

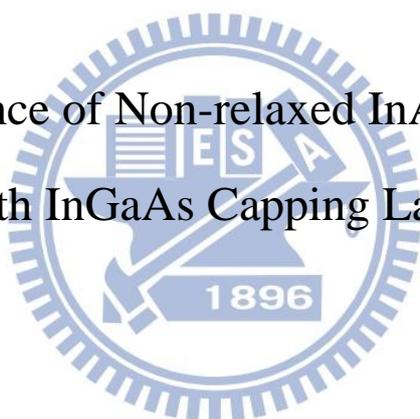
國立交通大學

電子物理學系

碩士論文

InAs/InGaAs 量子點光電容特性

Photo-Capacitance of Non-relaxed InAs Quantum Dots
with InGaAs Capping Layer



研究生：曾國豪

指導教授：陳振芳 博士

中華民國一百零一年七月

InAs/InGaAs 量子點光電容特性
Photo-Capacitance of Non-relaxed InAs Quantum Dots
with InGaAs Capping Layer

研究生：曾國豪

Student : Kuo-Hau Tseng

指導教授：陳振芳 博士

Advisor : Dr. Jenn-Fang Chen



A Thesis
Submitted to the Institute of Electrophysics
College of Science
National Chiao Tung University
in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master of Science
in
Electrophysics
July 2011
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 一百零一年七月

InAs/InGaAs 量子點光電容特性

研究生：曾國豪

指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學電子物理學系

摘 要

本論文是利用 MBE 系統成長的砷化銦(2.34 ML)的量子點樣品與應力鬆弛方式(3.3 ML)的量子點樣品比較，並透過光性與電性量測分析來瞭解其樣品的光電特性，接著透過光激發下的電性量測觀察樣品中的光電特性。第一部分：藉由光性與電性量測，包括螢光頻譜 (Photoluminescence, PL)、電容電壓量測 (Capacitance-Voltage, C-V)、深層能階暫態頻譜儀 (Deep Level Transient Spectroscopy, DLTS)、穿透式電子顯微鏡 (Transmission Electron Microscope, TEM) 的量測，來探討砷化銦/砷化鎵量子點結構中其量子能階、缺陷能階分佈以及電子放射機制。第二部分：由 DLTS 量測分析上發現缺陷的電子放射速率會受到電壓掃動速度影響。因此改變不同掃動速度的 C-V 量測，可以發現樣品在高溫下的確出現電容值變化並將該結果與應力鬆弛的樣品做比較，說明了未應力鬆弛的樣品中確實存在一個相當深的缺陷是 DLTS 難以完整量測。第三部分：將兩片樣品在光激發下，並改變光源能量作電容電壓量測，分析其光電容特性。光電容變化分為三個區域，分別為 EL2 缺陷、PL 光譜、深層能階缺陷所造成。而兩樣品的光電容有極大差距是由於應力鬆弛下量子點與砷化鎵之間的銦與鎵交換抑制了 EL2 缺陷的形成造成 EL2 缺陷濃度降低。另外，藉由不同的雷射光源激發未應力鬆弛砷化銦量子點樣品作 PL 量測可以確立深層能階缺陷訊號出現於特定激發光源下。最後選用特定激發光源為樣品做 C-V 量測可以確定在低能量(0.8 eV)

雷射光下確實能激發出 EL2 缺陷能階中的電子貢獻在光電容上，將雷射光能量提高至 1.17 eV 後照射樣品，則激發了量子點能階中的電子貢獻 PL 光譜上，並且由縱深圖上的變化分析載子被激發後的躍遷情形。

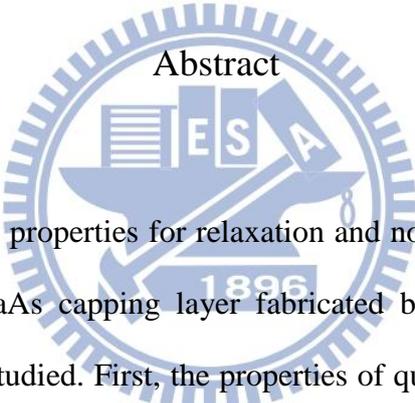


Photo-Capacitance of Non-relaxed InAs Quantum Dots with InGaAs Capping Layer

Student: Kuo-Hau Tseng

Advisor: Dr. Jenn-Fang Chen

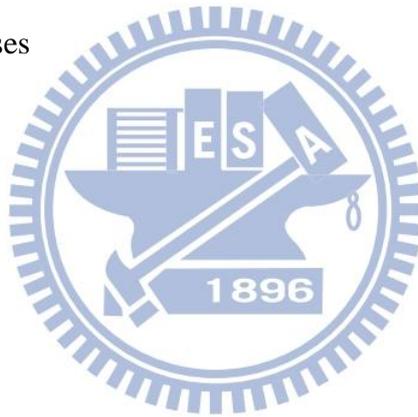
Department of Electrophysics
National Chiao Tung University

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem. It features a central shield with a book, a lamp, and the letters 'E', 'S', and 'A'. Below the shield is the year '1896'. The entire emblem is surrounded by a gear-like border.

Abstract

Electrical and optical properties for relaxation and non-relaxation InAs quantum dots (QDs) with an InGaAs capping layer fabricated by molecular beam epitaxy (MBE) deposition, were studied. First, the properties of quantum states, defect states, and mechanism of electron emission in InAs QDs samples are studied by using capacitance-voltage (C-V) profiling, bias-dependent deep level transient spectroscopy (DLTS), transmission electron microscope (TEM), and photoluminescence (PL) measurements. Second, the bias-dependent sweeping rate affects electron emission from the defect state by DLTS spectra. An elevated capacitance is found at the temperature of 300K by C-V measurement with the variation of sweeping rate, suggesting a non-relaxation InAs QDs containing a deep defect. Third, the photo-capacitances for relaxation and non-relaxation InAs QDs are investigated by using C-V measurement under illumination with the variation of energy (0.7 ~ 1.56 eV). The three regions are considered the electron emission from the EL2 defect state

and the deep defect state and carrier recombination in the energy-dependent photo-capacitance spectra for non-relaxation InAs QDs. The large difference of photo-capacitance for two samples is due to the concentration of EL2 defect states, suggesting the inter-diffusion with In and Ga atoms suppress the EL2 defect forming in the relaxation InAs QDs. In addition, an existence of the deep defect is confirmed in the PL spectra by using an excitation energy-dependent laser. By illumination energy of 0.8 eV, photo-capacitance originates from the electron emission of EL2 defect states, and the valley peak shift can analyze the mechanism of excess electrons emission from EL2 defect states in the carrier distribution profiling. As illumination energy is 1.17 eV, the recombination rate of excess carriers increases accompanying photo-capacitance decreases



致 謝

兩年的研究所生涯真的過得很快，這其間我走過了許許多多的回憶，不管是歡笑或淚水都讓我成長許多；回頭望去這段歲月，它帶給我的不只是在求學讀書上的更上一層樓，更重要的它讓我在人生觀上有了更多的省思，包括了研究、交友、處事態度..等，然而這段期間謝謝你們大家的存在，沒有你們就沒有這段難以忘懷的時光。

首先是老師，感謝老師在我碩班期間的用心指導，您在研究上所提供的靈感與方向，讓我在研究期間遇到瓶頸時得以突破而前進，而每每在 meeting 上老師所散發出的研究熱誠與對物理的洞悉總令我感到敬佩，您的研究熱誠與精神讓我知道，要成為一位成功的人之前所需具備的基本態度，謝謝您。

實驗室的博班學長們，謝謝你們的用心帶領；感謝政鴻學長，用您急速的腦袋在我實驗研究上用心的教導，並多次在報告前不厭其煩的叮嚀，讓我的錯誤得以改進；感謝孟謙學長，總在我每次報告完有運動需求時，找我打籃球，讓我的神準得以發揮！並紓解壓力以為下次報告做更好的預備；感謝家峰學長，謝謝您在儀器操作上的多次指導，並為實驗室大小事的用心付出，讓我們有最好研究環境。

我的兩位最佳研究夥伴們，謝謝你們兩年的陪伴與支持；精明的亞青總能在我的腦袋慌張時拉我一把，給於我最佳意見，並在生活處事上叮嚀許多事情，真的很感激與感動；兄弟俊泓總能在我疲憊時陪我聊聊，分享經驗當當垃圾桶，並給我鼓勵與安慰，讓我更有信心面對更多挑戰；我真的真的非常珍惜有兩位的陪伴，謝謝摟。三位貼心懂事的學弟，哲倫、家偉、敬恩，謝謝你們在我口試前一晚的陪伴，並且在這一年來許多事情的幫忙，相信你們未來都會非常優秀。還有畢業學長姐，阿豪、小毛、小豆、birdy、chic，感謝你們提供寶貴的經驗，讓我研究過程中有更正確的態度面對壓力，謝謝你們啦。

最後要感謝我親愛的家人，爸爸、媽媽、國銓、大嫂、國禎，最懂我的你們在我求學過程中給我最大的鼓勵與支持，在我最低潮時給我最大的溫暖，對於你們只有說不完感激。

想不完的回憶，說不完感謝，謝謝所有一路上陪伴我的你們，未來我會更加努力的。

曾國豪

中華民國一百零一年八月



目 錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
致謝.....	v
目錄.....	vii
圖表目錄.....	ix
第一章 緒論.....	1
1-1 InAs/InGaAs/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.....	3
1-2 研究動機.....	3
1-3 論文架構.....	3
第二章 量測系統簡介	
2-1 光激發螢光量測系統(PL).....	5
2-2 電流電壓量測(I-V).....	6
2-3 電容電壓量測(C-V).....	7
2-4 導納頻譜量測(C-F & G-F).....	8
2-5 深層能階暫態頻譜量測(DLTS).....	8
第三章 研究樣品備製	
3-1 量子點磊晶樣品成長.....	12
3-2 銻基界面&歐姆界面電極製作.....	12
第四章 2.34 ML 量子點基本特性	
4-1 TEM 分析.....	16
4-2 PL 分析.....	16

4-3	DLTS 分析.....	17
4-5	CV 分析.....	18
第五章	不同掃動速率 CV 量測	
5-1	2.34 ML 樣品量測.....	27
5-2	3.3 ML 樣品量測.....	28
5-3	兩片樣品結果比較.....	28
第六章	光激發之電容量測	
6-1	光電容原理簡介.....	36
6-2	量子點樣品之光電容量測.....	36
6-3	比較 2.34 ML 樣品與 3.3 ML 樣品.....	37
第七章	選擇性激發光源 PL	
7-1	選擇性激發光源 PL.....	42
7-2	躍遷機制.....	43
7-3	選擇性激發光源加電 PL.....	44
第八章	特定波段激發光源 CV 量測	
8-1	特定波段激發光源 -0.8 eV、1.17 eV.....	53
8-2	比較 3.3 ML 樣品.....	54
第九章	結論.....	62
	參考文獻.....	64

圖 表 目 錄

圖 1-1	不同侷限維度之結構所對應的能態密度.....	5
圖 2-1	PL 系統架構圖.....	11
圖 3-1	樣品結構及所對應之能帶圖.....	15
圖 4-1	2.4 ML 量子點之 TEM 圖.....	20
圖 4-2	2.34ML 樣品激發光源 2.33 eV 變溫度 PL 光譜圖.....	20
圖 4-3	2.34 ML 樣品低溫 50 K 能帶示意圖.....	21
圖 4-4(a)	2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖.....	21
圖 4-4(b)	2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖.....	22
圖 4-4(c)	2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖.....	22
圖 4-4(d)	2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖.....	23
圖 4-4(e)	2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖.....	23
圖 4-5	2.34 ML 樣品不同偏壓下阿瑞尼示圖.....	24
圖 4-6	2.34 ML 樣品 dark 隨溫度變化 CV 量測圖.....	25
圖 4-7	2.34 ML 樣品 dark 隨溫度變化縱深圖.....	25
圖 4-8	2.34 ML 樣品 dark 隨溫度變化載子邀遷示意圖.....	26
圖 5-1(a)	2.34 ML 78 K 改變不同掃動速率 C-V 圖.....	29
圖 5-1(b)	2.34 ML 78 K 改變不同掃動速率縱深圖.....	29
圖 5-2(a)	2.34 ML 300 K 改變不同掃動速率 C-V 圖.....	30
圖 5-2(b)	2.34 ML 300 K 改變不同掃動速率縱深圖.....	30
圖 5-3(a)	2.34 ML 350 K 改變不同掃動速率 C-V 圖.....	31
圖 5-3(b)	2.34 ML 300 K 改變不同掃動速率縱深圖.....	31
圖 5-4(a)	3.3 ML 78 K 改變不同掃動速率 C-V 圖.....	32
圖 5-4(b)	3.3 ML 78 K 改變不同掃動速率縱深圖.....	32

圖 5-5(a)	3.3 ML 300 K 改變不同掃動速率 C-V 圖.....	33
圖 5-5(b)	3.3 ML 300 K 改變不同掃動速率縱深圖.....	33
圖 5-6(a)	3.3 ML 350 K 改變不同掃動速率 C-V 圖.....	34
圖 5-6(b)	3.3 ML 350 K 改變不同掃動速率縱深圖.....	34
圖 5-7	3.3 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖.....	35
圖 6-1	光激發下電性量測時載子躍遷機制與能帶圖.....	39
圖 6-2	2.34 ML 樣品低溫 78 K 光電容圖.....	39
圖 6-3	3.3 ML 樣品低溫 78 K 光電容圖.....	40
圖 6-4	2.34 ML 樣品定偏壓變溫光電容圖.....	40
圖 6-5	3.3 ML 樣品定偏壓變溫光電容圖.....	41
圖 6-6	厚度 3ML 以上的量子點長晶過程產生銦鎵交換.....	41
圖 7-1(a)	2.34ML 樣品激發光源 2.33 eV 變溫度 PL 光譜圖.....	45
圖 7-1(b)	2.34ML 樣品激發光源 1.95 eV 變溫度 PL 光譜圖.....	45
圖 7-1(c)	2.34ML 樣品激發光源 1.37 eV 變溫度 PL 光譜圖.....	46
圖 7-1(d)	2.34ML 樣品激發光源 1.17 eV 變溫度 PL 光譜圖.....	46
圖 7-1(e)	2.34ML 樣品激發光源 0.95 eV 變溫度 PL 光譜圖.....	47
圖 7-1(f)	2.34ML 樣品激發光源 0.79 eV 變溫度 PL 光譜圖.....	47
圖 7-2(a)	激發光源 2.33 eV 與 1.95 eV 能帶上載子躍遷示意圖.....	48
圖 7-2(b)	激發光源 1.37 eV 與 1.17 eV 能帶上載子躍遷示意圖.....	48
圖 7-3(a)	2.34ML 樣品 78 K 激發光源 1.37 eV 加電 PL 光譜圖.....	49
圖 7-3(b)	2.34ML 樣品 150 K 激發光源 1.37 eV 加電 PL 光譜圖.....	49
圖 7-4(a)	2.34ML 樣品 78 K 激發光源 2.33 eV 加電 PL 光譜圖.....	50
圖 7-4(b)	2.34ML 樣品 150 K 激發光源 2.33 eV 加電 PL 光譜圖.....	50
圖 7-5(a)	激發光源 2.33 eV 能帶上載子躍遷示意圖.....	51
圖 7-5(b)	激發光源 2.33 eV 加電壓能帶上載子躍遷示意圖.....	51
圖 7-6(a)	激發光源 1.37 eV 能帶上載子躍遷示意圖.....	52

圖 7-6(b)	激發光源 1.37 eV 加電壓能帶上載子躍遷示意圖.....	52
圖 8-1(a)	2.34 ML 樣品 78 K 光源 0.8 eV 變 power CV 量測圖.....	55
圖 8-1(b)	2.34 ML 樣品 78 K 光源 0.8 eV 變 power 縱深圖.....	55
圖 8-2(a)	2.34 ML 樣品 300 K 光源 0.8 eV 變 power CV 量測圖.....	56
圖 8-2(b)	2.34 ML 樣品 300 K 光源 0.8 eV 變 power 縱深圖.....	56
圖 8-3(a)	2.34 ML 樣品 78 K 光源 1.17 eV 變 power CV 量測圖.....	57
圖 8-3(b)	2.34 ML 樣品 78 K 光源 1.17 eV 變 power 縱深圖.....	57
圖 8-4(a)	2.34 ML 樣品 300 K 光源 1.17 eV 變 power CV 量測圖.....	58
圖 8-4(b)	2.34 ML 樣品 300 K 光源 1.17 eV 變 power 縱深圖.....	58
圖 8-5	150 K 光源 1.17 eV 與光源 0.8 eV 縱深圖比較.....	59
圖 8-6(a)	3.3 ML 樣品 78 K 光源 1.17 eV 變 power CV 量測圖.....	60
圖 8-6(b)	3.3 ML 樣品 78 K 光源 1.17 eV 變 power 縱深圖.....	60
圖 8-6(c)	3.3 ML 樣品 300 K 光源 1.17 eV 變 power CV 量測圖.....	61
圖 8-6(d)	3.3 ML 樣品 300 K 光源 1.17 eV 變 power 縱深圖.....	61
表 4-1	2.34 ML 樣品不同偏壓下之活化能與捕捉截面積.....	24
表 5-1	3.3 ML 樣品的缺陷活化及與捕捉截面積.....	35

第一章 緒論

1-1. InAs/InGaAs/InAs 量子點材料簡介

近年來量子點特性研究在半導體領域有許多著作，期文獻大多著重於此 Dot-in-well(Dwell)結構下所造成的特殊現象；而本研究主要是針對其所造成的特殊光電容現象作為研究題材。

1-1-1 量子點簡介及其特性

(1) 量子點特形與應用

在量子世界中，我們若將材料尺度限制於數個到數十個奈米之間，使其 X Y Z 三個維度與 de Broglie 電子波長或平均自由徑近似或小於，此時由於尺度上被量化，因而有了似 δ 函數的態密度與能接分立不連續的特性[1,2]，而我們稱這種結構為量子點。如圖 1-1 所示為四種不同維度侷限下所形成的態密度，依序為塊材、量子線、量子井、量子點，由圖可以看出態密度為不連續的脈衝形式，類似於原子中不連續電子能階結構，因此量子點又被稱為人造原子(artificial atom)。

現在，由於量子點技術已達成熟，在物理與電子元件上已有許多的應用，如量子點雷射[3,4]、紅外光偵測器[5,6]、單電子電晶體[7]、光記憶體結構[8,9]、量子運算[10,11]光二極體(LEDs)[12]等。並且在生物醫學上也有實質上的應用，如生物感測器[13]。

(2) 異質接面三種磊晶模時的成長機制：

有鑑於以往利用蝕刻(Etching)來形成量子點的方法在過程中容易產生缺陷(trap)，影響品質，因而目前主要利用應力誘發的方式來成長量子點，主要方式有分子束磊晶(Molecular Beam Epitaxy, MBE)、有機金屬氣相沉積(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)：

1. 分子束磊晶(Molecular Beam Epitaxy, MBE)：用來成長均勻和密集量子點，

此方式其表面能對於量子點的成核作用有重要影響；其優點在於在掌控成分與厚度上好掌握，磊晶速率可精確到每秒低於一分分子層(ML/s)，並且均勻度與品質都很高。而在長晶過程中利用高能電子繞射(reflection high energy electron diffraction, RHEED)作為監控，可以隨時掌握當下成長狀況。

- 2.有機金屬氣相沉積(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)：為一種單向的化學反應，成長過程中速度快且維護上方便，適合用來做大量成長，但是在高質量量子點成長方面其與 MBE 相比是較弱的。

下面簡單介紹異質接面的三種磊晶模式[14]，這些成長模式的機制即系統的演變總會傾向最底能量：

1. 層接式(F-vdM mode, Frank-van der Merwe mode)[15]：適用於磊晶材料的表面能小於或等於基板的表面能，為層狀堆疊結構
2. 島嶼式(V-W mode, Volmer-Weber mode)[16]：適用於磊晶材料表面能大於基板表面能，一開始就形成三維島嶼狀結構。
3. 層接而後島嶼(S-K mode, Stranski-Krastanow mode)[17]：相較於島嶼式(V-W mode)而言有較小的界面能(interfacial energy)；以 S-K mode 成長的過程中，會先長成幾個單層，接下來會形成二維結構的沾濕層(wetting layer)，但是隨著沾濕層的厚度增加，由於晶格不匹配而應力持續上升，為釋放此應力，其會自我聚集成零維島嶼狀量子點，因此這種由二維轉三維的量子點型態又稱自聚式量子點 (self-assembled QDs)，是目前主要用來成長的方式。這種成長方式有效的提供高密度、高均勻度及無缺陷的量子點。但是值得一提的，當我們成長厚度達一定程度造成應力過大，將發生應力鬆弛(strain relax)現象以釋放彈性能，此結果會造成缺陷的產生。以砷化銻/砷化鎵為例，晶格常數較小的砷化銻為與晶格常數較大的砷化鎵匹配，將壓縮晶格，當長晶程度達 1.7 個單元子層(monolayer, ML)，此時磊晶型式由二維轉三維，若程度達 3 個原子層此時將發生應力鬆弛而造成缺陷。

