

# 國立交通大學

## 電子物理研究所

### 碩士論文

砷化銦量子點上覆蓋不同材料之電性研究



Electrical Properties of InAs Quantum Dots Covered by  
Different Capping Layers

研究生：劉立偉

指導教授：陳振芳 教授

中華民國九十三年七月

砷化銦量子點上覆蓋不同材料之電性研究

Electrical Properties of InAs Quantum Dots Covered by  
Different Capping Layers

研究生：劉立偉

Student : Li-Wei Liu

指導教授：陳振芳

Advisor : Jenn-Fang Chen



Submitted to Institute of Electrophysics

College of Science

National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master

In

Electrophysics

July 2003

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年七月

# 砷化銦量子點上覆蓋不同材料之電性研究

研究生：劉立偉

指導教授：陳振芳博士

國立交通大學電子物理所

## 摘要

本論文主要是探討低成長速率InAs量子點、傳統Dots-in-Well結構量子點，在DWELL結構中插入了一層10Å In<sub>0.14</sub>AlAs高位能障，以及覆蓋了In<sub>0.14</sub>AlAs高位能障但將InGaAs QW拿掉等結構的量子點光電特性異同。五片樣品分別是0.09ML/sec的InAs量子點直接覆蓋上GaAs層、0.26ML/sec的InAs量子點蓋上44Å In<sub>0.14</sub>GaAs量子井而形成的DWELL結構、在DWELL結構中插入10Å In<sub>0.14</sub>AlAs高位能障、再將In<sub>0.14</sub>GaAs QW拿掉只蓋上10Å的In<sub>0.14</sub>AlAs高位能障以及再將In<sub>0.14</sub>AlAs高位能障加厚到54Å。五片樣品的發光波長分別是1276nm、1306nm、1284nm、1264nm以及1268nm都接近目標的1300nm。我們利用計算面積的方法來分析PL及縱深分佈圖，在低溫下縱深分佈出現兩個峰值分別可以對應PL中量子點基態以及激發態對載子的侷限。其中擁有最簡單結構的低成長速率InAs量子點樣品，自PL和縱深分佈上來看半高寬以及量子點密度以及基態與激發態間的能階差表現最不理想，只要加上In<sub>0.14</sub>AlAs高位能障這材料，不論是不是需要再加上In<sub>0.14</sub>GaAs量子井，都可使得量子點密度增加到 $9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ， $\Delta E_{ge}$ 拉大到99meV以上，並且波長也接近1300nm。此外低長晶速率InAs QDs以及加上10Å In<sub>0.14</sub>AlAs樣品中有無法避免的串聯電阻存在，推測這個串聯電阻的產生是來自於GaAs層的摻雜濃度太低( $< 6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )，串聯電阻造成的時間常數跟量子結構造成的時間常數剛好在同一個範圍，不小心就可能造成對訊號的誤判，我們應用簡單的等效電路模型修正了串聯電阻對C-V量測所造成的影響，低溫時縱深分佈上第二個載子侷限會對量測頻率有響應，並且估計出第二個載子侷限的活化能值約幾十個meV，加上沒有串

聯電阻樣品使用G-T量到活化能分別為 35meV和 51meV。綜合各點推論出縱深分佈的看到的訊號來自於量子點的基態跟激發態，而載子在量子點中運動的行為是基態跳躍到激發態而後再穿隧到GaAs的價帶上，而這個數十個meV的活化能正是基態跟激發態間的能階差。綜合各片樣品來看，在InAs上面覆蓋適當厚度的In<sub>0.14</sub>AlAs而不用蓋上In<sub>0.14</sub>GaAs quantum well是最好的一個結構。



# Electrical Properties of InAs Quantum Dots Covered by Different Capping Layers

Student : Li-Wei Liu

Advisor : Dr. Jenn-Fang Chen

Department of Electrophysics

National Chiao Tung University

## Abstract

The electrical properties of InAs quantum dots covered by different capping layer are investigated by current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V), and admittance spectroscopy. Five samples, capped with GaAs, 44Å In<sub>0.14</sub>GaAs quantum well, 10Å In<sub>0.14</sub>AlAs and 44Å In<sub>0.14</sub>GaAs combination layer, 10Å In<sub>0.14</sub>AlAs and 54Å In<sub>0.14</sub>AlAs, are studied. The direct capping GaAs sample is grown at a rate as low as 0.09ML/sec and the others grown at 0.26ML/sec. Similar area ratio of low-temperature concentration depth profile and PL data suggests that the two accumulation peaks in the depth profile are the emission processes due to quantum-dot ground and excited state.

Low n-GaAs buffer layer doping may cause series resistance with time constant about  $10^{-6}$ sec, a value close to the emission time for the carrier emitting from the ground state to the excited state of the QD. Base on an equivalent circuit model, we observe the quantum emission from the ground state of the QD after removing the effect of the series resistance. An activation energy about 50meV can be obtained, which is supposed to be the activation energy from the ground state to excited state of the QD. Comparison each sample' s FWHM and ground/excited state area ratio

from PL and concentration depth profile suggests that the structure capped with 10Å  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  without the  $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  QW is the preferable one.



# 目錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	iii
目錄	.....	v
圖表目錄	.....	vi
第一章 緒論	.....	1
1.1 前言	.....	1
1.2 研究動機	.....	1
1.3 論文架構	.....	2
第二章 樣品製備與量測系統介紹	.....	3
2.1 樣品製備	.....	3
2.2 電極的製作	.....	3
2.2.1 蕭基界面(Schottky contact)製作	.....	4
2.2.2 歐姆界面(Ohmic contact)製作	.....	4
2.3 量測系統簡介	.....	5
2.3.1 光性量測系統	.....	5
2.3.2 電性量測系統	.....	5
第三章 光性量測及分析	.....	6
第四章 電性量測及分析	.....	9
4.1 電流電壓(I-V)特性量測分析	.....	9
4.2 導納頻譜(admittance)分析	.....	10
4.2.1 缺陷在不同量測頻率下對導納量測的影響	.....	10
4.2.2 串聯電阻對導納頻譜量測的影響	.....	11
4.3 電容電壓(C-V)量測與串聯電阻研究分析	.....	12
4-3-1 室溫電容電壓量測	.....	12
4-3-2 串聯電阻的影響與分析	.....	13
4-4 低溫下 C-V、G-T 及 C-F 的量測與分析	.....	14
第五章 結論	.....	19
參考文獻	.....	21

## 圖表目錄

圖 2.1	各片樣品的結構.....	25
圖 3-1	各片樣品的 PL.....	26
圖 3-2	(a) 覆蓋 10A In <sub>0.14</sub> AlAs 樣品的 AFM 照片.....	27
圖 3-2	(b) DWELL 結構的 TEM 照片.....	27
圖 4-1	各片樣品在室溫時的 I-V 特性曲線.....	28
圖 4-2	TR753 在室溫時 C-F 關係曲線.....	29
圖 4-3	(a) TR753 在室溫時的變頻 C-V.....	30
圖 4-3	(b) TR753 在室溫時的變頻縱深分佈.....	30
圖 4-4	(a) SH430 室溫時的變頻 C-V.....	31
圖 4-4	(b) SH430 室溫時的變頻縱深分佈.....	31
圖 4-5	(a) SH335 室溫時的變頻 C-V.....	32
圖 4-5	(b) SH335 室溫時的變頻縱深.....	32
圖 4-6	(a) SH332 室溫時的變頻 C-V.....	33
圖 4-6	(b) SH332 室溫時的變頻縱深.....	33
圖 4-7	(a) 量子點蕭基結構串聯一個電阻.....	34
圖 4-7	(b) 量子點結構加上串聯電阻的等效電路圖.....	34
圖 4-8	(a) TR753 低溫時的變頻 C-V.....	35
圖 4-8	(b) TR753 低溫時的變頻縱深分佈.....	35
圖 4-9	(a) SH430 低溫時的變頻 C-V.....	36
圖 4-9	(b) SH430 低溫時的變頻縱深分佈.....	36
圖 4-10	(a) SH335 低溫時的變頻 C-V.....	37
圖 4-10	(b) SH335 低溫時的變頻縱深分佈.....	37
圖 4-11	(a) SH332 低溫時的變頻 C-V.....	38
圖 4-11	(b) SH332 低溫時的變頻縱深分佈.....	38
圖 4-12	SH335 的 G-T 圖.....	39
圖 4-13	SH332 的 G-T 圖.....	39
圖 4-14	由 SH335 及 SH332 由 G-T 所得到的阿瑞尼士圖.....	40
圖 4-15	(a) SH430 樣品在 83K 時 C-V 經過平移後.....	41



圖 4-15 (b)由上圖所得到的 C-F 圖形.....	41
圖 4-16 串聯電阻與結構的 C-F 圖.....	42
圖 4-17 所有樣品的阿瑞尼士圖.....	43
圖 4-18 電子運動情形的示意圖.....	44
圖 4-19 量子點載子躍遷時間與能階差跟能帶彎曲的關係.....	45
圖 4-20 對低溫 80K, 頻率 10KHz 的縱深分佈.....	46
表 2-1 各片樣品的結構與參數.....	3
表 3-1 各片樣品在室溫下 15mW 的 PL.....	6
表 4-1 各片樣品由 I-V 得到的理想因子與串聯電阻.....	10
表 4-2 各片樣品 C-V 得到的摻雜濃度與蕭基位障.....	12
表 4-3 各片樣品摻雜濃度之比較.....	14
表 4-4 各片樣品 fitting 縱深分佈的結果.....	17
表 4-5 SH430 與 SH331 兩片樣品之比較.....	18



# 第一章 緒論

## 1-1 前言

由於光纖通訊的發展，因此光通訊用的雷射扮演著一個非常重要的角色，適合光纖中的雷射波段為 850nm、1300nm 以及 1550nm，而半導體雷射可以擁有在高頻下操作、成本低廉等優勢，而其中 1300nm 是為這些波段當中較理想的一個，跟 1550nm 相比較，在高位元率(high-bitrate)的資料傳輸下 1300nm 是較為理想的波長。而跟 850nm 來比，在光纖傳輸的過程中，會被吸收衰減的較少因此可以傳遞的較遠，此外人類的眼睛對 1300nm 的敏感度約是 850nm 的二十分之一，在安全的規格標準之下現行使用 850nm 傳遞波段雷射每 300m 的距離便需要強波器來放大訊號，改用 1300nm 的雷射時這個距離可以拉大到 10km 遠[1]，因此開發高效率的 1300nm 半導體雷射是一件相當重要的事情。

量子點結構是在空間中三維的小尺寸結構，將一個材料的大小縮小到跟電子的物質波波長接近時，量子力學中告訴我們在這當中運動的電子會具有波動的性質並且電子的能階會分裂成不連續的能階，這樣的結構對光電元件、低門檻電流的雷射、光偵測器、高密度的光記憶體等都具有相當的潛力[2]，其中 InAs/GaAs 這樣材料的量子點結構發光的波長約在 1300nm 附近，正好可以符合光纖通訊用雷射的波長需求。

## 1-2 研究動機

先前成長在GaAs基板上的InAs量子點直接覆蓋上GaAs材料時，發光的波長只能到 1240nm左右[3]，無法拉長到 1300nm。藉由覆蓋InGaAs量子井形成所謂DWELL結構的方式可使波長拉長到 1300nm[4][5]，但是InGaAs這個材料會使量子點周

圍的位能障降低，這使得以DWELL這樣結構的雷射元件溫度的穩定性不佳。運用低長晶速率成長InAs QDs層後直接蓋上GaAs這樣的結構可以在室溫下將波長增加到 1300nm[6][7]附近，並且能夠避開了量子點周圍的位能障降低的現象，這樣低長晶速率的樣品在本篇論文中也會拿來跟其他的樣品加以比較，此外InAs量子點能階中基態跟激發態能階的差會影響到製作成雷射後threshold current density對溫度的敏感度[3][8]，因此我們希望基態跟激發態的能階差越大越好，此外量子點的密度大小也會影響雷射的threshold current density大小以及發光的效率[3]。若是在成長完InAs量子點之後在蓋上一層In<sub>0.14</sub>AlAs或AlAs[9][10][11]這樣的材料可以將波長拉長到1300nm左右，基態跟激發態的能階差可以到108meV[10]並且可以有效的增加量子點的密度，文獻上面對這樣的結構普遍都是用PL來做光性分析，對於電性分析探討的並不多，本篇論文就是針對低長晶速率直接覆蓋GaAs capping layer的樣品以及覆蓋In<sub>0.14</sub>GaAs形成DWELL結構以及覆蓋InAlAs材料做光性(PL)及電性的分析。



### 1-3 論文架構

- 第二章 敘述樣品的製作過程以及所使用的量測系統做介紹。
- 第三章 光性PL量測，再對結果加以討論分析。
- 第四章 電性量測的結果，當中包括I-V、C-V、C-F及G-T，並對其結果討論分析。
- 第五章 將前面所得的結果在此做整理，並將光性及電性量測到的結果加以比較討論。

## 第二章 樣品製備與量測系統介紹

### 2-1 樣品製備

本論文中的樣品皆是由分子束磊晶(Molecular beam epitaxy)方式來成長，首先在 $n^+$ -GaAs(100)基板上成長  $0.3 \mu\text{m}$  矽摻雜n-GaAs buffer layer，成長溫度為  $600^\circ\text{C}$ ，接下來將溫度降到  $480^\circ\text{C}$ ，成長 2.4ML的InAs QDs層，之後再成長不同的覆蓋層，TR753 樣品為直接覆蓋上n-GaAs，SH332 則為覆蓋上  $44\text{\AA}$ 的 $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  QW層，\*SH331 為在SH332 DWELL結構中插入一個  $10\text{\AA}$ 的 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  high potential barrier材料，接下來SH430 樣品將 $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  QW拿掉，蓋上  $10\text{\AA}$  的 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 後直接蓋上GaAs，SH335 將 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 增厚到  $54\text{\AA}$ ，最後在成長同樣是  $0.3 \mu\text{m}$  矽參雜n-GaAs cap layer，至此就完成各片樣品的製備，[圖 2-1]為各片樣品的結構圖，而各個樣品的長晶參數則列於[表 2-1]中。



[表 2-1]

結構	編號	n-GaAs 層 參雜濃度	InAs 長晶速率	$\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 或 $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$ 層厚度
InAs	TR753	$4.63 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$0.09 \text{\AA}/\text{sec}$	0
InAs/ $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$	SH332	$7.25 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$0.26 \text{\AA}/\text{sec}$	$44 \text{\AA}$
InAs/ $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}/$ $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$	*SH331	$6.9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$0.26 \text{\AA}/\text{sec}$	$10 \text{\AA}$ $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ + $44 \text{\AA}$ $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$
InAs/ $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$	SH430	$5.43 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$0.30 \text{\AA}/\text{sec}$	$10 \text{\AA}$
InAs/ $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$	SH335	$10.2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$0.26 \text{\AA}/\text{sec}$	$54 \text{\AA}$

\*SH331 為參考文獻[22]中，同一個實驗室同學的樣品，引用數據結果來比較。

### 2-2 電極的製作

樣品的電極製作分為兩個方面，分別為正面的蕭基界面(Schottky contact)製作與背面的歐姆界面(Ohmic contact)製作。

### 2-2-1 蕭基界面(Schottky contact)製作

我們首先要將自MBE成長出來的晶片樣品的正面蒸鍍上圓形的圖形，我們使用的金屬為鋁(Al)作為蕭基電極，圓形圖形的直徑為  $800\ \mu\text{m}$ (面積為  $0.005024\text{cm}^2$ )，蕭基界面的好壞會直接的影響到我們量測的結果，因此在蒸鍍前的清洗動作非常重要。以下簡單的敘述晶片清洗的步驟：

