

國立交通大學

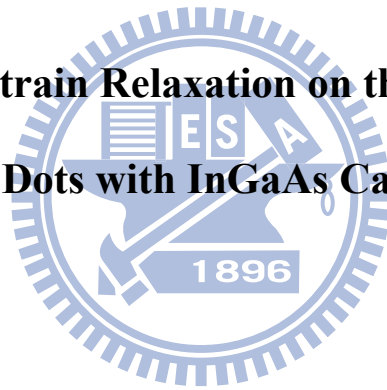
電子物理學系

碩士論文

應力鬆弛對 InAs/InGaAs 量子點特性之影響

The Influence of Strain Relaxation on the Properties of InAs

Quantum Dots with InGaAs Capping Layer



研究生：張祐誠

指導教授：陳振芳 博士

中華民國九十九年七月

The Influence of Strain Relaxation on the Properties of InAs Quantum Dots with InGaAs Capping Layer

研究生：張祐誠

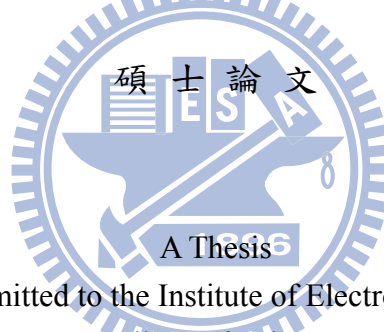
Student : You-Cheng Chang

指導教授：陳振芳 博士

Advisor : Dr. Jenn-Fang Chen

國立交通大學

電子物理學系



Submitted to the Institute of Electrophysics
College of Science

National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of
Master of Science

in

Electrophysics

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

應力鬆弛對 InAs/InGaAs 量子點特性之影響

研究生：張祐誠

指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學電子物理學系

摘 要

本論文對成長厚度為 3.06 及 3.3 ML 的兩個樣品進行光性及電性分析，探討應力鬆弛對於 InAs/InGaAs 量子點的影響。雖然在光激螢光頻譜(PL)中，可以看到兩個樣品的量子點都發生了應力鬆弛的現象。但在電容電壓量測(C-V)和導納頻譜量測(C-F)中卻發現，在 3.3 ML 樣品中量子點的載子躍遷速率比在 3.06 ML 樣品中慢了很多。從深層能階暫態頻譜(DLTS)上可以發現這是兩個樣品中缺陷濃度的不同，並且由 C-V 模擬可以印證缺陷造成了底層 GaAs 背景濃度的下降。

從 3.06 ML 樣品的 PL 頻譜及 TEM (Transmission Electron Microscopy)圖，可以看到存在著兩群量子點，分別來自於 In 向外擴散(高能量量子點)及產生差排缺陷(低能量量子點)的應力鬆弛量子點。在 3.06 ML 樣品的變溫 PL 頻譜，發現當溫度升到 140 K 時，有高能量量子點半高寬下降以及低能量量子點積分強度的上升的現象。這是由於兩群量子點間產生載子轉移效應所造成。量子點間載子轉移的效應使我們在 3.3 ML 樣品的 C-F 低溫量測中看到，電子躍遷速度在溫度升高到 140 K 時，有不尋常的下降現象。

此外，我們觀察在光激發下的量子躍遷行為。在光激發下，有更多的電子注入量子點中。而由於導帶中載子濃度的增加，會造成量子點和缺陷的電子躍遷速率變快。

The Influence of Strain Relaxation on the Properties of InAs Quantum Dots with InGaAs Capping Layer

Student: You-Cheng Chang

Advisor: Dr. Jenn-Fang Chen

Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

Abstract

In this study, we analyze the optical and electrical properties of the strain-relaxed InAs/InGaAs quantum dot (QD) samples with two different InAs deposition thicknesses, 3.06 and 3.3 ML, and discuss the influence of strain relaxation on the InAs QDs with InGaAs capping layer. While the strain relaxation is observed from the photoluminescence (PL) spectra of both QD samples, the carrier emission rate from the QDs, which can be obtained from the capacitance-voltage (C-V) and admittance (C-F) measurements, is much slower in the 3.3 ML sample than that in the 3.06 ML sample. It is attributed to the different defect concentration of two samples, estimated from deep-level transient spectroscopy (DLTS) measurements. The C-V simulation demonstrates the background concentration in the bottom GaAs is lowered by the defect.

From the PL spectra and transmission electron microscopy (TEM) data of the 3.06 ML sample, we discover there are bimodal QDs in the samples. One of the QD families is strain-relieved by indium out-diffusion, and the low-energy QD family is strain relaxed by the generation of misfit defect. PL properties of the 3.06 ML sample are studied as a function of temperature from 10 to 300 K. At about 140 K, an enhancement of the

integrated PL intensity of the low-energy QDs and a decrease of the FWHM of the high-energy QDs are observed. These abnormal temperature behaviors are attributed to the carrier transfer from the high-energy QD family to the low-energy one. From the C-F measurements of the 3.3 ML sample, the interdot carrier transfer can be seen as the electron emission rate from the QDs exhibiting an unusual reduction at about 140K.

Furthermore, the electron emission of the QD samples under illumination is investigated. During illumination, more electrons are injected into the QDs. The electron emission rate becomes faster due to the amount of electron on the conduction band is increased.



致 謝

碩班的研究生活終於告一段落，六年的交大生涯也跟著畫下了句點。在此我想要感謝一路上幫助我及讓我成長的人。首先要感謝的是，我的指導教授 陳振芳教授，在我的研究上，提供了無數的指導與意見，讓我獲益良多。尤其是對於討論實驗結果時的許多新的想法，讓我可以跳脫原本的框框，更讓我知道要如何進行研究。

接著要感謝實驗室的學長們，振豪學長在每次報告和論文討論上幫了我許多的忙，實驗室也多虧了有你才能維持得這麼好；孟謙學長除了帶起實驗室運動的風潮，其實對研究上也很有想法，祝你早日發表期刊；感謝政鴻學長每次都不厭其煩地幫我解決問題，平常也不吝提供給我們許多他的人生大道理；感謝材料所的吳岳翰學長在 TEM 上的協助；家峰常常好心地借我東西、建至在模擬上的幫忙和俞授學長也提供了我一些實驗上的建議，謝謝你們。

還要感謝上屆畢業的學長姐們，怡帆、嘉葳、啟慶、昱翔，你們對我的照顧以及帶我學習實驗都讓我依然印象深刻。特別是昱翔學長，不但傳承給我樣品，當兵還不忘回來提供我軍中心得！還有一起努力畢業的夥伴們，雁婷、淳俊、華安，謝謝你們兩年來的互相幫忙。雖然雁婷每天都早早回家、很少跟實驗室一起吃飯，不過妳在實驗室認真討論的聲音，都會讓我覺得有研究的動力。淳俊，謝謝你常常找我吃飯和聊天，也讓我研究之餘覺得生活很有趣。華安，實驗室有你鎮守著讓大家都安心！希望大家未來在工作上都能很順利。Chic，謝謝你安排實驗室出遊和很多次吃東西的事，辛苦你了！小毛、豆使、妍君，你們都是很認真也讓人很放心的學弟妹，認識你們讓我覺得很開心。你們在實驗上幫了我很多忙，實驗室有你們在也變得更好。研究上要好好加油，希望明年你們都可以順順利利！感謝一些一起留在交大的大學同學們，有你們讓這我兩年的生活更多采多姿。

最後，要感謝我的爸爸媽媽和一直陪伴在我身邊的人，有你們的支持我才能順利完成這一切，謝謝！

祐誠 2010 於新竹交大

目 錄

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 中文摘要..... | i |
| 英文摘要..... | ii |
| 致謝..... | iv |
| 目錄..... | v |
| 圖表目錄..... | vii |
| 第一章 緒論..... | 1 |
| 1-1 InAs/GaAs 量子點材料簡介..... | 1 |
| 1-1-1 量子點簡介及其特性..... | 1 |
| 1-1-2 Dot-in-well (DWELL)簡介..... | 2 |
| 1-2 研究動機..... | 2 |
| 1-3 論文架構..... | 3 |
| 第二章 樣品製備與量測系統簡介..... | 5 |
| 2-1 樣品製備..... | 5 |
| 2-1-1 量子點樣品成長..... | 5 |
| 2-1-2 蕭基界面及歐姆界面之電極製作..... | 5 |
| 2-2 量測系統簡介..... | 6 |
| 2-2-1 光激發螢光量測系統(PL)..... | 6 |
| 2-2-2 電流電壓量測(I-V)..... | 8 |
| 2-2-3 電容電壓量測(C-V)..... | 8 |
| 2-2-4 導納頻譜量測(C-F & G-F)..... | 9 |
| 2-2-6 深層能階暫態頻譜量測(DLTS)..... | 10 |
| 第三章 應力鬆弛對量子訊號影響的機制..... | 12 |
| 3-1 3.06 ML 及 3.3 ML 量子點光性及電性比較..... | 12 |
| 3-1-1 PL 分析..... | 12 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3-1-2 | C-V 及 C-F 分析..... | 12 |
| 3-1-3 | DLTS 分析..... | 13 |
| 3-2 | 量子點 C-V 模擬..... | 14 |
| 3-2-1 | C-V 模擬之模型..... | 14 |
| 3-2-2 | 模擬與高頻實驗數據之擬合..... | 15 |
| 3-2-3 | 模擬與低頻實驗數據之擬合..... | 16 |
| 第四章 | 應力鬆弛引發兩群量子點之探討..... | 32 |
| 4-1 | 兩群量子點的解析..... | 32 |
| 4-1-1 | PL 分析..... | 32 |
| 4-1-2 | TEM 分析..... | 33 |
| 4-1-3 | InAs/InGaAs DWELL 結構中應力鬆弛引發之兩群量子點..... | 33 |
| 4-2 | 兩群量子點間載子轉移效應..... | 34 |
| 4-2-1 | 3.06 ML 量子點樣品之變溫 PL 分析..... | 34 |
| 4-2-2 | 3.3 ML 量子點樣品之 G-F 分析..... | 35 |
| 第五章 | 光激發之電性量測..... | 45 |
| 5-1 | 光激發之電性分析..... | 45 |
| 5-1-1 | 光激發量子點訊號之改變..... | 45 |
| 5-1-2 | 光激發調變之缺陷訊號..... | 46 |
| 5-1-3 | 3.06 ML 及 3.3 ML 光激發電性量測之比較..... | 47 |
| 第六章 | 結論..... | 55 |
| | 參考文獻..... | 57 |

圖 表 目 錄

| | | |
|-----------|--|----|
| 圖 1-1 | 三種長晶模式，由左至右分別: F-vdM、V-W 及 S-K mode..... | 4 |
| 圖 2-1 | 樣品結構及所對應之能帶圖..... | 11 |
| 圖 2-2 | PL 系統架構圖..... | 11 |
| 圖 3-1 | 不同厚度量子點樣品的低溫 PL 頻譜..... | 17 |
| 圖 3-2 | 三個不同厚度量子點樣品的室溫 PL 頻譜..... | 17 |
| 圖 3-3(a) | 3.3 ML 樣品在低溫 100 K 的變頻 C-V 圖..... | 18 |
| 圖 3-3(b) | 3.06 ML 樣品在低溫 100 K 的變頻 C-V 圖..... | 18 |
| 圖 3-4(a) | 3.3 ML 樣品在 -3.2 V 的變溫 C-F 圖..... | 19 |
| 圖 3-4(b) | 3.06 ML 樣品在 -2.5 V 的變溫 C-F 圖..... | 19 |
| 圖 3-5(a) | 計算 3.3 ML 樣品下方空乏區寬度示意圖..... | 20 |
| 圖 3-5(b) | 計算 3.06 ML 樣品下方空乏區寬度示意圖..... | 20 |
| 圖 3-6 | 3.3 ML 樣品 TEM 傅立葉轉換圖與缺陷分佈..... | 21 |
| 圖 3-7(a) | 不同偏壓下 3.06 ML 樣品的 DLTS..... | 21 |
| 圖 3-7(b) | 不同偏壓下 3.3 ML 樣品的 DLTS..... | 22 |
| 圖 3-8(a) | 不同 rate window 下 3.06 ML 樣品的 DLTS..... | 22 |
| 圖 3-8(b) | 不同 rate window 下 3.3 ML 樣品的 DLTS..... | 23 |
| 表 3-1 | 兩片樣品中缺陷的活化能及捕捉截面積..... | 23 |
| 圖 3-9 | 兩片樣品與差排缺陷的阿瑞尼士圖比較..... | 24 |
| 圖 3-10(a) | 不同 filling pulse 下 3.06 ML 樣品的 DLTS..... | 24 |
| 圖 3-10(b) | 不同 filling pulse 下 3.3 ML 樣品的 DLTS..... | 25 |
| 圖 3-11 | 費米能階掃到量子點時的能帶示意圖..... | 25 |
| 圖 3-12 | 電容模擬等效電路圖..... | 26 |
| 圖 3-13(a) | 蕭基界面理論 C-V 圖與 3.06 ML 樣品實驗 C-V 比較..... | 26 |
| 圖 3-13(b) | 蕭基界面理論 C-V 圖與 3.3 ML 樣品實驗高頻 C-V 比較..... | 27 |

| | | |
|-----------|------------------------------------|----|
| 圖 3-14 | 3.3 ML 樣品模擬與實驗高頻 C-V 比較 | 27 |
| 圖 3-15(a) | 3.06 ML 樣品在室溫下大功率 PL 頻譜 | 28 |
| 圖 3-15(b) | 3.3 ML 樣品在室溫下大功率 PL 頻譜 | 28 |
| 圖 3-16 | 量子點中電荷對能量的分布 | 29 |
| 圖 3-17(a) | 3.06 ML 樣品高低頻 C-V 模擬圖 | 29 |
| 圖 3-17(b) | 3.06 ML 樣品實驗 C-V 實驗圖 | 30 |
| 圖 3-18(a) | 3.3ML 樣品高低頻 C-V 模擬圖 | 30 |
| 圖 3-18(b) | 3.3ML 樣品高低頻 C-V 實驗圖 | 31 |
| 圖 4-1(a) | 2.7 ML 樣品室溫變功率 PL 頻譜 | 37 |
| 圖 4-1(b) | 3.06 ML 樣品室溫變功率 PL 頻譜 | 37 |
| 圖 4-1(c) | 3.3 ML 樣品室溫變功率 PL 頻譜 | 38 |
| 圖 4-2 | 2.7 ML 正常樣品與 3.06 ML 應力鬆弛樣品 TEM 比較 | 38 |
| 圖 4-3(a) | 3.06 ML 樣品低能量量子點 TEM 缺陷分布圖 | 39 |
| 圖 4-3(b) | 3.06 ML 樣品高能量量子點 TEM 缺陷分布圖 | 39 |
| 圖 4-4(a) | 3.06 ML 樣品變溫 PL 頻譜 | 40 |
| 圖 4-4(b) | 3.3 ML 樣品變溫 PL 頻譜 | 40 |
| 圖 4-5(a) | 3.06 ML 樣品低溫 20 K PL 頻譜高斯擬合 | 41 |
| 圖 4-5(b) | 3.06 ML 樣品高溫 300 K PL 頻譜高斯擬合 | 41 |
| 圖 4-6 | 3.06 ML 樣品 PL 半高寬對溫度圖 | 42 |
| 圖 4-7 | 3.06 ML 樣品歸一化 PL 積分強度對溫度圖 | 42 |
| 圖 4-8 | 兩群量子點間載子轉移示意圖 | 43 |
| 圖 4-9 | 兩群量子點間能量差對溫度圖 | 43 |
| 圖 4-10 | 3.3 ML 樣品低溫 G-F 量測 | 44 |
| 圖 4-11 | 3.3 ML 樣品中量子點載子時間常數對 $1000/T$ 作圖 | 44 |
| 圖 5-1 | 光激發電性量測裝置示意圖 | 48 |
| 圖 5-2 | 光激發下載子躍遷機制示意圖 | 48 |

| | | |
|-----------|----------------------------------|----|
| 圖 5-3(a) | 3.3 ML 樣品照光與未照光之 200 K 低頻 C-V 圖 | 49 |
| 圖 5-3(b) | 3.3 ML 樣品照光與未照光之 200 K 低頻縱深圖 | 49 |
| 圖 5-4(a) | 3.3 ML 樣品低頻變溫 C-V 圖 | 50 |
| 圖 5-4(b) | 3.3 ML 樣品光激發下低頻變溫 C-V 圖 | 50 |
| 圖 5-5(a) | 3.3 ML 樣品照光與未照光 -2.5 V 低溫 G-F 圖 | 51 |
| 圖 5-5(b) | 3.3 ML 樣品照光與未照光 -3 V 低溫 G-F 圖 | 51 |
| 圖 5-6 | 3.06 ML 樣品高溫 370 K 低頻 C-V 圖 | 52 |
| 圖 5-7 | 3.06 ML 樣品照光與未照光之低頻低溫 C-V 圖 | 52 |
| 圖 5-8 | 3.06 ML 樣品光激發下變頻 C-V 圖 | 53 |
| 圖 5-9 | 3.06 ML 及 3.3 ML 樣品光激發增加 I-V 圖 | 53 |
| 圖 5-10(a) | 3.06 ML 樣品照光與未照光之 200 K 低頻 C-V 圖 | 54 |
| 圖 5-10(b) | 3.06 ML 樣品照光與未照光之 200 K 低頻縱深圖 | 54 |



第一章 緒論

1-1 InAs/InGaAs 量子點材料簡介

本研究是著重在 InAs/InGaAs 量子點應力鬆弛機制的探討，以下先針對量子點及 Dot-in-well (DWELL)結構作簡介。

1-1-1 量子點簡介及其特性

(1). 量子點特性與應用：

將材料的三維尺度都限制在數個~數十奈米間，而使材料的特徵尺寸在三個維度上都與電子的de Broglie波長或電子平均自由路徑相近或更小，電子的能量將被量化，所以就造成了：似 δ function的態密度&能階分立不連續的特性[1,2]，這種奈米結構稱為量子點。這種零維體系的物理行為〔如光、電性質〕與原子相似，電子在其中的能量狀態呈現類似原子的分立能級結構，因此量子點又被稱作「人造原子」。

由於量子點長晶技術的成熟，已經可以在電子或光電元件被應用，如量子點雷射[3]、紅外光偵測器[4]等。近幾年量子點在生醫領域也有許多潛在應用，尤其是在生物感測上[5]。此外，量子點一個極重要的應用是可拉長以 GaAs 為基底元件的放射波長，以達到光通訊所需的波長範圍(1.3~1.55 μm)。

(2). 異質接面三種磊晶模式的成長機制：

利用應力誘發原理來成長量子點的磊晶方法主要有二：

1. 有機金屬氣相磊晶(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)是一種單向的化學反應，成長速度較快且維護方便，較適合大量生產，但成長高品質的量子點則較具挑戰性。
2. 分子束磊晶(Molecular Beam Epitaxy, MBE)成長均勻和密集的量子點，此種成長方式中，表面能對於量子點的成核作用很重要。優點為在成份及厚度上具有良好的操控性，磊晶速率可精確到每秒低於一個分子層(ML/s)，品質及均勻度佳，且可

利用反射高能電子繞射(reflection high energy electron diffraction, RHEED)對材料表面做即時的監控。

接著簡單介紹異質接面的三種磊晶模式[6](如示意圖1-2)，這些成長模式的機制就是系統的演變總會傾向最低的能量：

1. 層接式(F-vdM mode, Frank-van der Merwe mode)[7]：磊晶材料的表面能小於或等於基板的表面能時，有利於此種成長模式。
2. 島嶼式(V-W mode, Volmer-Weber mode)[8]：磊晶材料的表面能大於基板的表面能時，則利於島嶼式的模式。
3. 層接而後島嶼式(S-K mode, Stranski-Krastanow mode)[9]：成長幾個單層後，會先在 GaAs 上形成沾濕層(wetting layer)，然後自我聚集形成島狀物，所以也稱為自聚式量子點 (self-assembled QDs)。此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。但當厚度繼續增加，應力鬆弛後就會有插排等缺陷產生。

1-1-2 Dot-in-well (DWELL)簡介

Dot-in-well 是指將量子點埋在量子井中，也就是量子點上方多覆蓋一層應力緩衝層，可以降低量子點與基板的應力及晶格不匹配。一般來說，成長在 GaAs 上的 InAs 量子點發光波長可以達到 1.3 μm 和 1.55 μm 的範圍。但在將量子點製作成應用元件時，需要蓋上一層 GaAs 作為覆蓋層(capping layer)。在一些實驗結果[10]中發現，蓋上 GaAs 的 InAs 量子點大小及密度會降低，而使發光波長產生藍移且發光效率降低。而在 InAs 和 GaAs 之間加入 InGaAs 層[11,12]，可以成功將波長延伸至 1.3 μm 以上。

1-2 研究動機

研究 DWELL 這個結構，最原始的目的是為了減緩晶格間的不匹配、拉長量子點波長、以及成長更均勻更高密度的量子點。但我們發現此結構，在量子點成長厚度超過其臨界值後，因為上方 InGaAs 應力緩衝層的存在，會導致應力鬆弛機制的改

變。由於覆蓋了 InGaAs 的緣故，造成應力鬆弛後缺陷僅分布量子點內部及底層，量子點上方沒有缺陷產生。這會使得當逆偏加大，量子點後方空乏層的寬度增加，而影響到載子躍遷出去的速率。

除此之外，蓋了 InGaAs 緩衝層的應力鬆弛還會引發樣品中產生兩群量子點的分布。在我們的樣品中存在兩群不同發光波長的量子點，並且會對量子點的光性及電性造成影響。因此，我們希望探討在 DWELL 結構中，量子點的應力鬆弛的特性與機制。

1-3 論文架構

本論文主要是利用光性(PL)及電性(C-V、C-F、DLTS 等)的量測，研究 InAs/InGaAs 這種 DWELL 結構的量子點，成長厚度為 3.06 ML 及 3.3 ML，超過臨界厚度而應力鬆弛後，應力鬆弛發生產生的效應以及對於量子躍遷的影響。最後，我們試著將光性及電性結合，作了光激發的電性量測，進一步確認我們樣品的特性。以下簡介本論文的章節安排：

第一章緒論部份，簡介量子點的成長及應用，並對研究的 DWELL 樣品做簡單介紹，以及此研究的動機。

第二章樣品的製備與量測系統部分，包括了實驗樣品的成長結構及電性量測所需之電極製作，另外針對本論文所用到的量測系統做簡介。

第三章首先對 3.06 ML 及 3.3ML 光性及電性的量測結果比較，發現在 DWELL 量子點應力鬆弛後，量子點及量子點下方背景濃度會因缺陷產生明顯下降，而對載子躍遷速度產生影響，並用 CV 模擬的方式證實。

第四章接著以 PL 及 TEM 的比較，對於應力鬆弛量子點造成兩群量子點的現象作討論。並且利用 3.06 ML 樣品的變溫 PL，確定在兩群量子點之間存在著載子轉移的現象，並且這個現象在 3.3 ML 樣品的電性量測中產生影響。