1-1-2 Dot-in-well (DWELL)簡介

Dot-in-well 結構是在量子點結構上蓋上一層晶格常數與量子點較接近的材料做為應力緩衝層，用來降低量子點與基板的應力及晶格不匹配，有效提升量子點密度與尺寸均勻性；而此結構使得量子點埋在量子井中，造成量子點侷限能力下降，以砷化銦(InAs)量子點為例子，當在砷化鎵(GaAs)與量子點間長上一層砷化鎵銦(InGaAs)量子井[18-20]，可成功的使波長範圍延伸至 $1.33\mu\text{m}$ 以上，進而增加了量點發光效率。

1-2 研究動機

近年來實驗室中針對 InAs/InGaAs 不同厚度下的樣品做了許多的探討，然而針對特定能量光源照光後，樣品對光電容特性的反應，我們所知道的還不夠詳確，因而我們想針對 InAs/InGaAs 量子點厚度 2.34 ML 這塊樣品，利用不同激發能量光源下的光電容反應來做為研究的主题，並探討其缺陷所扮演的角色；並且在之前研究中曾針對量子點厚度 3 ML 以上的應力鬆弛樣品，在長晶過程中有銦鎵交換的現象做了詳確的研究，因此我們將 2.34 ML 與 3.3 ML 厚度不同的樣品來做比較，探討銦鎵交換現象的存在與否，是否會在光電容反應上有影響來做為研究的方向。

1-3 論文架構

本論文主要利用 InAn/InGaA 量子點 2.34 ML 樣品來做研究，探討樣品在不同掃動速度與不同激發光源下，缺陷對其 C-V 電容值與光電容值所造成的反應，並且利用 3.3 ML 應力鬆弛樣品在相同實驗下的結果，與 2.34 ML 樣品比較，進而探討應力鬆弛後對其光電容值的影響。

以下為本論文的章節安排：

第一章：對量子點簡介並介紹三種量子點的長晶模式和 DWELL 結構優勢，

最後說明研究動機與論文架構。

第二章：說明實驗室中使用的量測系統，包括了光性量測：光激發螢光光譜 (PL)與電性量測：電容-電壓(C-V)、導納頻譜(C-F)、深層能階暫態頻譜 (DLTS)。

第三章：介紹研究樣品結構，並說明其長晶條件，最後介紹電性量測時所需之蕭基界面與歐姆界面電極製備。

第四章：針對樣品在 TEM 上、PL、DLTS、CV 量測中所得到的結果，對樣品做一基本特性的介紹。

第五章：由於在 DLTS 中量到的異常捕捉截面積與活化能值，進而使我們改變不同掃動速率去做 CV 量測，以探討是否存在缺陷是 DLTS 掃動速率下難以偵測到的。

第六章：由於光照光後會加快缺陷中載子出來的速率，因而讓我們想去研究變激發光源下缺陷對光電容值的影響，並且與 3.3 ML 應力鬆弛樣品做比較，進而了解應力鬆弛結果對光電容值大小的影響。

第七章：對於光電容中疑似深層能階缺陷存在的訊號，我們利用不同激發光源下的 PL 量測來證實它的存在，並且做了不同激發光源加電 PL 實驗，以更加確立其正確性。

第八章：選定兩個特定的激發光源，做 C-V 量測實驗，由縱深圖上訊號現象，探討不同光源下，其所激發的態。

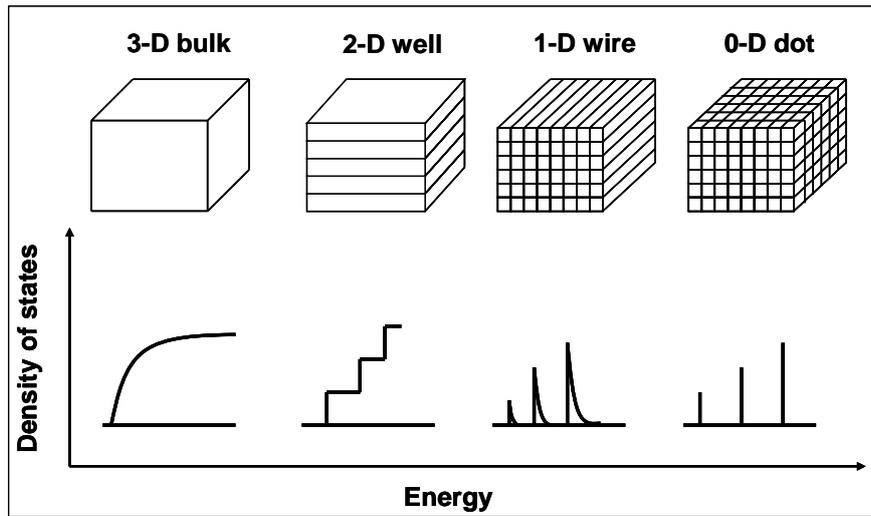


圖 1-1 不同侷限維度之結構所對應的能態密度



第二章 量測系統簡介

2-1 光激發螢光量測系統(Photoluminescence, PL)

本論文使用的 PL (Photoluminescence)量測設備由電物所楊賜麟老師實驗室提供，其原理為對實驗樣品激發一大於或等於其能隙的光源，使價電帶(valence band, VB)中的電子吸收雷射光的激發能量後被激發至導電帶(conduction band, CB)上，在價電帶上則產生了電洞，形成電子電洞對(electron-hole pair, E-H pair)，而受到庫倫力所吸引的電子電洞對則稱為激子(exciton)，激子在經過一段生命週期後電子落回價電帶與電洞復合，過程中可能是放出光子的輻射復合(radiative recombination)，或是熱輻射、放出聲子等非輻射復合(non-radiative recombination)。

PL 量測系統所包含的儀器設備：

- (1). 固態雷射(solid-state laser)：為 Excel 公司生產，型號為 LOC-VENTUS 1000 SERIES，為 CW 雷射，波長 532 nm，最大輸出功率 1.3 mW，雷射穩定度在 1.9% 以內，RMS 平均雜訊為 0.7%，驅動電流 6 安培，主要利用此雷射來激發樣品發出螢光而偵測。
- (2). 衰減濾光片組(Variable Neutral Density Filter)：利用衰減片來控制、調整實驗所需的雷射輸入功率。
- (3). 光遮斷器(Optical chopper)：目的在於使連續波的雷射形成方波的形式，所使用的型號為 NEW FOCUS 3501，7/5 孔型式，固定頻率在 500 Hz。
- (4). 聚焦透鏡(Focus Lens)：利用聚光透鏡將雷射光聚焦在樣品上。
- (5). 溫控裝置：主要為了量測低溫與變溫的光學特性而設置，包含真空腔體(chamber)、降溫用壓縮機(compressor)、機械幫浦(mechanical pump)、冷卻水系統以及溫控器(temperature controller)。系統的最低溫度約在 10 K，可利用循環氬的壓縮機與溫控器的加熱器相互配合以控制實驗所需的溫度進行

量測。

- (6). 高通濾光片(Long-pass filter)：雷射光強度遠大於樣品所放射出的螢光，使用 695 nm 的濾光片將雷射光過濾掉，避免其進入光偵測器中干擾實驗結果。
- (7). 分光儀(monochromator)：型號為 ARC Spectro-275，聚焦長度為 27.5 cm，內部含有有三塊光柵，為 600 groove/mm(BLZ=1000 nm)，可根據實驗所需的波段範圍來選擇。
- (8). 光偵測器(photodetector)：使用 Electro-Optical Systems 公司所生產的 InGaAs 光偵測器，在 300 K 時所適用的波長為 800 nm 到 1800 nm。
- (9). 訊號放大器(multi-meter)：將光偵測器所接收到的訊號放大。
- (10). 鎖相放大器(Lock-in Amplifier)：儀器型號為 STANFORD RESEARCH SYSTEM SR850，目的在量測微小的交流訊號。

PL量測系統以如圖2-1所示進行架設，將波長532 nm固態雷射所發出的雷射光，用不同倍率衰減片以降低輸出功率。將雷射光經由光遮斷器調變為方波形式，並將光遮斷器的頻率送至鎖相放大器作為參考頻率。經過光遮斷器調變的雷射會先光經過第一面透鏡後聚焦在樣品上，樣品受激發後進而放出螢光，螢光會經由第二片透鏡將聚焦並通過一片695 nm的高通濾光片，將雷射光濾掉(為避免雷射光訊號干擾)後進入分光儀的狹縫中進行分光，最後光偵測器會將偵測到的螢光訊號傳送至鎖相放大器將與光遮斷器相同頻率與相位的訊號加以放大，再傳回電腦存檔並讀出光激螢光光譜。

2-2 電流電壓量測(I-V)

實驗室所使用的電流電壓(I-V)量測系統為 KEITHLEY 236。我們會利用 I-V 量測來檢驗樣品經過蒸鍍或其它電極備製後特性的好壞，以確保樣品適合後續其他電性發面的量測，再者我們也會利用 I-V 量測來探討照光下光電流的訊號。其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：

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

(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)。本量測樣品理想因子大約在 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)：

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{W}$$

(2-2)

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

(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(2.34 ML 樣品 0.00785 cm^2 3.3 ML 樣品 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[22,23]：

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

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

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。

2-2-5 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[24]。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[25]。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。



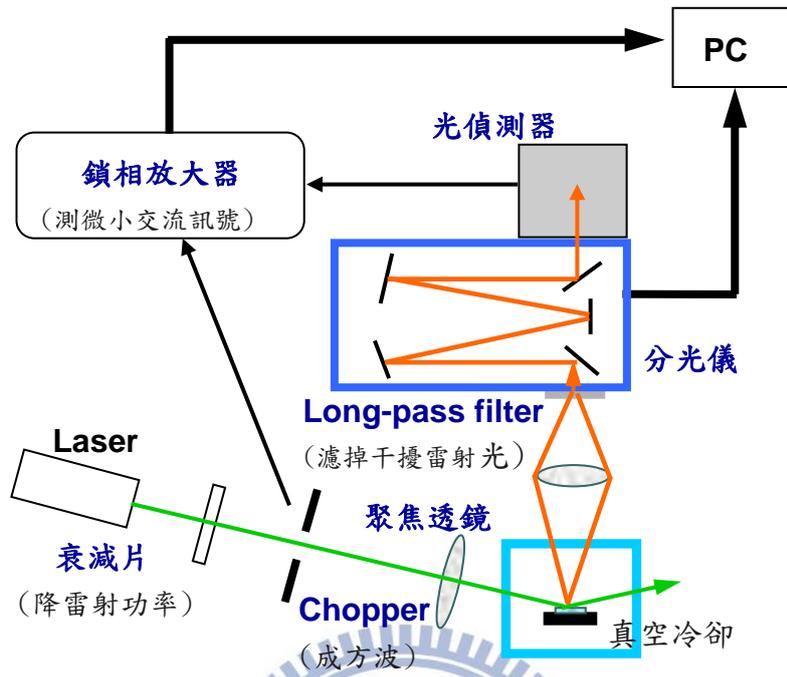


圖 2-1 PL 系統架構圖

第三章 研究樣品備製

3-1 量子點磊晶樣品之備製

本實驗中所使用到的樣品為工研院所提供，利用分子束磊晶(Molecular beam epitaxy)機台在(100)方向的 n^+ -GaAs(10^{18} cm^{-3})基板上進行晶片的成長。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). 首先將基板溫度固定在 600°C ，並以每秒 0.28 nm 的速率在 GaAs 基板上成長 $0.2 \mu\text{m}$ n-GaAs (Si doping: 10^{17} cm^{-3}) 緩衝層(buffer layer)
- (2). 利用成長緩衝層的最後 3 分鐘時間，於長晶的同時將基板溫度降至 550°C 。接著中斷成長(Growth interruption, GI) 2 分鐘的時間內把把基板溫度再降至磊晶量子點結構所需的 $480\sim 500^\circ\text{C}$
- (3). 之後以每秒 0.027 nm 的速率依序成長上不同厚度 InAs QD，量子點結構的磊晶厚度為 2.34 個原子層(monolayer, ML)、3.3 ML
- (3). 接著再以相同的基板溫度並配合長晶速率每秒 0.16 nm ，覆蓋上一厚度為 4.8 nm 的 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ QW
- (4). 維持磊晶量子井的基板溫度(500°C)與長晶速率先成長上 20 秒低溫 GaAs
- (5). 中斷成長 2 分鐘的同時將基板溫度升 550°C ，緊接著則是花 3 分鐘的時間利用邊升溫邊磊晶 GaAs 的條件將基板溫度升回 600°C ，覆蓋 $0.2 \mu\text{m}$ n-GaAs(Si doping: 10^{17} cm^{-3}) 覆蓋層(cap layer)。

完整的磊晶結構與能帶圖如圖 3-1 所示

3-2 蕭基界面及歐姆界面之電極製作

由於電性量測時我們是利用探針，與樣品正負極接觸，所以做為電性量測的

樣品需要製作上加正負電極，利用電極施與逆向偏壓施加於量測樣品上，藉由調變空乏區的大小，來得到量子點樣品的特性。首先以熱蒸鍍的方式將鋁(Al)金屬蒸鍍於樣品的磊晶面上，所形成的蕭基界面(Schottky contact)即為我們的正電極。而負電極的製作則是在樣品的 GaAs 基板背面點上高純度錫球(In ball)並將其置於均勻塗滿熔融狀態之錫薄膜的矽基板上，使正負電極將在同一方向上，方便我們三點探針基台的量測。

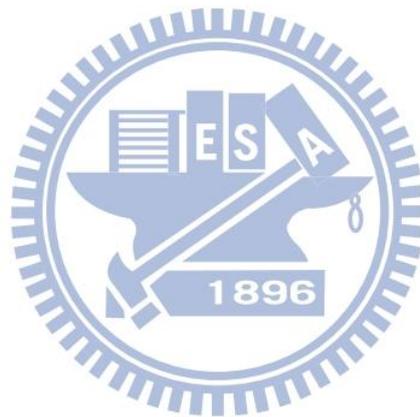
詳細的蕭基界面的製備過程如下：

- (1). 首先將樣品與蒸鍍金屬 Al 進行清潔，確保蒸鍍完成的蕭基界面有良好的品質。第一個步驟將其沖泡於去離子水(D.I water)中 3 分鐘，並配合使用石英震盪器，以去除表面的一般雜質。
- (2). 緊接著將試片浸泡於丙酮溶液(Acetone)中約 3~5 分鐘，將表面油漬除去。
- (3). 利用沖泡去離子水約 3 分鐘的時間將殘留的 Acetone 去除。
- (4). 以水與鹽酸一比一的比例調配將鹽酸稀釋，將樣品置入溶液中 15 秒，去除陽離子及氧化物。
- (5). 以同樣比例的稀釋鹽酸將金屬 Al 表面的氧化層去除，使 Al 的表面成為乳白色。
- (6). 針對 3.06 ML 的樣品，為了避免其過大的漏電流在大負偏壓時影響電性量測準確性，我們利用稀釋過後的硫酸與過氧化氫混合液，其調配比例為 $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{SO}_4$ (10:1:1)。將樣品浸泡約 1 分鐘，蝕刻掉表面的 GaAs 約 50 nm。
- (6). 最後則是沖泡去離子水約 3 分鐘，去除表面殘留的酸液，並用氮氣將其吹乾。
- (7). 將清洗完成的樣品以真空膠帶黏貼於載台上，覆蓋上圓形面積 0.005024 cm^2 的 Mask，利用 Mask 決定了蕭基界面的大小。
- (8). 置入蒸鍍機內，使用機械幫浦(mechanical pump)粗抽至真空度為 1×10^{-2} torr 後再利用擴散幫浦(diffusion pump)將真空度達到 $2 \sim 3 \times 10^{-6}$ torr 以下，開始以

熱蒸鍍的方式鍍上 Al。

詳細的歐姆接面的製備過程如下：

- (1). 當樣品成功的蒸鍍上蕭基接面後，我們會在樣品的 GaAs 基板背面點上約 4 個高純度的錫球(In ball)。
- (2). 將其送入高溫 300 °C 的爐管裡加熱，使 In ball 與基板的黏合性增加，透過電性量測確保兩 In ball 間的電阻值小於 10 Ω ，有良好的歐姆特性。
- (3). 再將其與一表面有覆蓋一層均勻度很高的熔融狀 In 薄膜之矽基板相連接後即完成電性量測所需要的樣品備製。



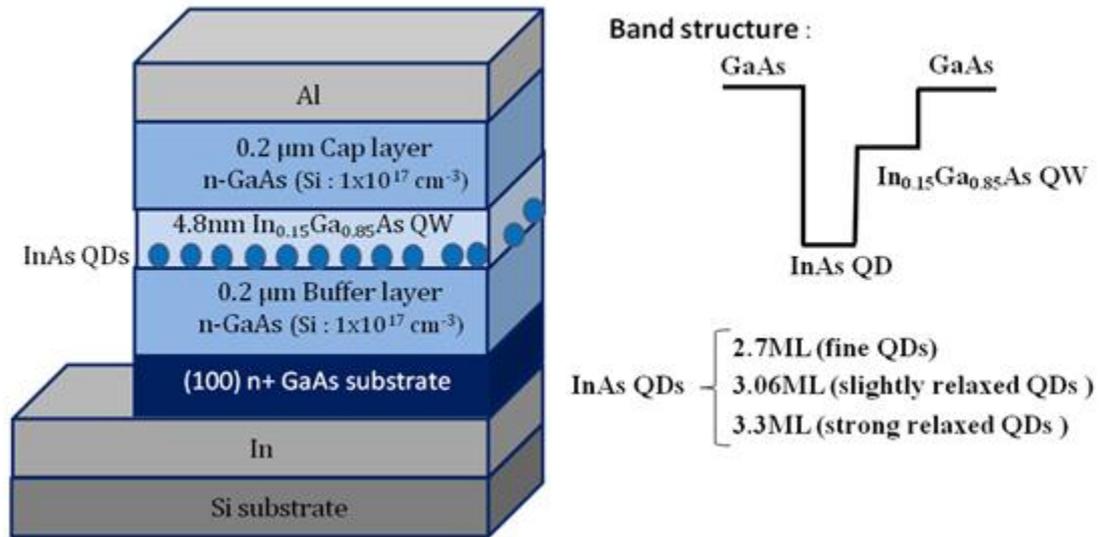
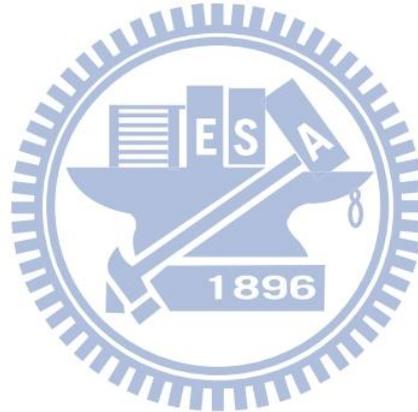


圖 3-1 樣品結構及所對應之能帶圖



第四章 2.34 ML 量子點基本特性

本章節要先就本論文主要研究樣品，2.34 ML fine 量子點的基本特性去做主要研究說明前的基本介紹，包含穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscope, TEM)上的所看到的量子點分布情形、dark 情形下電性電容電壓(CV)量測及縱深圖去分析量子點對應偏壓及空乏區位置、光性光激發光譜(PL)量測去觀察其發光位置所對應能量、以及深層能階暫態頻譜(DLTS)量測去找出量子點的缺陷(defect)位置。

4-1 TEM 分析

我們利用 TEM 技術來分析量子點在奈米尺度下其空間的結構，圖 4-1 為 2.34 ML 量子點的橫切面暗場圖，圖中的影像亮暗程度對應了原子序的大小，亮的部分代表著其分佈範圍存在原子序較高的元素，相反的暗的部分為原子序較小的元素；由 2.34 ML 的 TEM 圖我們可以看到，其亮點位於量子井中的分佈大多是大小與形狀上是類似的結構，並且多呈現橢圓形或梯形，這代表著 2.34 ML 樣品量子點結構在大小跟形狀上是均勻的，而根據之前研究對其寬度與高度的統計，可以知道 2.34 ML 樣品的量子點平均高度約為 19.6 nm，基底寬度約為 8.4 nm

4-2 PL 分析

藉由 PL 螢光光譜的量測，我們可以得到該量子點的發光位置，由發光位置所對應能量我們可以了解該樣品的發光範圍。圖 4-2 為 2.34 ML 樣品在固定激發強度 10 mW，隨溫度變化的光激發螢光光譜圖，由圖可以看出其訊號分成兩包 peak，一包在較低能量位置是量子點基態(Ground State, G.S.)訊號，而另一包發光位置在較高能量位置是由第一激發態(First Excited State, F.E.S.)所貢獻，由圖可以看出隨著溫度上升兩包訊號有往低能量紅移的現象，以基態為例，隨著溫度上

