

國立交通大學

電子物理系

碩士論文

熱退火於InAsSb/GaAs量子點光性及應力鬆弛引致  
缺陷之載子傳輸特性研究

Effect of thermal annealing on the optical properties and  
electron emission from relaxation –induced states in  
InAsSb/GaAs quantum dots

研究生：吳春慧

指導教授：陳振芳博士

中華民國九十六年七月

熱退火於 InAsSb/GaAs 量子點光性及應力鬆弛引  
致缺陷之載子傳輸特性研究

Effect of thermal annealing on the optical properties  
and electron emission from relaxation –induced states  
in InAsSb/GaAs quantum dots

研究生：吳春慧

Student：Chun-Hui Wu

指導教授：陳振芳博士

Advisor：Dr. Jenn-Fang Chen



A Thesis  
Submitted to department 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 2007

Hsin-chu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年七月

# 熱退火於InAsSb/GaAs量子點光性及應力鬆弛引致缺陷之載子傳輸特性研究

研究生：吳春慧

指導教授：陳振芳 博士

國立交通大學電子物理學系

## 摘要

本論文主要是探討 InAsSb/GaAs 量子點經熱退火處理後之光電特性。由光性量測發現在室溫時，InAsSb QD 基態與激發態的能階差約為 60meV，但在低溫時能階差竟高達 160meV，且激發態半高寬高達 130meV。推測 InAsSb 量子點在低溫下，並非單純量子點的基態與激發態訊號。

為了探討Sb摻雜至InAs QD中的效應，我們將樣品做 650~750<sup>0</sup>C的熱退火處理。由低溫PL量測發現經熱退火處理的樣品，均勻性相較於as grown的樣品有逐漸變好的趨勢，因此推測InAsSb 量子點於長晶時存有尺寸不均勻的現象。

但熱退火 700<sup>0</sup>C的樣品於室溫下PL特性變差，並有類似晶格鬆弛的現象。於是將該樣品作電性分析，在CV量測發現大量載子被空乏，並由DLTS量測觀察到兩個缺陷存在，其類型分別為threading dislocation 及 misfit dislocation，而活化能分別為 0.60eV及 0.33eV。相較於已晶格鬆弛的InAsSb量子點，其活化能分別為 0.64eV及 0.35eV，兩者是相類似的。由實驗結果推測除了量子點成長時超過臨界厚度會發生晶格鬆弛的現象，當熱退火給予能量後，也有晶格鬆弛的情形。

接著針對 2.8ML relaxed InAsSb QD樣品做 650~750<sup>0</sup>C的熱退火處理。由PL量測發現熱退火後發光波長藍移且均勻性變差。在電性上由CV量測發現載子濃度銳減，而DLTS缺陷分析發現缺陷能階位置不變，但載子的傳輸機制產生變化。針對量子點附近的偏壓進行DLTS量測，發現缺陷的活化能由 0.35eV變小至 0.2eV，推測載子並非由缺陷跳至GaAs傳導帶的行為，而

是趨向跳至量子點的量子能階。此外，DLTS量測在低溫下呈現對溫度沒有反應的缺陷訊號，這代表emission time是與溫度無關的，來源可能是 Tunneling現象。由實驗結果推測載子趨向由缺陷跳至量子點的量子能階之後，再穿隧出去的傳輸機制。



Effect of thermal annealing on the optical properties and  
electron emission from relaxation –induced states in  
InAsSb/GaAs quantum dots

Student: Chun-Hui Wu

Advisor: Dr. Jenn-Fang Chen

Department of Electrophysics  
National Chiao Tung University

**Abstract**

The thesis is highlighted on the discussion over the optical and electrical characteristics of InAsSb/GaAs quantum dots before and after thermal annealing process. From the PL measurement, we observed the energy separation between the ground state and the excited state in InAsSb quantum dots is about 60 meV at room temperature. However, the energy separation at low temperature is increased up to 160 meV with a large FWHM of 130 meV for the excited-state emission. This abnormal large energy separation is explained by the non-uniformity of InAsSb quantum dots induced by the Sb incorporation, because, after 650~750<sup>0</sup>C thermal annealing, the broad excited-state emission is split into two well-separated peaks, suggesting a significant improvement in the uniformity.

In a non-relaxed InAsSb sample (2.2 ML), annealing at 700<sup>0</sup>C was found to degrade the PL property. Electrical C-V profiling on this sample revealed massive carriers depletion around the QD region. Two defect traps with activation energies of 0.60eV and 0.33eV were found by DLTS measurements. These activation energies are similar as those (0.64eV and 0.35eV) of the traps associated with threading dislocation in the GaAs top cladding layer and misfit dislocation near the QD region previously observed in relaxed InAsSb QD

samples. From these results, we infer that annealing can provide the necessary energy for the occurrence of strain relaxation and the generated defects are similar as those observed in the relaxed QD samples when the InAs thickness exceeds the critical thickness.

Effect of annealing on the properties of relaxation-induced traps is also investigated in a relaxed 2.8ML InAsSb QD sample. After annealing at 650~750<sup>0</sup>C, the PL spectra show a blue shift and a degradation of uniformity. The C-V profiling displays a further reduction of carrier density in the QD. DLTS analysis reveals a decrease from 0.35eV to 0.2eV for the emission energy of the misfit-related trap. This is explained by an electron emission from the defect trap to the QD energy level, rather than to the GaAs conduction band. The DLTS spectra of this trap show a nearly temperature-independent constant signal at low temperatures, suggesting a tunneling effect at low temperatures. Thus, the electron escape from the misfit-related trap to the GaAs conduction band occurs through tunneling from the QD energy state.



# 目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
目錄.....	V
圖表目錄.....	VII
第一章 緒論.....	1
1.1 InAs/GaAs 量子點材料介紹.....	1
1.2 研究動機.....	3
1.3 論文架構.....	4
1.4 銻(Sb)對長晶的影響.....	5
1.4-1 表面活化效應(surfactant effect) .....	5
1.4-2 加入 InAs 成長.....	5
第二章 樣品製備與量測系統簡介.....	6
2.1 樣品製備.....	6
2.2 電極的製作.....	7
2.2-1 蕭基接面的製作.....	7
2.2-2 歐姆接面的製作.....	8
2.3 量測系統簡介.....	9
2.3-1 光性量測系統.....	9
2.3-2 電性量測系統.....	10
第三章 InAsSb(2.2ML)熱退火後之光性及電性量測結果與分析.....	11
3.1 光激發螢光(Photoluminescence)量測結果與分析.....	11
3.2 電流-電壓(I-V)量測結果與分析.....	16
3.3 電容-電壓(C-V)量測結果與分析.....	17
3.4 深層能階暫態頻譜(DLTS)量測結果與分析.....	18
第四章 Relaxed InAsSb(2.8ML)熱退火後之光性及電性量測結果與分析.....	20
4.1 光激發螢光(Photoluminescence)量測結果與分析.....	20
4.2 電流-電壓(I-V)量測結果與分析.....	22

4.3	電容-電壓(C-V)量測結果與分析.....	23
4.4	深層能階暫態頻譜(DLTS)及 TEM 量測結果與分析.....	25
4.4-1	Relaxed InAsSb QD 之缺陷分析.....	25
4.4-1-1	Relaxed InAsSb QD 之 DLTS 及 TEM 缺陷分析.....	25
4.4-1-2	Relaxed InAsSb QD 之深層能階暫態頻譜與捕獲位能障(Capture barrier).....	26
4.4-2	Relaxed InAsSb QD 熱退火後之缺陷分析.....	28
第五章	結論.....	30
	參考文獻.....	94





## 圖表目錄

圖 1-1	三種不同長晶模式的示意圖.....	32
圖 1-2	三片樣品之室溫 PL 圖.....	33
圖 1-3	InAsSb ternary alloys X-ray 分成 InAs-rich 與 InSb-rich 兩群.....	33
圖 2-1	樣品結構圖.....	34
圖 2-2	樣品能帶圖.....	34
圖 2-3	PL 量測系統架設圖.....	35
圖 3-1(a)	一般 dots-in-well 量子點-變溫 PL 圖.....	36
圖 3-1(b)	一般 dots-in-well 量子點-室溫 300K 變功率 PL 圖.....	36
圖 3-2(a)	InAsSb(2.2ML) - 變溫 PL 圖.....	37
圖 3-2(b)	InAsSb(2.2ML) - 室溫 300K 變高功率 PL 圖.....	37
圖 3-2(c)	InAsSb(2.2ML) - 低溫 20K 變功率 PL 圖.....	37
圖 3-3	InAsSb (Dots-in-well) - 變溫 PL 圖.....	38
圖 3-4	InAsSb (2.2ML) - 四片熱退火樣品-低溫 PL 圖.....	38
圖 3-5(a)	InAsSb(2.2ML)-Annealing650 <sup>o</sup> C - 變溫 PL 圖.....	39
圖 3-5(b)	InAsSb(2.2ML)-Annealing650 <sup>o</sup> C - 室溫 300K 變高功率 PL 圖.....	39
圖 3-5(c)	InAsSb(2.2ML)-Annealing650 <sup>o</sup> C - 低溫 20K 變功率 PL 圖.....	39
圖 3-6(a)	InAsSb(2.2ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C - 變溫 PL 圖.....	40
圖 3-6(b)	InAsSb(2.2ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C - 室溫 300K 變高功率 PL 圖.....	40
圖 3-6(c)	InAsSb(2.2ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C - 低溫 20K 變功率 PL 圖.....	40
圖 3-7(a)	InAsSb(2.2ML)-Annealing750 <sup>o</sup> C - 變溫 PL 圖.....	41
圖 3-7(b)	InAsSb(2.2ML)-Annealing750 <sup>o</sup> C - 室溫 300K 變高功率 PL 圖.....	41
圖 3-7(c)	InAsSb(2.2ML)-Annealing750 <sup>o</sup> C - 低溫 20K 變功率 PL 圖.....	41
圖 3-8	InAsSb(2.2ML)-(a) as grown (b)RTA650 <sup>o</sup> C (c) RTA700 <sup>o</sup> C (d) RTA750 <sup>o</sup> C 變溫 PL 圖.....	42
圖 3-9	InAsSb(2.2ML)-as grown ~ Gaussian function 擬合 PL 圖.....	43
圖 3-10	InAsSb(2.2ML)-Annealing 650 <sup>o</sup> C ~ Gaussian function 擬合 PL 圖.....	44
圖 3-11	InAsSb(2.2ML)-Annealing 700 <sup>o</sup> C ~ Gaussian function 擬合 PL 圖.....	45
圖 3-12(a)	InAsSb(2.2ML)-as grown- 能階隨溫度變化圖.....	46
圖 3-12(b)	InAsSb(2.2ML)-Annealing 650 <sup>o</sup> C-能階隨溫度變化圖.....	46
圖 3-12(c)	InAsSb(2.2ML)-Annealing 700 <sup>o</sup> C-能階隨溫度變化圖.....	46
圖 3-13	InAsSb(2.2ML)-As grown 和 Annealing 700 <sup>o</sup> C 能階隨溫度變化圖.....	47
圖 3-14(a)	InAsSb(2.2ML)-As grown- three peak 擬合圖.....	47
圖 3-14(b)	InAsSb(2.2ML)-As grown- two peak & three peak 擬合圖.....	47
圖 3-15(a)	InAsSb(2.2ML)-as grown - 半高寬隨溫度變化圖.....	48
圖 3-15(b)	InAsSb(2.2ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C - 半高寬隨溫度變化圖.....	48

圖 3-16(a) InAsSb(2.0ML)-低溫 PL 圖.....	49
圖 3-16(b) InAsSb(2.0ML)-室溫 PL 圖.....	49
圖 3-17(a) InAsSb(2.0ML)-as grown-變溫 PL 圖.....	49
圖 3-17(b) InAsSb(2.0ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C -變溫PL圖.....	49
圖 3-18(a) InAsSb(2.2ML)-AFM 平面圖.....	50
圖 3-18(b) InAsSb(2.2ML)-AFM3D 圖.....	50
圖 3-19 InAsSb(2.2ML)-as grown和Annealing700 <sup>o</sup> C -室溫IV圖.....	51
圖 3-20(a) InAsSb(2.2ML)-as grown和Annealing700 <sup>o</sup> C -低溫CV圖.....	51
圖 3-20(b) InAsSb(2.2ML)-as grown和Annealing700 <sup>o</sup> C -低溫CV轉縱深圖.....	51
圖 3-21(a) InAsSb(2.2ML)-as grown-變溫 CV 圖.....	52
圖 3-21(b) InAsSb(2.2ML)-as grown-變溫 CV 轉縱深圖.....	52
圖 3-22(a) InAsSb(2.2ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C-變溫CV圖.....	53
圖 3-22(b) InAsSb(2.2ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C-變溫CV轉縱深圖.....	53
圖 3-23(a) InAsSb(2.2ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C-室溫CV圖.....	54
圖 3-23(b) InAsSb(2.2ML)-Annealing700 <sup>o</sup> C-室溫CV轉縱深圖.....	54
圖 3-24(a) InAsSb(2.2ML)- As grown -大偏壓範圍下之 DLTS 圖.....	55
圖 3-24(b) InAsSb(2.2ML)- Annealing700 <sup>o</sup> C -大偏壓範圍下之DLTS圖.....	55
圖 3-25 InAsSb(2.2ML)- Annealing700 <sup>o</sup> C -各偏壓範圍下之DLTS圖.....	56
圖 3-26(a) InAsSb(2.2ML)- Annealing700 <sup>o</sup> C-E1 缺陷各速度視窗下之DLTS圖...	57
圖 3-26(b) InAsSb(2.2ML)- Annealing700 <sup>o</sup> C-E1 缺陷之Arrhenius plot.....	57
圖 3-27(a) InAsSb(2.2ML)- Annealing700 <sup>o</sup> C-E2 缺陷各速度視窗下之DLTS圖...	58
圖 3-27(b) InAsSb(2.2ML)- Annealing700 <sup>o</sup> C-E2 缺陷之Arrhenius plot.....	58
圖 3-28(a) Relaxed after annealing InAsSb 與 Relaxed InAsSb QDS ~E1與E2缺陷之Arrhenius plot比較.....	59
圖 3-28(b) Relaxed after annealing InAsSb 能帶圖.....	59
圖 4-1(a) Relaxed InAsSb-as grown -變溫 PL 圖.....	60
圖 4-1(b) Relaxed InAsSb-as grown -室溫 PL 圖.....	60
圖 4-1(c) Relaxed InAsSb-as grown -低溫 PL 圖.....	60
圖 4-2(a) Relaxed InAsSb-Annealing 650 <sup>o</sup> C-變溫PL圖.....	61
圖 4-2(b) Relaxed InAsSb-Annealing 650 <sup>o</sup> C-室溫PL圖.....	61
圖 4-2(c) Relaxed InAsSb-Annealing 650 <sup>o</sup> C-低溫PL圖.....	61
圖 4-3(a) Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C -變溫PL圖.....	62
圖 4-3(b) Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C -室溫PL圖.....	62
圖 4-3(c) Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C -低溫PL圖.....	62
圖 4-4(a) Relaxed InAsSb-Annealing750 <sup>o</sup> C -變溫PL圖.....	63
圖 4-4(b) Relaxed InAsSb-Annealing750 <sup>o</sup> C -室溫PL圖.....	63
圖 4-4(c) Relaxed InAsSb-Annealing750 <sup>o</sup> C -低溫PL圖.....	63
圖 4-5 Relaxed InAsSb -四片熱退火樣品-低溫 PL 圖.....	64

圖 4-6	Relaxed InAsSb -四片熱退火樣品-室溫 PL 圖.....	64
圖 4-7	Relaxed InAsSb -as grown ~ Gaussian function 擬合.....	65
圖 4-8	Relaxed InAsSb - Annealing700 <sup>o</sup> C ~ Gaussian function 擬合.....	66
圖 4-9(a)	Relaxed InAsSb-as grown - 能階隨溫度變化圖.....	67
圖 4-9(b)	Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C - 能階隨溫度變化圖.....	67
圖 4-10(a)	Relaxed InAsSb-as grown - 半高寬隨溫度變化圖.....	68
圖 4-10(b)	Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C -半高寬隨溫度變化圖.....	68
圖 4-11(a)	Relaxed InAs-as grown-室溫 PL 圖.....	69
圖 4-11(b)	Relaxed InAs- Annealing700 <sup>o</sup> C-室溫PL圖.....	69
圖 4-12	Relaxed InAsSb-各熱退火溫度下之室溫 IV 圖.....	70
圖 4-13(a)	Relaxed InAsSb-各熱退火溫度下-低溫 CV 圖.....	70
圖 4-13(b)	Relaxed InAsSb-各熱退火溫度下-低溫 CV 轉縱深圖.....	70
圖 4-14(a)	Relaxed InAsSb-Annealing650 <sup>o</sup> C-低溫CV圖.....	71
圖 4-14(b)	Relaxed InAsSb-Annealing650 <sup>o</sup> C-低溫CV轉縱深圖.....	71
圖 4-15(a)	Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C-低溫CV圖.....	72
圖 4-15(b)	Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C-低溫CV轉縱深圖.....	72
圖 4-16(a)	Relaxed InAsSb-Annealing750 <sup>o</sup> C-低溫CV圖.....	73
圖 4-16(b)	Relaxed InAsSb-Annealing750 <sup>o</sup> C-低溫CV轉縱深圖.....	73
圖 4-17(a)	Relaxed InAsSb-Annealing650 <sup>o</sup> C-變溫CV圖.....	74
圖 4-17(b)	Relaxed InAsSb-Annealing650 <sup>o</sup> C-變溫CV轉縱深圖.....	74
圖 4-18(a)	Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C-變溫CV圖.....	75
圖 4-18(b)	Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C-變溫CV轉縱深圖.....	75
圖 4-19(a)	Relaxed InAsSb-Annealing750 <sup>o</sup> C-變溫CV圖.....	76
圖 4-19(b)	Relaxed InAsSb-Annealing760 <sup>o</sup> C-變溫CV轉縱深圖.....	76
圖 4-20(a)	Relaxed InAsSb-Annealing650 <sup>o</sup> C-室溫CV圖.....	77
圖 4-20(b)	Relaxed InAsSb-Annealing650 <sup>o</sup> C-室溫CV轉縱深圖.....	77
圖 4-21(a)	Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C-室溫CV圖.....	78
圖 4-21(b)	Relaxed InAsSb-Annealing700 <sup>o</sup> C-室溫CV轉縱深圖.....	78
圖 4-22(a)	Relaxed InAsSb-Annealing750 <sup>o</sup> C-室溫CV圖.....	79
圖 4-22(b)	Relaxed InAsSb-Annealing750 <sup>o</sup> C-室溫CV圖.....	79
圖 4-23	Relaxed InAsSb(2.8ML)~各偏壓範圍下之 DLTS 圖.....	80
圖 4-24(a)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~HRTEM(未經傅立葉轉換).....	81
圖 4-24(b)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~HRTEM(經傅立葉轉換).....	81
圖 4-25	Relaxed InAsSb~四個速率窗下改變填充偏壓 DLTS 圖.....	82
圖 4-26(a)	Relaxed InAsSb~不同速率視窗之對應溫度及其捕捉速率.....	83
圖 4-26(b)	Relaxed InAsSb~捕捉位能障擬合.....	83
圖 4-27	Relaxed InAsSb~修正後之能帶圖.....	84
圖 4-28	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing650 <sup>o</sup> C~各偏壓範圍下之DLTS圖	85