- I. 置入去離子水(D. I. water)用超聲波震盪器震盪 5 分鐘→去除一般雜質
- II. 置入丙酮(A. C. E)溶液中用超聲波震盪器震盪 5 分鐘→去除油漬。
- III. 置入去離子水中用超聲波震盪器震盪 5 分鐘→去除丙酮。
- IV. 將晶片放入稀釋過的鹽酸溶液(HCl:H<sub>2</sub>O=1:1)中 10 秒→去除陽離子以及表面的氧化層。
- V. 置入去離子水中用超聲波震盪器震盪 5 分鐘→去除殘餘的鹽酸溶液。

至此清洗步驟算是完成，接下來將晶片放於載具(holder)上，放上金屬遮罩(mask)固定後(事前先將載具跟金屬遮罩用丙酮擦拭過並用氮氣吹乾)一起放入蒸鍍機中固定放好，接下來將清潔過後鎢舟(Tungsten boat)及靶材鋁放入蒸鍍機中，將真空度抽到  $5 \times 10^{-6}$  torr以下時即可以開始蒸鍍，通電流約 50A加熱使鋁汽化後便蒸鍍在晶片上，至此即完成正面的蕭基界面製作。

### 2-2-2 歐姆界面(Ohmic contact)製作

在做好上述蕭基界面樣品後，在背面我們黏上兩顆銻(Indium)球，送入通入氮氣的高溫爐管(300°C)中約 10 秒鐘，然後對這兩點量測電阻值，確定這兩點間的阻值小於 10 歐姆，之後取一片矽基板加熱至 200°C左右，均勻的塗上一層銻後將樣品背面黏於矽基板上，如此便完成背面的歐姆界面製作，整個樣品的製作也到此告一段落。

## 2-3 量測系統簡介

量測系統分為光性量測跟電性量測兩部分。

### 2-3-1 光性量測系統

PL(Photoluminescence)量測系統：包括真空腔體、降溫用壓縮機 (compressor)、固態雷射(波長為 532nm，功率為 1.5W)、分光儀、Optical chopper、透鏡組、衰減片、high pass filter 以及 InGaAs 光偵測器等。

### 2-3-2 電性量測系統

- I. Keithley 236：用來量測電流-電壓(I-V)的特性曲線。
- II. HP 4194 阻抗/增益相位分析儀：主要用來量測電容-電壓(C-V)、電容-頻率(C-F，亦稱為 admittance spectroscopy)和暫態電容(transient capacitance)等特性曲線。
- III. DLTS 系統(SULA technology)：拿來做 DLTS 技術的量測。
- IV. LakeShore 330 溫控器。
- V. 變溫量測系統：包括 Cryogenic、真空幫浦、真空腔體、三軸探針台及液態氮鋼瓶。

所有實驗量測的儀器經由 GPIB 介面與個人電腦相連接進行儀控以及擷取數據，之後對數據的計算以及整理成圖形皆在個人電腦上進行工作。

### 第三章 光性量測及分析

#### Photoluminescence(PL)量測分析

PL 量測實驗中我們所使用的雷射為波長 532nm 的半導體雷射，輸出功率為 1.5W，經過衰減片後調變功率為 15mW 及 90mW，使用的偵測器為 InGaAs 光偵測器適用範圍在 800nm~1800nm，[圖 3-1]為各片樣品在室溫底下功率為 15mW 量測結果，而主要峰值位置跟半高寬大小如[表 3-1]表示。

表 3-1：溫度 300K，功率 15mW

	基態 FWHM (meV)	$\lambda_g$ (nm)	$\lambda_e$ (nm)	$\Delta E$ (meV)	基態面積	激發態面積	基態面積/激發態面積
TR753	40.19	1276	1196	66	0.01674	0.02886	0.58
SH332	39.21	1306	1210	75	0.05313	0.07704	0.69
*SH331	40.2	1284	1163	101	0.19124	0.10336	1.85
SH430	32.62	1266	1150	99	0.07274	0.03615	2.01
SH335	44.67	1268	1146	104	0.03519	0.01449	2.42

由PL的Data中可以發現，不論是TR753 低長晶速率的量子點樣品、覆蓋不同厚度In<sub>0.14</sub>AlAs層或是DWELL結構都可以將波長拉長到 1266nm以上。首先我們先來比較低長晶速率的TR753 與傳統DWELL結構的SH332 這兩片樣品。

低長晶速率 QDs 的樣品 TR753 基態的發光波長為 1276nm 半高寬為 40.19meV，DWELL 結構的 SH332 波長是最長的 1306nm 半高寬是 39.21meV，這兩個樣品的 $\Delta E_{ge}$  都是比較小的，均在 75meV 以下，在半高寬來說 TR753 比 SH332 來的略差，推測是因為對 TR753 這片低長晶速率的樣品來說，QDs 的大小均勻性

較差[12]因此導致於半高寬的加大。在基態面積比激發態面積這個比值上來看 SH332 比 TR753 來的大，PL 的面積可以看成是載子佔據能階的數目，當載子將 QDs 基態的能階填滿，就會填到激發態上面去，當 QDs 的數目不是很多時，基態的能階很容易就被填滿而填到激發態上面去，當具有相同的載子數目產生時，就可以用基態跟激發態面積的比值來估計量子點密度誰大誰小，低長晶速率量子點的樣品這個比值是 0.58 而 DWELL 結構是 0.69，也就是說 DWELL 結構的量子點密度比 low growth rate QDs 樣品的量子點密度略大，且均勻性較好。稍後在第四章會用電性量測的結果來加以比較。

從 PL data 來看，在 DWELL 結構中加了 10Å In<sub>0.14</sub>AlAs capping layer 的 \*SH331 樣品，基態跟激發態的能階差拉大到 101meV，我們將 PL 圖形中強度對波長的圖形做 fitting[15]，求得基態跟激發態強度對波長所圍成的面積，假設每一個量子點可以捕捉的載子數目是固定的，pumping power 很大的時候提供了很多的載子，當 ground state 的位置都被填滿的時候載子就會填往 excited state 甚至是 2nd excited state，當量子點密度變大，在基態可容納的總載子數目就變多，載子也就較不容易填到激發態上面去，用基態跟激發態面積的比值可以估計出量子點密度誰多誰少。在 15mW 的 pumping power 之下 DWELL 中加了 10Å In<sub>0.14</sub>AlAs 的 \*SH331 基態跟激發態面積的比值為 1.85。

接下來將 \*SH331 結構中的 InGaAs QW 拿掉，變成只蓋 10Å In<sub>0.14</sub>AlAs 材料的 SH430，然後將 In<sub>0.14</sub>AlAs 加厚到 54Å 成為 SH335，這兩個樣品的  $\Delta E_{ge}$  為 99 與 104meV，加了 In<sub>0.14</sub>AlAs 的樣品比沒加的 TR753(QDs)、SH332(DWELL)  $\Delta E_{ge}$  來的大，而基態跟激發態的面積比也分別為 SH430 的 2.01 跟 SH335 的 2.42，也就是說在加進了 In<sub>0.14</sub>AlAs 之後不管有沒有後面的 In<sub>0.14</sub>GaAs quantum well 存在，都可以使得量子點的密度變大，我們自 PL 量測上也可以推論量子點的密度變大了。

當加入了含有 Al 的材料的當 capping layer，可以使得量子點周圍的 potential barrier 變高，另外由於 Al 跟 As 之間的鍵結力比 In 跟 As 之間的鍵結力來的強，因此可以使得 In 留在 QDs 層裡面而不會擴散到 GaAs 層中，使得



InAs 量子點的密度沒有因為擴散作用而減少，另一方面也使 InAs 中 In 跟 As 的比例沒有因為 In 原子的擴散而有太大的改變也可以使量子點周圍的 potential barrier 相對的也會較高，這樣的效應會使得量子點中的基態跟激發態能階差加大[13][14]。

另一方面由覆蓋 10Å In<sub>0.14</sub>AlAs 樣品的 AFM 圖形來看[圖 3-2(a)]，我們可以算出量子點的密度大約是  $9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ，而比較先前在相同長晶機台上得到同樣是 DWELL 結構樣品的 TEM 圖形[圖 3-2(b)][16]上來算，量子點的密度大約是  $3 \sim 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ，這樣的 AFM 跟 TEM 所求得的量子點密度，也告訴了我們量子點的密度在加上 InAlAs 這層材料後，大約增加了 2 到 3 倍，提升到了接近  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ，稍後在第四章中亦會用載子縱深分佈來加以比較。



## 第四章 電性量測及分析

### 4-1 電流電壓(I-V)特性量測分析

在做其他的分析之前，首先藉由量測樣品的電流電壓(I-V)特性曲線，來判斷此片樣品在蒸鍍金屬形成的 Schottky Diode 元件的界面好壞，以及漏電流的大小，這些數據可作為其他電性量測時的重要參考依據。

依據 Schottky 接面的電流特性

$$I = I_s e^{\frac{e(V-IR_s)}{nkT}} - I_s \quad (4-1)$$

其中  $I_s$  為逆向飽和電流(saturation current)， $R_s$  為串聯電阻， $n$  是理想因子(ideal factor)， $T$  是溫度， $k$  是波茲曼常數。由  $n$  的數值可以判斷元件的 Schottky 特性好壞，當  $n$  越接近 1 代表 Schottky 特性越好。[圖 4-1] 中是各片樣品在室溫時的順向電流電壓(I-V)特性曲線，由[圖 4-1]經由(4-1)式計算可得到  $I_s$  逆向飽和電流(saturation current)、 $R_s$  串聯電阻及  $n$  理想因子(ideal factor)。

$J_{sT}$  逆向飽和電流密度(reverse-saturation current density)跟  $\phi_{bn}$  蕭基位障(Schottky barrier height)的關係式

$$J_{sT} = A^* T^2 e^{\frac{-e\phi_{bn}}{kT}} \quad (4-2)$$

其中  $A^*$  是effective Richardson constant，對n-type的GaAs材料來說  $A^*$  值為  $0.41A/K^2\text{-cm}^2$ [17]，藉由(4-2)式和前面所求得的  $I_s$  逆向飽和電流就可以求得  $\phi_{bn}$  蕭基位障(Schottky barrier height)，這個  $\phi_{bn}$  的大小稍後會跟由電容電壓(C-V)特性中所求得的值相互比較。各片樣品經由I-V特性曲線所求得的  $I_s$  逆向飽和電流(saturation current)、 $R_s$  串聯電阻及  $n$  理想因子(ideal factor)及  $\phi_{bn}$  (Schottky barrier height)整理在[表 4-1]中

表 4-1

	n	Is(A)	Rs( $\Omega$ )	$\phi_{bn}$ (V)
TR753	1.59	$2.674 \times 10^{-9}$	1211	0.646
SH332	1.14	$4.017 \times 10^{-9}$	93	0.635
*SH331	1.8	$7.83 \times 10^{-10}$	104	0.667
SH430	1.30	$4.638 \times 10^{-9}$	437	0.631
SH335	1.43	$1.284 \times 10^{-10}$	119	0.724

從上表中發現每一片樣品的 ideal factor 都還可以，蕭基位障為 0.7V 左右，跟文獻上所記載 Al 與 n-GaAs 接面的蕭基位障 0.8V[18]相差不多，這是一個不錯的蕭基元件，從上表可以看到 TR753 和 SH430 這兩片樣品的都有一個較大串聯電阻在，串聯電阻的來源一般是由於基材電阻或接面的電阻所造成，另外的可能來源是由於樣品本身的缺陷太多或是摻雜濃度太低，造成自由載子被空乏而使得電阻加大，這個串聯電阻會影響到 C-V、C-F 等的量測，而這個串聯電阻對 C-V 和 C-F 等的影響將在後續加以討論。

## 4-2 導納頻譜(admittance)分析

對元件輸入一個小交流電壓訊號  $\tilde{v}_0 e^{j\omega t}$ ，元件會有一個小交流電流訊號  $\tilde{i}_0 e^{j\omega t}$  產生，其導納的定義為

$$Y(\omega) = \frac{\tilde{i}_0}{\tilde{v}_0} = Gp(\omega) + j\omega Cp(\omega) \quad (4-3)$$

### 4-2-1 缺陷在不同量測頻率下對導納量測的影響

$$C_i(\omega) = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_i}\right)^2} \quad (4-4)$$

$$G_i(\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_i}\right)^2 \omega_i C_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_i}\right)^2} \quad (4-5)$$

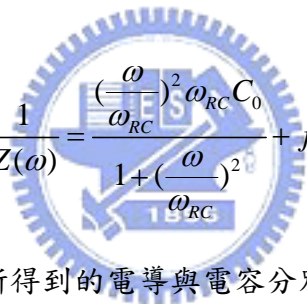
其中  $\omega_i = 2e_n$  (emission rate)

#### 4-2-2 串聯電阻對導納頻譜量測的影響

當我們考慮電容  $C_0$  與某種原因造成的電阻  $R$  串聯時，其總阻抗為

$$Z(\omega) = R(\omega) + \frac{1}{j\omega C_0(\omega)} \quad (4-6)$$

導納為



$$Y(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2 \omega_{RC} C_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2} + j\omega \frac{C_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2} \quad (4-7)$$

其中  $\omega_{RC} = 1/(RC_0)$ ，而量測所得到的電導與電容分別為

$$G_R(\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2 \omega_{RC} C_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2} \quad (4-8)$$

$$C_R(\omega) = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2} \quad (4-9)$$

這是串聯電阻跟電容產生的 RC 時間常數所造成的影響。

將上述  $C(\omega)$  對  $\omega$  圖形的取反曲點 (inflexion)，可以得到  $\omega_i = \sqrt{3}\omega_{inflexion}$  又從  $G(\omega)/\omega$  對  $\omega$  圖形時，峰值的地方  $\omega_i = \omega_{peak}$ ，又  $\omega_i = 2e_n$ ，利用這個方法就可以得到串聯電阻的  $\omega_{RC}$  或是缺陷的  $\omega_i$ ，再加上不同溫度下的量測時，即可畫成阿瑞尼士圖得到活化能及載子捕捉截面積。從上面(4-8)跟(4-9)與之前的(4-4)、

(4-5)比較，可以發現串聯電阻與缺陷對導納與電容量測具有相同形式的影響，因此在分析導納頻譜時要小心分辨訊號的來源為何。

### 4-3 電容電壓(C-V)量測與串聯電阻研究分析

#### 4-3-1 室溫電容電壓量測

電容電壓(C-V)量測是利用外加逆向偏壓來空乏半導體內部的自由載子，藉由改變空乏區寬度的大小及簡單的平行板電容式

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{W} \quad (4-10)$$

$\epsilon$  為半導體的介電係數(dielectric constant)對GaAs來說為 13.1，A為元件的面積，對所有我們的樣品皆為  $0.005024\text{cm}^2$ ，W為空乏區寬度大小。由上式可知改變空乏區寬度W的大小所得到的電容值大小也會隨之改變。

$$N(W) = \frac{2}{e\epsilon\epsilon_0 A^2 \left[ d\left(\frac{1}{C^2}\right) / dV \right]} \quad (4-11)$$