升其發光位置由低溫 50 K 時的 1 eV 逐漸紅移到高溫 300 K 時的 0.96 eV，同樣的情況也發生在第一激發態訊號上，而上述紅移的原因是由於 InAs 量子點的能隙在隨著溫度上升過程中將由大變小，反映在光譜圖上就會發現發光位置由高能紅移到低能量；並且我們利用導電帶(Conduction band)與價電帶(Valence band) 7:3(CB:VB=7:3)的比例，針對基態訊號與第一激發態訊號去做活化能上的估計可以得到基態活化能在低溫時約為 364 meV 在高溫時約為 364 meV,而第一激發態活化能在低溫 50 K 時約為 322 meV 在高溫 300 K 時約為 280 meV，其低溫下能帶示意如圖 4-3 所示。

4-3 DLTS 分析

為了要在接下來的研究中能先對 2.34 ML 量子點空間結構的組成有更多地了解，特別是缺陷的性質，我們對樣品的整個偏壓範圍 0 V 到 -3.5 V 每隔 -0.5 V 一個範圍去做了 DLTS 的量測，如圖 4-4 (a) ~ (e)所示；由量測的結果發現本樣品從結構表面到量子點偏壓位置都有一個明顯且訊號形狀類似的缺陷存在，所出現的溫度大約在 350 K 附近，由文獻查證可以知道它應該為一個 EL2 缺陷，而在過了 -2.5 V 後可以看到訊號明顯的減弱，這代表著其缺陷濃度在空間中的分部大多是存在樣品表面到量子點位置之間的位置。

我們將 DLTS 上所量到的訊號繪成阿瑞尼士圖(Arrhenius plot)的表示方式，如圖 4-5，並根據 4-1 式去擬合其活化能與捕捉截面積，如表 4-1 所示。

$$e_{th}(T) = \gamma T^2 \sigma_n \exp \left[-\frac{E_a}{kT} \right] \text{的} \quad 4-1$$

其中 γ 為一常數，對 n-type GaAs 而言其值為 $2.28 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-2}$ ， σ_n 為捕捉截面積、 E_a 為活化能。然而由表格中可以看到在偏壓位置 -0.5 V 以後捕捉截面積的值開始出現異常，所擬合出來的數值已經遠大於一般所認知到捕捉截面積數量級，不能符合我們的預期，而如此擬合出來的活化能深度也不免讓我們感到懷疑；因

而在此我們只能先確定 2.34 ML 樣品確實在內部存在缺陷，並且由訊號出現溫度範圍合理懷疑是 EL2 缺陷，至於我們得到的異常捕捉截面積值與活化能量目前懷疑是由於 DLTS 機台掃動原理是在一週期內(1 s)先給予一個 filling puls(1ms 到 100 ms 不等)，然後在剩餘時間(999 ms 到 900 ms)內將缺陷訊號掃出，然而假如該樣品還存在其他能量位置更深的缺陷，或者是樣品中缺陷訊號無法在這個掃動速度下被完全掃出，那我們就無法得到完整的缺陷訊號，所以在擬合值的判讀上我們就會出現誤判。

4-4 CV 分析

藉由 CV 電容電壓量測，我們可以得知在電性上隨偏壓改變 2.34 ML 樣品在各個偏壓下的電容變化，藉由其電容的變化，我們得以知道該樣品的量子點偏壓位置，甚至是受缺陷因素影響而使電容值變化的偏壓位置，進而再經由 CV 圖轉縱深圖得到各空乏區位置下對應的載子濃度圖。

圖 4-6 為 2.34 ML 樣品在未照光 dark 情況下，由低溫 78 K 到高溫 360 K 的變溫圖，由圖上可以明顯的看出低溫下電壓掃動來到 -2 V 時，電容值開始出現平台，平台出現代表著此時量子點位置開始有載子被空乏區空乏掉，也就是偏壓位置來到量子點區域，直到約 -4 V 時平台位置才消失。

而樣品在低溫到高溫過程中約有 200 (pF)電容值抬升的溫度響應，代表著溫度升高後樣品中有大量的載子跑出來貢獻在電容值上；接著我們將變溫 CV 圖轉換成變溫的縱深圖，如圖 4-7 所示，縱深圖上有兩群訊號，一群位置約在空乏區深度 0.24 (μm)處，另一群位置約在空乏區深度 0.14 (μm)處；將這兩個空乏區位置對應到 CV 偏壓位置上，我們可以發現空乏區深度 0.24 (μm)這群對應到量子點偏壓位置，並且其濃度大小隨溫度升高有逐漸下降的趨勢，符合量子點在高溫下載子侷限能力差，載子漏掉的條件，所以其訊號為量子點所貢獻；而空乏區深度 0.14 (μm)的訊號對應到 CV 圖上偏壓位置是在量子點前面，位在樣品表面到

量子點之間，由上一小節 DLTS 上訊號出現的偏壓位置我們知道在表面到量子點之間存在缺陷訊號，所以我們合理的猜測縱深圖上該訊號是由缺陷中的載子所貢獻，並且其濃度大小隨溫度升高逐漸變大，符合缺陷在低溫下完全抓住載子，隨著高溫後，載子越來越容易從缺陷中跳出，因而貢獻在濃度上，簡單示意圖如圖 4-8 所示。



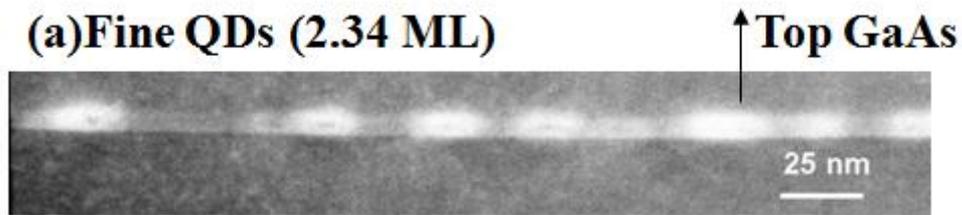


圖 4-1 2.4 ML 量子點之 TEM 圖

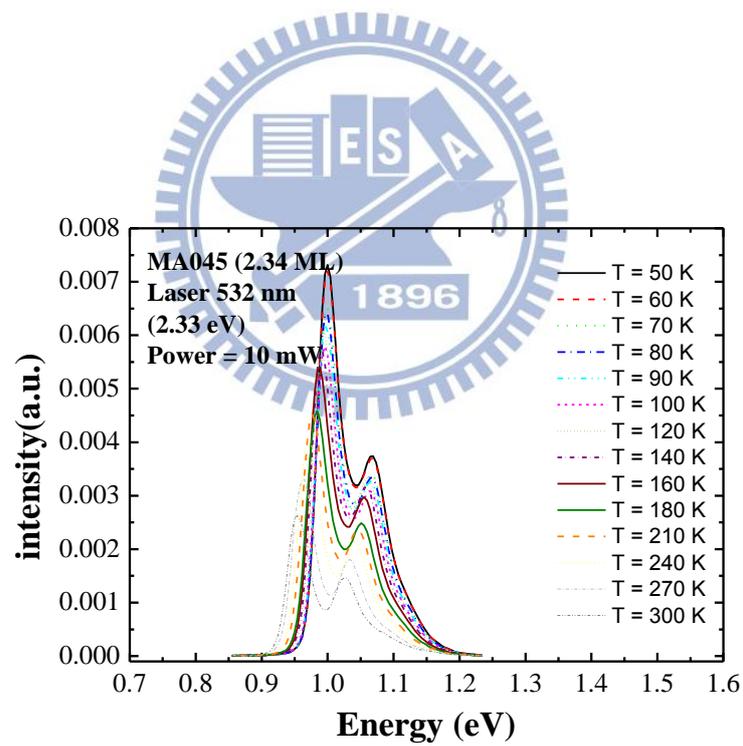


圖 4-2 2.34ML 樣品激發光源 2.33 eV 變溫度 PL 光譜圖

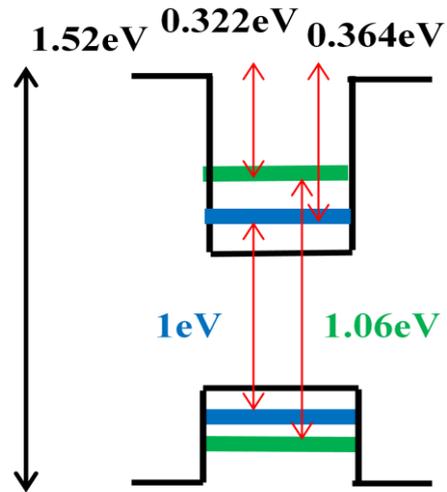


圖 4-3 2.34 ML 樣品低溫 50 K 能帶示意圖

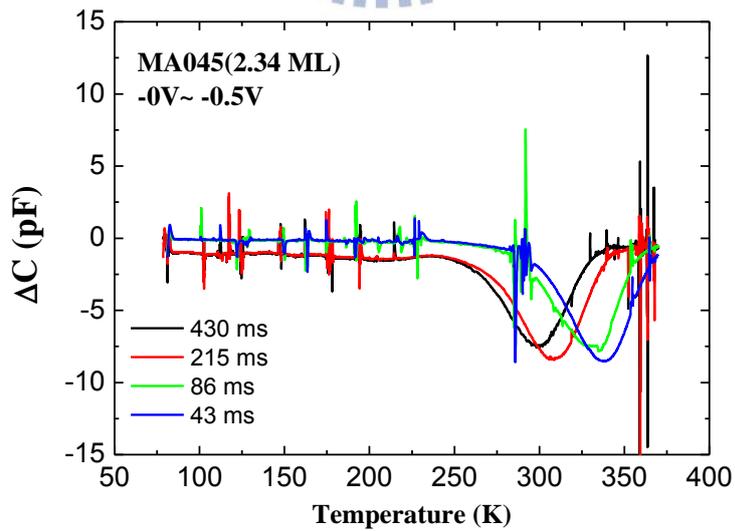
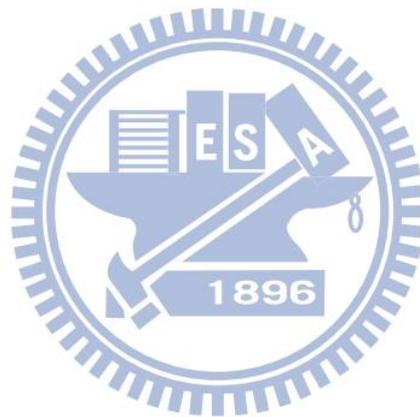


圖 4-4(a) 2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖

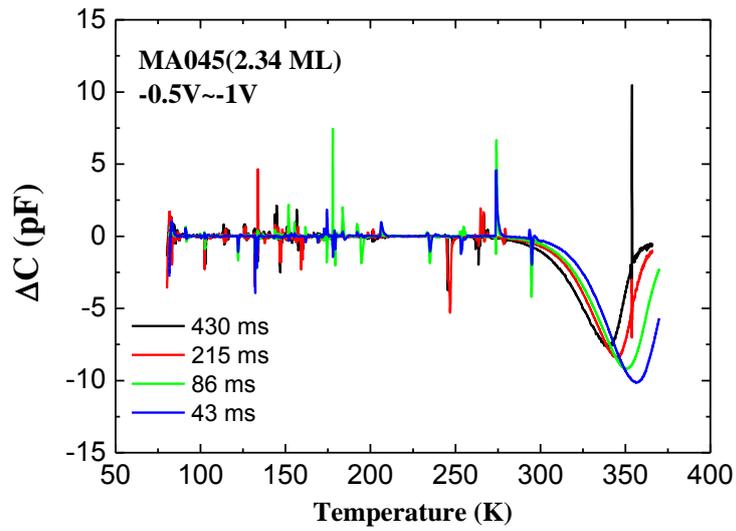


圖 4-4(b) 2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖

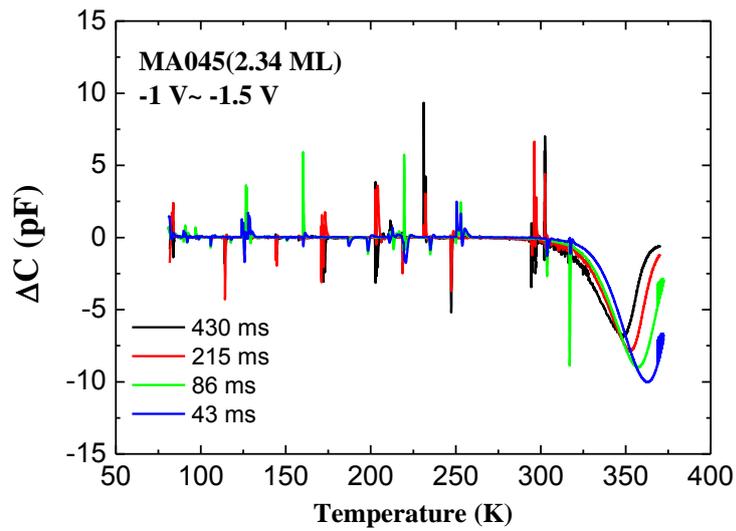


圖 4-4(c) 2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖

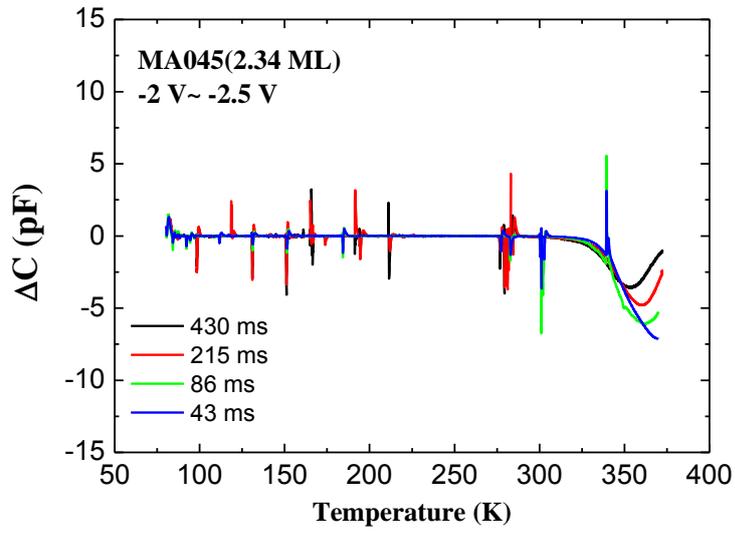


圖 4-4(d) 2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖

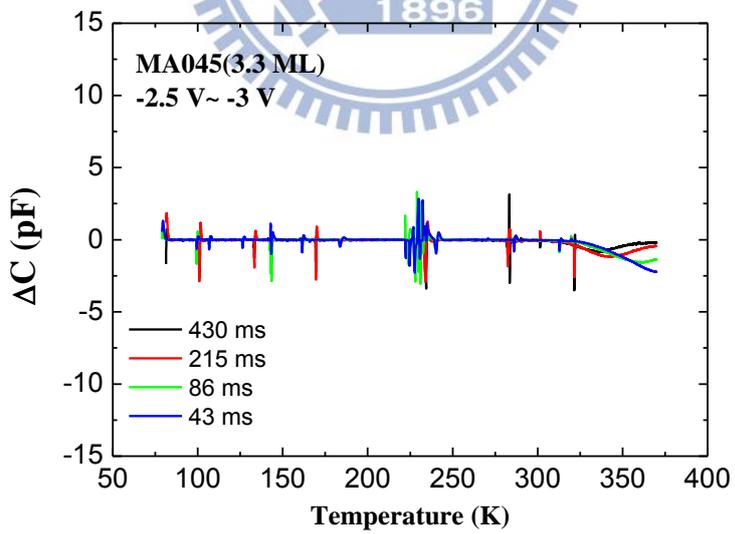


圖 4-4(e) 2.34 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖

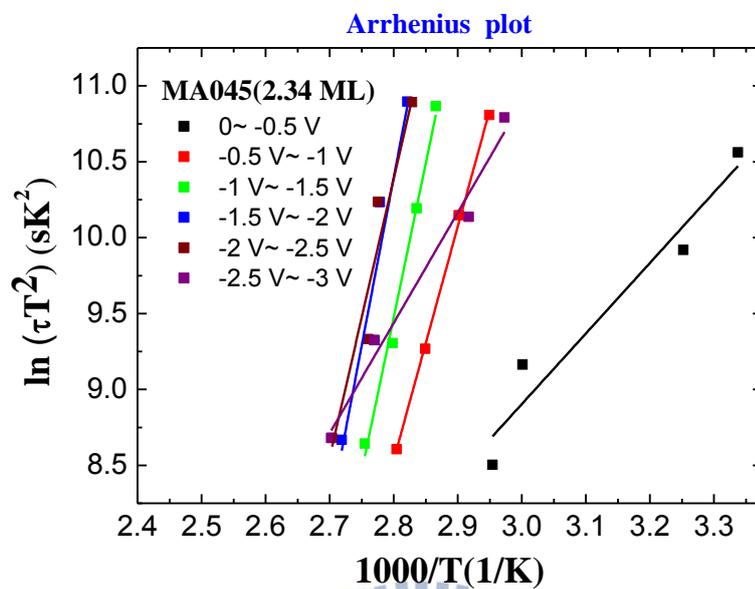


圖 4-5 2.34 ML 樣品不同偏壓下阿瑞尼示圖

2.34 ML	Ea (eV)	σ (cm ²)
0 V / -0.5 V	0.401	6.775×10^{-19}
-0.5 V / -1 V	1.327	4.26×10^{-6}
-1 V / -1.5 V	1.751	1.132
-1.5 V / -2 V	1.913	122.3
-2 V / -2.5 V	1.583	2.54×10^{-3}
-2.5 V / -3 V	0.628	2.42×10^{-16}

表 4-1 2.34 ML 樣品不同偏壓下之活化能與捕捉截面積

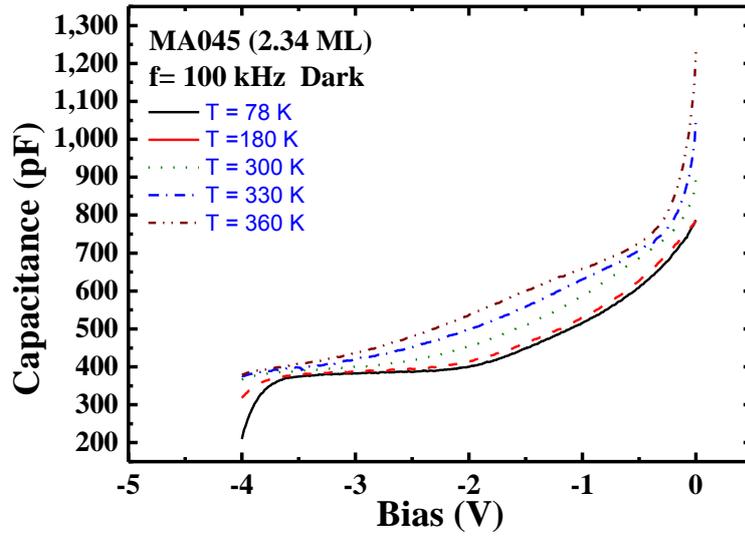


圖 4-6 2.34 ML 樣品 dark 隨溫度變化 CV 量測圖

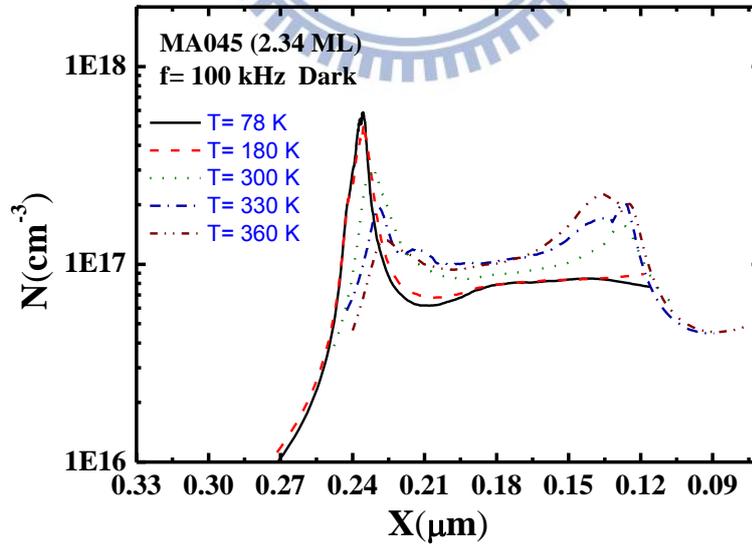


圖 4-7 2.34 ML 樣品 dark 隨溫度變化縱深圖

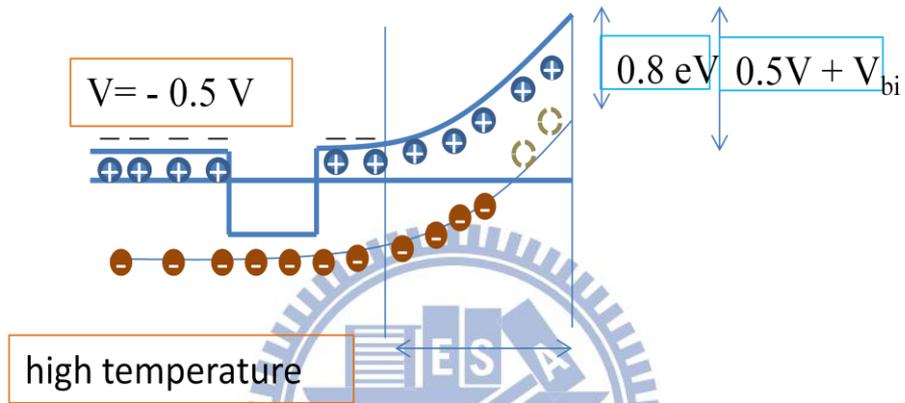
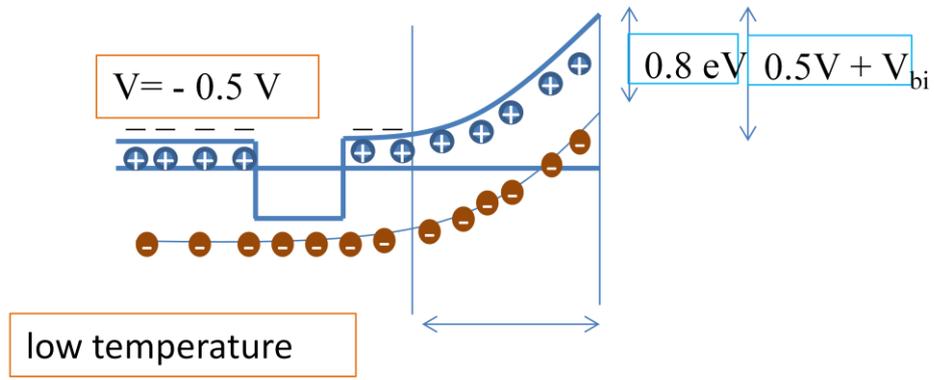