圖 4-29	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700 <sup>o</sup> C~各偏壓範圍下之DLTS圖	86
圖 4-30	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing750 <sup>o</sup> C~各偏壓範圍下之DLTS圖	87
圖 4-31(a)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing650 <sup>o</sup> C~ 量子點附近偏壓下各速度視窗之 DLTS 圖.....	88
圖 4-31(b)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing650 <sup>o</sup> C~ 量子點附近偏壓下之 Arrhenius plot.....	88
圖 4-32(a)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700 <sup>o</sup> C~ 量子點附近偏壓下各速度視窗之 DLTS 圖.....	89
圖 4-32(b)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700 <sup>o</sup> C~ 量子點附近偏壓下之 Arrhenius plot.....	89
圖 4-33(a)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing750 <sup>o</sup> C~ 量子點附近偏壓下各速度視窗之 DLTS 圖.....	90
圖 4-33(b)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing750 <sup>o</sup> C~ 量子點附近偏壓下之 Arrhenius plot.....	90
圖 4-34(a)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700 <sup>o</sup> C~ 較大偏壓下各速度視窗之 DLTS 圖.....	91
圖 4-34(b)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700 <sup>o</sup> C~ 較大偏壓下之 Arrhenius plot. ....	91
圖 4-35(a)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing750 <sup>o</sup> C~ 較大偏壓下各速度視窗之 DLTS 圖.....	92
圖 4-35(b)	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing750 <sup>o</sup> C~ 較大偏壓下之 Arrhenius plot.....	92
圖 4-36	Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing 後之能帶圖.....	93

# 第一章 緒論

## 1.1 InAs/GaAs 量子點材料介紹

半導體的量子奈米結構一開始是由 Esaki 與 Tsu 於 1969 年研究超晶格 (superlattices) 開始的，他們在厚度小於電子平均自由路徑的一維週期結構上觀察到量子效應，此後也開啟了奈米結構的研究熱潮。由於隨著長晶技術不斷的進步下，量子線、量子井與量子點結構也分別被發展出來，量子線為一維束縛，量子井與量子點各為二維與三維束縛，由於如此的束縛效應，使得電子在某些方向上的運動受到限制，而導致在其方向上能量的量子化。

常見的異質界面長晶模式可分為三種：(1)層接式 (F-vdM mode, Frank-van Merwe mode) [1]；(2)島嶼式 (V-W mode, Volmer-Weber mode) [2]；(3)層接而後島嶼式 (S-K mode, Stranski-Krastanow mode) [3]，如圖 1-1 所示。當磊晶材料的表面能大於基板的表面能時，是利於島嶼式的成長模式，反之，若磊晶材料的表面能小於基板的表面能時，則利於層接式的成長模式，至於層接而後島嶼成長模式是先成長一層 wetting layer 的薄膜，之後再聚集形成島嶼模式。

長晶模式牽涉於基板材料和磊晶材料之間表面能的差異，及晶格常數間的匹配程度，由於晶格常數的不匹配會產生彈性應變能的問題。若磊晶材料的表面能較基板的表面能小，且它們之間存在晶格不匹配時，則最初的成長會趨向於層接式，但是當磊晶厚度超過一定程度，因為彈性應變能的增加，使得晶格會藉由晶格鬆弛降低彈性應變能，造成系統總能量的下降，至於成長模式則轉換成島嶼式，當磊晶厚度在一定的臨界值內，晶格鬆弛不會產生出缺陷，若繼續增加磊晶厚度，就會有差排 (dislocation)、堆疊錯誤 (stacking fault) 等缺陷產生。

根據參考文獻[4]，當 InAs 的磊晶厚度超過 1.75ML(Monolayer)時，會從二維轉變為三維的成長模式，在剛開始時不會產生任何缺陷，但是當 InAs 的磊晶厚度超過 3ML 時，InAs 量子點會因為晶格不匹配的因素導致在異質界面處產生差排(dislocation)等缺陷。InAs 的晶格常數大於 GaAs，所以 InAs 成長在 GaAs 材料上時，會在平行的方向上產生壓縮應變(compressive strain)，因此在適當的磊晶厚度下，就可以形成三維島嶼式的長晶模式。

根據參考文獻[5]，Goldstein 在 1985 年提出 InAs Islands 以 S-K 成長模式在 GaAs 基板上會出現量子點的特性，若成長參數控制適當，將可長出無缺陷的量子點結構，從此之後，以 S-K 方式成長的量子點，成為製作量子點的主要方法。

量子點為一個三維小體積的奈米結構，在其中的電荷載子被三維空間的位能障侷限住了，因此在數學上具有 $\delta$ 函數的態密度，所以理論上用量子點結構為作用區的半導體雷射具有超低的起始電流密度[6]、高特徵溫度(characteristic temperature,  $T_0$ )[7]、高材料增益(gain)[8]、較窄的譜線寬度、操作條件對溫度不敏感...等優點，因此對於光電元件的應用上具有很大的貢獻。利用量子點的這些特性所做成的元件有量子點雷射[9-10]、電晶體[11]、光檢測器[12]、量子點記憶體元件(quantum dots memory device)等。

## 1.2 研究動機

近年來的研究發現把 antimony(Sb)加入 InGaAs 及 InGaAsN 量子井中，可使得其發光波段拉長至  $1.3\mu\text{m}$  甚至  $1.55\mu\text{m}$  附近[13-17]。由文獻記載得知：antimony(Sb)的功用可以增加二維的成長模式且抑制三維的成長模式，所以二維轉變為三維的臨界厚度會增加，此外可減輕磊晶層材料的表面能且延後差排(dislocation)缺陷的形成，進而可使量子結構長得更厚，發光波段可拉得更長。

但多數的研究皆為將 Sb 加入 GaAs capped layer 中，作為應力減緩層(strain-reducing layers) [18-21]，將 Sb 加入 InAs/GaAs 量子點的研究卻是少之又少[22-24]。本論文即採用此結構，成長了三片不同厚度(2ML、2.2ML、2.8ML)的 InAsSb/GaAs 量子點，配合電性及光性的量測技術，深入探討這種新穎的量子點結構。

根據本研究室先前的研究[25,36]指出，隨著 InAsSb 厚度增加，波長往長波長移動，從  $1235\text{nm}$  移動至  $1285\text{nm}$ ，如圖 1-2。在 PL、CV 及 DLTS 量測後，發現 2.2ML 樣品的載子侷限效應最好，且沒有缺陷存在。而 2.8ML 的樣品已發生晶格鬆弛，這表示其臨界厚度介於 2.2~2.8ML。將 Sb 加入 InAs QDs 中雖然可把能隙降低進而拉長波長，但是晶格不匹配較大所受到的應力也因此變大，所以會提早發生晶格鬆弛現象。

然而，在量子結構中加入 antimony(Sb)材料，Sb 所伴隨的效應為何？本論文針對三片樣品中，長晶品質最好(2.2ML)及晶格鬆弛(2.8ML)的樣品做熱退火處理，藉由光性及電性分析，探討在外加能量(熱能)的情況下：

- (一) Sb 摻雜至 QDs 的效應為何？根據文獻指出[23]，用 MBE 成長 InAsSb ternary alloys 會有 Sb phase separation 的現象。我們藉由光性分析來探討 InAsSb QD 隨熱退火溫度有何變化的趨勢？
- (二) 當給予外加能量(熱退火)對於 InAsSb QD 的影響為何？是否提供晶格鬆弛所需能量？並由電性缺陷分析來詳細探討缺陷分布與類型。
- (三) 載子於量子與缺陷能階間的傳輸機制有何改變？

### 1.3 論文架構

本論文主要是研究 InAsSb/GaAs 單一量子點，針對長晶品質最好 InAsSb(2.2ML)及晶格鬆弛 InAsSb(2.8ML)的樣品做熱退火處理，利用光性與電性的量測方法，研究此種結構的特性。

而論文的章節安排如下：

第二章：樣品製備與量測系統簡介。

簡述樣品的製作過程與介紹所使用的量測系統。

第三章：InAsSb(2.2ML) 熱退火後之光性及電性量測結果與分析。

針對該樣品作光性量測(PL)與電性量測(包括 I-V、C-V、C-F、及 DLTS)，再對其實驗數據加以分析與討論。

第四章：Relaxed InAsSb(2.8ML) 熱退火後之光性及電性量測與分析。

針對該樣品作光性量測(PL)與電性量測(包括 I-V、C-V、C-F、及 DLTS)，再對其實驗數據加以分析與討論。

第五章：由光性及電性量測所得到的數據加以彙整而得到最後結論。



## 1.4 銻(Sb)對長晶的影響

### 1.4.1 表面活化效應(surfactant effect)

由先前文獻得知，Sb 最常應用於量子井結構，原因是 Sb 在 InGaAs/GaAs 系統長晶過程中，能有效降低磊晶表面能量，保持介面穩定平整，改善晶格的品質，延緩 2D 到 3D 的轉換點，這現象稱為表面活化效應(surfactant effect)[26-32]。這個效應可以應用於修正高應力 III-V 磊晶層的長晶模式，使錯位形成(dislocation)與應力鬆弛(strain relaxation)的臨界厚度增加[33]。近年有文獻指出，造成表面活化效應的原因，是因 Sb-Sb 的二聚元素鍵結(dimmer bonds)能夠減少 GaAs 或 InAs 這類閃鋅礦晶格(zincblende lattice)的懸空鍵結(dangling bonds)，由二降為一，加上 Sb-Sb 鍵結長度大於 As-As，導致 Sb 在 InAs 上表面移動(migration)填補懸空鍵結，降低總體表面能[34]，因此這個效應很有可能於 S-K mode 延緩自聚式量子點形成時間。



### 1.4.2 加入 InAs 成長

理想上 Sb 加入量子點成長，會將能隙縮小(InAs: 0.360eV, InSb: 0.172eV; 而  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ : 介於兩者之間)，進而波長拉長；能帶平移量(band offset)漸漸由價帶(valance band)居多；晶格常數變大(Lattice mismatches: InAs/GaAs: 6.9%; InSb/GaAs: 14.6%;  $\text{InAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ : 介於兩者之間)，進而使得應力增加...等現象[22]。另外文獻上還有利用 Sb 的含量來控制量子點的尺寸與密度[35]。但是要將 Sb 加入 InAs 成長並沒有這麼容易，有文獻記載[23]，用 MBE 成長 InAsSb ternary alloys 會有 Sb phase separation 的現象，由 X-ray 分成 InAs-rich 與 InSb-rich 兩群，如圖 1-3 所示。

## 第二章 樣品製備與量測系統簡介

### 2.1 樣品製備

分子束磊晶技術(molecular beam epitaxy, MBE)其原理類似一個超高真空蒸鍍的系統，與蒸鍍系統不同的是，在磊晶過程基板會加熱到一定的高溫，使分子沈積於基板表面後有足夠的熱能移動到適當的位置，形成高品質的單晶薄膜。分子束是由已加熱的坩鍋中，從液化元素或固態元素蒸汽壓得來的，利用蒸汽壓將分子束射向磊晶基板，故名為分子束磊晶。在磊晶過程可由改變坩鍋的溫度以控制分子束的通量，即磊晶速率。我們也可以使用 RHEED(Reflection High Energy Electron Diffraction)來監視薄膜成長的好壞，確保薄膜成長的品質。分子束磊晶之所以會採用超高真空系統，主要是為了減少其他雜質融入磊晶層中，影響材料的光、電特性。

本論文所研究的樣品是以分子束磊晶方式成長，成長的方式為：

(一)採用S-K長晶模式，在 $n^+$  GaAs(100) substrate上成長  $0.3\mu\text{m}$  矽摻雜 n-GaAs buffer layer，成長溫度設定在  $595^\circ\text{C}$ 。

(二)於 n-GaAs buffer layer 之上再成長 3 片不同厚度的 InAsSb 的量子點，其中 Sb 的含量為 6%，而其成長溫度為  $485^\circ\text{C}$ 。

(三)最後再覆蓋  $0.3\mu\text{m}$  矽摻雜 n-GaAs cap layer，便完成各片樣品的製備。

樣品結構圖與能帶圖，如圖 2-1、圖 2-2 所示。

而各個樣品的長晶條件則列於下表中。

樣品編號	n-GaAs 層 摻雜濃度	InAsSb 長晶速率	InAsSb 量子點厚度
sh454	$6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$0.256 \text{\AA}/\text{sec}$	2ML
sh435	$6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$0.256 \text{\AA}/\text{sec}$	2.2ML
sh438	$6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$	$0.256 \text{\AA}/\text{sec}$	2.8ML

## 2.2 電極的製作

分為蕭基界面(Schottky contact)及歐姆界面(Ohmic contact)兩個部分。

### 2.2-1 蕭基界面的製作

經由MBE成長樣品後，需在樣品表面蒸鍍金屬圖形(pattern)，使其形成蕭基界面(Schottky contact)，再進一步量測元件的電性，元件的直徑為 $800\mu\text{m}$ (面積為 $0.005024\text{cm}^2$ )。蒸鍍的金屬與樣品黏著是否良好，關係金屬與半導體界面的電性，影響著我們一連串的量測結果的準確性，所以蒸鍍前清洗樣品的工作是非常重要的。

以下簡述樣品的清洗步驟：

- (1)將樣品與適量的鋁條置入 D.I water (阻值 $>15\text{M}\Omega$ 的去離子水)中，用超音波震盪器震盪約 3 分鐘→去除樣品表面的一般雜質。
- (2)將樣品與鋁條浸泡於 A.C.E(丙酮溶液)中，用超音波震盪器震盪約 3 分鐘→去除樣品表面的油漬。
- (3)置入 D.I water 中用超音波震盪器震盪約 3 分鐘→去除樣品殘留的 A.C.E。
- (4)將樣品放入稀釋過的鹽酸溶液( $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:1$ )中，約 15 秒鐘→去除樣品表面的氧化層。(同時將鋁條放入稀釋過的鹽酸溶液中，用夾子刮至乳白色以去除表面之氧化鋁。)
- (5)再浸泡於 D.I water 中，用超音波震盪器震盪約 3 分鐘→去除樣品殘留的鹽酸溶液。
- (6)對樣品做蝕刻(etching)處理，蝕刻配方為 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:10$ ，蝕刻時間約 1~2 秒。→蝕刻掉表面的量子點  
(長晶時為了對樣品表面進行 AFM 量測所長的量子點)
- (7)最後使用氮氣吹乾樣品。

樣品經過清洗之後，將其置於載具上，以金屬光罩(mask) 覆蓋固定(事先將載具及mask皆用丙酮擦試並用氮氣吹乾)，然後將之與欲鍍物(鋁)一起放入chamber中，接著用mechanic pump和diffusion pump將chamber內壓力抽至  $3 \times 10^{-6}$  torr以下，即可利用電流(約 50A) 加熱鋁使其汽化鍍在樣品上，如此便完成蕭基接面的製作。

## 2.2-2 歐姆接面的製作

完成蕭基接面的製作後，接著在樣品背面做歐姆接面。我們在已蒸鍍完成的樣品背面黏上2~3點銻(Indium)球，送入通有氮氣的高溫爐管( $320^{\circ}\text{C}$ ) 約 60 秒。為了避免背面電阻對本實驗的影響，對背面銻球做I-V量測，確定電阻小於  $10\Omega$ 之後，再將矽基板放在加熱平台上加熱至  $180\sim 200^{\circ}\text{C}$ ，便可在矽基板上均勻塗抹一層銻，而後再將樣品背面黏在矽基板上，即完成歐姆接面的製作。



## 2.3 量測系統簡介

量測系統分為光性與電性兩個系統。

### 2.3-1 光性量測系統

本實驗所使用的光性量測系統為 PL 量測系統，所使用到的量測儀器如下：

1. 固態雷射(solid-state laser)：型號為 LOC-VENTUS 1000 SERIES，波長為 532nm，最大輸出功率為 1.3W，功能是用來激發樣品發光。
2. 衰減濾光片組(Variable Neutral Density Filter)：配合雷射功率依需要使用適當的衰減片(filter)來達到所要的入射功率。
3. 光遮斷器(chopper)：型號為 NEW FOCUS MODEL 3501，選用的頻率為 500Hz，目的在使雷射激發光源調制成方波的形式。
4. 聚光透鏡組(Focus lens)：用來聚焦雷射光與 PL 訊號。
5. 低溫系統：包括真空腔體、降溫用壓縮機(compressor)、溫控器(型號為 Neocera LTC-11)等。
6. 冷卻水冷凍系統：冷卻水系統是 Firstek Scientific 公司出產，型號 CF-100，主要用來冷卻壓縮機與固態雷射。
7. 高通濾光片(filter)：使用 695nm 的 long-pass filter，其用意是為了濾除雷射光，避免雷射光進入光偵測器中。
8. 分光儀(monochromator)：型號為 ARC Spectro-275，其焦距長度為 27.5cm，內部有三塊光柵可供選擇，而光柵的選擇是依據實驗所量測的波長範圍而定。本實驗皆屬長波長範圍，因此使用的光柵為 600 groove/mm (BLZ=1000 nm)。
9. 光偵測器(photodetector)：由 Electro-Optical Systems 公司所生產的 InGaAs 光偵測器，在室溫波長範圍為 800~1800nm。
10. 訊號放大器(multi-meter)：將光偵測器的訊號整理放大再傳給鎖相放大器。

11. 鎖相放大器 (Lock-in Amplifier)：型號為 STANFORD RESEARCH SYSTEM SR850，用來測量微小的交流訊號。

圖 2-3 為整個 PL 量測系統之架設圖[37]。首先由最大輸出功率為 1.3W 固態雷射，發射出波長為 532 nm 的雷射光。接著視實驗需要使用衰減片(VNDF)來降低雷射功率，再將雷射光通過光遮斷器，對訊號轉為方波的形式。再利用透鏡將雷射光聚焦在樣品上，對樣品進行激發。激發後所放射的螢光，再經由透鏡聚焦在分光儀的狹縫中進行分光。在光進入狹縫之前，使用高通濾光片來濾掉雷射光，以避免其對訊號產生干擾。而後螢光會由分光儀背後的狹縫射出，再經由光偵測器接收。偵測到的訊號送至鎖相放大器處理，最後再傳回電腦，我們即可在電腦上進行操控動作。

## 2.3-2 電性量測系統

1. Keithley 236：用來量測電流-電壓(I-V)特性曲線。
2. DLTS系統(SULA Technology製造)：包含脈衝產生器、溫控系統、雙開訊號平均器、電容計、降溫系統及水平垂直紀錄器等。其 $t_2/t_1=11.5$  是固定的，量測頻率是 1MHz。
3. HP 4194(阻抗/增益相位分析儀)：用來量測電容-電壓(C-V)、電容-頻率(C-F，又稱 Admittance Spectroscopy)、暫態電容(Transient Capacitance)與深層能階暫態頻譜(Deep Level Transient Spectroscopy)的特性曲線。
4. 溫控器：型號為 LakeShore330。
5. 變溫量測系統：變溫系統是 open cycle 型式的，利用液態氮降溫，最低溫可達 80K；另一種是利用液態氮降溫，最低可降至 20K 的溫度。系統總共包括 Cryogenic、抽真空 Pump、液態氮鋼瓶、真空腔體內有加熱平台與三軸探針台等。其中真空腔體為 CRYO 製造，型號為 CMP-1487。

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

## 第三章 InAsSb(2.2ML) 熱退火後之光性及電性量測結果與分析

### 3.1 光激發螢光(Photoluminescence)量測結果與分析

#### 3.1-1 摻入銻(Sb)量子點與一般量子點 PL 比較

首先我們要判斷樣品的訊號來源。一般來說，我們視PL量測圖型中，較長波長的訊號為基態(Ground State)載子所放射，較短波長的為激發態(Excited State)載子所放射。

一般傳統的量子點，其基態與激發態的放射強度，會隨溫度有同步上下的趨勢，即此兩能態間沒有相對消長的現象，如圖3.1(a)；而InAsSb量子點，其基態與激發態的放射強度，會隨溫度有著明顯地相對消長現象，如圖3.2(a)。因此我們懷疑這二能態並非單純基態與激發態的關係。

另外，一般傳統的量子點，其基態與激發態的放射強度，在某一特定溫度下，會隨著雷射激發功率的增加而有相對消長的現象，如圖3.1(b)於室溫300K的變功率PL圖。原因是當雷射激發功率增加時，使得有愈來愈多的光子打入樣品，產生更多的電子電洞對。當低能量的基態被填滿時，便會轉填高能量的激發態。而InAsSb量子點的室溫PL量測，基態與激發態亦隨功率增加而有相對消長的情形，如圖3.2(b)。可見在室溫下，InAsSb量子點的表現與傳統量子點相似。