根據(4-10)以及(4-11)式，可以將量測到的 C-V 曲線轉換成載子濃度(N)對空乏區寬度(W)的關係。各片樣品經由 C-V 量測所得到的參數如下[表 4-2]。Schottky barrier height 的大小跟從 I-V 量測得到的差不多。

$$\phi_{bn} = V_{bi} + \phi_n \quad (4-12)$$

表 4-2

	Nd(cm <sup>-3</sup> )	V <sub>bi</sub> (V)	$\phi_n$ (V)	$\phi_{bn}$ (V)
TR753	4.63x10 <sup>16</sup>	0.650	0.048	0.698
SH332	7.25x10 <sup>16</sup>	0.833	0.067	0.890
*SH331	6.9x10 <sup>16</sup>	0.52	0.046	0.57

SH430	$5.43 \times 10^{16}$	0.578	0.054	0.632
SH335	$10.2 \times 10^{16}$	0.761	0.053	0.814

[圖 4-3(a)]為 TR753 樣品在室溫底下變頻的 C-V 圖形，我們可以很明顯的看到隨著頻率的變化整個電容值會往下做一個 shift，[圖 4-3(b)]是將 C-V 根據 (4-11) 式轉換之後的縱深分佈，因為電容隨量測頻率 shift 的影響，可以看到載子侷限的 peak 隨著量測頻率的增加而往後移動，不過還是可以看到在 10KHz 這個較低的量測頻率時在  $0.26 \mu\text{m}$  深處有載子的堆積現象，[圖 4-4(a)(b)]為樣品 SH430 的 C-V 跟載子縱深分佈，同樣的隨著量測頻率的增加，電容值往下平移，載子侷限的 peak 也隨著量測的頻率產生了平移的現象。在[圖 4-5(a)(b)]樣品 SH335 及[圖 4-6(a)(b)]樣品 SH332 的室溫 C-V 和載子縱深分佈圖，並沒有看到電容平移的現象。

首先假設這個平移是量子點結構所造成，[圖 4-2]是 TR753 這片樣品在室溫時的 C-F 關係圖，由 C-F 中高頻跟低頻的電容差  $\Delta C=150\text{pF}$ ，假設這是 QDs emission 所造成的電容變化根據平行板電容的公式可以推導出

$$N_{QDs} = N_d \Delta W = N_d \frac{\Delta C \epsilon A}{C_0^2} \quad (4-13)$$

$N_d = 4.63 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $\epsilon = 1.14 \times 10^{-16} \text{F/cm}$  帶入，可以得到  $N_{QDs} = 6.364 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ，跟[圖 3-2(a)]中 AFM 上看到的密度大了 7 倍，這個值大的有點不太合理，並且從[圖 4-3(a)]中可以看到，不管在哪一個偏壓下都看到電容隨頻率的變化，如果是量子結構造成的 emission 應該只會在某特定的偏壓範圍下才会有改變，而非每一個偏壓都有，因此猜測這個 C-F 的變化並非來自 Quantum emission。

#### 4-3-2 串聯電阻的影響與分析

假設我們的蕭基結構旁邊有一個電阻的存在如[圖 4-7(a)]，可以將它的等

效電路模型看成如[圖 4-7(b)][20]，這個電路的等效電容值為

$$C(\omega) = \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1} \left( 1 + \frac{\frac{C_0}{C_1}}{1 + \omega^2 R^2 (C_0 + C_1)^2} \right) \quad (4-14)$$

[圖 4-2]TR753 這片樣品在室溫時的C-F關係圖，可以求得反曲點的位置，帶進  $\omega_{RC} = \sqrt{3}\omega_{inflexion}$ ，又  $\omega_{RC} = (R(C_0 + C_1))^{-1}$ ，可以求得R=1003 歐姆，這個結果跟上一節中由I-V得到的 1211 歐姆相當接近另外SH430 也用同樣的方法求得R=402 歐姆，也與I-V得到的 437 歐姆很接近，可以簡單的猜測說這兩個是相同原因所造成的串聯電阻值。由[表 4-3]中，我們看到串聯電阻比較大的樣品GaAs buffer layer的doping濃度是略小於沒有串聯電阻的樣品，TR753 的doping濃度為  $4.63 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  而SH430 為  $5.53 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  較其他片 sample 為  $7.25 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  及  $10.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  來的小，還有另一原因為在蒸鍍Schottky接面的步驟中有etching的動作，而可能造成表面不平整，Schottky產生高阻值層的接面，或是GaAs表面氧化形成一個電阻區，產生串聯電阻的影響。在此我們看到doping濃度有些許的差異，因此推斷造成串聯電阻的原因是來自於doping濃度不夠，載子在通過GaAs buffer layer就看到了一個電阻。

表 4-3 各片樣品的摻雜濃度

TR753	SH332	SH430	SH335
$4.63 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$7.25 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$5.43 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$10.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

#### 4-4 低溫下 C-V、G-T 及 C-F 的量測與分析

接下來將溫度降到 80K 左右對各片樣品做變頻的 C-V 量測，對四片樣品來說不管是有串聯電阻影響[圖 4-8][圖 4-9]或是沒有[圖 4-10][圖 4-11]我們都看到在較深的地方有了第二個 peak 產生，而且這個 peak 對頻率的變化有響應，為了

找出這個變化所對應到的缺陷能階，首先我們對沒有串聯電阻的樣品 SH335 及 SH332 這兩個樣品做 G-T 的量測，其結果如[圖 4-12]及圖[4-13]，再將其轉換成阿瑞尼士圖[圖 4-14]就可以得到 SH335 活化能為 35meV 與 SH332 的 51.3meV，這樣大小的活化能能階。

接下來看 TR753 和 SH430 這兩片有串聯電阻的樣品，在低溫 80K 的 C-V 以及縱深分佈如[圖 4-8]及[圖 4-9]，在縱深分佈的圖中我們仍然可以看到第二個 peak 隨著頻率的增加而消失這跟上面兩個沒有串聯電阻影響的樣品具有類似的現象，可是我們在量測這個第二個 peak 時沒辦法避開由串聯電阻造成的 RC 時間常數，因為量子能階所造成的時間常數大約是在  $10^{-6}$  sec 左右，剛好跟串聯電阻所造成的時間常數接近，因此在用 C-F 或 admittance 量測時串聯電阻所產生的訊號與真正量子點結構所產生的訊號會重疊在一起，以致於無法經由這樣的方法來得到量子結構所造成的活化能大小。我們利用一個如[圖 4-7]的等效電路模型來討論[20]。

假設在 GaAs buffer layer 層有一個因為 doping 濃度太低所造成，我們將它看成一個電阻 R 與一個電容  $C_1$  的並聯，並且在 InAs QDs 的結構區所形成的是一個等效電容  $C_0$ ，這樣品電容隨頻率的變化應該是

$$C(\omega) = \frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1} \left( 1 + \frac{\frac{C_0}{C_1}}{1 + \omega^2 R^2 (C_0 + C_1)^2} \right) \quad (4-14)$$

在低頻時量測到的電容值是  $C_0$ ，也就是我們的量子結構所造成的電容值，高頻時所量測到的是  $C_1$  與  $C_0$  的串聯值  $\frac{C_0 C_1}{C_0 + C_1}$ ，這個式子中串聯電阻 R 可藉由 I-V 量測或是 C-F 量測中求得， $C_1$  是由於串聯電阻區所造成的， $C(\omega)$  是在各個頻率及偏壓下量測得到的電容， $\omega$  是量測的頻率，假設 R 與  $C_1$  的值並不隨著量測偏壓而改變，將量到的 C 及上述的值帶入(4-14)中就可以求得各個頻率偏壓下的  $C_0$  值是多少，也就是在沒有串聯電阻的情況下樣品的 C-V 圖，在[圖 4-15(a)]是 SH430 這個樣品在 83K 用這個模型將 C-V 平移反推回沒有串聯電阻時應該的所在位置，我們就可



以看到跟SH335、SH332 樣品一樣，在-2.6V附近有一個電容隨頻率的變化產生，再藉著不同的量測頻率下所量到的電容-電壓關係，將偏壓定在-2.6V看到的變化，可以畫成如圖[4-15(b)]所表現的C-F圖形，根據(4-4)可以算出反曲點的位置，就可以求得樣品結構區所造成的time constant是多少，用這個方法就可以來推論沒有串聯電阻的情況之下，第二個peak對頻率的響應所對應的時間常數應該在什麼位置，同樣的應用(4-13)式， $\Delta C=5\text{pF}$ 算出 $N_{\text{QDs}}=2.793 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ ，這個值就與AFM上面看到的量子點密度較接近，在同一個order裡面，猜測這個電容隨頻率的變化可能是來自於量子點。[圖 4-16]是將串聯電阻與這個量子點訊號畫在一起的圖形，可以看出電容隨頻率的變化都是出現在 500KHz~5000KHz之間，而 $\Delta C$ 卻差了 20 倍以上，也就是說這兩個訊號的時間常數很容易被搞混在一起，造成對量測訊號的誤判，將 $\Delta C$ 大了 20 倍的串聯電阻訊號誤認為是量子的訊號，關於這點必須小心的判斷。

用相同的方法針對 SH430 及 TR753 這兩片樣品分別計算其在不同溫度下的time constant，得到的結果畫成阿瑞尼士圖，如[圖 4-17]所表示。由於這樣計算下的 data 點數太少，造成 fitting 反曲點的誤差實際上很大，因此在轉換成阿瑞尼士圖之後，分別得到 SH430 的活化能 17.3meV 及 TR753 的 21.2meV 誤差會很大，這個值並非真正準確的活化能值，但能作為參考之用。從阿瑞尼士圖上面可以知道這些點是落在相同的位置附近，可以推論這些樣品第二個 peak 對頻率的響應是來自於相同的物理機制，而活化能大約在幾十個 meV 左右，我們推論載子在裡面運動的機制如[圖 4-18]，在室溫或低溫時所看到的載子堆積現象來自於量子點的激發態，電子直接穿隧到 GaAs 導帶這樣的方式來傳遞，由於這個穿隧的時間太快了，因此不論是在室溫或是低溫下，在儀器量測範圍內都量測不到對頻率的變化。而在低溫看到的會隨頻率變化的第二個 peak 則是來自於電子侷限在量子點的 ground state，而量測到的時間常數是電子從 ground state 跳到 excited state 的時間，電子跳躍到 excited state 後在經由穿隧效應到 GaAs 的導帶。這也符合理論計算上 InAs 量子點結構的基態到激發態能階的差[21]在

30~100meV 的結果。

另一方面在[圖 4-17]中各片的time constant也是具有參考的價值，上面我們推測這個time constant是來自於量子點基態躍遷到激發態的時間，這個躍遷的時間可能會受到以下兩個因素的影響，如[圖 4-19]所表示，第一如[圖 4-19(a)]加入 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 後 $\Delta E_{ge}$ 變大了，躍遷的時間也變長了，因此沒加Al這個材料的SH332 樣品，在同一溫度時的時間常數是最短的因為 $\Delta E_{ge}$ 較小，第二如[圖 4-18(b)]，doping的濃度會影響到band的斜度，當doping濃度越大時band就越傾斜，也就是說載子就越容易從量子點中穿隧而出，當doping濃度下降時載子就必須到更高的能階才能穿隧出去，因此doping濃度最小的樣品TR753 的time constant是最長的。

接下來我們取同樣是 10KHz 在溫度 80K 附近的縱深分佈圖[圖 4-19]去 fitting 兩個 peak 對應的載子堆積情形，來估計被侷限的載子數目以及半高寬的大小，其結果列於[表 4-4]中。

從[表 4-4]中先來比較 TR753 跟 SH332 這兩片樣品，並且跟第三章的 PL 的 data 相互比較，跟第三章相同，基態跟激發態的面積比來看量子點的密度，SH332 DWELL 的比值是 0.595 而 TR753 低長晶速率樣品是 0.497，SH332 DWELL 結構密度略大於 low growth rate 的 TR753，而就半高寬來看 SH332 的半高寬是 0.01325 而 TR753 是 0.01731，低長晶速率的 TR753 量子點的均勻性要比 DWELL 結構的 SH332 差，這跟 PL 所看到的結果是一樣的。

表 4-4

	激發態面積	基態面積	激發態半高寬	基態半高寬	基態面積/激發態面積
TR753	2.838	1.411	0.02027	0.01731	0.497
SH332	3.554	2.116	0.0128	0.01325	0.595

*SH331	1.711	2.818	0.015	0.017	1.645
SH430	1.766	1.457	0.00986	0.00547	0.825
SH335	1.908	2.213	0.00706	0.01234	1.16

縱深的面積代表濃度，單位為  $10^{11} \text{cm}^{-2}$ ，半高寬的單位為  $\mu\text{m}$

加入  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  不管是 SH331、SH430 或是 SH335，基態比激發態面積比值都變大了，也就是說位於基態的載子數目明顯的變多了，這個現象也跟在第三章 PL 光性量測中 [表 3-1] 有相同的結果，假設載子的總數是一樣多的情形下，當量子點的數目變多，也就是基態的位置變多後，載子會先填滿基態後再填到激發態上面。我們不管是在 PL、AFM 或是 C-V 縱深分佈上都看到了加上  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  材料後量子點的密度增加了，在  $\text{InAs}$  量子點旁成長一層 high potential barrier 的  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  層可以使得量子點的密度增加。

接下來來比較 \*SH331 這個  $\text{InAs}$  QDs 蓋上 10Å  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  後再蓋上  $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  QW 的樣品與蓋上 10Å  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  後直接蓋上  $\text{GaAs}$  capping layer 的樣品 SH430 來比較，一個是沒有  $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  QW 的樣品，另一個是有加  $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  QW。在  $\text{InAs}$  上加上  $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  這樣的 Dots-in-Well 結構最主要的目的是減少晶格不匹配、拉長波長 [23][24]，我們將這兩個的比較做成 [表 4-5]。

表 4-5

	基態波長	激發態波長	FWHM(meV)	$\Delta E(\text{meV})$
10 Å	1266	1150	32.62	99
10Å+QW	1284	1163	40.2	101

從 [表 4-4] 中發現  $\Delta E$  是差不多大都約在 100meV，沒加上 QW 的 SH430 波長變短了有藍移的現在，但是在半高寬的表現較好，量子點的均勻性反而比有蓋  $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$  QW 來的好。

## 第五章 結論

從PL量測可以得到低長晶速率InAs量子點樣品直接蓋上GaAs層就可以達到接近 1300nm的發光波長，在製程上是最簡單的結構，但是這樣結構的量子點密度以及均勻性卻不理想，是各片樣品中最差的一個，在製作成雷射元件若是對雷射的功率，半高寬及 $T_0$ 沒那麼高的要求時，可以用這樣的簡單的結構，低長晶速率來降低元件的成本。在InAs QDs上加入InGaAs QW因為晶格間strain的力量使得量子點沒被壓小，放射的波長可以達到 1298nm，但是量子點的密度卻不是很理想( $\sim 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ )，接下來在這DWELL結構中間插入一個 10Å InAlAs high potential barrier的結構有效的讓 $\Delta E_{ge}$ 拉大 101meV，並且量子點的密度增加將近三倍( $\sim 9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ )。接下來將InGaAs QW的結構拿掉我們發現到對 $\Delta E_{ge}$ 並沒有什麼影響，雖然波長有些藍移的現象( $\sim 20\text{nm}$ )，但是量子點的均勻性卻更好了，而再加厚這層的厚度到 54Å對 $\Delta E_{ge}$ 和量子點密度並沒有什麼影響，但在均勻性卻明顯的變差，不論是自PL上、AFM上或是C-V縱深分佈上我們都看到了這樣的結論。加入適當厚度的In<sub>0.14</sub>AlAs不加上In<sub>0.14</sub>GaAs QW可以在製作上省掉一個步驟，並且可以使 $\Delta E_{ge}$ 變大，量子點密度變高。

