

國立交通大學

電子物理系

碩士論文

自聚式 InAs 量子點上覆蓋 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ / $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$
複合層之研究

Study of self-assembled InAs quantum dots
covered by an $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ and $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$
combination layer

研究生：謝明芳

指導教授：陳振芳博士

中華民國九十三年六月

自聚式 InAs 量子點上覆蓋 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ / $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$
複合層之研究

Study of self-assembled InAs quantum dots
covered by an $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ and $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$
combination layer

研究生：謝明芳

Student : Ming-Fang Hsieh

指導教授：陳振芳博士

Advisor : Dr. Jenn-Fang Chen



A Thesis
Submitted to 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
June 2004

Hsin-chu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年六月

自聚式 InAs 量子點上覆蓋 In_{0.14}AlAs / In_{0.14}GaAs

複合層之研究

研究生：謝明芳

指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學電子物理所

摘要

本篇論文樣品是以 MBE(分子束磊晶)長晶，藉由 PL 光性量測以及電流-電壓(I-V)、電容-電壓(C-V)、導納頻譜(G-T)等電性量測的方式探討在波長 1.3 μm 的 InAs/InGaAs dots in well 結構中間覆蓋一層不同厚度(0、10、14、20 \AA) 的 In_{0.14}AlAs 所產生的影響。我們將四片樣品的電容-電壓量測結果換算成縱深分佈後發現，低溫 80K 時都有兩個載子堆積的峰值出現，且較深的峰值對頻率有響應(1K~1MHz)；於是我們針對對頻率有響應的偏壓進行導納頻譜(G-T)量測，得到 DWELL 結構的活化能為 57.2 \pm 5.1meV (1.4 $\times 10^{-14}\text{cm}^2$)；另外我們從 PL 已知結構具有完整的量子點結構，DLTS 在量測範圍內也沒有出現缺陷訊號，所以我們推測訊號可能來自於量子能階；其中較深的峰值來自於基態載子躍遷到激發態然後再從激發態直接穿隧出去，而我們得到載子從基態躍遷到激發態在溫度 80K 的時間常數約為 10⁻⁶ 秒；至於較淺的峰值則可能來自於激發態載子直接從激發態穿隧出去，然而這個過程太快，導致我們一直到溫度 30K 都量不到載子對頻率的響應，也就是載子在溫度 30K 時時間常數仍小於 10⁻⁶ 秒。

從光性 PL 量測結果發現當我們在 DWELL 中間加入一層 In_{0.14}AlAs 後，量子點的基態跟激發態之間的能量差從 78 變成 103meV；而電性量測更發現隨著 In_{0.14}AlAs 厚度增加量子點基態到激發態的活化能越來越大，其值從 57.2 變成 95.6 meV；藉由光性與電性量測結果的差異推算出 ΔE_{ge} 落在

C.B 與 V.B 上的比例，在 DWELL 結構是 7.3:2.7，對於 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度 10\AA 比例則為 7.8:2.2。從光性與電性量測我們都發現載子不容易將基態填滿，推測這個原因是由於加了 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 抑制了 InAs 量子點內部的 In segregation 的情性，使得量子點密度變大。為了進一步證實這個推論，我們也從 TEM (AFM) 影像來估計量子點密度，發現三種量測結果很接近，加了一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 後量子點密度相對於 DWELL 結構變大了 1.5~3 倍左右。



Study of self-assembled InAs quantum dots covered by an In_{0.14}AlAs and In_{0.14}GaAs combination layer

Student: Ming-Fang Hsieh

Advisor: Dr. Jenn-Fang Chen

Department of Electrophysics

National Chiao Tung University

Abstract

The electrical and optical properties of self-assembled InAs quantum dots (QDs) covered by an In_{0.14}AlAs and In_{0.14}GaAs combination layer are investigated by photoluminescence, current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V), and admittance spectroscopy. Four samples with different In_{0.14}AlAs deposition thicknesses of 0, 10, 14 and 20 Å, are grown by molecular beam epitaxy (MBE). C-V profile shows two accumulation peaks at 80K, and the deeper one is frequency-dependent (1K ~ 1MHz). From admittance spectroscopy measurement, we determine activation energy of 57.2 ± 5.1 meV (1.4×10^{-14} cm²). Quality of these quantum structures is good since no traps are observed by DLTS. The two quantum peaks of C-V profile are probably originated from the ground and excited state of the QD, respectively. The electrons in the ground state are excited to the excited state of the QD then tunnel out of the potential well. The emission time of the electrons from ground to excited state is about 10^{-6} sec at 80K. On the other hand, the tunneling process for

the excited state of the QD to the GaAs conduction band is too fast to be detected even at 30K (emission time $< 10^{-6}$ sec at 30K).

By covering a 10\AA $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ layer, the PL and admittance spectroscopy data show an increase of energy separation between the quantum-dot ground and first-excited state, from 78.0 to 101.4meV for PL and from 57.2 to 79.1meV for admittance spectroscopy. From these results, the ratios of energy separation between the quantum-dot ground and first-excited state in conduction band and valence band are determined to be 7.3:2.7 for DWELL structure and 7.8:2.2 for the sample with 10\AA $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$, respectively. The electrical, optical and TEM(AFM) results show that covering the 10\AA $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ layer can increase the InAs quantum-dot density by 1.5 to 3 times. This result might be due to the effect of the reduction of indium segregation caused by the $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ layer.

目錄

中文摘要	i
英文摘要	iii
目錄	v
第一章 緒論	
1.1 前言	1
1.2 研究動機	1
1.3 論文架構	2
第二章 樣品的製備與量測系統	
2.1 晶片的成長	3
2.2 電極的製作	3
2.2-1 Schottky contact 的製作	3
2.2-2 Ohmic contact 的製作	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 光性量測結果與分析	
photoluminescence	6
第四章 電性量測結果與分析	
4.1 電流-電壓(I-V)量測與分析	10
4.2 電容-電壓(C-V)量測與分析	11

4.2-1	C-V 量測的基礎理論	11
4.2-2	量測結果與分析	13
4.3	導納頻譜量測結果與分析	14
4.3-1	導納頻譜量測的基礎理論	14
4.3-2	量測結果與分析	17
4.4	In _{0.14} AlAs 的影響	18
4.4-1	ΔE_g 變大	18
4.4-2	quantum dots density 變大	19
第五章	結論	22
參考文獻		24
圖目錄		28
附圖		30



第一章 緒論

1.1 前言

自聚式量子點由於它獨特的似原子(atomic-like)特性適用於光電元件，在近幾年引起相當大的注意！所謂自聚式量子點乃是利用材料之間晶格常數的不匹配產生彈性應變能，使得量子點在特定基板上自聚成長。如此成長的量子點僅是奈米級的尺寸結構，擁有不連續的 energy spectrum 以及相當窄的 gain spectrum 等特性，尤其以量子點為主動層材料的雷射 [1-2] 可達到 $1.3\mu\text{m}$ 的發光波長，正符合光纖通訊的需求；此外量子點還擁有較高的 saturation material gain、較低的 threshold current、以及較高的 differential gain，所以量子點可說是非常具有潛力。然而目前的技術仍無法將量子點大小控制均勻，亦須再提高量子點密度以及對溫度的穩定性，這些都是急欲解決的問題。



1.2 研究動機

雖然 DWELL 結構 [3-5] 以及低溫成長量子點 [6] 均可將波長拉長到 $1.3\mu\text{m}$ ，但由於量子點密度太低以及量子點基態到第一激發態之間的能量差太小 [7]，造成量子點雷射受限於 gain saturation [8-9] 情形之外，在室溫左右對溫度的穩定性變得較低。於是我們嘗試在 DWELL 結構中間覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ ，由於 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 相對於 InAs 、 InGaAs 擁有較大的 band gap 使得量子點 InAs 形成較深的位能井 [10]，從理論計算我們已經知道如此的效應會造成量子點基態與第一激發態之間的能階差變大，並將藉此結構提高量子點的密度！相同結構的光性研究已經有多個研究團對進行 [11-15]，本論文中我們將針對這一個出發點除光性以外並進行電性研究。

1.3 論文架構

第二章：樣品的備製與量測系統簡介。

第三章：對樣品做光性的量測與分析；針對 PL 量測結果加以分析和討論。

第四章：對樣品做電性的量測與分析；簡單說明電性量測的原理，並針對電性量測結果加以分析和討論。

第五章：結論。



第二章 樣品的製備與量測系統

2.1 晶片的成長

本論文所研究的樣品以分子束磊晶(Molecular beam epitaxy)方式成長。在 n^+ GaAs(100) substrate 上先成長 $0.3\ \mu\text{m}$ 矽摻雜 n-GaAs buffer layer，成長溫度設定在 600°C 。之後再依序成長 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 44\AA $\text{In}_{0.14}\text{GaAs}$ 量子井 (QW) 在 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 上面，活性層的長晶溫度約為 480°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\AA
SH330	$5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$0.26\text{\AA}/\text{sec}$	14\AA
SH337	$8 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$0.26\text{\AA}/\text{sec}$	20\AA

2.2 電極的製作

分為正反面兩個部分。

2.2-1 Schottky contact 的製作

首先在樣品的正面鍍上一層鋁作為 Schottky contact。為避免蒸鍍過程所造成的不理想的效應，影響電性量測結果，蒸鍍前要將樣品確實清洗

過。以下簡述晶片的清洗步驟：

1. 以 D. I water(去離子水)沖洗，然後置入 D. I water 用超聲波震盪器震盪約 5 分鐘→去除表面一般雜質。
2. 將晶片浸泡於 A. C. E(丙酮溶液)中，用超聲波震盪器震盪約 5 分鐘→去除表面油漬。
3. 以 D. I water 沖洗，然後置入 D. I water 用超聲波震盪器震盪約 5 分鐘→去除 A. C. E。
4. 將晶片放入稀釋過的鹽酸溶液(HCl:H₂O=1:1)中，約 10 秒鐘→去除陽離子及氧化層。
5. 以 D. I water 沖洗，然後置入 D. I water 用超聲波震盪器震盪約 5 分鐘→去除殘留的鹽酸溶液。
6. 用氮氣吹乾。

晶片清洗完後，將其以金屬光罩(mask)覆蓋固定，然後將之與欲鍍物(鋁)一起放入真空腔體中；用 pump 將真空腔體內壓力抽至 5×10^{-6} torr 以下，即可利用電流(約 50A)加熱鋁使其汽化鍍在樣品上，如此便完成 Schottky contact 的製作。至於樣品表面蒸鍍金屬圖形(pattern)為直徑為 $800 \mu\text{m}$ (面積為 0.005024cm^2)的圓形。

2.2-2 Ohmic contact 的製作

完成正面 Schottky contact 的製作後，接著在樣品背面做 ohmic contact。我們在已蒸鍍完成的樣品背面黏上兩點銻(Indium)球，送入通有氮氣的高溫爐管(溫度 300°C)約 10 秒，為了避免背面電阻對我們實驗的影響，對背面這兩點銻做 I-V 量測，確定電阻小於 10Ω 之後，再將矽基板放在加熱平台上加熱至 200°C (超過 In 熔點)，便可在矽基板上均勻塗抹一層銻，最後再將樣品背面黏在基板上。即完成 Ohmic contact 的製作。

2.3 量測系統簡介

包括光性與電性兩個系統。

2.3-1 光性量測系統

雷射(波長為 532nm，功率為 1.5mW)、分光儀 (monochromator)、光遮斷器 (chopper)、光偵測器 (photodetector)、濾波片 (filter)、鎖相放大器 (Lock-in Amplifier)、溫控系統等。

2.3-2 電性量測系統

1. Keithley 236：量測電壓-電流(I-V)特性曲線。
2. DLTS：包含脈衝產生器、溫控系統、雙閘訊號平均器、電容計、降溫系統及水平垂直紀錄器等。
3. HP 4194(Impedance/Gain-phase 分析儀)：量測電容-電壓、導納頻譜、暫態電容與深層能階暫態頻譜的特性曲線。
4. 溫控器 LakeShore330。
5. 變溫系統：Cryogenic、抽真空 Pump、液態氮鋼瓶、真空腔體內有加熱平台與三軸探針。

藉由電腦透過 GPIB 介面控制卡來控制儀器與讀取數據，之後再利用軟體處理與作圖。

第三章 光性量測結果與分析

Photoluminescence 量測及分析

利用波長 532nm 的雷射對四片樣品進行 PL 量測，量測功率設定在 15mW 與 90mW。圖[3.1]為四片樣品室溫下功率 90mW 的 PL 圖，四片樣品均可明顯分出兩支峰值。當我們將功率由 15mW 提高到 90mW，見圖[3.4(a)]~ [3.4(d)]，發現 excited state 相對於 ground state 的強度均變大了所以我們可以確定兩支 peak 中較低能量的為量子點的 ground state，高能量的則為 first-excited state。將四片樣品在溫度 300K，功率 90mW 的 PL 歸納如下表：

	Sh332 (0 Å)	Sh331 (10 Å)	Sh330 (14 Å)	Sh337 (20 Å)
RT energy (g. s) (單位：eV)	0.949 (~1.31μm)	0.965	0.964	0.971
RT energy (e. s) (單位：eV)	1.027	1.066	1.067	1.074
ΔE_{gc} (單位：meV)	78.0	101.4	102.6	103.1
FWHM (g. s) (單位：meV)	36.2	40.2	40.7	40.5
FWHM (e. s) (單位：meV)	85.5	74.2	75.1	77.1

由 PL 量測確認四片樣品在室溫下的發光波長均在 1.3μm 左右，符合光纖通訊的需求。見圖[3.1(a)]、圖[3.1(b)]，首先我們可以發現三片樣品相對於 sh332(DWELL)呈現藍移的結果，惟三片樣品 first excited

state 藍移的程度相對於 ground state 藍移的情況都比較大，這一點我們推測是由於加了一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 可能產生了以下兩個效應：[10]

- I. 由於 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 相對於結構中的其他材料 (GaAs、InAs、InGaAs) 具有較大的 band gap，在結構中就形同一個 potential barrier，見圖[2.2]，會造成量子點發光波長藍移，而這個效應對於量子點的 first-excited-state 的影響又大於 ground state，所以同時會造成 ground state 到 first-excited-state 之間的能量差變大！
- II. 在 DWELL 結構中加入一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ ，使得 InAs QDs 裡的 In 原子不容易跑走 (suppressing of In segregation)，於是 InAs QDs 裡的 In 原子相對於 DWELL 結構變的比較多！這個結果會造成量子點紅移的情形，而紅移的效應對於量子點的 ground state 的影響又大於對 first-excited-state 的影響，所以同樣的也會讓 ground state 到 first-excited-state 之間的能量差變大。
[16-18]

兩種效應互相作用下，結果顯示 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 的 high potential barrier 造成的藍移影響較大！而由於 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 的 high potential barrier 使得量子點的 PL 藍移，這一個效應本來就對 first excited state 影響的程度比較大，倘若再考慮第二個效應的作用，覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 使得量子點內部 In segregation 的情形減少了，對量子點的 ground state 造成紅移的影響又相對的比較大，會牽制 ground state 藍移的程度，於是可以看到 first excited state 藍移的程度比 ground state 還要大的結果。

探討四片樣品 ground state 與 excited state 之間的能量差，見圖[3.2]，發現隨著 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 的加入，QDs 的 ground state 與 first excited state 之間的能量差 ΔE_{ge} 從 78 變成 103meV，明顯的變大了。這一個結果我們可追溯上頁提到的加了一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 可能產生的兩個效應，倘若只有任一個效應發生作用，均會造成能量差 ΔE_{ge} 變大；若兩個效應都出現

了，由於第一個效應的藍移主要影響 first excited state，而第二個效應的紅移又主要影響 ground state，兩個效應綜合起來恰使得 ground state 與 first excited state 之間的能量差變大！

接著看到 ground state 的半高寬(FWHM)，見圖[3.3]，當我們在 DWELL 結構中加入一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ ，半高寬從 36meV 增大至 40meV，這樣的增幅並不大，顯示加入 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 後 uniformity 仍是不錯。

取四片樣品在溫度 300K，功率 15mW 與 90mW 的 PL 圖，見圖[3.4(a)]~[3.4(d)]，fitting 曲線大概估計 ground state 與 excited state peak 下方所包圍的面積，所得到的 excited state peak 相對於 ground state peak 面積的比率(excited / ground)：

	Sh332 (0 Å)	Sh331 (10 Å)	Sh330 (14 Å)	Sh337 (20 Å)
15mW	1.40	0.71	0.72	0.50
90mW	2.04	1.04	0.94	0.93

由表我們發現當功率由 15mW 提高到 90mW，excited state 相對於 ground state 的面積比值均變大，這是由於在較大激發功率下，載子容易填到高能階上。接著比較在相同功率下，不管是 15mW 還是 90mW，隨著 DWELL 結構加上一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ ，excited state 相對於 ground state 面積的比值都越來越小，顯示在 DWELL 結構中間加上一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 使得 QDs ground state 所侷限的載子相對於 excited state 是比較多的；其原因我們推測是由於第二個效應也產生了作用，也就是在 InAs QDs 上覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 使得量子點內部 In segregation 的情形減少了，於是量子點密度變大，也就是說由於量子點密度變大，相對的量子點的 ground state 也變多，所以 ground state 不易被填滿，導致填到 excited state 的載子就相對

的減少！

以上所有光性結果將進一步由電性量測來驗證並加以分析探討。



第四章 電性量測結果與分析

4.1 電流-電壓(I-V)量測與分析

為了了解 Schottky contact 品質好壞，我們必須先針對樣品做 I-V 電流-電壓量測。從順向偏壓的 I-V 量測可以得知樣品的 ideal factor、串聯電阻大小、以及 Schottky barrier height，判斷樣品結構是否形成良好的 Schottky 接面，粗略判斷是否產生缺陷；另外也可得知反向偏壓對應的漏電流大小。

已知 Schottky 結構的電流-電壓特性如下：

$$I(V) = I_S \left[e^{\frac{q(V-IR)}{nkT}} - 1 \right] \quad (4.1)$$

而

$I_S = I_S(\phi)$ 是 Saturation current

n 是 ideal factor、 R 是串聯電阻

利用最小平方差方法，將四片樣品室溫的順向偏壓下的 I-V 曲線[圖 4.1]

以 (4.1) 式做最佳擬合，可得到樣品的 n 、 I_S 、 R 值。

另外由

$$\phi = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_S} \right) \quad (4.2)$$

A^* 是 Richardson's constant

$$A^* = 0.41$$

ϕ 為電子從金屬到半導體所需跨越的電位障

可得到 Schottky barrier height ϕ 。

	n	R	I _s	φ
Sh332 (0 Å)	1.3	67Ω	1.19*10 ⁻¹¹	0.786V
Sh331 (10 Å)	1.8	104Ω	7.83*10 ⁻¹⁰	0.667V
Sh330 (14 Å)	1.6	44Ω	2.91*10 ⁻¹⁰	0.703V
Sh337 (20 Å)	1.2	68Ω	8.24*10 ⁻¹⁰	0.676V

如上表所示，四片樣品的 ideal factor 很接近理想值 1，而串聯電阻也都
 很小，特性都算不錯！而 Schottky barrier height 還可以跟 C-V 電容-
 電壓比較。

4.2 電容-電壓(C-V)量測與分析

4.2-1 C-V 量測的基礎理論

C-V 量測與 Schottky 結構空乏區有直接的關係，故 C-V 量測可以提
 供我們 Schottky 結構中載子堆積情形以及相關電的特性。

考慮空乏區為一平行板電容：

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{W} \quad (4.3)$$

其中 W 為空乏區寬度，ε 為半導體介電係數，A 為元件面積

已知空乏區寬度與反向偏壓關係：

$$W = \left[\frac{2\epsilon\epsilon_0 (V_{bi} + V_R)}{eN_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

改變外加反向偏壓，元件空乏區寬度改變，同時調變電容，利用

$$C = dQ/dV$$

$$= A \left[\frac{e\epsilon\epsilon_0 N_d}{2(V_{bi} + V_R)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