圖 4-8 2.34 ML 樣品 dark 隨溫度變化載子激遷示意圖

第五章 不同掃動速率 CV 量測

在上一章節曾談到，在 2.34 ML 樣品的 DLTS 量測實驗中，我們無法擬合到正常的捕捉截面積 σ_n 與為活化能 E_a ，猜測是由於樣品本身存在的缺陷，在有限的 DLTS 掃動速度下，我們無法將所有缺陷訊號完全掃出，所以才造成捕捉截面積 σ_n 與為活化能 E_a 數值的誤判；而 CV 量測時我們可以調整其掃動速率 (Sweeping rate)，讓速率可以比 DLTS 掃動速率慢，因而本章節想藉由改變 CV 量測時不同掃動速率的設定，以探討是否在樣品中確實存在 DLTS 掃動速率下所無法掃到的缺陷訊息，並將 3.3 ML 應力鬆弛樣品[26]以同樣手法條件做實驗，再比較兩邊差異，以做為更多佐證。

5-1 2.34 ML 樣品量測

圖 5-1(a)、5-1(b)為 2.34 ML 樣品在低溫 78 K 不同掃動速率下所得到的 CV 圖與縱深圖，由圖上可以看出在低溫下所呈現的圖形是幾乎沒有電容值變化量的，在縱深圖上也一樣呈現無變化，只在量子點空乏區位置上出現訊而縱深圖深度較淺的位置也沒出現我們先前所提到缺陷訊號，然而當我們把溫度升高到 300 K 甚至 350 K 時，如圖 5-2(a)、5-2(b)與 5-3(a)、5-3(b)，可以很明顯的發現 CV 圖上開始出現電容值變化，並且在縱深圖上空乏區較淺的區域出現一包訊號，假設我們之前的討論結果是對的，那這包訊號就是缺陷了。當在低溫下時由於缺陷中載子難以掙脫缺陷的束縛，因而即使我們的掃動速率再慢也難以等到缺陷中載子訊號出來，而當溫度一升高如同先提到的原理，由於載子熱能增加，相對的脫離缺陷的機會就大幅增加，並且我們調整了 CV 量測的掃動速率，一旦載子受熱能後跳出的速率與 CV 量測的掃動速率相同或更快時，我們就會掃到載子訊號。

隨著我們改變掃動速率可以得到不同掃動速率下的電容值變化，這意味著

2.34 ML 樣品的確存在缺陷訊號是 DLTS 所無法掃出的，並且也代表著缺陷中載子跳出的速率有其不同的時間常數。

5-2 3.3 ML 樣品量測

當我們把相同實驗手法與條件運用在另一片 3.3 ML 應力鬆弛樣品上時，我們所得到的低溫結果如圖 5-4(a)、5-4(b)所示，低溫下一樣不會掃到載子，在縱深圖上也只有量子點訊號，然而當溫度升高溫時，如圖 5-5(a)、5-5(b)與 5-6(a)、5-6(b)所示，卻發現 3.3 ML 樣品在高溫時並不會有如同 2.34 ML 樣品的電容值變化，在縱深圖上也不會有多餘的一包訊號產生，整個低溫到高溫的 CV 與縱深圖只呈現出量子點的訊號；如此的實驗結果代表著 3.3 ML 樣品缺陷中載子跳出速度率完全大於或小於 CV 量測所設定掃動速率，而由之前對 3.3 ML 樣品的研究 [26-29]當中也確實提到 3.3 ML 應力鬆弛樣品存在的缺陷，其 DLTS 量測結果如圖 5-7、表 5-1 所示，為鎵空缺(Ga vacancy)與砷間隙原子(As interstitial)複合型的 EL6 ($E_C-0.35$ eV)缺陷(As_i-V_{Ga} complex)，因而其缺陷中載子挑出速率是完全大於等於我們所設定的最快掃動速率，即載子是全部都被量測到的。

5-3 兩片樣品結果比較

綜合上述兩片樣品在改變 CV 量測掃動速率的實驗結果可以發現，2.34 ML 樣品存在的缺陷性質具有明顯的時間常數，所以對於不同掃動速率下的電容值會有所變化，然而 3.3 ML 樣品之主要缺陷完全不同於 2.34 ML 樣品之缺陷，屬於載子跳脫缺陷時間較快的，所以在該實驗中並不會有電容值的變化。