再則，一般量子點的基態與激發態間之能階差，約為60~70meV，且隨溫度變化不會有太大的差距，如圖3.1(a)；而InAsSb的基態與激發態間之能階差，如圖3.12(a)，在室溫時為64meV，為一般量子點的情況。而低溫時，竟高達160meV！。

此外，在低溫時，從PL圖形上明顯可見激發態與基態間的有不對稱的

情形存在，如圖3.2(c)。從半高寬來分析，基態的半高寬隨著溫度變化，大致維持在40meV附近，如圖3.15(a)；而激發態的半高寬在低溫時相當地大，約為130meV，而室溫時約為80meV。

綜言之，根據上述分析顯示，InAsSb量子點在室溫時，其基態與激發態的表現，在放射強度隨功率的消長情形、能階差以及半高寬，與一般量子點相近；然而低溫時，其基態與激發態除了圖形的不對稱外，且其放射功率隨溫度上升有相對消長的情形，能階差與半高寬都較一般量子點大了好幾倍。因此推測InAsSb 量子點在低溫下，並非單純量子點的基態與激發態訊號。

在本實驗先前的研究，針對InAsSb/GaAs QDs [40]以及InAsSb/InGaAs/GaAs dots-in-well [45]此一系系列含Sb的量子點樣品中，同樣在低溫下，有著非單純量子點的基態與激發態訊號的情形，其PL量測結果如圖3.3。

根據參考文獻[23]，InAsSb三元合金有相分離(phase separation)現象。因此不排除在我們的長晶條件下，也有發生相分離現象的可能性。我們初步假設PL量測於低溫下觀察到非單純量子點的行為，可能是在量子點中摻雜入Sb所造成的效應。

### 3.1-2 熱退火處理之銻(Sb)量子點分析

為了探討摻雜Sb於量子結構中，所伴隨的效應。這裡分為三部份探討。第一部分是將InAsSb長晶品質最好的(2.2ML)樣品做熱退火處理，再以光性觀察變化趨勢。第二部份是將可代表初使成長條件的(2.0ML)樣品做熱退火處理，並和2.2ML樣品做對照。第三部分佐以(AFM)的表面分析來驗證量子點的長晶情形。



## (一) InAsSb(2.2ML)熱退火後之光性分析

我們將2.2ML樣品做一系列的熱退火處理，溫度分別為 $650^{\circ}\text{C}\rightarrow 700^{\circ}\text{C}\rightarrow 750^{\circ}\text{C}$ ，而時間皆為 1 min。

首先先觀察低溫下的PL圖，因為低溫載子熱動能少，容易停留於原來的能態，不容易跑脫，侷限效果好，因此我們可用低溫的結果推估量子點的成長情形。

圖3.5(c)、3.6(c)、3.7(c)、為一系列熱退火處理的InAsSb QD樣品，在低溫20K時的PL圖，而圖3.4為各片低溫PL比較圖。隨熱退火溫度逐漸升高，可見激發態半高寬的變化趨勢，是由As grown時一個大的合成訊號，在Annealing $650^{\circ}\text{C}$ 時分為兩個清晰可見的小訊號，而 $700^{\circ}\text{C}$ 時激發態約只剩下一個窄半高寬的訊號， $750^{\circ}\text{C}$ 時激發態與基態是明顯可區分的。

除了低溫20K之外，再觀察隨溫度變化的PL圖3.8(a)~(d)，發現as grown的樣品在低溫25~180K時，激發態也都可觀察到一個大的合成訊號，而Annealing $650^{\circ}\text{C}$ 的樣品在低溫25~100K，都可觀察到激發態分為兩個小的訊號。相對地，Annealing $700^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$ 的樣品，各個溫度下所呈現的均勻性良好。由此可見隨著熱退火溫度增加，InAsSb量子點的均勻性有逐漸改善的趨勢。

接著我們針對量測的PL圖做Gaussian和Lorentzian擬合，以取得基態與激發態的能階差(Energy separation)、半高寬(FWHM)及積分強度(Integral Intensity)等相關資訊。圖3.9~3.11為各片熱退火樣品於PL上各量測溫度的擬合圖形。

由經擬合後的能階差(Energy separation)示意圖3.12(a)~(c)可見，在室溫下，各樣品的能階差皆為64meV，同一般傳統量子點的情形。而低溫下，as grown的樣品能階差為160meV，而針對Annealing $650^{\circ}\text{C}$ 樣品的激發態作two peak的擬合，可以區分為兩個訊號對基態的能階差。而Annealing $700^{\circ}\text{C}$ 樣品的能階差為74meV，趨向一般量子點的值。

將兩片樣品的能階差置於同一張圖做比對，如圖3.13，觀察到

Annealing700<sup>o</sup>C樣品相較於as grown樣品有下列改變：

- 1、發光波長藍移(Blue shift)：根據文獻[38-39]指出，此現象為InAs/GaAs中 In 和 Ga atoms之間的interdiffusion造成。
- 2、700<sup>o</sup>C樣品各PL溫度下的能階差固定約為60~70meV，均勻性較as grown更好。

此外，若針對as grown樣品由原先的two peak擬合改為three peak擬合，圖3.14(a)~(b)，發現除了擬合的情形與實際量測圖形更吻合外，可將激發態的訊號分為兩個小的訊號。再對應至Annealing650<sup>o</sup>C的樣品，推測as grown存有尺寸不均勻的情形。原因可能為長晶時，在二維結構就已經產生Sb的相分離，加上表面活化效應，使得Sb含量較多的一群形成三維結構更加延遲，量子點較慢形成，而顯現出剛開始成核的小顆量子點；相對地，而Sb含量較少的一群，隨著磊晶厚度增加而形成大顆量子點。由於同時存在兩種大小尺寸不同的量子點，因此低溫PL量測可觀察到激發態半高寬的合成訊號[40]。經由熱退火後，由於外加能量促使小顆量子點彼此融合成大顆量子點，因此Annealing650<sup>o</sup>C的樣品可以明顯看出兩個尺寸的訊號被區隔開來，更於Annealing700<sup>o</sup>C的樣品呈現近乎大顆的量子點，由於尺寸趨於均勻而呈現半高寬變窄的情形，如圖3.15(a)~(b)。

## (二)InAsSb(2.0ML)熱退火後之光性分析

我們將可代表InAsSb量子點初使形成條件的2.0ML樣品，做一系列的熱退火處理，溫度分別為650<sup>o</sup>C→700<sup>o</sup>C，而時間皆為1min。

在低溫及室溫的PL量測，如圖3.16(a)~(b)可發現as grown和annealing樣品，無論發光波長和半高寬都很相近。而於各溫度下PL圖也沒有變化，如圖3.17(a)~(b)。這代表熱退火對長晶厚度最薄的2.0ML量子點沒有影響。原因可能是因為量子點在2.0ML初步形成時，由於剛成核完畢，量子點都很小顆，其三個維度的尺寸都不大，且量子點密度不高，因此即使外加能量(熱退火)彼此間不會發生作用，因此於PL量測沒有變化。

### (三)InAsSb 之 AFM 分析

由圖3.18(a) AFM平面圖與圖3.18(b)AFM 3D圖，我們可以看到該樣品有很明顯的兩群大小不同的量子點。這是由於Sb含量較少部分已形成較大顆的量子點，而Sb含量較多的量子點，正開始由二維結構轉三維因此形成較小顆量子點所致。

綜合上述三部份的探討。由PL量測可推測InAsSb在成長時存有尺寸不均勻的現象，並佐以AFM表面分析來驗證。而隨熱退火溫度升高可見相分離的趨勢，而外加熱能可促使量子點的尺寸更均勻。

#### 3.1-3 Non relaxed InAsSb(2.2ML)~Annealing700<sup>o</sup>C後之光性分析

由上述推論得知，熱退火對於InAsSb的效應為：可促使量子點尺寸的均勻性。而一系列熱退火溫度中，以Annealing700<sup>o</sup>C的樣品，在低溫PL下擁有最窄的半高寬以及正常的量子點基態與激發態能階差。

接著對樣品進行室溫PL量測，因為高溫時載子熱動能大，不容易停留於原來的能態，容易跑脫，侷限效果差，因此我們可用室溫的結果推估載子跑脫的情形與載子可能的去向。

值得一提的是，我們發現Annealing700<sup>o</sup>C樣品，如圖3.6(b)，其室溫PL的載子侷限能力極差，故推測該樣品可能有晶格鬆弛導致缺陷的產生，缺陷會吃掉部分自由載子而導致PL的特性變差。下一節我們將針該樣品進行電性缺陷分析來驗證。

### 3.2 電流-電壓(I-V)量測結果與分析

將InAsSb as grown和Annealing700°C樣品，經由正向I-V曲線，圖 3.19 所求得的參數整理如下表：

	N	$r_s(\Omega)$	$I_s(A)$	$\phi_{bn}(V)$
As grown	1.1	149	$7.3 \cdot 10^{-10}$	0.68
RTA700°C	1.888	352	$1.75 \cdot 10^{-11}$	0.77

由上表中可以發現，as grown的ideal factor很接近理想值 1，而串聯電阻很小，表示此樣品的Schottky特性皆不錯，但RTA700°C的Schottky特性較差，其ideal factor等於 1.888，顯示電流傳導機制有可能來自於缺陷的產生-再結合電流(generation-recombination current)，這說明了缺陷的存在。其串聯電阻較as grown樣品為大，串聯電阻的來源一般是由基材電阻或接面電阻所造成，另外的可能來源是由於樣品本身的缺陷過多，使自由載子被空乏而導致電阻大幅增加。因此，我們可以推測該樣品可能有晶格鬆弛現象而導致dislocation缺陷，當dislocation發生之後會產生高濃度的缺陷來捕捉自由載子，造成樣品內部有高阻值區域的存生，在稍後的電性量測中，我們可以證實RTA700°C確實有缺陷的存在，且部分自由載子被缺陷所捕獲空乏。

### 3.3 電容-電壓(C-V)量測與分析

在作 C-V 量測時，除了給予一直流的外加偏壓外，還會給一 AC 小訊號 (osc level=0.01V) 來調變，而所量得的訊號來源可能為量子能階或缺陷能階。若其放射速率跟得上 AC 訊號的調變，則對電容有貢獻，反之，若其放射速率跟不上 AC 訊號的調變，則對電容沒有貢獻。所以從變頻 C-V 量測，就可得到量子能階或缺陷能階載子發射的速率為何。

圖 3-20(a)為InAsSb (as grown和Annealing700°C)兩片樣品在低溫下量測頻率為 10KHz的電容-電壓曲線圖。從圖中可以看出as grown從 0V到 -1.0V為典型塊材的曲線，而-1.0V至-2V都有一段電容緩慢變化的平台，當偏壓超過-2V時，又恢復成塊材的電容-電壓曲線。此電容變化的平台有可能是量子點侷限載子的peak。至於如何確認？由固定頻率的變溫CV量測，

利用  $N(W) = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 A^2 \left(\frac{dC^{-2}}{dV}\right)}$  式將電容-電壓曲線圖換算成縱深分佈圖，如圖

3-21(b)所示，可以看出隨著溫度越低，peak濃度越高，這是常見的量子侷限效應。而在 0.28 $\mu\text{m}$ 有載子堆積的peak存在，位置大概在量子點層(約 0.3 $\mu\text{m}$ )的附近，因此我們相信這個peak應為量子點侷限載子所造成。此外，其載子堆積的濃度約為  $1.3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ，高於背景濃度( $6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ )，意味著有不錯的量子侷限效應，並沒有缺陷的存在。

然而Annealing700°C的樣品，在電容電壓曲線圖中，如圖 3-20(a)，整段偏壓範圍都觀察不到電容變化的平台。而變溫CV量測中，如圖 3.22，亦看不到載子堆積的peak，取而代之的是大量載子空乏的情形發生。造成此情形的原因，我們推測該樣品發生晶格鬆弛，因此在異質接面處產生了很多缺陷，這些缺陷會捕捉載子，使得自由載子的濃度降低，造成載子的空乏。再看該樣品室溫CV圖形，如圖 3.23，也觀察不到載子堆積的peak存在且有大量載子空乏的情形。因此從C-V量測得知Annealing700°C的樣品有缺陷的存在。

### 3.4 深層能階暫態頻譜(Deep Level Transient Spectroscopy,DLTS) 量測結果與分析

經由前幾節I-V、C-V量測我們得知，InAsSb(2.2ML)as grown的樣品並沒有明顯的缺陷訊號存在，但Annealing700°C後有carrier depletion現象發生，故有缺陷的存在。所以先對as grown的樣品做大偏壓範圍的DLTS量測，如圖 3-24(a)所示，偏壓範圍從 0~-3.5V，對應至樣品範圍從GaAs surface涵蓋量子點一直到bottom GaAs，沒有發現缺陷訊號存在於樣品中。同樣地我們對Annealing700°C大偏壓範圍的DLTS量測，如圖 3-24(b)，發現在溫度200~400K間有極大的缺陷訊號。

為了釐清該樣品的缺陷分布情形，我們繼續做不同偏壓範圍的DLTS量測。方法是採用填充偏壓(filling voltage)和觸發偏壓(trigger voltage)的差值固定是 0.5V，而填充偏壓分別是 0、-0.5V、-1V、-1.5V、-2V、-2.5V。圖 3-25 是速率視窗(rate window)為 8.6msec，而填充偏壓時間(Filling pulse width)為 10 msec的DLTS圖。從圖中可發現Annealing700°C樣品有兩個缺陷訊號的存在，在 375K附近出現E1 缺陷，另外在 275K附近出現E2 缺陷。

從偏壓的位置可得知缺陷的分佈情形，對於 E1 缺陷而言，0~-1.0V 缺陷濃度最大，遠離此偏壓位置缺陷濃度漸漸變小，打到 interface 附近的偏壓缺陷訊號就消失了，這代表 E1 缺陷分佈在 GaAs surface 且延伸到 interface 附近。對於 E2 缺陷而言，訊號出現在-2.0~-3.0V 附近的缺陷濃度最大，代表 E2 缺陷分佈在 QD 的 interface 附近。

圖 3-26(a)(b)~3-27(a)(b)為E1 缺陷與E2 缺陷的不同速率視窗下之DLTS圖和Arrhenius圖，所求出的活化能和捕獲截面積分別是：E1( $E_a=0.60\text{eV}$ ， $\sigma=4.52*10^{-16}\text{cm}^2$ )；E2( $E_a=0.33\text{eV}$ ， $\sigma=2.04*10^{-18}\text{cm}^2$ )。比較這兩個缺陷得知，E1 比E2 的缺陷能階更深，捕獲截面積更大。

在以前實驗室所做的研究中，於 2.8ML InAsSb relaxed QD的樣品也有量到類似E1 與E2 的缺陷能階，其活化能和捕獲截面積分別為：

$E_a=0.64\text{eV}$  ,  $\sigma=2.11*10^{-15}\text{cm}^2$  ;  $E_a=0.35\text{eV}$  ,  $\sigma=1.18*10^{-17}\text{cm}^2$ [36]。我們把 relaxed after annealing InAsSb QD 和 relaxed InAsSb QD 兩種結構的 Arrhenius plot 畫在一起加以比較，如圖 3-28(a)所示，從圖中可以發現，確實存在兩個缺陷訊號(E1 及E2)，而且這些缺陷是因為發生晶格鬆弛所造成的。

而由上述 InAsSb QD 熱退火後的實驗結果，我們推測熱退火可提供應力鬆弛現象發生所需的能量，並產生類似於長晶超過臨界厚度而晶格鬆弛樣品的缺陷。

綜合上述光性和電性分析，我們匯製 InAsSb QD 熱退火後的樣品能帶圖，如圖 3.28(b)，並將量測所得資訊顯現在能帶圖中。圖中可見熱退火樣品相較於 as grown 樣品，有下列情形的改變：

- 1、 由於InAs/GaAs 中 In 和 Ga atoms之間的 inter diffusion ，因此能帶圖應會在interface處轉為continuous[41]。
- 2、 PL量測有發光波長藍移現象，得知量子能階往上提升，原因亦為In和Ga的 inter diffusion[38-39]。
- 3、 有缺陷能階產生，分別為：

Misfit dislocation : 0.33eV ; Threading dislocation : 0.60eV

## 第四章 InAsSb(2.8ML) 熱退火後之光性及電性量測結果與分析

### 4.1 光激發螢光(Photoluminescence)量測結果與分析

為了探討熱退火對於晶格鬆弛缺陷的影響。我們針對長晶超過臨界厚度而晶格鬆弛的樣品InAsSb(2.8ML)進行一系列的熱退火處理，溫度分別為 $650^{\circ}\text{C}\rightarrow 700^{\circ}\text{C}\rightarrow 750^{\circ}\text{C}$ ，而時間皆為 1 min。

圖4.1(c)~4.4(c)為一系列熱退火處理的relaxed InAsSb QD樣品，在低溫20K時的PL圖。而圖4.5為各片樣品的低溫PL圖比較圖。由圖中可見，隨熱退火溫度逐漸升高，有逐漸藍移的現象產生。根據文獻[38-39]指出，此現象為InAs/GaAs中 In 和 Ga atoms之間的interdiffusion。此外，熱退火後的樣品較as grown的樣品，於PL的峰值變弱，半高寬變寬，且均勻性變差。

再看室溫的情形，如圖4.1(b)~4.4(b)，其中Annealing $700^{\circ}\text{C}$ 的樣品，可以看見基態與激發態隨雷射功率有相對消長的情形，推測為單純量子點的行為。而將各片樣品的室溫PL圖比較，如圖4.6，發現隨熱退火溫度逐漸升高也有PL峰值變弱的情形。

圖4.1(a)~4.4(a)為四片樣品的變溫PL圖。圖中as grown樣品於各個溫度下，都呈現良好的均勻性，每個溫度下都有兩個peak，分別為基態與激發態；而熱退火的樣品，於各個溫度下皆存有三個peak，且均勻性都不好。

接著利用Gaussian和Lorentzian function將所量測的PL圖進行擬合，以細部探討基態與激發態的能階差(Energy separation)、半高寬(FWHM)及積分強度(Integral Intensity)等相關資訊。圖4.7~4.8為as grown 樣品及Annealing $700^{\circ}\text{C}$ 樣品的擬合圖形。

首先探討as grown樣品，如圖4.9(a)、4.10(a)，發現其PL特性相當好，無論在低溫及室溫下，能階差大致維持在60~70meV，且有相當窄的半高寬，基態約維持在30meV，而激發態約維持在90meV；接著看



Annealing 700°C 樣品，如圖 4.9(b)、4.10(b)，發現在低溫下，激發態可分為兩個訊號，且與基態的能階差提高，而室溫下能階差卻窄化為 45 meV。而激發態解析成兩個半高寬，較 as grown 樣品有更大的半高寬。

綜合上述，由光性分析可見，熱退火對於 relaxed InAsSb QD 而言，會產生尺寸不均勻的現象，初步認為是 Sb 所造成的效應。相對應的是，本實驗室也針對 relaxed InAs QD 樣品進行熱退火的研究[42]，如圖 4.11(a)~(b)，發現熱退火後，使原先晶格鬆弛導致均勻性不佳的樣品，PL 峰值大大提升，且有半高寬窄化的情形。可見含有 Sb 的 InAs QD 與純粹 InAs QD 的熱退火效應有相反的情形。下節我們將由電性分析來繼續探討熱退火於 relaxed InAsSb QD 的效應。



## 4.2 正向 I-V 量測

各片熱退火的 relaxed InAsSb QD 樣品，經由正向 I-V 曲線，如圖 4.12，所求得的參數整理如下表：

	n	$r_s(\Omega)$	$I_s(A)$	$\phi_{bn}(V)$
As grown	2.1	998	$3.7*10^{-10}$	0.7
Annealing650°C	1.519	179	$1.57*10^{-9}$	0.66
Annealing700°C	1.462	207	$1.167*10^{-9}$	0.67
Annealing750°C	2.013	495	$8.73*10^{-11}$	0.73