第五章是我們嘗試著將光電性量測結合，對 3.06 ML 及 3.3ML 兩個樣品作光激發的電性量測，並對我們所看到的現象作出說明。

第六章對本論文作出總結。



圖 1-1 三種長晶模式，由左至右分別: F-vdM 、V-W 及 S-K mode



第二章 樣品製備與量測系統簡介

2-1 樣品製備

樣品製備包含：1.量子點樣品的成長；2.蕭基界面(Schottky contact)以及 3.負極歐姆界面(Ohmic contact)的電極製作。

2-1-1 量子點樣品成長

樣品是由工研院所提供，是利用分子束磊晶(Molecular beam epitaxy)所成長的。長晶所使用的基板為(100)方向的 n^+ -GaAs(10^{18}cm^{-3})，基板成長溫度固定在 600°C 。而 QD、QW 的長晶溫度則設定為 $485\sim 500^\circ\text{C}$ 。成長的步驟如下：

- (1). 先在 GaAs 基板上成長一層 $0.2\ \mu\text{m}$ GaAs 緩衝層(buffer layer, Si doping: $10^{17}\ \text{cm}^{-3}$)
- (2). 之後成長不同厚度 InAs QD，分別為 3.06 ML 及 3.3 ML
- (3). 接著再以相同溫度覆蓋上一厚度為 60\AA 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ QW
- (4). 然後低溫(500°C)成長 20 秒的 GaAs
- (5). 最後升回 600°C ，覆蓋 $0.2\ \mu\text{m}$ GaAs cap layer(Si doping: $10^{17}\ \text{cm}^{-3}$)。

本論文成長的樣品結構圖及所對應的能帶圖如圖 2.1 所示。

2-1-2 蕭基界面及歐姆界面之電極製作

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

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

並用氮氣吹乾。

- (2). 將試片浸泡於丙酮溶液(Acetone)中約 2~3 分鐘，去除表面油漬。
- (3). 沖泡去離子水，約 3 分鐘(去除殘留之 Acetone)，並用氮氣吹乾。
- (4). 置入稀釋過的鹽酸溶液(HCl : H₂O = 1 : 1)中約 2~3 分鐘(去除陽離子及氧化層)。
- (5). 沖泡去離子水約 3 分鐘(去除殘留的酸液)，並用氮氣吹乾。
- (6). 經過清理後的樣品，於其上覆蓋所需要的 mask 來決定金屬接面的面積大小。(本篇論文中所量測的面積大小為 0.005024 cm³)
- (7). 置入蒸鍍機內，使用機械幫浦(mechanical pump)及擴散幫浦(diffusion pump)，待抽真空至 2~3x10⁻⁶ torr 以下，再開始以熱蒸鍍的方式鍍上 Al。
- (8). 另外歐姆接面則是使用 In，先在樣品的背面上點上兩個 In ball，經過高溫爐管約 300 °C 的加熱後，量測兩個 In ball 間的電阻值使低於 10 Ω，具有歐姆特性，再將之置於均勻塗滿 In 的 Si 基板上。以上為電性量測所需的樣品製備。

3.3 ML 量子點樣品的電極製作步驟是按照上述所進行；而在製備 3.06 ML 量子點樣品的電極之前，為了避免過大的漏電流在量測到量子點附近偏壓即產生而影響我們電性量測的準確性，我們必須在清理步驟中多進行一個蝕刻的動作，讓表面 GaAs 的厚度下降。蝕刻所使用 H₂SO₄:H₂O₂:H₂O 的比例為 1:1:100，蝕刻時間為一分鐘。3.06 ML 的樣品表面 GaAs 厚度比 3.3 ML 薄了約 50 nm。

2-2 量測系統簡介

本研究主要對樣品進行了光性量測與電性量測，分別在 2-2-1 節及 2-2-2 節作介紹。

2-2-1 光激發發光量測系統(PL)

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

- (1). 固態雷射(solid-state laser)：為 Excel 公司生產，型號為 LOC-VENTUS 1000 SERIES，為 CW 雷射，波長 532 nm，最大輸出功率 1.3 mW，雷射穩定度在 1.9% 以內，RMS 平均雜訊為 0.7%，驅動電流 6 安培，主要利用此雷射來激發樣品發出螢光而偵測。
- (2). 衰減濾光片組(Variable Neutral Density Filter)：利用衰減片來控制、調整想要的雷射輸入功率。
- (3). 光遮斷器(Optical chopper)：目的在於使連續波的雷射形成方波的形式，所使用的型號為 NEW FOCUS 3501，7/5 孔型式，固定頻率在 500 Hz。
- (4). 聚焦透鏡(Focus Lens)：利用聚光透鏡將雷射光聚焦在樣品上。
- (5). 溫控裝置：主要為了量測低溫與變溫的光學特性而設置，包含真空腔體(chamber)、降溫用壓縮機(compressor)、機械幫浦(mechanical pump)、冷卻水系統以及溫控器(temperature controller)。系統的最低溫約在 10 K，可利用循環 He 的壓縮機與溫控器的加熱器相互配合以便控制所想要的溫度進行量測。
- (6). 高通濾光片(Long-pass filter)：我們所使用的是 695 nm 的濾光片，目的為濾掉雷射光，避免其進入光偵測器中(因為螢光相較於雷射光是屬於非常微弱的光)。
- (7). 分光儀(monochromator)：型號為 ARC Spectro-275，聚焦長度為 27.5 cm，內部含有有三塊光柵，為 600 groove/mm(BLZ=1000 nm)，主要是根據實驗所需的波段範圍來選擇。
- (8). 光偵測器(photodetector)：使用 Electro-Optical Systems 公司所生產的 InGaAs 光偵測器，在 300 K 時所適用的波長為 800 nm 到 1800 nm。
- (9). 訊號放大器(multi-meter)：將光偵測器所接收到的訊號放大。
- (10). 鎖相放大器(Lock-in Amplifier)：儀器型號為 STANDFORD RESEARCH SYSTEM SR850，目的在量測微小的交流訊號。

PL 設備架設如圖 2.2 所示，首先由固態雷射發射波長為 532 nm 的雷射光，經由實驗需要調整好倍率的衰減片，來降低雷射輸出功率，然後經由光遮斷器對雷射光

進行調變，並將光遮斷器的頻率送至鎖相放大器作為參考頻率，經過光遮斷器的雷射光經由第一面透鏡聚焦在樣品上，進而激發樣品放射出螢光，再經由第二片透鏡聚焦在分光儀的狹縫中進行分光，且在光進入狹縫前，另外使用一片 695 nm 的高通濾光片以濾掉雷射光，以避免其對訊號產生干擾，之後螢光再經由光偵測器去接收，傳送至鎖相放大器處理後再傳回電腦而存檔。利用 PL 系統在各溫度下可以針對我們的樣品做量測，也可以利用不同衰減倍率的濾光片針對不同的雷射激發強度做量測。

2-2-2 電流電壓量測(I-V)

以下介紹本研究的電性量測系統。首先，樣品的電流與電壓特性是電性量測實驗中的首要步驟，可利用 I-V 特性的量測了解我們樣品在成長與經過熱蒸鍍等電極製備後其特性是否良好，作為其他電性量測的參考依據。主要是利用蕭基接面的電流特性，來擬合樣品的漏電流(leakage current)、串聯電阻 r_s (series resistance) 與理想因子 n (ideal factor)，Schottky 電流公式如下：

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

上式中 I_s 為逆向飽和電流(saturation current)， V 為順向偏壓， k 為波茲曼常數(Boltzmann's constant)。本篇論文利用 KEITHLEY 236 作 I-V 量測，本量測的樣品其理想因子大約在 1.0~1.4 之間，Schottky 特性算不錯，而漏電流大約在 10^{-10} mA，串聯電阻約在 100~500 Ω 。

2-2-3 電容電壓量測(C-V)

在蕭基接面下可以藉由調變其空乏區，控制樣品的費米能階(Fermi level)去量測樣品所反映出來的電容特性，接下來的量測都與樣品的電容與導納值有關。首先，C-V 量測主要是利用外加逆偏壓來空乏半導體內自由載子，配合交流頻率的調變做電容電導量測，不同 DC 偏壓下的電容值可得出各區域的載子濃度變化，再利用縱

深變化圖初步了解樣品是否存在有載子侷限，或存有大量缺陷空乏大量載子。主要利用到的公式有平行板電容公式(2-2)與載子濃度隨空間分佈公式(2-3)：

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

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

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

2-2-4 導納頻譜量測(C-F & G-F)

若由 C-V 量測發現某逆偏下載子對不同頻率有不同電容值的響應，則可進一步作 C-F 與 G-F 量測，更深入去探討被侷限的載子對外加偏壓的反應時間。調變 ac 的頻率由 100 Hz 到 15 MHz，理論上不同的溫度之下，載子的反應時間常數也不同(與其熱動能有關)，因此可藉由量測 C-F 與 G-F 頻譜，針對不同偏壓(對應到不同區域)的量測，進而畫出阿瑞尼斯圖(Arrhenius plot)，由圖中的斜率與截距，推算缺陷或侷限能階的活化能(activation energy)及捕捉截面積(capture cross section)。根據數學推導的結果，電容及電導對應頻率的公式如下[13,14]：

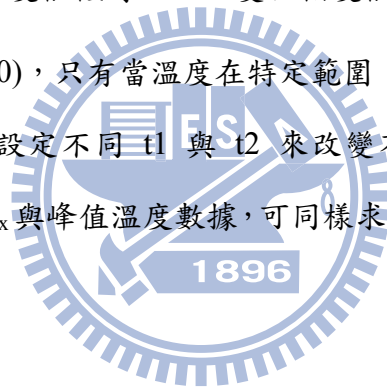
$$C_p = \frac{\epsilon\epsilon_0}{x_d} + (2e_n)^2 C_0 \left[\frac{1}{\omega^2 + (2e_n)^2} \right] \quad (2-4)$$

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

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

2-2-6 深層能階暫態頻譜量測(DLTS)

DLTS 技術在 1974 年首先由貝爾實驗室的 D. V. Lang 在 J. A. P. 提出[15]。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[16]。優點：靈敏度高(可到 10^{10}cm^{-3} 之濃度偵測範圍)、能測多數與少數載子、觀測 defect 能階範圍廣、尤其是較深層的缺陷能階(emission time 在毫秒等級的)也能夠被精準量測到，提高信號對雜訊的比值(S/N ratio)等。DLTS 技術主要是給定兩時間 t_1 與 t_2 ，固定 t_2/t_1 ，改變 t_1 與 t_2 來設定不同速率窗(利用雙閘訊號平均器設定)，電子發射速率 e_n 隨著系統溫度變化而改變，只有當 e_n 剛好落在所設之速率窗中，量測系統才達到峰值，即有 $e_{n,\max} = \frac{\ln(t_2/t_1)}{t_2 - t_1}$ 。當溫度很低時， ΔC 變化幅度很小($\Delta C \sim 0$)，當溫度很高時， ΔC 變化幅度又太快($\Delta C \sim 0$)，只有當溫度在特定範圍， ΔC 變化才最大，與我們所設定的時間常數最接近。設定不同 t_1 與 t_2 來改變不同速率窗(rate window，即 $e_{n,\max}^{-1}$)，獲得多組不同 $e_{n,\max}$ 與峰值溫度數據，可同樣求出缺陷活化能與捕捉截面積。



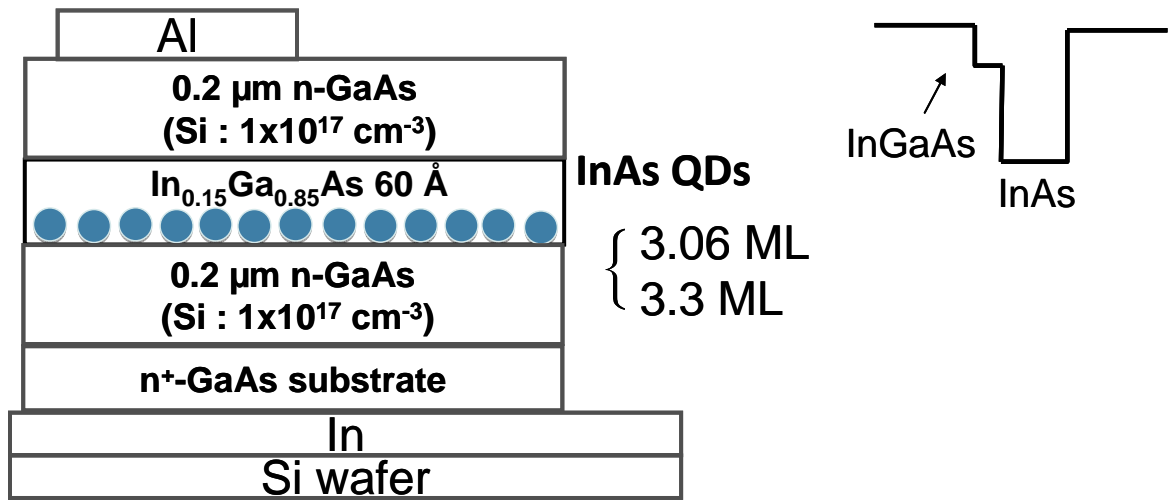


圖 2-1 樣品結構及所對應之能帶圖

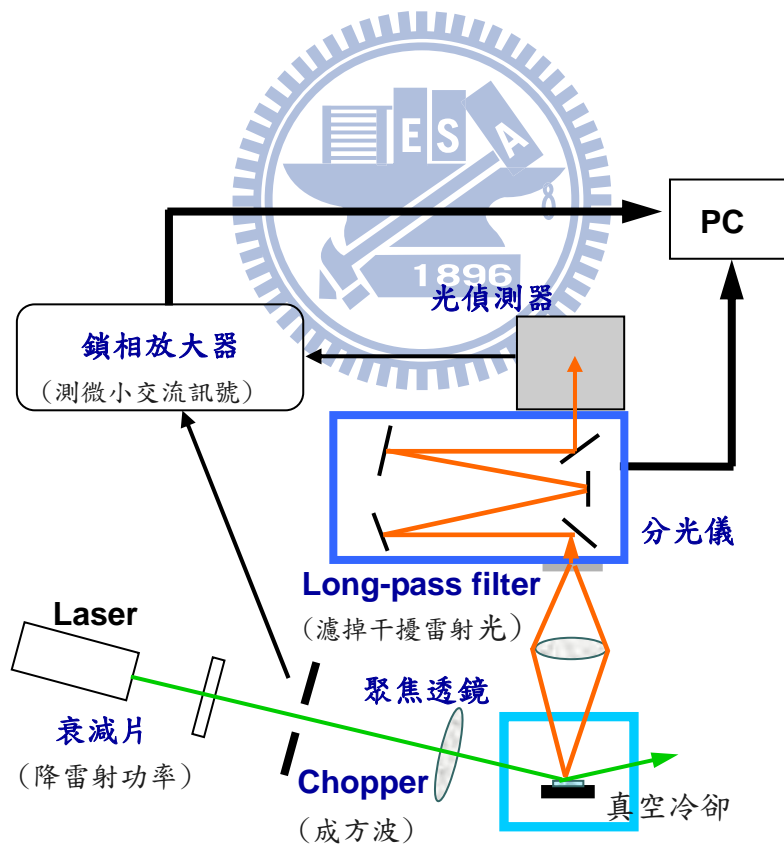


圖 2-2 PL 系統架構圖

第三章 應力鬆弛對量子訊號影響的機制

在本章節中，將比較 3.06 ML 及 3.3 ML 在光性及電性上的異同，來討論應力鬆弛對量子訊號的影響。

3-1 3.06 ML 及 3.3 ML 量子點光性及電性比較

3-1-1 PL 分析

我們可以從不同厚度量子點的 PL 頻譜，如圖 3-1，發現當量子點的成長厚度尚未超過臨界厚度(~3 ML)時，量子點的發光波長會隨著成長厚度的增加而拉長。但 3.06 ML 以及 3.3 ML 的量子點發光波長卻產生了明顯的藍移效應。我們從室溫下 2.7 ML、3.06 ML 及 3.3 ML 的 PL，如圖 3-2，也可以發現 3.06 ML 及 3.3 ML 樣品的發光強度比起 2.7 ML 樣品小得許多。在之前的研究中[17]，我們認為這是因為在 DWELL 結構中的量子點厚度成長到 3 ML 以上時，會發生應力鬆弛所導致。

3-1-2 C-V 及 C-F 分析

我們繼續對 3.06 ML 及 3.3 ML 樣品作電性上的研究。雖然兩片樣品因為應力鬆弛的關係，在光性上與正常量子點都有所不同。但從兩片樣品的 C-V 及 C-F 量測比較，可以發現在電性上兩片樣品卻有明顯的不同。圖 3-3 (a)為 3.3 ML 樣品的 110 K 變頻 C-V 圖，平台的位置是量測到量子點的偏壓範圍。在我們量測頻率範圍中可以看到平台對頻率有響應，代表載子躍遷的速度會趕不上我們量測的頻率。而圖 3-3 (b), 3.06 ML 樣品的 78 K 變頻 C-V 圖，卻可以發現不管我們將量測頻率設定為多快，量子點的平台都仍存在，表示量子點中的載子躍遷速度超過我們量測頻率的範圍。

圖 3-4 (a) (b)則分別是 3.3 ML 及 3.06 ML 樣品，在掃到量子點範圍的偏壓下所量測的變溫 C-F 圖。圖中的反曲點所在的頻率代表量子點中載子躍遷出來的速率。在

3.3 ML 樣品中的量子點在 78 K 到 300 K 的溫度範圍內，載子躍遷速度大約在 $10^3 \sim 10^6$ Hz 內；而 3.06 ML 樣品在 78 K 到 300 K 的溫度範圍，我們都無法量到反曲點，載子躍遷速度超過我們的量測頻率範圍。

由以上分析可以得知，3.06 ML 量子點的載子躍遷速度很快，比較接近正常量子點中載子的躍遷速度，而 3.3 ML 量子點的載子躍遷速度則下降了很多。從圖 3-3 (a) (b)，低溫 C-V 圖來看，量子點平台結束的位置代表著費米能階掃到量子點的最深能階，此時量測到的電容值可以代表此時空乏區的寬度 W 。在 3.06 ML 樣品中約為 260 pF；在 3.3 ML 樣品中約為 170 pF。將空乏區寬度扣掉量子點到表面的距離 L_2 後，可以得到兩個樣品在掃到最深能階時底層空乏區的寬度 L_1 ，我們發現在 3.3 ML 樣品中量子點平台結束的電容值比起 3.06 ML 小了很多，而換算出來的 L_1 是在 3.06 ML 樣品中的 1.7 倍，如圖 3-5 (a) (b)。

因此我們認為，在量測量子點訊號時，由於量子點底層的空乏寬度 L_1 會影響到量子點內載子躍遷出來的速度，不同大小的底層空乏寬度 L_1 是造成兩片樣品中量子點載子躍遷速率不同的主要原因。

3-1-3 DLTS 分析

在之前的研究中[18]，曾經以 TEM 分析技術證明，在 3.3 ML 樣品中，由於在上方蓋了 InGaAs 緩衝層，差排缺陷僅存在於量子點內部與底層 GaAs 處，如圖 3-6。圖中經由傅立葉轉換技術，可以看到樣品晶格的排列及缺陷。斜直線為 wetting layer 的位置，虛線框出之橢圓形為量子點的區域，而其餘不規則曲線圈出的即為差排缺陷的分佈。

我們進一步對 3.06 ML 及 3.3 ML 作 DLTS 的量測。圖 3-7 (a) (b) 是對兩片樣品進行固定 rate window 及 filling pulse，而改變量測偏壓範圍的 DLTS。我們可以看到兩片樣品出現 DLTS 訊號的區域，可以對應到 C-V 上量子點或量子點底層的範圍。這也可以再次證實差排缺陷是存在於量子點內部與底層 GaAs 處。而分別對兩片樣品

在定偏壓及 filling pulse 下，改變 rate window 量測的 DLTS，如圖 3-8 (a) (b)，得到峰值對應的溫度值，可以以阿瑞尼士圖得到缺陷的活化能以及捕捉截面積，如表 3-1。我們可以看到在 3.06 ML 和 3.3 ML 樣品中的缺陷特性非常相近，活化能約為 380 meV、捕捉截面積約為 $1 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 。並且我們把兩片樣品的阿瑞尼士圖與之前研究的整理[19]作比較如圖 3-9，可以知道在 3.06 ML 及 3.3 ML 中的缺陷應該是屬於相同的類型，並且為之前定義的 E2 misfit 缺陷。

圖 3-10 (a) (b) 所示為固定 rate window、偏壓，變換不同 filling pulse，對 3.3 ML 及 3.06 ML 樣品做的 DLTS 量測，可以看到隨著 filling pulse 的增加，發現此缺陷是屬於會飽和的缺陷。我們利用可以量測到的最大飽和峰值 ΔC 作比較。在 3.3 ML 中 $\Delta C = 0.3 \text{ pF}$ ，3.06 ML 的 $\Delta C = 0.04 \text{ pF}$ 。根據理論計算公式 $N_T = N_d(\Delta C/C_0^2)\epsilon A$ ，其中樣品參雜濃度 $N_d = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、介電常數 $C = 1.14 \times 10^{-10} \text{ F/m}$ 、金屬接面量測面積 $A = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 。而由於初始電容值 C_0 在兩片樣品中相差不大，約在 200~270 pF 的範圍內，但兩個樣品的 ΔC 相差了一個級數。由此可以知道，在 3.3 ML 樣品中的缺陷濃度比 3.06 ML 大了很多。

我們在 3-1-2 有提到，在量測量子點訊號時，3.3 ML 量子點底層的空乏寬度會比 3.06 ML 樣品中的大很多，進而造成在 3.3 ML 中的量子點載子躍遷速度比在 3.06 ML 中的載子躍遷速度慢了很多。而同樣為應力鬆弛量子點的樣品，在 3.3 ML 及 3.06 ML 樣品之間的差異主要僅在於缺陷濃度的差別，因此我們認為缺陷濃度是影響量子點底層空乏寬度大小，進而造成載子躍遷速度不同的主要原因。

3-2 量子點 C-V 模擬

3-2-1 C-V 模擬之模型

在電性量測中，須將空乏區延伸到量子點底層，才能使費米能階掃到量子點能階，能帶圖如圖 3-11 所示。我們將調變的偏壓 dV ，分為跨於量子點底層的 dV_1 及量子點上層 GaAs 的 dV_2 。我們利用高斯定律，可以知道 $dV_1 = (dQ/\epsilon) \cdot L_1$ ；