故我們只需將 C-V 曲線換算成 $1/C^2-V$ 即可斜率與截距得到摻雜載子濃度 N_d 與內建位勢障 V_{bi} ，由於

$$V_{bi} = \phi - \phi_n$$

其中 ϕ_n 為 $E_c - E_f$

$$\phi_n = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (4.6)$$

進而得到 Schottky barrier height ϕ 。[19]

	N_d	V_{bi}	ϕ_n	ϕ
Sh332(0 Å)	$4.7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	0.83v	57mev	0.89v
Sh331(10 Å)	$6.9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	0.52v	46mev	0.57v
Sh330(14 Å)	$3.2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	0.64v	41mev	0.71v
Sh337(20 Å)	$7.9 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	0.71v	43mev	0.76v

最後利用

$$N(W) = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 A^2 \left(\frac{dC^{-2}}{dV}\right)} \quad (4.7)$$

即可從 C-V 曲線換算成載子的縱深分佈。

外加反向偏壓時，除了直流偏壓，我們還外加一個 A.C 小訊號 (osc level=0.1V)。改變交流訊號的頻率，倘若量子能階或缺陷捕捉的載子的放射速率恰落於儀器的量測頻率範圍內，則高頻時由於載子放射速度趕不上 A.C 訊號而對電容沒有貢獻；反之低頻時，載子放射速度趕的上 A.C 訊號所以會對電容有貢獻，故從高頻與低頻的量測，我們可以判斷載子從能階跳要出來所需要的 time constant。

4.2-2 量測結果與分析

圖[4.2(a)]為四片樣品在室溫下頻率 1MHz 的電容-電壓曲線圖，從圖中均可清楚的看見一段電容緩慢變化的平台，利用(4.7)式將電容-電壓換算成縱深分佈，可發現平台恰對應於載子堆積的位置，如圖[4.2(b)]所示。接下來我們對四片樣品做室溫下變頻電容-電壓量測，圖[4.3]~[4.6]為四片樣品室溫下變頻的縱深分佈圖，如圖所示四片樣品在室溫下載子堆積的峰值對頻率均沒有變化，表示室溫下載子從能階跳躍出來均趕的上 A.C 訊號的調變。

為進一步確定載子侷限的情況，變溫量測載子對電容-電壓的貢獻。圖[4.7(a)] 圖[4.7(b)] 圖[4.8] ~ 圖[4.10 (b)]分別為四片樣品的量測結果，結果發現隨著溫度漸漸下降，約從溫度 200K 開始，從原本室溫下即存在的峰值漸漸分離出第二個峰值，而第二個峰值相對於原本存在的峰值是在較深的空間位置。由於低溫下熱動能越小，需要較大 D.C bias 才能將載子完全趕出來，所以兩個峰值均有向後平移的趨勢，並導致兩個峰值分開的程度越來越大！另外由於低溫下 Debye length 較小造成空間解析度較高的緣故[20]，所以兩個峰值在低溫(80K)時變的更高且更窄！至於室溫下由於熱動能較大的關係，載子從能階跳躍出來的速度很快，均趕的上儀器的調變，所以無法分出兩個峰值。

特別針對 sh331($d_{In15AlAs}=10 \text{ \AA}$)將溫度降至 31K 做變溫電容-電壓量測，量測頻率設定在 10KHZ，由圖[4.8]可以發現原本隱沒在第一個峰值裡的第二個峰值從 200K 左右開始出現且隨著溫度降低而變高、變窄，直到 80K 峰值高度達到最大，再繼續降溫峰值漸漸變小，也就是說第二個峰值的載子由於低溫時載子從能階跳躍出來所需時間常數 (time constant) 較大的緣故漸漸趕不上儀器的量測頻率，一直到 31K 第二個峰值完全消失。由這一系列的變化，我們完全量測到了溫度從 30~300K 之間，第二個也就是較深的峰值在 A.C 訊號頻率 10KHZ 時對溫度的響應！

於是我們接下來針對四片樣品量測溫度 80K 時，載子對頻率的變化情形。如圖[4.11(a)]~ 圖[4.14(b)]所示，四片樣品的第二個（較深的）峰值對頻率 1KHz~1MHz 均有清楚的變化情形，可知在溫度 80K，載子從能階跳躍出來所需的反應時間恰可被儀器量到($\sim 10^{-6}$ 秒)，下一節我們也將針對這一點做導納頻譜量測，進一步求得能階的活化能。而當我們仔細觀察四片樣品對頻率的響應，可以發現在頻率為 1MHz 時，sh331($d_{In0.14AlAs}=10 \text{ \AA}$)、sh330($d_{In0.14AlAs}=14 \text{ \AA}$)、sh337($d_{In0.14AlAs}=20 \text{ \AA}$)的較深的峰值強度幾乎已經快消失，只有 sh332($d_{In0.14AlAs}=0 \text{ \AA}$) 的還有很明顯的峰值存在，這顯示在溫度 80K 時，載子從 sh332 的能階跳躍出來所需的時間相對於其他三片是比較小的，所以當高頻量測下，峰值強度雖然變小但仍然明顯存在。

雖然從室溫一直到 30K 我們都無法量測到第一個（較淺的）峰值對頻率的響應，這表示載子從能階跳躍出來的速度太快，在溫度 30K 時時間常數小於 10^{-6} 秒，致使我們無法在這個溫度範圍內以現有的儀器得到關於第一個峰值的訊息；但相對的，約在 80K 左右可以清楚的看到第二個（較深的）峰值對頻率的響應，表示載子從能階跳出來所需時間較長(在溫度 80K 時大約 10^{-6} 秒)，因此可以進一步探討。

4.3 導納頻譜量測與分析

4.3-1 導納頻譜量測的基礎理論

導納頻譜分析 (Admittance Spectroscopy) 是在準平衡 (quasi-equilibrium) 條件下[21-23]，利用小訊號調變欲量測的元件。導納頻譜分析具有下列優點：

1. 非常淺或者反應非常快的缺陷能階亦能被分析出來。
2. 在量測過程中由於元件依然是維持在準平衡狀態下，因此在能帶、位能障或其他參數的計算上仍可用準平衡下的近似條件。
3. 利用小訊號調變，因此元件對漏電流具有較高的容忍力。

4. 具有頻譜分析之特性，亦即量測過程中一個峰值會對應一個缺陷能階，峰值的高度則對應到缺陷的濃度高低。

我們對元件施加一 A.C 小訊號 $\tilde{V}e^{j\omega t}$ ，則元件會得到一個對應的小電流訊號 $\tilde{I}e^{j\omega t}$ ，所以元件所對應的導納應為：

$$Y = \frac{\tilde{I}}{\tilde{V}} = G + j\omega C \quad (4.8)$$

經過繁複的數學運算會得到

$$C_t(\omega) = \frac{C_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_t}\right)^2} \quad (4.9)$$

$$G_t(\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_t}\right)^2 \omega_t C_0}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_t}\right)^2} \quad (4.10)$$

以上呈現的是缺陷對導納量測的影響，其中 $\omega_t = 2e_n$ ，而 e_n 為缺陷的 emission rate。

另外我們考慮串聯電阻對導納量測的影響，當我們考慮電容 C (二極體的界面電容或是缺陷電容等) 與某種原因產生的電阻 R 串聯時，其導納的形式為：

$$C_R(\omega) = \frac{C}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2} \quad (4.11)$$

$$G_R(\omega) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2 \omega_{RC} C}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{RC}}\right)^2} \quad (4.12)$$

其中 $\omega_{RC} = (RC)^{-1}$ 。

比較缺陷以及串聯電阻對導納頻譜量測的影響，我們發現二者所呈現的形式大同小異，所以在分析量測結果時需格外小心判斷。

從 $C-\log(w)$ 圖，圖[4.15]，可發現當儀器量測頻率小於曲線的反曲點位置對應的頻率，此時載子從能階跳躍出來的速度趕的上儀器交流訊號的調變，所以會對電容有貢獻；但隨著儀器量測頻率高於曲線的反曲點，載子從能階跳躍出來的速度漸漸趕不上儀器交流訊號的調變，所以對電容的貢獻越來越少。當能階上的載子完全趕不上交流訊號的調變，此時的電容完全由自由載子所提供。利用載子在不同溫度下對應的放射速度會不同的特性，來推算出載子的放射能階。

考慮(4.9)式，我們取電容 C 對 $\log(w)$ 做二次微分得到值為零，亦即 $C-\log(w)$ 圖中反曲點 (inflexion point) 的位置 w 恰等於 $w_t/\sqrt{3}$ 。再考慮(4.10)式，將 G/w 對 w 做一次微分為零，即 G/w 為最大值的位置， w 恰等於 w_t ；而由於 $\omega_t = 2e_n$ ，當我們得到了 w_t 亦即得到了載子的 emission rate e_n 。所以我們利用固定溫度下電容對頻率的關係圖，或者是固定頻率下的電導對溫度圖以得到載子的 emission rate e_n ，將每個溫度對應的 emission rate e_n ($e_n = 1/\tau_e$) 畫成阿瑞尼士圖 (Arrhenius plot)，其關係如下：

$$\tau_e T^2 = \frac{\exp\left(\frac{E_c - E_t}{KT}\right)}{\gamma_n \sigma_n} \quad (4.13)$$

故

$$\ln(\tau_e T^2) = \left(\frac{E_c - E_t}{K}\right)\left(\frac{1}{T}\right) - \ln\left(\frac{1}{\gamma_n \sigma_n}\right) \quad (4.14)$$

取 n 型 GaAs 材料， $\gamma_n = 2.28 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \text{ S}^{-1} \text{ K}^{-2}$ ，

$E_c - E_t = E_a$ 即活化能(activation energy)。

$\sigma_n =$ 捕獲截面積(cross section)

將 $\ln(\tau_e T^2) - 1/T$ 做圖，從斜率就可得到活化能 E_a ，從 $\frac{1}{T} = 0$ 曲線和縱軸的截距可以得到捕獲截面積(cross section) σ_n 。

4.3-2 量測結果與分析

針對四片樣品在溫度 80K 電容-電壓量測中對頻率有響應的偏壓，也就是縱深分佈中較深的峰值對應的偏壓做 G-T 量測，如圖[4.16 (a)]~[4.16 (d)]所示，得到的曲線我們利用最小平方差的方法，將最大值附近的實驗數據以一條溫度的十次方多項式曲線做最佳的擬合，再由擬合所得之理論曲線求得極大值的點換算成 time constant τ_e ，對應量到的溫度去做阿瑞尼士圖。圖[4.17 (a)]為量測十個頻率對應溫度得到的十個點，為避開低溫載子可能出現 tunneling 的情形，會影響我們判斷活化能，所以我們只取高溫的五個點來換算活化能。圖[4.17 (b)]為四片樣品的活化能 E_a 、捕獲截面積(cross section) σ_n 。

可以看到 sh332(DWELL)結構的活化能為 $57.2 \pm 5.1 \text{ meV}$ ，由本實驗室學姊陳宜屏的論文得到 InAs/GaAs 量子點的 ground state 與 excited state 之間的能量差約為 50 meV [24-25]。將我們由 G-T 量測所得到的活化能與此結果相比較，推測我們 G-T 量到的活化能亦對應於 ground state 與 excited state 之間的能量差，也就是說訊號是載子由 ground state 跳躍到 excited state 然後直接從 excited state tunneling 出去所得到的[26-27]。

由這個推論我們也可以進一步探討四片樣品在低溫的縱深分布圖[4.11(a)]~圖[4.14(b)]中兩個峰值的來源。從空間上的相對位置以及電容-電壓的量測理論判斷，施加反向直流偏壓使 Fermi level 先達到較淺的能階，載子受 A.C 訊號調變而對電容有貢獻，即在縱深分佈形成了第一個(較淺的)峰值；隨著反向直流偏壓越大空乏區寬度也越寬，Fermi level 降低至較深的能階位置，此時第二個(較深的)峰值才出現。所以我們推測第二個峰值是 ground state 的載子跳躍到 excited state 然後直接從 excited state tunneling 出去所得到的(在溫度 80K 時大約 10^{-6} 秒)[26-27]，圖[4.18]；至於第一個峰值則應該是載子直接從 excited state tunneling 出去所得到的，而這個過程太快(在溫度 30K 時小於 10^{-6}

秒)致使現有儀器量不到 excited state 對頻率的變化。

為進一步確認訊號來自於量子能階，我們再針對四片樣品做深層能階暫態頻譜(DLTS)[28]，如圖[4.19]所示，四片樣品在溫度 80K~350K 範圍內並沒有缺陷訊號出現[29]；而從四片樣品的 PL 可知樣品均具有量子點的結構，以及電容-電壓對溫度的特性等，我們進一步推斷電容-電壓量測所得載子堆積比較可能是來自於量子能階的訊號，也就是 Quantum emission[30-31]，至於載子堆積的峰值位置不一樣則是由於 etching 時間不一樣所致，但從峰值位置仍大致對應於 InAs 長晶位置。

另外一點，之所以不推測縱深分佈中較淺的峰值來自於 wetting layer，而較深的峰值則來自於 excited state 是因為在 PL 中並沒有 wetting layer 的訊號！

4.4 In_{0.14}AlAs 的影響



以下將綜合光性與電性結果討論在 DWELL 結構中加入一層 In_{0.14}AlAs 所產生的結果。

4.4-1 ΔE_{ge} 變大

將電性 G-T 量測得到的結果與光性 PL 量測得到的 ground state 與 excited state 之間的能量差 ΔE_{ge} 做一個比較：（單位：meV）

	Sh332 (0 Å)	Sh331 (10 Å)	Sh330 (14 Å)	Sh337 (20 Å)
G-T	57.2±5.1	79.1±6.0	89.2±10.9	95.6±9.8
PL	78.0	101.4	102.6	103.1
C.B : V.B	7.3 : 2.7	7.8 : 2.2	8.7 : 1.3	9.3 : 0.7

從電性（導納頻譜）量測得到隨著 InAs QDs 上覆蓋的 In_{0.14}AlAs 厚度越來越厚，QDs 的 ground state 與 excited state 之間的能量差也越來越大。我們將 G-T 量測得到的活化能與 In_{0.14}AlAs 厚度歸納成圖[4.20]，可以發現隨著 InAs QDs 上覆蓋的 In_{0.14}AlAs 厚度越來越厚，樣品的活化能從 57.2meV 變到 95.6meV，有越來越大的趨勢。

由於 PL 量測所得能量差有一部份是落在價帶上，所以由光性量測所得的值比電性量測大一點是可預期的，但兩個量測結果很接近，讓我們更進一步作訊號來源是從 ground state 躍遷到 excited state 然後 tunneling 出來的推測！已知電性量測得到的 ground state 到 excited state 之間的活化能是落在 conduction band，所以我們將光性得到的活化能減去電性得到的值視為落在 valence band 上的活化能大小。如表上的第三列所示，對於 DWELL 結構而言，ground state 到 excited state 之間的活化能在 C.B 與 V.B 上的比值為 7.3 : 2.7，sh331($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$)是 7.8 : 2.2，這兩個結果還算蠻接近的，但隨著覆蓋的 In_{0.14}AlAs 厚度超過 10 Å，C.B 所佔的比例越來越大，我們猜測 In_{0.14}AlAs 厚度可能也影響了 InAs QDs 的 g.s 到 e.s 之間的活化能在 C.B 與 V.B 之間的比例。

如上表所示，在 DWELL(sh332)結構中加入一層 In_{0.14}AlAs 使得量子點 ground state 與 excited state 之間的能量差變大了，而這一個結果我們推論可能是由於加了一層 In_{0.14}AlAs 產生的兩個效應綜合所致，由於藍移的影響主要在 first excited state，而紅移的效應又主要在 ground state，兩個效應個別發生的情況下都會使得 ground state 與 first excited state 之間的能量差 ΔE_{gc} 變大；也可能兩個效應都產生了，綜合起來同樣會造成能量差變大！再看 sh332($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0 \text{ \AA}$)的 ground state 到 excited state 的活化能最小，這也解釋了為什麼在溫度 80K 時 sh332(DWELL)的變頻縱深分佈圖中 ground state 對頻率響應的程度較小！

4.4-2 quantum dots density 變大

取四片樣品在溫度 80K 的縱深分佈圖，圖[4.21]，fitting 曲線大概估計 ground state 與 excited state peak 下方所包圍的面積，所得到的 excited state 相對於 ground state 的面積比率以及半高寬如下表所示：

	Sh332 (0 Å)	Sh331 (10 Å)	Sh330 (14 Å)	Sh337 (20 Å)
Excited /Ground	1.58	0.60	0.79	0.83
FWHM (g. s)	0.013	0.017	0.013	0.012
FWHM (e. s)	0.011	0.015	0.022	0.015

由列表可以發現只有 sh332(DWELL)是 excited state 侷限載子多於 ground state，亦即只有 sh332 的 ground state 容易被填滿進而填到 excited state。其他三片也就是 DWELL 結構中間有成長一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 者，則是 ground state 侷限的載子較多！這一點與光性量測是相符合的，而我們推測是由於第二個效應也發生了作用，也就是在 InAs QDs 上覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 使得量子點內部 In segregation 的情形減少了，於是量子點密度變大，相對的使得 QDs 的 ground state 也變多了，所以 ground state 不易被填滿，當然 excited state 所侷限的載子相對的也就比較少。

為進一步驗證這個推測，我們將樣品作掃描。圖[4.22(a)]為 DWELL 結構的平面 TEM 圖，而圖[4.22(b)]為 DWELL 結構中間加上一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 的 AFM 圖，根據圖像大概估計量子點密度，發現量子點密度從 $3\sim 5\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ 上升到 $9\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ ，顯示量子點密度的確變大。

從光性、電性、以及 TEM (AFM) 均證實了在 InAs QDs 上覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 會使得量子點的密度變大，接著我們要探討三種量測方式得到量

子點密度增加的情況。第一到第四列分別為我們 fitting DWELL 結構以及 sh331($d_{\text{In}0.14\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$)在室溫下 90mW PL 曲線與溫度 80K 縱深分佈曲線，大概估計得到兩個峰值的面積，第五列為 TEM (AFM) 圖像大概估計量子點密度：

	DWELL	10Å In _{0.14} AlAs
90mW PL(g. s) (a. u)	26	48
90mW PL(e. s) (a. u)	53	50
CV(g. s) (cm ⁻²)	1.39×10 ¹¹	2.78×10 ¹¹
CV(e. s) (cm ⁻²)	2.18×10 ¹¹	1.67×10 ¹¹
TEM、AFM (cm ⁻²)	3~5×10 ¹⁰	9×10 ¹¹

我們從峰值所包圍的面積大概估計成被能階所侷限的載子數。先比較光性量測的結果，原本 DWELL 結構 g. s 的載子數佔總載子數的比例 (g. s/g. s+e. s) 為 26/79，在覆蓋一層 10Å In_{0.14}AlAs 後變成 48/98，變成原本的 1.5 倍；用相同的方法估計電性量測所得的量子點密度約變成 1.6 倍；最後由 TEM、AFM 影像估計發現量子點密度變成 1.8~3 倍，我們發現三種量測方法所得到的結果很接近，量子點密度約變成原本 DWELL 結構的 1.5~3 倍左右。

觀察圖[4.16]以及上表，雖然 excited state 的半高寬 (FWHM) 隨著加入一層 In_{0.14}AlAs 後變大了，但 ground state 並沒有相同的情況，雖然 sh331($d_{\text{In}0.14\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$) 半高寬相對於 sh332(DWELL) 變大了，但 sh330($d_{\text{In}0.14\text{AlAs}}=14 \text{ \AA}$)、sh337($d_{\text{In}0.14\text{AlAs}}=20 \text{ \AA}$) 卻有變小的情形，所以我們推測當 DWELL 結構中間加入一層 In_{0.14}AlAs 後並沒有使得樣品的 uniformity 變差，而這一系列結果均與光性 PL 量測相互呼應。