其中 ideal factor 及 Leakage current 值愈小，代表 Schottky 的特性愈好，這取決於蒸鍍或樣品的品質好壞。而串連電阻的來源一般是由基材電阻或接面電阻所造成，另外的可能來源是由於樣品本身的缺陷過多，使自由載子被空乏而導致電阻大幅增加。該樣品(2.8ML)的 ideal factor 較上一章 InAsSb(2.2ML) 差，串聯電阻也較大。原因是晶格鬆弛對樣品產生 dislocation 缺陷，當 dislocation 發生之後會產生高濃度的缺陷來捕捉自由載子，造成樣品內部有高阻值區域的存生。此外，由 I-V 曲線所量得的蕭特基障礙高度  $\phi_{bn}$ ，可以和之後的 C-V 量測所得的值做比對。

### 4.3 電容-電壓(C-V)量測與分析

各片熱退火的 relaxed InAsSb QD 樣品，經由 C-V 曲線，所求得的參數整理如下表：

	$N_d(\text{cm}^{-3})$	$V_{bi}(\text{V})$	$\phi_n(\text{meV})$	$\phi_{bn}(\text{V})$
As grown	$5.4 \times 10^{16}$	0.714	52	0.766
Annealing 650°C	$3.8 \times 10^{16}$	1.284	65	1.219
Annealing 700°C	$4.32 \times 10^{16}$	0.363	61	0.424
Annealing 750°C	$4.43 \times 10^{16}$	0.6996	61	0.761

圖 4-13(a)為四片樣品在低溫下量測頻率為 10KHz 的電容-電壓曲線圖，從圖中可以看出四片樣品都在於 0V 到 -1.7V 的範圍內，電容值快速的下降，當超過 -1.7V 時有不明顯的電容緩慢變化平台存在，當大於 -3V 又回復到塊材曲線。利用第三章(3.4)式將電容-電壓曲線圖換算成縱深分佈圖，如圖 4-13(b)所示，可以發現四片樣品在 0.36 $\mu\text{m}$  有載子堆積的 peak 存在，位置大概在量子點層的附近，這個 peak 應為量子點侷限載子所造成。

由圖 4-13(b)可見四片樣品皆在上層的 GaAs 有載子空乏的情形發生，這是因為該樣品已有晶格鬆弛的發生。而四片樣品的濃度值如上表，as grown 樣品的濃度為  $5.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，而熱退火後載子濃度有減少的情形， $< 5.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。而圖 4-14~4-16 為各片樣品詳細低溫 CV 圖。

圖 4-17~4-19 為四片樣品變溫的 C-V 圖。除了熱退火後樣品的載子濃度較 as grown 低之外，四片樣品的共同特性為：隨著溫度變低而 peak 濃度變化的幅度很小，這是因為缺陷捕獲了大部分的自由載子，使得量子能階侷限的載子很少，使得濃度變化不大，因此量子侷限能力較差。

圖 4-20~4-22 為四片樣品在室溫下變頻的電容-電壓曲線圖與縱深分

佈圖，從縱深分布圖中可以看出熱退火的樣品在室溫下載子堆積的 peak 對頻率有些微地變化。但對照 CV 圖，在所有偏壓範圍下，皆有此高低頻的平移現象，因此判斷此為 CV 曲線平移的時間常數，並非 quantum emission 的訊號。

綜合上述，as grown 的樣品因為有晶格鬆弛現象，而在異質界面處產生了許多缺陷，缺陷捕捉大部分自由載子，造成載子被空乏。而熱退火後發現除了 carrier depletion 之外，和 as grown 相比還有載子濃度銳減的情形。



## 4.4 深層能階暫態頻譜(Depth Level Transient Spectroscopy,DLTS) 及 TEM 量測結果與分析

本節的第一部分內容是先針對 relaxed InAsSb QD 的缺陷分布與類型做介紹，詳細研究內容可參考實驗室先前的研究[36]。而第二部份將探討熱退火對於 relaxed InAsSb QD 的缺陷分布與載子傳輸機制。

### 4.4-1 Relaxed InAsSb QD 之缺陷分析

#### 4.4-1-1 Relaxed InAsSb QD 之 DLTS 及 TEM 缺陷分析

從實驗室先前針對 Relaxed InAsSb QD 做 DLTS 的分析，如圖 4.23，可觀察到兩個缺陷：

- (1)從GaAs表面延伸到interface的缺陷，( $E_a=0.64\text{eV}, \sigma=2.11\text{e}^{-15}\text{cm}^2$ )
- (2)分佈在interface附近的缺陷，( $E_a=0.35\text{eV}, \sigma=1.18\text{e}^{-17}\text{cm}^2$ )

欲得知缺陷類型，於是我們將樣品做 TEM 量測以判斷缺陷的類別。首先利用高解析度的 HRTEM 去對此片樣品做量測。HR(High Resolution)TEM 的成像主要由不同晶面組成，所以利用傅立葉轉換的技術，可以了解在不同晶面上原子排列的狀況。圖 4-24(a)為 2.8ML Relaxed InAsSb QD 樣品的 TEM 圖(未經過傅立葉轉換)，從圖中發現有陰影的存在，造成陰影的原因通常為元素或應力所造成的，這個陰影的 size，高為 5~10nm，寬為 20~30nm，符合一個量子點的 size，所以確定這個陰影為一個量子點。把圖 4-24(a)經過傅立葉轉換之後，結果如圖 4-24(b)，圖中我們在量子點下方畫一直線，那條直線就是 wetting layer 所在位置。由圖中得知在量子點的 interface 附近有很多晶格錯位的 dislocation 存在，且 dislocation 並沒有往上面的 Top GaAs 或下方的 Bottom GaAs 延伸，而僅存在於量子點的 interface 附近。根據文獻[43]記載：分佈在 interface 附近的 dislocations 為 misfit dislocation defect。再配合上述 DLTS 的量測結果，有

量到 0.35eV 的缺陷分佈在 interface 附近，所以我們推測 0.35eV 這個缺陷為 misfit dislocation defect。

因此，透過 HRTEM 量測我們得知：造成 C-V 量測所得大量載子被空乏的主因，應該是 0.35eV 的 misfit dislocation defect 所造成的，而晶格鬆弛是發生在 QD 的 interface 附近。

而 DLTS 量測到另一個 0.64eV 的缺陷，類型為 threading dislocation defect，分布是從樣品的 GaAs surface 一直延伸到 interface，詳細內容可參見本實驗室先前的研究[36]。

#### 4.4-1-2 Relaxed InAsSb QD 之深層能階暫態頻譜與捕獲位能障 (Capture barrier)

關於捕捉位能障  $E_{\sigma}$  的求取步驟如下[40]：

(1) 首先改變數個不同  $t_p$  直到確定飽和 DLTS 強度，將三組以上未飽和訊號源  $S$  如下公式取對數再對  $t_p$  做直線擬合得斜率，即得捕捉速率  $C$ 。

DLTS 訊號與填充偏壓時間公式求取捕捉速率：

$$S(t_p) = S(0) + S(\infty) * [1 - \exp(-C * t_p)] \rightarrow \ln \left[ 1 - \frac{S(t_p)}{S(\infty)} \right] = -C * t_p \rightarrow C$$

$S(t_p)$  是 DLTS 峰值強度， $t_p$  是填充偏壓時間(filling pulse width)， $S(0)$  是背景強度(background signal)， $S(\infty)$  是無限填充到飽和的 DLTS 強度， $C$  是捕捉速率(capture rate)。

(2) 將(1)的步驟做四個不同的速率視窗(rate window)，由於在不同速率視窗下峰值出現的溫度會不一樣，即捕捉速率  $C$  會隨溫度而變，一個速率視窗對應到一個溫度。根據下式，將捕捉速率  $C$  換成捕捉截面積  $\sigma$ ，代入不同  $\sigma$  和對應的溫度  $T$  取對數做直線擬合，即可得到捕捉位能障  $E_{\sigma}$ 。

捕捉速率與捕捉截面積及其對溫度公式求取捕捉位能障：

$$C = \sigma v n \rightarrow \sigma \quad \sigma = \sigma_{\infty} \exp\left(-\frac{E_{\sigma}}{K_B T}\right) \rightarrow E_{\sigma}$$

$\sigma$  是捕捉截面積(capture cross section),  $v$  是平均速率(mean thermal velocity) 取  $4.4 \times 10^7 \text{ cm/sec}$ ,  $n$  是自由載子濃度(free carrier concentration) 取摻雜濃度  $8 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ ,  $\sigma_{\infty}$  是與溫度無關的係數,  $E_{\sigma}$  是捕捉位能障(capture barrier)大小,  $K_B$  是波茲曼常數(Boltzmann constant)。

圖4.25為四個速率窗下改變填充偏壓DLTS圖, 飽和填充時間隨著載子時間常數變大而愈大, 詳細載子時間常數(飽和填充時間估計值)變化如下:  
 $\tau=0.86\text{ms}(0.7\text{ms}) \rightarrow \tau=2.15\text{ms}(2\text{ms}) \rightarrow \tau=4.3\text{ms}(4\text{ms}) \rightarrow \tau=8.6\text{ms}(8\text{ms})$   
 隨著載子時間常數增加, 載子速率變慢, 對應溫度變低, 即對應的缺陷捕捉載子速率變慢, 要填滿缺陷至飽和的填充時間也就愈長。

依照上述步驟, 我們針對 relaxed InAsSb QD 進行捕捉位能障  $E_{\sigma}$  的求取。求得如圖 4.26(a)不同速率視窗之對應溫度及其捕捉速率與 4.26 (b)捕捉位能障, 由此判定此樣品有捕捉位能障  $E_{\sigma}=0.21\text{eV}$ 。

接著我們必須判斷該捕捉位能障(Capture barrier)的來源為何? 其中有可能是缺陷所貢獻, 或是能帶結構所貢獻。由上節 TEM 量測得知 misfit dislocation 是位在 QD region, 首先我們假定該晶格鬆弛樣品為 localized point defect, defect 本身沒有 capture barrier。接著我們是針對 QD 的附近的偏壓範圍(-2.0~-2.5V)進行 DLTS 量測, 因此推論 Capture barrier 的來源完全歸於 Interface 的 band structure。由此我們將 relaxed InAsSb 的能帶圖做以下的修正, 如圖 4.27。

由於我們將 Capture barrier 歸於 Interface 的 band structure, 接著我們進行下列運算, 以求得載子佔據量子能階的機率, 並與 C-V 量測結果做比對。

由 C-V 量測可得熱平衡時 GaAs 層傳導帶的載子濃度:  $n_0 \approx 6.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$$\text{代回公式} \quad n_0 = N_C \exp\left[\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right]$$

以求得費米能階與傳導帶的能階差:  $E_C - E_F \approx 0.053\text{eV}$

接下來由於能帶上存有捕捉位能障  $E_{\sigma}=0.21\text{eV}$ ，因此估計量子點區域費米能階和傳導帶距離  $0.21+0.053=0.263\text{eV}$ 。

根據實驗室的研究[42]，量子點的基態與傳導帶間的能階差，約為  $0.16\text{eV}$ ，因此由上述費米能階與傳導帶的距離，扣除量子點基態與傳導帶間的能階差，即為量子點基態與費米能階的距離， $E-E_F\sim 0.103\text{eV}$ 。

再代回 Fermi-Dirac Probability Function：
$$f_F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

即可求得載子佔據量子能階的機率，在此求得約為： $f_F(E) \approx 1.8\%$

由此可見，約有九成以上的載子被空乏，這和 C-V 量測所得大量載子空乏的情形是一致的。

#### 4.4-2 Relaxed InAsSb QD 熱退火後之缺陷分析

由前幾節 I-V、C-V 和 C-F 量測我們得知，Relaxed InAsSb 樣品有載子被空乏的現象發生，且載子侷限能力不佳；而經熱退火後樣品，其載子的侷限能力更差。為了探討熱退火對於晶格鬆弛缺陷的影響，我們針對各熱退火溫度的樣品進行 DLTS 缺陷分析。

圖 4.28~4.30 為各熱退火溫度的 Relaxed InAsSb QD 在不同偏壓範圍的 DLTS 量測，量測條件同 as grown 的 relaxed 樣品，如圖 4.23，速率視窗 (rate window) 為  $8.6\text{msec}$ ，而填充偏壓時間 (Filling pulse width) 為  $10\text{msec}$  的 DLTS 圖。

首先我們將重心擺在造成載子空乏的主因：misfit dislocation，而 threading dislocation 將不再細部探討。圖中可發現：熱退火後的樣品於量子點 interface 附近偏壓下的 DLTS 圖，都存有共通的現象，那就是缺陷訊號所對應到的溫度值，從 as grown 樣品的  $275\text{K}$  附近，往更低溫 (約  $200\sim 250\text{K}$ ) 移動，這訊息告訴我們，其缺陷的活化能有變小的趨勢，因此我們更進一步去量取缺陷的活化能。

圖 4-31~4-33 為各熱退火樣品於量子點區域偏壓下，變化速率視窗之



DLTS 圖和 Arrhenius 圖。各熱退火樣品所求出的活化能大約都在 0.2eV 附近。該活化能較 as grown 樣品的 0.35eV 更小。造成活化能變小的因素可能有二：

第一：缺陷能階朝 GaAs Conduction Band 上提，因此 electron emission 的活化能變小。

第二：缺陷能階位置不變，但載子趨向跳至量子點的量子能階，而非 GaAs Conduction Band，因此活化能變小。

欲釐清載子於缺陷及量子能階間的傳輸行為，我們必須先找出缺陷活化能變小的原因為何種情況。接著我們進行較大偏壓範圍下的 DLTS 量測，如圖 4-34~4-35，由 Arrhenius 圖算出活化能約為 0.34~0.36eV，這和 as grown 樣品 misfit dislocation 活化能大小相近~0.35eV。由此分析發現如第二項假設，缺陷能階位置不變，但部份載子趨向跳至量子點的量子能階，而非 GaAs Conduction Band。

此外，在 DLTS 量測還發現一個不尋常的現象，如圖 4-31~4-33，除了缺陷的位置朝更低溫移動外，接著在低溫下呈現對溫度沒有反應的缺陷訊號，這代表 emission time 是與溫度無關的。根據參考文獻[44]，其來源可能是 Tunneling 現象。

由實驗結果推測部分載子趨向由缺陷跳至量子點的量子能階之後，再穿隧出去的傳輸機制。能帶圖如圖 4-36。

## 第五章 結論

在 InAs 量子點中摻雜 Sb，可幫助量子結構長的更厚，發光波長更長。本論文採用此結構，成長了三片不同厚度(2ML、2.2ML、2.8ML)的 InAsSb/GaAs 量子點，在 PL、CV 及 DLTS 量測後，發現 2.2ML 樣品的載子侷限效應最好，且沒有缺陷存在，而 2.8ML 的樣品已發生晶格鬆弛，這表示其臨界厚度介於 2.2~2.8ML。

由光性及電性分析，得知 InAsSb 量子點與一般 InAs 量子點的差別為：

1. 量子點的尺寸不均勻現象：顯現於低溫 PL 量測上，基態與激發態的能階差高達 160meV，激發態半高寬高達 130meV，異於一般 InAs 量子點。
2. 提前發生晶格鬆弛現象：由光性得知臨界厚度介於 2.2~2.8ML，較 InAs 量子點 2.7~3.06ML 小。因此 Sb 雖可降低能隙進而拉長波長，但是由於所受到的應力較大，會提早發生晶格鬆弛現象。

因此，我們針對 InAsSb(2.2ML) 樣品進行 650~750<sup>o</sup>C 熱退火處理，以找出其中的 Sb effect。由光性分析得知，原本激發態半高寬(130meV)的訊號，於熱退火 650<sup>o</sup>C 時可區分為兩個清晰的訊號，更於 700<sup>o</sup>C 時擁有 60~70meV 的能階差，半高寬由 130meV 降低至 60meV。我們推測 Sb 的加入，會使量子點成長時產生尺寸不均勻現象，而外加熱能可促使樣品均勻性獲得改善。接著我們做以下兩種驗證：

1. AFM 表面分析：InAsSb 的樣品從 AFM 表面分析可發現確實有大、小兩種尺寸的量子點存在。
2. 針對長晶厚度最薄的 InAsSb(2.0ML) 樣品，進行熱退火處理以作對照，原因是該樣品可以代表 InAsSb 初使成長的情形。在光性上發現熱退火對該樣品沒有明顯地改變。原因是該樣品沒有尺寸不均勻的現象，且量子點密度較低，故外加熱能對其沒有影響。

然而，熱退火 700<sup>0</sup>C的樣品於室溫下PL特性變差，並有類似晶格鬆弛的現象。於是將該樣品作電性分析，在CV量測發現大量載子被空乏，並由DLTS量測觀察到兩個缺陷存在，其類型分別為threading dislocation 及 misfit dislocation，而活化能分別為 0.60eV及 0.33eV。相較於已晶格鬆弛的 InAsSb量子點，其活化能分別為 0.64eV及 0.35eV，兩者是相類似的。由實驗結果推測熱退火可提供應力鬆弛現象發生所需的能量，並產生類似於長晶超過臨界厚度而晶格鬆弛樣品的缺陷。

接著探討 Relaxed InAsSb(2.8ML)樣品。從 CV 量測發現大量載子被空乏的現象，接著我們利用 DLTS 量測計算出該樣品有捕捉位能障  $E_{\sigma}=0.21\text{eV}$ 。並由 Fermi-Dirac Probability Function 計算出載子佔據量子能階的機率約小於 5%。由此得知約有九成以上的載子被空乏，這和 C-V 量測所得的情形是一致的。

由 DLTS 分析得知 Relaxed InAsSb(2.8ML)樣品有兩個缺陷存在。分別為 misfit dislocation(活化能 0.35eV);threading dislocation(活化能 0.64eV)。再由 HRTEM 可得知 misfit 缺陷的分布是位於 quantum dot 的 interface，並未向 top GaAs 及 bottom GaAs 延伸。

接下來探討熱退火對於 relaxed InAsSb QD 的缺陷的影響。由 PL 量測發現熱退火後發光波長藍移且均勻性變差。在電性上，由 CV 量測發現載子濃度銳減。針對量子點附近的偏壓進行 DLTS 量測，發現缺陷的活化能由 0.35eV 變小至 0.2eV。為了釐清活化能變小的原因，是缺陷能階向 GaAs 傳導帶上移，還是載子趨向跳至量子點的量子能階？我們進行較大偏壓下的 DLTS 量測，發現缺陷能階位置不變。推測部分載子並非由缺陷跳至 GaAs 傳導帶的行為，而是趨向跳至量子點的量子能階。此外，DLTS 所量得的缺陷，於低溫下呈現持續與溫度無關的訊號，意指在低溫下有穿隧現象。綜而言之，有部分載子傾向由 misfit dislocation 缺陷跳至量子點的量子能階後再穿隧出去的傳輸機制。