$dV_2 = (dQ + dQ_{dot} / \epsilon) \cdot L_2$ 。 L_1 、 L_2 分別為量子點底層及上層的空乏區寬度， ϵ 為材料的介電係數、 dQ 為空乏調變的電荷、 dQ_{dot} 為費米能階調變到量子點中的電荷。我們可以得到以下式子：

$$dV = dV_1 + dV_2 = \frac{dQ_1}{\epsilon} l_1 + \frac{dQ_1 + dQ_{dot}}{\epsilon} l_2 = \frac{dQ_1}{\epsilon} \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right) + \frac{dQ_{dot}}{\epsilon} l_2 \quad \text{-----式(1)}$$

及

$$\frac{dV}{dV_1} = \left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right) + \frac{dQ_{dot}}{dV_1} \frac{l_2}{\epsilon} \quad \text{-----式(2)}$$

我們將 dQ_{dot} / dV_1 定義為電容 C_Q ，也相當於量子點中的電荷。而由於樣品量測到的電容 $C = (dQ + dQ_{dot}) / dV$ ，可推導成：

$$C = \frac{dQ_1 + dQ_{dot}}{dV} = \frac{\frac{dQ_1}{dV_1} + \frac{dQ_{dot}}{dV_1}}{\frac{dV}{dV_1}} = \frac{C_1 + C_Q}{\left(1 + \frac{l_2}{l_1}\right) + C_Q \frac{l_2}{\epsilon}} = \frac{(C_1 + C_Q) \cdot C_2}{C_1 + C_2 + C_Q} \quad \text{-----式(3)}$$

C_1 、 C_2 分別為量子點底層和量子點上層空乏區寬度的幾何電容。

經過以上推導，我們可以知道電容模擬的等效電路模型，如圖 3-12。低頻 C-V 量測，可以調變出量子點的電荷，須將 C_Q 考慮進來，量測到量子點偏壓範圍的電容如式(3)所示；而高頻 C-V 量測，將調變不到量子點電荷，量測到的電容可視為量子點底層和上層空乏區電容串聯的結果。這個等效電路模型，在其他團隊的研究中也有使用過[20]。

3-2-2 模擬與高頻實驗數據之擬合

實驗中高頻量測所得到的電容，若可以不考慮量子點調變電荷的電容，得到的實驗 C-V 曲線理論上要可以符合蕭基界面電容、電壓的公式。

因此，我們先利用蕭基界面電容對電壓的公式與 3.06 ML 及 3.3 ML 量測到的 C-V 作對照，如圖 3-13。在 3.3 ML C-V 量測中，由於量子點載子躍遷速率較慢，我們利用高頻量測可以得到沒有量子點平台的 C-V 圖；而在 3.06 ML C-V 量測，載子躍遷速率太快，不論頻率都量到量子點的平台。但我們仍然可以看出趨勢，我們代

入實際摻雜濃度約 $N_d = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，可以發現蕭基界面得到的 C-V 曲線，可以與 3.06 ML 樣品量測的 C-V 中，除了量子點外的前後段 C-V 幾乎可以符合；而對 3.3 ML 樣品量測到的高頻 C-V，只在前段小偏壓處可以擬合，但在量子點後段的偏壓範圍中，實驗得到的電容值比理論的小了很多。

在 3-2-1 中的等效電路模型中，由於我們將量子點上層及底層的空乏區分開代入，因此在 3.3 ML 樣品中量子點後段電容值的下降，我們利用將底層空乏區內的等效摻雜濃度降低為 $N_{d1} = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 代入，將得到擬合的 C-V 曲線，如圖 3-14。

模擬的結果，可知為何 3.3 ML 樣品中載子躍遷速率會因缺陷增加而明顯下降。從 3-1-3 的分析中我們得知，應力鬆弛缺陷主要分布在量子點內與量子點底層，會造成量子點底層 GaAs 的等效背景濃度大幅下降，而使得在量子點底層 GaAs 空乏寬度變寬，進而影響到量子點載子躍遷的速率。

3-2-3 模擬與低頻實驗數據之擬合

我們可以利用 PL 中峰值的分布，得到合理的量子點電荷分布。圖 3-15 (a) (b) 是 3.3 ML 及 3.06 ML 室溫下大功率的 PL 頻譜。從圖中我們可以看到兩個樣品都存在著，主要量子點的基態和第一激發態訊號、InGaAs 應力緩衝層的訊號，以及在低能量的一個額外峰值。

按照 PL 量測到的結果，我們將量子點電荷對能量的分布取為 4 個高斯的分布，如圖 3-16。由量子點導帶與價帶能量為 7:3，我們可以決定主要量子點基態的峰值位於導帶下方 0.252 eV，進而得到其它訊號的分布。第一激發態的峰值位於 0.192 eV、低能量峰值位於 0.3 eV、InGaAs 應力緩衝層位於 0.07 eV。

量子點電荷對能量的分布，即為在 3-2-1 中所提到 C_0 的能量分布，將此分布代入等效電路模型與實驗作比較，如圖 3-17 (a) (b) 和 3-18 (a) (b)。可以發現模擬得到的量子點平台偏壓範圍與實驗中的大致符合，由此可以再次確認以上模擬的合理性。