另外我們用 fitting 的方法去 fitting PL 跟 C-V 縱深分佈的圖形，將 PL 以及縱深分佈上的兩個 Peak 分開來，並去計算面積比來代表載子被侷限在基態以及激發態上面數目的比例多寡，並且用半高寬來估計量子點大小分佈的均勻性。這樣子得到的結果有相當的一致性，因此也大膽的推論這兩個圖形上的 peak 就分別是基態以及激發態對載子所造成的量子侷限。

此外我們也成功的運用了等效的電路模型來移除串聯電阻對量子點訊號的影響，用這個模型分析出低溫時第二個 peak 對量測頻率的響應，雖然轉換成阿瑞尼士圖後有相當大的誤差，但仍然可以看出有串聯電阻的兩片樣品跟沒有串聯電阻的樣品，低溫時出現的第二個 peak 應該是屬於相同的機制產生，推測這是量子點基態所造成的載子侷限，另外一方面，我們也用 G-T 量到了 SH332 及 SH335 這兩片樣品第二個 peak 的活化能是 53meV 及 35meV，還有另外兩片 TR753 和 SH430 的活化能也在數十個 meV 左右，這個值的大小推測是量子點中基態跟激發態間的能階差，載子在整個元件中的運動方式是像[圖 4-18]一般，基態的電子跳躍到激發態後經由穿隧效應到 GaAs 的導帶去，而量到的活化能大小，就是這之間的差值。也更近一步的相信這兩個縱深分佈的 peak 就是對應到基態跟激發態對載子的侷限。

綜合上述各點，我們發現低長晶速率雖然可以達到拉長波長的效果但是在量子點均勻性、量子點密度以及  $\Delta E_{ge}$  上的表現都不好，而蓋上適當厚度的  $In_{0.14}AlAs$  可以大大的提升均勻性，密度跟  $\Delta E_{ge}$ ，並且不在  $In_{0.14}AlAs$  後面加上  $In_{0.14}GaAs$  QW 反倒能使得均勻性表現的更好，而波長不到 1300nm 的情況應該可以試試將  $InAs$  QDs 層再長的更厚一點，使之波長能更拉到 1300nm。這樣來說跟傳統的 DWELL 結構或是低長晶速率直接覆蓋 GaAs 比起來，加上  $In_{0.14}AlAs$  可以在均勻性，密度及  $\Delta E_{ge}$  都有明顯提升，並且跟加  $In_{0.14}AlAs$  再多一層  $In_{0.14}GaAs$  比起來少了一個製程步驟並且量子點的均勻性變更好了。

## 参考文献

- [1] H. Riechert, L. Geelhaar, G. Ebbinghaus, A. Lima, A. Ramakrishnan, “1.3  $\mu\text{m}$  VCSELs for fiber-optical communication systems” , Indium Phosphide and Related Materials, 2003. International Conference on , 12-16 May 2003, Pages : 3 - 7
- [2] P. N. Brunkov, A. Patanic, A. Leevin, L. Eaves, P. C. Main, Yu. G. Musikhin, B. V. Volovik, A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, S. G. Konnikov, “Photocurrent and capacitance spectroscopy of Schottky barrier structures incorporating InAs/GaAs quantum dots” , Phys. Rev. B 65, 085326 (2002)
- [3] Oleg B. Shchenkin, Gyoungwon Park, Diana L. Huffaker, and Dennis G. Deppe, “Discrete energy level separation and the threshold temperature dependence of quantum dot lasers” , Appl. Phys. Lett. 77, 466 (2000)
- [4] V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, A. Yu. Egorov, A. V. Lunev, B. V. Volovik, I. L. Krestnikov, Yu. G. Musikhin, N. A. Bert, P. S. Kop' ev, and Zh. I. Alferov, “InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ ” , Appl. Phys. Lett. 74, 2815 (1999)
- [5] A. Stintz, G. T. Liu, H. Li, L. F. Lester, and K. J. Malloy, “Low-threshold current density 1.3- $\mu\text{m}$  InAs quantum-dot lasers with the dots-in-a-well (DWELL) structure” , IEEE Photon. Tech. Lett. 12,

591 (2000)

- [6] P. B. Joyce, T. J. Krzyzewski, G. R. Bell, T. S. Jones, S. Malik, D. Child, and R. Murray, “Growth rate effects on the size, composition and optical properties of InAs/GaAs quantum dots grown by molecular beam epitaxy” , *J. Crystal Growth* 227/228, 1000 (2001)
- [7] M. J. da Silva, S. Martini, T. E. Lamas, A. A. Quivy, E. C. F. da Silva, J. R. Leite, “Low growth rate InAs/GaAs quantum dots for room-temperature luminescence over  $1.3\mu\text{m}$ ” , *Microelectronics Journal* 34, 631 (2003)
- [8] L. V. Asryan, and R. A. Suris, “Temperature dependence of the threshold current density of a quantum dot laser” , *IEEE J. Quantum Electron.* 34, 841 (1998)
- [9] J. S. Kim, P. W. Yu, J. Y. Leem, M. Jeon, S. K. Noh, J. I. Lee, G. H. Kim, S. K. Kang, J. S. Kim, and S. G. Kim, “Effects of high potential barrier on InAs quantum dots and wetting layer” , *J. Appl. Phys.* 91, 5055 (2002)
- [10] Z. Y. Zhang, B. Xu, P. Jin, X. Q. Meng, Ch. M. Li, X. L. Ye, and Z. G. Wang, “Photoluminescence study of self-assembled InAs/GaAs quantum dots covered by an InAlAs and InGaAs combination layer” , *J. Appl. Phys.* 92, 511 (2002)
- [11] Y. Q. Wei, S. M. Wang, F. Ferdos, J. Vukusic, A. Larsson, Q. X. Zhao, and M. Sadeghi, “Large ground-to-first-excited-state transition energy separation for InAs quantum dots emitting at  $1.3\mu\text{m}$ ” , *Appl. Phys. Lett.* 81, 1621 (2002)
- [12] P. B. Joyce, T. J. Krzyzewski, G. R. Bell, T. S. Jones, E. C. Le Ru, and R. Murray, “Optimizing the growth of  $1.3\mu\text{m}$  InAs/GaAs quantum

- dots” , Phys. Rev. B 64, 235317 (2001)
- [13] Z. Y. Zhang, B. Xu, P. Jin, X. Q. Meng, Ch. M. Li, X. L. Ye, and Z. G. Wang, “Photoluminescence study of self-assembled InAs/GaAs quantum dots covered by an InAlAs and InGaAs combination layer” , J. Appl. Phys. 92, 511 (2002)
- [14] Y. Q. Wei, S. M. Wang, F. Ferdos, J. Vukusic, A. Larsson, Q. X. Zhao, and M. Sadeghi, “Large ground-to-first-excited-state transition energy separation for InAs quantum dots emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ ” , Appl. Phys. Lett. 81, 1621 (2002)
- [15] A. P. Ongstad, G. C. Dente, M. L. Tilton, D. Gianardi, and G. Turner, “Linewidth analysis of the photoluminescence from InAs/GaSb/InAs/AlSb type-II superlattices” , J. Appl. Phys. 87, 7896 (2000)
- [16] 王建国, 交通大学电子物理所硕士论文 (2003)
- [17] M. Missous, and E. H. Rhoderick, “On the Richardson constant for aluminum/gallium arsenide Schottky diodes” , J. Appl. Phys. **69**, 7142 (1991)
- [18] A. M. Cowley, and S. M. Sze, “Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems” , J. Appl. Phys. **36**, 3212 (1965)
- [19] M. A. Green, and J. Shewchun, Solid-St. Electron. **16**, 1141
- [20] 陳乃權, 交通大学电子物理所博士论文 (1998)
- [21] 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, “Hole and electron emission from InAs quantum dots” , Appl. Phys. Lett. 76, 1573 (2000)
- [22] 謝明芳, 交通大学电子物理所硕士论文 (2003)



- [23] A. Stintz, G. T. Liu, H. Li, L. F. Lester, and K. J. Malloy,  
“Low-threshold current density 1.3- $\mu\text{m}$  InAs quantum-dot lasers with  
the dots-in-a-well (DWELL) structure” , IEEE Photon. Tech. Lett. 12,  
591 (2000)
- [24] V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, A. Yu. Egorov,  
A. V. Lunev, B. V. Volovik, I. L. Krestnikov, Yu. G. Musikhin, N.  
A. Bert, P. S. Kop’ ev, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg,  
“InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at  
1.3  $\mu\text{m}$ ” , Appl. Phys. Lett. 74, 2815 (1999)



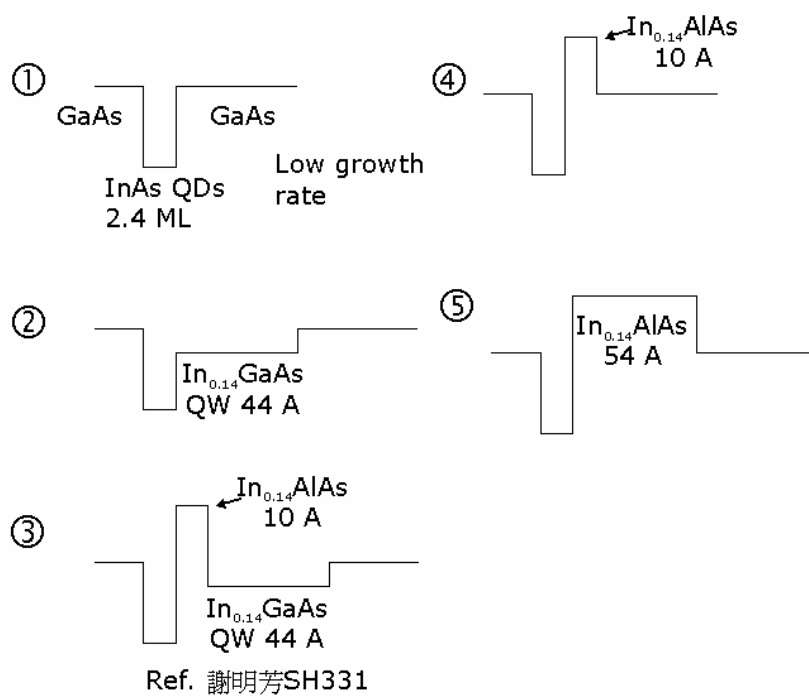
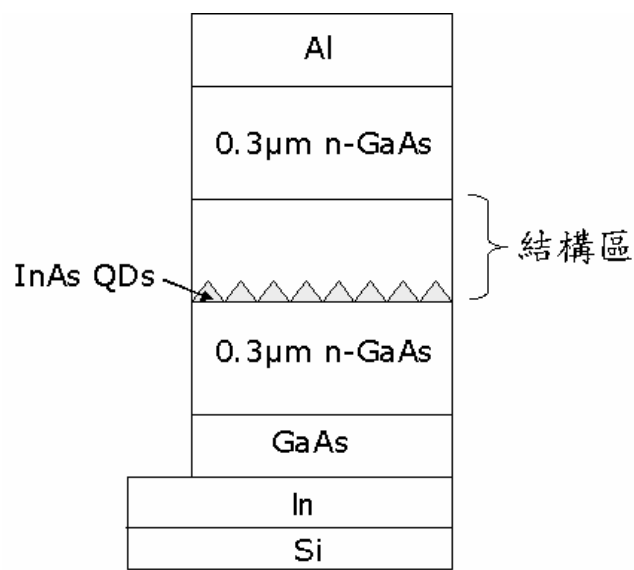


圖 2-1 各片樣品的結構

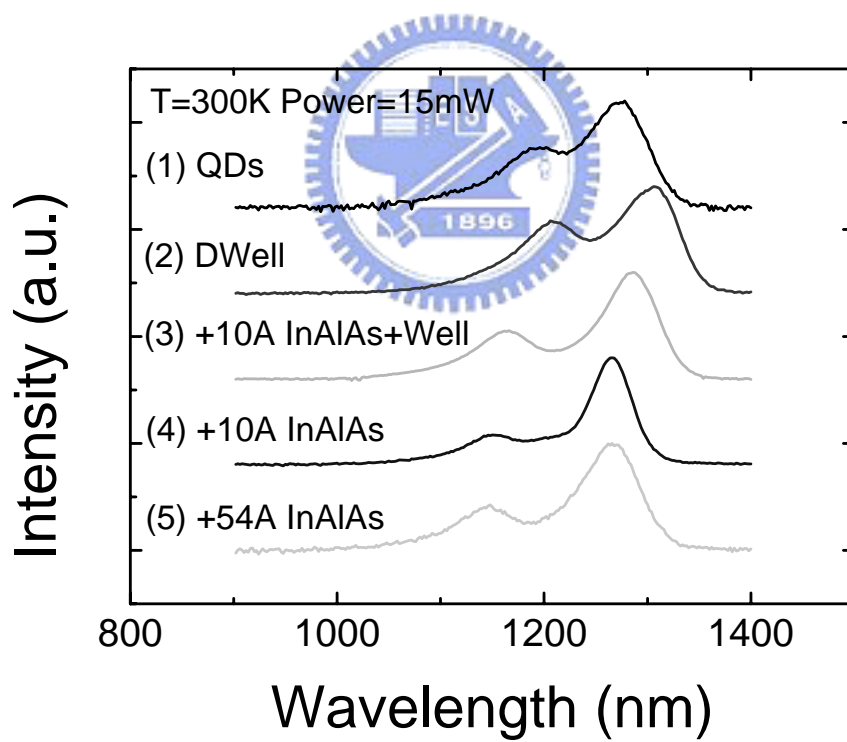


圖 3-1 各片樣品的 PL

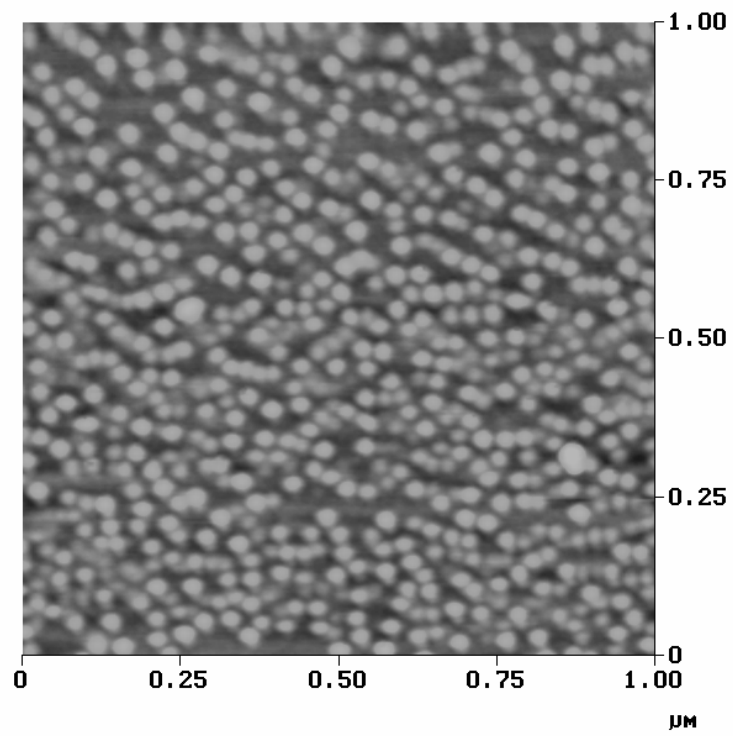


圖 3-2(a) 覆蓋 10Å  $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$  樣品的 AFM 照片，整個照片的範圍是  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$