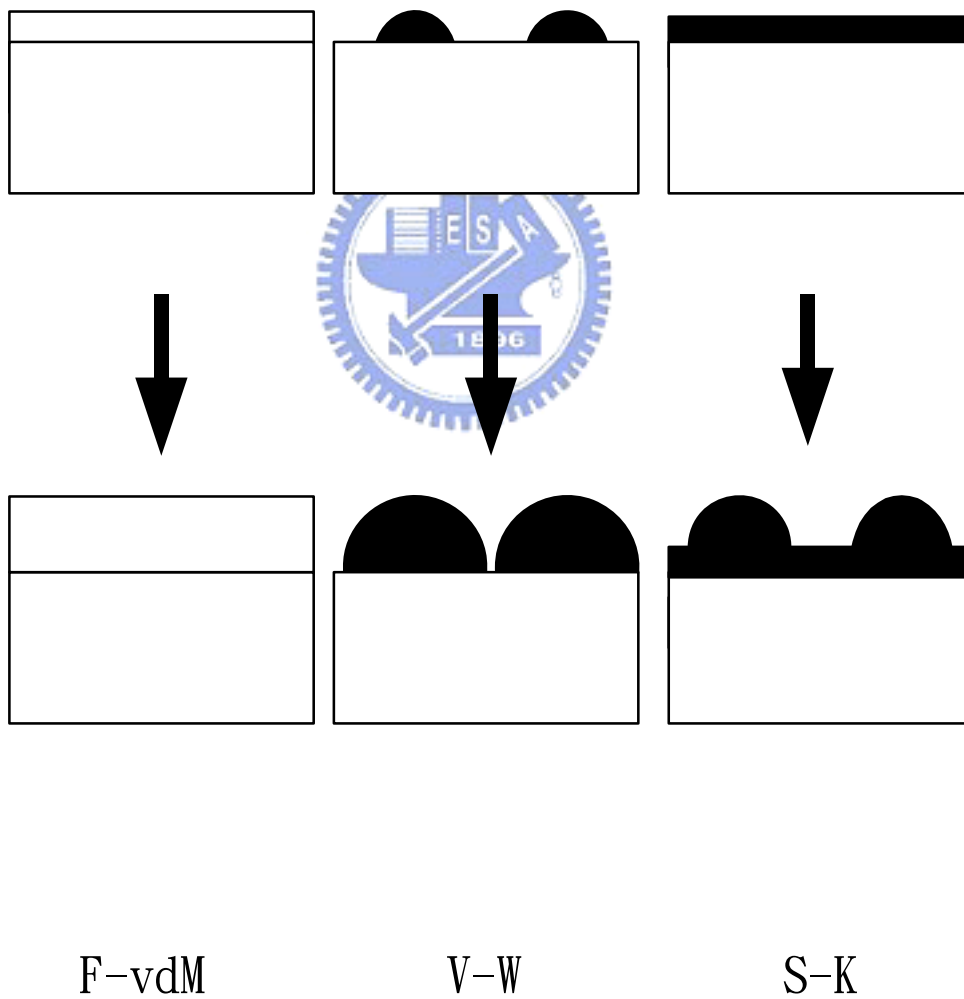


圖 1-1 三種不同長晶模式的示意圖

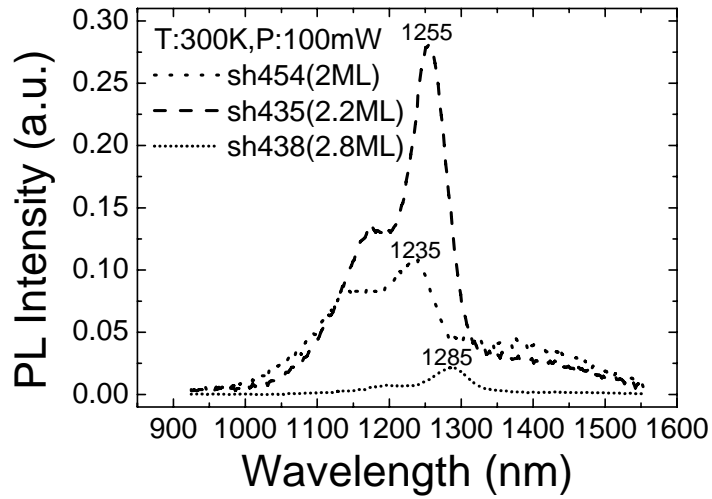


圖 1-2 三片樣品之室溫 PL 圖

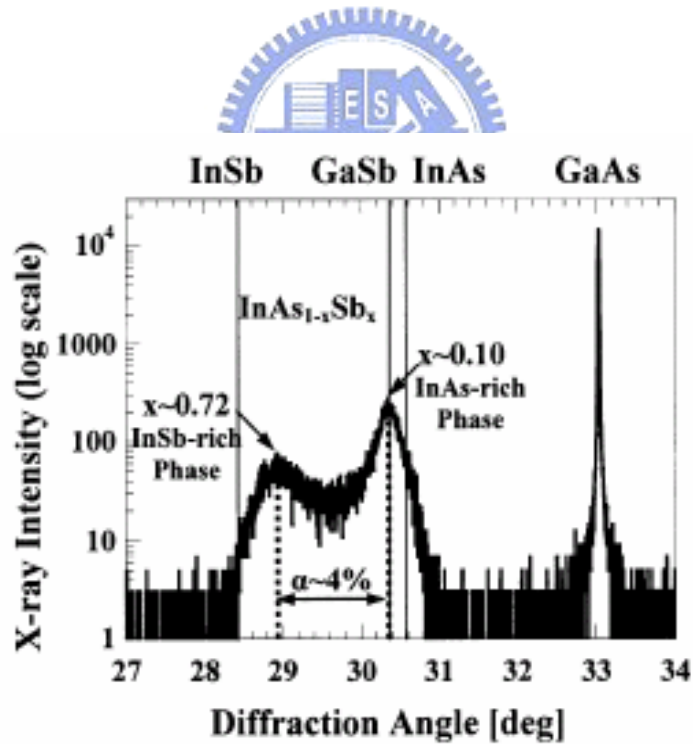


圖 1-3 InAsSb ternary alloys X-ray 分成 InAs-rich 與 InSb-rich 兩群

Ref. Journal of Crystal Growth vol.237–239, p1519–1524, 2002

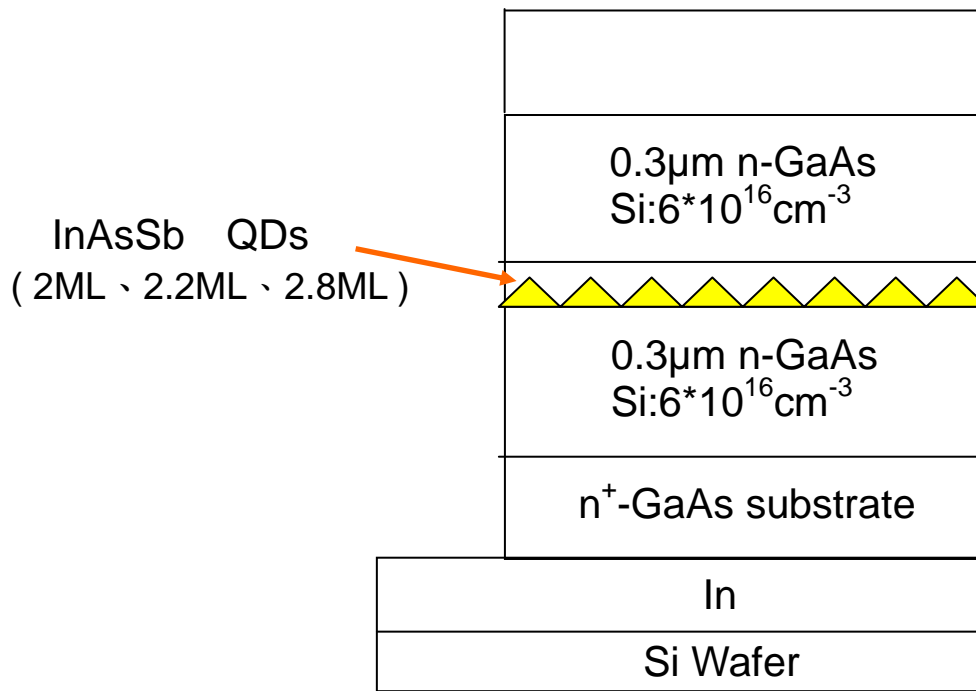
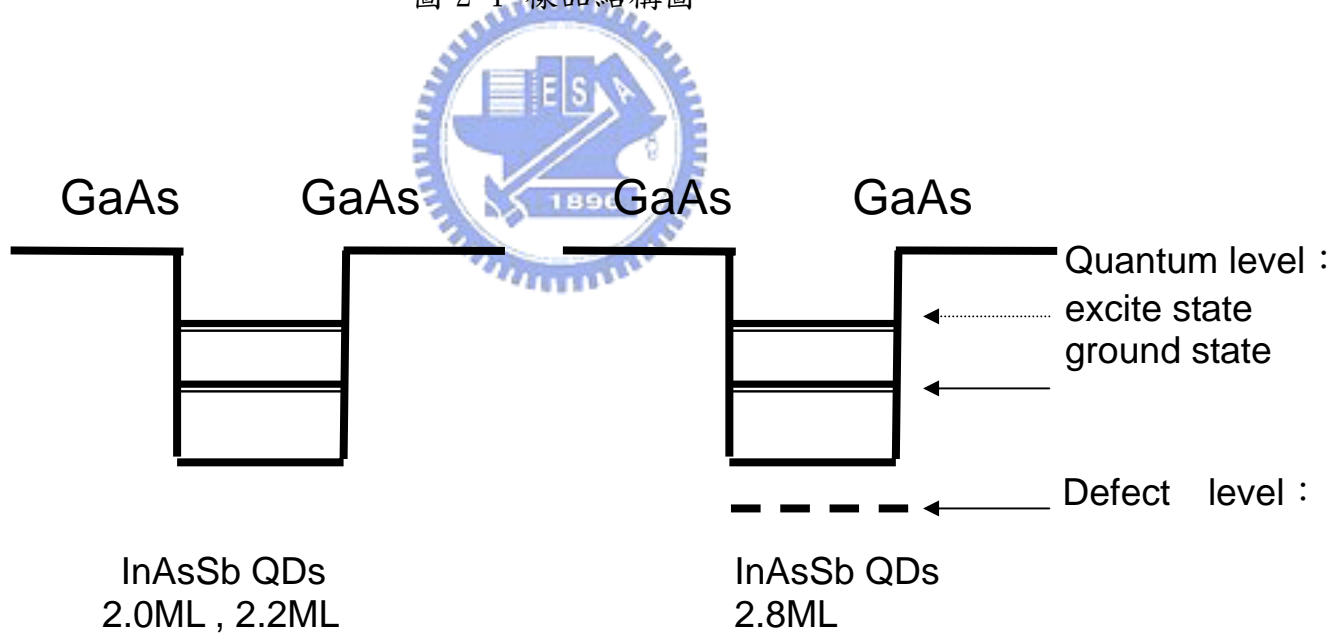