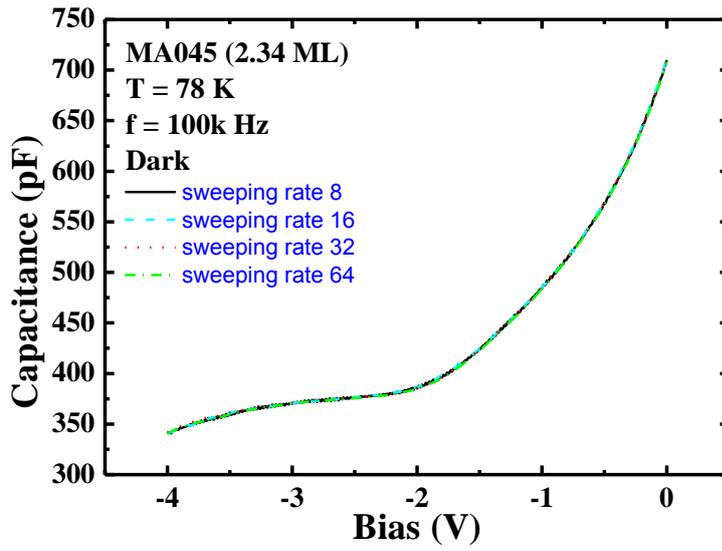


圖 5-1(a) 2.34 ML 78 K 改變不同掃動速率 C-V 圖

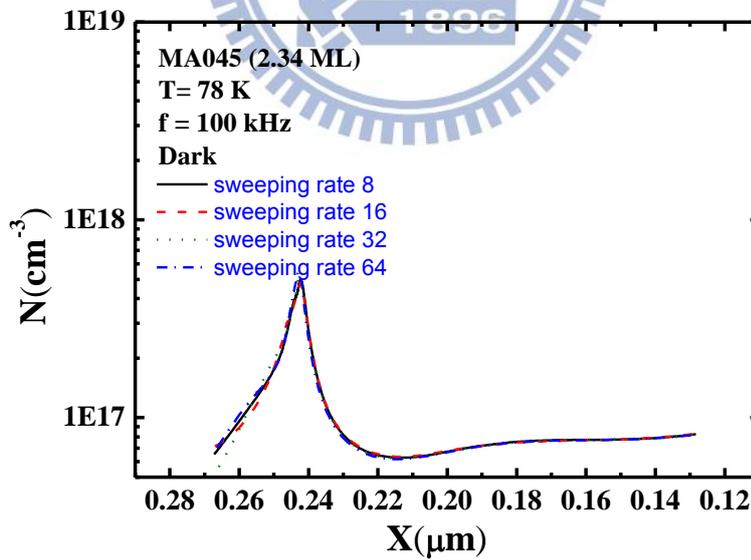


圖 5-1(b) 2.34 ML 78 K 改變不同掃動速率縱深圖

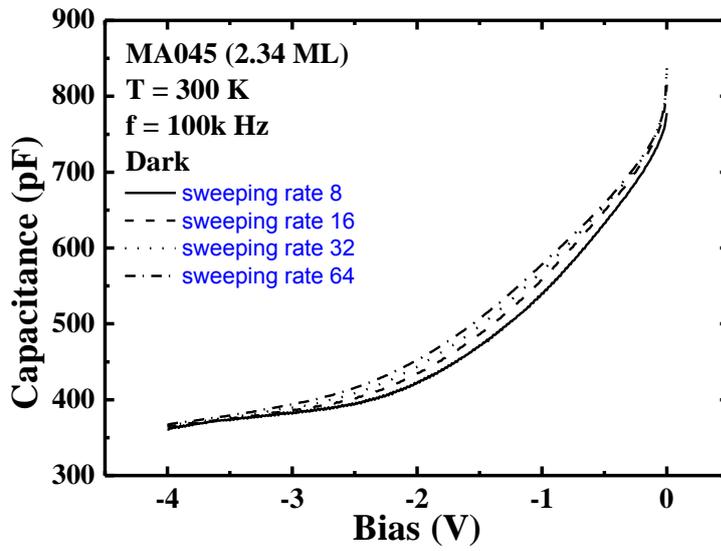


圖 5-2(a) 2.34 ML 300 K 改變不同掃動速率 C-V 圖

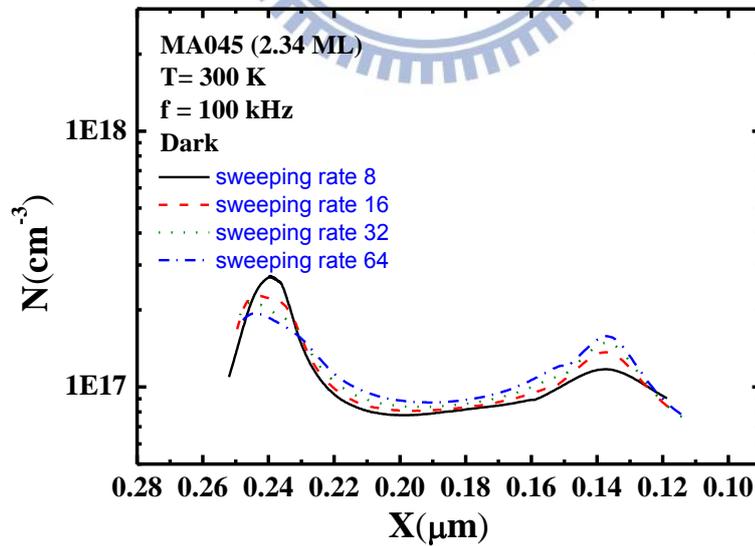


圖 5-2(b) 2.34 ML 300 K 改變不同掃動速率縱深圖

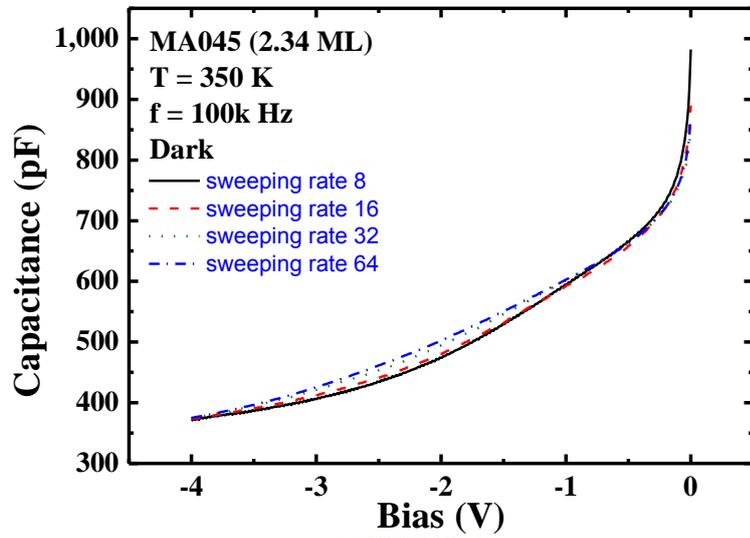


圖 5-3(a) 2.34 ML 350 K 改變不同掃動速率 C-V 圖

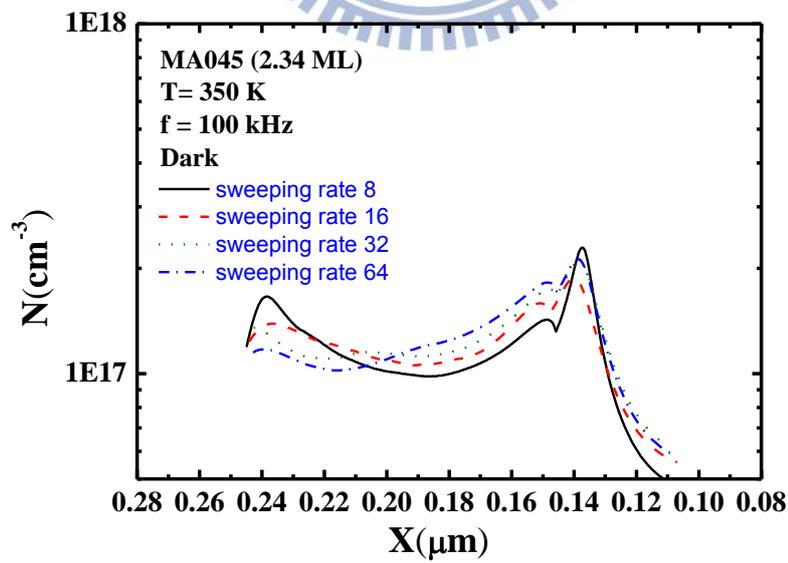


圖 5-3(b) 2.34 ML 300 K 改變不同掃動速率縱深圖

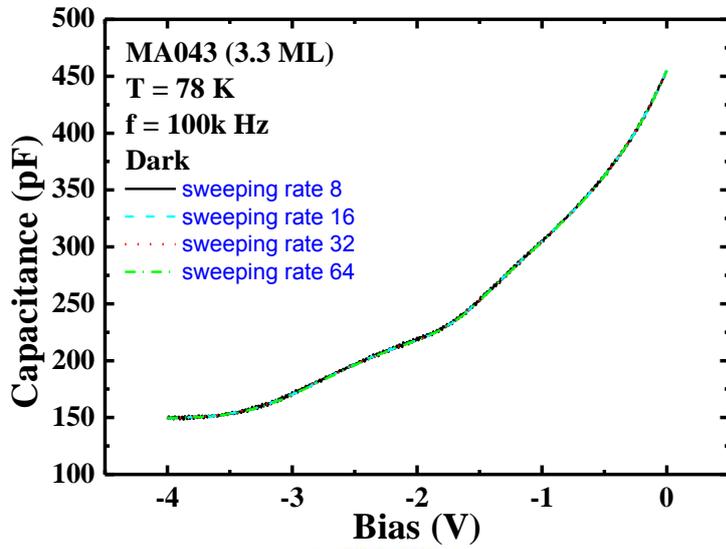


圖 5-4(a) 3.3 ML 78 K 改變不同掃動速率 C-V 圖

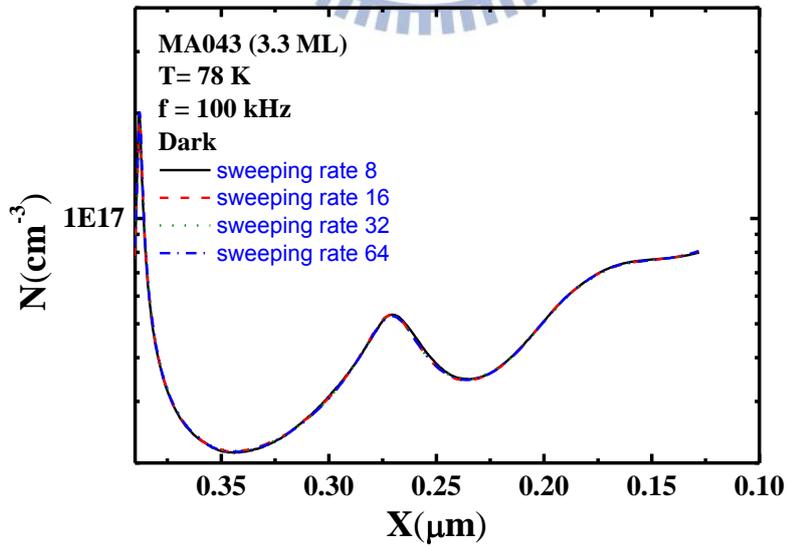


圖 5-4(b) 3.3 ML 78 K 改變不同掃動速率縱深圖

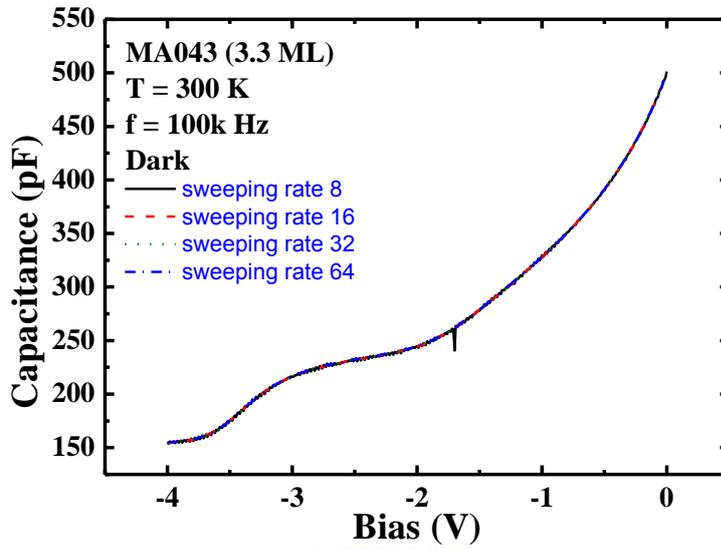


圖 5-5(a) 3.3 ML 300 K 改變不同掃動速率 C-V 圖

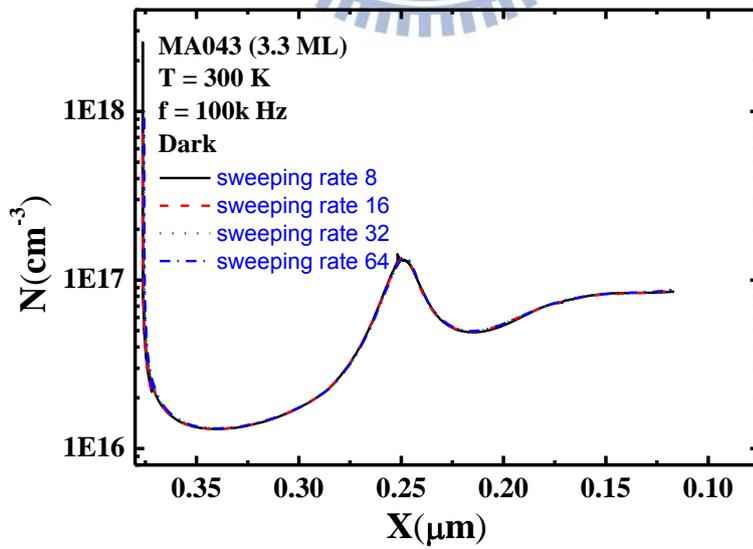


圖 5-5(b) 3.3 ML 300 K 改變不同掃動速率縱深圖

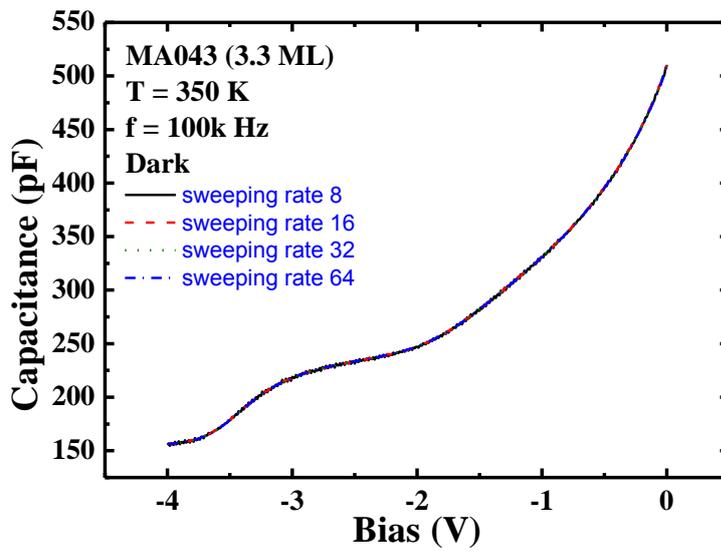


圖 5-6(a) 3.3 ML 350 K 改變不同掃動速率 C-V 圖

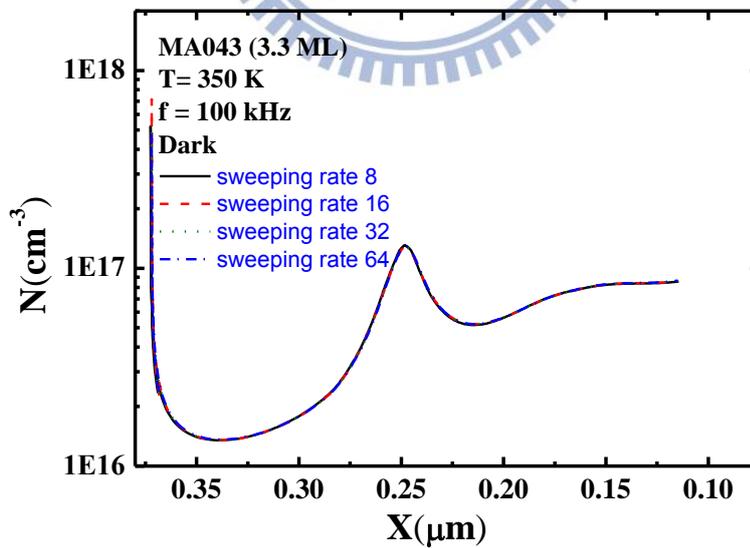


圖 5-6(b) 3.3 ML 350 K 改變不同掃動速率縱深圖

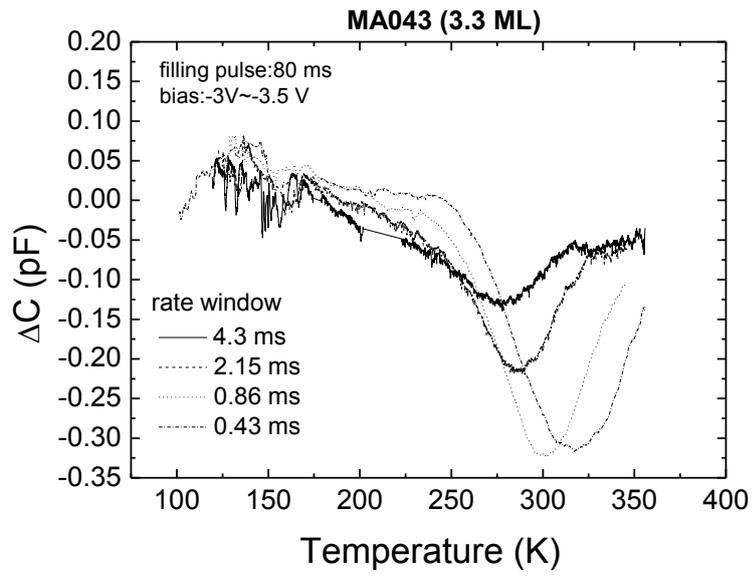


圖 5-7 3.3 ML 樣品固定偏壓與 filling pulse 下變 rate window 圖

3.3 ML	(-3 ~ -3.5 V)
Ea (meV)	383
σ (cm ²)	1.42E-16

表 5-1 3.3 ML 樣品的缺陷活化及與捕捉截面積

第六章 光激發之電容量測

為了在研究中得到更多研究樣品照光後的資訊，本章節開始我們將進入本論文的主要研究重點；以具有連續發光波段(500 nm~2000 nm)的鹵素燈(Halogen lamp)為光源，在樣品上進行光激發 CV 量測，我們藉由照光後的電容值扣掉未照光 DARK 情形下的電容值，進而可以得到光電容(Photo-Capacitance)值隨不同照光波段下的圖，並且針對我們在光電容圖上所看到的特殊現象，比較 2.34 ML 樣品與 3.3 ML 樣品兩片樣品的差異，進而由各別的内部特性，去探討為何會有如此現象。

6-1 光電容原理簡介

當樣品受一連續發光波段光源激發時，我們藉由各照光光源下所得到電容值減掉 dark 情形下的電容值，因而得到隨激發光源變化的光電容圖。假設我們以一能量為 $h\nu$ 的激發光源做為激發，在能帶圖將產生等量的電子電洞對，而樣品中的某一個能態，如量子點基態，由於受到光激發將使電子由低能態躍遷到量子點以外，而相同的情況也可以想像在電洞被激發出去，當等量的電子與電洞數目同時貢獻在電極上，那麼此時將形成光電流(Photo-Current)訊號；當電子電洞沒貢獻在電極上而是產生覆合(recombination)時，此時將產生 PL 訊號；而當所被激發的電子數目扣除貢獻在光電流部分還有貢獻在 PL 上的部分，那麼最後剩下的淨電子量將會造成空乏區位置的內縮，如圖 6-1 所示，因而使電容值變大，即形成光電容(Photo-Capacitance)值，其中淨電子數量將與電容值前後變化量成正比。

6-2 量子點樣品之光電容量測

我們對 2.34 ML 樣品所打的激發光波段範圍為 805 nm~1771nm, 其低溫 78 K 變電壓光電容圖形如圖 6-2 所示, 由圖上可以看到整個光電容的趨勢大致上可分為三大區域, 第一部分為在打光 0.8 eV 附近的區域有一包光電容值的抬升, 接著在 1 eV 時下凹[30], 第二部分是在過了 0.8 eV 後約在 1 eV 到 1.3 eV 間有一個段光電容值幾乎為零的區域, 而第三部分是在打光 1.3 eV 後光電容值會開始呈現一個較劇烈的抬升。而相同的情況也發生在 3.3 ML 樣品上, 如圖 6-3 所示; 而當我們將樣品量測的溫度逐漸提高時, 如圖 6-4、6-5 所示, 會發現整體光電容趨勢大致上是不變的, 但是整個光電容值會下降許多, 根據前面所提到的光電容原理, 我們可以說該光電容值下降現象是由於在高溫下電洞跑出量子點的數量比起低溫時多了許多, 因而淨電子數量就會下降, 整個光電容值也就下降。

光電容圖上三個區域的來源: 在 0.8 eV 附近這包的抬升, 我們覺得是由於之前 DLTS 上所量到的 EL2 缺陷[33]所照成的; 當激發光源能量在 0.8 eV 附近時, 由於 EL2 缺陷受到光的激發, 使得缺陷上的電子往外躍遷而造成光電容值; 在 1 eV 到 1.3 eV 間的訊號是由於此波段下正好為樣品 PL 光譜發光位置, 如圖圖 5-6 所示, 大部分的電子都貢獻到 PL 訊號去了, 因而能貢獻在光電容上的電子就很少了; 而最後一部分是在 1.3 eV 時有一明顯的較大光電容值的現, 目前猜測是由於樣品內仍存在一個更深的高濃度缺陷, 屬於純鎵空缺(Ga vacancy), 此高濃度缺陷的在被光激發後會照成大量的電子貢獻在光電容上。

6-3 比較 2.34 ML 樣品與 3.3 ML 樣品

比較 2.34 ML 樣品, 如圖 6-2 與 3.3 ML 樣品, 如圖 6-3, 雖然在趨勢上同如上一節所解釋的, 都有一樣的現象, 但是此處令我們很納悶的點是, 為何在光電容值上兩片樣品會有如此大的不同。在 2.34 ML 樣品我們看到其電容值的抬升是非常明顯的, 低溫 78 K 下 1.3 eV 這包訊號最大的光電容值達 300 (pF), 訊號小一點的 0.8 eV 這包訊號接近 50 (pF), 然而我們將 3.3 ML 樣品拿來做了比較,

卻發現 3.3 ML 樣品低溫 78 K 整體最大的電容值只有 15 (pF)，跟 2.34 ML 樣品比起來有了好幾時倍的差距，這個特殊的現象讓我們懷疑兩片樣品是否在內部特性有其特別不一樣的地方才造成此結果。

在先前的研究中曾提到 3.3 ML 樣品是一片應力鬆弛樣品，在成長過程中會造就有別於 2.34 ML fine QD 樣品，首先我們先簡單介紹一下其成長過程：當 InAs 磊晶厚度超過一臨界厚度約 3 ML 此時 InAs 量子點已產生非常大壓縮應力，然而還會再覆蓋上一層 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ QW，如圖 6-6(a)，此步驟將造成晶格不匹配使得部分體積較大的 InAs 量子產生差排錯位(misfit dislocation)缺陷以釋放應力，之後再長上的低溫 GaAs 時失去了原先穩固量子點的用意，反而施予 InAs 量子點更大的應力，如圖 6-6 (b)，造成沒有利用產生缺陷來釋放應力的另一部份 InAs 量子點開始與缺陷量子點產生銻鎵原子交換(In/Ga intermixing)的過程，將銻原子往應力較低的缺陷量子點聚集 [31,32]，達到應力減緩的效果，而此時的長晶溫度(500~550 °C)也有利於銻鎵原子交換。在上述的過程中有提到銻鎵原子會交換，因而可以合理的懷疑鎵空缺(Ga vacancy, V_{Ga})在這個過程中將會變少，並且由銻所佔據形成 In_{Ga} ，而我們在上一小節有提到光電容訊號上 0.8 eV 這包訊號由 EL2 (As_{Ga})缺陷[33]所造成，然而此時由於銻鎵交換深的關係，砷(As)佔據鎵空缺(Ga vacancy, V_{Ga})的量即下降，所以 EL2 (As_{Ga})缺陷量即變少，即造成 0.8 eV 這包訊號的減弱，而 1.3 eV 這包訊號為純鎵空缺(Ga vacancy, V_{Ga})缺陷所造成的，一旦鎵空缺(Ga vacancy, V_{Ga})量下降，1.3 eV 這包訊號也會減落。

綜合上述所有結果，我們知道了 3.3 ML 應力鬆弛樣品之所以在光電容值上如此的小，主要是來至於特定缺陷的缺乏，因為銻鎵交換過程將所需的缺陷都取代掉了，而相反的 2.34 ML 樣品未達應力鬆弛，仍具有這些所需的缺陷，因而在光電容值上就會有大量的貢獻。

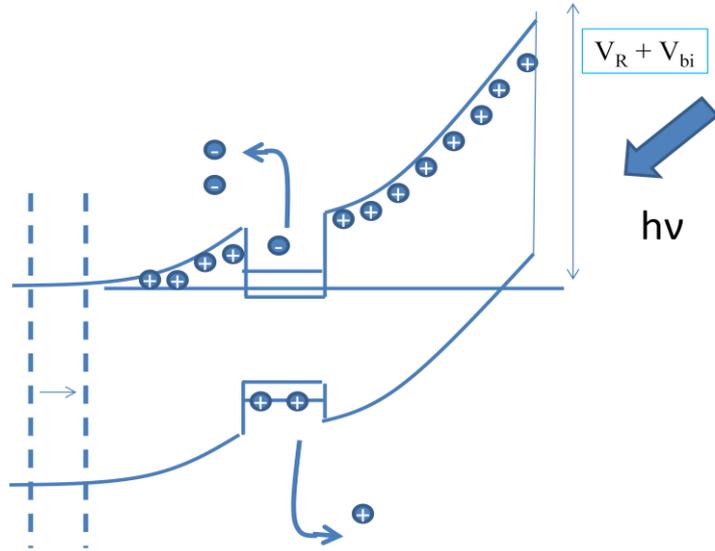


圖 6-1 光激發下電性量測時載子躍遷機制與能帶圖

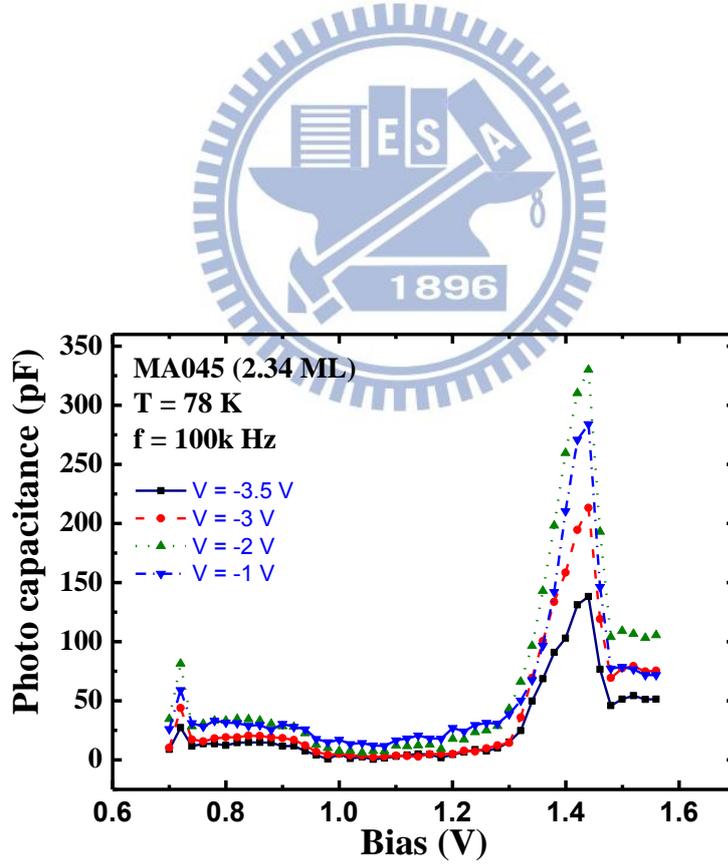


圖 6-2 2.34 ML 樣品低溫 78 K 光電容圖

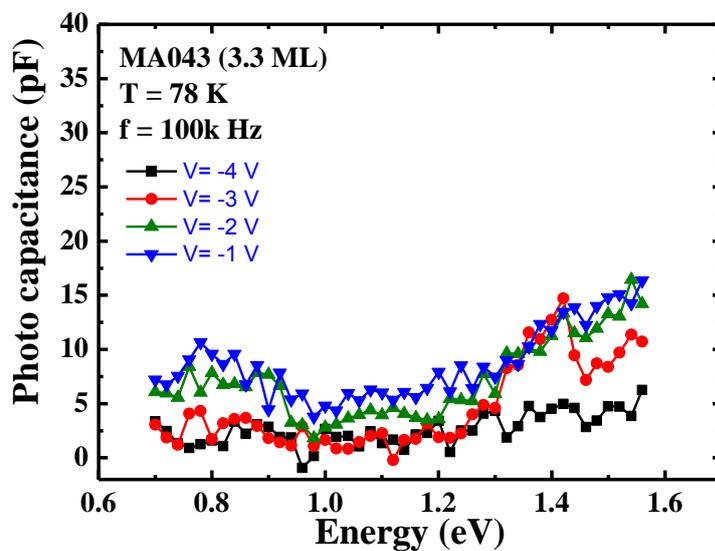


圖 6-3 3.3 ML 樣品低溫 78 K 光電容圖

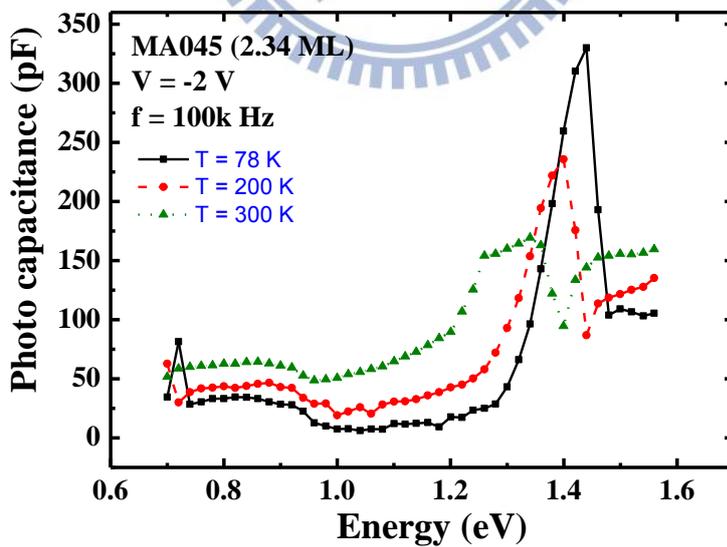


圖 6-4 2.34 ML 樣品定偏壓變溫光電容圖

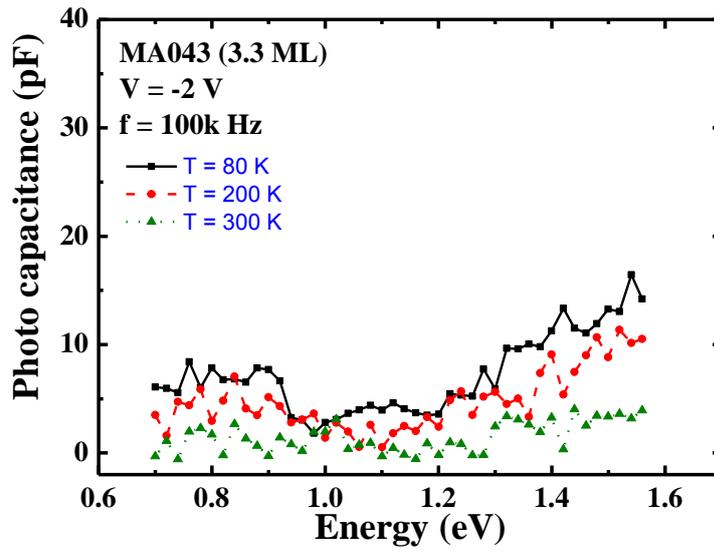


圖 6-5 3.3 ML 樣品定偏壓變溫光電容圖

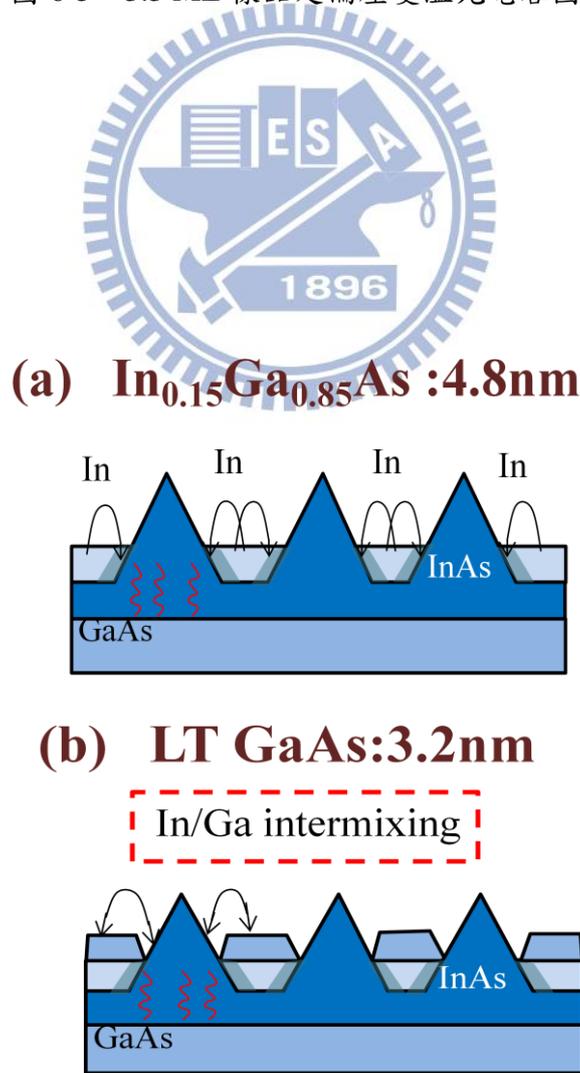


圖 6-6 厚度 3ML 以上的量子點長晶過程產生銦鎵交換

第七章 選擇性激發光源 PL

在前面的介紹中曾提 2.34 ML 樣品在光電容圖上有看到一包訊號在 1.3 eV 時大量抬升，這讓我們懷疑樣品中存在一個深層能階(deep level)缺陷，但是我們始終無法看到該缺陷的直接證據。本章節會藉由改變不同激發光源之 PL 實驗，探討當所使用的激發光源換成不同能量時，在 2.34 ML 樣品量測中所看到結果，並且分析其機制以說明它是深層能階(deep level)缺陷訊號；最後再以加電 PL 實驗上所看到的結果，來驗證所提出模型的可靠性。