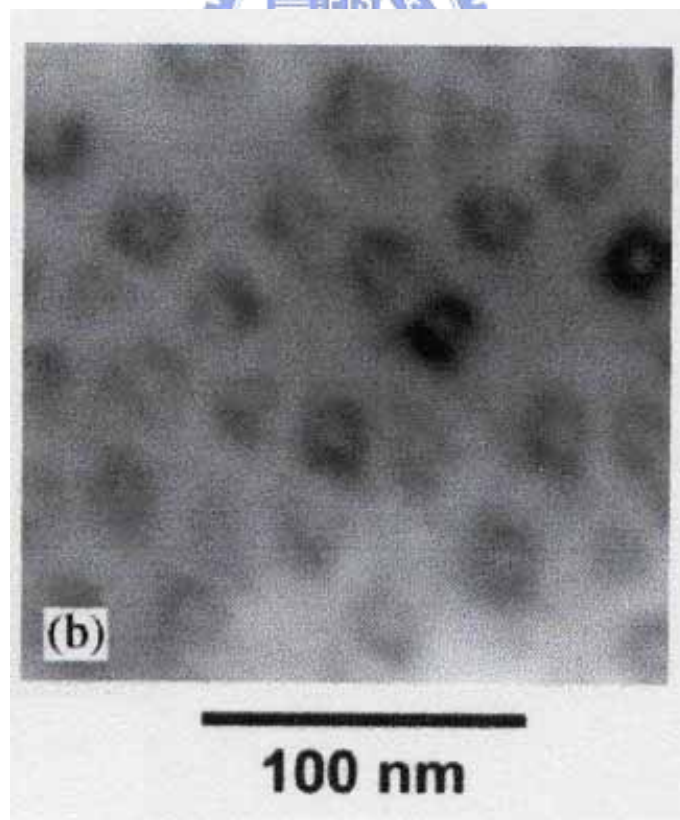


圖 3-2(b) DWELL 結構的 TEM 照片

from ref. [5]

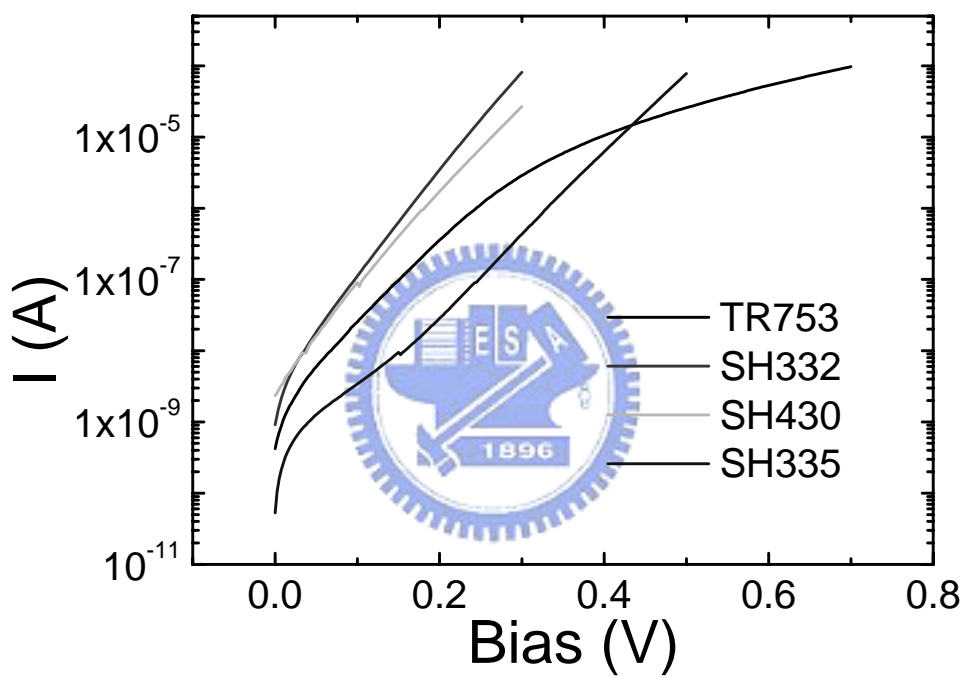


圖 4-1 各片樣品在室溫時的 I-V 特性曲線

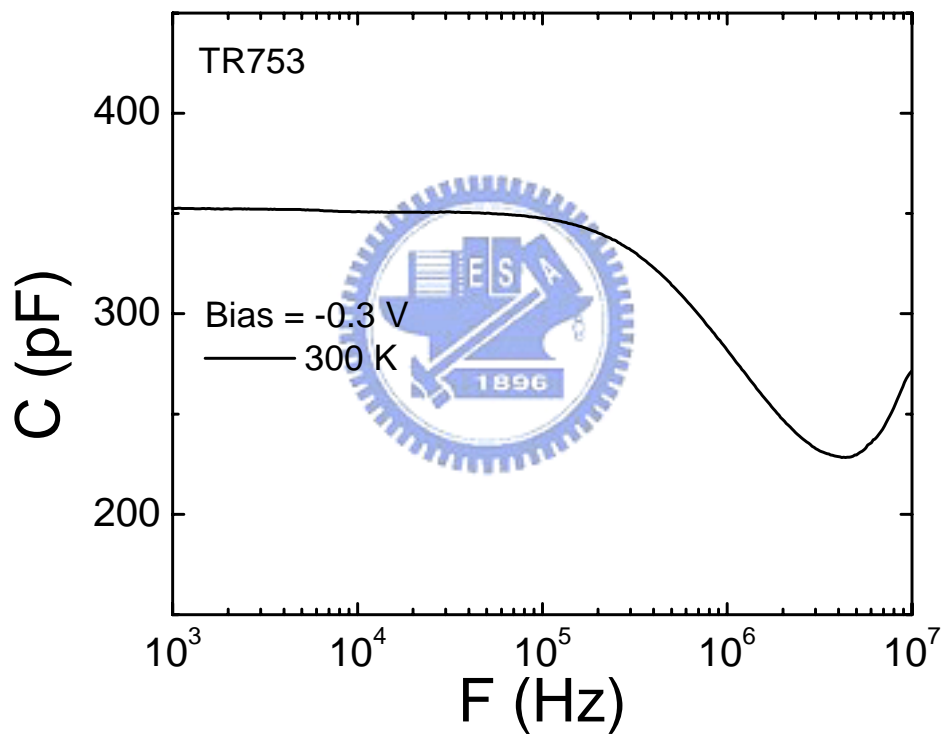
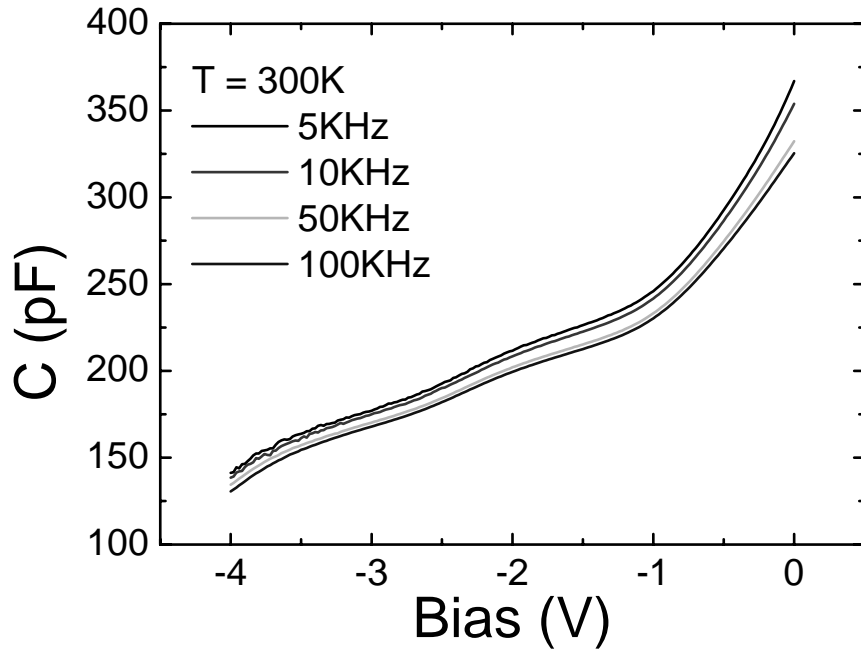
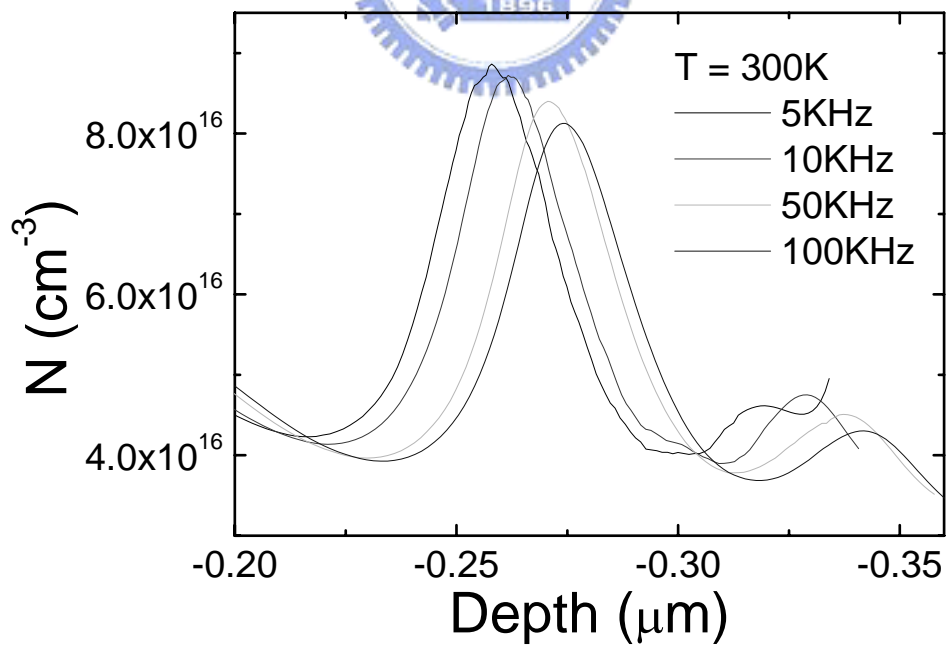