圖 2-1 樣品結構圖



樣品編號	InAsSb
SH454	2ML
SH435	2.2ML
SH438	2.8ML

圖 2-2 樣品能帶圖

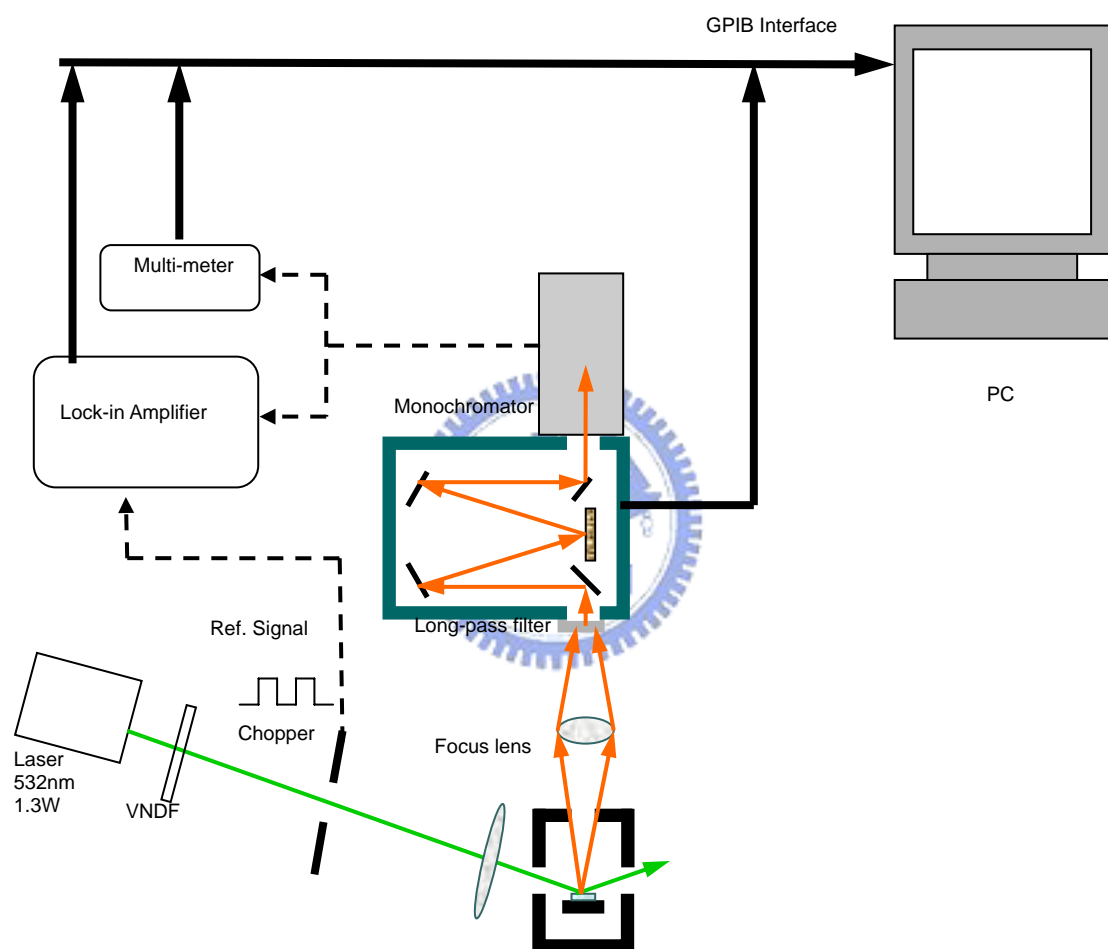


圖 2-3 PL 量測系統架設圖

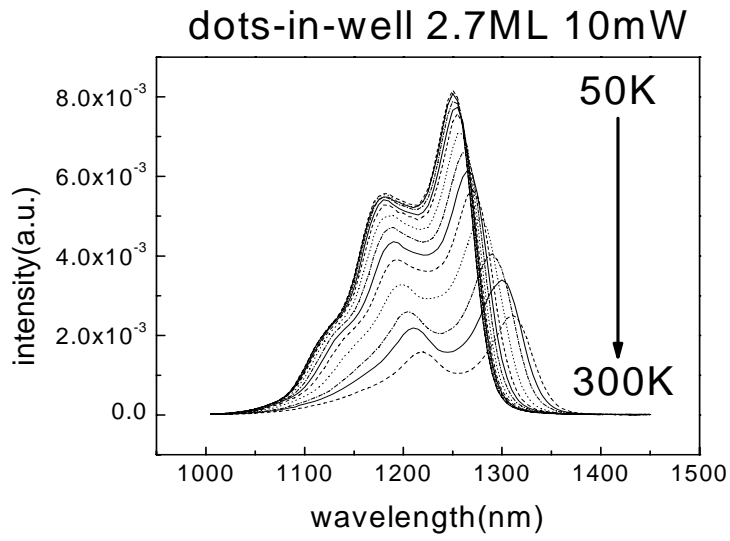


圖3-1(a) 一般dots-in-well量子點-變溫PL圖

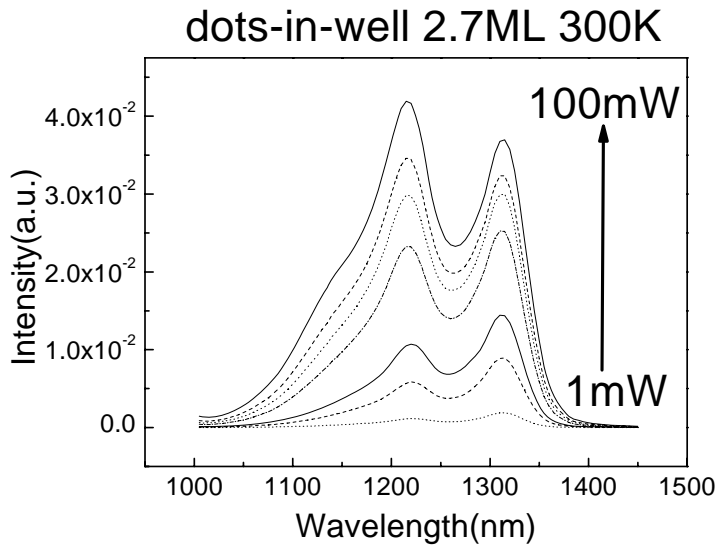


圖3-1(b) 一般dots-in-well量子點-室溫300K變功率PL圖



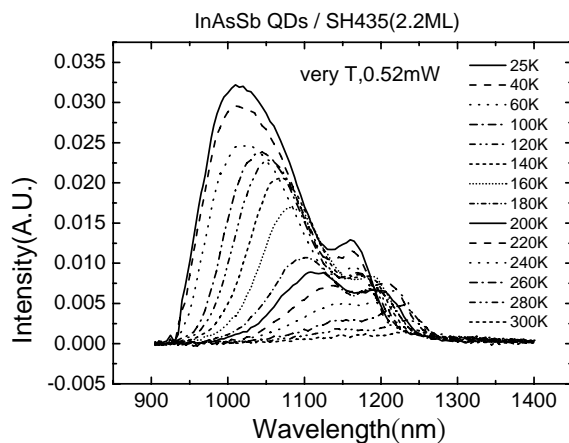


圖3-2 (a) InAsSb(2.2ML) - 變溫PL圖

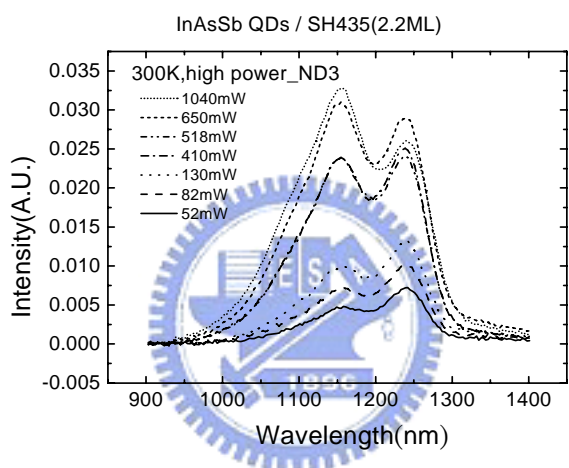


圖3- 2 (b) InAsSb(2.2ML) - 室溫300K變高功率PL圖

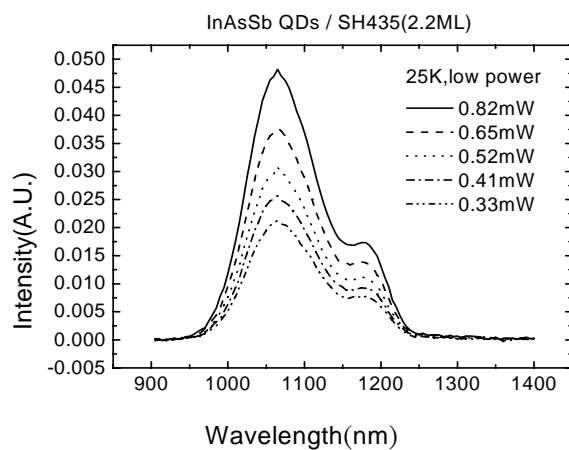


圖3-2 (c) InAsSb(2.2ML) - 低溫20K變功率PL圖

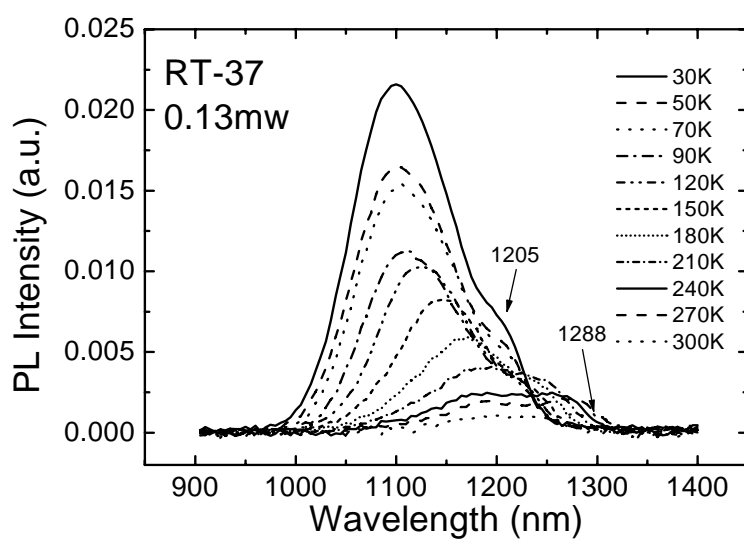


圖3-3 InAsSb(Dots-in-well) - 變溫PL圖

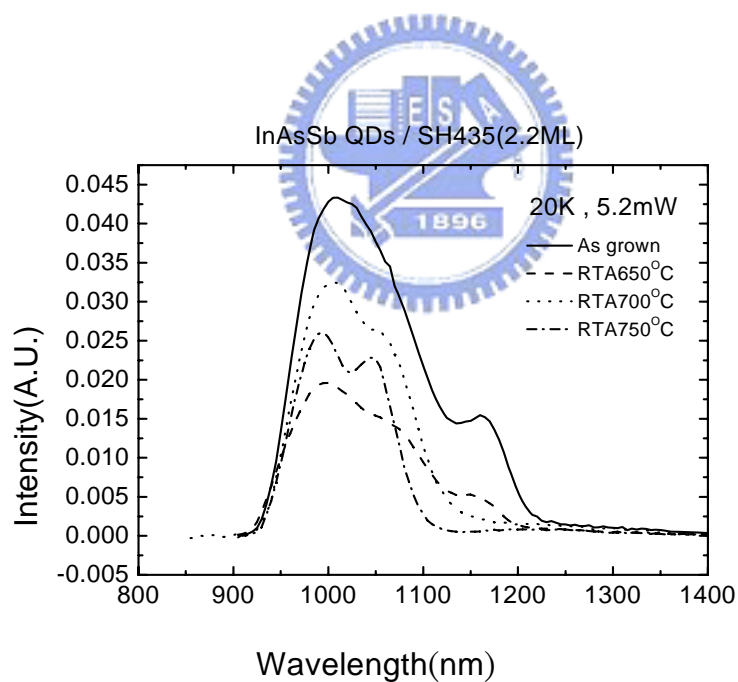


圖3-4 InAsSb(2.2ML)-四片熱退火樣品 - 低溫PL圖

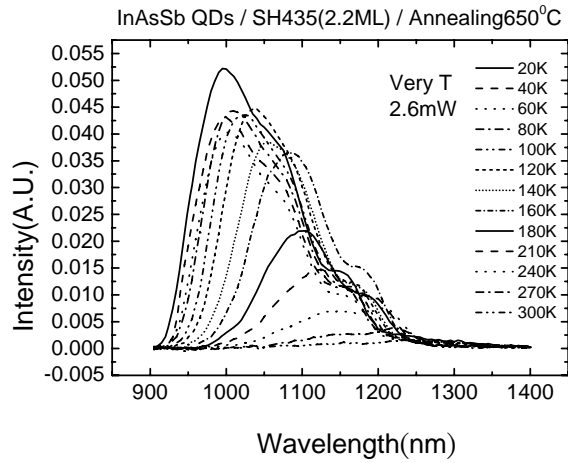


圖3-5(a) InAsSb(2.2ML)-Annealing650°C - 變溫PL圖

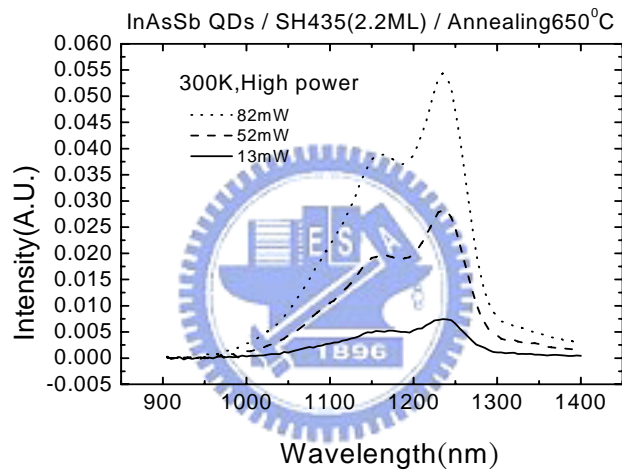


圖3-5(b) InAsSb(2.2ML) -Annealing650°C - 室溫300K變高功率PL圖

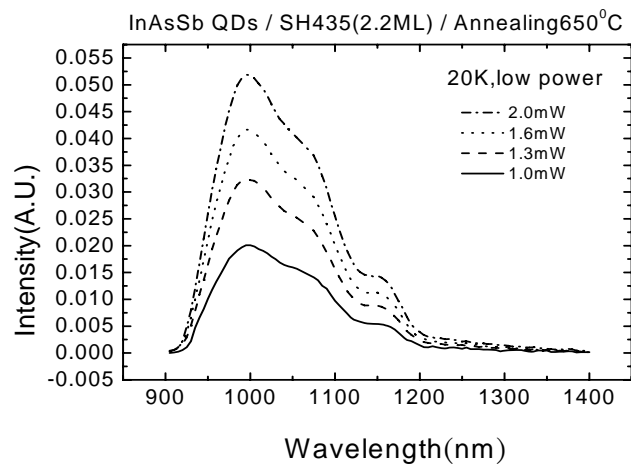


圖3-5(c) InAsSb(2.2ML) -Annealing650°C - 低溫20K變功率PL圖

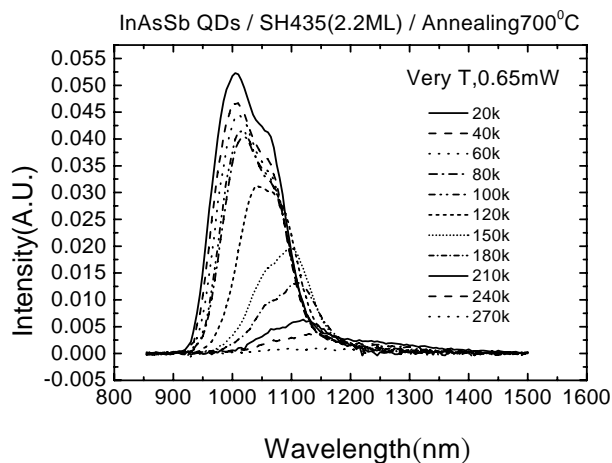


圖3-6(a) InAsSb(2.2ML)-Annealing700°C - 變溫PL圖

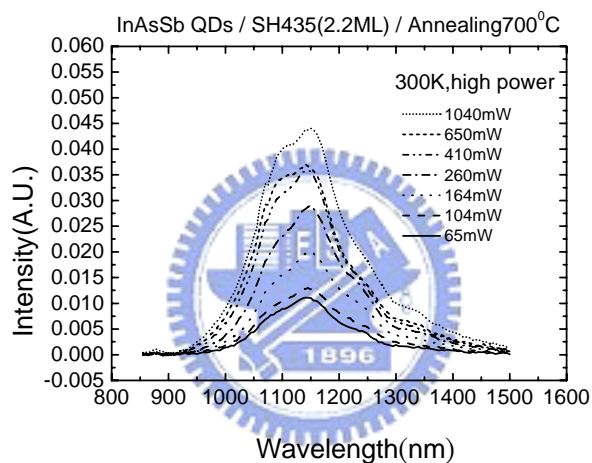


圖3-6(b) InAsSb(2.2ML) -Annealing700°C - 室溫300K變高功率PL圖

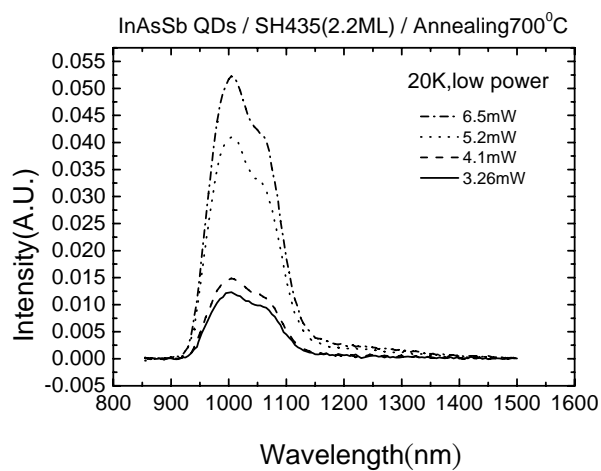


圖3-6(c) InAsSb(2.2ML) -Annealing700°C - 低溫20K變功率PL圖

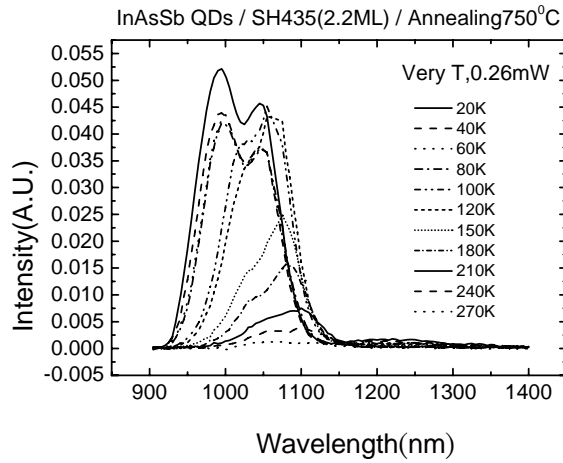


圖3-7(a) InAsSb(2.2ML)-Annealing750°C - 變溫PL圖

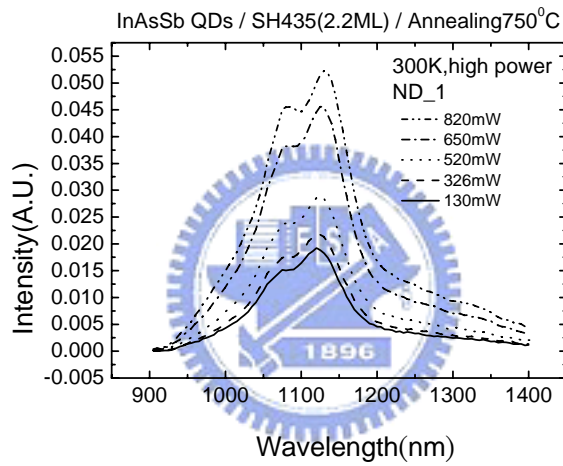


圖3-7(b) InAsSb(2.2ML) -Annealing750°C - 室溫300K變高功率PL圖

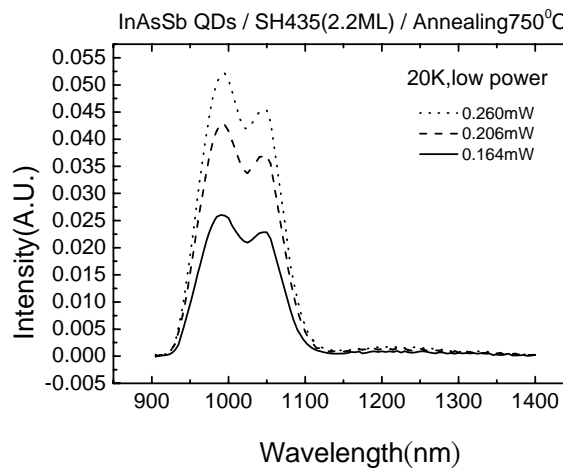


圖3-7(c) InAsSb(2.2ML) -Annealing750°C - 低溫20K變功率PL圖

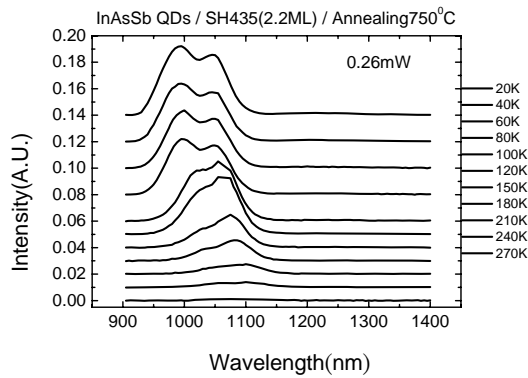
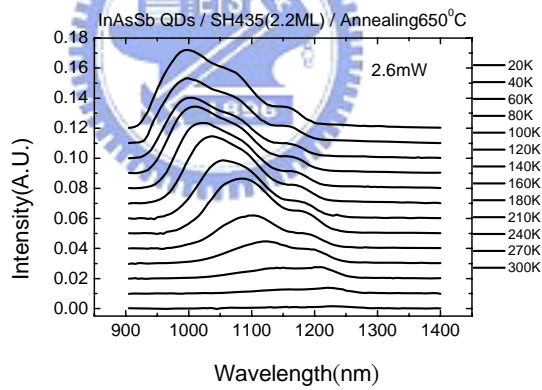
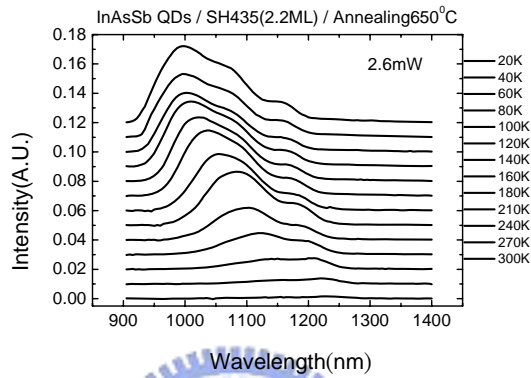
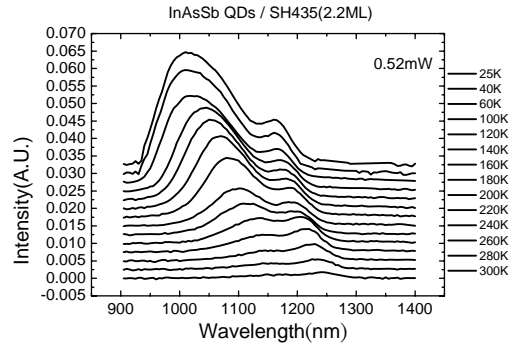