第五章 結論

我們由電性 G-T 量測得到 DWELL 結構的活化能 57.2meV 推測訊號對應於基態到激發態之間的能量差；另外 PL 顯示樣品均具有 QDs 的結構，以及 DLTS 並沒有缺陷的訊號出現，因此進一步推測 C-V 量測得到的兩個載子堆積峰值是來自於量子能階，其中較淺的峰值來自於激發態載子直接從能階穿隧出去，而這一個穿隧的過程太快（在溫度 30K 時時間常數仍小於 10^{-6} 秒）導致我們以現有的儀器在溫度 30~300K 之間都量不到載子對頻率的響應；至於較深的載子堆積峰值則推測是來自於基態，載子從基態跳躍到激發態，然後再由激發態直接穿隧出去，我們得到載子從基態躍遷到激發態在溫度 80K 的時間常數約為 10^{-6} 秒，對應的活化能 57.2 ± 5.1 meV。

同樣考慮 DWELL 結構，光性 PL 量測得到基態到激發態之間的能量差為 78meV，由於 PL 所得能量差有一部分會落在價帶上，我們也因此推算出基態到激發態之間的能量差落在 C.B 與 V.B 上的比值為 7.3 : 2.7。

接著考慮在 DWELL 結構中間覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 後，由光性 PL 我們可以知道不管是 DWELL 結構或者是 DWELL 結構中間有覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 的樣品，QDs 的發光波長均可達到 $1.3\mu\text{m}$ 。然而相對於 DWELL 結構，覆蓋了不同厚度的 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 的其他三片樣品有不同程度的藍移，而且對於同一片樣品而言激發態藍移的程度又大於基態，推測這是因為在 InAs QDs 上覆蓋的 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 就像 high potential barrier 造成 QDs 藍移，而這個影響對第一激發態的影響相較於基態會比較大所致。

從光性、電性、以及 TEM (AFM) 我們發現在 DWELL 結構中間覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 後，QDs 密度變大成 DWELL 結構的 1.5~3 倍，推斷是由於 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 抑制了 InAs QDs 內部的 In segregation 影響所致，雖然此效應亦同時會造成 QDs 紅移，但由 PL 顯示最後結果呈現藍移來判斷， $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 的 high potential barrier 效應顯然大於紅移的效應。

從光性 PL 量測結果發現當我們在 DWELL 中間加入一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 後，

量子點的基態跟激發態之間的能量差從 78 變成 103meV；而電性量測更發現隨著 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度增加量子點基態到激發態的活化能越來越大，其值從 57.2 變成 95.6 meV。由於 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 形同 high potential barrier 造成 QDs 激發態藍移程度會大於基態；而 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 抑制了 InAs QDs 內部的 In segregation 造成 QDs 紅移又對基態影響比較大，所以任何其中一個效應或者綜合兩個效應均會使得 QDs 基態到激發態之間的能量差 ΔE_{ge} 變大。

我們也從光性及電性所得到的活化能差值推算出基態到激發態之間的能量差落在 C.B 與 V.B 上的比值；對於 DWELL 結構而言，ground state 到 excited state 之間的活化能在 C.B 與 V.B 上的比值為 7.3 : 2.7，sh331($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$)是 7.8 : 2.2，這兩個結果還算蠻接近的，但隨著覆蓋的 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度超過 10 \AA ，C.B 所佔的比例越來越大，我們猜測 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度可能也影響了 InAs QDs 的 g.s 到 e.s 之間的活化能在 C.B 與 V.B 之間的比例。

最後，我們不管從電性量測所得縱深分佈曲線圖，或者針對室溫 PL 圖比較峰值的半高寬，發現在 DWELL 結構中間覆蓋一層 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 後，QDs 的 uniformity 還是很好。

参考文献

- [1] D. L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O. B. Shchekin, and D. G. Deppe, "1.3 μm room-temperature GaAs-based quantum dot laser," *Appl. Phys. Lett.* 73, 2564 (1998)
- [2] Y. Arakawa and K. Sakaki, "Evanescent-light guiding of atoms through hollow optical fiber for optically controlled atomic deposition," *Appl. Phys. Lett.* 40, 939 (1982)
- [3] A. Stintz, G. T. Liu, H. Li, L. F. Lester and K. J. Malloy, "Low-Threshold Current Density 1.3- μm InAs Quantum-Dot Lasers with the Dots-in-a-Well(DWELL) Structure" *IEEE Photonics Technology Letters* 12 (6) (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, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov and D. Bimberg, "InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at 1.3 μm " *Appl. Phys. Lett.* 74, 2815 (1999).
- [5] A. R. Kovsh, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, S. S. Mikhlin, A. P. Vasil'ev, E. A. Semenova, Yu. M. Shernyakov, M. V. Maximov, D. A. Livshits, V. M. Ustinov, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, Zh. I. Alferov, "InAs/InGaAs/GaAs quantum dot lasers of 1.3 μm range with enhanced optical gain", *Journal of Crystal Growth* 251, 729 (2003)
- [6] J. X. Chen, A. Markus, A. Fiore, U. Oesterle, R. P. Stanley, J. F. Carlin, R. Houdre, and M. Illegems, "Tuning InAs/GaAs quantum dot properties under Stranski-Krastanov growth mode for 1.3 μm application," *Journal of Applied Physics.* 91, 6710 (2002)
- [7] Oleg B. Shchekin, 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)

- [8] H. Y. Liu and M. Hopkinson, "Tuning the structural and optical properties of 1.3- μm InAs/GaAs quantum dots by a combined InAlAs and GaAs strained buffer layer," *Appl. Phys. Lett.* 82, 3644 (2003)
- [9] Gyoungwon Park, Oleg B. Shchekin, and Dennis G. Deppe, "Discrete energy level separation and the threshold temperature dependence of quantum dot lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* 36, 1065 (2000)
- [10] Jin Soo Kim and Phil Won Yu, "Effects of high potential barrier on InAs quantum dots and wetting layer," *J. Appl. Phys.* 91, 5055 (2002)
- [11] M. Arzberger, U. Kasberger, G. BoHm, and G. Abstreiter, "Influence of a thin AlAs cap layer on optical properties of self-assembled InAs/GaAs quantum dots," *Appl. Phys. Lett.* 75, 3968 (1999)
- [12] R. Jia, D.S. Jiang, H.Y. Liu, Y.Q. Wei, B. Xu, Z.G. Wang, "Influence of combined InAlAs and InGaAs strain-reducing laser on luminescence properties of InAs/GaAs quantum dots," *J. Crystal Growth* 234, 354 (2002)
- [13] Y.Q. Wei, Z.Y. Zhang, Z.G. Wang, S.M. Wang, Q.X. Zhao, X.D. Wang, A. Larsson, "Photoluminescence comparison of InAs quantum dots with different capping," *IEEE*, 168 (2003)
- [14] 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)
- [15] Y.Q. Wei, S.M. Wang, F. Ferdos, J. Vukusic, and A. Larsson, "Large ground-to-first-excited-state transition energy separation for InAs quantum dots emitting at 1.3 μm ," *Appl. Phys. Lett.* 81, 1621 (2002)
- [16] U. Woggon, "Electron microscopic and optical investigations of the indium distribution in GaAs capped $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ islands," *Appl. Phys. Lett.* 71, 377 (1997)
- [17] O. Brandt, L. Tapfer, and K. ploog, "Effect of In segregation on the structural and optical properties of ultrathin InAs films in GaAs,"

- Appl. Phys. Lett. 61, 2814 (1992)
- [18] M. Schowalter, A. Rosenauer, and D. Gerthsen, "Investigation of In segregation in InAs/AlAs quantum-well structures," Appl. Phys. Lett. 79, 4426 (2001)
- [19] Naoto Horiguchi, Toshiro Futatsugi, Yoshiaki Nakata and Naoki Yokoyama, "Dynamics Properties of InAs Self-Assembled Quantum Dots Evaluated by Capacitance-Voltage Measurements", Jpn. J. Appl. Phys. 36, L1246-L1249 (1997).
- [20] P. Krispin, J.-L. Lazzari, and H. Kostial, "Deep and shallow electronic states at ultrathin InAs insertions in GaAs investigated by capacitance spectroscopy," J. Appl. Phys. 84, 6135 (1998)
- [21] W.-H. Chang, W. Y. Chen, M. C. Cheng, C. Y. Lai, and T. M. Hsu, "Charging of embedded InAs self-assembled quantum dots by space-charge techniques", Phys. Rev. B64, 125315 (2001).
- [22] 陳乃權 交通大學電子物理所博士論文 "分子束磊晶低溫成長砷化鎵電性量測分析" (1998)
- [23] G. Vicent, D. Bois and P. Pinard, J. Appl. Phys. 46, 5173(1975)
- [24] M. Grundmann, O. Stier, and D. Bimberg, "InAs/GaAs pyramidal quantum dots: Strain distribution, optical phonons, and electronic structure", Phys. Rev. B. 52, 11969 (1995).
- [25] 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.
- [26] C. M. A. Kapteyn, F. Heinrichsdorff, O. Stier, R. Heitz, M. Grundmann, "Electron escape from InAs quantum dots," Phys. Rev. B. 60, 14265 (1995)
- [27] J. Ibanez, R. Leon, and D. T. Vu, "Tunneling carrier escape from InAs self-assembled quantum dots," Appl. Phys. Lett. 79, 2013 (2001)
- [28] D. V. Lang, J. Appl. Phys. 45, 3023(1974)
- [29] C. Walther, J. Bollmann, H. Kirmse, W. Neumann, and W. T. Masselink,

“Characterization of electron trap states due to InAs quantum dots in GaAs,” Appl. Phys. Lett. 76, 2916 (2000).

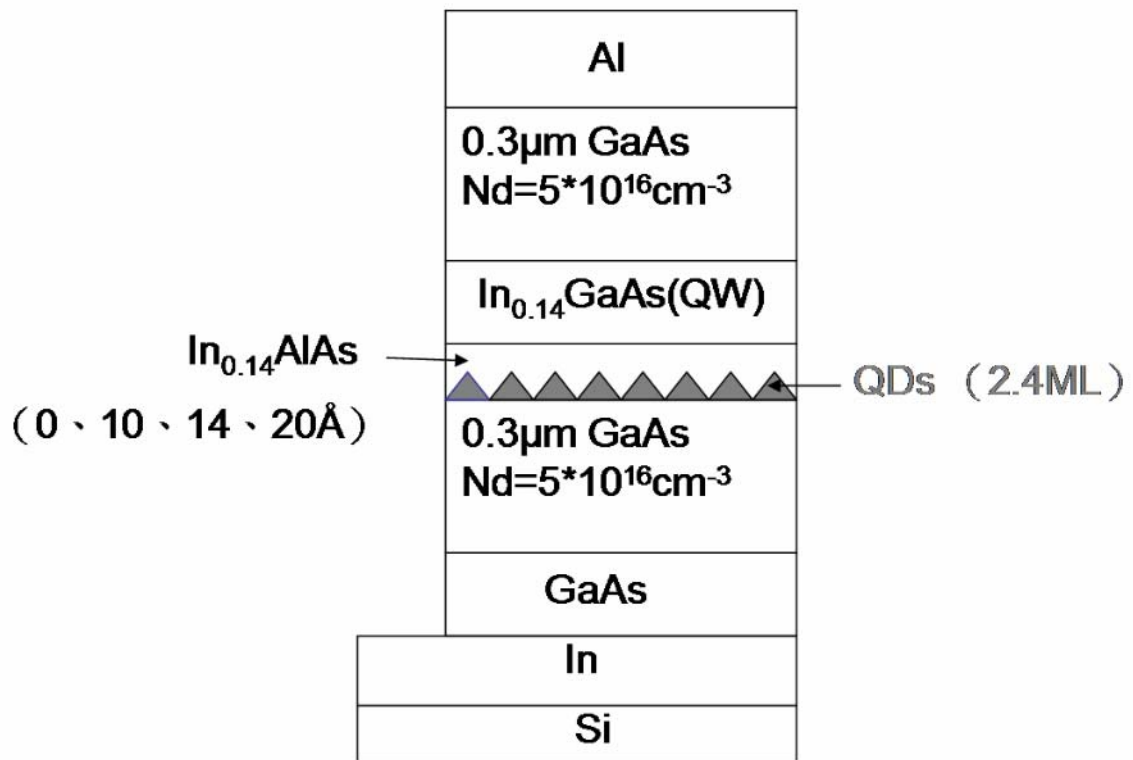
- [30] P. N. Brounkov, A. Polimeni, S. T. Stoddart, M. Henini, L. Eaves, and P. C. Main, “Electronic structure of self-assembled InAs quantum dots in GaAs matrix”, Appl. Phys. Lett. 73, 1092 (1998).
- [31] C. M. A. Kapteyn, M. Lion, R. Heitz, and D. Bimberg, “Hole and electron emission from InAs quantum dots”, Appl. Phys. Lett. 76, 1573 (2000).



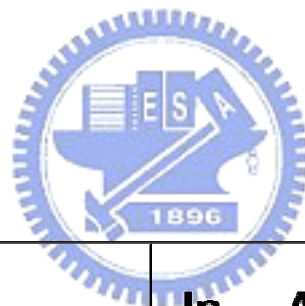
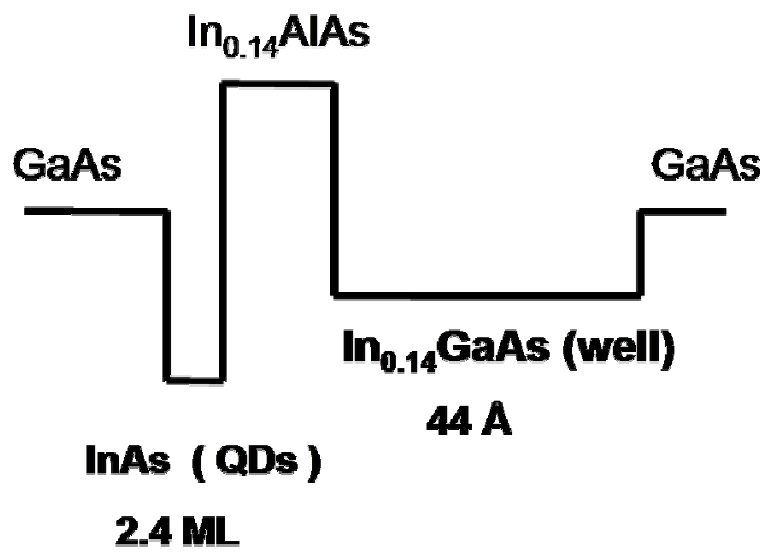
圖目錄

圖[2.1]	樣品結構圖	30
圖[2.2]	樣品能帶圖	31
圖[3.1]	(a) 四片樣品 PL 圖	32
	(b) PL peak position 與 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度關係圖	32
圖[3.2]	$\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度與 ΔE_{gc} 關係圖	33
圖[3.3]	$\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度與基態和激發態半高寬關係圖	33
圖[3.4]	(a) sh332($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0 \text{ \AA}$) 功率 90mW 變溫 PL 圖	34
	(b) sh331($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$) 功率 90mW 變溫 PL 圖	34
	(c) sh330($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=14 \text{ \AA}$) 功率 90mW 變溫 PL 圖	35
	(d) sh337($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20 \text{ \AA}$) 功率 90mW 變溫 PL 圖	35
圖[4.1]	室溫下四片樣品電流-電壓曲線圖	36
圖[4.2]	(a) 室溫下頻率 1MHz 四片樣品電容-電壓曲線圖	37
	(b) 室溫下頻率 1MHz 四片樣品縱深分佈曲線圖	37
圖[4.3]	sh332($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0 \text{ \AA}$) 室溫變頻縱深分佈曲線圖	38
圖[4.4]	sh331($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$) 室溫變頻縱深分佈曲線圖	38
圖[4.5]	sh330($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=14 \text{ \AA}$) 室溫變頻縱深分佈曲線圖	39
圖[4.6]	sh337($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20 \text{ \AA}$) 室溫變頻縱深分佈曲線圖	39
圖[4.7]	(a) sh332($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0 \text{ \AA}$) 頻率 1MHz 變溫電容-電壓曲線圖	40
	(b) sh332($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0 \text{ \AA}$) 頻率 1MHz 變溫縱深分佈曲線圖	40
圖[4.8]	sh331($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$) 頻率 10KHz 變溫縱深分佈曲線圖	41
圖[4.9]	(a) sh330($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=14 \text{ \AA}$) 頻率 10KHz 變溫電容-電壓曲線圖	42
	(b) sh330($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=14 \text{ \AA}$) 頻率 10KHz 變溫縱深分佈曲線圖	42
圖[4.10]	(a) sh337($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20 \text{ \AA}$) 頻率 10KHz 變溫電容-電壓曲線圖	43
	(b) sh337($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20 \text{ \AA}$) 頻率 10KHz 變溫縱深分佈曲線圖	43
圖[4.11]	(a) sh332($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0 \text{ \AA}$) 溫度 80K 變頻電容-電壓曲線圖	44
	(b) sh332($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0 \text{ \AA}$) 溫度 80K 變頻縱深分佈曲線圖	44

圖[4.12]	(a) sh331($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻電容-電壓曲線圖	45
	(b) sh331($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻縱深分佈曲線圖	45
圖[4.13]	(a) sh330($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=14 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻電容-電壓曲線圖	46
	(b) sh330($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=14 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻縱深分佈曲線圖	46
圖[4.14]	(a) sh337($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻電容-電壓曲線圖	47
	(b) sh337($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻縱深分佈曲線圖	47
圖[4.15]	電容/電導對頻率關係圖	48
圖[4.16]	(a)sh332($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=0 \text{ \AA}$) G-T 圖	49
	(b)sh331($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=10 \text{ \AA}$) G-T 圖	49
	(c)sh330($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=14 \text{ \AA}$) G-T 圖	50
	(d)sh337($d_{\text{In}_{0.14}\text{AlAs}}=20 \text{ \AA}$) G-T 圖	50
圖[4.17]	(a)由 G-T 換算成 Arrhenius plot	51
	(b)四片樣品 Arrhenius plot	51
圖[4.18]	載子躍遷示意圖	52
圖[4.19]	四片樣品 DLTS	53
圖[4.20]	$\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度與活化能關係圖	54
圖[4.21]	比較四片樣品低溫低頻縱深分佈曲線圖	55
圖[4.22]	(a)DWELL 結構 TEM 平面圖	56
	(b) sh331(10 \AA $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$) 結構 AFM 圖	56

