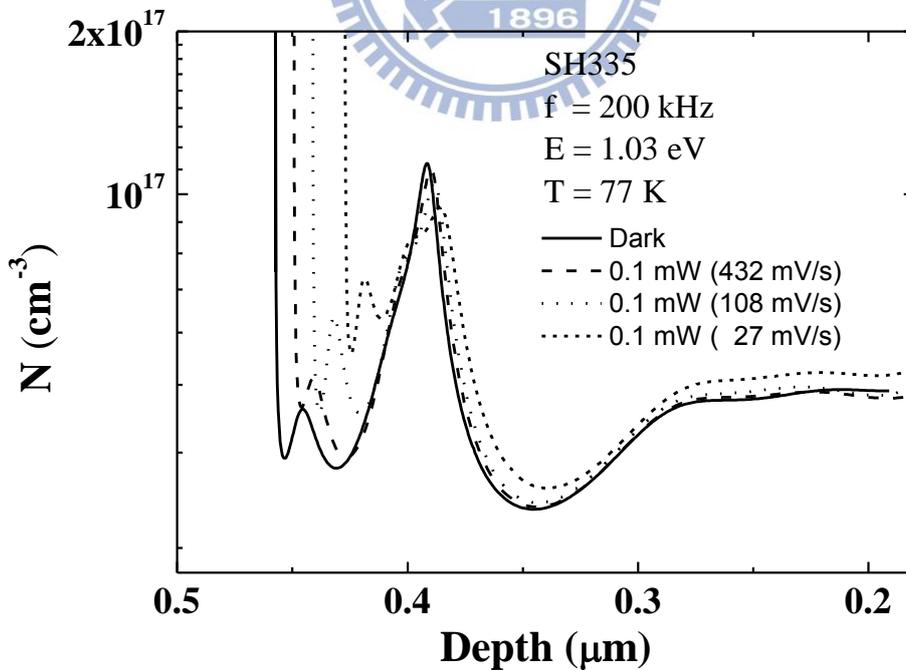


圖 4-9(b)SH335( $d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}} = 54 \text{ \AA}$ )  
 低溫 77K 照射 LED ( $E = 1.03 \text{ eV}$ )變掃動偏壓速率之縱深分布圖