圖 3-8 InAsSb(2.2ML)- (a) as grown (b) RTA650°C (c) RTA700°C (d) RTA750°C

變溫PL圖

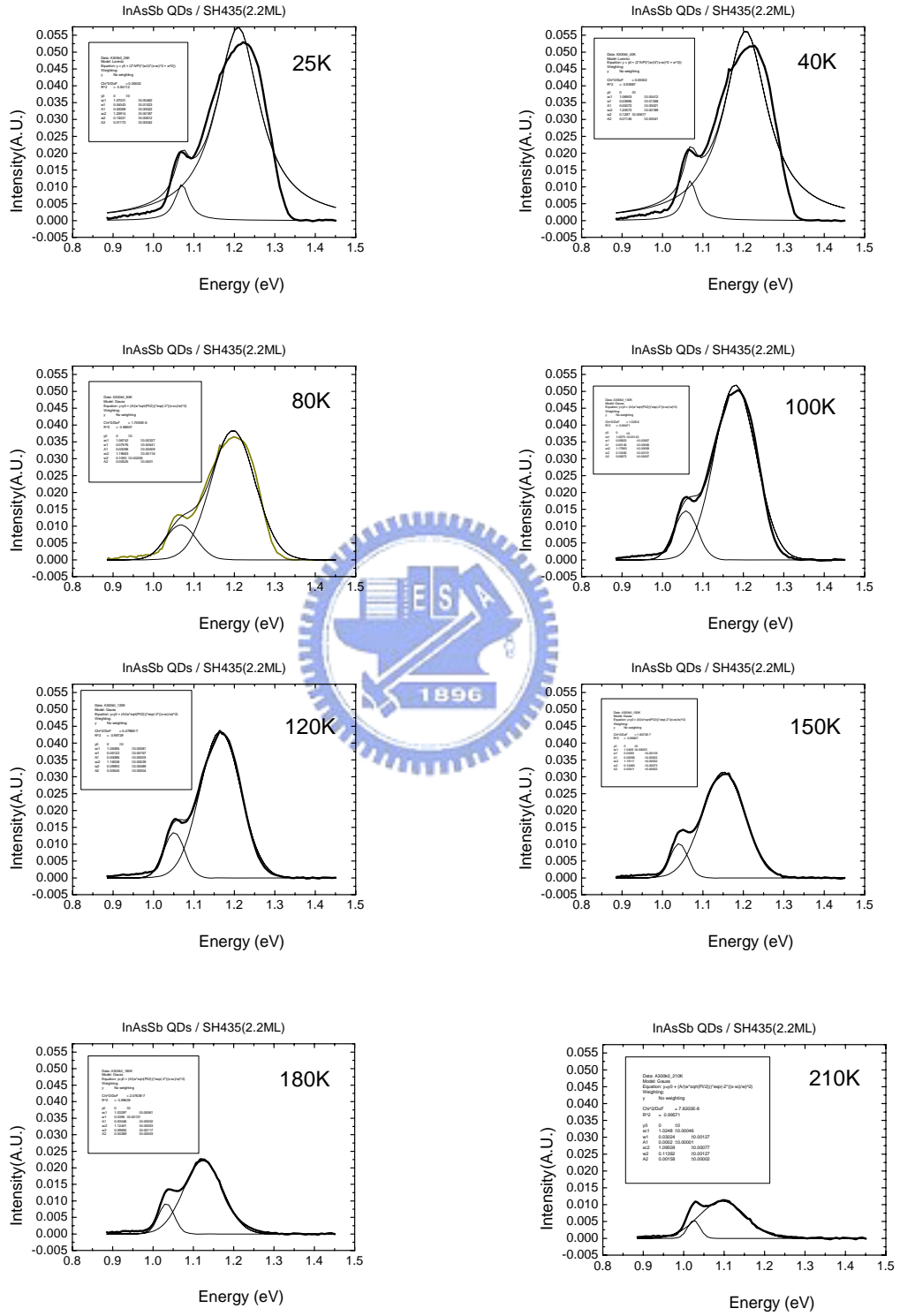


圖 3-9 InAsSb(2.2ML)-as grown ~ Gaussian function 擬合PL圖

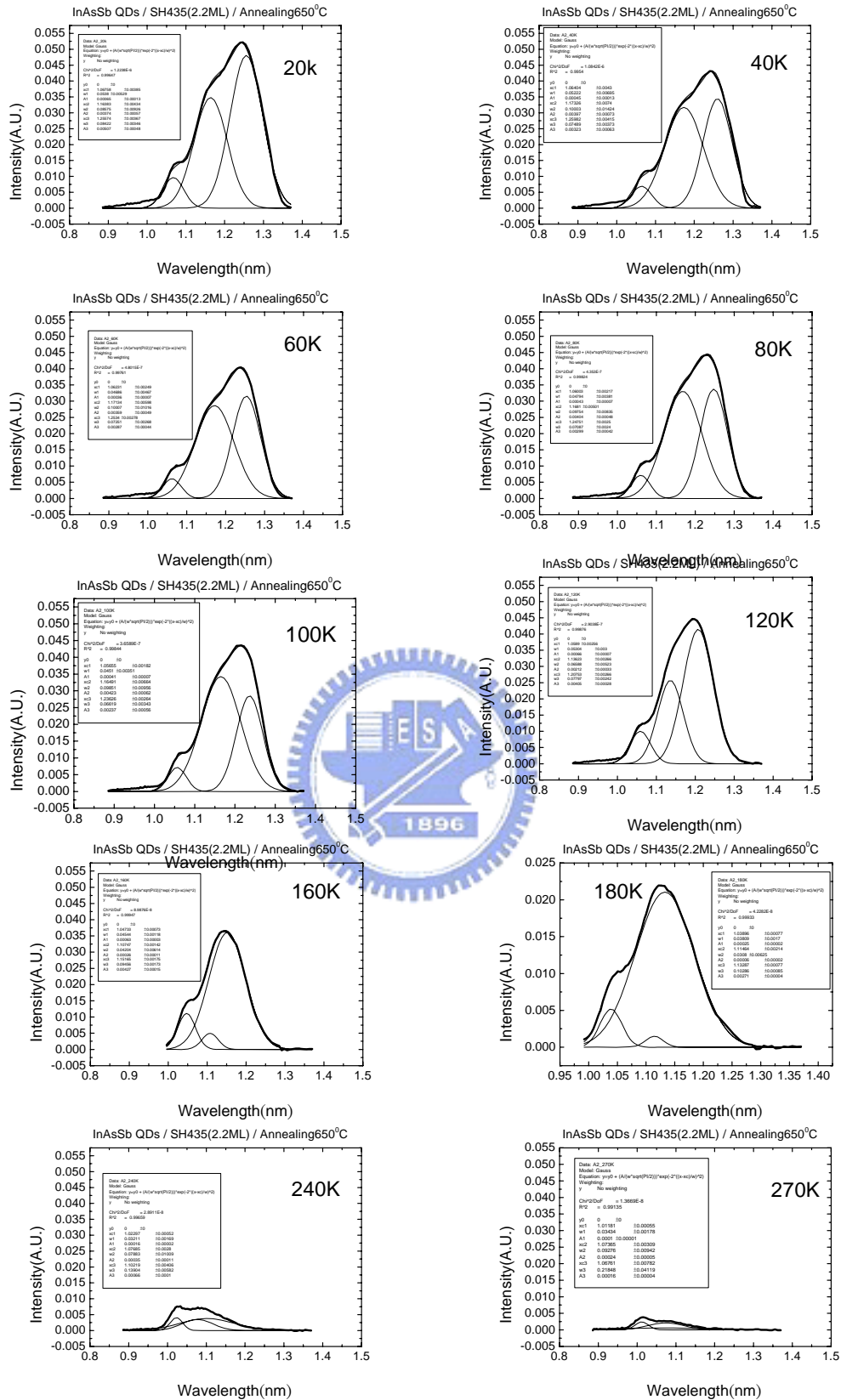


圖3-10 InAsSb(2.2ML)-Annealing 650°C ~ Gaussian function 擬合PL圖



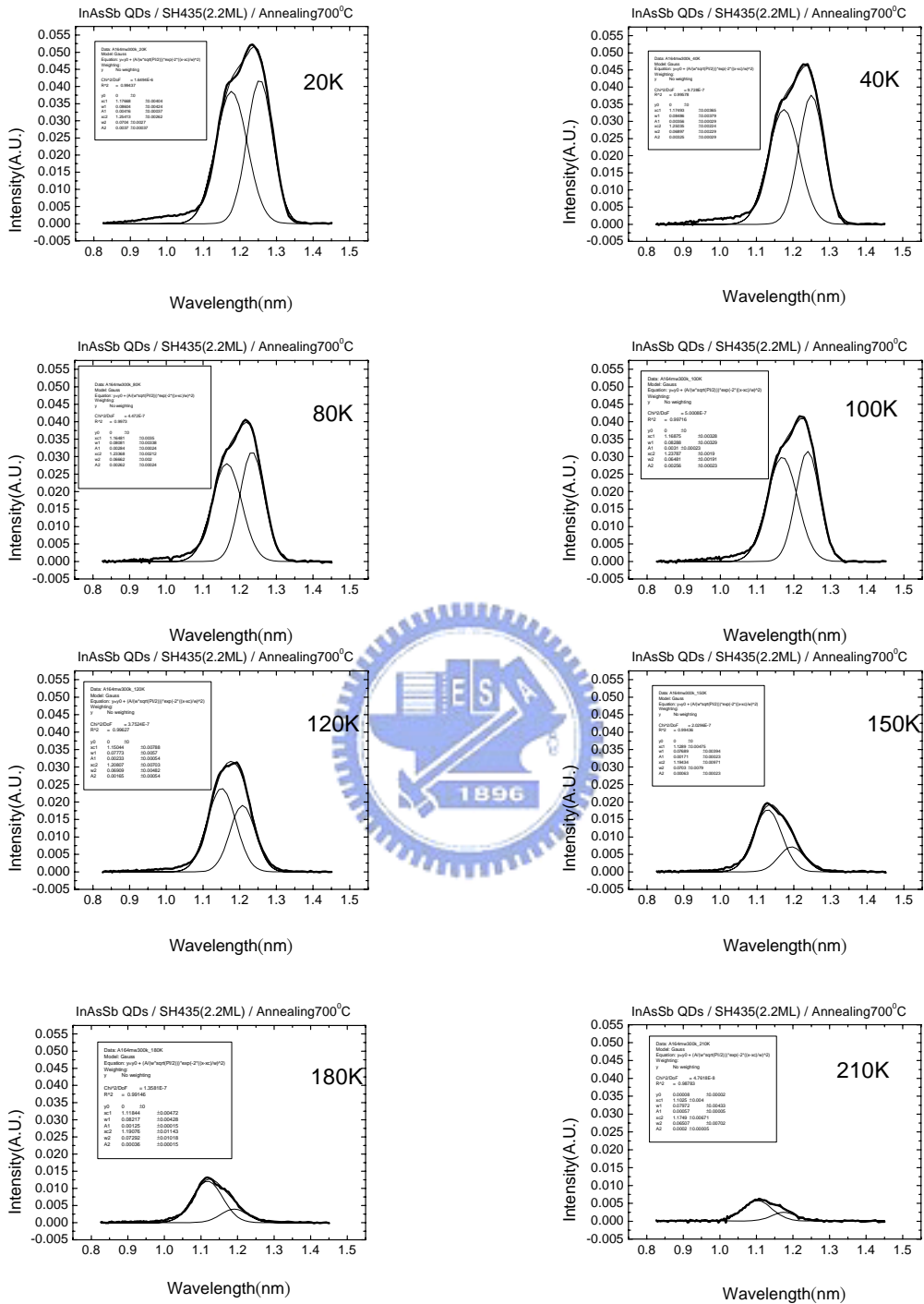


圖3-11 InAsSb(2.2ML)-Annealing 700°C ~ Gaussian function 擬合PL圖

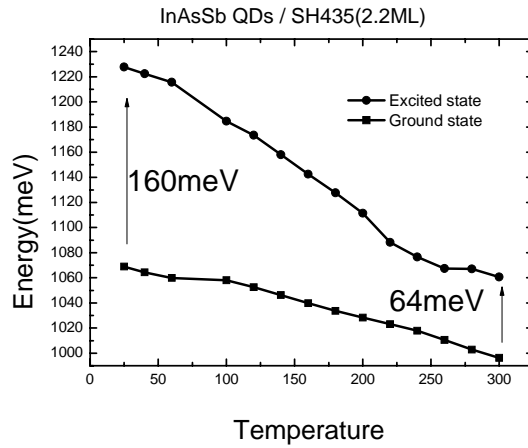


圖3-12(a) InAsSb(2.2ML) - as grown- 能階隨溫度變化圖

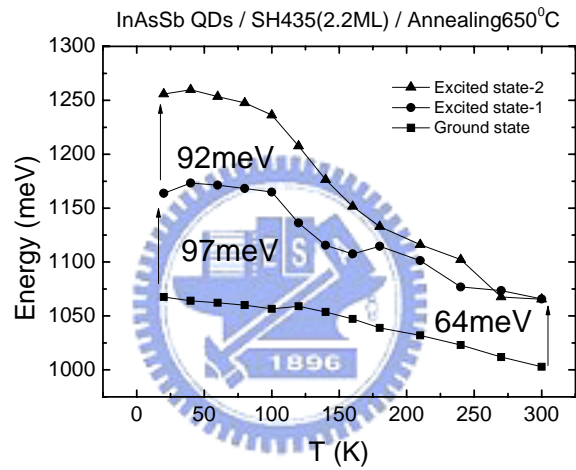


圖3-12(b) InAsSb(2.2ML) - Annealing 650°C-能階隨溫度變化圖

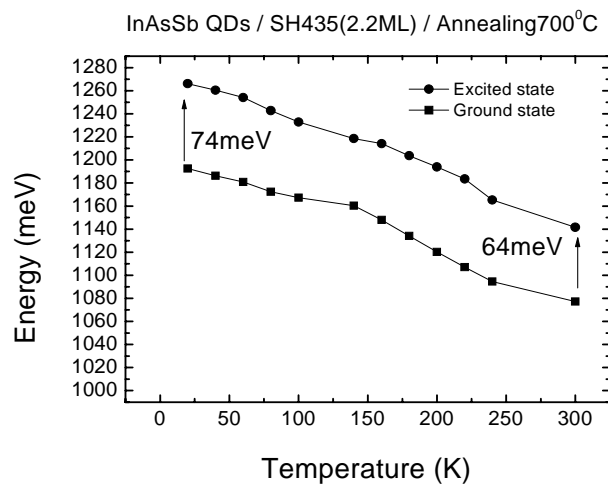


圖3-12(c) InAsSb(2.2ML) - Annealing 700°C-能階隨溫度變化圖

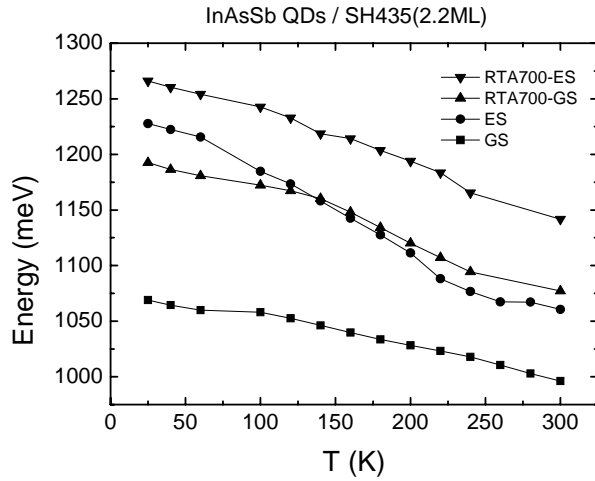


圖3-13 InAsSb(2.2ML) - As grown 和 Annealing 700°C能階隨溫度變化圖

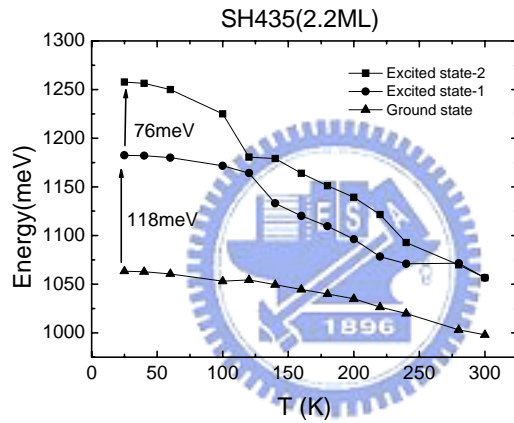


圖3-14(a) InAsSb(2.2ML) - As grown- three peak 擬合圖

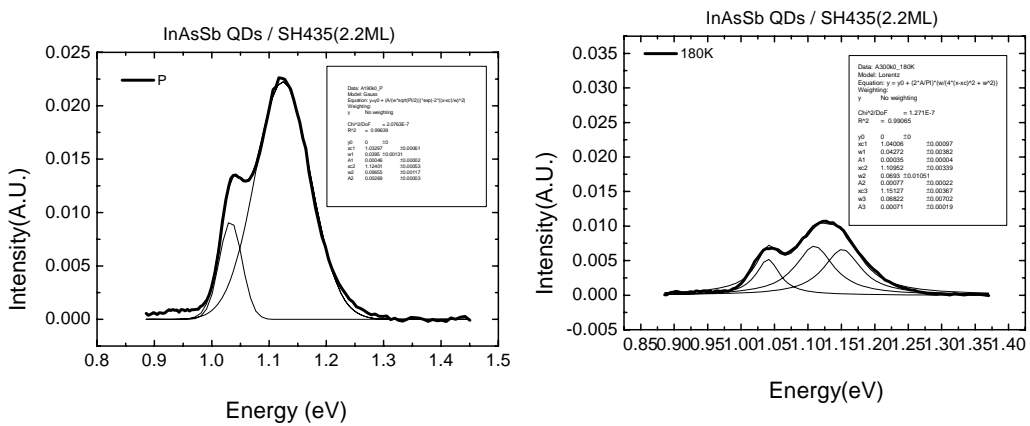


圖3-14(b) InAsSb(2.2ML) - As grown- two peak & three peak 擬合圖

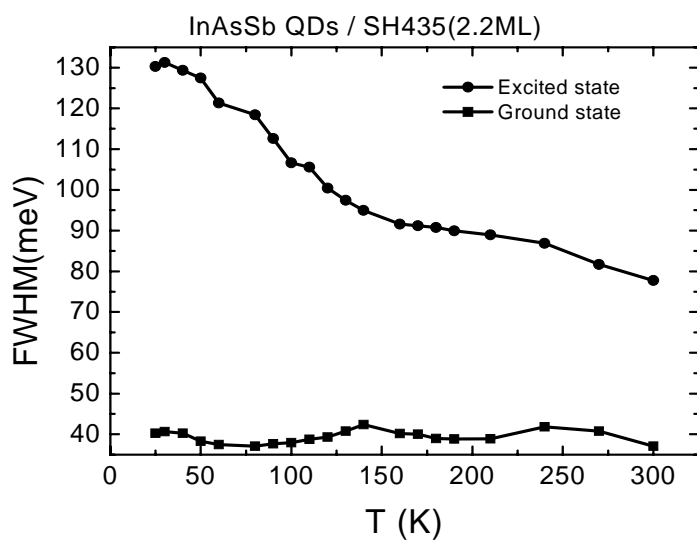


圖3-15(a) InAsSb(2.2ML) - as grown - 半高寬隨溫度變化圖

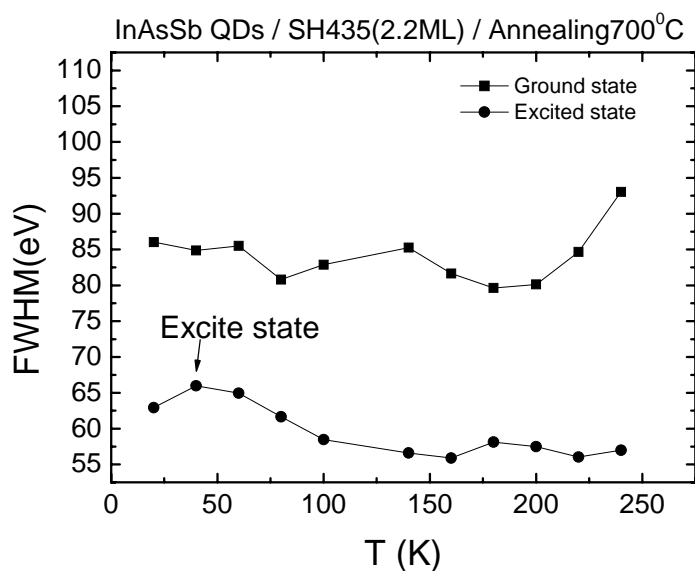


圖3-15(b) InAsSb(2.2ML) - Annealing 700°C - 半高寬隨溫度變化圖

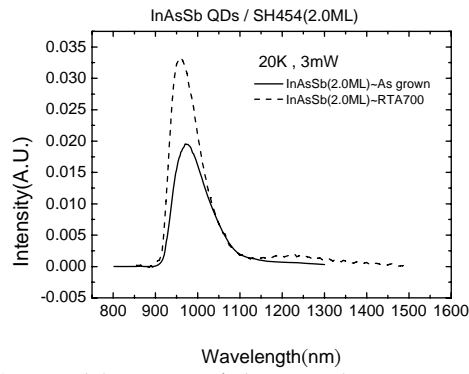


圖3-16(a) InAsSb(2.0ML) - 低溫PL圖

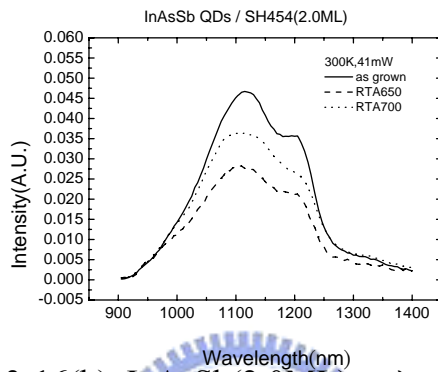


圖3-16(b) InAsSb(2.0ML) - 室溫PL圖

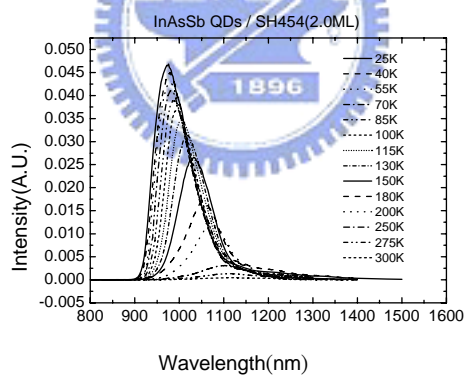


圖3-17(a) InAsSb(2.0ML) - as grown-變溫PL圖

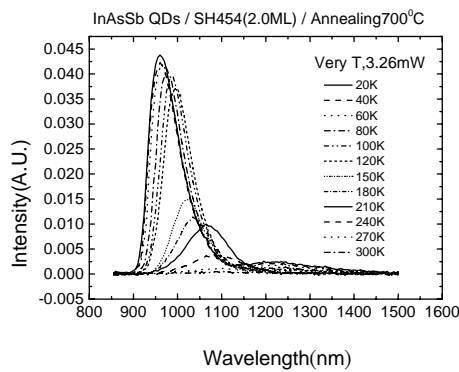


圖3-17(b) InAsSb(2.0ML) - Annealing700°C -變溫PL圖

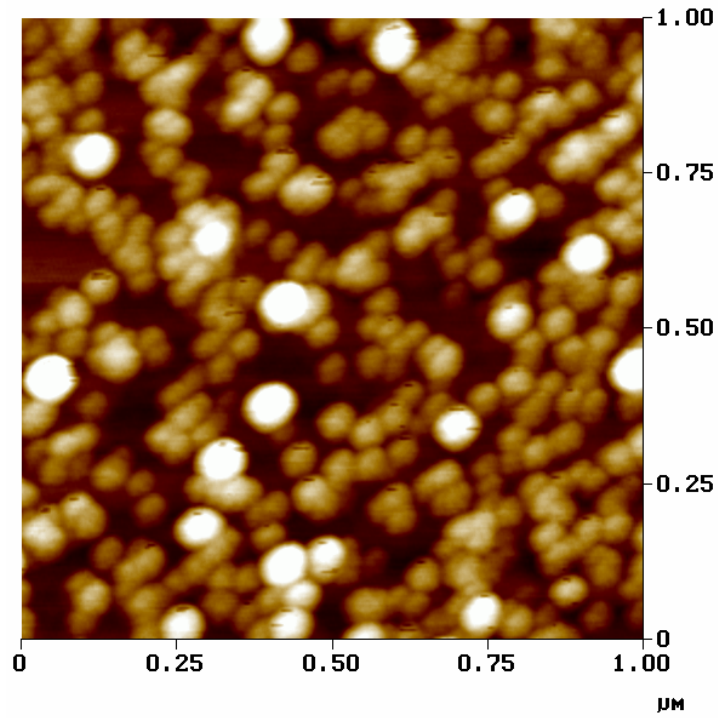
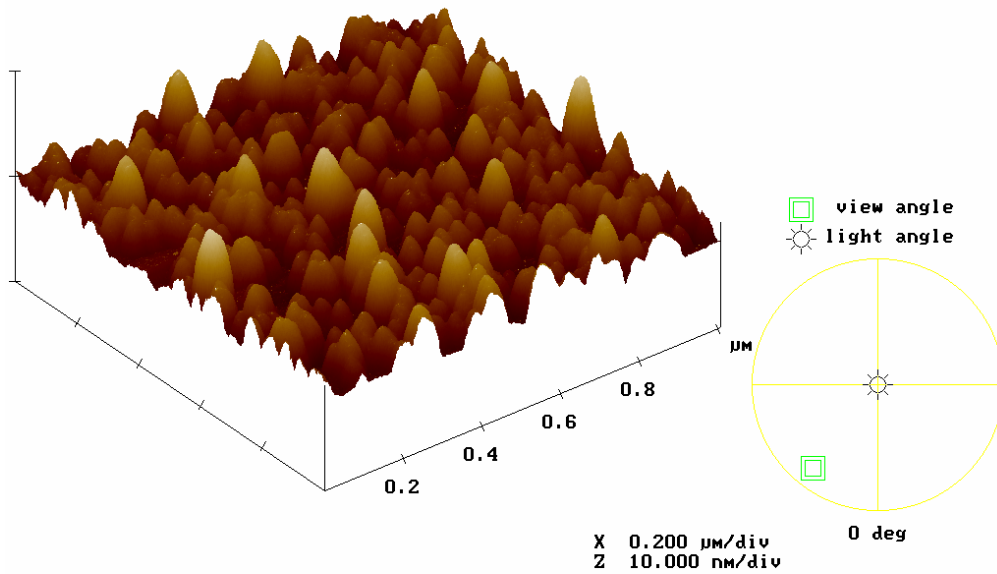