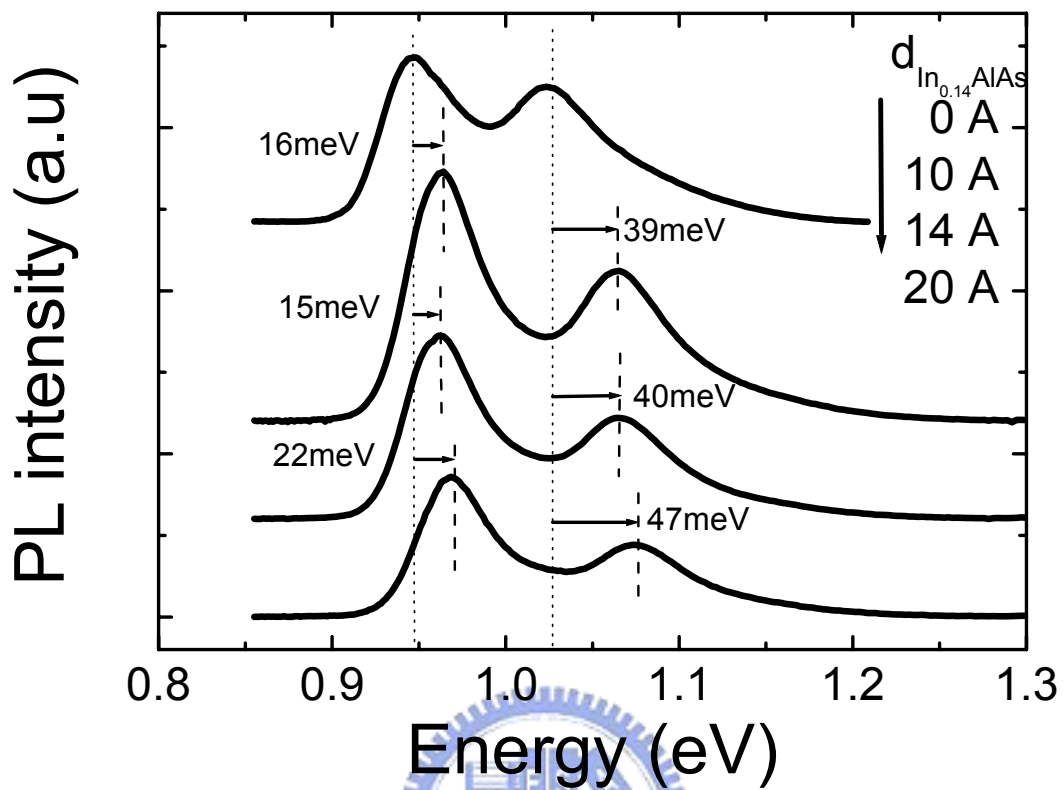


圖[2.1] 樣品結構圖

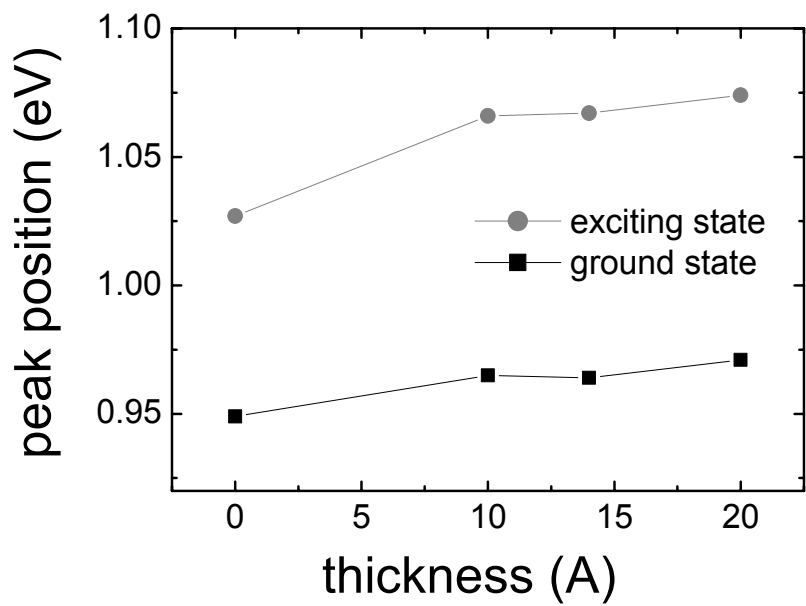


	$\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$
sh332	0 Å
sh331	10 Å
sh330	14 Å
sh337	20 Å

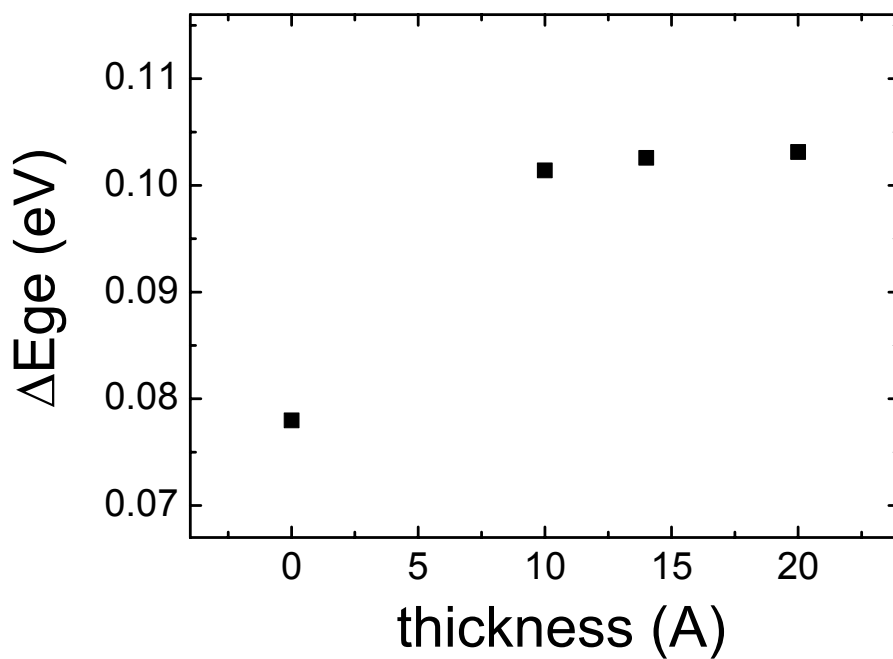
圖[2.2] 樣品能帶圖



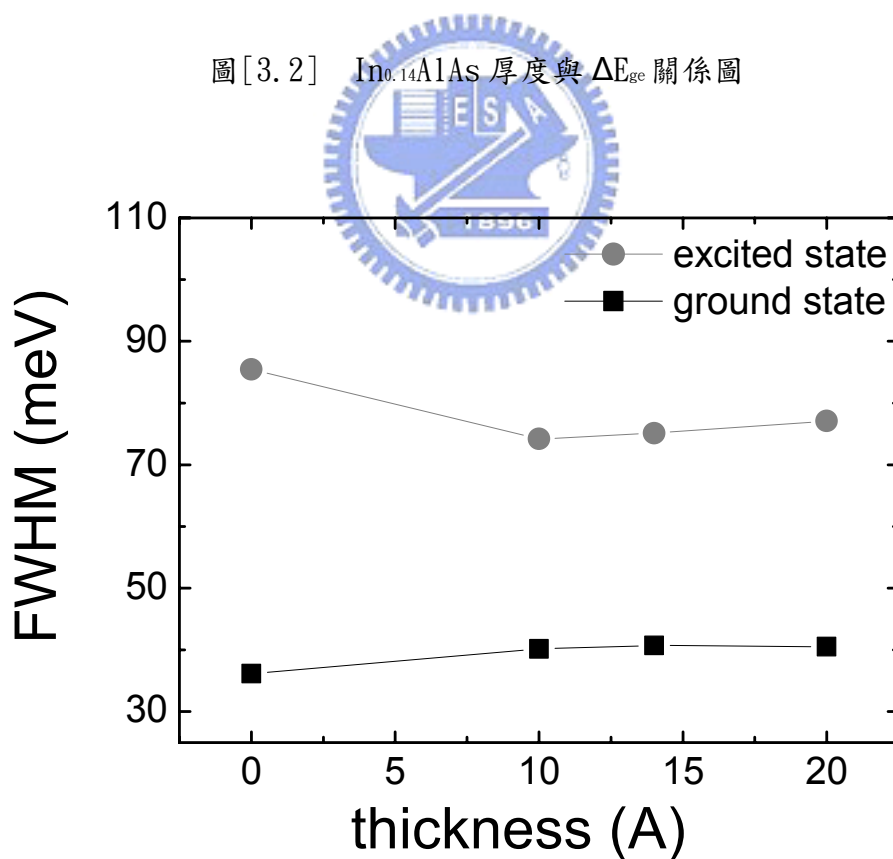
圖[3.1(a)] 四片樣品 PL 圖



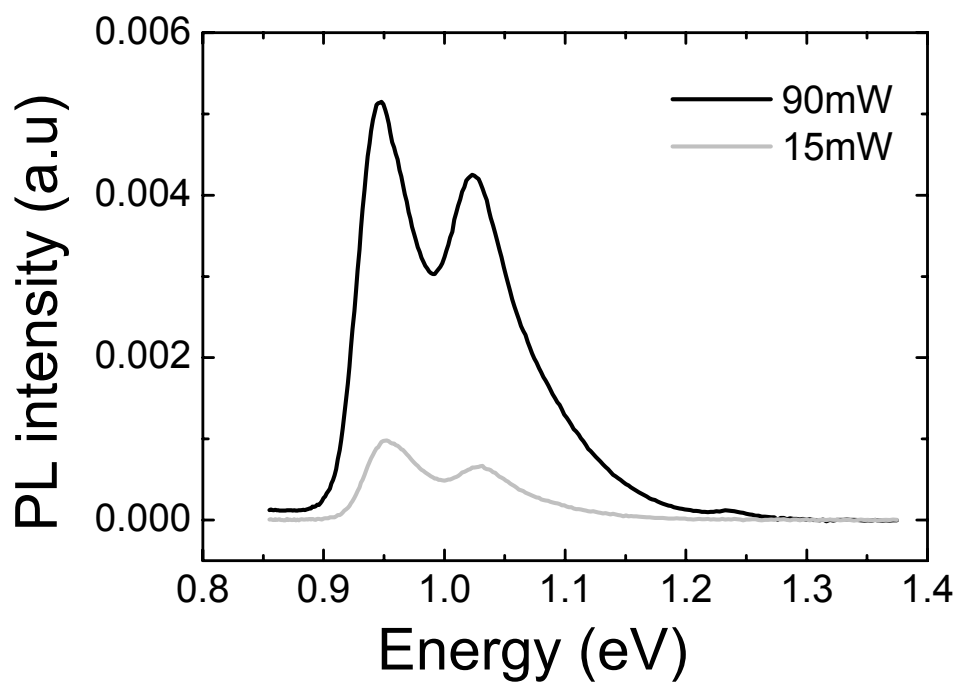
圖[3.1(b)] PL peak position 與 $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度關係圖



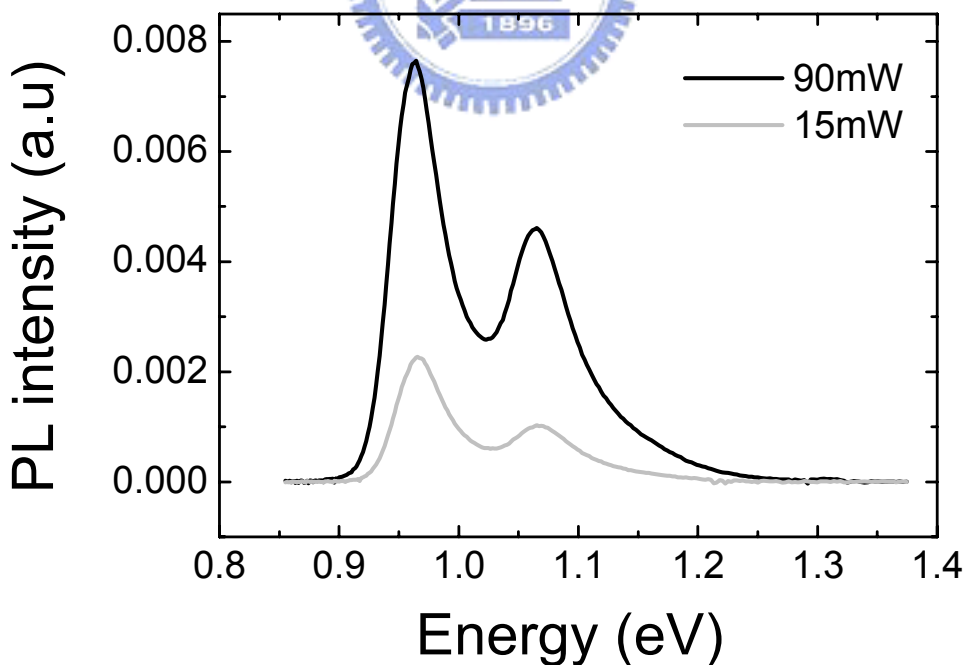
圖[3.2] $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度與 ΔE_{ge} 關係圖



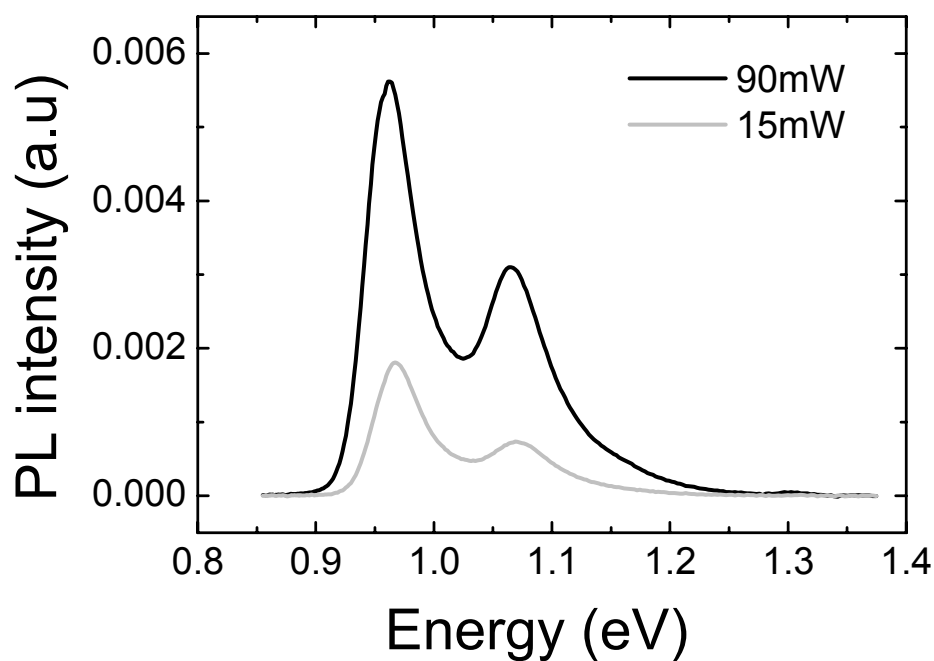
圖[3.3] $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度與基態和激發態半高寬關係圖



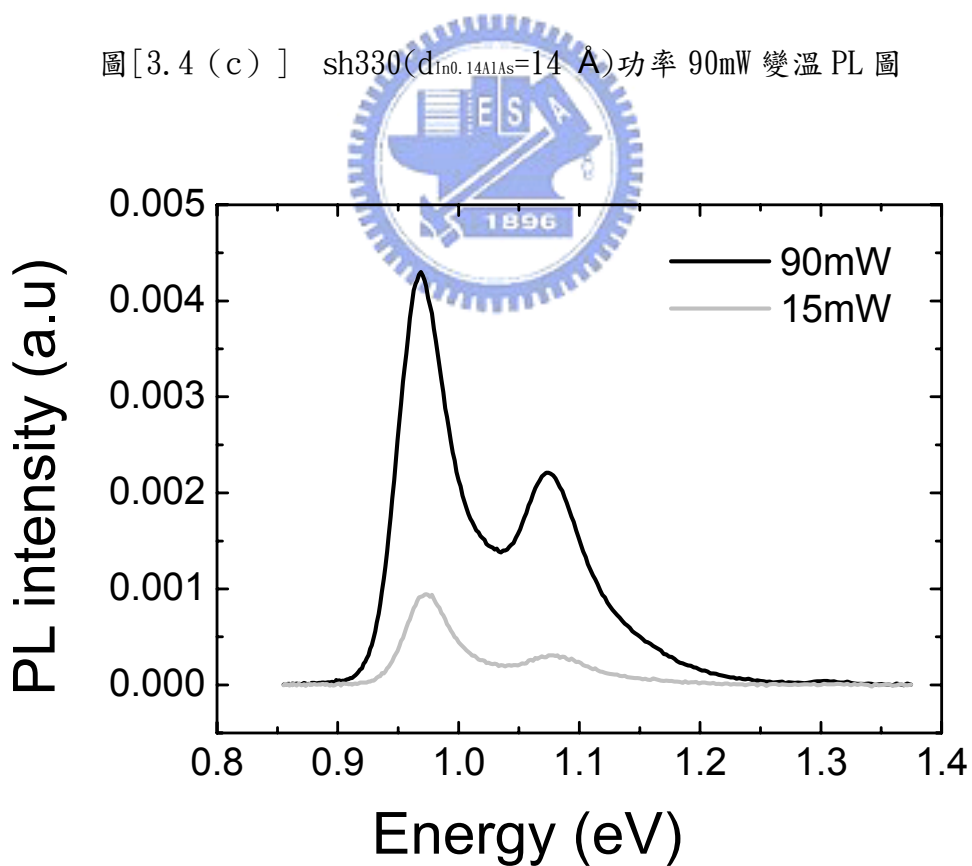
圖[3.4 (a)] sh332($d_{\text{In0.14AlAs}}=0 \text{ \AA}$)功率 90mW 變溫 PL 圖



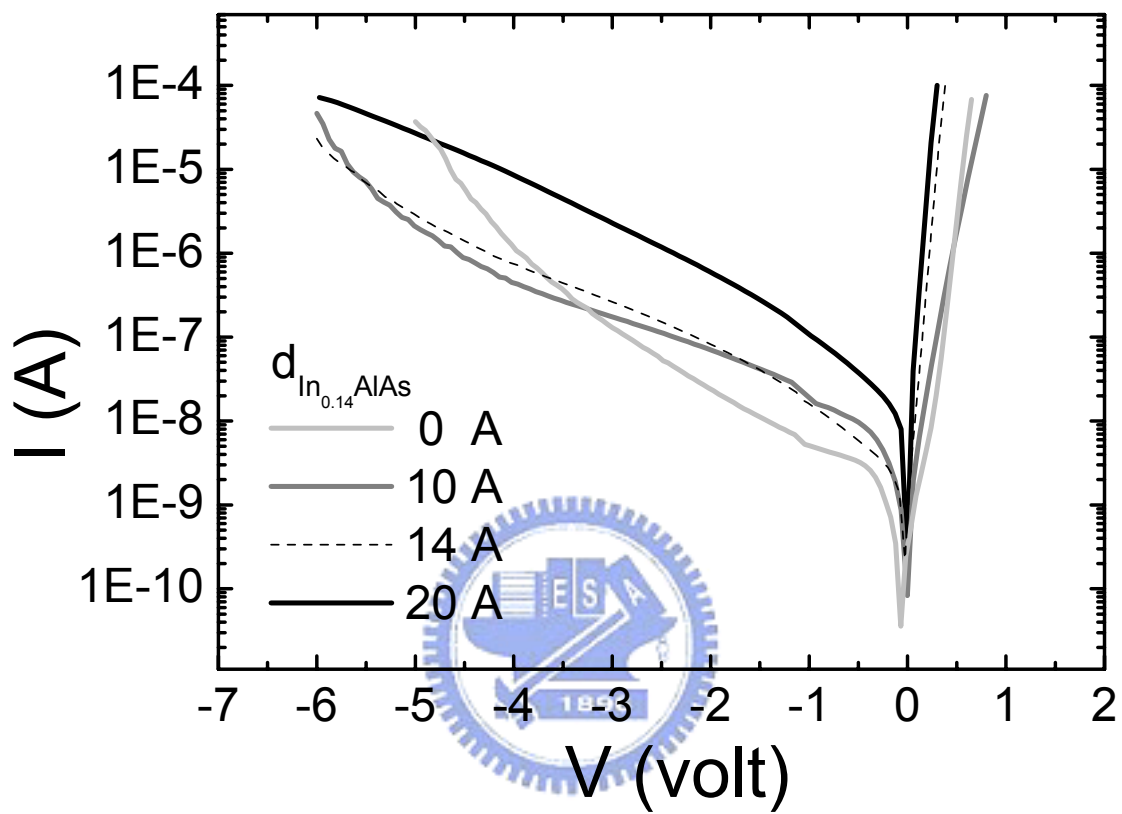
圖[3.4 (b)] sh331($d_{\text{In0.14AlAs}}=10 \text{ \AA}$)功率 90mW 變溫 PL 圖