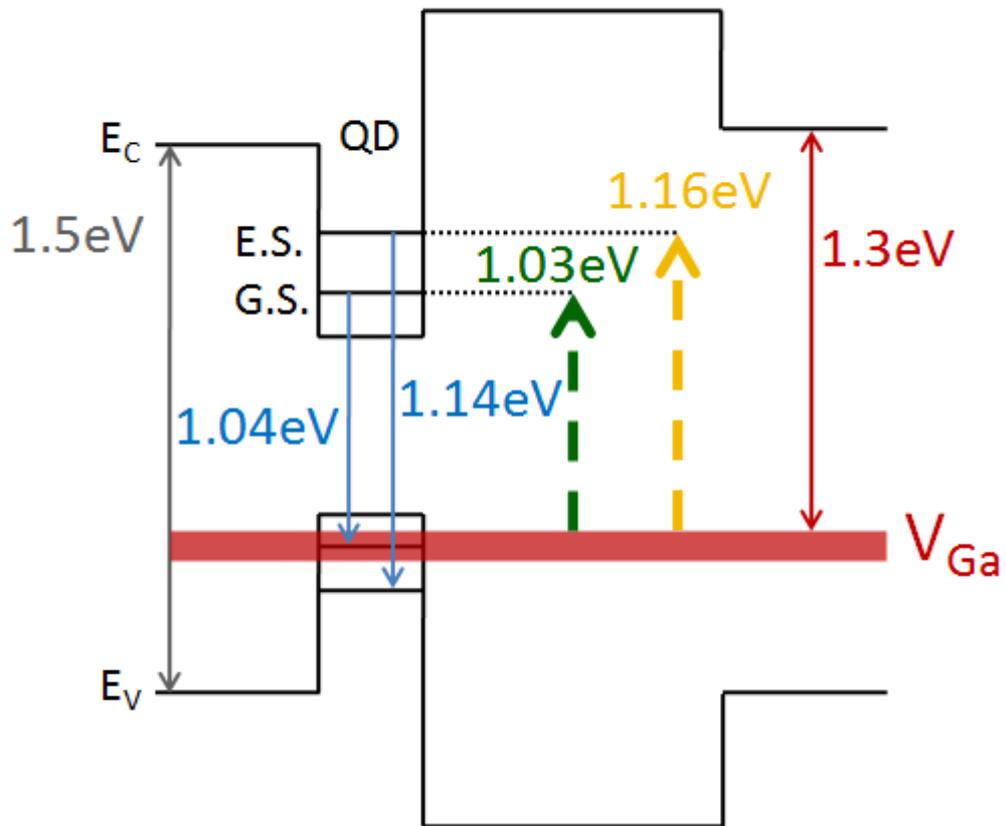


圖 4-10 考慮缺陷躍遷之能帶圖

## 第5章 結論

本論文主要是在討論在成長 2.4ML(monolayer, ML)的 InAs/GaAs 的量子點上再覆蓋一層不同厚度 In<sub>0.14</sub>AlAs (10Å、20Å、54Å)的樣品。一開始先透過 PL 量測作基本的光性分析，了解量子點的基態跟第一激發態放射訊號不同溫度所在的能量位置。接著藉由變掃動偏壓速率的 C-V 分析，在高溫時，發現一個遠慢於量子點躍遷速度的躍遷機制，推測為缺陷所造成的。並從變溫的 C-V 分析中，發現缺陷能階在低溫時躍遷速度緩慢，即使在外加偏壓下被費米能階調變到，也還不足以使載子躍遷出來；必須在高溫下，缺陷載子才會受熱激發躍遷至傳導帶，受到 InAlAs/GaAs 位障的阻擋，因而堆積在 InAlAs 層和 top GaAs 層的界面處，中和此區的正電荷形成中性區(Neutral region)，造成空乏區回縮，導致電容值抬升，因此在縱深分布圖上比量子點更淺的位置多出一個電荷累積訊號。這個訊號出現的溫度和出現掃動偏壓速率響應的溫度和偏壓位置一樣，更驗證了是由缺陷造成此訊號的出現，而隨 InAlAs 層厚度增加，更多從缺陷躍遷至傳導帶的電子被 InAlAs/GaAs 位障阻擋，造成更大的空乏區回縮，導致較大的電容值變化。此外，藉由逆掃的 C-V 分析，發現在逆掃時，仍有一些電子從缺陷躍遷出來，使得逆掃時的 C-V 曲線不與順掃的 C-V 曲線重合，而形成像是電滯曲線(Hysteresis)的圖形，呼應前面提出的缺陷載子躍遷模型。而 Hysteresis 的現象跟掃動偏壓速率的響應都有隨溫度的正相關趨勢，證明了成長 InAlAs 層的樣品中確實存在缺陷，而且是造成電容值變化的主要原因。

接著，探討外加光源下的電容變化，為了排除溫度對缺陷的影響，皆在低溫下進行實驗。先以鹵素燈為外加照射光源，作能量 0.9 eV ~ 1.6eV 的光電容量測，發現 1.3 eV 的能量會有最顯著的光電容抬升，推測為直接激發缺陷能階造成的結果。為了作進一步的分析，改用 LED 作為外加光源，並藉由調變

光強度期望能有更大的光電容變化。當以發光能量 1.36 eV 的 LED 為外加照射光源時，C-V 量測也會像是在升溫時，小偏壓的位置產生一個平台訊號；但不同的地方是轉成縱深分布圖後，會看到量子點的訊號隨光強度增加而向淺位置移動，這是因為照光時，整個系統分成 Schottky band (蕭基界面至 InAlAs 層的能帶結構)跟 Quantum band (量子點附近的能帶結構)兩部分；當中性區形成時，降低了 Schottky band 的壓降，為了維持整個系統的電壓平衡，必須使 Quantum band 增加壓降，促使費米能階調變到量子點內的載子。因此隨著光強度越強，更多的電子中和 Schottky band 上的正電荷，增加中性區的寬度造成 Quantum band 增加壓降，使得費米能階更早調變到量子點內的載子，因此會在縱深分布圖上會看到量子點的訊號隨光強度增加而向淺位置移動。

最後，考慮缺陷能階的位置，對照 PL 量測所得到的能帶圖，發現缺陷載子躍遷至量子點的可能性。以能量 1.03 eV 和 1.16 eV 的 LED 為外加照射光源作 C-V 量測，會發現量子點基態和第一激發態有填充載子的現象；而從掃動偏壓速率的響應說明這樣的電容變化來自於缺陷，證明了缺陷載子躍遷至量子點的可能性。

## 参考文献

- [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] Y. Arakawa, H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 939 (1982).
- [3] N. N. Ledentsov, V. A. Shchukin, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Bo'hrer, O. Schmidt, D. Bimberg, V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov, A. E. Zhukov, P. S. Kop'ev, S. V. Zaitsev, N. Yu. Gordeev, and Zh. I. Alferov, *Phys. Rev. B* **54**, 8743 (1996).
- [4] S. Kim, H. Mohseni, M. Erdtmann, E Michel, C. Jelen, and M. Razeghi, *Appl Phys. Lett.* **73**, 963 (1998)
- [5] K. Stewart, M. Buda, J. Wong-Leung, L. Fu, C. Jagadish, A. Stiff-Roberts, and P. Bhattacharya, *J. Appl. Phys.* **94**, 5283 (2003).
- [6] G. Yusa, H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 345 (1997).
- [7] S. Guha, A. Madhukar, and K. C. Rajkumar, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 2110 (1990).
- [8] D. L. Huffaker and D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 520 (1998).
- [9] I. N. Stranski, and L. Von Krastanov, *Akad. Wiss Lit. Main Math. Natur. Kl. lib*, **146**, 797 (1939)
- [10] Y. Nakata, K. Mukai, M. Sugawara, K. Ohtsubo, H. Ishikawa and N. Yokoyama, *Journal of Crystal Growth* **208**, 93 (2000).