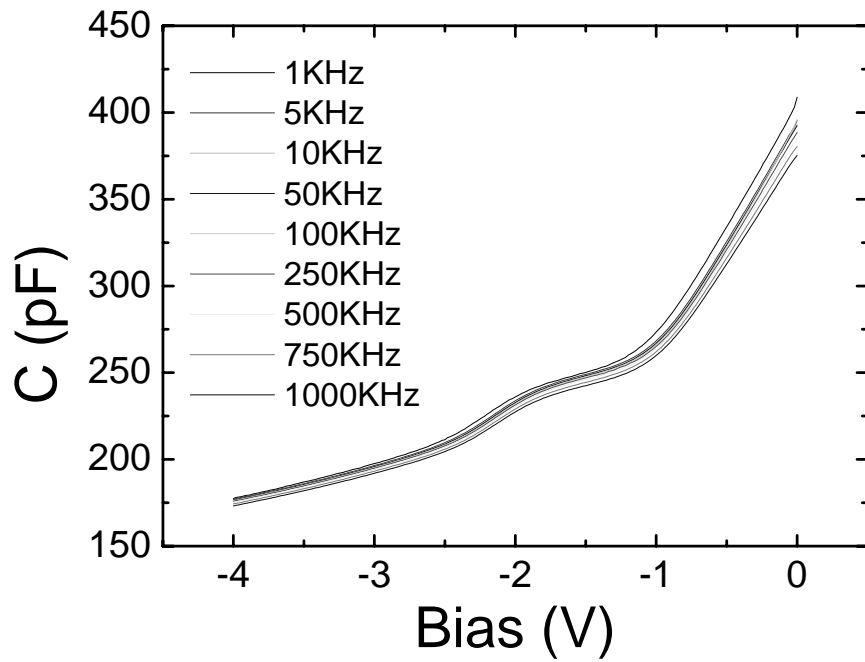
圖 4-2 TR753 在室溫時 C-F 關係曲線



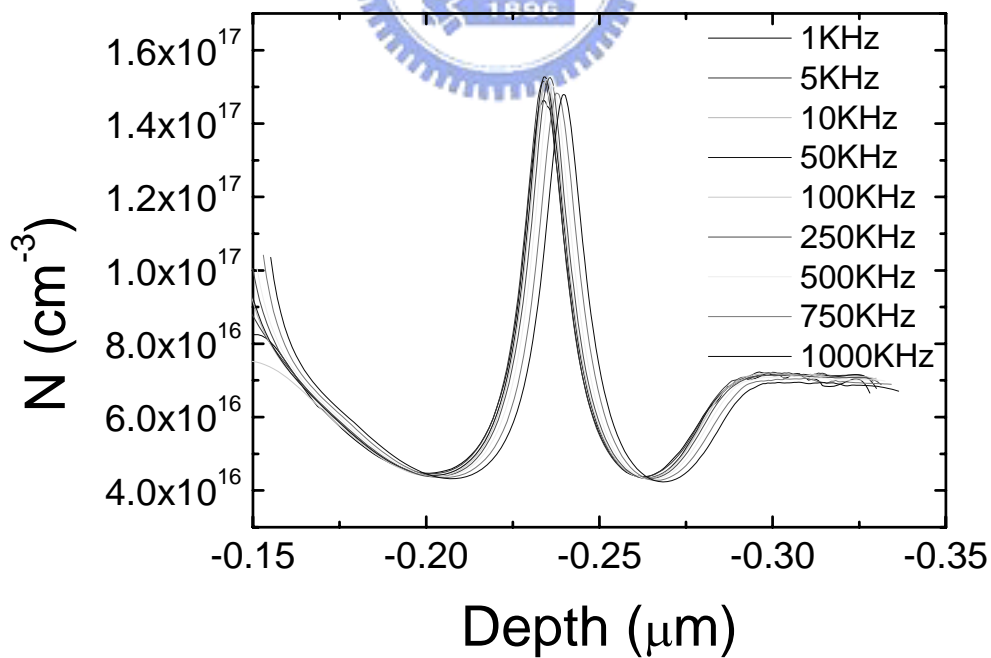
圖[4-3(a)] TR753 在室溫時的變頻 C-V



圖[4-3(b)] TR753 在室溫時的變頻縱深分佈

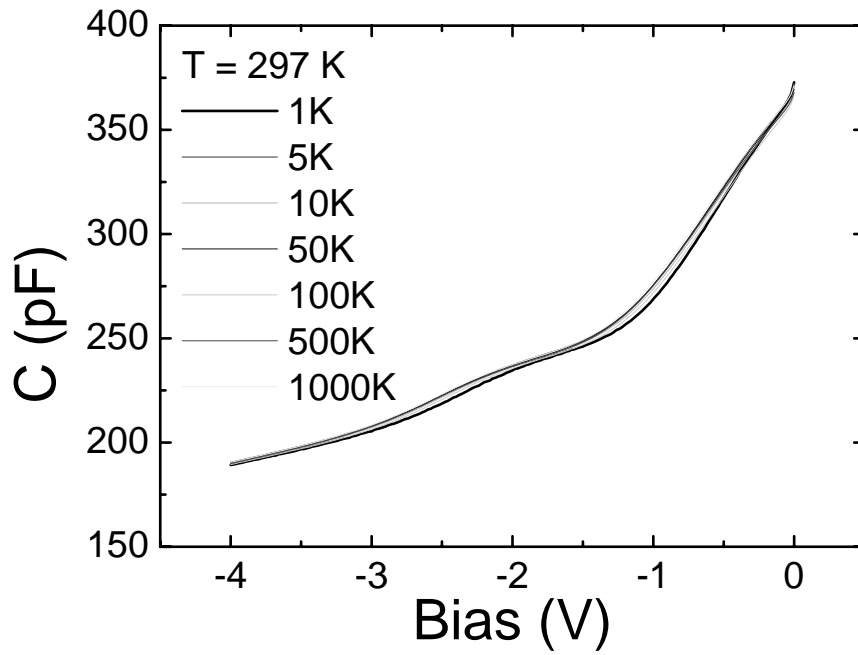


圖[4-4(a)] SH430 室溫時的變頻 C-V

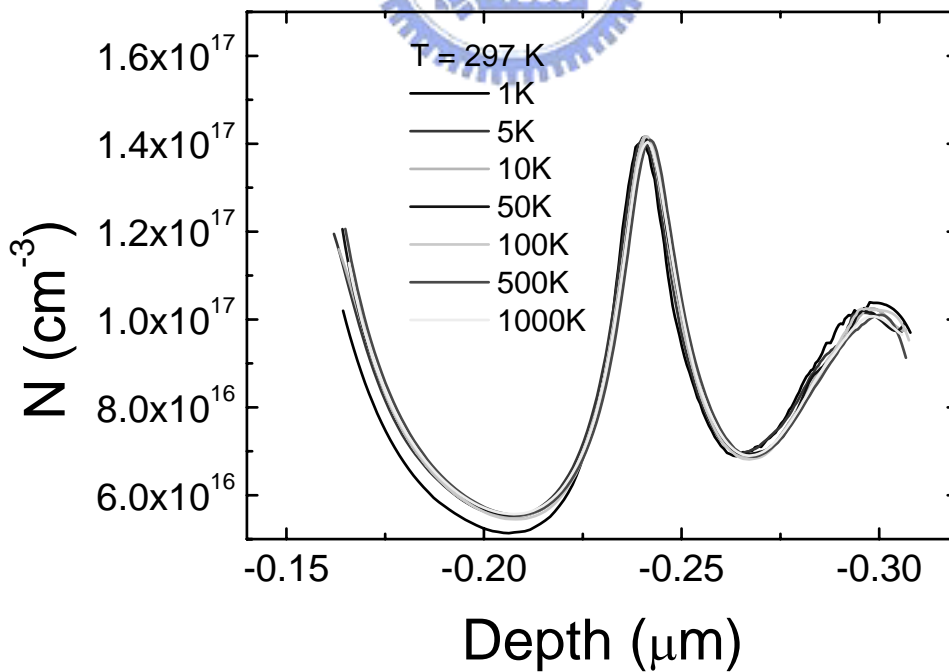


圖[4-4(b)] SH430 室溫時的變頻縱深分佈

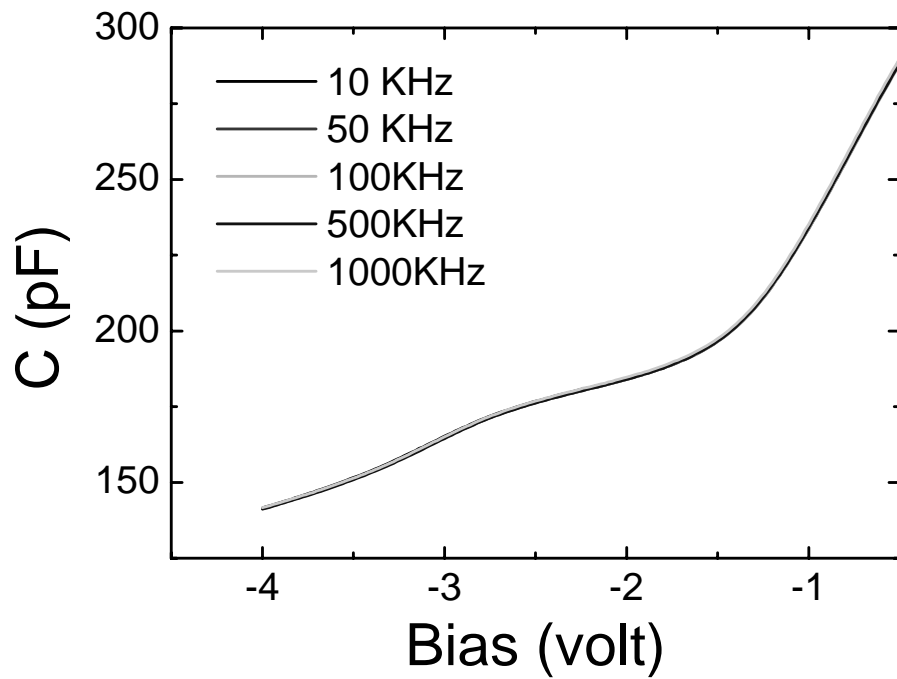




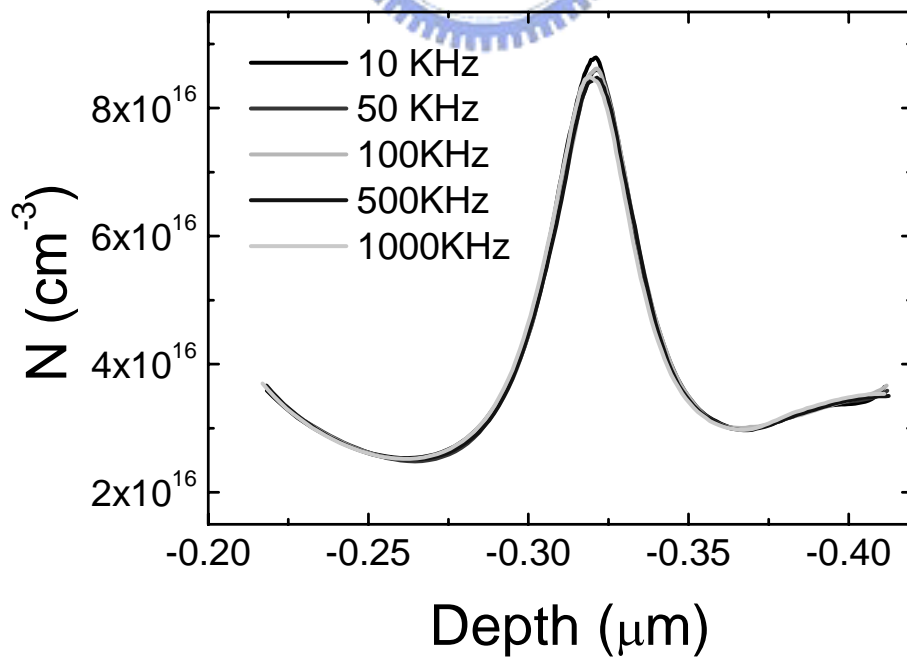
圖[4-5(a)] SH335 室溫時的變頻 C-V



圖[4-5(b)] SH335 室溫時的變頻縱深



圖[4-6(a)] SH332 室溫時的變頻 C-V



圖[4-6(b)] SH332 室溫時的變頻縱深

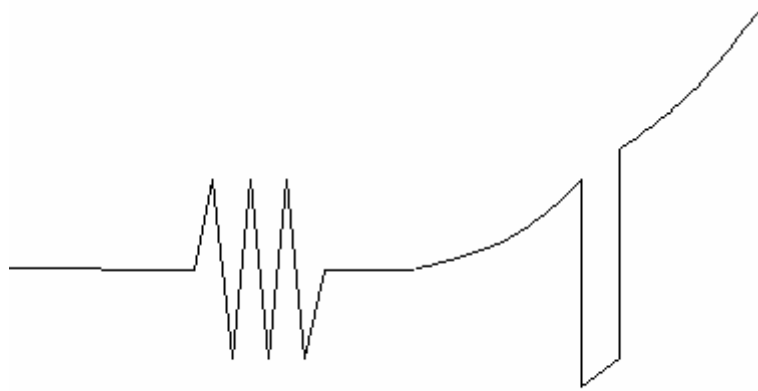


圖 4-7(a) 量子點蕭基結構串聯一個電阻

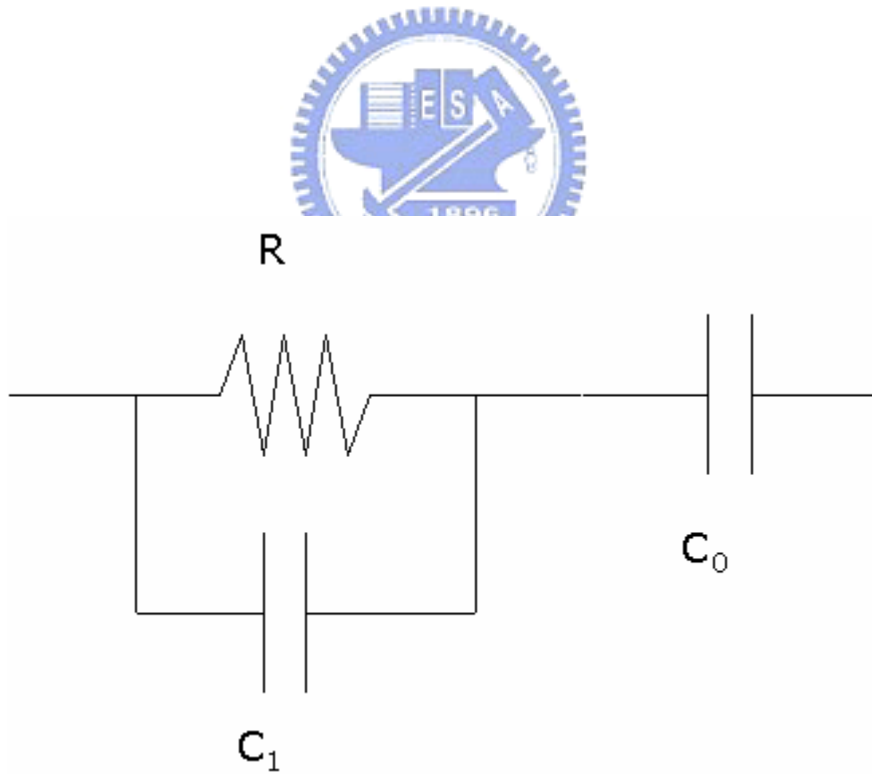
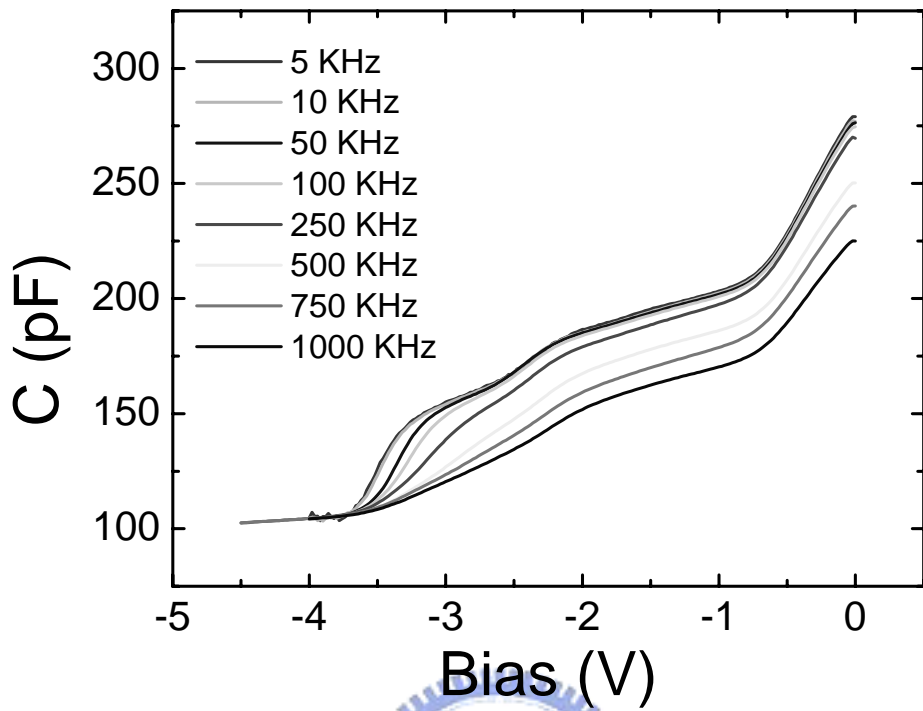
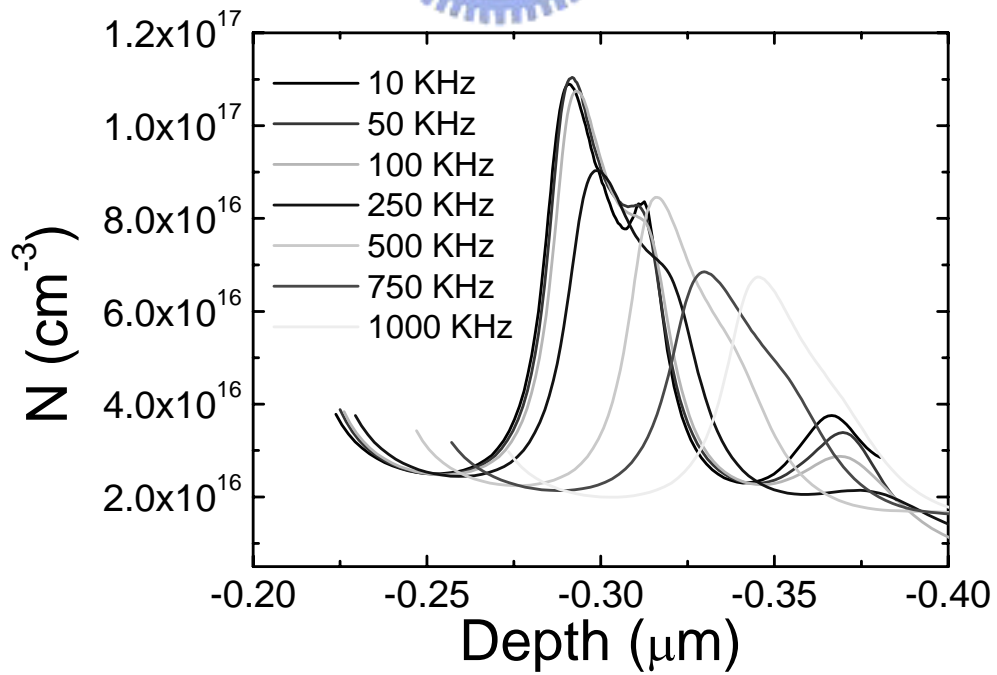