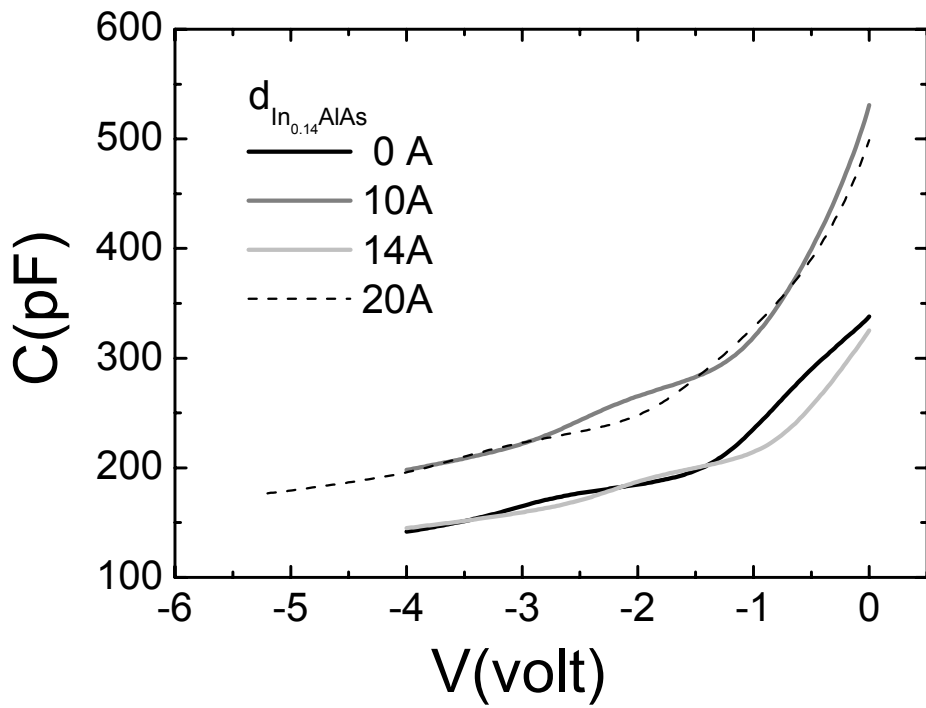
圖[3.4 (c)] sh330($d_{\text{In0.14AlAs}} = 14 \text{ \AA}$) 功率 90mW 變溫 PL 圖



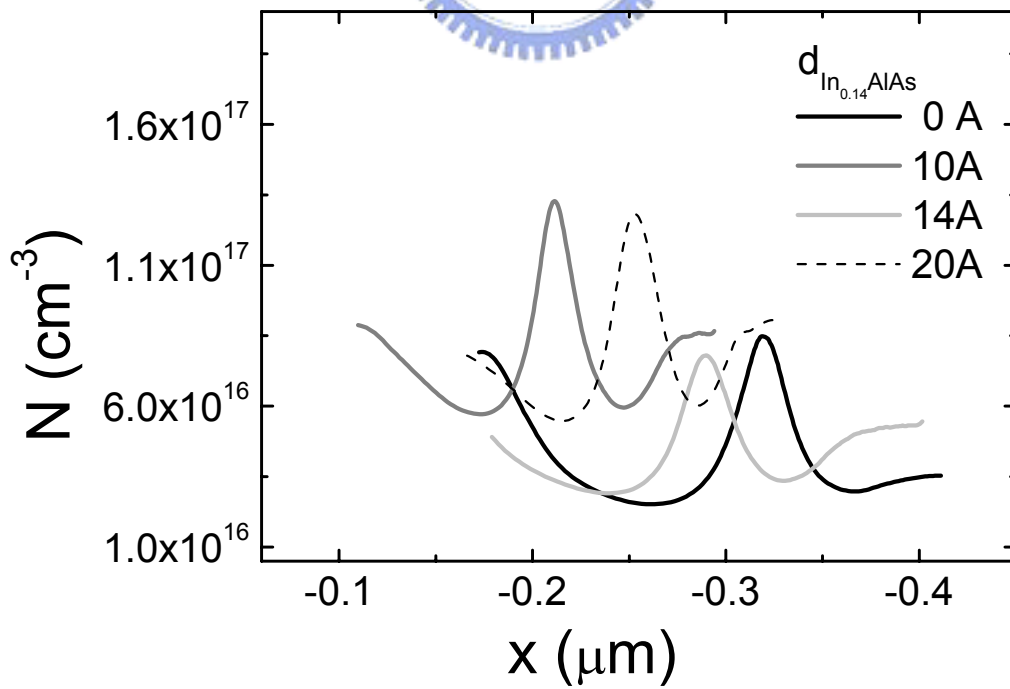
圖[3.4 (d)] sh337($d_{\text{In0.14AlAs}} = 20 \text{ \AA}$) 功率 90mW 變溫 PL 圖



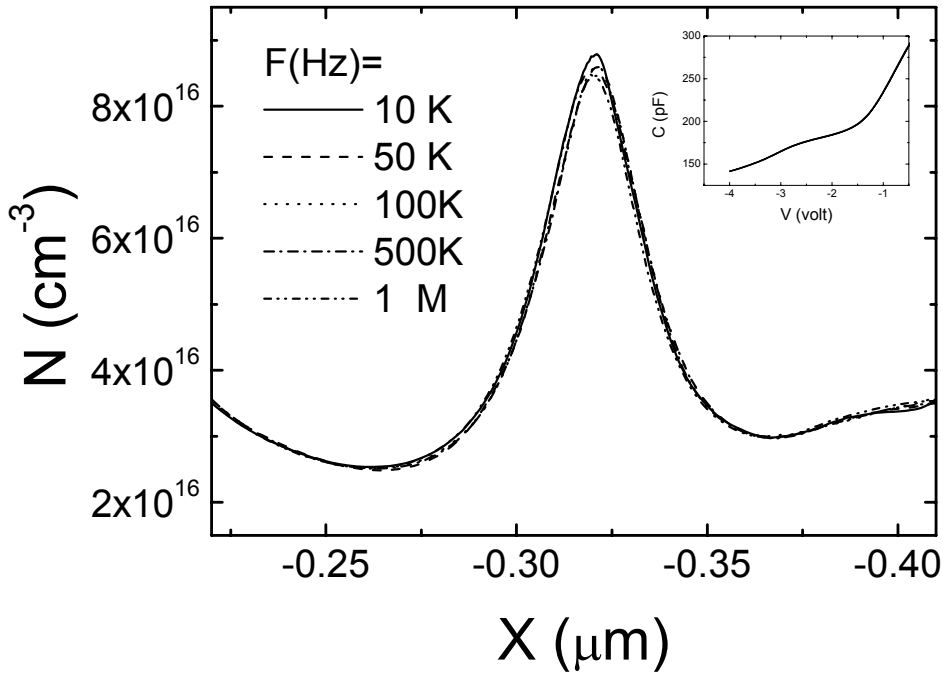
圖[4.1]室溫下四片樣品電流-電壓曲線圖



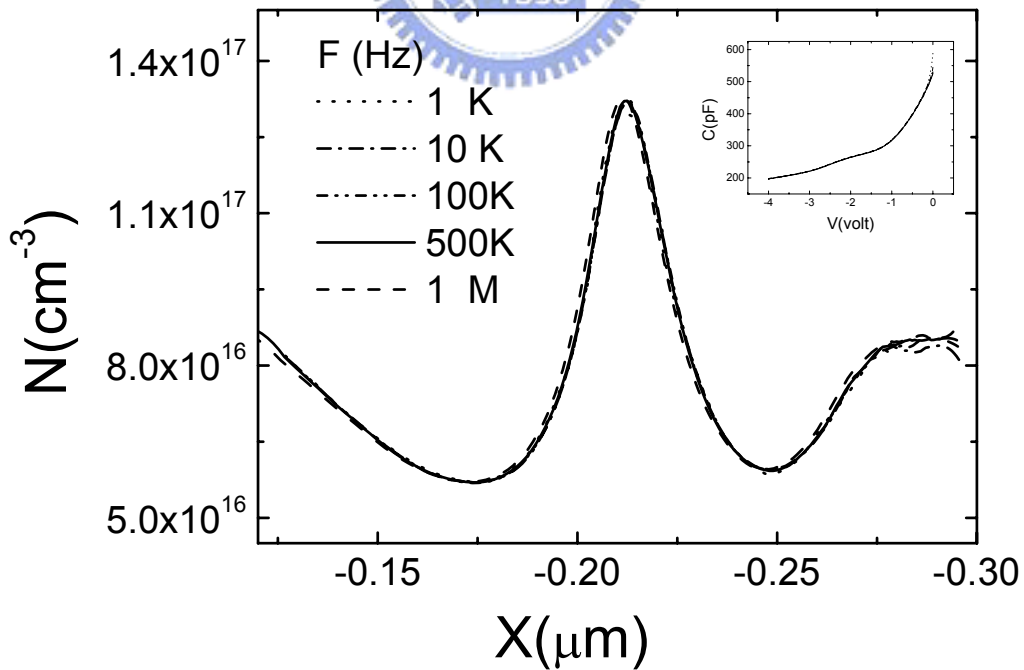
圖[4.2(a)] 室溫下頻率 1MHz 四片樣品電容-電壓曲線圖



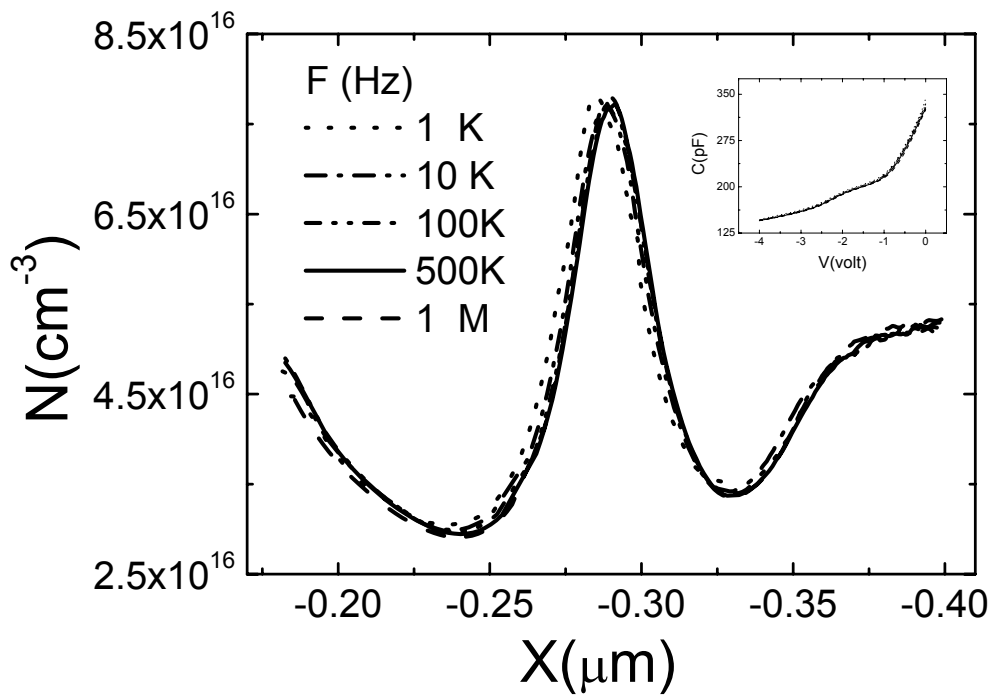
圖[4.2(b)] 室溫下頻率 1MHz 四片樣品縱深分佈曲線圖



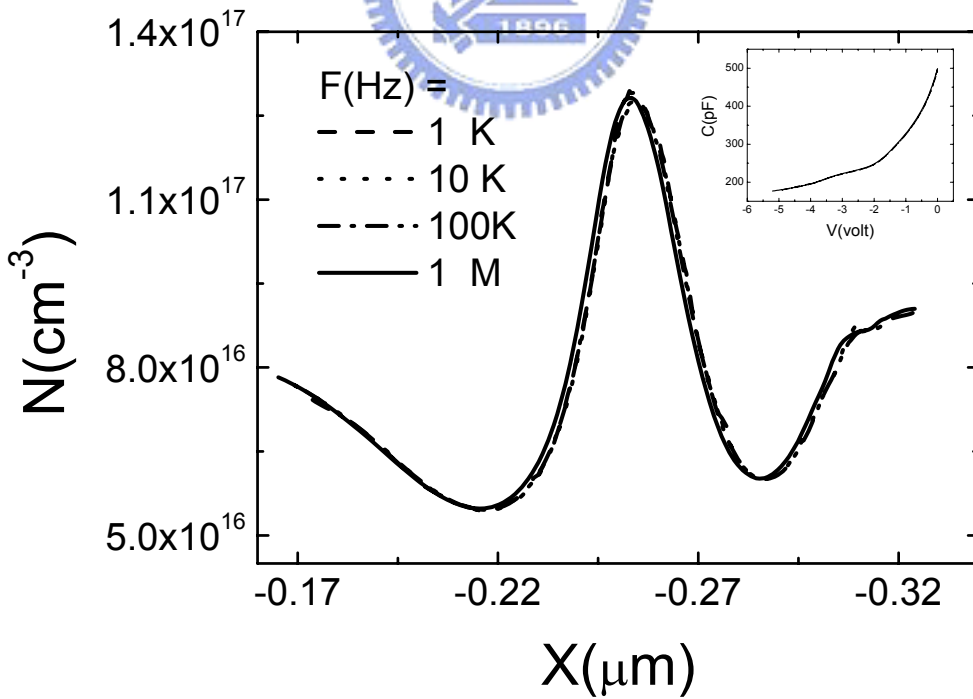
圖[4.3] sh332($d_{In0.14AlAs}=0 \text{ \AA}$)室溫變頻縱深分佈曲線圖



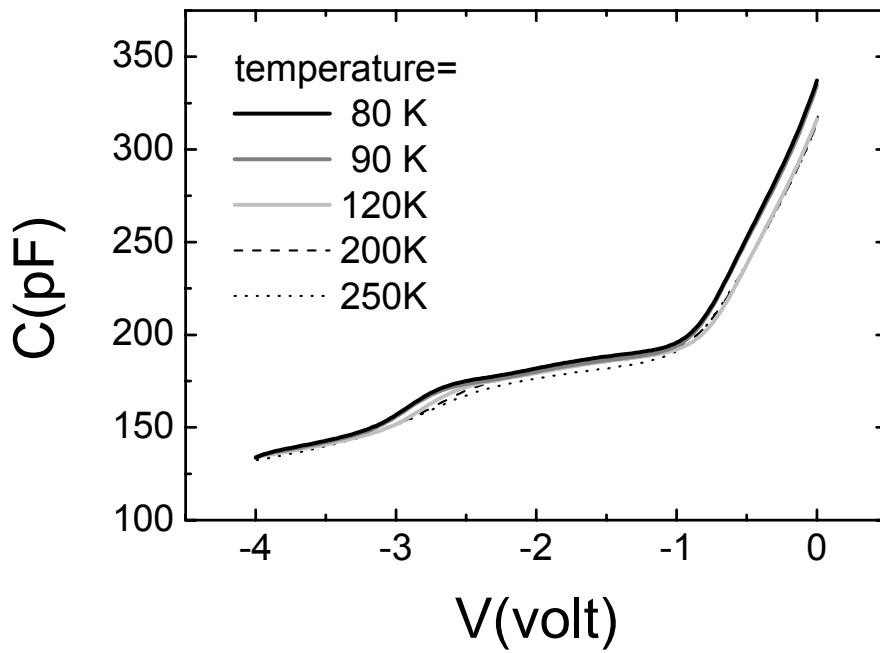
圖[4.4] sh331($d_{In0.14AlAs}=10 \text{ \AA}$)室溫變頻縱深分佈曲線圖



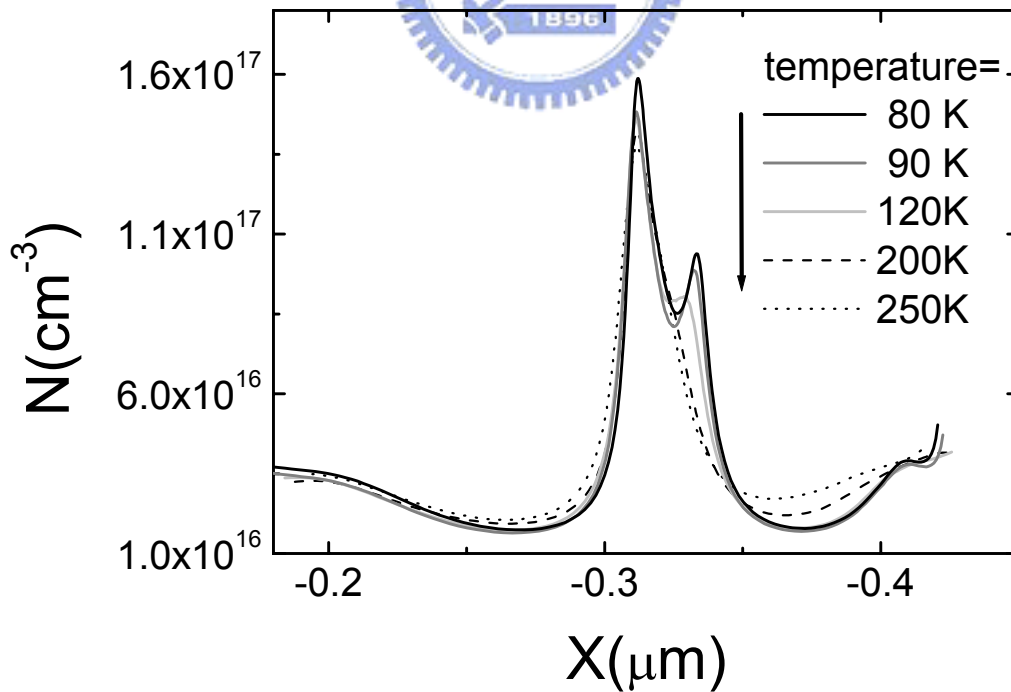
圖[4.5] sh330($d_{In0.14AlAs}=14 \text{ \AA}$)室溫變頻縱深分佈曲線圖



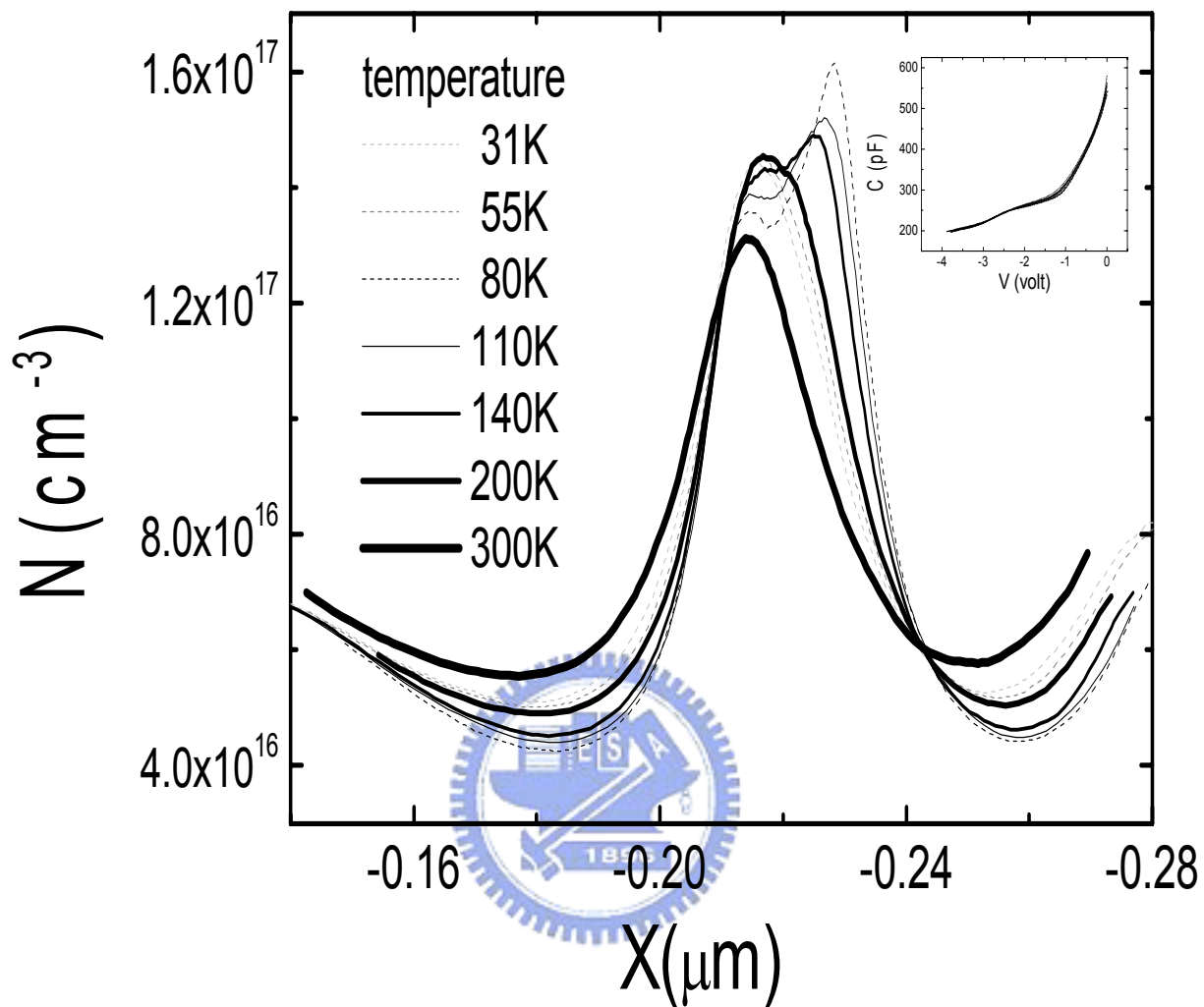
圖[4.6] sh337($d_{In0.14AlAs}=20 \text{ \AA}$)室溫變頻縱深分佈曲線圖