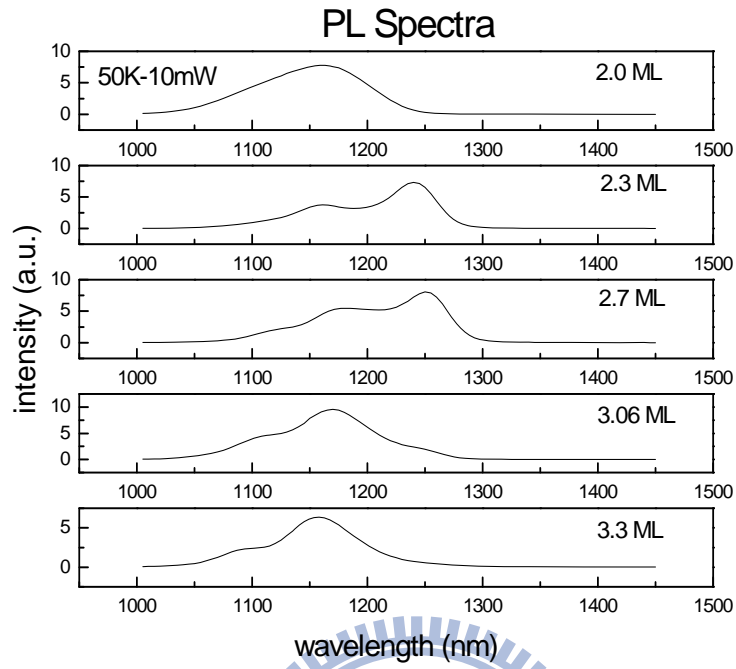


圖 3-1 不同厚度量子點樣品的低溫 PL 頻譜

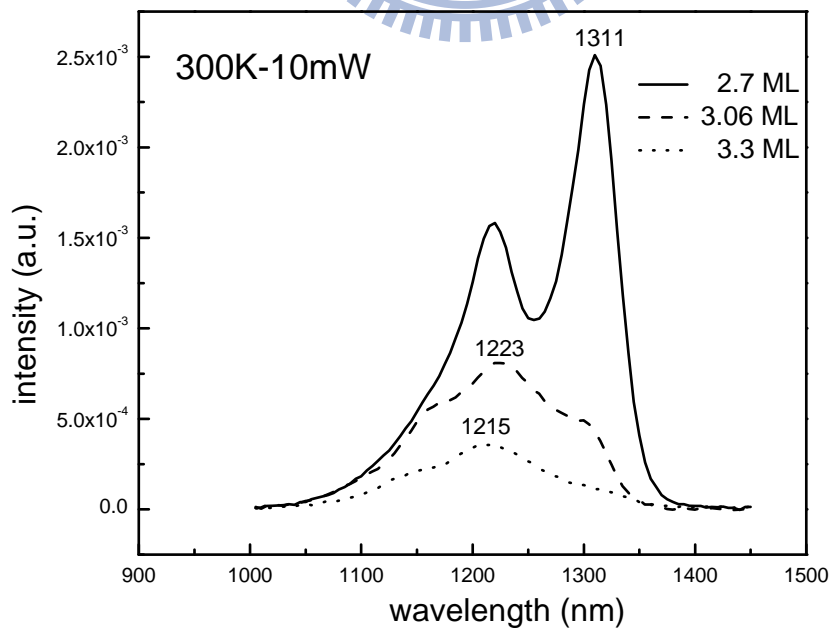


圖 3-2 三個不同厚度量子點樣品的室溫 PL 頻譜

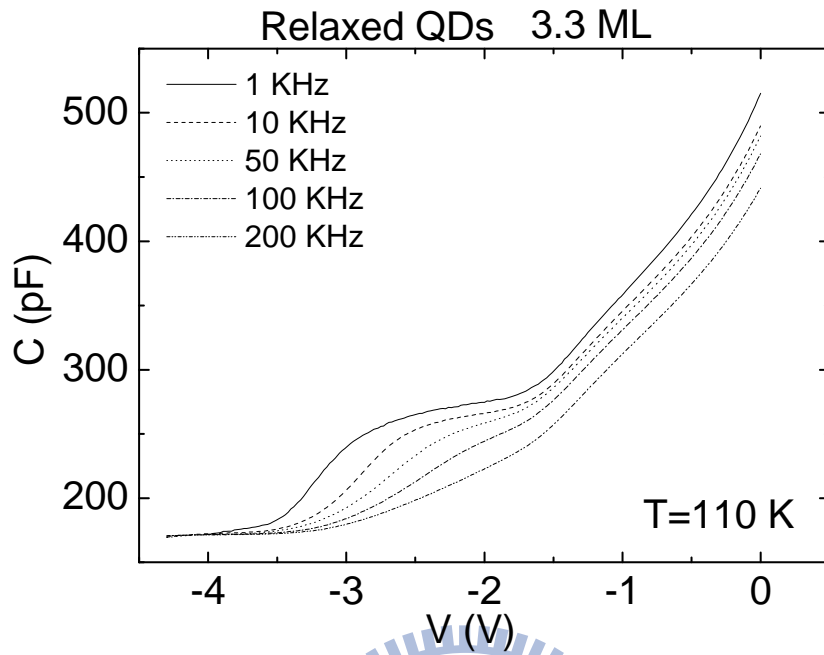


圖 3-3 (a) 3.3 ML 在低溫 100 K 的變頻 C-V 圖

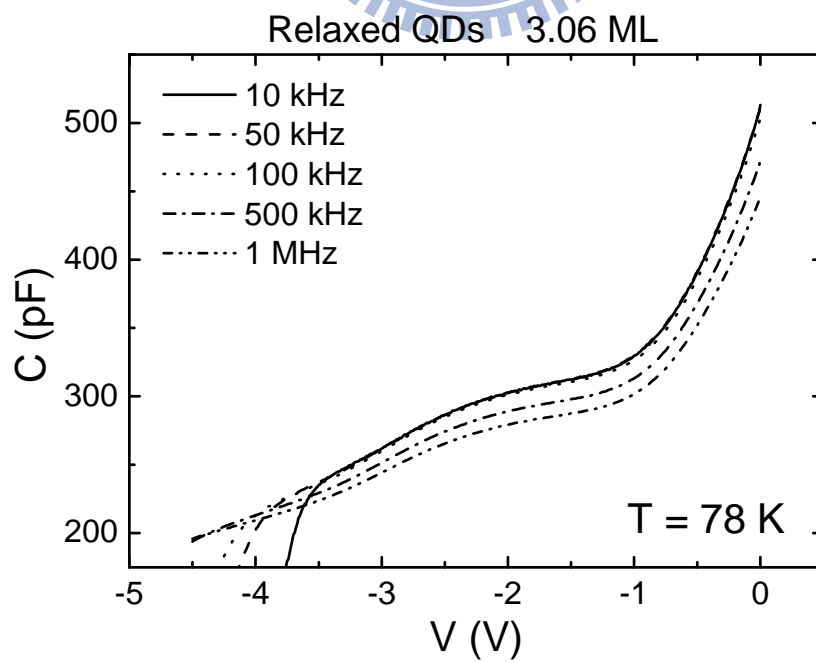


圖 3-3 (b) 3.06 ML 在低溫 100 K 的變頻 C-V 圖

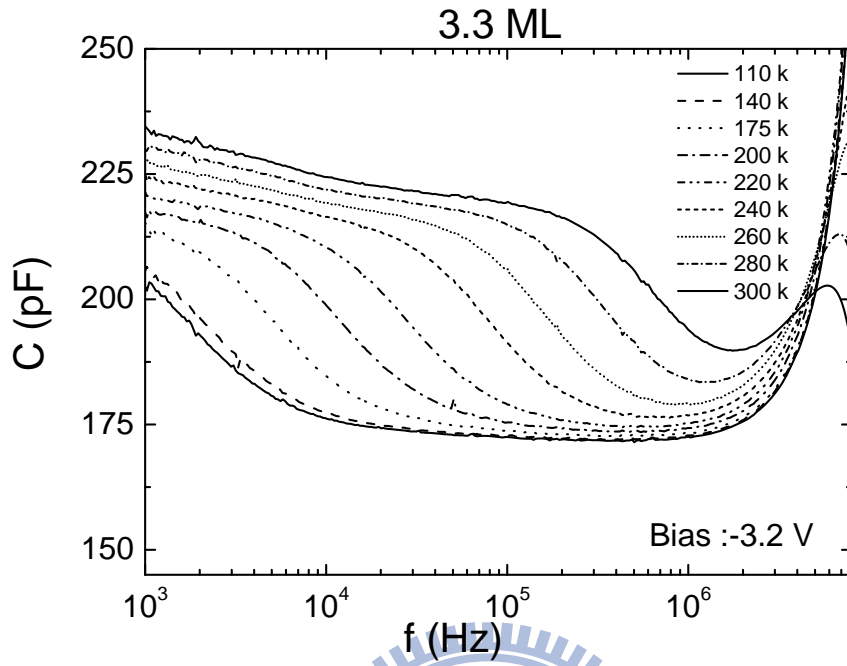


圖 3-4 (a) 3.3 ML 樣品在 -3.2 V 的變溫 C-F 圖

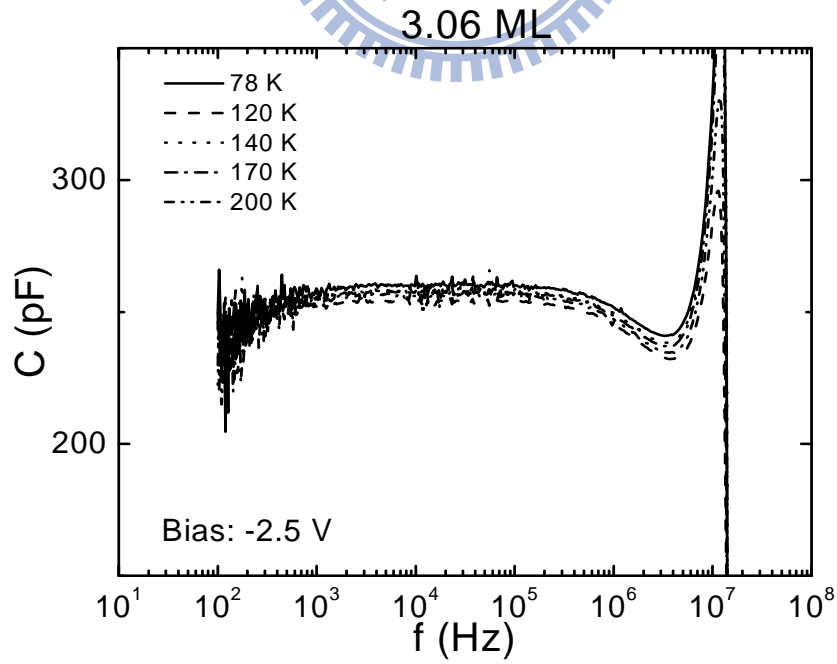


圖 3-4 (b) 3.06 ML 樣品在 -2.5 V 的變溫 C-F 圖

3.3 ML

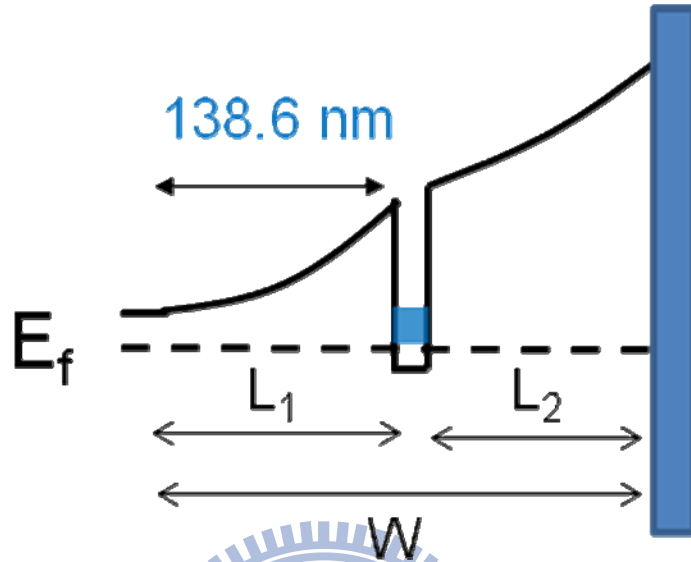


圖 3-5 (a) 計算 3.3 ML 樣品下方空乏區寬度示意圖

3.06 ML

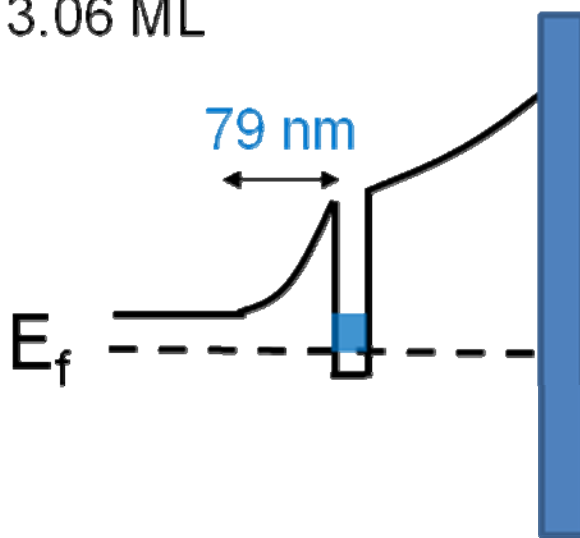


圖 3-5 (b) 計算 3.06 ML 樣品下方空乏區寬度示意圖

3.3 ML TEM

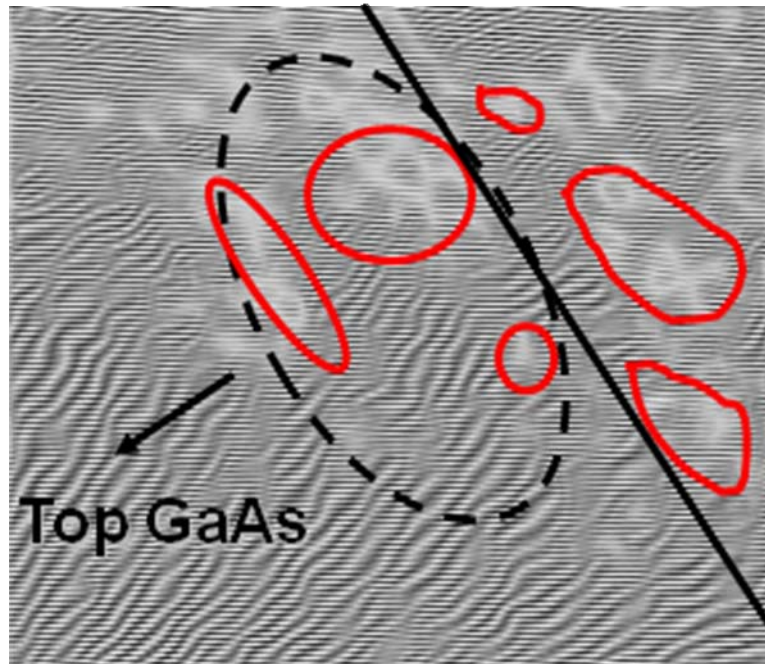


圖 3-6 3.3 ML 樣品 TEM 傅立葉轉換圖與缺陷分佈

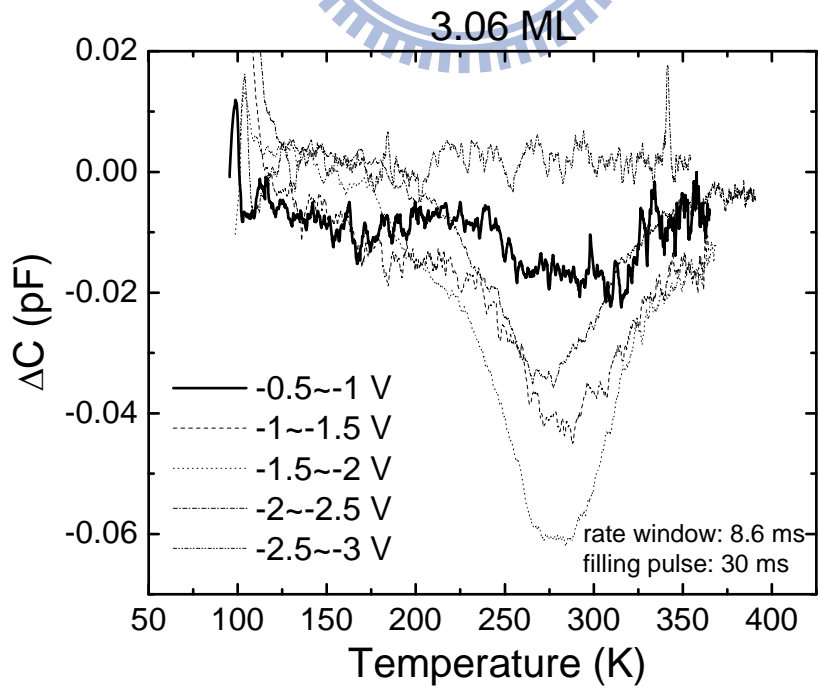


圖 3-7 (a) 不同偏壓下 3.06 ML 樣品的 DLTS

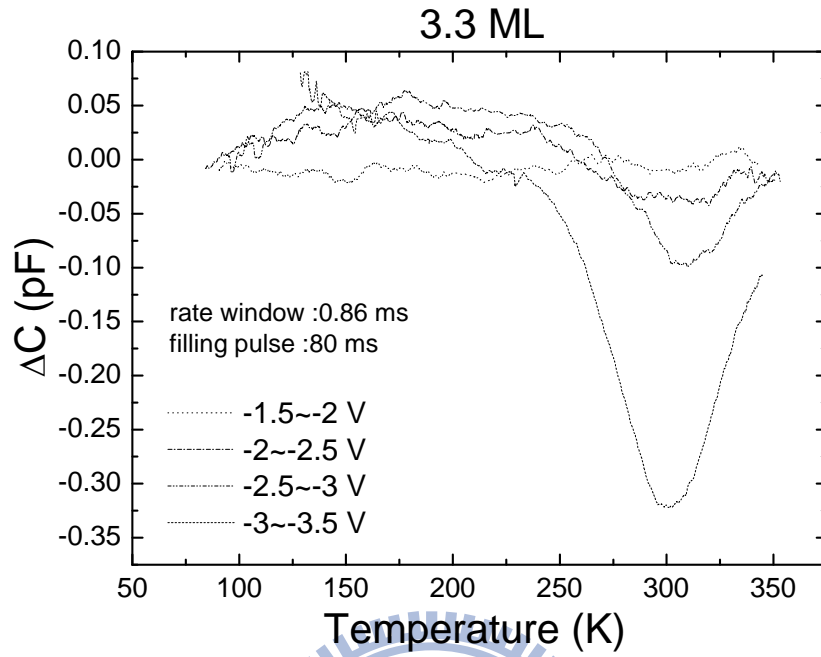


圖 3-7 (b) 不同偏壓下 3.3 ML 樣品的 DLTS

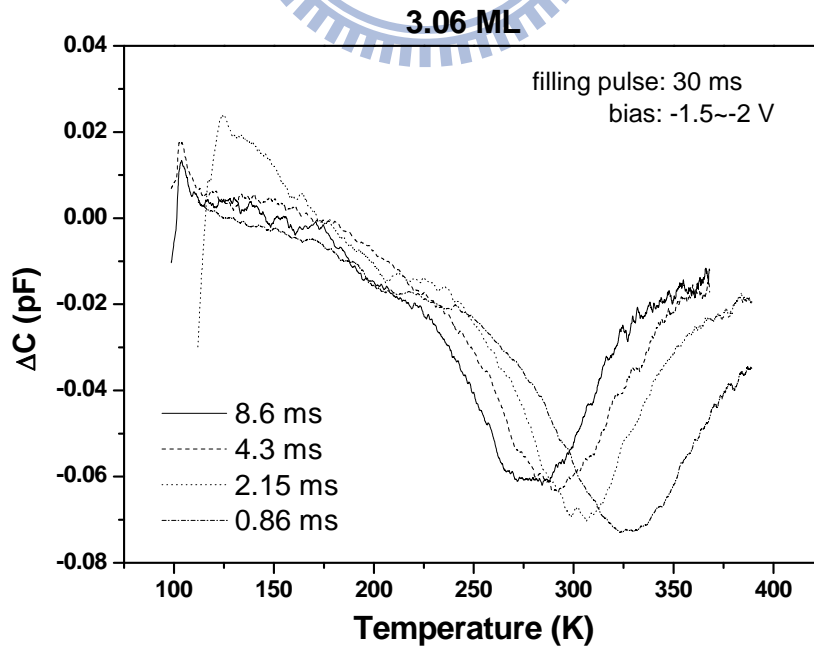


圖 3-8 (a) 不同 rate window 下 3.06 ML 樣品的 DLTS

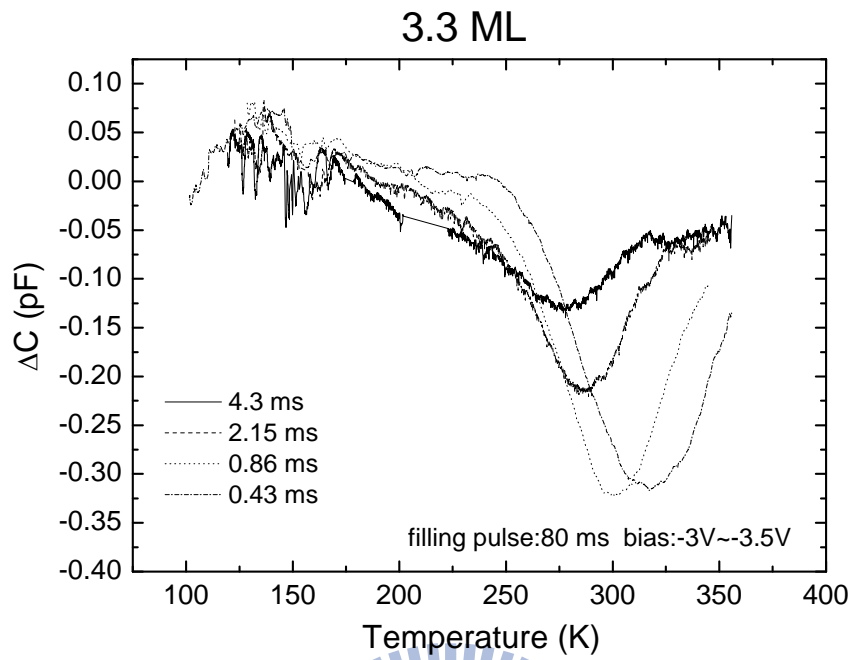


圖 3-8 (b) 不同 rate window 下 3.3 ML 樣品的 DLTS



| | 3.06 ML (-1.5~-2 V) | 3.3 ML (-3~-3.5 V) |
|--|--------------------------------|-------------------------------|
| Ea (meV) | 380 | 383 |
| σ (cm⁻²) | 7.41E-17 | 1.42E-16 |