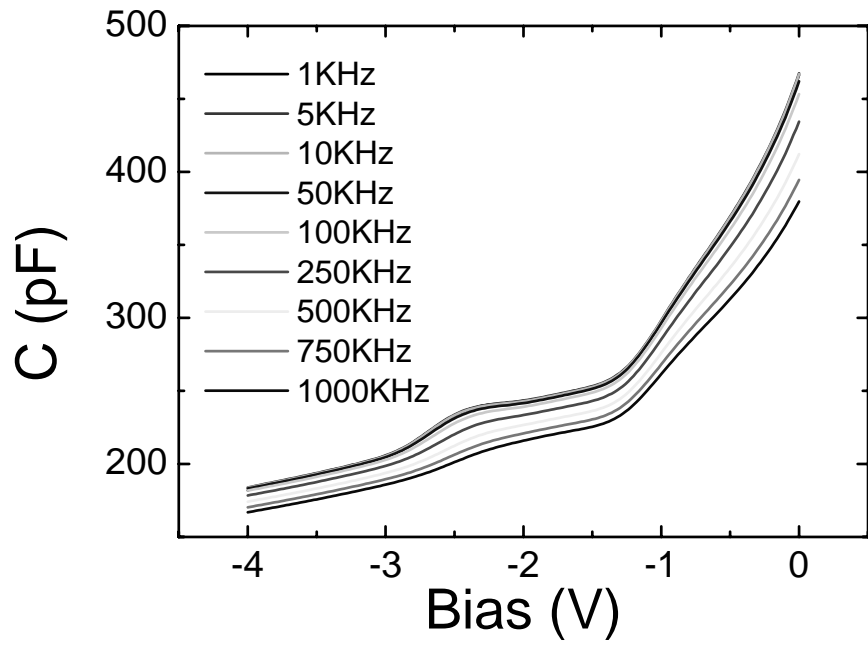
圖 4-7(b) 量子點結構加上串聯電阻的等效電路圖



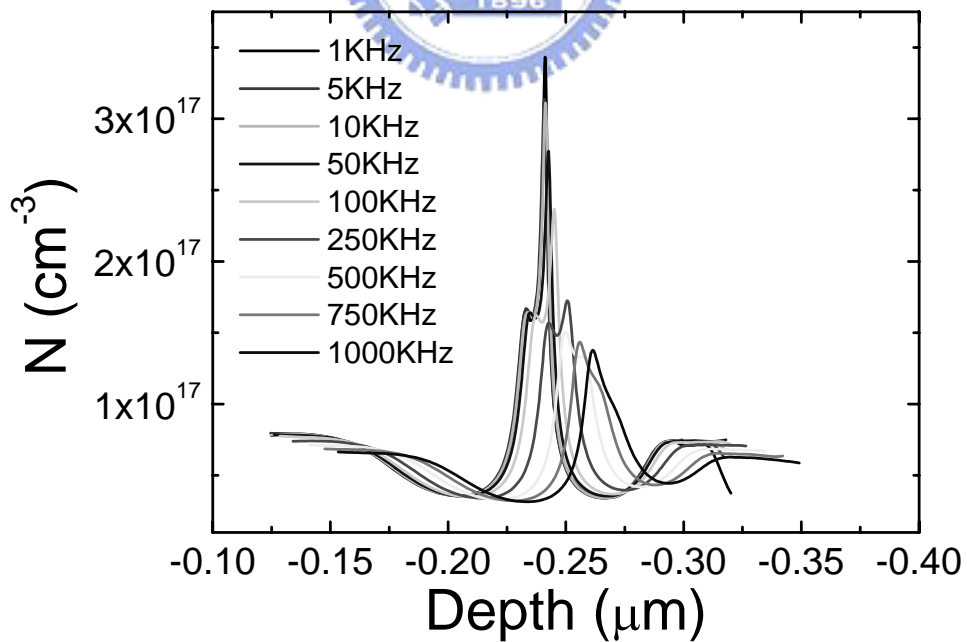
圖[4-8(a)] TR753 低溫時的變頻 C-V



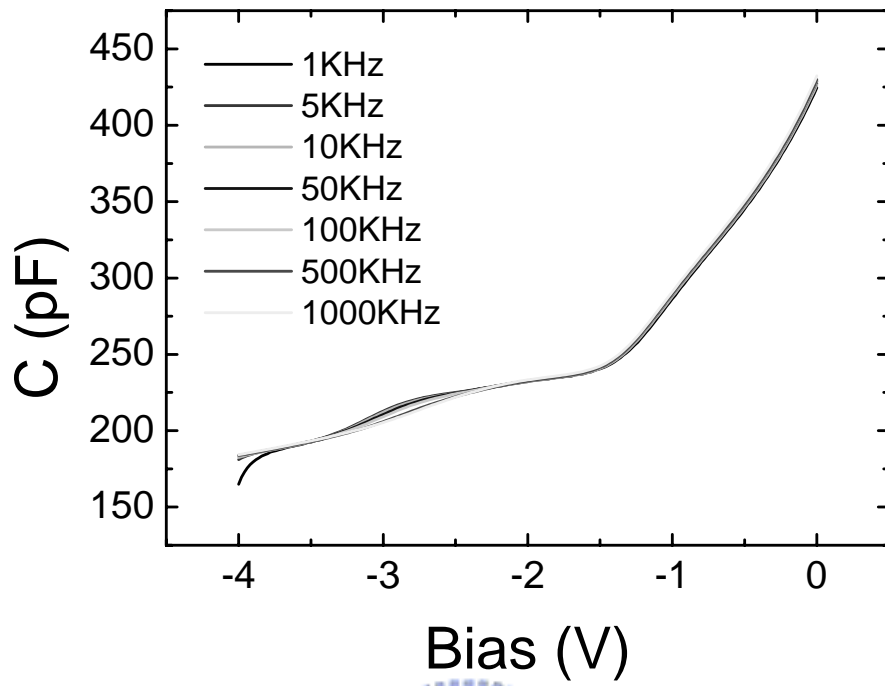
圖[4-8(b)] TR753 低溫時的變頻縱深分佈



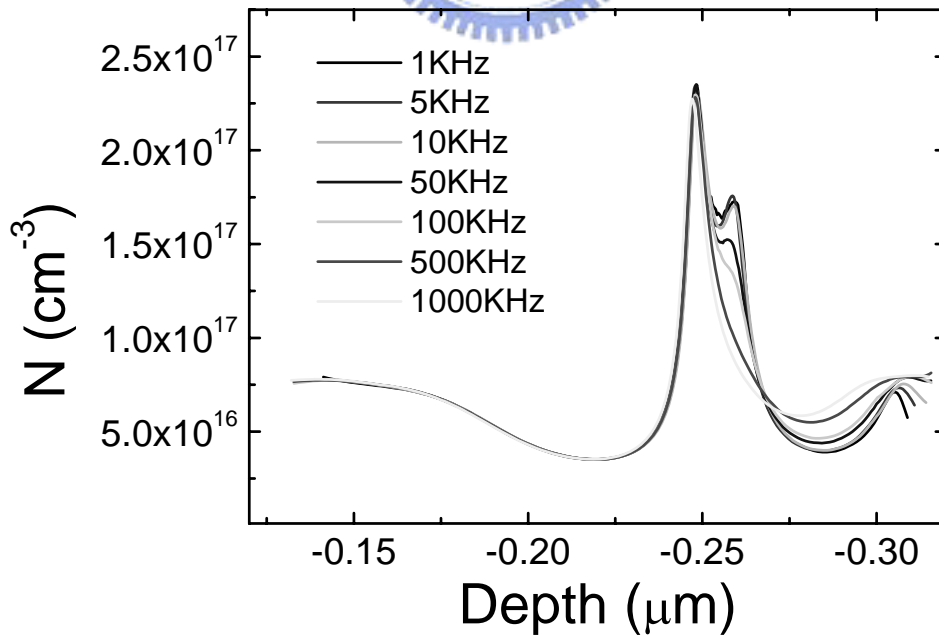
圖[4-9(a)] SH430 低溫時的變頻 C-V



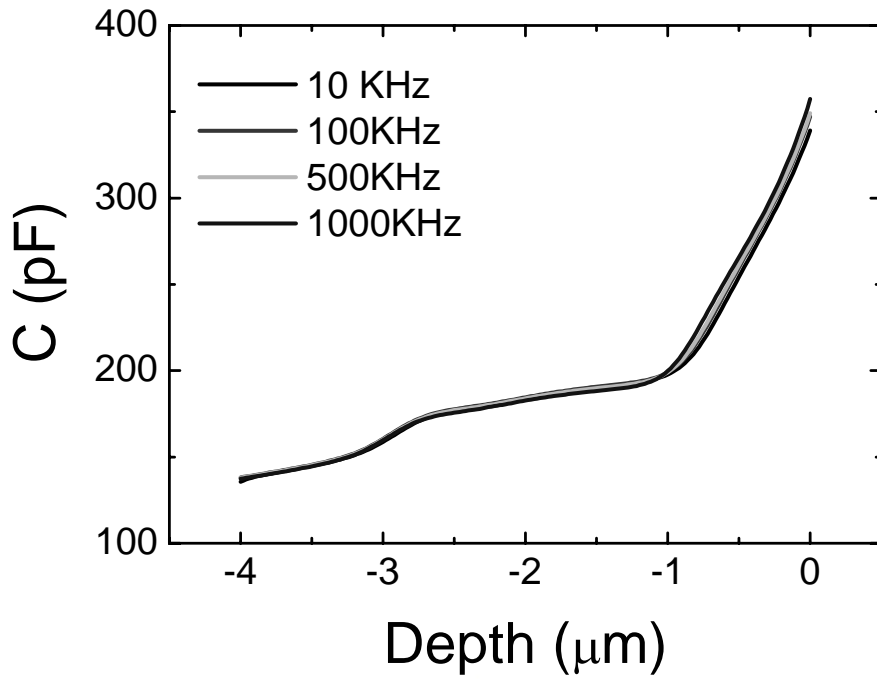
圖[4-9(b)] SH430 低溫時的變頻縱深分佈



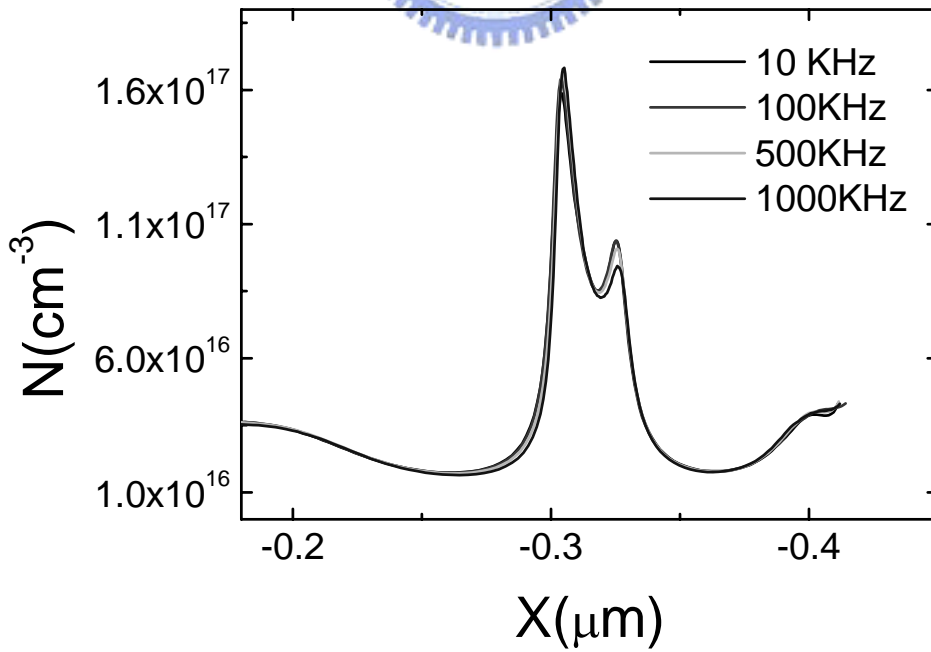
圖[4-10(a)] SH335 低溫時的變頻 C-V



圖[4-10(b)] SH335 低溫時的變頻縱深分佈



圖[4-11(a)] SH332 低溫時的變頻 C-V



圖[4-11(b)] SH332 低溫時的變頻縱深分佈

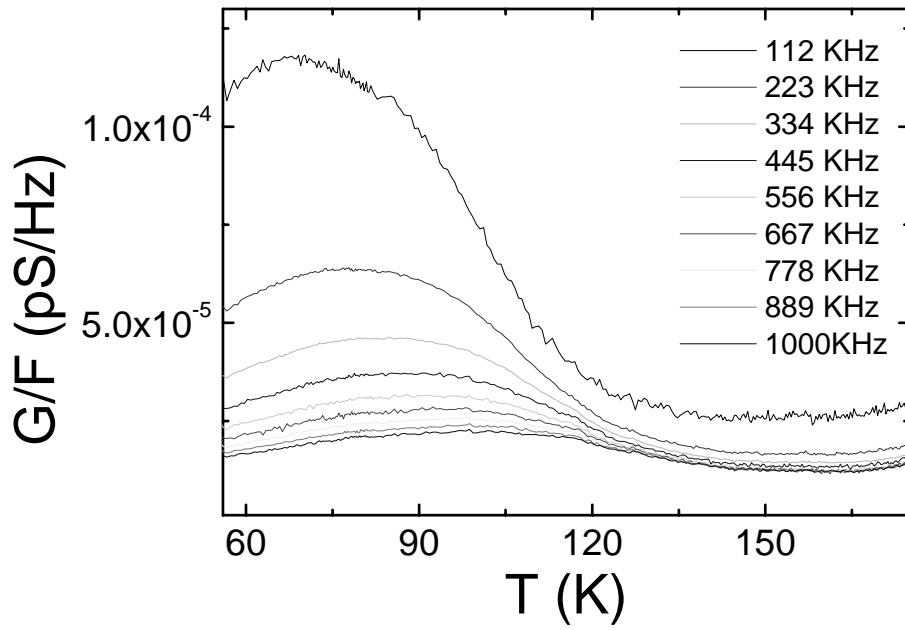


圖 4-12 SH335 的 G-T 圖

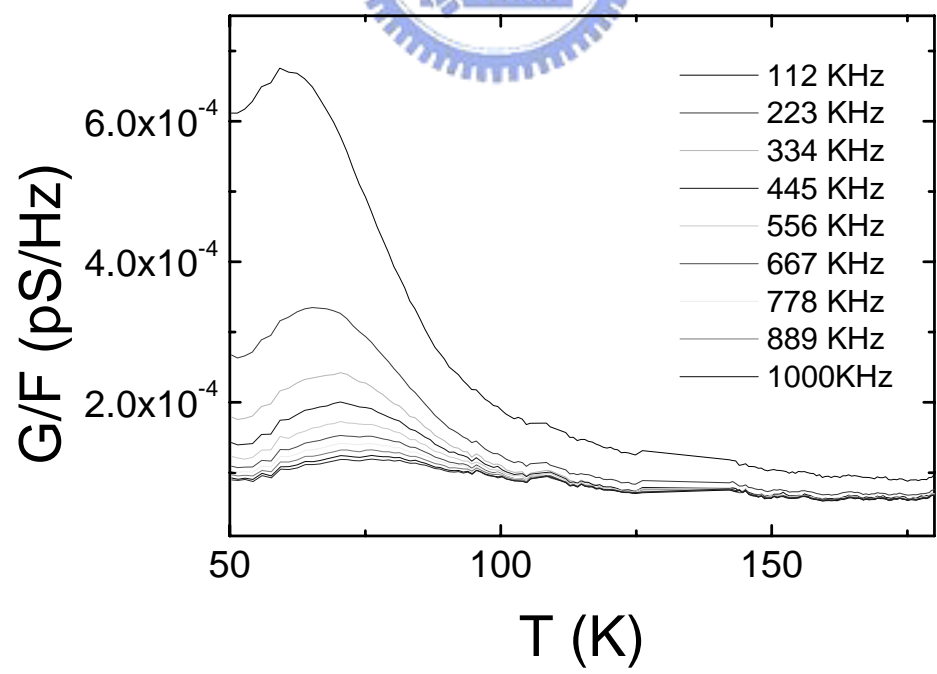


圖 4-13 SH332 的 G-T 圖



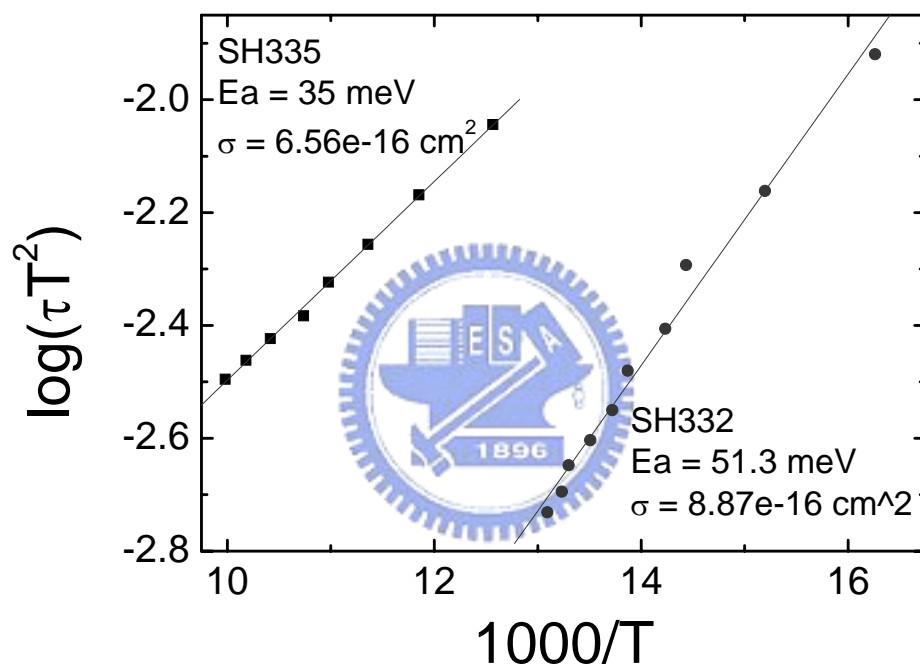