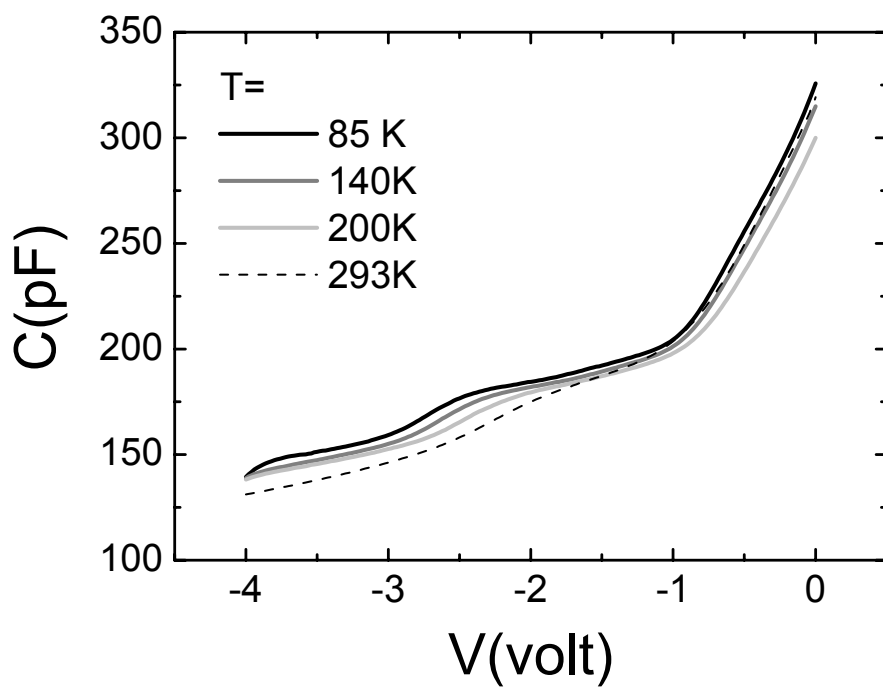
圖[4.7(a)] sh332($d_{In0.14AlAs}=0 \text{ \AA}$)頻率 1MHz 變溫電容-電壓曲線圖



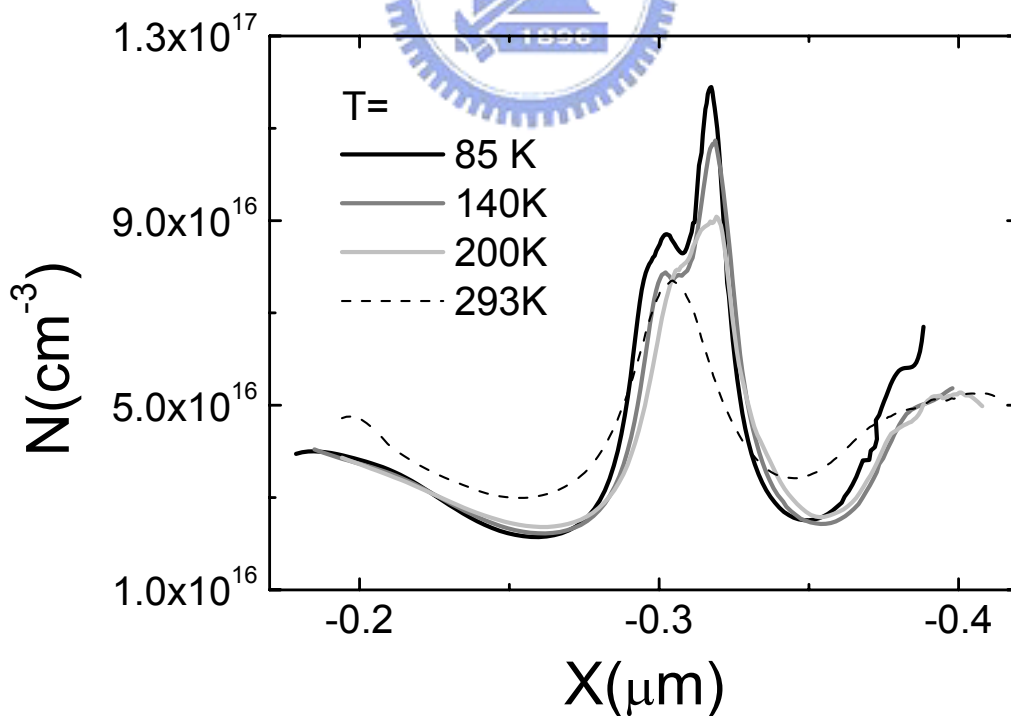
圖[4.7(b)] sh332($d_{In0.14AlAs}=0 \text{ \AA}$)頻率 1MHz 變溫縱深分佈曲線圖



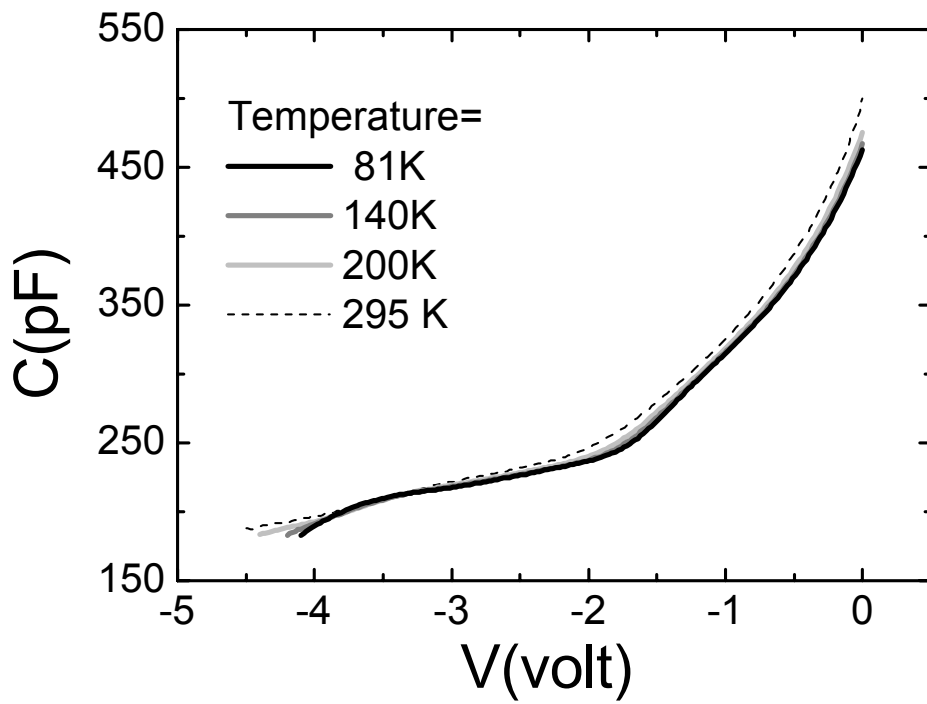
圖[4.8] sh331($d_{\text{In0.14AlAs}}=10 \text{ \AA}$)頻率 10KHz 變溫縱深分佈曲線圖



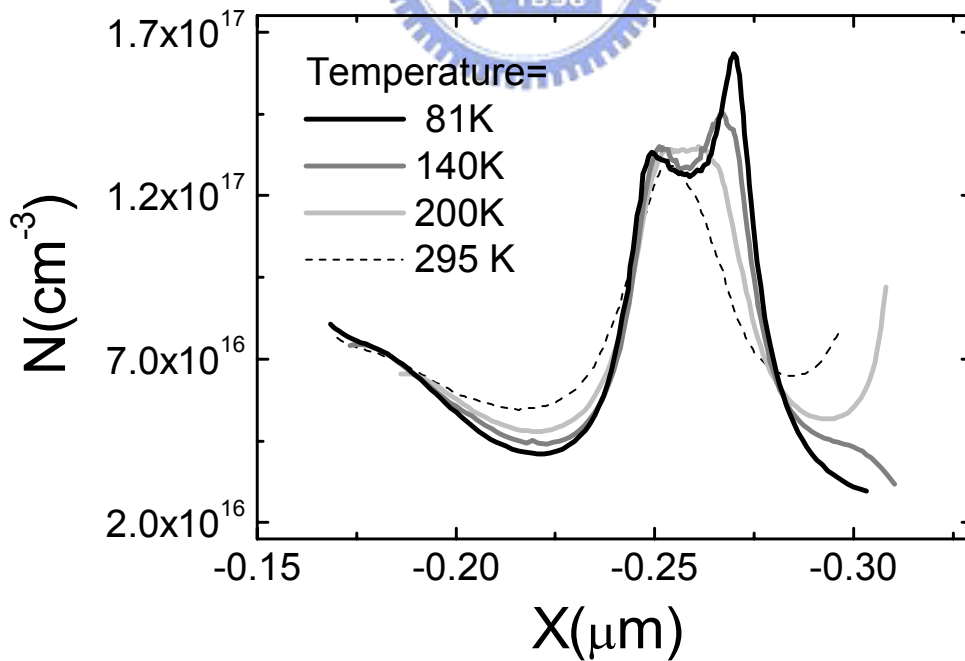
圖[4.9(a)] sh330($d_{In0.14AlAs}=14 \text{ \AA}$)頻率 10KHz 變溫電容-電壓曲線圖



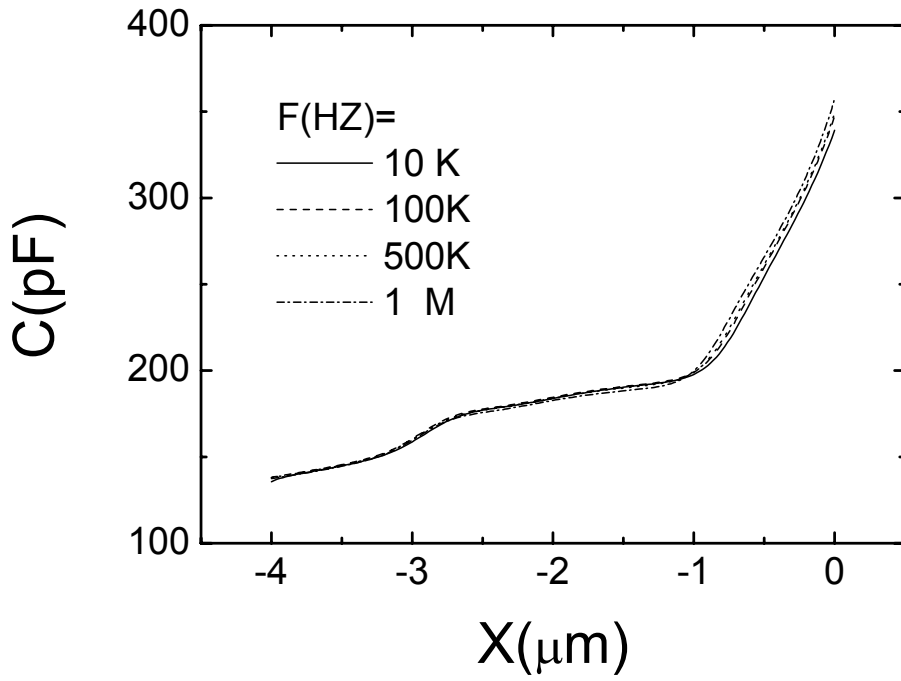
圖[4.9(b)] sh330($d_{In0.14AlAs}=14 \text{ \AA}$)頻率 10KHz 變溫縱深分佈曲線圖



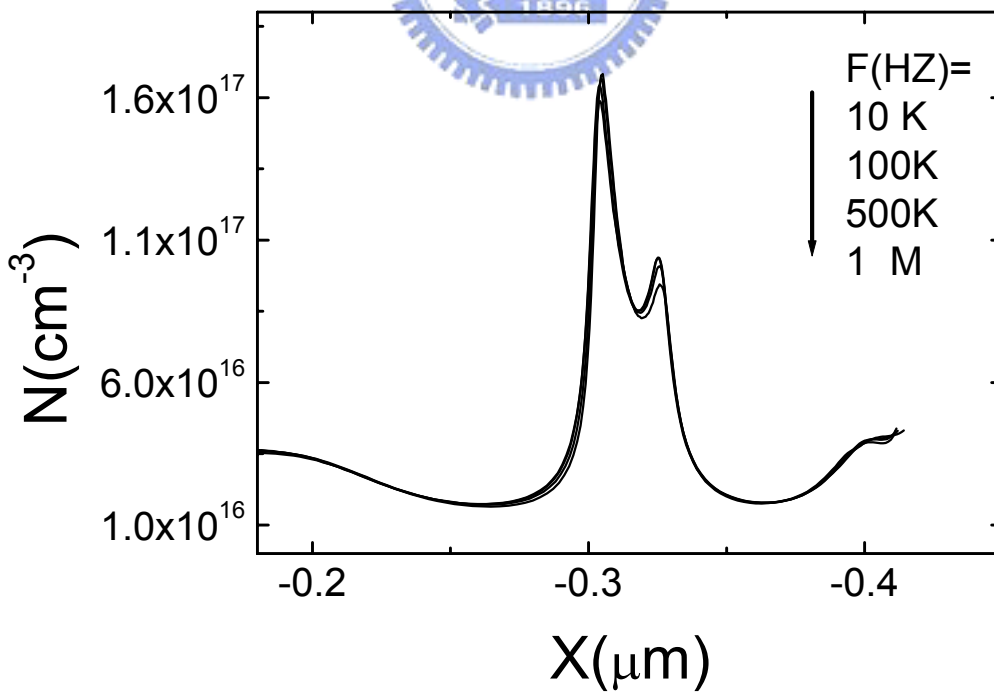
圖[4.10(a)] sh337($d_{In0.14AlAs}=20 \text{ \AA}$)頻率 10KHz 變溫電容-電壓曲線圖



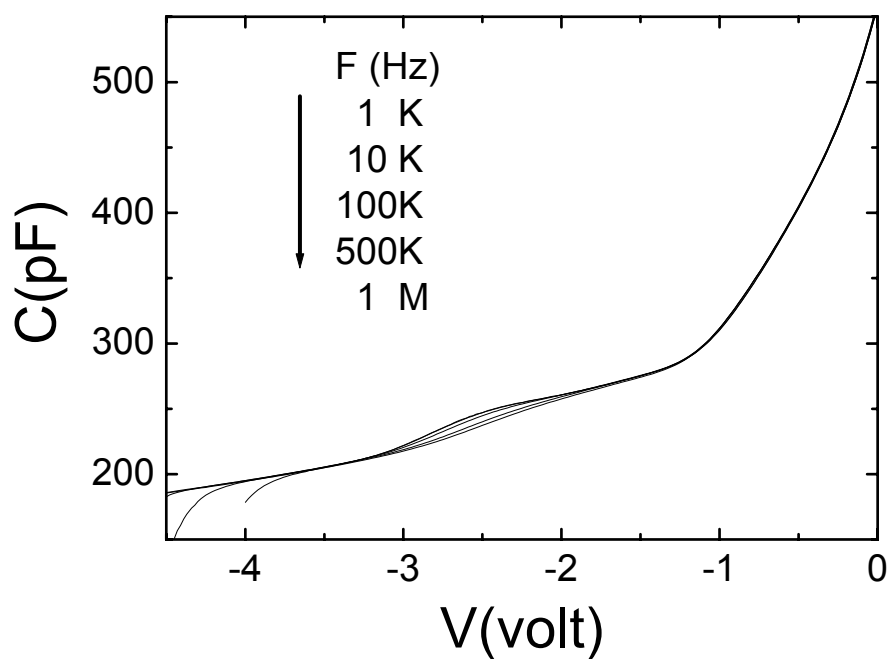
圖[4.10(b)] sh337($d_{In0.14AlAs}=20 \text{ \AA}$)頻率 10KHz 變溫縱深分佈曲線圖



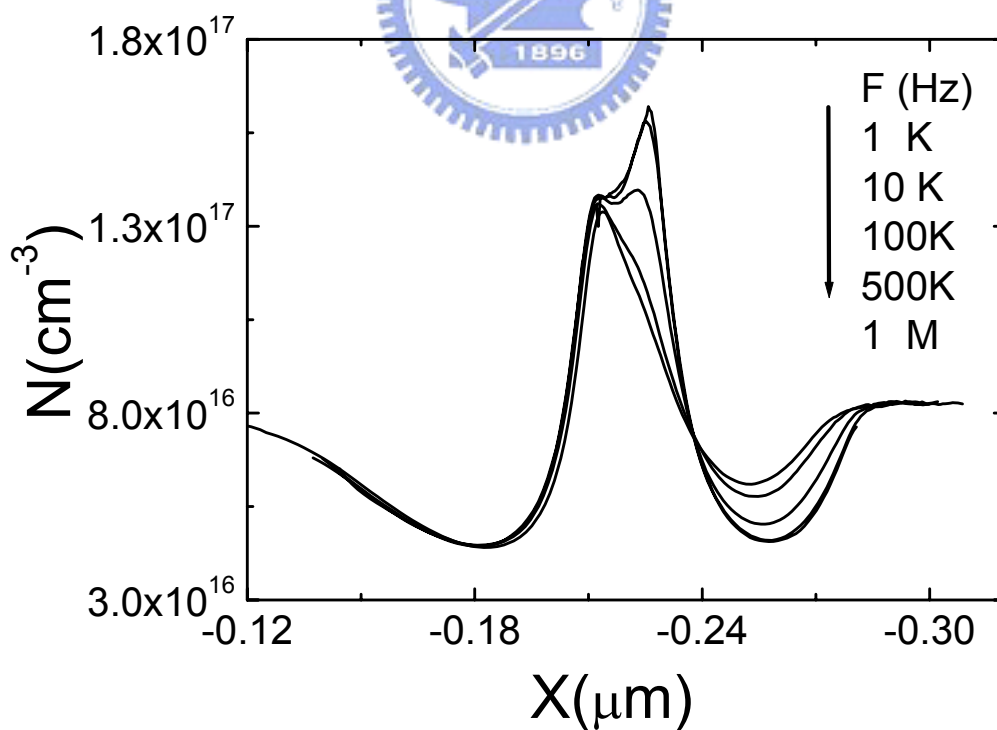
圖[4.11(a)] sh332($d_{In0.14AlAs}=0 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻電容-電壓曲線圖