7-1 選擇性激發光源 PL

一般而言，大部分的 PL 螢光光譜量測的激發光源會選擇比樣品的最大能隙還高的激發能量，目的在於使能帶上所有載子獲得能量後可以激發到能隙以外，然後再藉由釋放螢光而讓載子再回到能帶上，因而我們可以藉由判讀圖形上的螢光訊號進而得到我們所想要的能帶資訊。以本樣品 InAs(2.34 ML)/InGaAs 為例，GaAs 在低溫 80K 下能隙大概為 1.51 eV，因而我們選用 He-Ne 綠光雷射 532nm (2.33 eV) 做為激發光源，以獲得樣品量子點的資訊，如圖 7-1(a) 所示，由光譜圖可看出該樣品在低溫 50K 時基態與第一激發態發光位置大約在 1 eV 與 1.07 eV 左右，而隨著溫度上升發光位置漸進紅移到 0.95 eV 與 1.03 eV，並且在升高溫過程中由於載子受熱激發影響螢光強度也會隨之遞減。

然而該研究樣品在上述的激發光源下，螢光訊號所能提供給我們的只有量子點的資訊，為了要獲得更多除此之外的資訊，我們將激發光源能量由 2.33 eV 換成 1.95 eV、1.37 eV、1.17 eV、0.95 eV、0.8 eV 五種能量，各種不同激發光源下所得到的螢光訊號如圖 7-1(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 所示，由圖 7-1(b) 可以發現在激發光源為 1.95 eV 時其光譜圖形跟原本用 2.33 eV 所呈現的訊號幾乎是一樣的，然而當光源換成 1.37 eV 或 1.17 eV 時，如圖 7-1(c)、圖 7-1(d)，可以明顯的看出

整體訊號半高寬變的更胖，並且訊號位置上除了原本基態、第一激發態外，在約 0.95 eV 處有多出一包，跟先前所提到的兩個激發光源(2.33 eV、1.95 eV)在圖形上有很大變化，暫且我們將這包多出來的訊號當作是該樣品在靠近價帶(valence band)上的一個深層能皆缺陷(deep level defect)，接著當激發光源來到 0.95 eV 或 0.79 eV 時，可以發現前面所提到的所有量子點訊號與多出來的一包 defect 訊號完全消失了，能看到的只有該激發光源下所產生光源訊號。

7-2 躍遷機制

總結上面三種光譜圖看到的結果，可以發現要量到 defect 訊號似乎得在特定激發光源下才可行；第一部分，當我們所用的光源是大於 GaAs 能隙時，如 2.33 eV 與 1.95 eV，此時光幾乎被 GaAs 載子吸收，其電子電洞將會被激發到 GaAs 能隙以外做重新分佈，如圖 7-2(a)所示，然後再回到量子能階上佔據在能階上，最後量子能階上的電子電洞將覆合，因而我們只看到量子點的訊號，載子躍遷機制如圖 7-2(a)所示；第二部分，當激發光源是介於 GaAs 能隙與量子點能隙間的能量時，激發光源可以進到量子點內部，此時缺陷能階上的電子獲得能量將由缺陷能階往更高能階要遷，而該激發能量只足夠讓電子停留在量子點高能階位置，如 InGaAs 量子井，無法逃出 GaAs 能隙外，最後電子會回到量子點基態能階上做佔據，最後再回到缺陷能階上，因此我們在光譜圖上就可以看到相較於用高能量激發光源時所多出來 defect 訊號，載子躍遷機制如圖 7-2(b)所示；最後第三部分；首先當激發光源能量約等於缺陷在 PL 上的光譜能量(約 0.95 eV)時，此時缺陷上電子有可能被直接激發到量子點基態上，然後再回到缺陷上，而得到發光訊號，但由圖 7-1(e)可以發現，並不會會有訊號產生，這說明了電子被激發後難以直接以基態做為佔據而產生 PL 訊號，而當激發光源小於缺陷在 PL 上的光譜能量(約 0.95 eV)時，由於電子連被激發到量子點基態所需的能量都不夠，是必在光譜圖上我們完全無法看到任何 PL 的訊號，只能看見光源本身的光源訊號。

7-3 選擇性激發光源加電 PL

在前面的章節中我們已確立了 2.34 ML 樣品打 1.37 eV 與 1.17 eV 的光源將會在 PL 光譜上看到深層能階缺陷的訊號，並且也已經提出各激發光源下 PL 光譜的發光機制，接下來我分別利用 1.37 eV 與 2.33 eV 做為激發光源但是在樣品上加了電場，進而探討在家電場下的機制，以更加驗證上一章節所提出得模型。

如圖 7-3(a)、(b)所示，其分別為 2.34 ML 樣品利用激發光源 1.37 eV 與 2.33 eV 所得到的低溫 78 K 加電 PL 圖，由圖可以看出在加了電壓後，激發光源 1.37 eV 的 PL 光譜圖完全不會有變化，也就是說加電對其載子不會造成的影響，而當溫度提高到 150 K 時，如圖 7-4(a)，可以發現訊號強度一樣不會隨電壓增加而使強度下降，反觀激發光源為 2.33 eV 的 PL 光譜圖在低溫 78 K 時，加電後訊號強度下降了，當溫度升高到 150 K，如圖 7-4(b)，同樣的加電壓後也會造成訊號強度的下降；由上述的各種情況說明了激發光源 1.37 eV 只會使載子激發範圍在量子點以內，如圖 7-5(a)所示，符合了我們在上一節所提到的缺陷載子是被激發到量子點態上做佔據，因而即時我們加了電壓使能帶彎曲，如圖 7-5(b)所示，其影響也不足以使量子點內的載子往外漏掉，所以全部還是貢獻在 PL 光譜上；而當激發光源為 2.33 eV 時，此時由於載子是從 GaAs 內部被激發到 GaAs 能隙以外重新分佈，如圖 7-6(a)，在這種情況下我們又加了電壓，如圖 7-6(b)，那將會使大量載子被電場掃走，能產生覆合的載子數量就下降，自然的 PL 訊號就下降了。