圖 4-14 由 SH335 及 SH332 由 G-T 所得到的阿瑞尼士圖

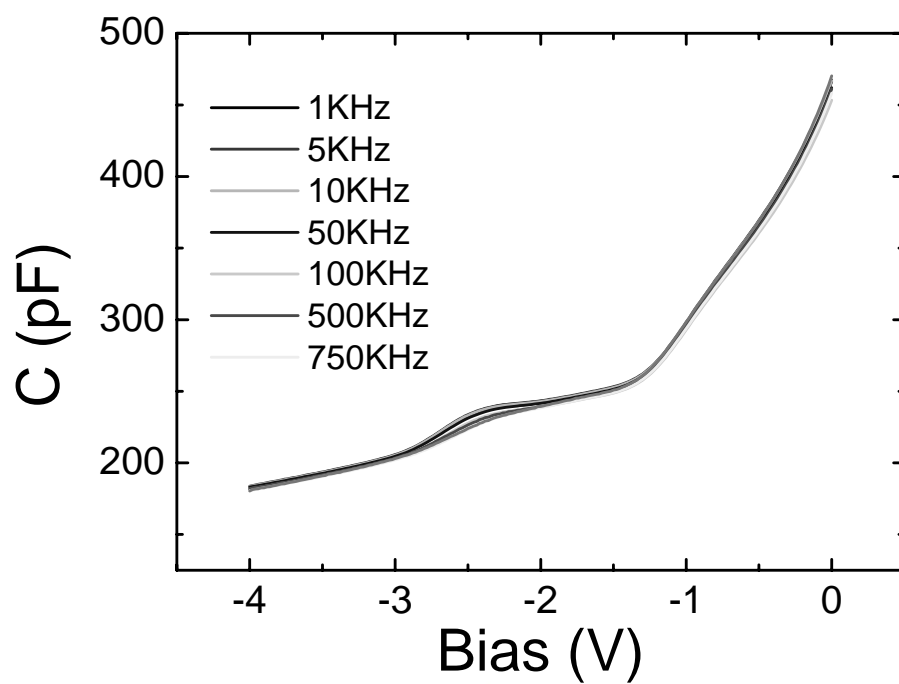


圖 4-15(a) SH430 樣品在 83K 時 C-V 經過平移後

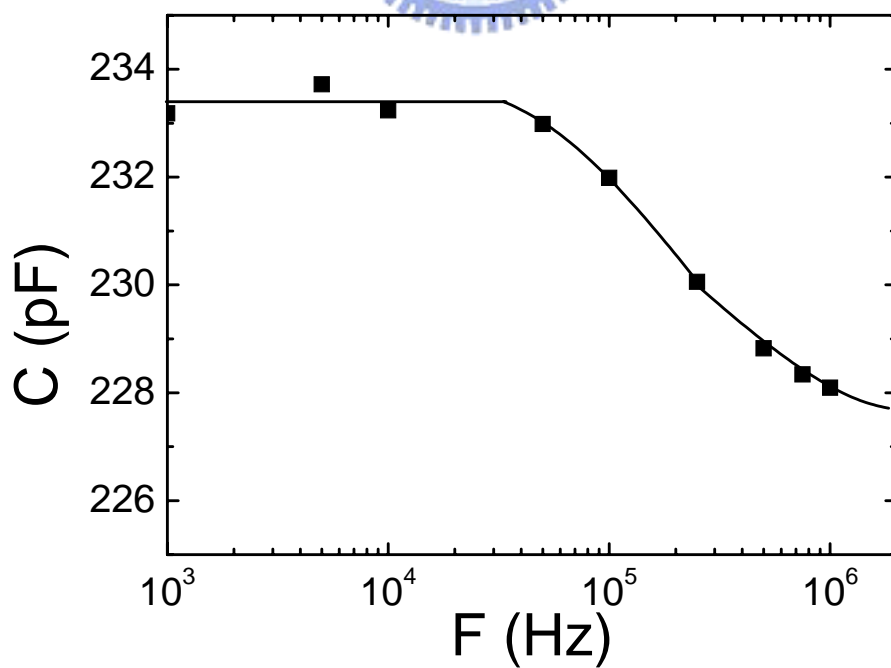


圖 4-15(b) 由上圖所得到的 C-F 圖形

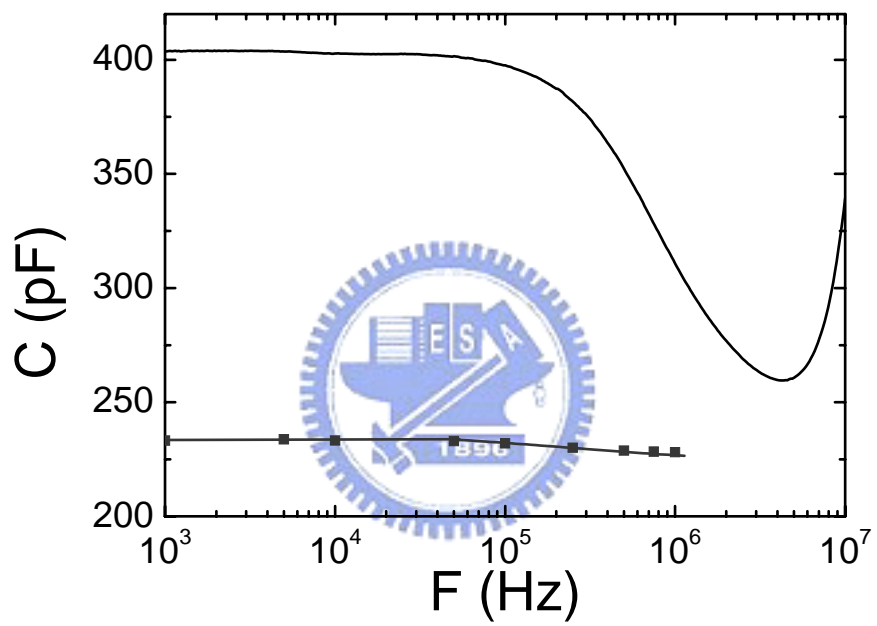


圖 4-16 串聯電阻與結構的 C-F 圖

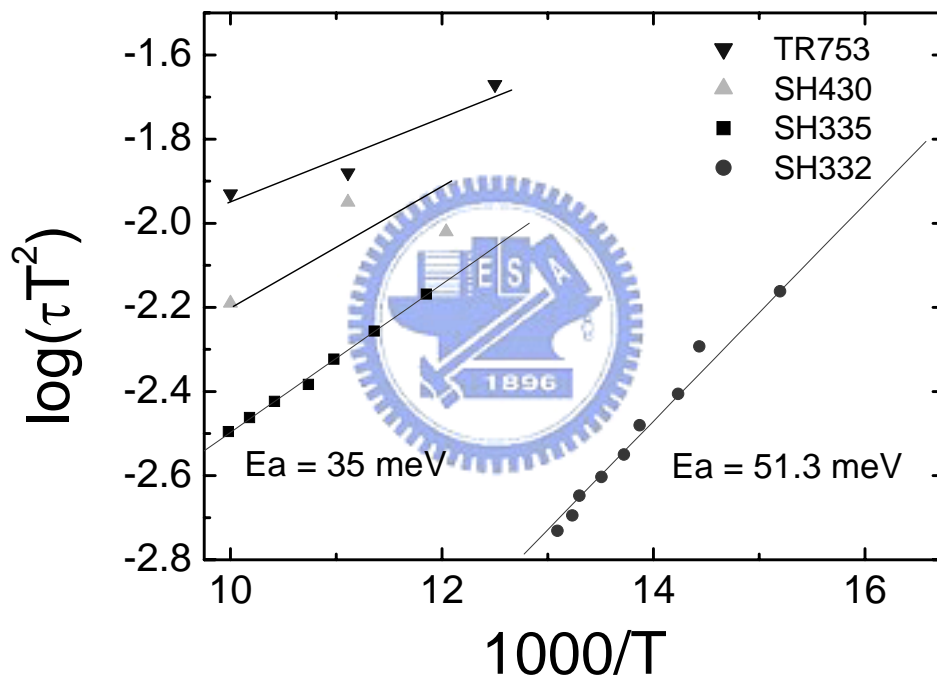


圖 4-17 所有樣品的阿瑞尼士圖

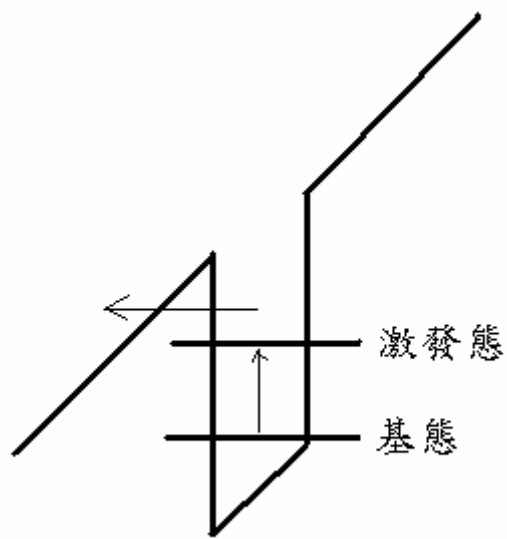


圖 4-18 電子運動情形的示意圖

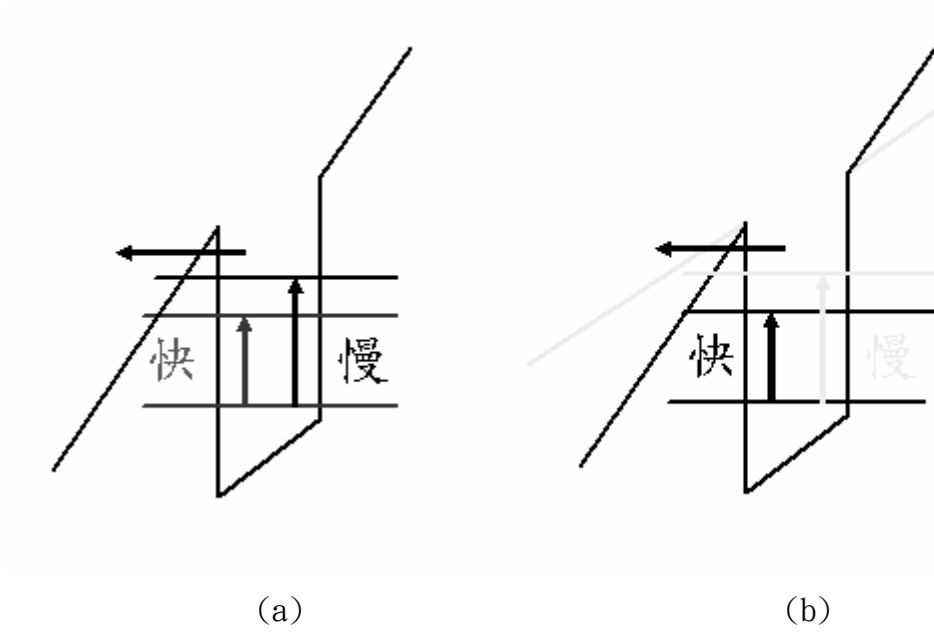
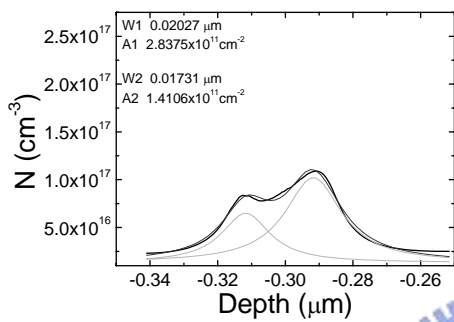
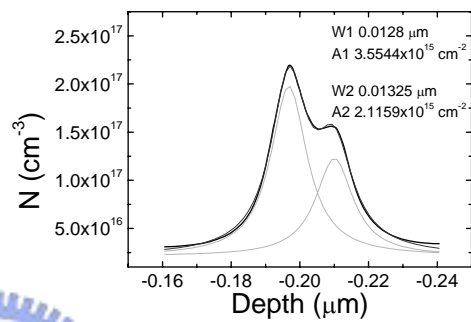


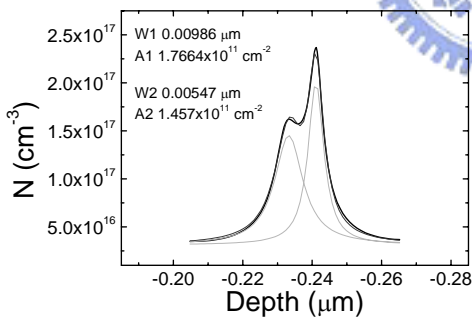
圖 4-19 量子點載子躍遷時間與能階差跟能帶彎曲的關係



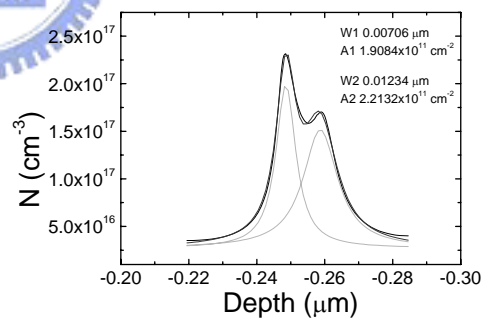
(a)TR753



(b)SH332



(c)SH430



(d)SH335

圖 4-20 對低溫 80K，頻率 10KHz 的縱深分佈