表 3-1 兩片樣品中缺陷的活化能及捕捉截面積

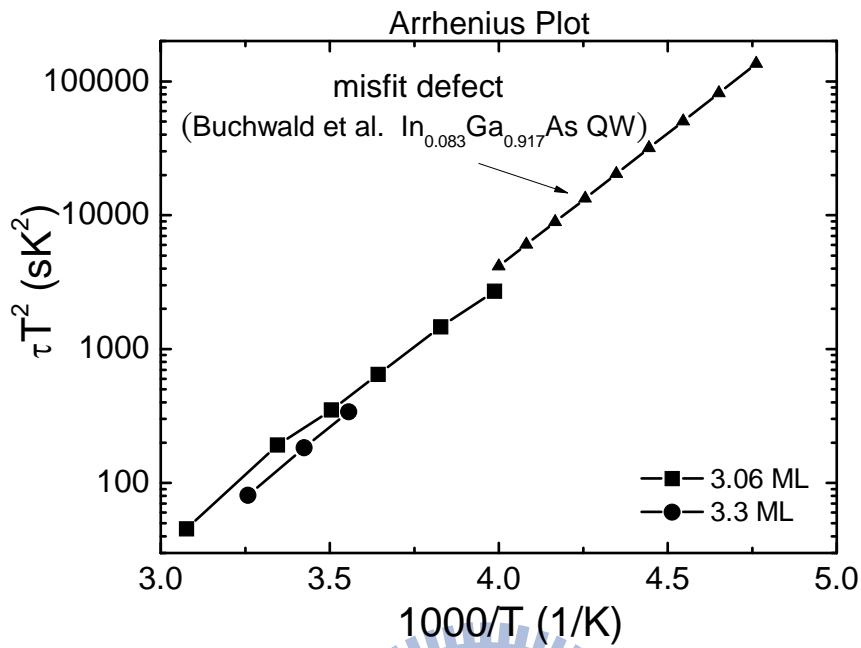


圖 3-9 兩片樣品與差排缺陷的阿瑞尼士圖比較

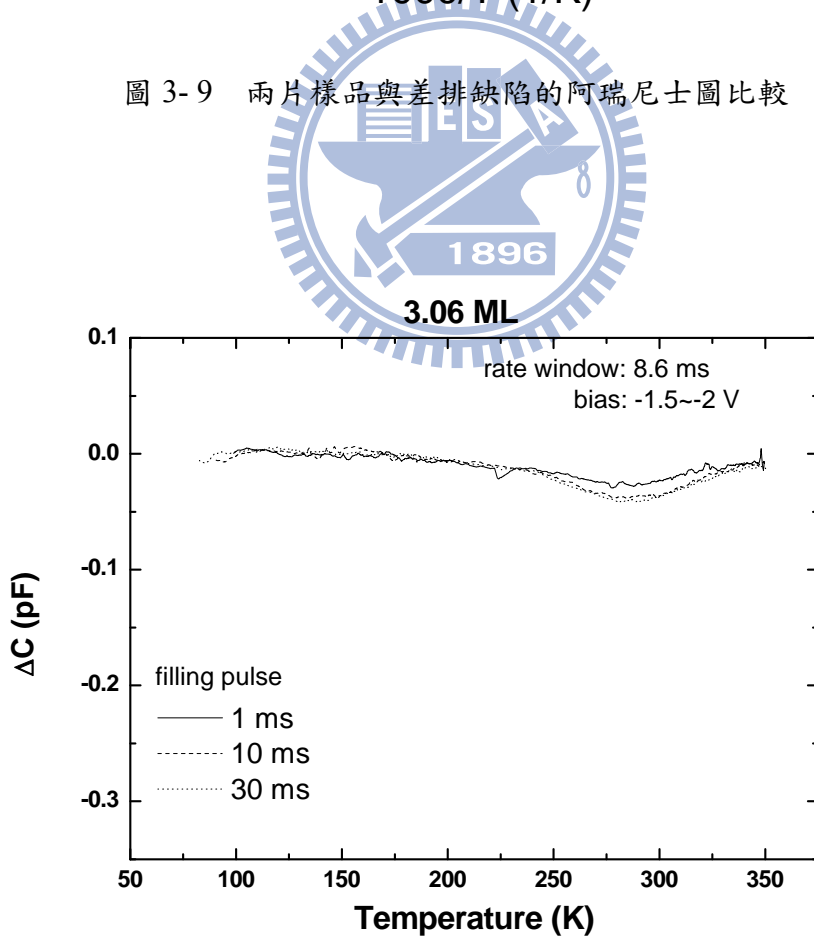


圖 3-10 (a) 不同 filling pulse 下 3.06 ML 樣品的 DLTS

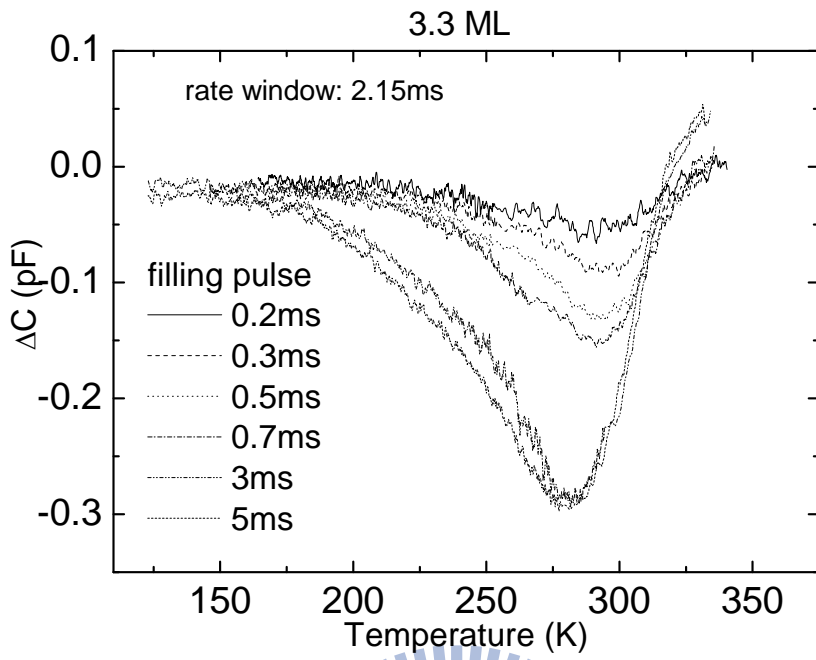


圖 3-10 (b) 不同 filling pulse 下 3.3 ML 樣品的 DLTS

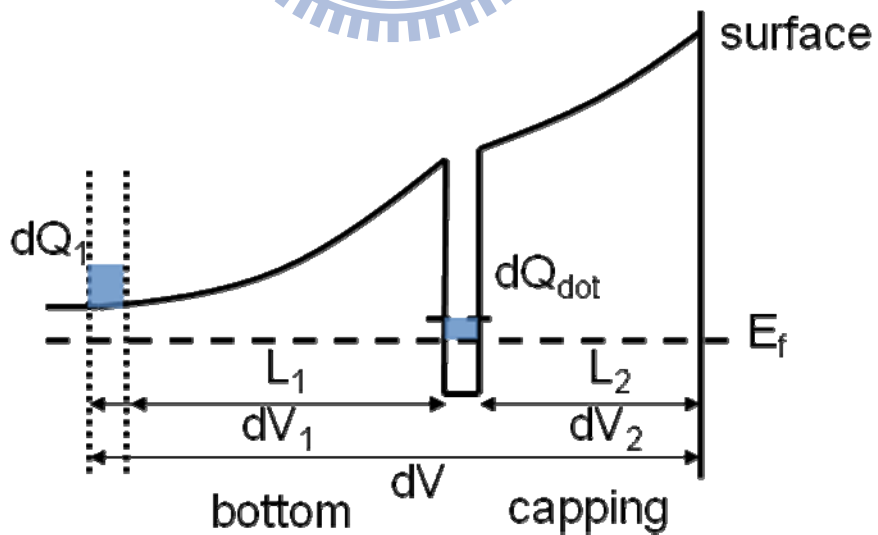


圖 3-11 費米能階掃到量子點時的能帶示意圖

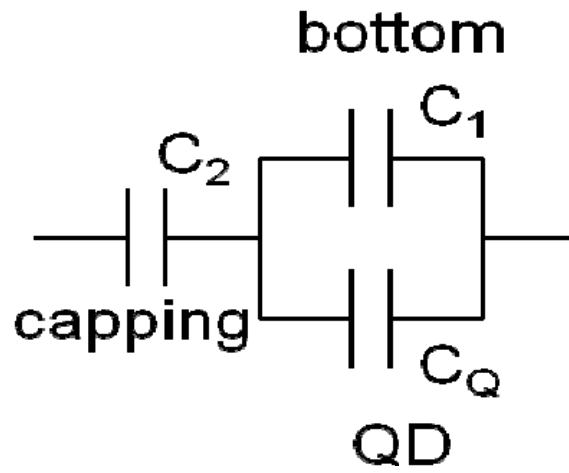


圖 3-12 電容模擬等效電路圖

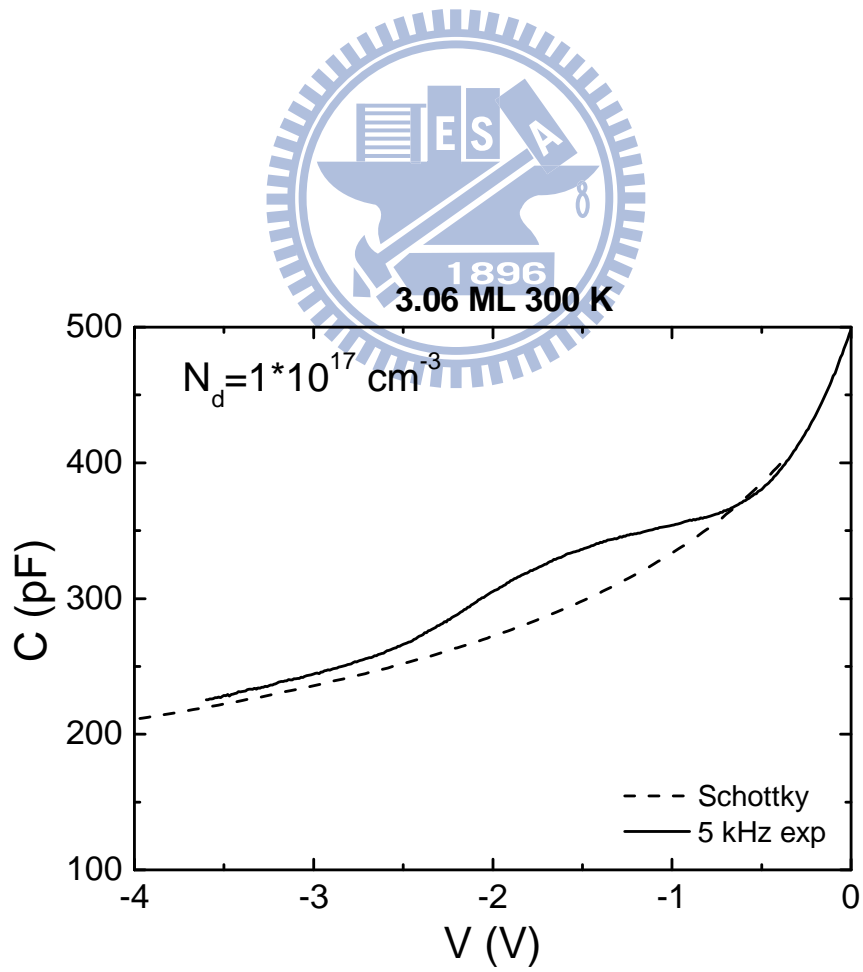


圖 3-13 (a) 蕭基接面理論 C-V 圖與 3.06 ML 樣品實驗 C-V 比較

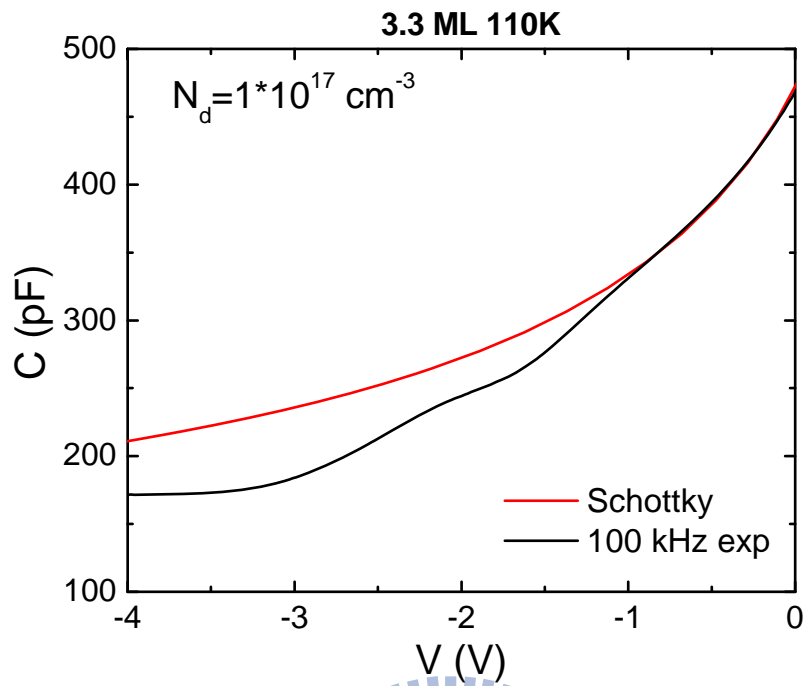


圖 3-13 (b) 蕭基接面理論 C-V 圖與 3.3 ML 樣品實驗高頻 C-V 比較

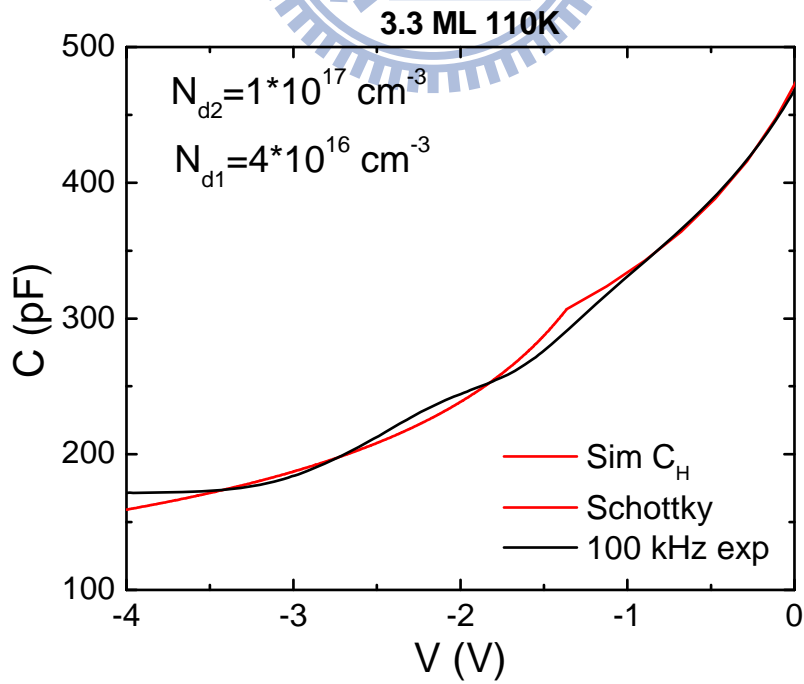


圖 3-14 3.3 ML 樣品模擬與實驗高頻 C-V 比較

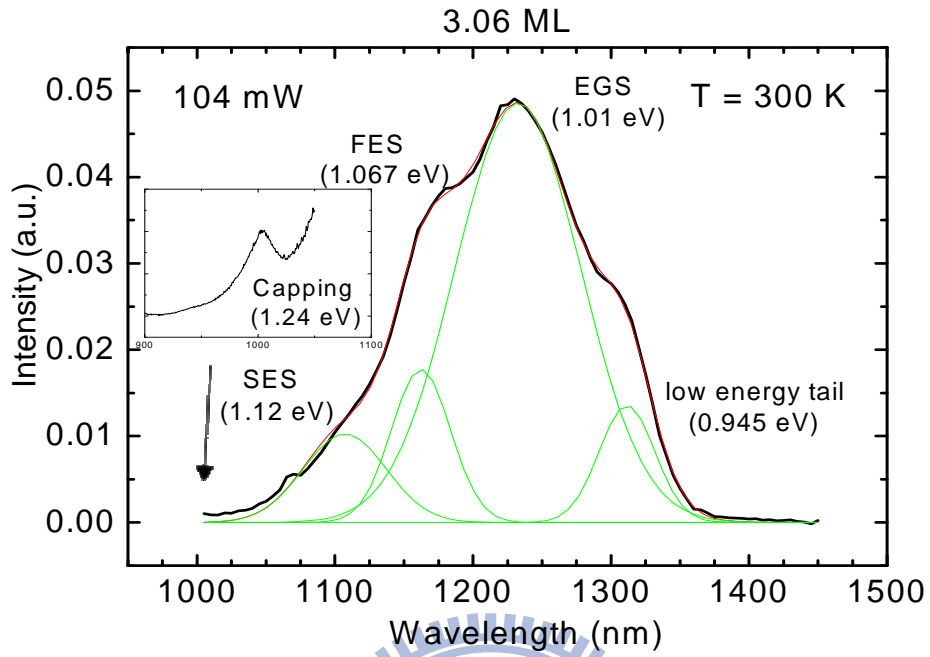


圖 3-15 (a) 3.06 ML 樣品在室溫下大功率 PL 頻譜

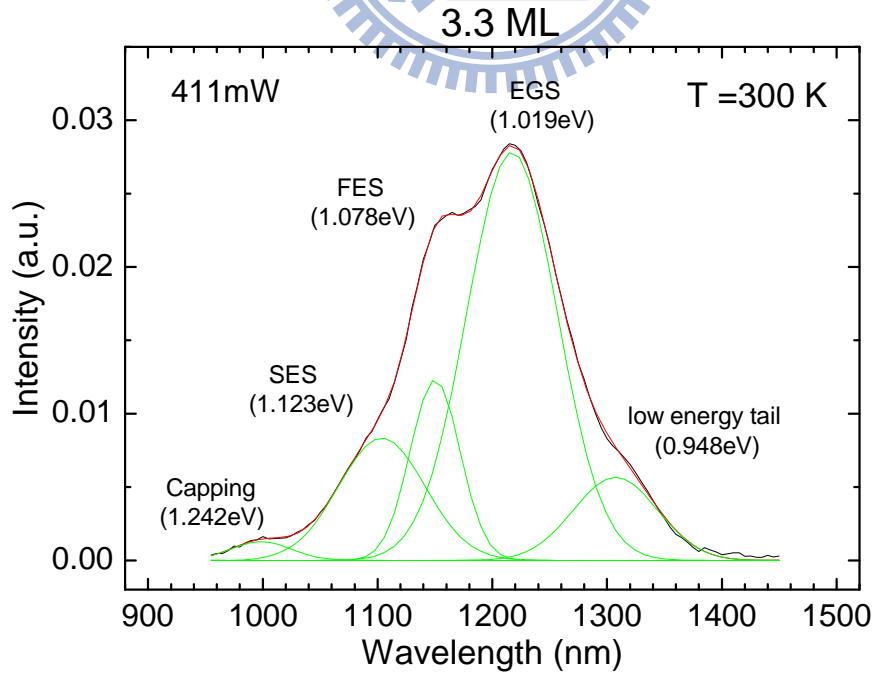


圖 3-15 (b) 3.3 ML 樣品在室溫下大功率 PL 頻譜

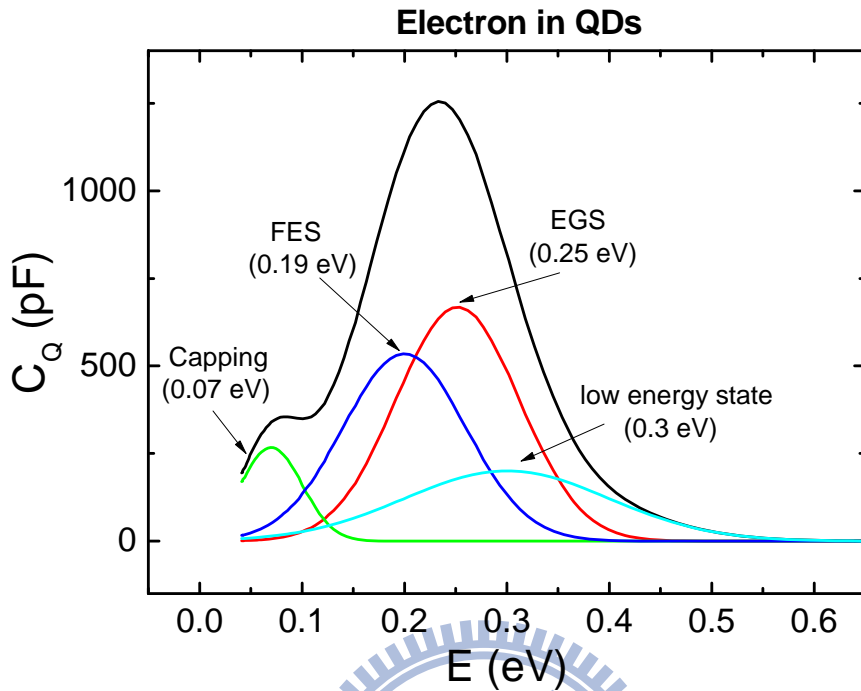


圖 3-16 量子點中電荷對能量的分布

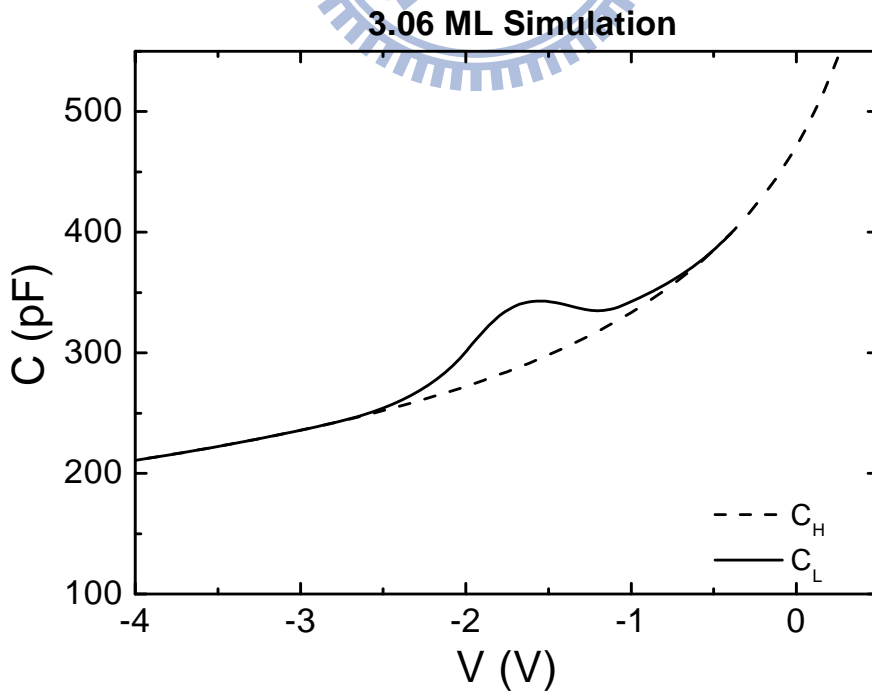


圖 3-17 (a) 3.06 ML 樣品高低頻 C-V 模擬圖

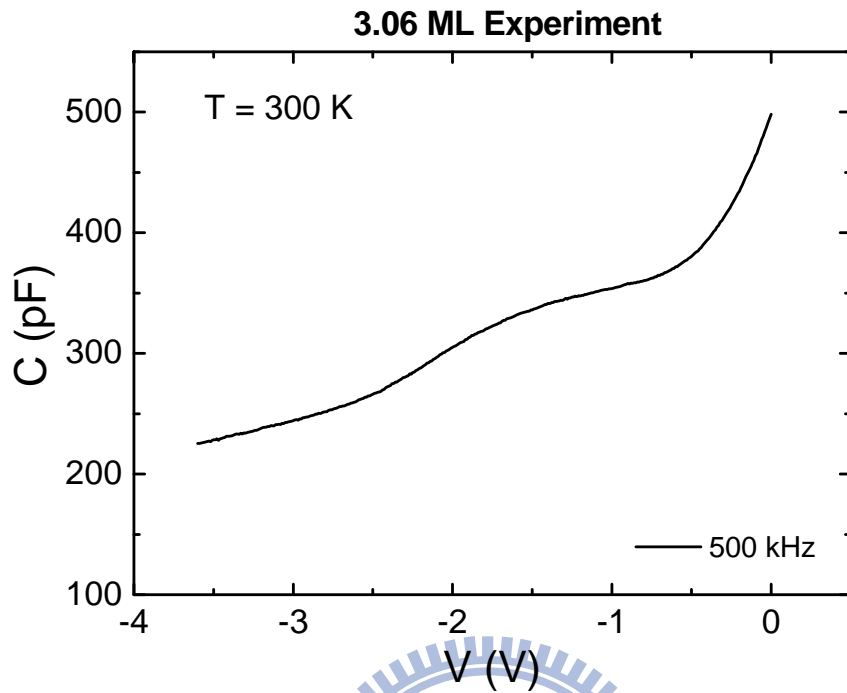


圖 3-17 (b) 3.06 ML 樣品高低頻實驗 C-V 圖

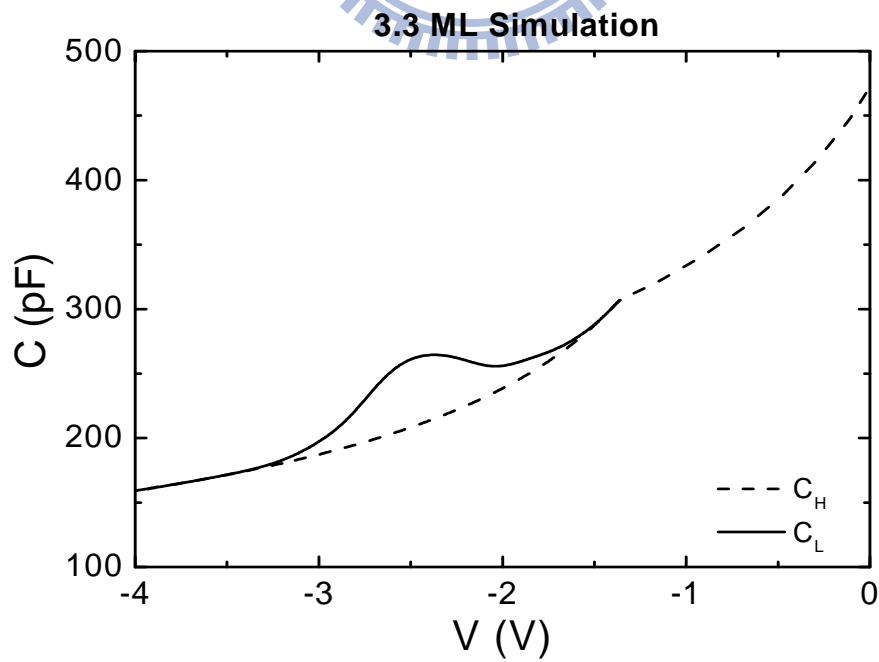


圖 3-18 (a) 3.3ML 樣品高低頻 C-V 模擬圖

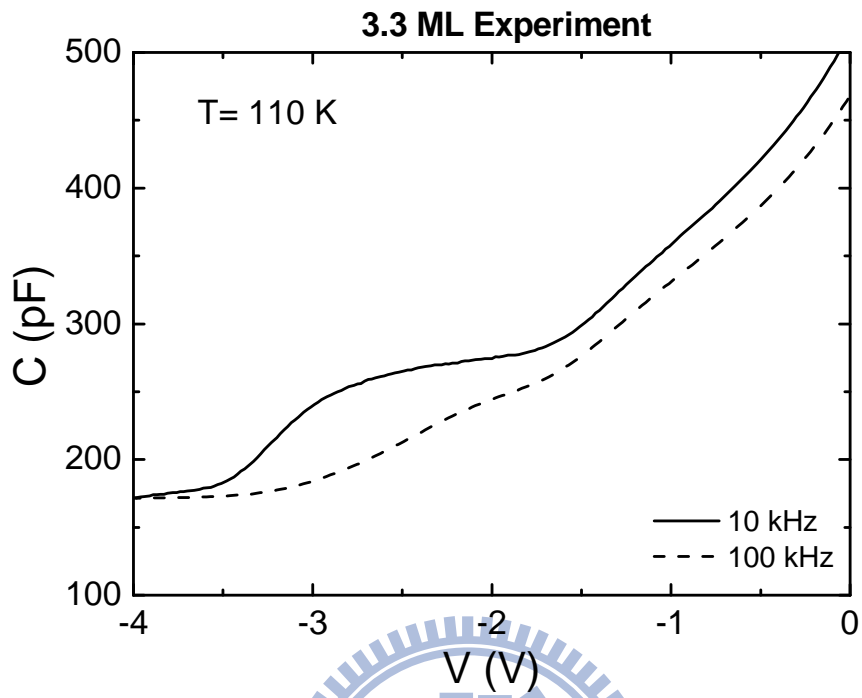
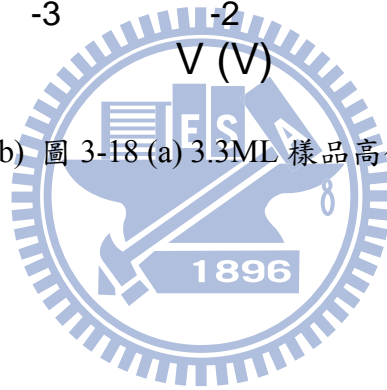


圖 3-18 (b) 圖 3-18 (a) 3.3ML 樣品高低頻 C-V 實驗



第四章 應力鬆弛引發兩群量子點之探討

在前面有提到，在應力鬆弛量子點樣品的 PL 中，我們觀察到除了量子點基態、激發態的峰值之外，在發光波長 1300 nm 的波段出現了一個額外的峰值，我們認為是來自於另外一群量子點的訊號。在本章，我們將針對兩群量子點形成的原因及互相載子轉移的現象作討論。

4-1 兩群量子點的解析

4-1-1 PL 分析

在 3.06 ML 及 3.3 ML 的應力鬆弛量子點和 2.7 ML 正常量子點的 PL 圖中，如圖 3-2，我們可以看到應力鬆弛之後，PL 訊號會有強度明顯下降、主要峰值藍移以及長波長出現額外訊號等現象發生。PL 強度的下降，是由於在應力鬆弛樣品中缺陷的產生，造成非發光性躍遷的路徑增加所造成。

在單純考慮應力的條件下，一般對於量子點能帶結構的理論計算[21]認為，當量子點所受到的應力下降時，能隙寬度會下降，也就是在 PL 上會發生紅移的現象。這與我們實驗所得到在應力鬆弛之後，PL 主要峰值藍移的發現有所抵觸。而除了應力大小，影響量子點發光波段的主要因素還有：量子點的組成元素比例及量子點的大小等，必須加入考慮。

在之前的研究中[22]，曾經比較過 2.7 ML 樣品與 3.3 ML 樣品室溫下變功率 PL 的量測，現在加入了 3.06 ML 樣品一起作比較，如圖 4-1 (a) (b) (c)所示。為了比較樣品 PL 波長隨入射光強度消長的情形，分別對圖形做了歸一化的動作，圖 4-1(a)中 2.7 ML 樣品針對主要峰值作歸一化後，發現其他兩個 peak 強度有隨著激發功率變大而成長的比主要峰值更快的趨勢，由此推估這些峰值為同一群 QDs 的基態與激發態訊號[23]。

而從 3.3 ML 及 3.06 ML 樣品的室溫變功率 PL，如圖 4-1(b) (c)，發現長波長峰

值的成長速率比其他峰值慢，可以推測這是應力鬆弛造成兩群發光能量不同 QDs 所造成。

4-1-2 TEM 分析

我們接著對 3.06 ML 應力鬆弛量子點的樣品作 TEM 的研究，並與 2.7 ML 正常量子點的 TEM 作比較，如圖 4-2。在 TEM 中，比較亮的區域是原子序較大的原子較多的部份，在我們的樣品中就是 In 聚集的地方。在 2.7 ML 正常樣品的 TEM 中，可以看到位在量子井的量子點中，並且發現 In 均勻分布在各個量子點中。在 3.06 ML 應力鬆弛樣品的 TEM 中，量子點的大小沒有明顯與 2.7 ML 正常樣品有所差異，但可以看到除了形貌正常的量子點之外，還存在著將 In 擴散到量子點及量子井外、甚至到上層 GaAs 的量子點。當量子點將 In 向外擴散，同時代表著 Ga 會交互擴散到量子點之中。這個行為會造成量子點的能階提升，造成能隙的增加，這可以解釋為何在之前的 PL 中主要峰值會發生藍移的現象。

我們將正常形貌與有 In 向外擴散的量子點分別作高解析 TEM 的分析，如圖 4-3 (a) (b)。我們藉由傅立葉轉換的技術可以分辨出差排缺陷，並將其分布與原本的量子點 TEM 圖作比較。我們可以看到，正常形貌的量子點具有較多的差排缺陷分布在附近，反而在有 In 向外擴散的量子點上，差排缺陷的數量明顯少了許多。我們可以因此而推測，在樣品中正常形貌的量子點，也是發生了應力鬆弛的量子點，其釋放應力的方式是藉由在量子點附近產生差排缺陷。

4-1-3 InAs/InGaAs DWELL 結構中應力鬆弛引發之兩群量子點

藉由上述的實驗，我們發現在 InAs/InGaAs DWELL 結構中，由於量子點釋放應力的方式有兩種：一種是將 In 向外擴散，會造成量子點能隙增加，；另一種則是在量子點附近產生差排缺陷。從樣品的 PL 圖，如圖 3-2，可以發現將 In 向外擴散的量子點訊號中仍保有基態以及第一激發態兩個峰值，說明這群量子點的發光特性並沒

有被破壞太多，也可以證實這群量子點被差排缺陷影響較小。而產生差排缺陷的量子點則只觀察得到基態的訊號。

我們認為會造成量子點應力鬆弛有兩種方式的原因是，由於我們在 InAs 量子點上方蓋了一層 InGaAs 應力緩衝層所造成。在 InAs 和 GaAs 中間長一層 InGaAs 可以減緩應力以及晶格的不匹配。但當我們成長量子點超過臨界厚度時，InAs 和下方 GaAs 有可能因為晶格不匹配程度較強，而因此會產生差排缺陷來釋放應力；沒有產生差排缺陷的量子點，則因為 InAs 受到應力的累積會在 InGaAs 緩衝層達到最大，進而產生了 In 向上方大量擴散的效應發生。

而藉由以上的分析，使得我們了解量子點在 DWELL 結構中發生應力鬆弛的機制，除了會造成差排缺陷的產生，也會引發兩群發光能量不同的量子點。

4-2 兩群量子點間載子轉移效應

4-2-1 3.06 ML 量子點樣品之變溫 PL 分析

根據以上的實驗分析，我們知道在應力鬆弛量子點樣品中有著兩群量子點的分布。我們進行了 3.3 ML 及 3.06 ML 樣品的變溫 PL 量測，如圖 4-4 (a) (b)。而由於在 3.06 ML 樣品的 PL 中，長波長訊號比較明顯，我們針對 3.06 ML 的變溫 PL 作分析。

在 3.06 ML 的 PL 頻譜中，可以看到主要存在著三個峰值，分別為 In 向外擴散量子點的基態以及第一激發態和產生差排缺陷量子點的基態訊號。對 3.06 ML 樣品在不同溫度下量測的 PL 圖作三個高斯分布的擬合，如圖 4-5 (a) (b)，可以得到各個峰值的資訊，包含峰值的半高寬、積分強度及能量位置。

我們主要想觀察兩群量子點之間的交互作用，將針對兩群量子點基態的數據作對照。以下為了方便起見，我們將 In 向外擴散的量子點稱為高能量量子點；產生差排缺陷的量子點稱為低能量量子點。在圖 4-6 中，我們將兩群量子點基態的半高寬對溫度作圖。一般而言，由於溫度上升時聲子散射的效應增加，量子點 PL 的半高寬會隨溫度升高而升高。然而我們發現高能量量子點的半高寬隨著溫度升高有會先下降

才又上升的趨勢。一些別的團隊研究[24]中認為，這是由於隨著溫度升高，這群量子點內的載子會有重新分布的現象發生所造成。這群量子點的能階深淺呈一個高斯分布，其中較淺能階的量子點，會隨著溫度升高而使原本侷限的載子脫逃，並而有可能在此時會掉入能階較深，因此造成半高寬的分布集中到較深能階的量子點區域。

圖 4-7 則是將兩群量子點基態的 PL 積分強度先分別對最低溫 PL 積分強度的值作歸一化，再對溫度作圖。一般而言，因為溫度升高量子點侷限的載子會減少的緣故，PL 積分強度會隨著溫度而下降。但是我們卻在低能量量子點積分強度對溫度的變化中發現，溫度在 140 K 附近時，會有異常上升的現象發生。這代表在 140 K 溫度範圍，低能量量子點內侷限的載子有所增加。

高能量量子點的半高寬下降及低能量量子點積分強度的增加，我們認為這是由於載子隨溫度作重新分布時，兩群量子點間會有載子轉移的現象發生。如圖 4-8 (a) (b)，當溫度升高，載子會從高能量量子點掉入低能量量子點中，使得低能量量子點的 PL 訊號增強所造成。

這個量子點間載子轉移現象在其他團隊之前的研究中[25]曾經作過討論，發生載子轉移的溫度與我們大致上相同。在低溫時，不會發生載子的轉移；當溫度升高到約 140 K，使得載子轉移發生。研究中認為，載子可能是多聲子輔助穿隧效應 (Multiphonon-assisted Tunneling Process) 而轉移到其他量子點。

圖 4-10 則為高斯擬合換算出兩群量子點峰值間能量差對溫度的變化。我們也可以發現，當溫度同樣上升到 140 K 附近時，量子點間能量差會有明顯下降。能量差的下降，會造成多聲子輔助穿隧機率的增加。而溫度上升，聲子效應的增加也同樣會使得載子轉移效應更容易發生。

4-2-2 3.3 ML 量子點樣品之 G-F 分析

在之前的研究[26]中，我們曾經在 3.3 ML 樣品的 G-F 量測中發現也有兩群載子轉移的效應。G-F 量測中的峰值所在的頻率即為量子點載子躍遷的速率。由於 3.3 ML

樣品中的量子點載子躍遷在低溫時，會由穿隧效應主導，載子躍遷速率大致上不隨溫度改變。而如果是由熱激發主導載子躍遷，應該要隨著溫度上升而變快。從圖 4-11 中，我們卻可以發現，當量測溫度為 110 K 時，載子躍遷速率在 2×10^4 Hz；而當溫度上升至 140 K 附近溫度時，G-F 的峰值反而往低頻移動。這代表著當溫度升高，載子躍遷速率反而變慢。

圖 4-12 則是將載子躍遷的時間常數對溫度作圖，也可明顯看到，數據在 140 K 會出現 S 型的轉折。這種現象的產生，同樣歸因於兩群量子點載子轉移效應發生。在低溫時，有較多載子侷限於高能量量子點中。由於高能量量子點的能階較淺，使得 G-F 量測到的載子躍遷速率會在比較快的速度；當溫度升高到 140 K，在高能量量子點中的載子大部分掉入了低能量量子點中。由於低能量量子點的能階較深，我們在這個溫度範圍會量到比低溫時還慢的載子躍遷速率。

由光性量測中發現的兩群量子點間載子轉移現象，讓我們可以驗證在電性量測上這個現象是由於兩群量子點間載子轉移所造成。在 3.06 ML 樣品的 PL 量測上低能量積分強度發生明顯增加和 3.3 ML 樣品 G-F 量測到載子躍遷速率下降所出現的溫度區間都大約為 140 K 上下，表示的確是相同的效應所導致。雖然是在不同樣品所發現到的現象，但由於兩個樣品在 PL 上都有看到低能量量子點的訊號，而且樣品間差異僅在於缺陷數量的多寡，我們認為是可以相互印證的。