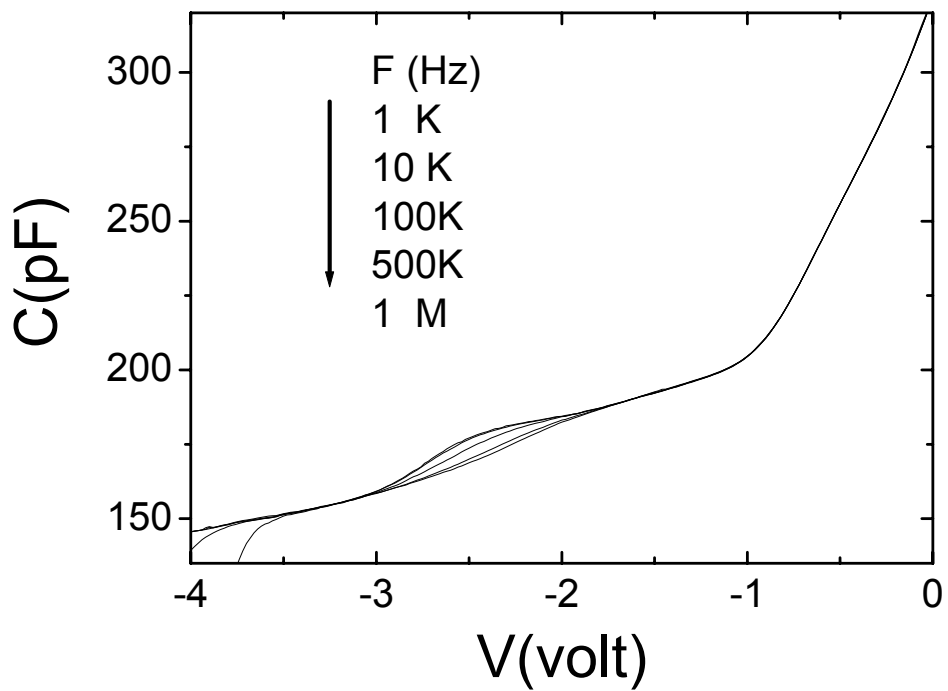
圖[4.11(b)] sh332($d_{In0.14AlAs}=0 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻縱深分佈曲線圖



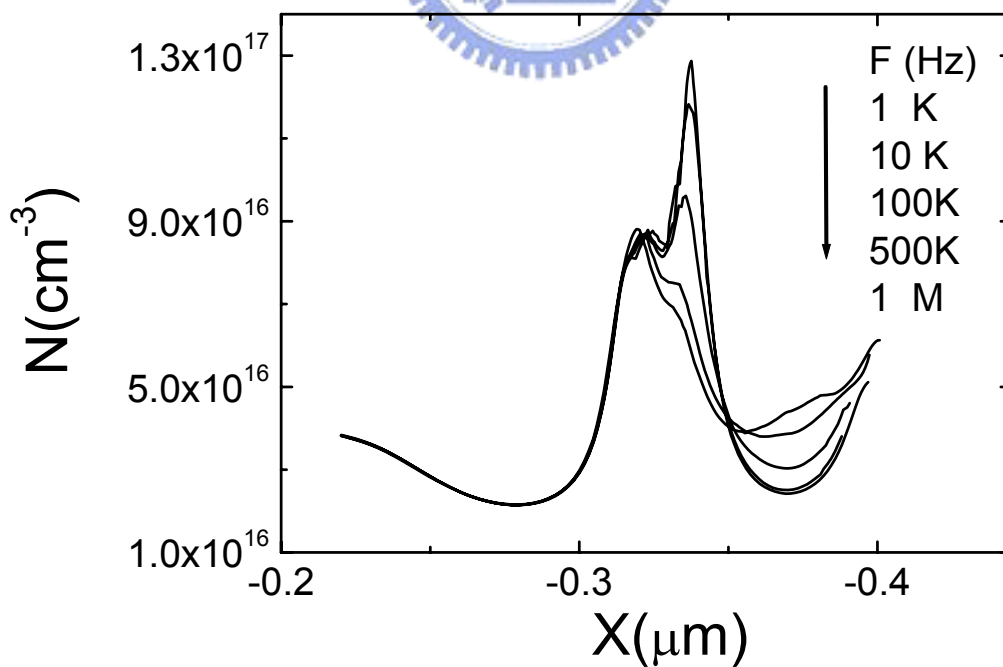
圖[4.12(a)] sh331($d_{In0.44AlAs}=10 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻電容-電壓曲線圖



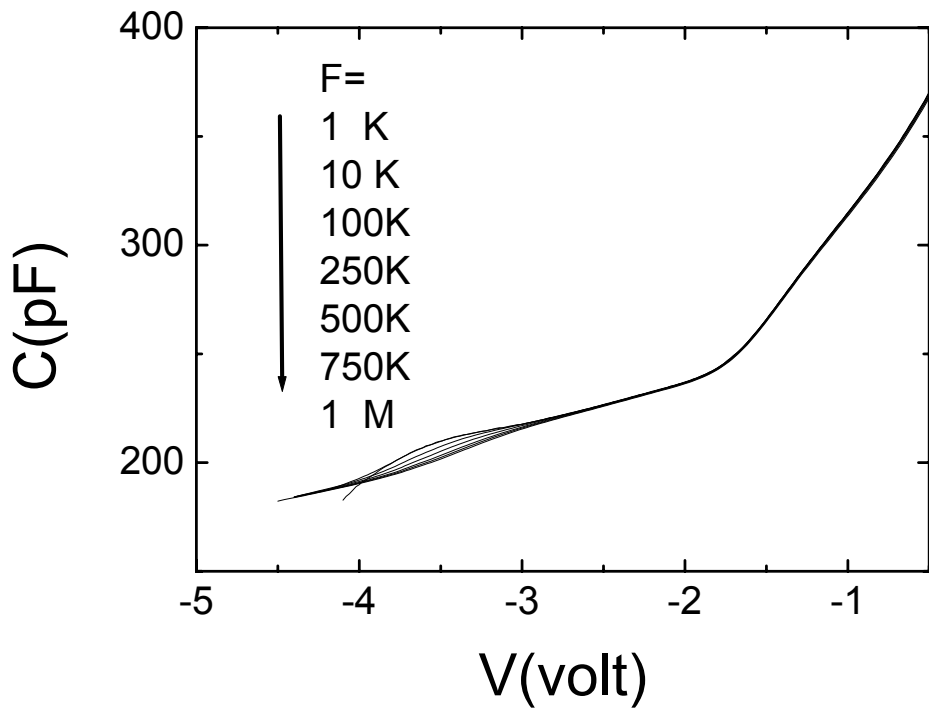
圖[4.12(b)] sh331($d_{In0.44AlAs}=10 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻縱深分佈曲線圖



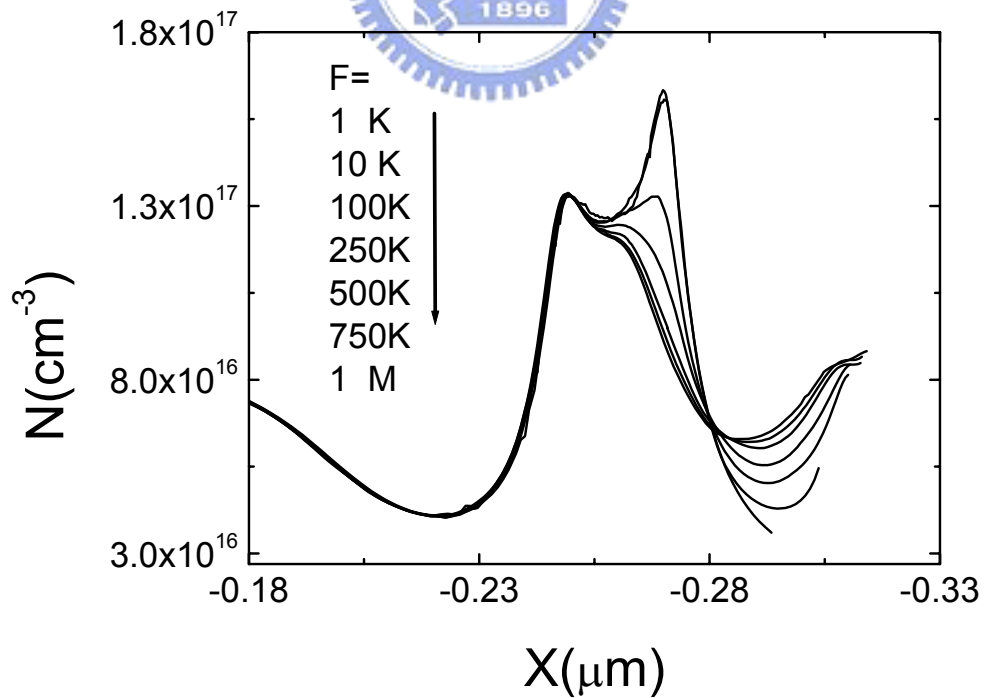
圖[4.13(a)] sh330($d_{In0.14AlAs}=14 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻電容-電壓曲線圖



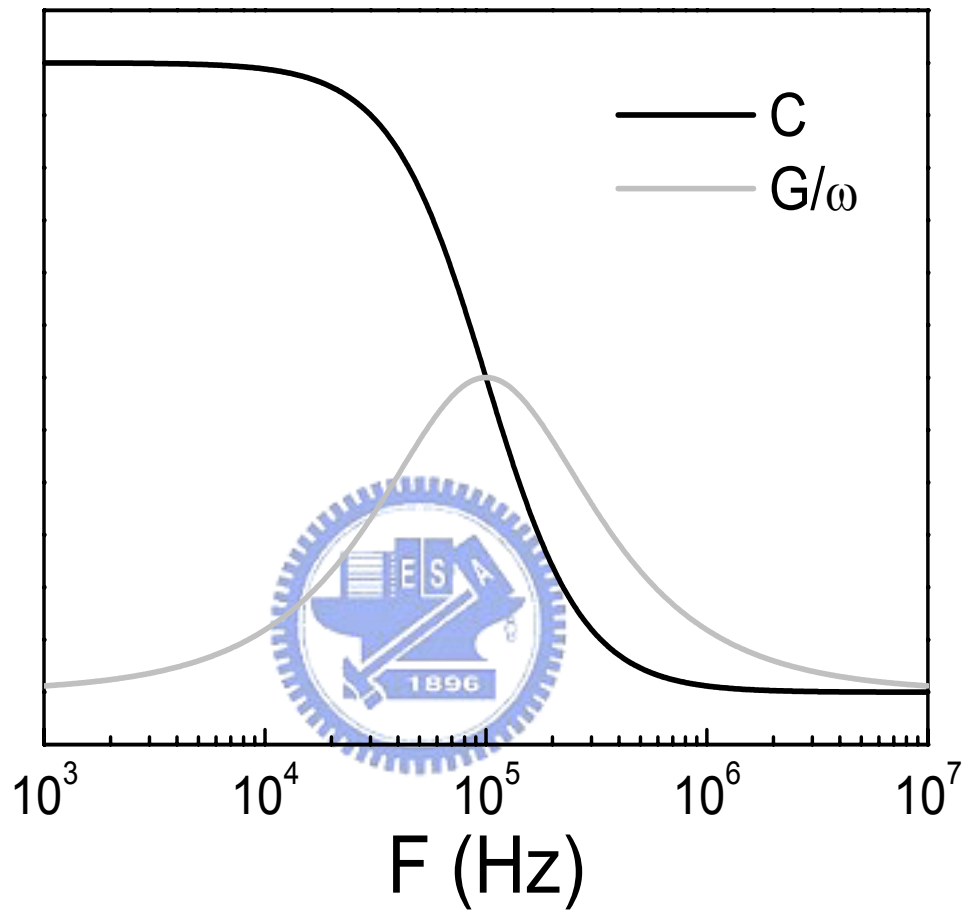
圖[4.13(b)] sh330($d_{In0.14AlAs}=14 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻縱深分佈曲線圖



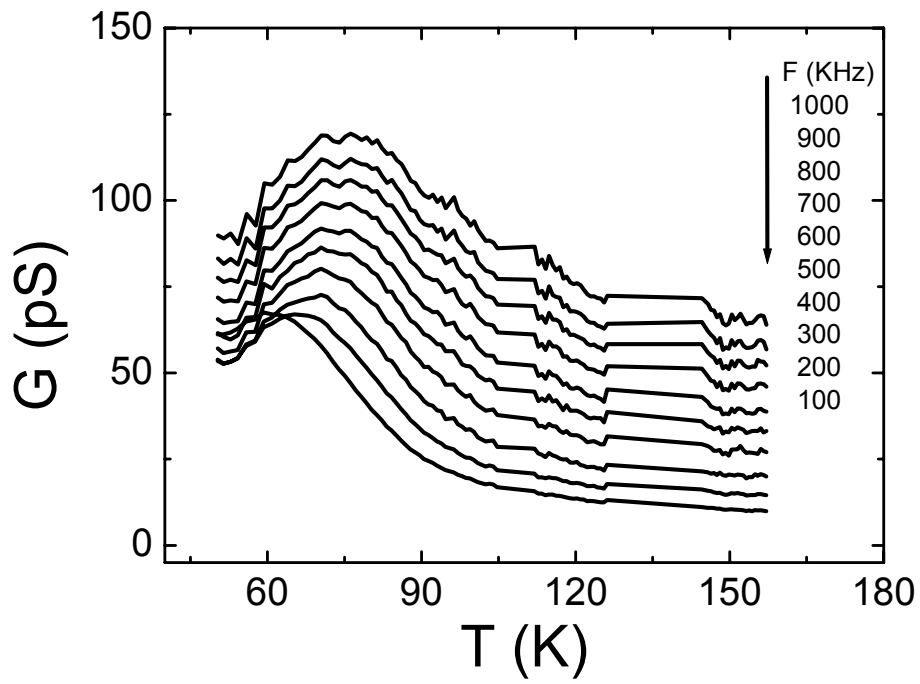
圖[4.14(a)] sh337($d_{In0.14AlAs}=20 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻電容-電壓曲線圖



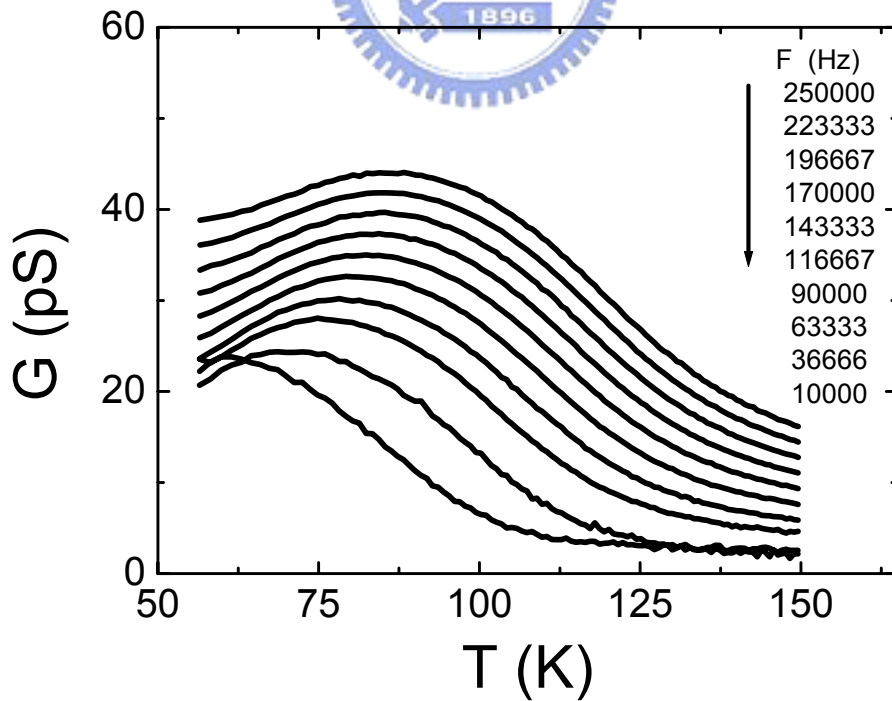
圖[4.14(b)] sh337($d_{In0.14AlAs}=20 \text{ \AA}$)溫度 80K 變頻縱深分佈曲線圖



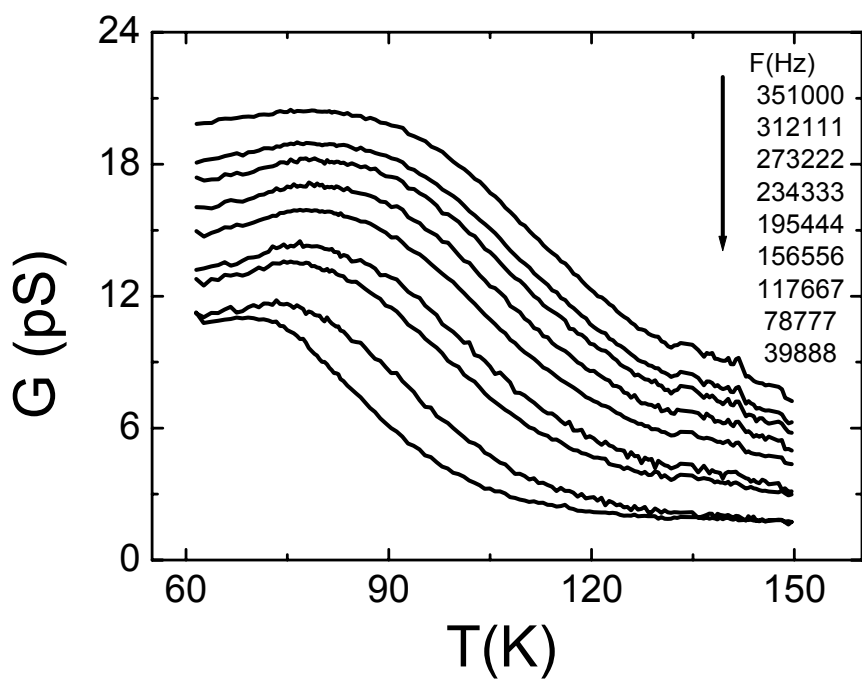
圖[4.15)] 電容/電導對頻率關係圖



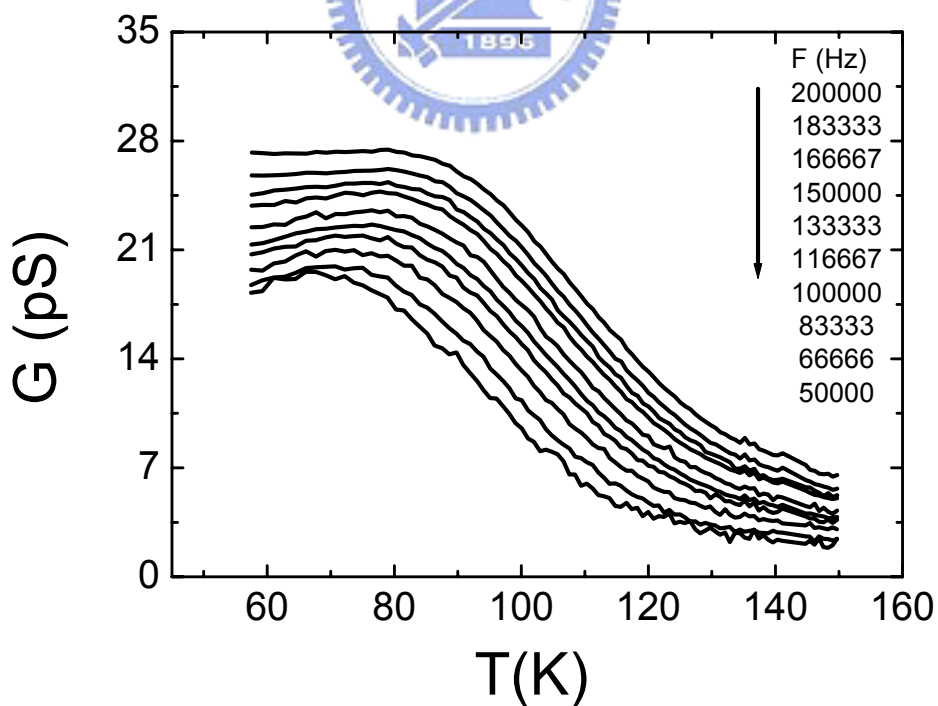
圖[4.16 (a)] sh332($d_{\text{In0.14AlAs}} = 0 \text{ \AA}$) G-T 圖