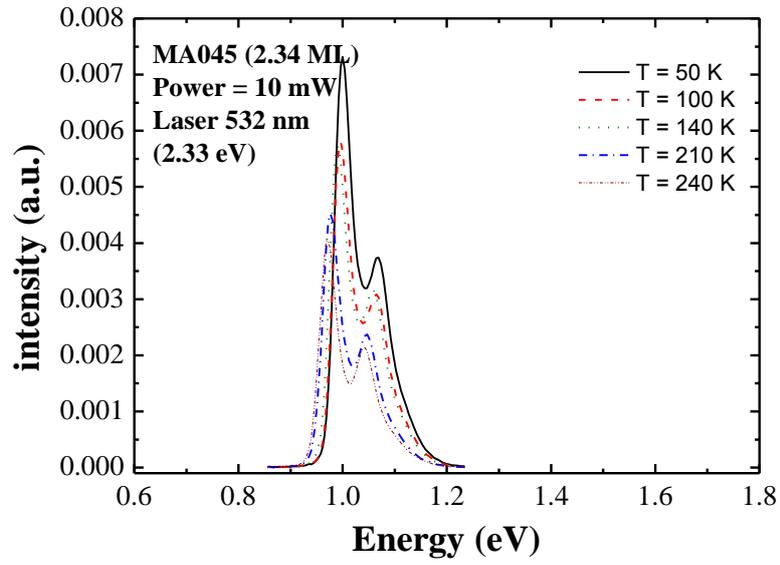


圖 7-1(a) 2.34ML 樣品激發光源 2.33 eV 變溫度 PL 光譜圖

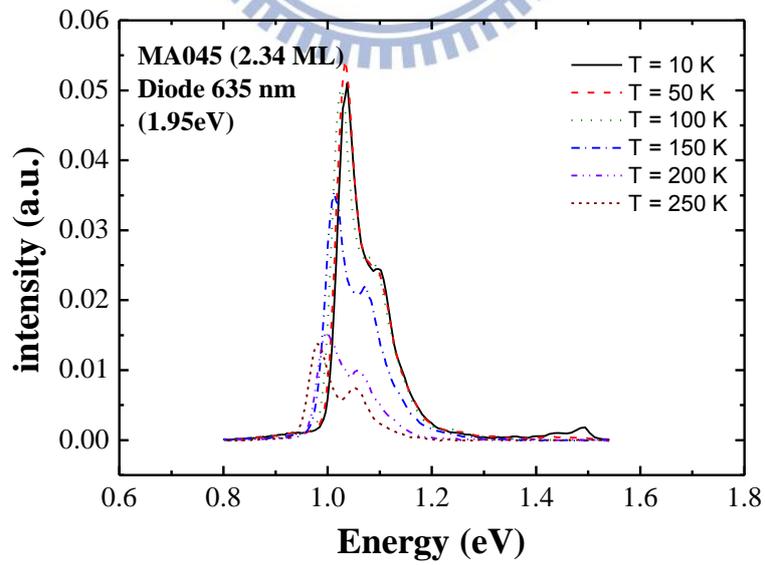


圖 7-1(b) 2.34ML 樣品激發光源 1.95 eV 變溫度 PL 光譜圖

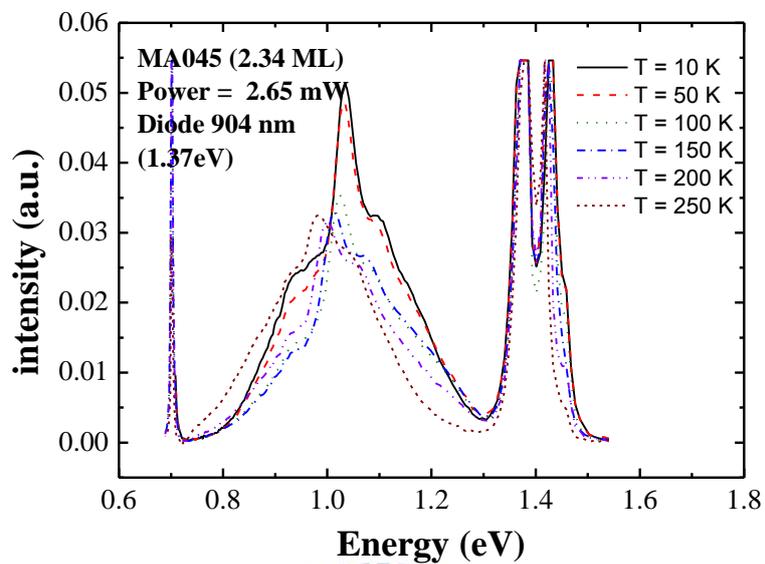


圖 7-1(c) 2.34ML 樣品激發光源 1.37 eV 變溫度 PL 光譜圖

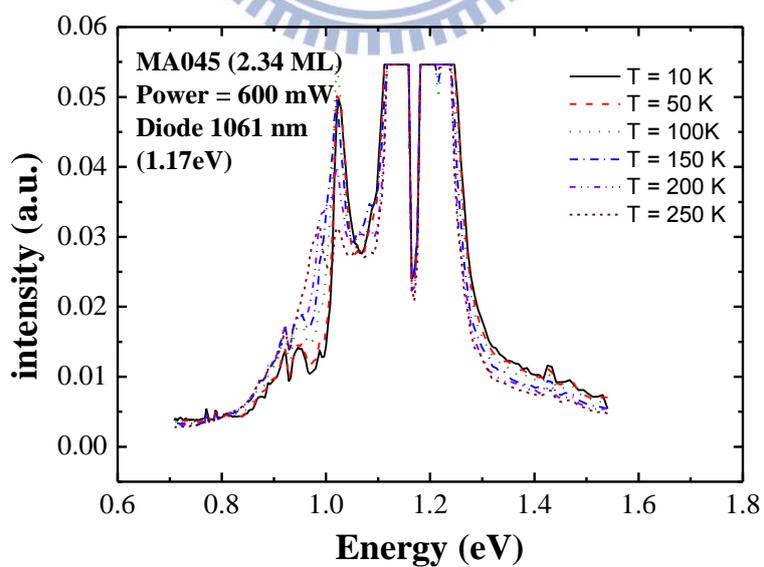


圖 7-1(d) 2.34ML 樣品激發光源 1.17 eV 變溫度 PL 光譜圖

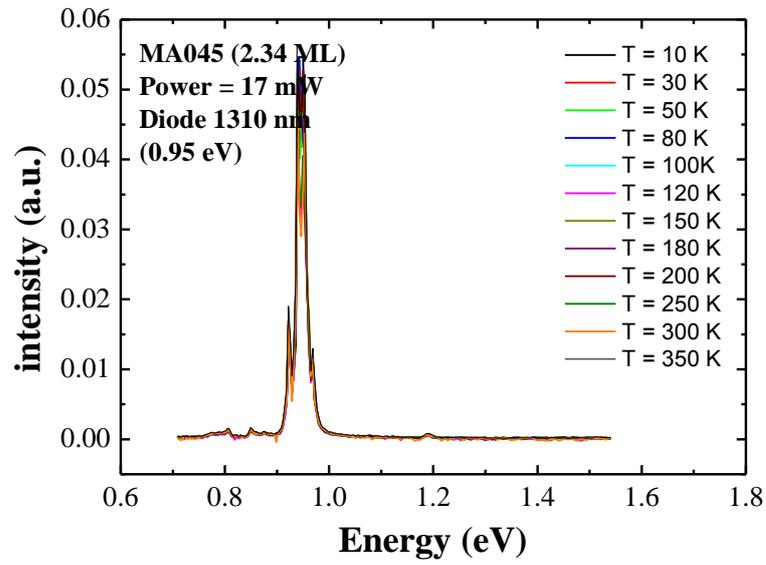


圖 7-1(e) 2.34ML 樣品激發光源 0.95 eV 變溫度 PL 光譜圖

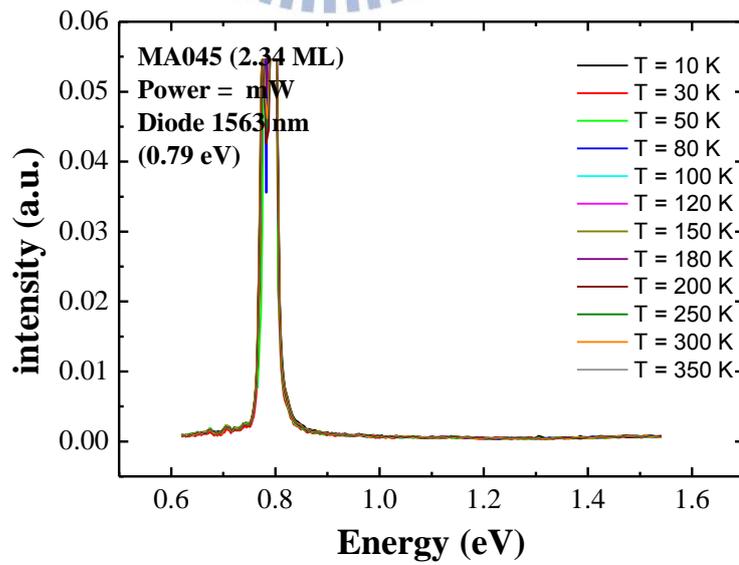


圖 7-1(f) 2.34ML 樣品激發光源 0.79 eV 變溫度 PL 光譜圖

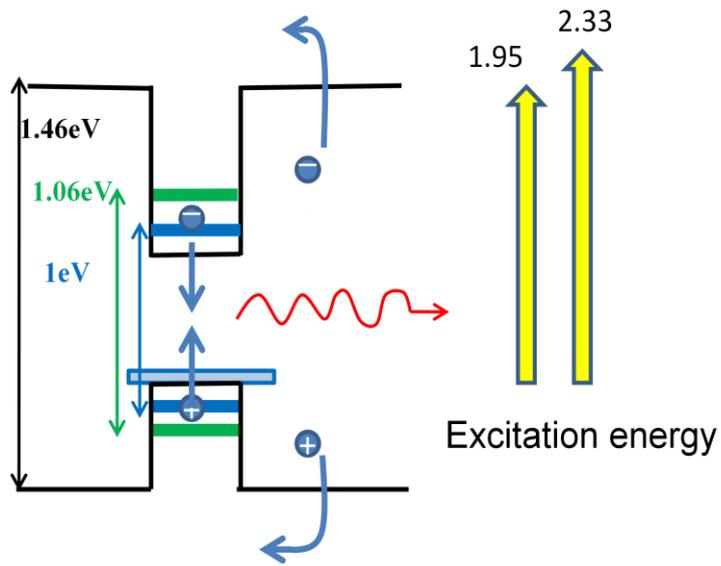


圖 7-2(a) 激發光源 2.33 eV 與 1.95 eV 能帶上載子躍遷示意圖

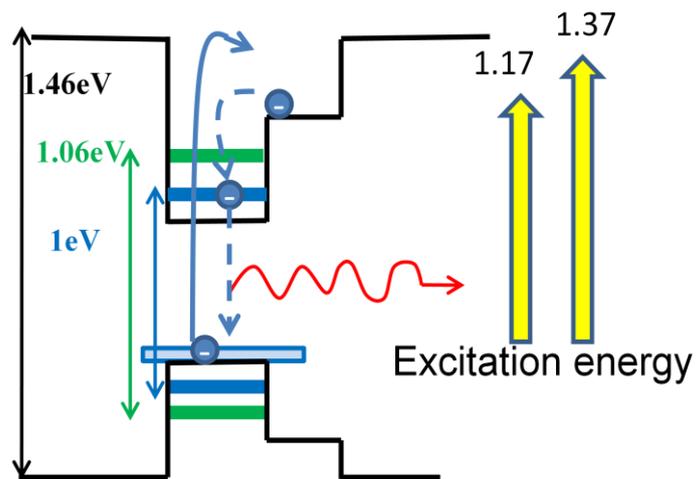


圖 7-2(b) 激發光源 1.37 eV 與 1.17 eV 能帶上載子躍遷示意圖

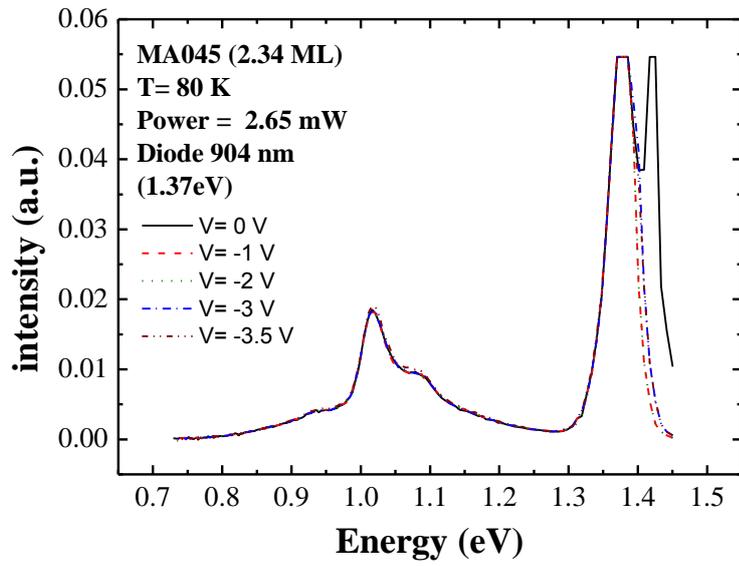


圖 7-3(a) 2.34ML 樣品 78 K 激發光源 1.37 eV 加電 PL 光譜圖

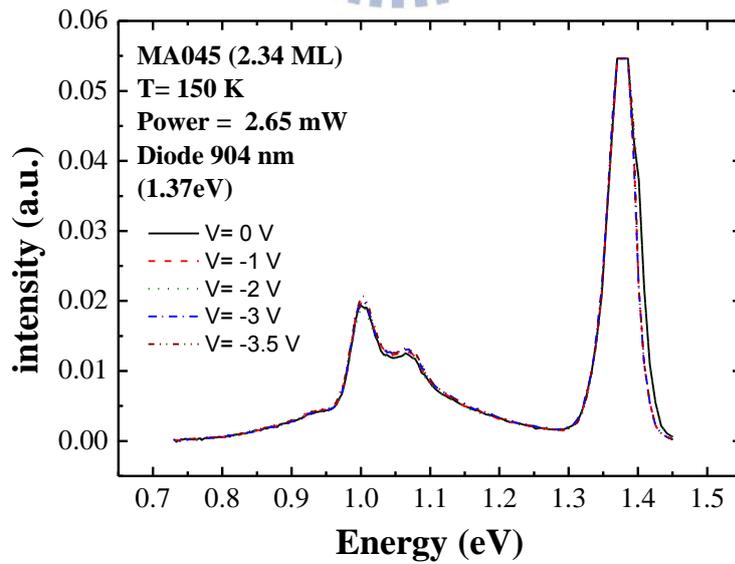


圖 7-3(b) 2.34ML 樣品 150 K 激發光源 1.37 eV 加電 PL 光譜圖

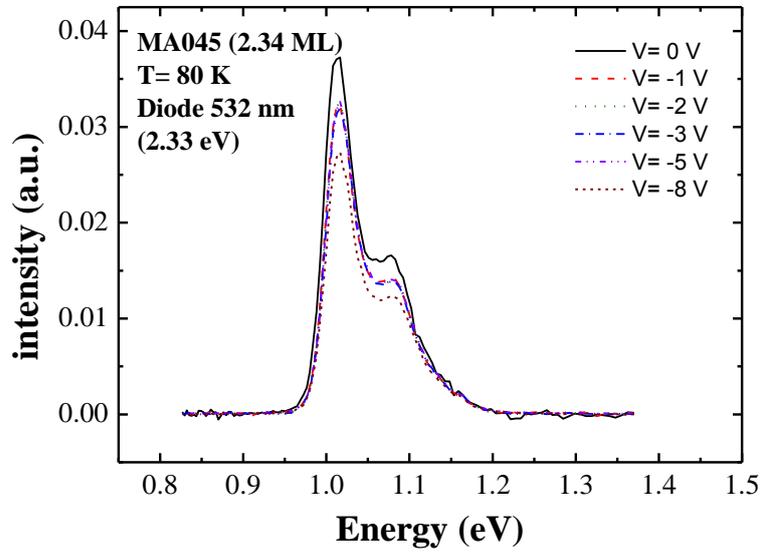


圖 7-4(a) 2.34ML 樣品 78 K 激發光源 2.33 eV 加電 PL 光譜圖

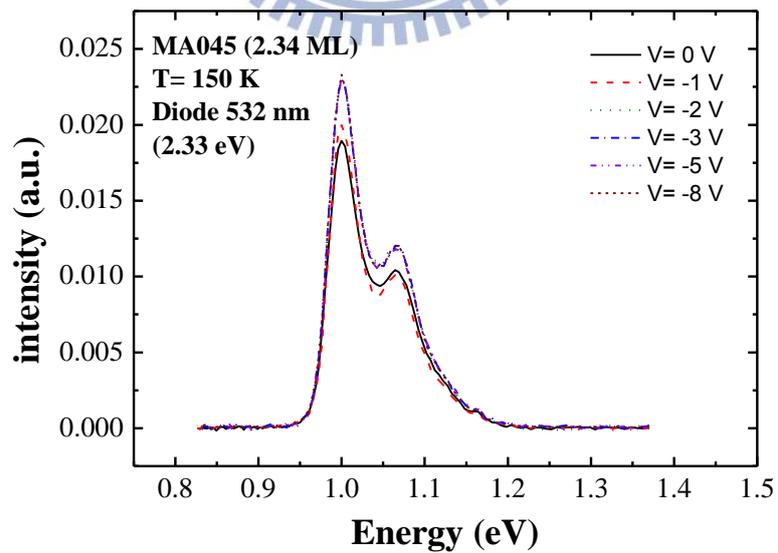


圖 7-4(b) 2.34ML 樣品 150 K 激發光源 2.33 eV 加電 PL 光譜圖

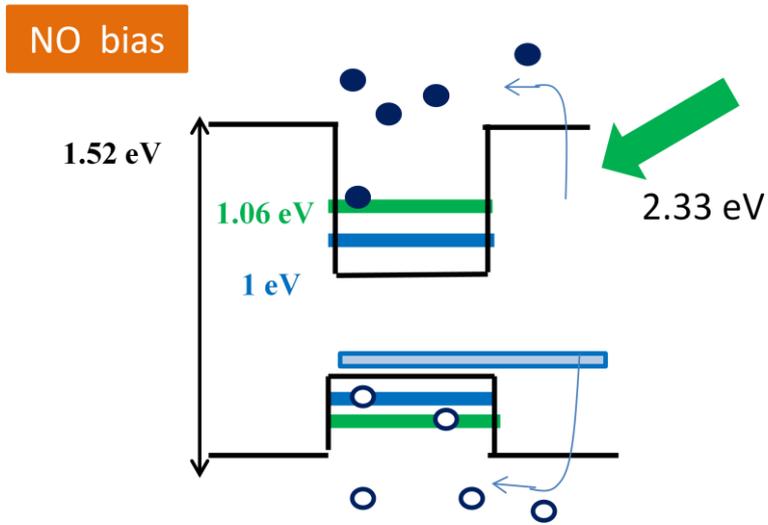


圖 7-5(a) 激發光源 2.33 eV 能帶上載子躍遷示意圖

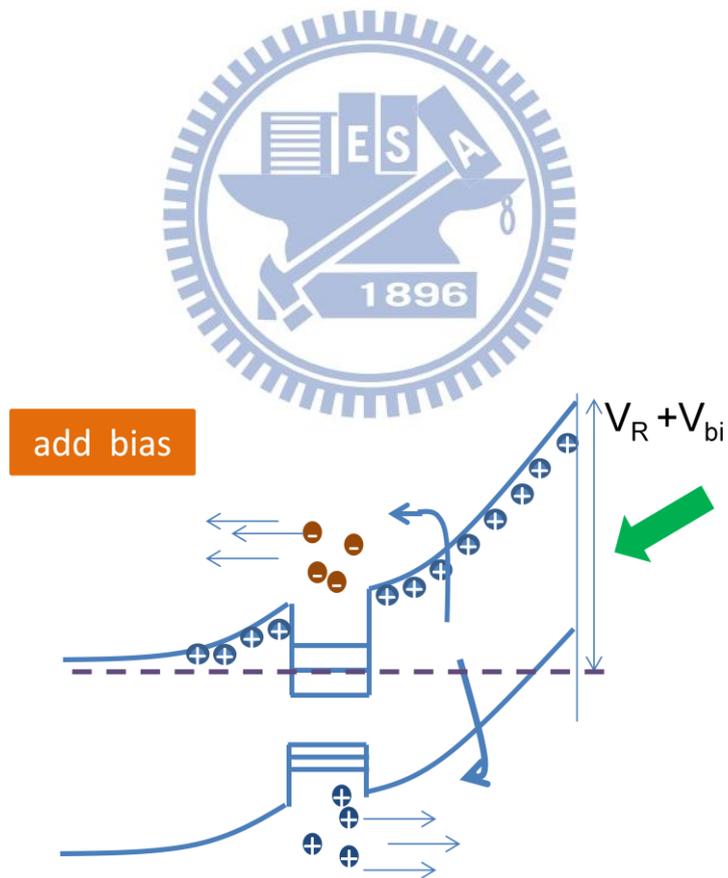


圖 7-5(b) 激發光源 2.33 eV 加電壓能帶上載子躍遷示意圖

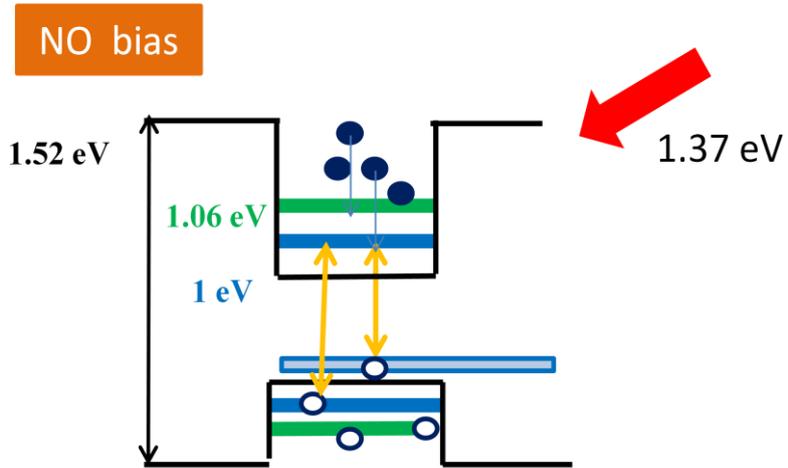


圖 7-6(a) 激發光源 1.37 eV 能帶上載子躍遷示意圖

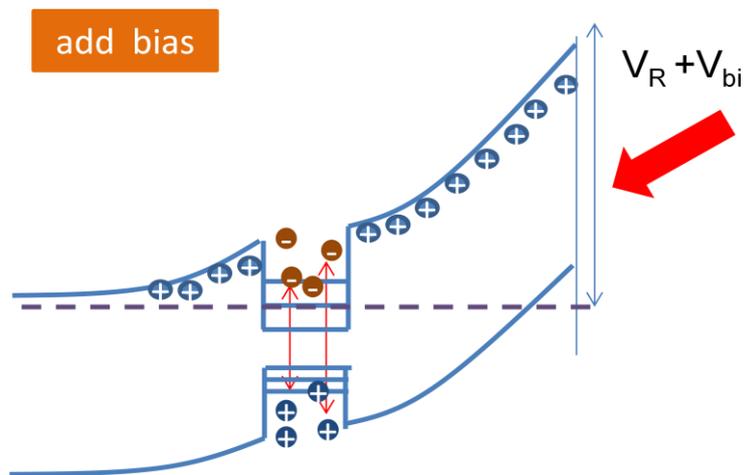


圖 7-6(b) 激發光源 1.37 eV 加電壓能帶上載子躍遷示意圖

第八章 特定波段激發光源 CV 量測

在前面章節中我們曾經提到在連續照光波段下光電容量測中，2.34 ML 樣品與 3.3 ML 樣品在整體光電容趨勢上都有一樣的情況，並說明了低能量波段(約 0.8 eV 附近)下光電容值為 EL2 缺陷所造成，而在 1 eV~1.3 eV 波段下光電容值為 PL 光譜發光位置，而形成低電容值的情況；而 2.34 ML 樣品與 3.3 ML 樣品在光電容值大小上有如此大的不同，乃因於特定缺陷的多寡。本章節要針對光電容實驗中特定的激發光源，如 0.8 eV、1.17 eV 去做 CV 量測上的探討，以驗證造成該光電容趨勢的因素是否為我們假設的想法。

8-1 特定波段激發光源 -0.8 eV、1.17 eV

圖 8-1(a)為 2.34 ML 樣品低溫 78 K，激發光源 0.8 eV 隨打光 power 不同所得到的 CV 量測圖，圖 8-1(b)為該 CV 量測圖所對應的縱深圖；由 CV 圖形上的變化可以發現在打了 0.8 eV 的光源後，其電容值約有 70 pF 的抬升，而縱深圖上，也可以看出在空乏區較淺的量子點位置附近有訊號出現，並且訊號隨著打光 power 會有明顯 shift 的現象，而當溫度來到高溫 300 K，CV 圖上一樣有變化但是程度已不如低溫時的多，如圖 8-2(a)所示，而縱深圖上在深淺空乏區位置都出現了訊號，如圖 8-2(b)所示；反觀我們來看激發光源 1.17 eV 的圖形，CV 圖上不論在高低溫皆有電容值變化與激發光源 0.8 eV 圖形類似，如圖 8-3(a)、8-4 (a)，但是在縱深圖上卻有變化，低溫時雖然類似 0.8 eV 光源在空乏區量子點位置上出現訊號，但是其訊號卻不會有 shift 的現象，而高溫下的縱深圖則幾乎和 0.8 eV 光源長一樣，在深淺空乏區位置都出現了訊號，如圖 8-3(b)、8-4 (b)。

依據我們在第四章曾經提過的說法，在 dark 下我們認為縱深圖上出現在空乏區較深位置的應該為量子點的訊號，而在 0.8 eV 光源下該位置的訊號會隨 power 不同而 shift，但是 1.17 eV 光源下的量子點訊號卻不會，如此結果意味著

打光 0.8 eV 時將會造成空乏區的改變；從之前的說法中我們認為，打 0.8 eV 光源時，是激發到了樣品內的 EL2 缺陷，將缺陷上的電子直接激發出來，因而我們可以合理的解釋成，在低溫下載子仍佔據在缺陷中，缺陷中的電子被 0.8 eV 光源激發後，電子跳出缺陷態進而貢獻在電容值上，而當整體電容值因為多並聯了缺陷所貢獻的電容而變大時，等效而言所換算出來的空乏區位置就變小，當我們所使用的 power 越大，被激發出來的電子也就越多使得整體電容變更大，等效空乏區位置變更小，因而我們就會在縱深圖上看到隨 power 增加，訊號越往空乏區較淺位置 shift 的情形，而高溫下由於缺陷的載子侷限能力下降，我們打光後所能被激發的載子量也不多，所以只會看到其訊號比起低溫減弱，且不會有 shift 情形；而反觀我們打 1.17 eV 光源時，就我們一般的認知，會覺得打 0.8 eV 會激發到缺陷，那使用越高能量使用 1.17 eV 光源應該也要可以激發，然而由圖 8-5 我們可以看出來，當使用 1.17 eV 光源時其訊號會由原本 dark 時的一包變成兩包，並且位置較淺的這一小包訊號會隨著 power 越大，似乎有越來越大的趨勢，這說明了這是量子點的訊號，並且其訊號在低溫完全不會有 shift 的狀況，所以 1.17 eV 光源只能激發量子點位置，至於高溫情形下 1.17 eV 光源源本就無法激發缺陷了，所以圖形就會類似 0.8 eV 光源在高溫時一樣。

8-2 比較 3.3 ML 樣品

更進一步地我們拿 3.3 ML 樣品來做一個比較；在第五章我們曾提過 3.3 ML 樣品中由於 EL2 缺陷的缺乏，導致他光電容值的量比起 2.34 ML 樣品要少得很多，因而我們也將 0.8 eV 光源使用在 3.3 ML 樣品上，如圖 8-6(a)、(b)、(c)、(d) 所示，由 CV 圖與縱深圖我們可以發現 3.3 ML 樣品在打 0.8 eV 光源後不論在高溫或低溫幾乎是沒反應，也就是說根本不會激發到缺陷訊號，假若我們認為 0.8 eV 光源會激發 EL2 缺陷是正確的，那這樣的結果也再次證明了 3.3 ML 樣品的確是缺乏 EL2 缺陷的。