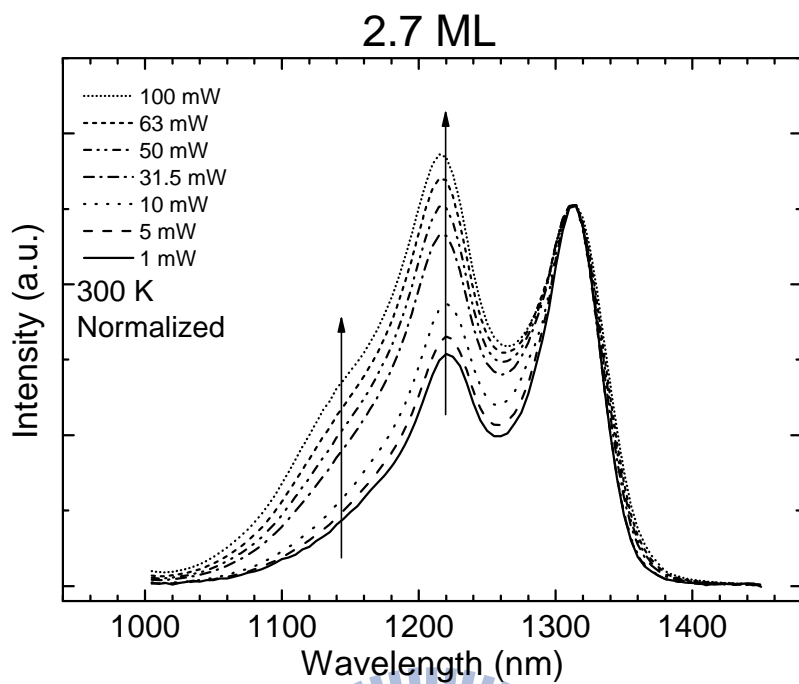


圖 4-1 (a) 2.7 ML 樣品室溫變功率 PL 頻譜

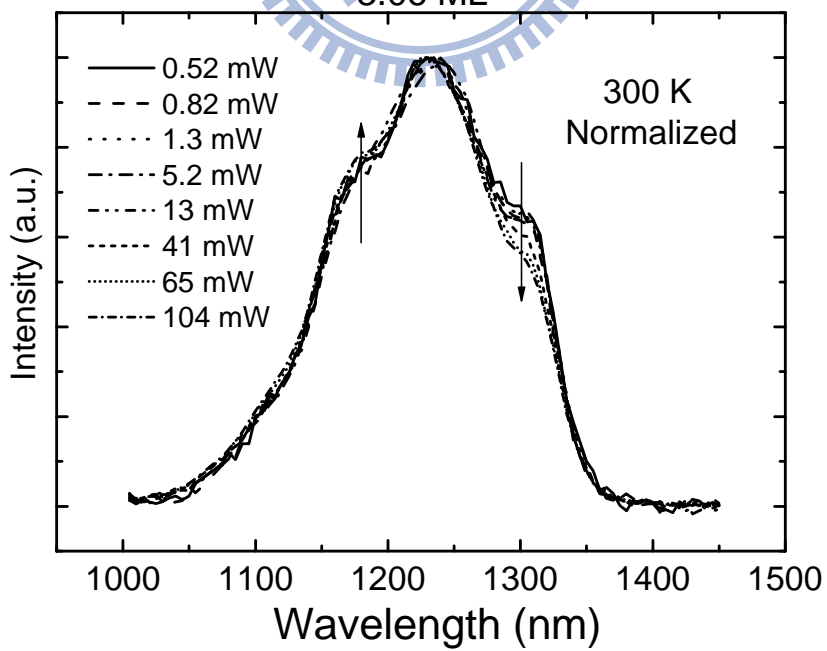


圖 4-1 (b) 3.06 ML 樣品室溫變功率 PL

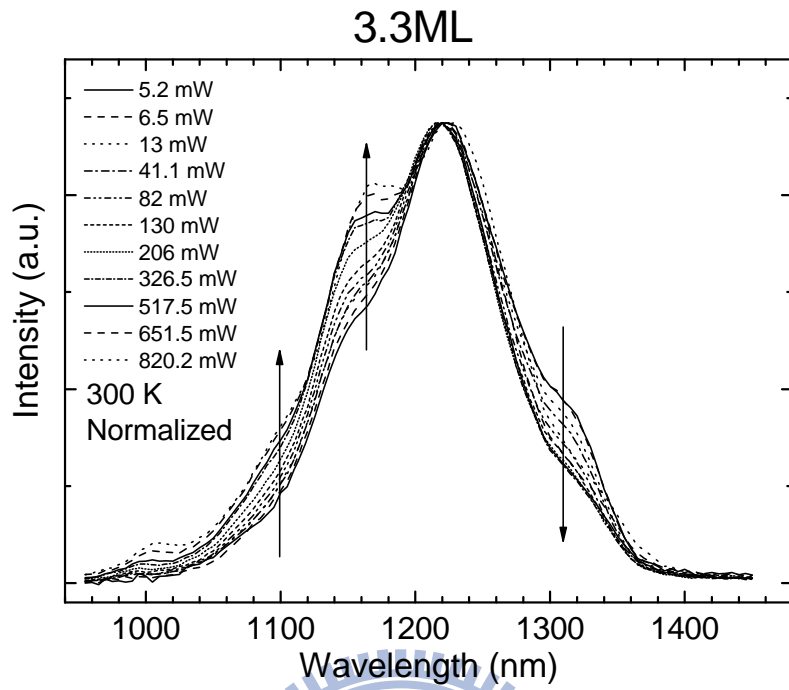


圖 4-1 (c) 3.3 ML 樣品室溫變功率 PL 頻譜

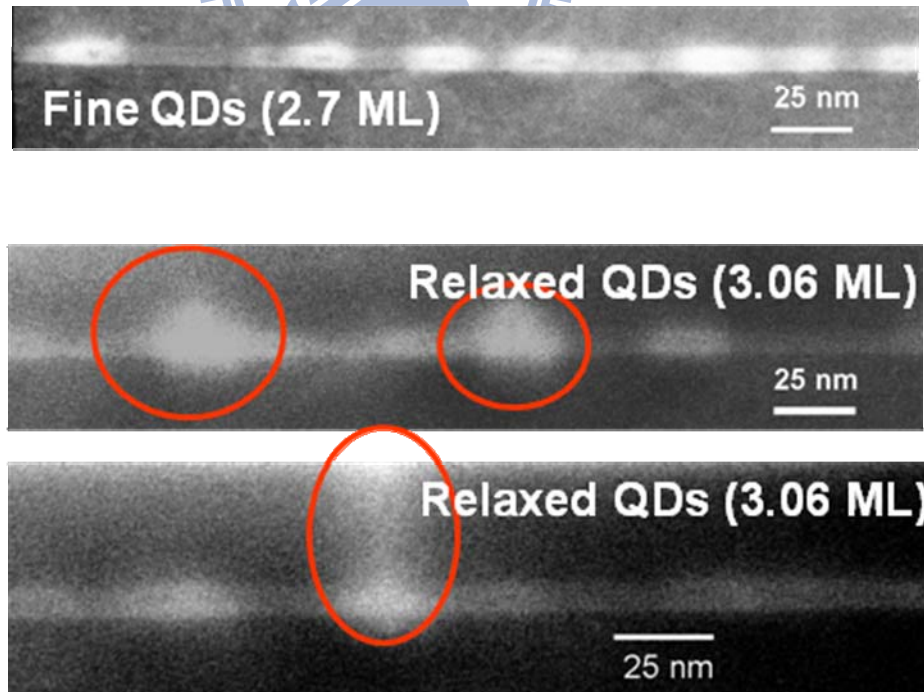


圖 4-2 2.7 ML 正常樣品與 3.06 ML 應力鬆弛樣品 TEM 比較

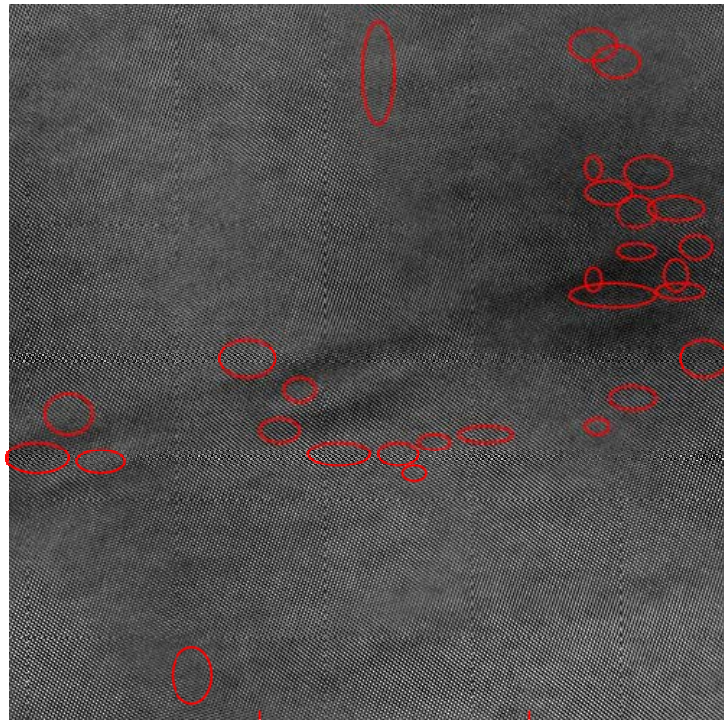


圖 4-3 (a) 3.06 ML 樣品低能量量子點 TEM 缺陷分布

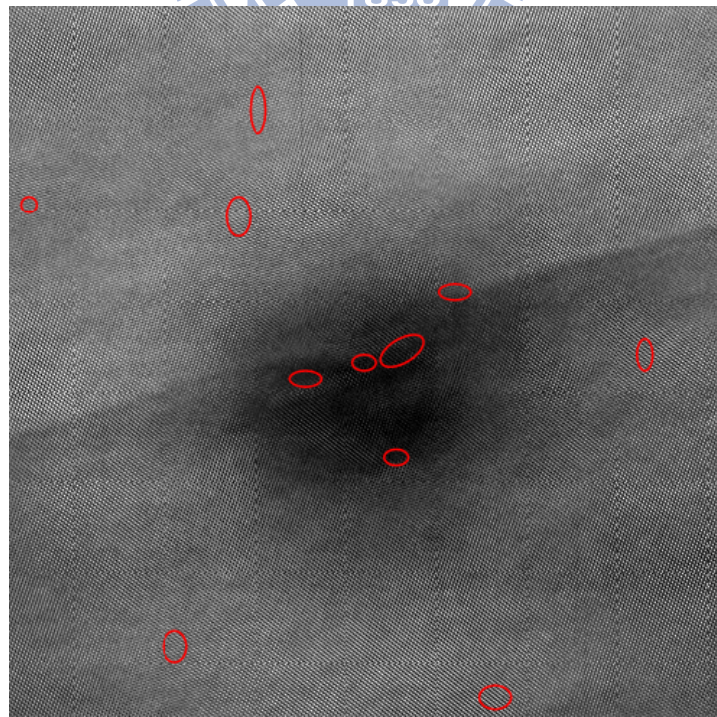


圖 4-3 (b) 3.06 ML 樣品高能量量子點 TEM 缺陷分布

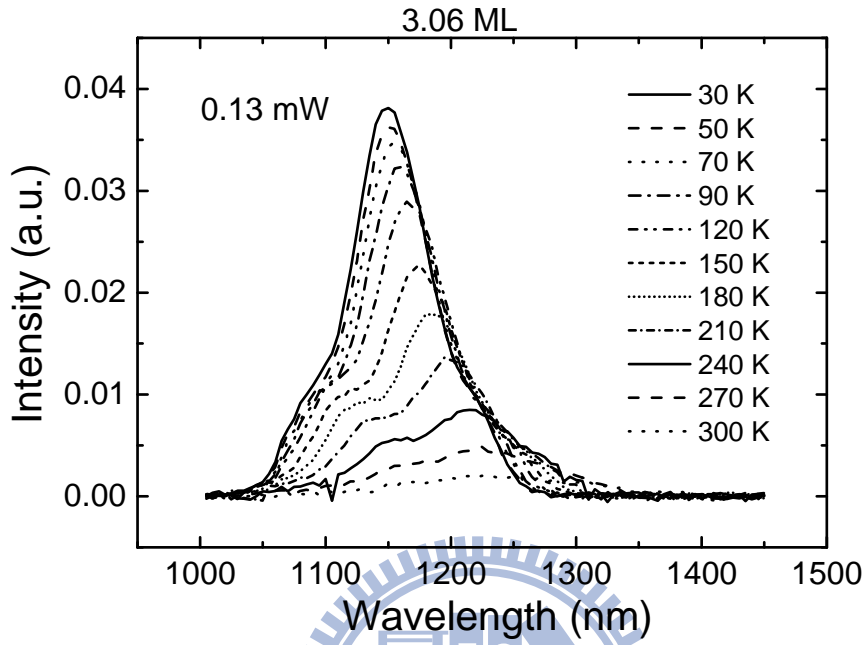


圖 4-4 (a) 3.06 ML 樣品變溫 PL 頻譜

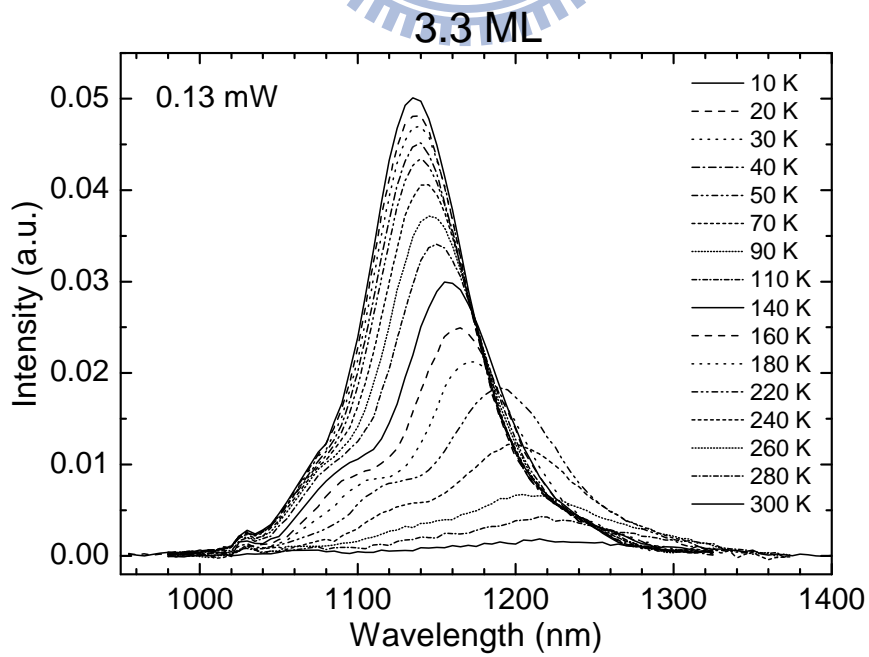


圖 4-4 (b) 3.3 ML 樣品變溫 PL 頻譜

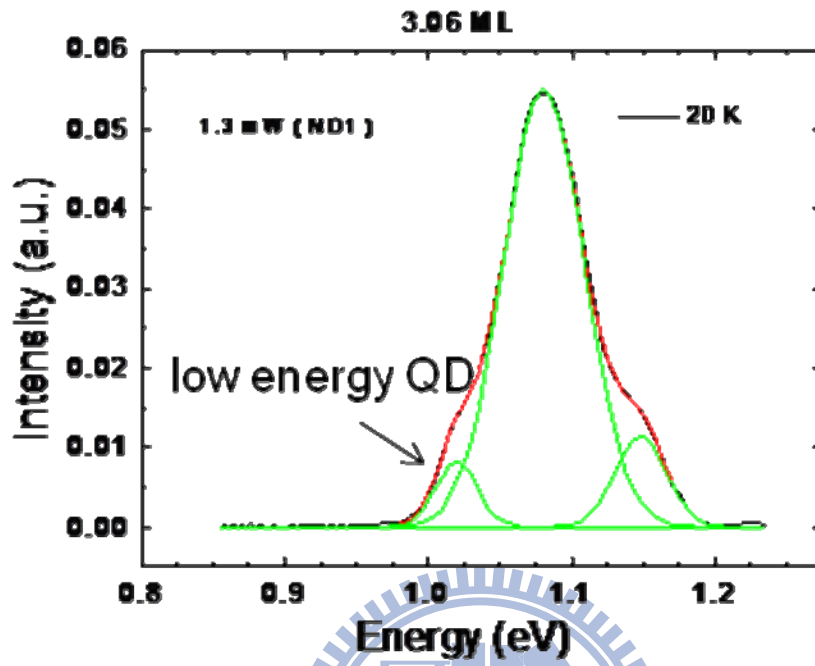


圖 4-5 (a) 3.06 ML 樣品低溫 20 K PL 頻譜高斯擬合

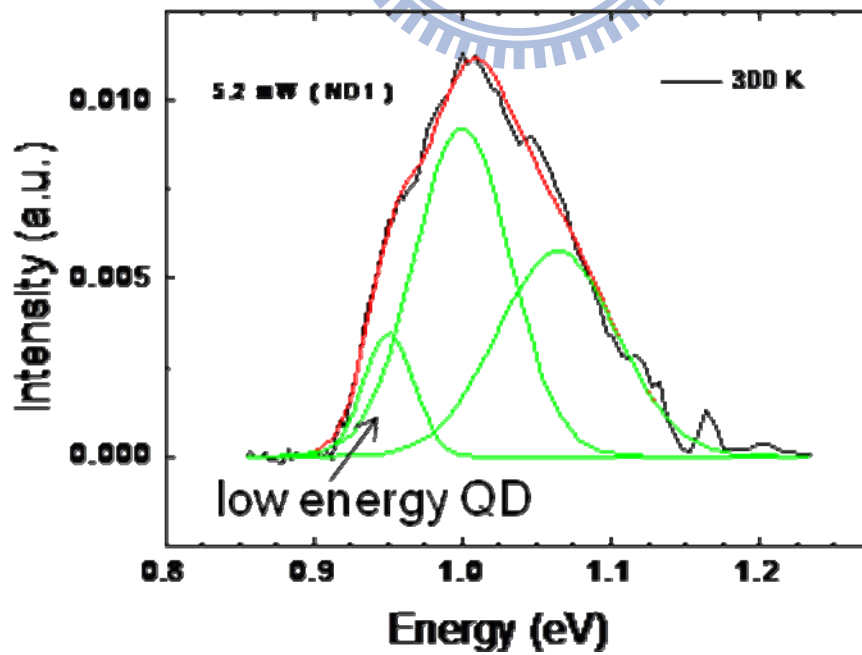


圖 4-5 (b) 3.06 ML 樣品高溫 300 K PL 頻譜高斯擬合

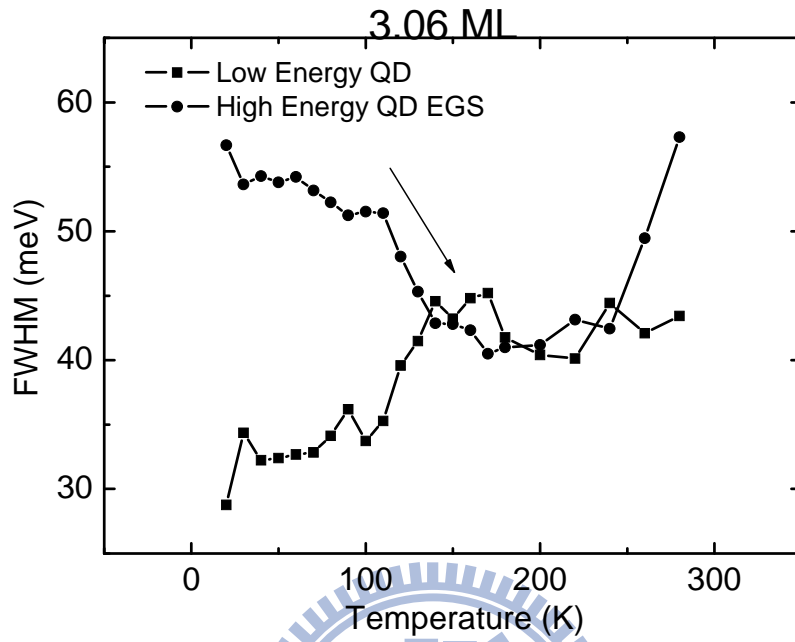


圖 4-6 3.06 ML 樣品 PL 半高寬對溫度圖

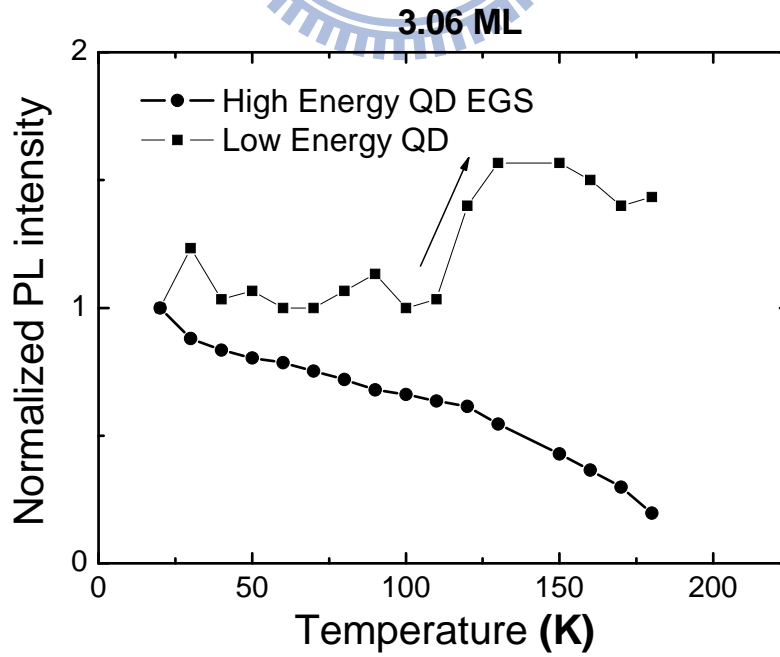
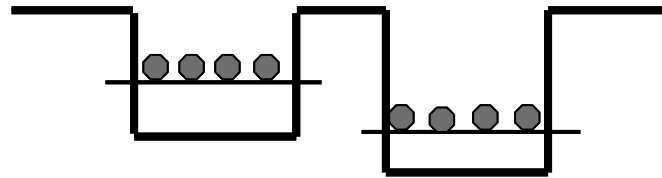


圖 4-7 3.06 ML 樣品歸一化 PL 積分強度對溫度圖

At low temperature (10~140 K) :



At high temperature (140~180 K) :