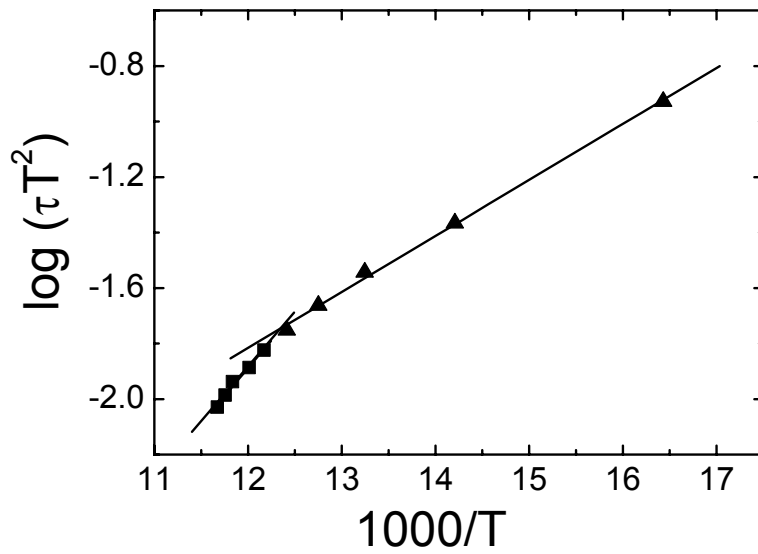
圖[4.16 (b)] sh331($d_{\text{In0.14AlAs}} = 10 \text{ \AA}$) G-T 圖



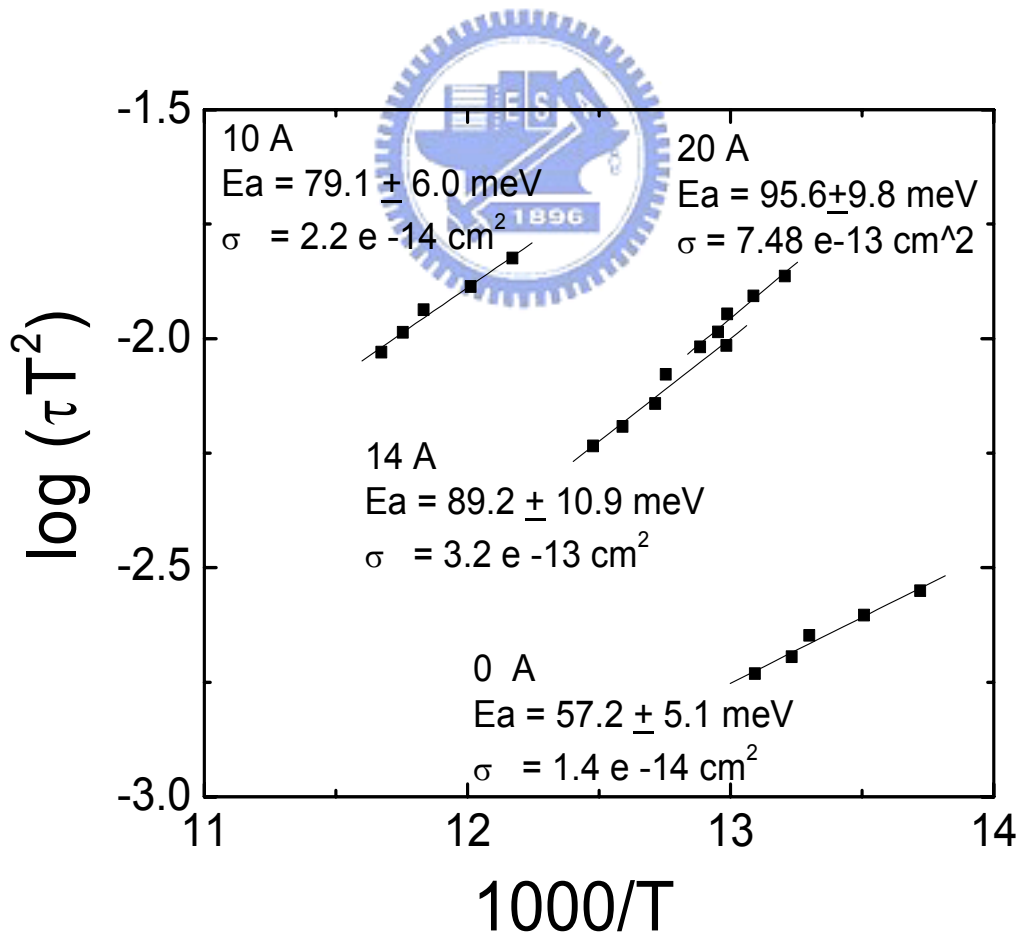
圖[4.16 (c)] sh330($d_{\text{In0.14AlAs}}=14 \text{ \AA}$) G-T 圖



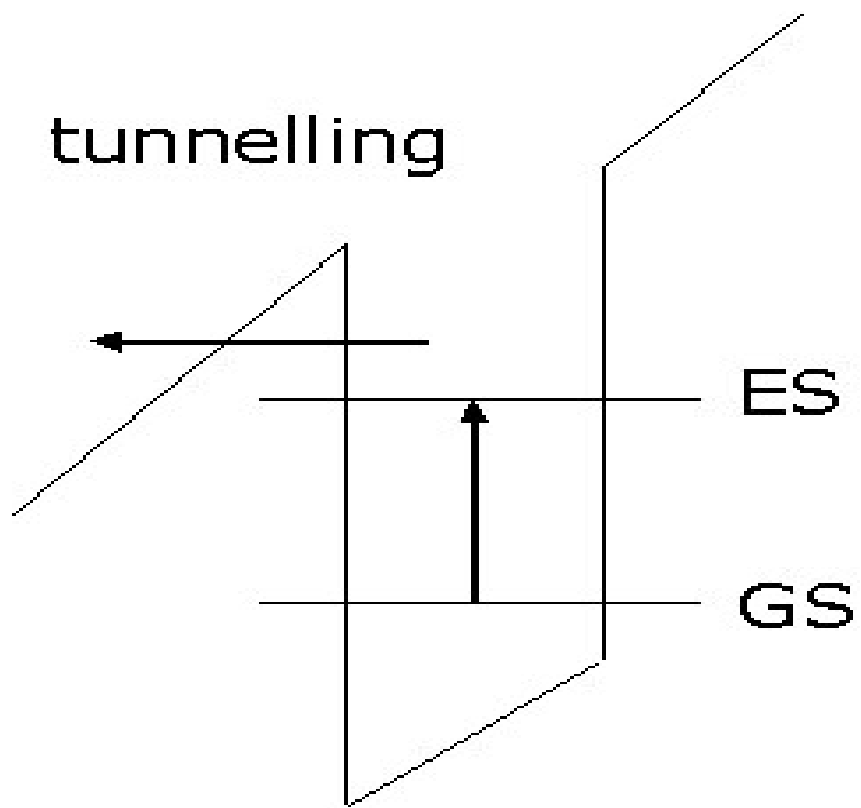
圖[4.16 (d)] sh337($d_{\text{In0.14AlAs}}=20 \text{ \AA}$) G-T 圖



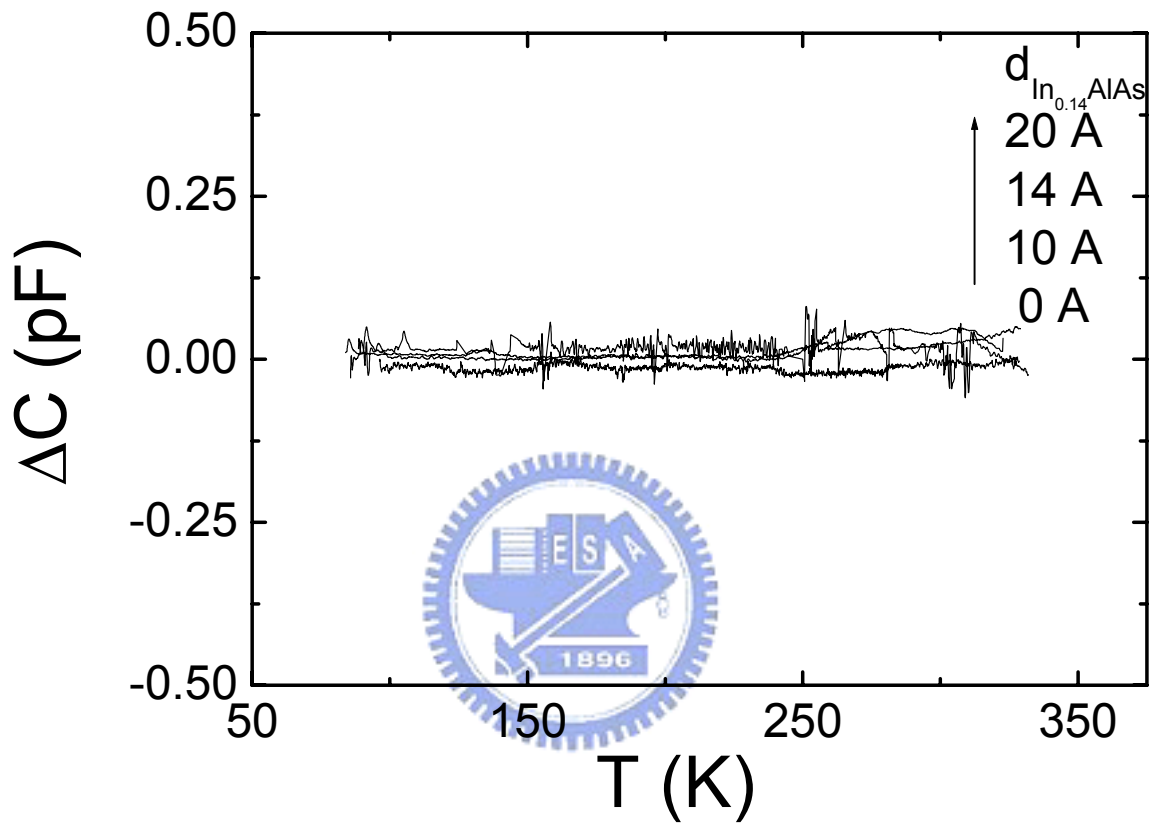
圖[4.17 (a)] 由 G-T 換算成 Arrhenius plot



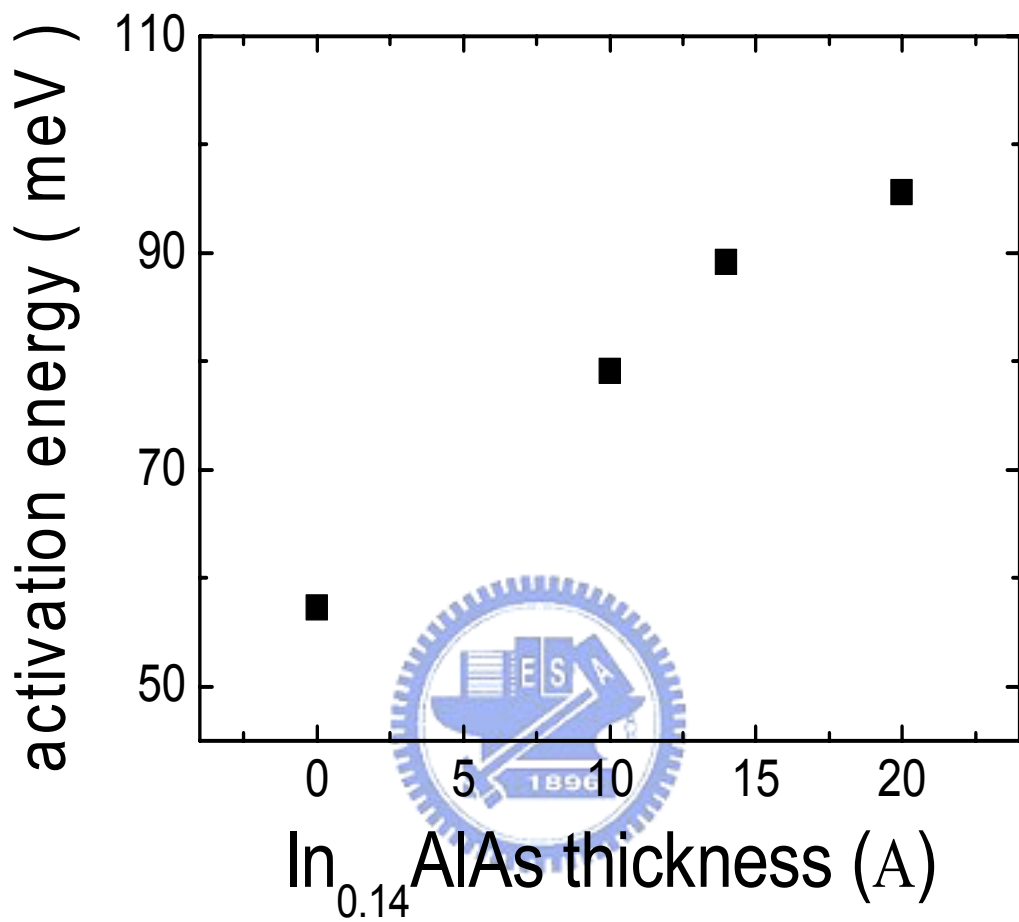
圖[4.17 (b)] 四片樣品 Arrhenius plot



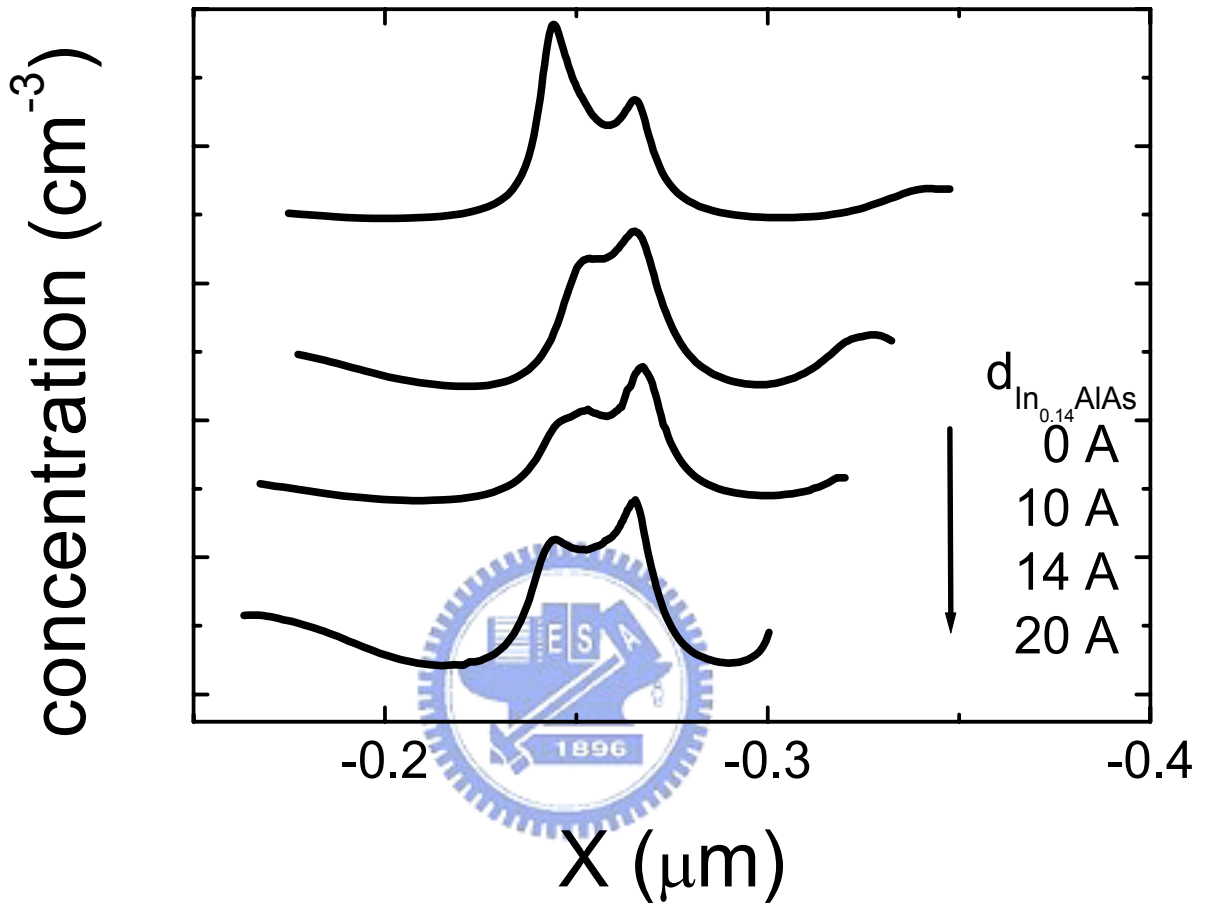
圖[4.18] 載子躍遷示意圖



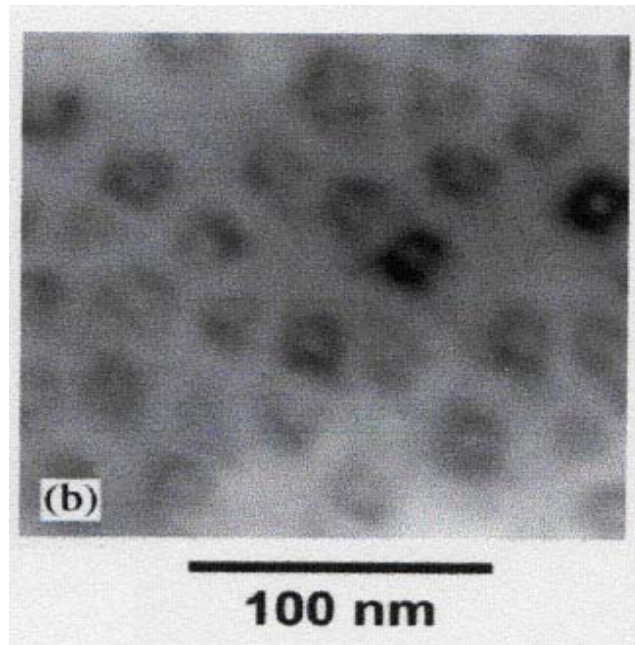
圖[4.19] 四片樣品 DLTS



圖[4.20] $\text{In}_{0.14}\text{AlAs}$ 厚度與活化能關係圖



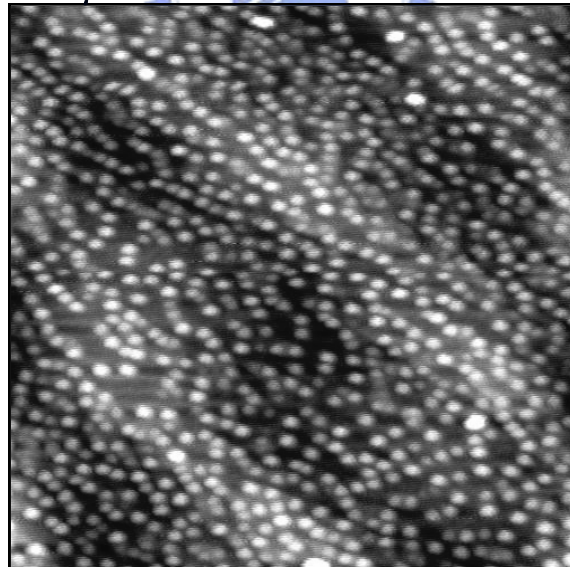
圖[4.21] 比較四片樣品低溫低頻縱深分佈曲線圖



dot density : $3\sim 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

圖[4.22 (a)] DWELL 結構 TEM 平面圖

$1 \times 1 \mu\text{m}^2$



dot density $\sim 9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$

圖[4.22 (b)] sh331(10 Å In_{0.14}AlAs) 結構 AFM 圖