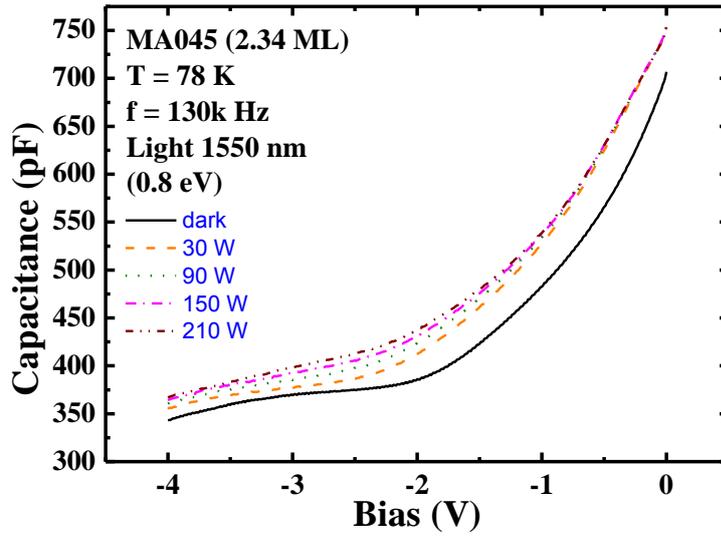


圖 8-1(a) 2.34 ML 樣品 78 K 光源 0.8 eV 變 power CV 量測圖

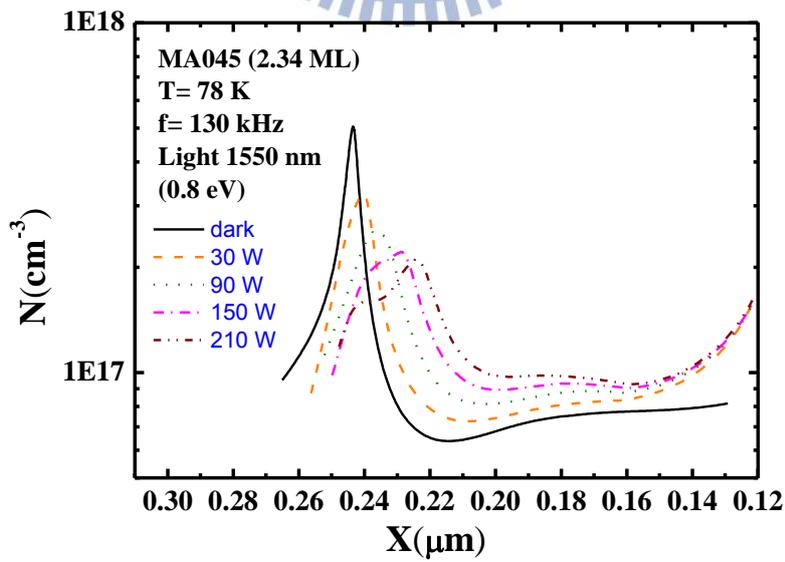


圖 8-1(b) 2.34 ML 樣品 78 K 光源 0.8 eV 變 power 縱深圖

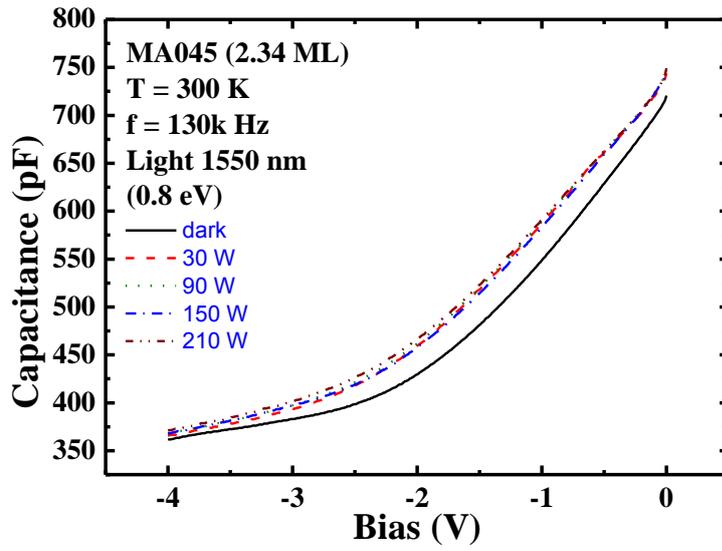


圖 8-2(a) 2.34 ML 樣品 300 K 光源 0.8 eV 變 power CV 量測圖

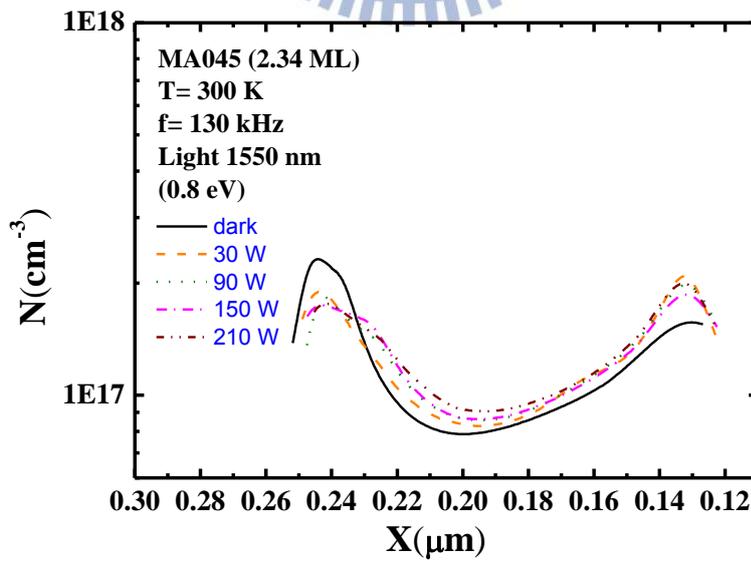


圖 8-2(b) 2.34 ML 樣品 300 K 光源 0.8 eV 變 power 縱深圖

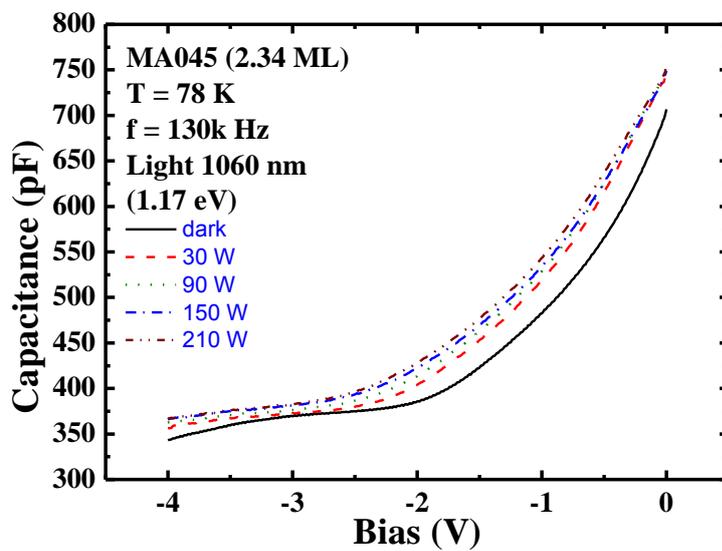


圖 8-3(a) 2.34 ML 樣品 78 K 光源 1.17 eV 變 power CV 量測圖

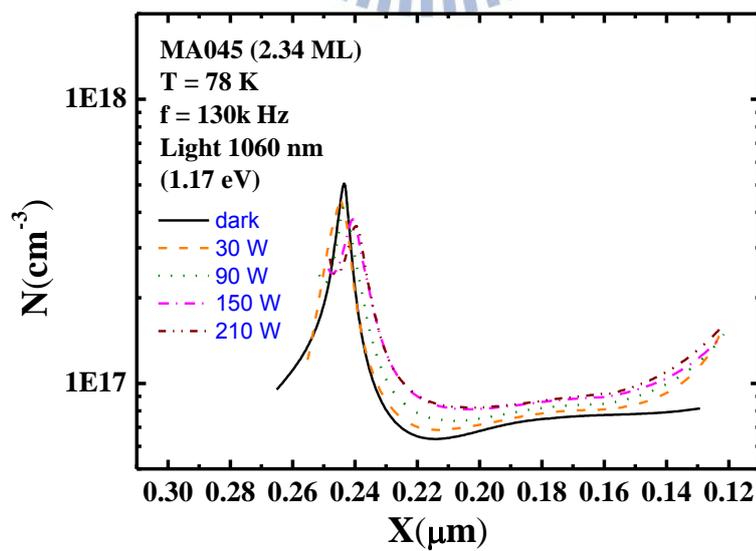


圖 8-3(b) 2.34 ML 樣品 78 K 光源 1.17 eV 變 power 縱深圖

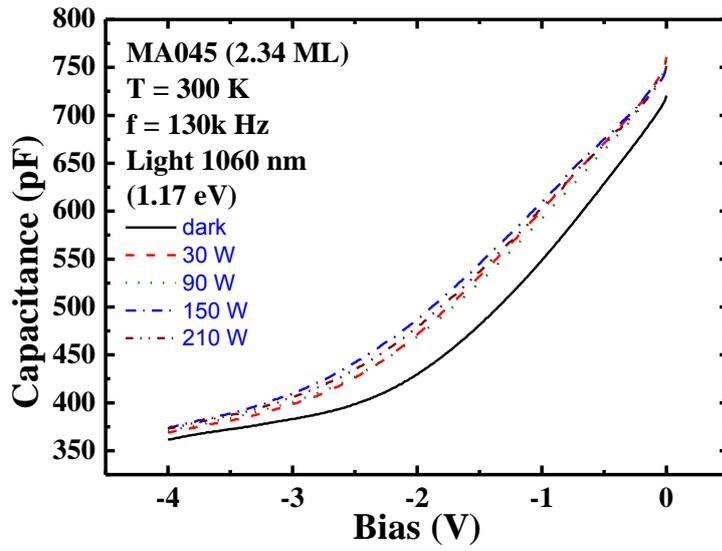


圖 8-4(a) 2.34 ML 樣品 300 K 光源 1.17 eV 變 power CV 量測圖

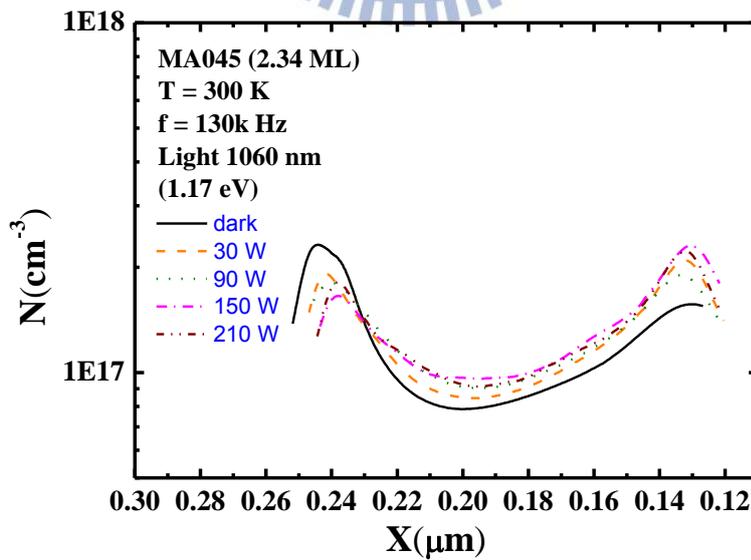


圖 8-4(b) 2.34 ML 樣品 300 K 光源 1.17 eV 變 power 縱深圖

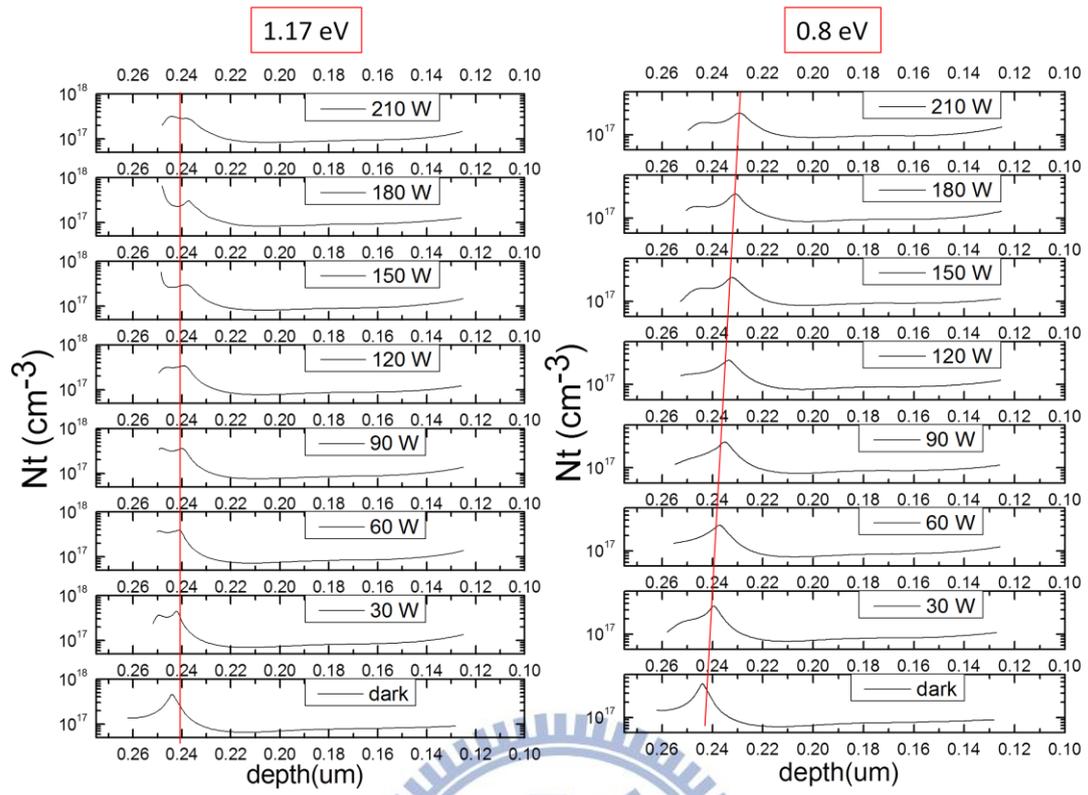


圖 8-5 150 K 光源 1.17 eV 與光源 0.8 eV 縱深圖比較



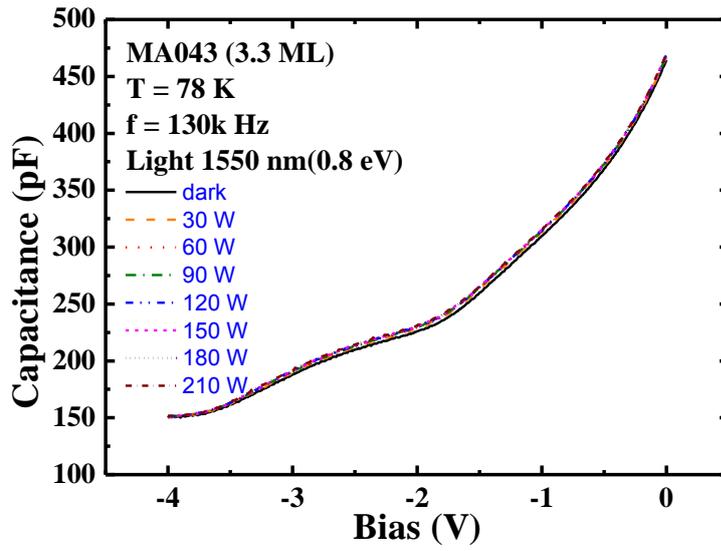


圖 8-6(a) 3.3 ML 樣品 78 K 光源 1.17 eV 變 power CV 量測圖

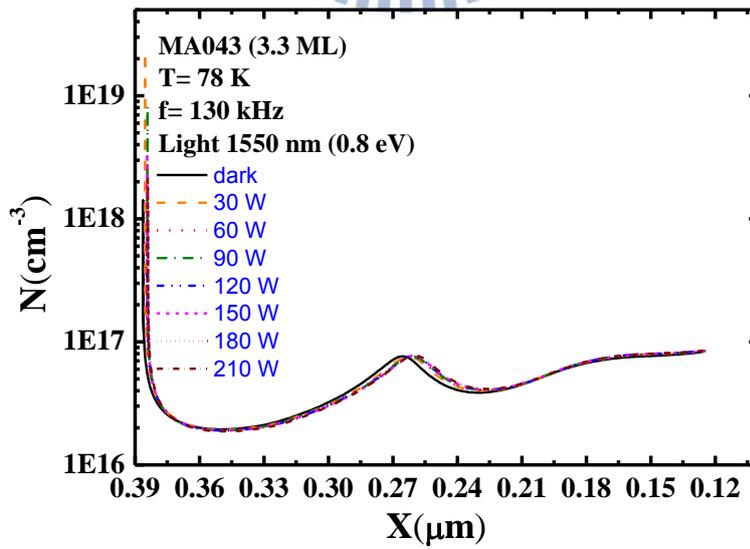


圖 8-6(b) 3.3 ML 樣品 78 K 光源 1.17 eV 變 power 縱深圖

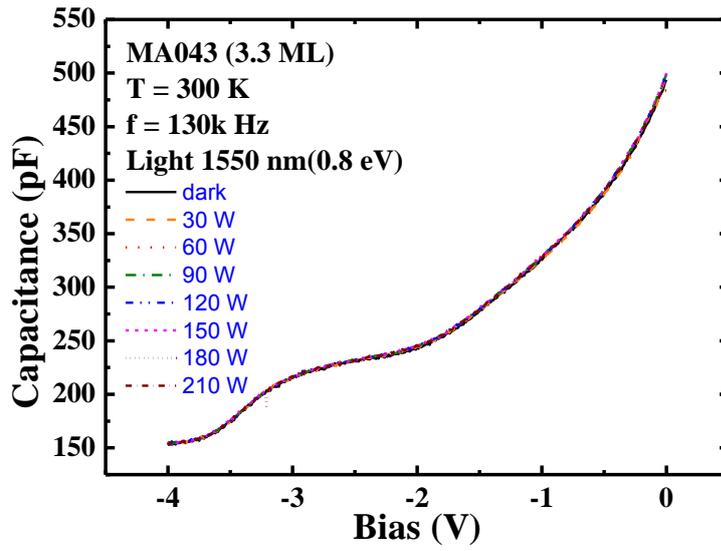


圖 8-6(c) 3.3 ML 樣品 300 K 光源 1.17 eV 變 power CV 量測圖

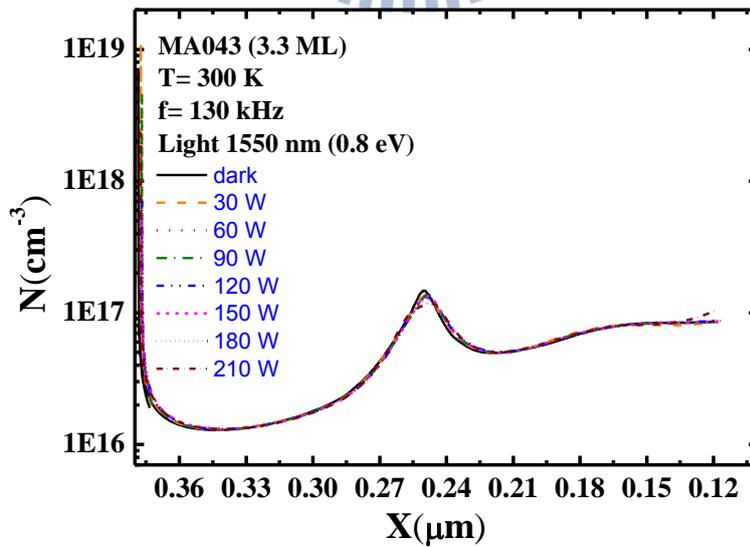


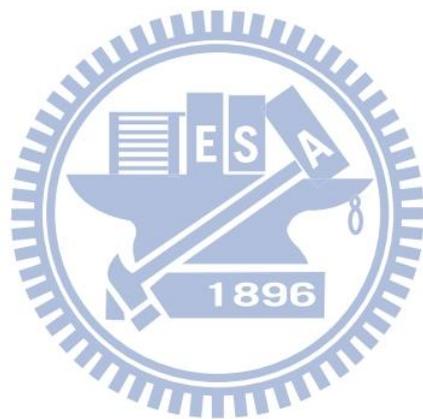
圖 8-6(d) 3.3 ML 樣品 300 K 光源 1.17 eV 變 power 縱深圖

第九章 結論

本論文的主要研究樣品為 InAs/InGaAs 厚度 2.34 ML 量子點，搭配與 3.3 ML 應力鬆弛的比較，讓我們的研究有了更有力的佐證。由於樣品於 DLTS 量測結果中所擬合出來的活化能與捕捉截面積不同於一般們所看到的數量級，讓我們將一開始研究方向指向是否是因為 DLTS 有限的掃動速率下無法將所有缺陷訊號掃出，因而造成擬合值的誤判，進而我們將 2.34 ML 樣品與已知 DLTS 量測下有 misfit 缺陷存在的 3.3 ML 樣品，去做了改變掃動速率的 CV 量測，由量測結果證實，3.3 ML 樣品在實驗結果中完全不會看到電容值的變化，而 2.34 ML 樣品卻在高溫下看見明顯的電容值變化，因而證實了 2.34 ML 樣品確實存在一個 DLTS 難以量測到的缺陷，且其缺陷是存在時間常數。

而為了對樣品在照光後的特性有更多了解，我們將兩片樣品都做了隨激發能量變化的光電容實驗，由實驗結果確立了光電容趨勢上的三個區域分別由於 (1). EL2 缺陷受光激發後，淨電子量貢獻在光電容上，因而造成光電容的抬升 (2). PL 光譜發光能量位置對應在低光電容值能量位置，說明了是由於載子覆合機制導致光電容下降 (3). 1.3 eV 下光電容值的急劇抬升，為一深層缺陷所導致；而兩片樣品在光電容值有極大的差距，發現是由於 3.3 ML 應力鬆弛樣品長晶過程中，發生銻鎵交換(In/Ga intermixing)形成 In_{Ga} ，導致品 EL2 (As_{Ga})缺陷與 V_{Ga} 的缺乏，因而成就不了大的電容值。而為了進一步證實深層能階的存在，我們選擇不同激發光源對 2.34 ML 樣品做 PL 光譜實驗，實驗上我們清楚看到，在特定的激發能量 1.37 eV 與 1.17 eV 下，PL 光譜約在 0.95 eV 處會看到多出來的一包訊號，由其發光位置在能帶圖上的推算，推測其為深層能階缺陷電子被激發到 InGaAs 量子井後，再回到量子點激態做佔據，最後再回到缺陷能階上覆合，而這個結果也可以確立了，樣品中缺陷確實是會跟量子點做交互作用(interaction)的。最後一部份是選用了兩個特定的激發光源做 CV 量測，由量測的結果看到激發光源 0.8 eV

時，低溫下隨 power 變大縱深圖上量子點訊號明顯有 shift，我們進而猜測是 EL2 缺陷中電子被激發出來，多貢獻的電容使整體電容值變大造成等效空乏區位置縮短而導致，然而照射 1.17 eV 光源時卻發現訊號不會有 shift 的現象，讓我們感覺 1.17 eV 光源是沒有激發缺陷；並且在縱深圖中發現訊號有一包變大一包不變的趨勢，此情況說明了 1.17 eV 光源是激發量子點，並沒有激發缺陷訊號。



参考文献

- [1] P. Hawrylak, *Phys. Rev. B* **60**, 5597 (1999).
- [2] U. Banin, Y. Cao, D. Katz, O. Millo, *Nature* **400**, 542 (1999).
- [3] Y. Arakawa, H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 939 (1982).
- [4] N. N. Ledentsov, V. A. Shchukin, M. Grundmann, N. Kirstaedter, J. Bo'hrer, O. Schmidt, D. Bimberg, V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov, A. E. Zhukov, P. S. Kop'ev, S. V. Zaitsev, N. Yu. Gordeev, and Zh. I. Alferov, *Phys. Rev. B* **54**, 8743 (1996).
- [5] S. Kim, H. Mohseni, M. Erdtmann, E Michel, C. Jelen, and M. Razeghi, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 963 (1998).
- [6] K. Stewart, M. Buda, J. Wong-Leung, L. Fu, C. Jagadish, A. Stiff-Roberts, and P. Bhattacharya, *J. Appl. Phys.* **94**, 5283 (2003).
- [7] N. YOKOYAMA, S. MUTO, K. IMAMURA, M. TAKATSU, T. MORI, Y. SUGIYAMA, Y. SAKUMA, H. NAKAO and T. ADACHI, *Solid-state Electronics*. **40**, 505(1996)
- [8] G. Yusa, H. Sakaki, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 345 (1997).
- [9] S. Guha, A. Madhukar, and K. C. Rajkumar, *Appl. Phys. Lett.* **57**, 2110 (1990).
- [10] Mark S, Sherwin, Atac Imamoglu, Thomas Montroy, *Phys.Rev.B* **60**, 3508(1999).
- [11] Charles H. Bennett & David P. DiVincenzo, *Nature* **404**, 247 (2000).
- [12] D. L. Huffaker and D. G. Deppe, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 520 (1998).
- [13] P. Alivisatos, *Nature Biotechnology*, **22**, 47 (2004).
- [14] D. Bimberg, M. Grundmann, and N. N. Ledentsov, "Quantum Dot Heterostructures," (Wiley, Chichester, 1999)
- [15] F. C. Frank, and J. H. van der Merwe, *Proc. Roy. Soc. London A*, **198**, 205 (1949).
- [16] M. Volmer, A. Weber, and Z. Phys. Chem., **119**, 277 (1926).
- [17] I. N. Stranski, and L. Von Krastanov, *Akad. Wiss Lit. Main Math. Natur. K1. Iib*, **146**, 797 (1939).
- [18] 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, Zh. I. Alferov, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 2815 (1999).
- [19] M. V. Maximov et al., *Physica E*, **7**, 326-330 (2000).
- [20] N.-T. Yeh, T.-E. Nee, J.-I. Chyi, T. M. Hsu, and C. C. Huang, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 1567 (2000).
- [21] M. V. Maximov, A. F. Tsatsul'nikov, B. V. Volovik, D. S. Sizov, Yu. M. Shernyakov, I. N. Kaiander, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, S. S. Mikhrin, V. M. Ustinov, and Zh. I. Alferov, R. Heitz, V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg, *Phys. Rev. B* **62**, 16671 (2000)
- [22] D.L. Losee, *J. Appl. Phys.* **46**, 2204 (1975).
- [23] G. Vicent, D. Bois, P. Pinard, *J. Appl. Phys.* **46**, 5173 (1975).
- [24] D.V. Lang, , *J. Appl. Phys.* **45**, 3023 (1974).
- [25] Dieter K. Schroder, "Semiconductor Material and Device Characterization"-2nd ed. (New York :Wiley 1998).
- [26] 林妍君, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "應力誘發之雙模態 InAs/InGaAs 量子點特性" (2011).
- [27] 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).
- [28] 徐榕鎂, 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).
- [29] 張佑誠, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "應力鬆弛對 InAs/InGaAs 量子點特性之影響" (2010).
- [30] D. Bors and M. BOULOU, *phys. stat. sol. (a)* **22**, 671 (1974)
- [31] L. J. M. Selen, L. J. van IJzendoorn, and M. J. A. de Voigt P. M. Koenraad, *Phys. Rev. B* **61**, 8270 (2000).
- [32] Adam Babiński, J. Jasiński, R. Bozek, A. Szepielow, and J. M. Baranowski, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 2576 (2001).
- [33] T Wosiński - *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1985 - Springer