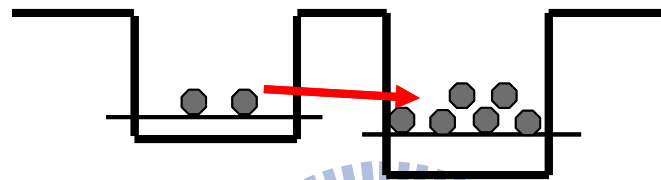


圖 4-8 兩群量子點間載子轉移示意圖

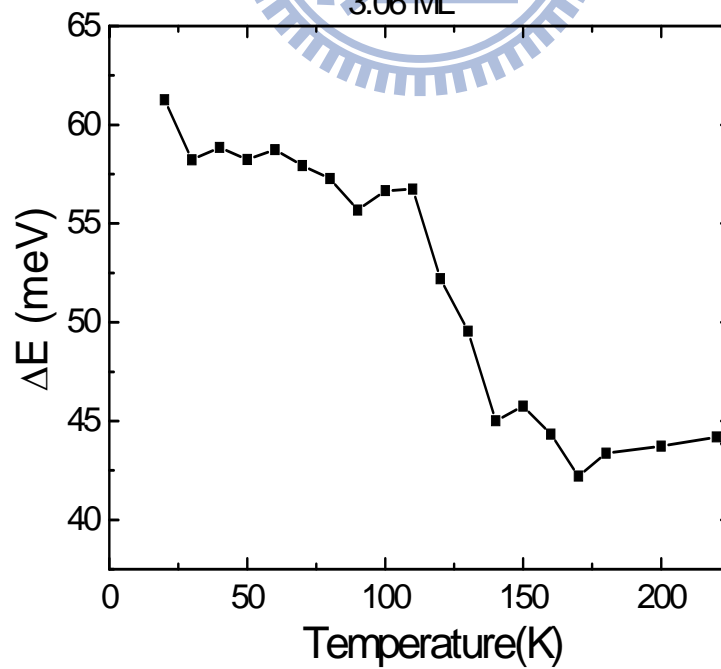


圖 4-9 兩群量子點間能量差對溫度圖

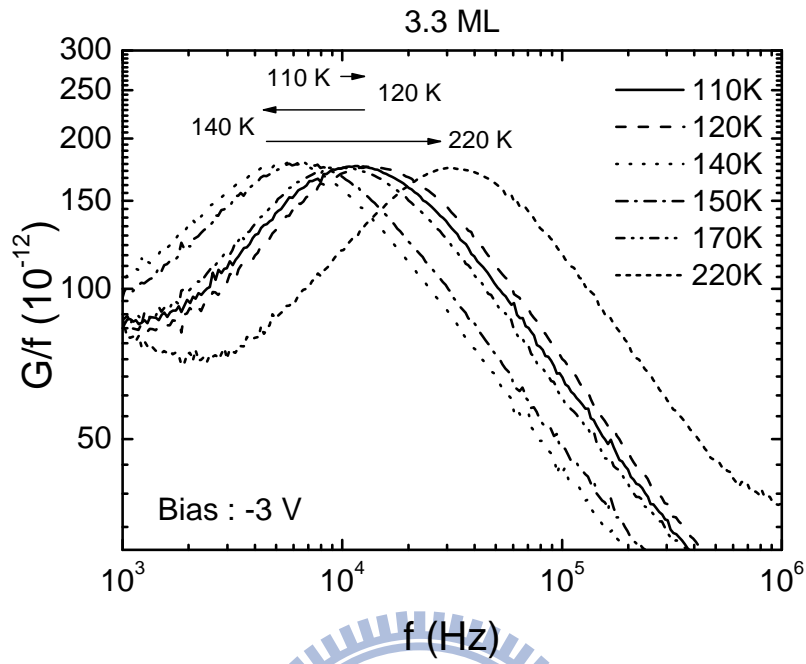


圖 4-10 3.3 ML 樣品低溫 G-F 量測

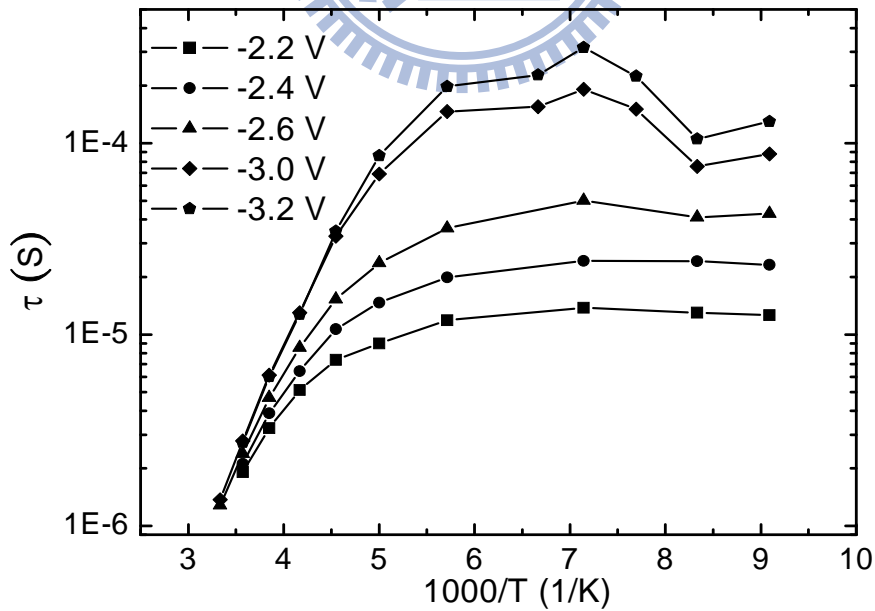


圖 4-11 3.3 ML 樣品中量子點載子時間常數對 1000/T 作圖

第五章 光激發之電性量測

近年我們實驗室嘗試著將光性與電性量測作結合，在進行電性量測時，加入光激發的條件，進一步探討量子點的載子侷限及躍遷特性。在之前的研究中[26]，曾經使用過波長為 532 nm 的綠光雷射作為激發光源，來進行光激發的電性量測。但是由於此波段光源的能量超過了 GaAs 的能隙大小，會造成樣品中整體背景濃度的抬升，反而使得量子點的訊號不明顯。

在本章中，我們利用波長約為 940 nm 的紅外光 LED 作為激發光源，能量小於 GaAs 的能障大小，因此光激發作用的區域可以被限制在 InAs/InGaAs DWELL 結構中，實驗裝置如圖 5-1 所示。

5-1 光激發之量子點訊號分析

5-1-1 光激發量子點訊號之改變

首先，我們將量子點在光激發下電性量測發生的行為，如圖 5-2，作一個簡述：當激發光照進量子點樣品時，會使得量子點中產生電子電動對，在沒有外加偏壓時，電子會掉回量子點導帶的底部，進行電子電洞對的重新複合。進行電性量測時，我們加逆向偏壓使量子點位於空乏區內，在空乏區內被激發的量子點電子會有兩種路徑：1. 掉進量子點底部，進行重新複合；2. 被空乏區電場影響，載子從量子點中躍遷出來。由於我們是在持續進行光激發的情形下，電子會一直產生、複合而達到平衡，而淨效應會使額外電子填入量子點中，也會持續有載子躍遷出量子點。

我們對於 3.3 ML InAs 量子點進行光激發的 CV 量測，我們從有照光、沒照光的 CV 及縱深圖的比較，如圖 5-3 (a) (b)，可以發現以下幾個現象。首先，在小偏壓為量測到 GaAs 的區域，我們可以發現照光後的 CV 沒有明顯變化，可以證實 GaAs 的確不會被激發。此外，在量子點的 CV 平台有明顯變寬、電容值增加的現象。縱深

圖更可以清楚看出，量子點被光激發後載子有增加、並且往高能階填入。以上符合我們的預期，光激發只在量子點區域會產生作用。

除此之外，圖 5-4 (a) (b) 是 3.3 ML 樣品在固定量測頻率為 10 kHz 的變溫 CV 量測，可以發現，沒有照光的量子點平台會在低溫趕不上量測的頻率，使平台大小下降；而經由照光之後，量子點平台在低溫下都可以趕得上量測頻率。在低溫 78 K、固定偏壓的 G-F 量測中，如圖 5-5 (a) (b)，也可以發現在光激發之後，G-F 的峰值會往高頻移動。這些現象是由於在進行量測時，我們持續對樣品進行光激發，會有更多的電子從量子點持續掃入下方導帶，造成下方導帶電子濃度 $n = n_0 + \Delta n$ 。根據 Shockly-Read-Hole 理論，載子的時間常數 $\tau_{dot} \propto \frac{1}{C_{dot}(n+n')}$ ，當導帶濃度 n 增加，會使得載子速率上升。

5-1-2 光激發調變之缺陷訊號

在未照光的情況下，缺陷中的載子躍遷速率很慢，無法在 C-V 量測頻率範圍中調變出來。在 3.06 ML 樣品可以看到，溫度上升到 370 K 的 C-V 圖中，缺陷偏壓範圍下的電容值才有些微的抬升，如圖 5-6。然而我們發現經由光激發之後，3.06 ML 樣品在量子點後的偏壓，會有電容值大幅抬升的現象，如圖 5-7。我們在低溫 78 K 對這個訊號作變頻的量測，如圖 5-8，可以看到就算頻率降低至 175 Hz，訊號的強度仍會持續增強，代表載子躍遷的速度很慢。加上這個電容值抬升出現的偏壓範圍中，正好是缺陷分布的偏壓區域，我們認為是缺陷的訊號所造成。

而缺陷訊號的出現，顯示在光激發之後缺陷中載子躍遷的速度上升，使我們的量測頻率足以調變所致。缺陷中載子的時間常數 $\tau_i \propto \frac{1}{C_i(n+n')}$ ，會由於光激發造成量子點下方導帶電子的濃度 n 增加而下降。且在缺陷位置的 n' 會遠小於照光後的導帶濃度 n ，讓缺陷中載子因照光而躍遷速度大幅上升到我們的量測頻率。

5-1-3 3.06 ML 及 3.3 ML 光激發電性量測之比較

在 3-1 及 3-2 曾經說明，由於應力鬆弛產生的差排缺陷在 3.3 ML 中較多，會導致量子點底層空乏區的寬度比 3.06 ML 中寬了很多，從光激發電性量測的結果比較，也可以得到印證。

從照光後電流的增加量，可以比較出兩片樣品的差異。圖 5-9 中，我們比較兩片樣品，在照光下電流扣掉未照光電流對電壓的作圖，可以發現在 3.06 ML 樣品中電流在光激發後的增加量，比 3.3 ML 樣品來得大。照光會使得量子點中電子電洞對分離，從量子點跑出的載子會造成額外的電流增加。也因為底層空乏區的寬度的不同，使量子點跑出的載子量在 3.06 ML 樣品中較大，照光增加的電流也較大。

我們也試著比較在 3.3 ML 及 3.06 ML 光激發的 CV 和縱深圖，如圖 5-3 (a) (b) 和圖 5-10 (a) (b)，可以看到在照光之後，量子點平台寬度及電容值抬升的程度在 3.3 ML 中比較明顯。縱深圖中，可以更清楚看到量子點濃度在 3.3 ML 樣品中增加非常明顯；在 3.06 ML 樣品中只有些微改變。量子點底層空乏區的寬度較大，會使得量子點侷限的能力較強。因此 3.3 ML 樣品在光激發之後，載子可以填往更高的能階，在 3.06 ML 樣品中則只會多填入少許。

在 5-1-2 中因照光缺陷載子速度增加的現象，我們只有在 3.06 ML 樣品中觀察到，但在缺陷較多的 3.3 ML 樣品中卻沒有看到。這同樣歸因於空乏區寬度的不同，3.3 ML 樣品照光後從量子點掃出的載子量比較少，使得導帶濃度增加的量不足以使載子躍遷速度達到我們的量測頻率所致。

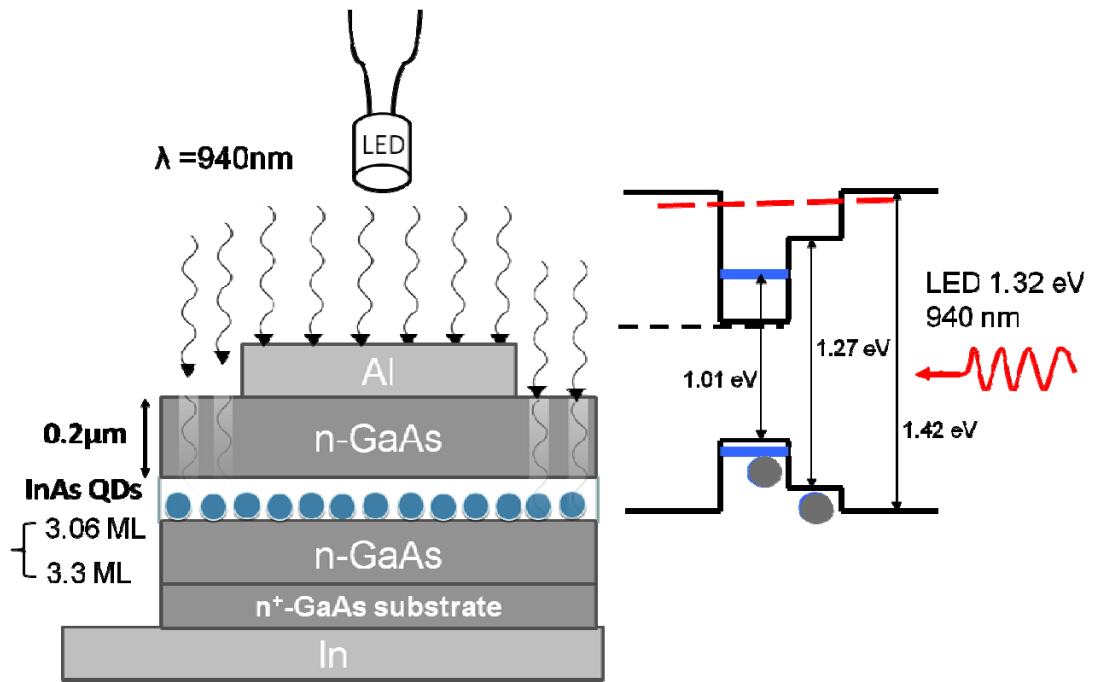


圖 5-1 光激發電性量測裝置示意圖

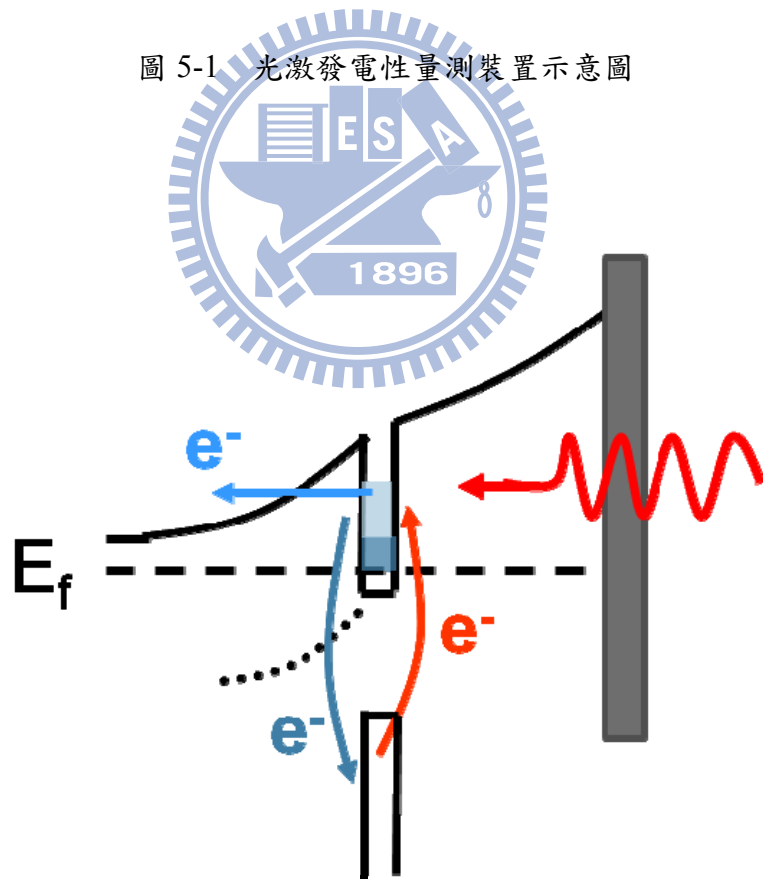


圖 5-2 光激發下載子躍遷機制示意圖

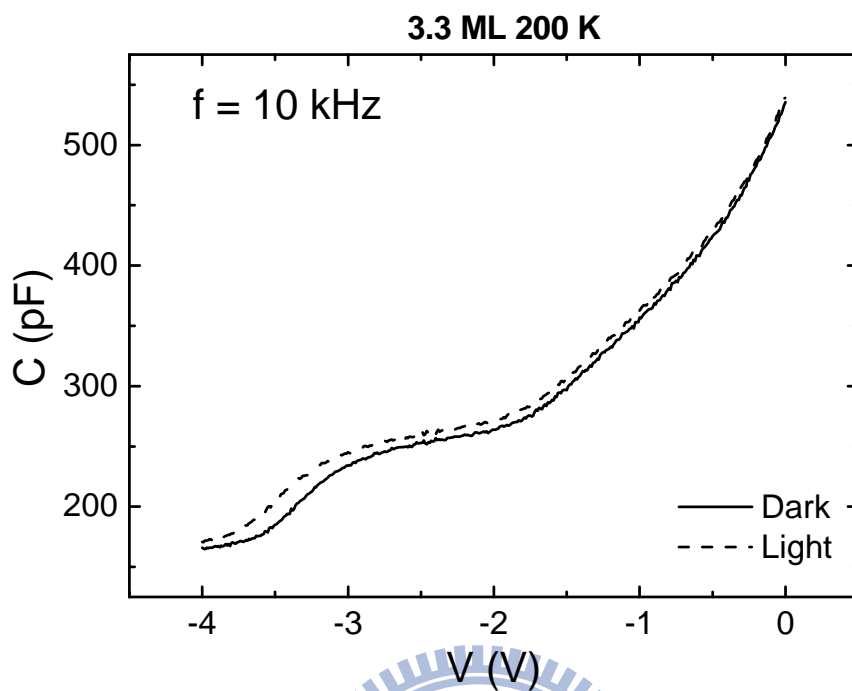


圖 5-3 (a) 3.3 ML 樣品照光與未照光之 200 K 低頻 C-V 圖

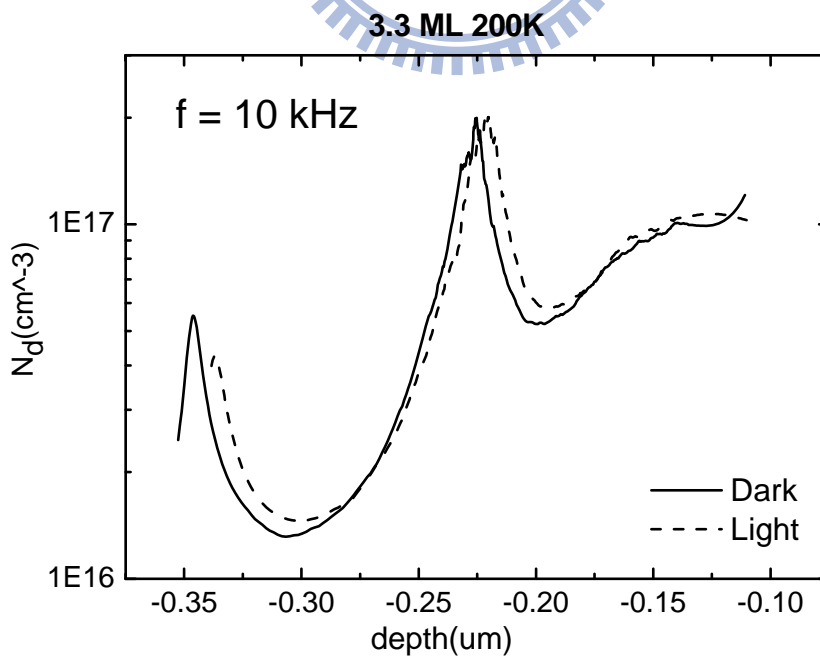


圖 5-3 (b) 3.3 ML 樣品照光與未照光之 200 K 低頻縱深圖

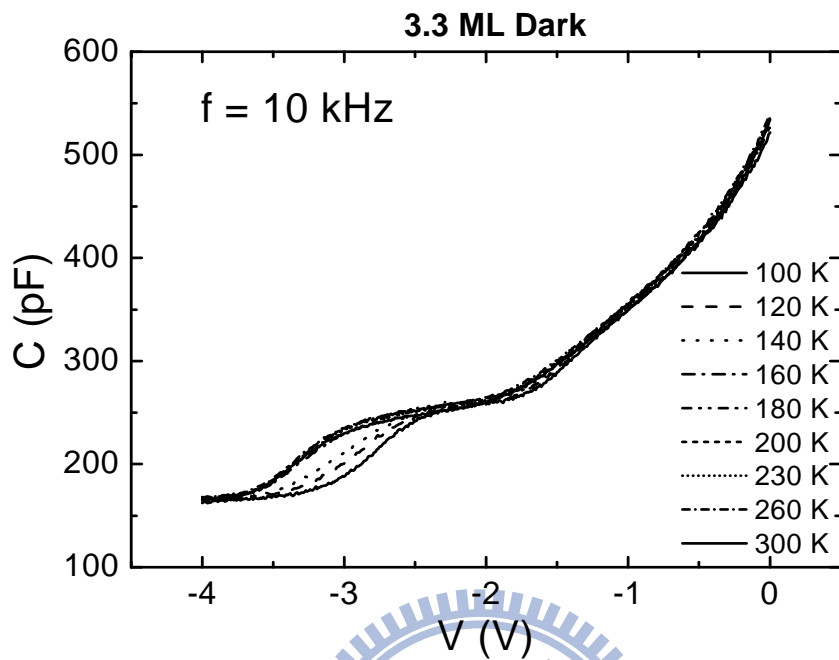


圖 5-4 (a) 3.3 ML 樣品低頻變溫 C-V 圖

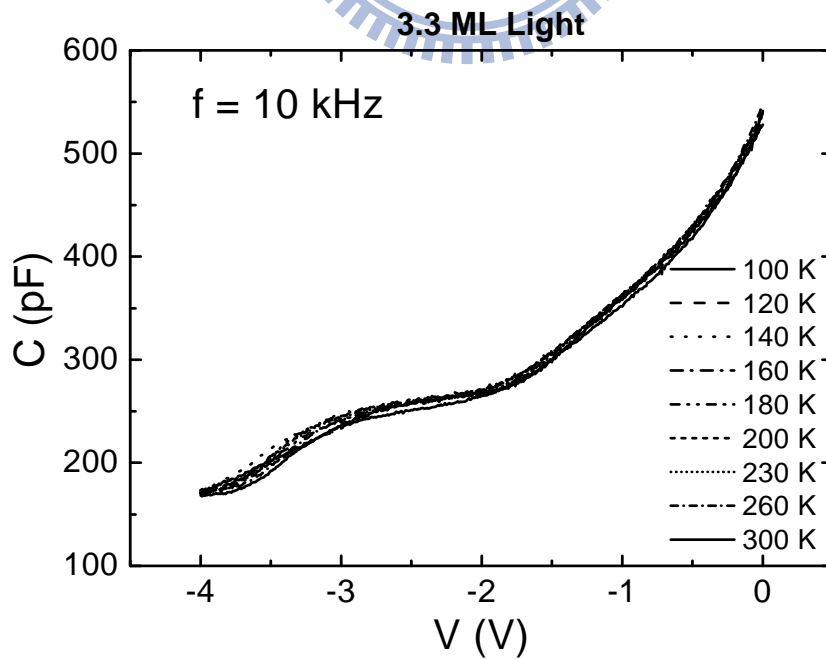


圖 5-4 (b) 3.3 ML 樣品光激發下低頻變溫 C-V 圖

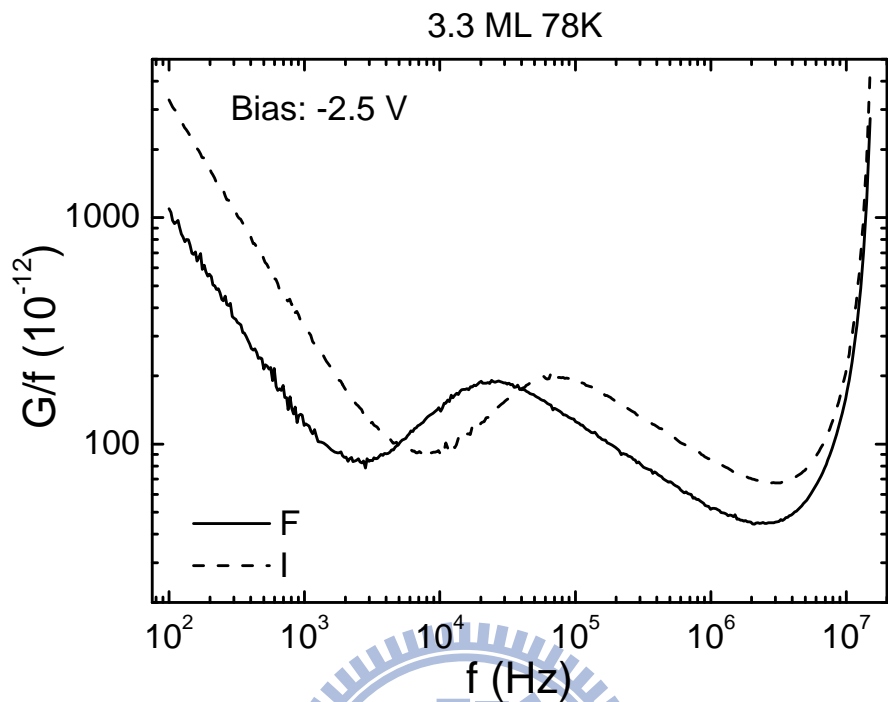


圖 5-5 (a) 3.3 ML 樣品照光與未照光 -2.5 V 低溫 G-F 圖

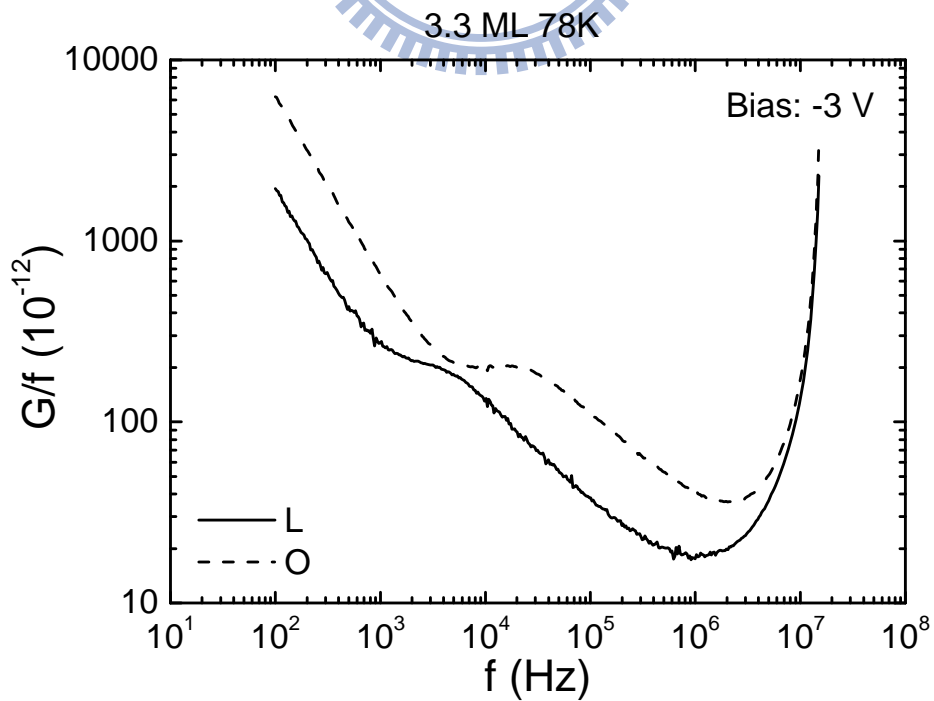


圖 5-5 (b) 3.3 ML 樣品照光與未照光 -3 V 低溫 G-F 圖

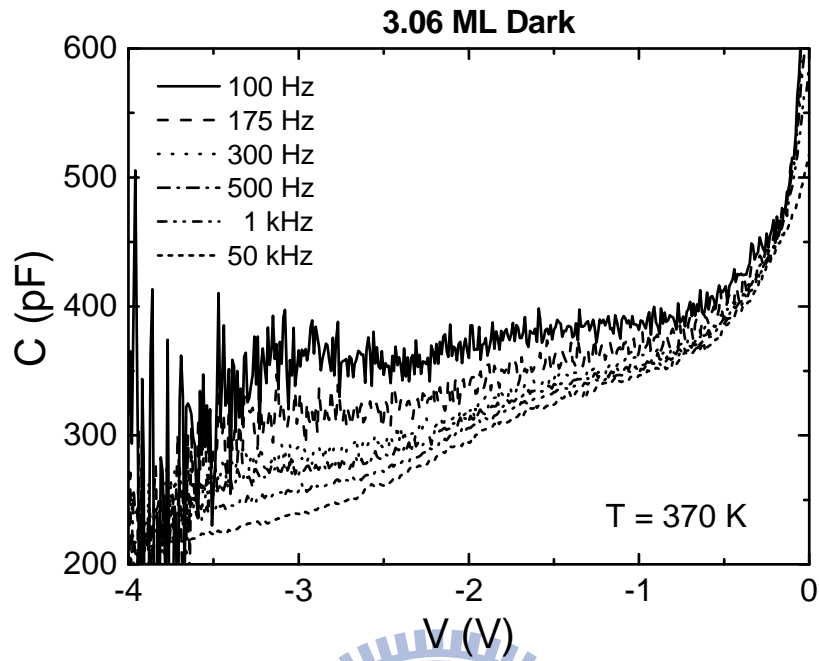


圖 5-6 3.06 ML 樣品高溫 370 K 低頻 C-V 圖

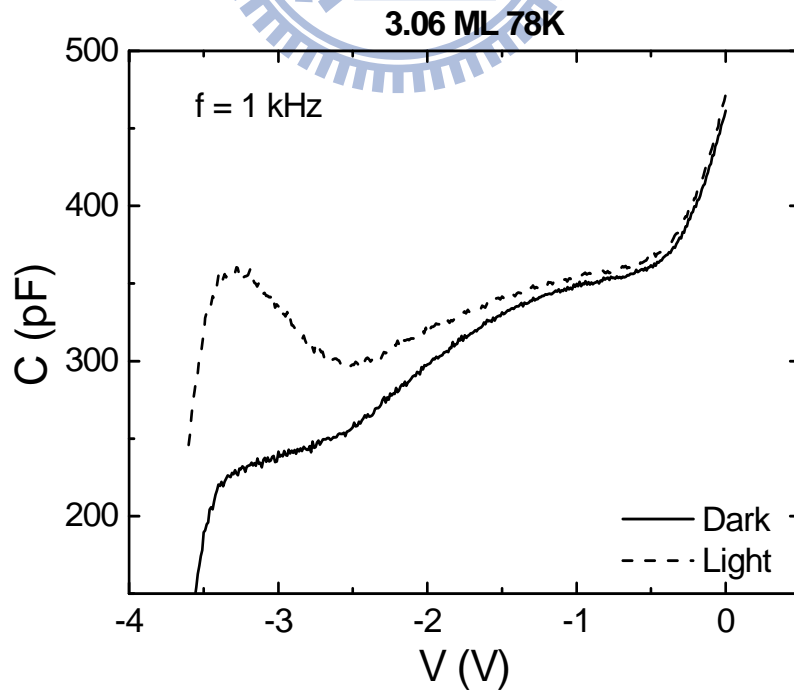


圖 5-7 3.06 ML 樣品照光與未照光之低頻低溫 C-V 圖

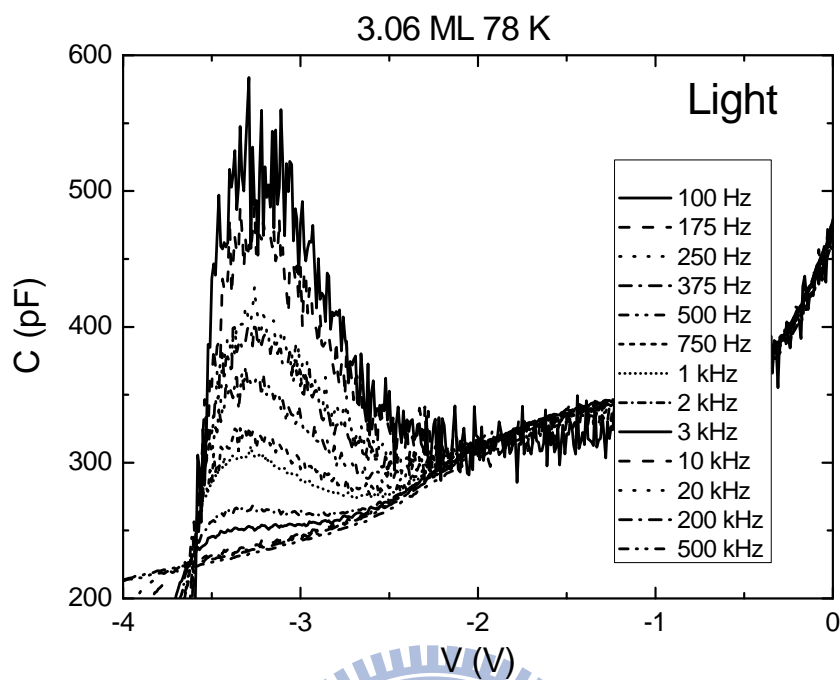


圖 5-8 3.06 ML 樣品光激發下變頻 C-V 圖

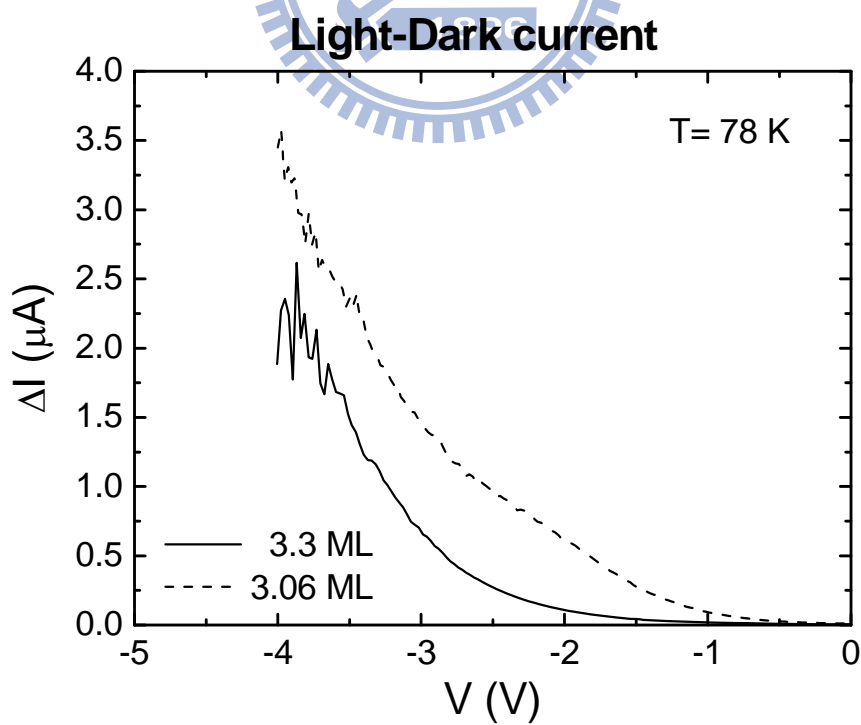


圖 5-9 3.06 ML 及 3.3 ML 樣品光激發增加 I-V 圖

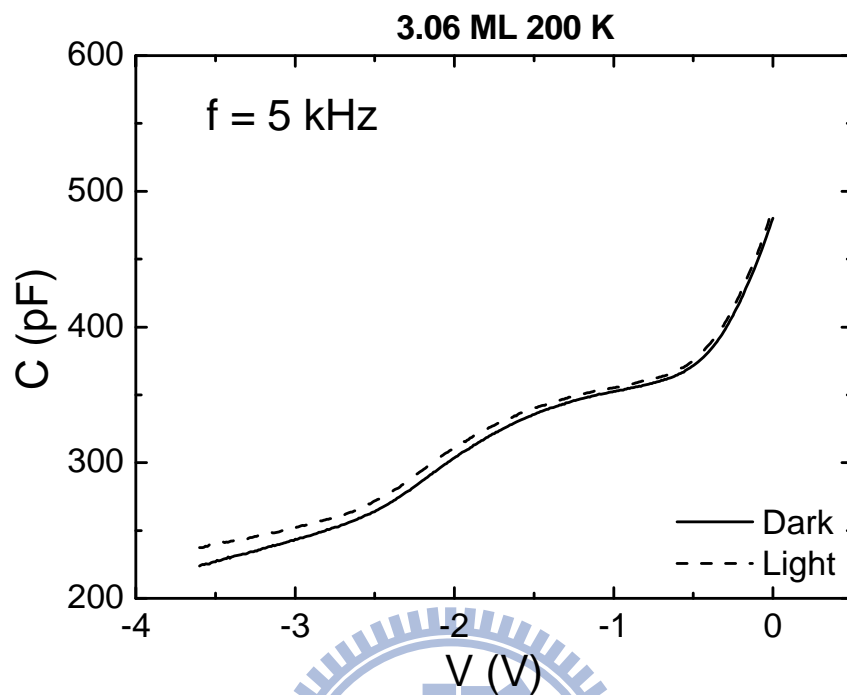


圖 5-10 (a) 3.06 ML 樣品照光與未照光之 200 K 低頻 C-V 圖

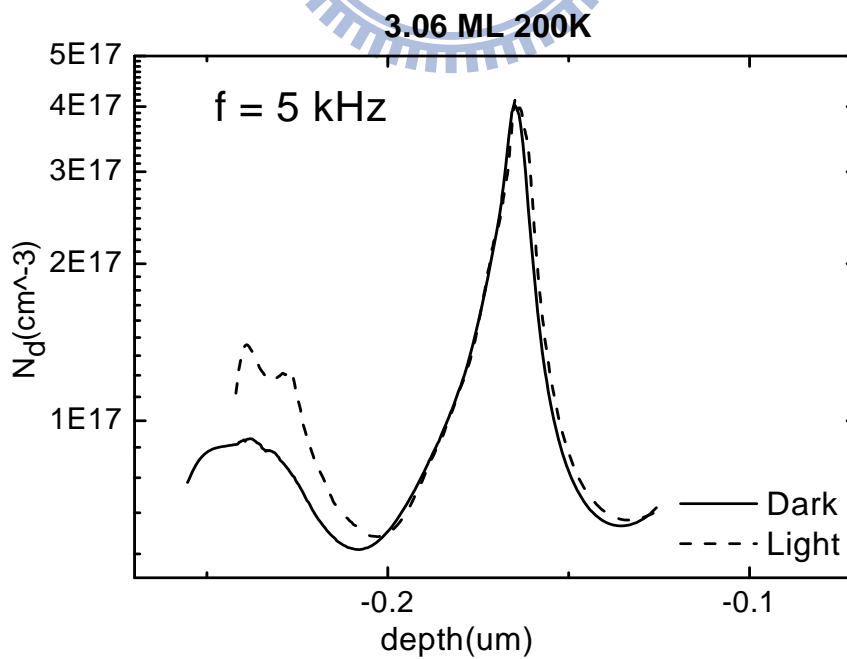


圖 5-10 (b) 3.06 ML 樣品照光與未照光之 200 K 低頻縱深圖

第六章 結論

本論文對成長厚度為 3.06 及 3.3 ML 的兩個樣品進行光性及電性分析，發現在覆蓋一層 InGaAs 應力緩衝層於 InAs 量子點上之後，應力鬆弛對於 InAs/InGaAs 量子點特性產生了很大的影響。在 PL 頻譜中，可以看到應力鬆弛使得兩個樣品的量子點都發生了主要峰值藍移、PL 強度下降以及多出一個低能量的訊號。而在 C-V 量測和 C-F 量測中發現兩個樣品特性上的不同，在 3.3 ML 樣品中量子點的載子躍遷速率比在 3.06 ML 樣品中慢了很多。

從 DLTS 及 TEM 可以發現兩個樣品中缺陷特性相近，都分布於量子點內部及底層。用 DLTS 估算出樣品中的缺陷濃度，發現在 3.3 ML 樣品中的缺陷濃度大了很多，我們認為這是造成兩片樣品量子點載子躍遷速率不同的主因。在對兩個樣品作 C-V 模擬的比較之後可以知道，缺陷造成了底層 GaAs 背景濃度的下降，而使量子點下方空乏區寬度增加，造成了載子躍遷速率的不同。

我們可以利用 3.06 ML 樣品的 TEM 圖，來解釋量子點在 PL 頻譜上發生藍移以及多出一個低能量訊號的原因。我們認為這是因為 InAs 量子點在蓋了 InGaAs 緩衝層之後，應力鬆弛的方式會分成兩種：分別為將 In 向外擴散及產生差排缺陷，使得樣品內存在著兩群能量不同的量子點。而我們進一步觀察 3.06 ML 樣品 PL 變溫頻譜，可以發現當溫度升到 140 K 時，有高能量量子點半高寬下降以及低能量量子點積分強度的上升的異常現象。在 3.3 ML 樣品的 C-F 低溫量測，發現電子躍遷速度在溫度升高到 140 K 時，有不尋常的下降之現象。這都是由於兩群量子點間產生載子轉移效應所造成。

此外，我們利用能量範圍在可以使量子點中載子被激發，而 GaAs 不會吸收的激發光照射我們的樣品，觀察在光激發下的量子躍遷行為。在 3.3 ML 樣品的 C-V 量測上，可以看到在光照射下電容平台會跟著增加；由 C-F 量測，量子點的載子躍遷速度在光照射之後明顯變快。這是由於在光激發下，有更多的載子注入至量子點中，

而導帶中的載子濃度也有所增加。比較兩片樣品在光激發下量子點內載子侷限的增加量，可以再次印證量子點底層空乏區寬度的不同。最後，我們在 3.06 ML 樣品中，發現了在大偏壓的低頻 C-V 中，有著電容值明顯變大的現象。我們認為這是由於光激發使得我們缺陷載子躍遷的速率增加，使我們能調變到的緣故。



參考文獻

- [1] P. Hawrylak, *Phys. Rev. B* 60, 5597 (1999).
- [2] U. Banin, Y. Cao, D. Katz, O. Millo, *Nature* 400, 542 (1999).
- [3] H. Shoji, Y. Nakata, K. Mukai, Y. Sugiyama, M. Sugawara, N. Yokoyama, and H. Ishikawa, *Appl. Phys. Lett.* 71, 193 (1997).
- [4] S. Kim, H. Mohseni, M. Erdtmann, E Michel, C. Jelen, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* 73, 963 (1998).
- [5] P. Alivisatos, *Nature Biotechnology*, 22, 47 - 52 (2004).
- [6] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, "Quantum Dot Heterostructures," (Wiley, 1999)
- [7] F. C. Frank, and J. H. van der Merwe, *Proc. Roy. Soc. London A*, vol.198, pp.205 (1949).
- [8] M. Volmer, A. Weber, and Z. Phys. Chem., vol. 119, pp.277 (1926).
- [9] I. N. Stranski, and L. Von Krastanov, *Akad. Wiss Lit. Main Math. Natur. K1. Iib*, vol. 146, pp.797 (1939).
- [10] Fariba Ferdos, Shumin Wang, Yongqiang Wei, and Anders Larsson, *Appl. Phys. Lett.* 81, 1195 (2002).
- [11] V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, A. Yu. Egorov, A. V. Lunev, B. V. Volovil, I. L. Krestnikov, Yu. G. Musikhin, N. A. Bert, P. S. Kop'ev, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov and D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.* vol. 74, pp. 2815-2817 (1999).
- [12] M. V. Maximov et al., *Physica E*, vol.7, pp.326-330 (2000).
- [13] D.L. Losee, *J. Appl. Phys.* 46, 2204 (1975).
- [14] G. Vicent, D. Bois, P. Pinard, *J. Appl. Phys.* 46, 5173 (1975).
- [15] D.V. Lang, , *J. Appl. Phys.* 45, 3023 (1974).
- [16] Dieter K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization"-2nd ed. (New York :Wiley 1998).
- [17] 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).
- [18] 汪炎宗, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "InAs 量子點應力鬆弛所引發缺陷對量子躍遷之影響" (2007).
- [19] 黃文鏞, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "InAsSb/GaAs 自聚式量子點之電性研究" (2005)
- [20] O. Engström, M. Kaniewska, and M. Kaczmarczyk, *Appl. Phys. Lett.* 95, 013104 (2009).
- [21] Chris G. Van de Walle, *Phys. Rev. B* 39, 1871 (1989).

- [22] 徐榕鎡, 交通大學電子物理研究所碩士論文, ”應力鬆弛引發之缺陷 InAs/InGaAs 量子躍遷機制”(2008).
- [23] A. Markus, J.X. Chen, C. Paranthoen, and A. Fiore, , *Appl. Phys. Lett.* 82, 1818 (2003).
- [24] Y.C. Zhang, C.J. Huang, F.Q. Liu, B. Xu, D. Ding, W.H. Jiang, Y.F. Li, X.L. Ye, J. Wu, Y.H. Chen and Z.G. Wang. *J. Crystal Growth* 219 (2000).
- [25] Y. I. Mazur, X. Wang, Z. M. Wang, G. J. Salamo, M. Xiao, and H. Kissel, *Appl. Phys. Lett.* 81, 2469 (2002).
- [26] 傅昱翔, 交通大學電子物理研究所碩士論文, ”InAs 量子點中缺陷效應影響下之量子躍遷機制”(2009).