圖3-18(a) InAsSb(2.2ML)-AFM平面圖



Digital Instruments NanoScope  
 Scan size 1.000 μm  
 Scan rate 0.5991 Hz  
 Number of samples 256  
 Image Data Height  
 Data scale 10.00 nm



g040512.010

圖3-18(b) InAsSb(2.2ML)-AFM3D圖

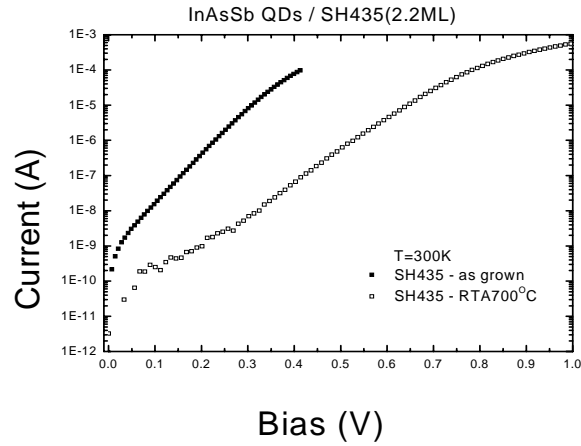


圖3-19 InAsSb(2.2ML) - as grown和Annealing700°C - 室溫IV圖

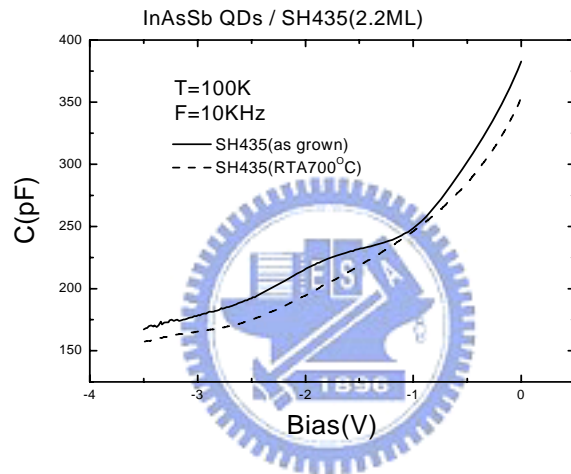


圖3-20(a) InAsSb(2.2ML) - as grown和Annealing700°C - 低溫CV圖

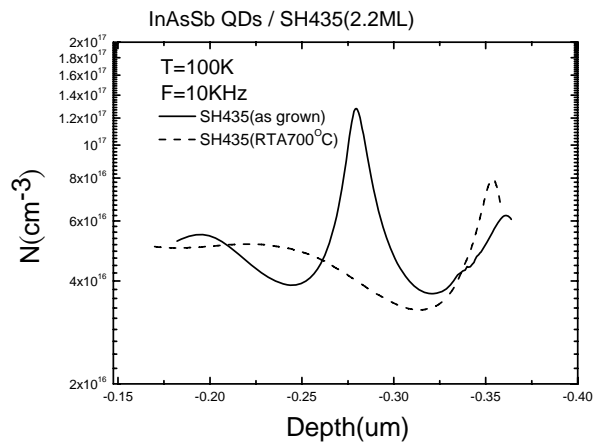


圖3-20(b) InAsSb(2.2ML) - as grown和Annealing700°C  
- 低溫CV轉縱深圖

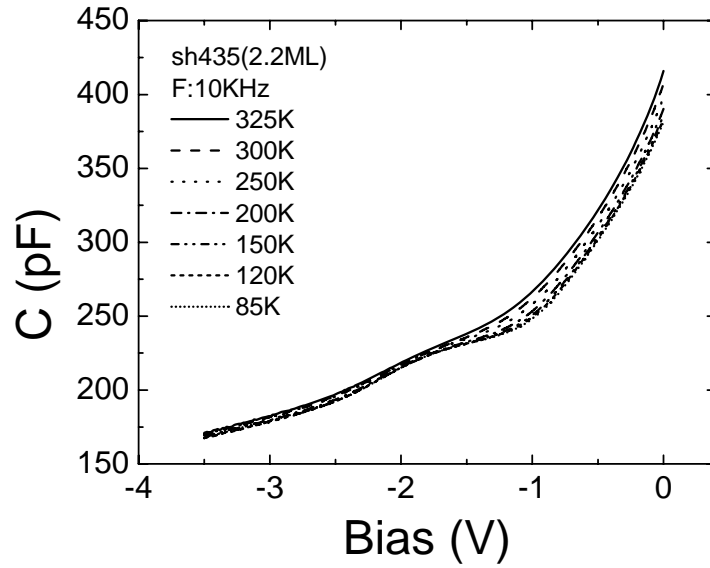


圖3-21(a) InAsSb(2.2ML) - as grown - 變溫CV圖

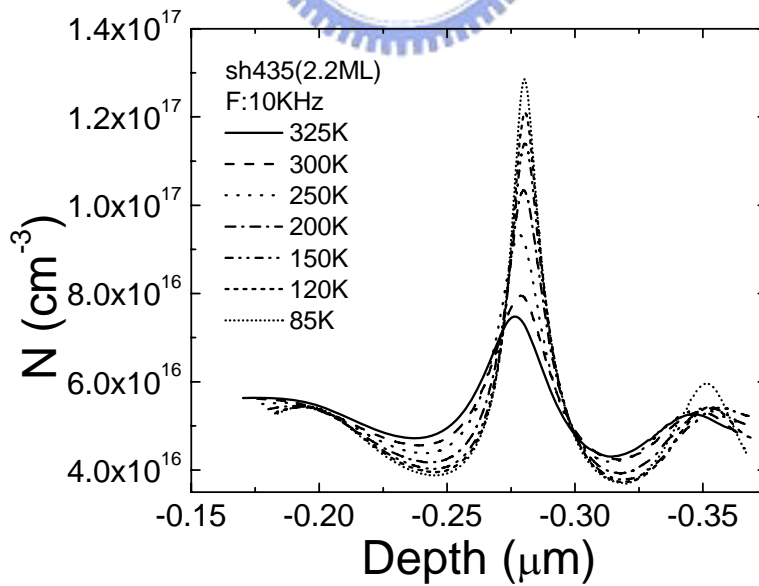


圖3-21(b) InAsSb(2.2ML) - as grown - 變溫CV轉縱深圖



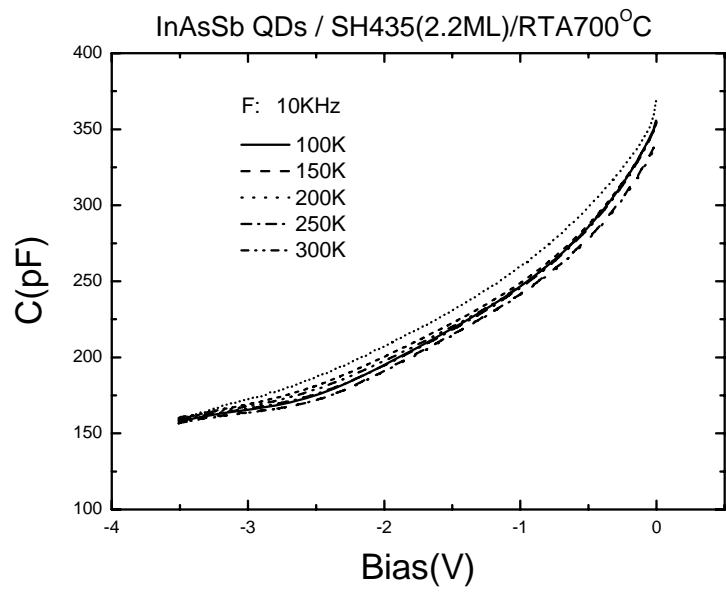


圖3-22(a) InAsSb(2.2ML) - Annealing700°C - 變溫CV圖

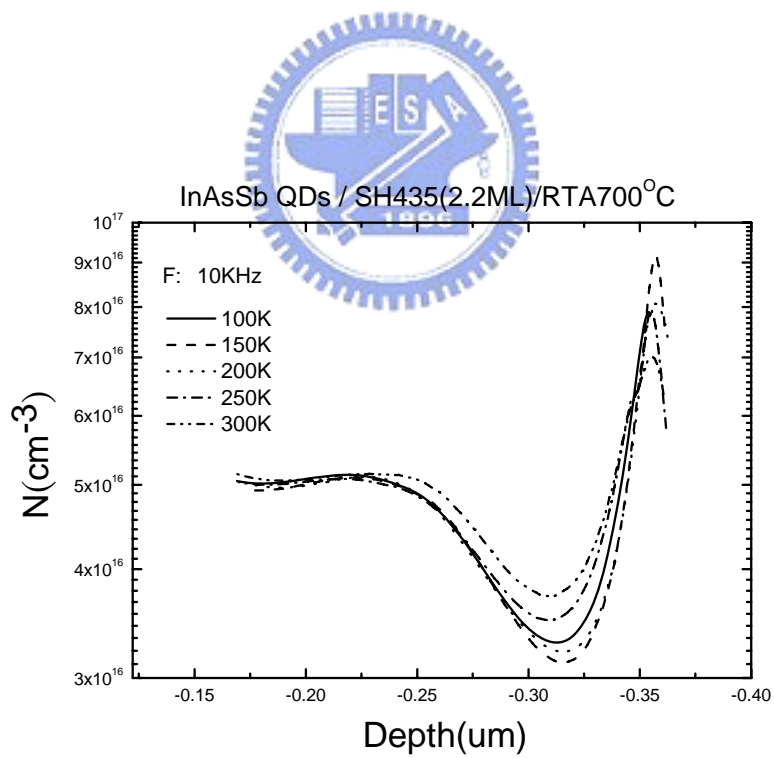


圖3-22(b) InAsSb(2.2ML) - Annealing700°C - 變溫CV轉縱深圖

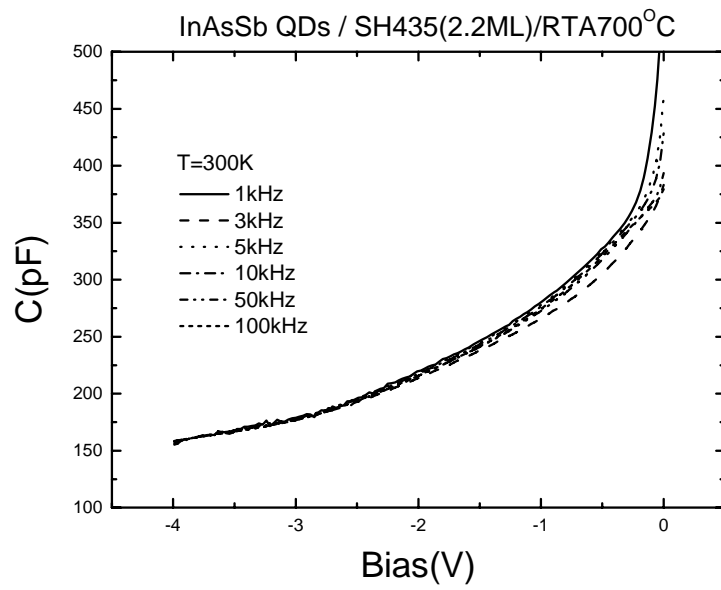


圖3-23(a) InAsSb(2.2ML) - Annealing700°C - 室溫CV圖

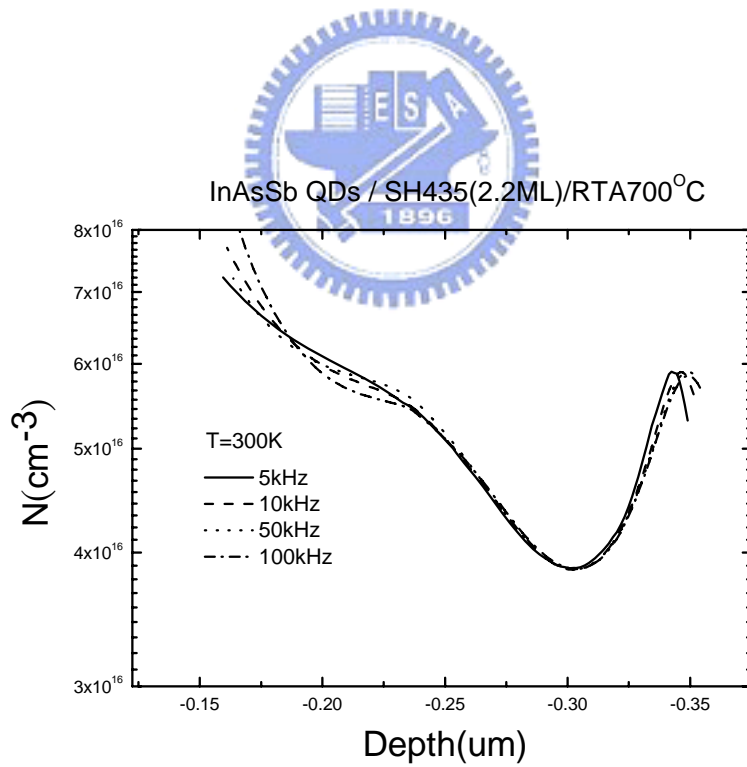


圖3-23(b) InAsSb(2.2ML) - Annealing700°C - 室溫CV轉縱深圖

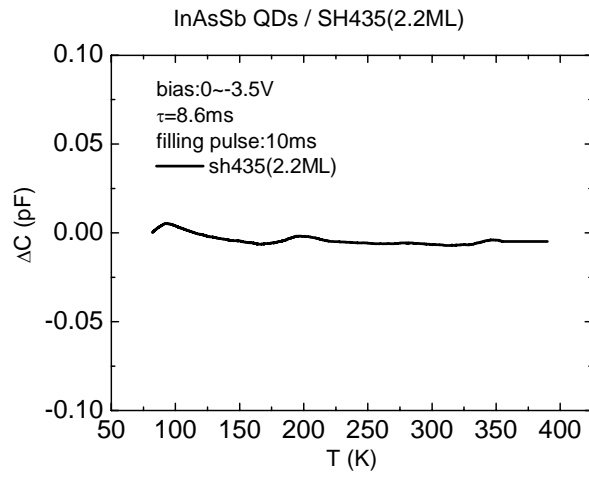


圖3-24(a) InAsSb(2.2ML)- As grown -大偏壓範圍下之DLTS圖

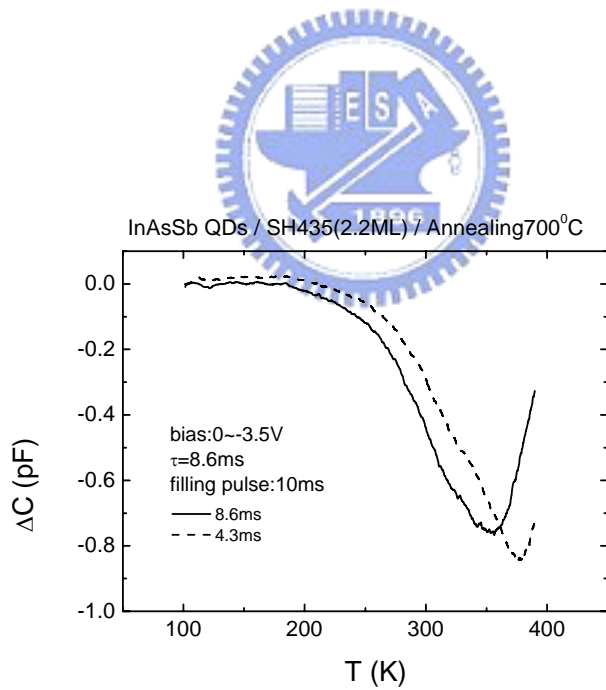


圖3-24(b) InAsSb(2.2ML)- Annealing 700°C -大偏壓範圍下之DLTS圖

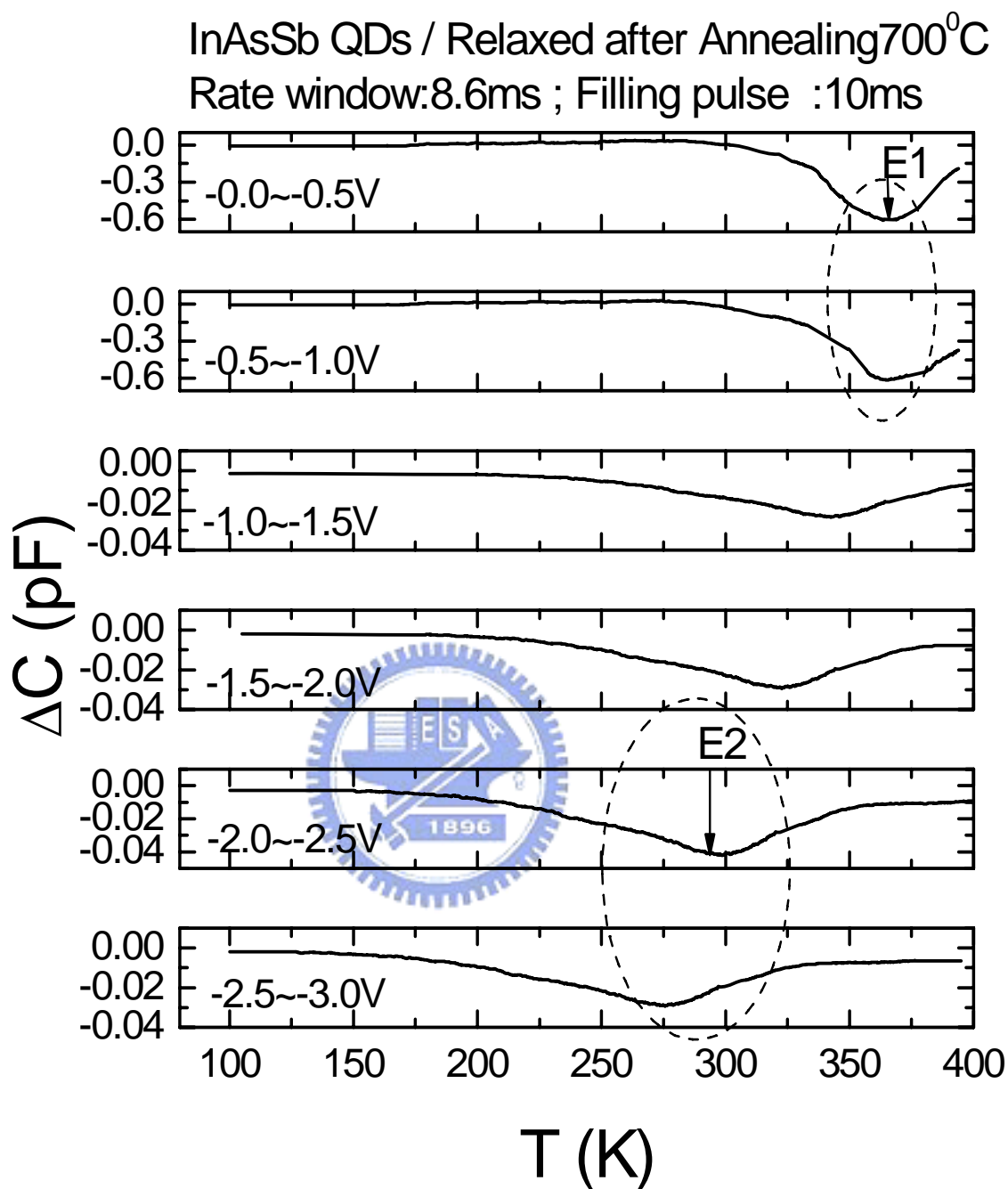


圖3-25 InAsSb(2.2ML)- Annealing 700°C - 各偏壓範圍下之DLTS圖

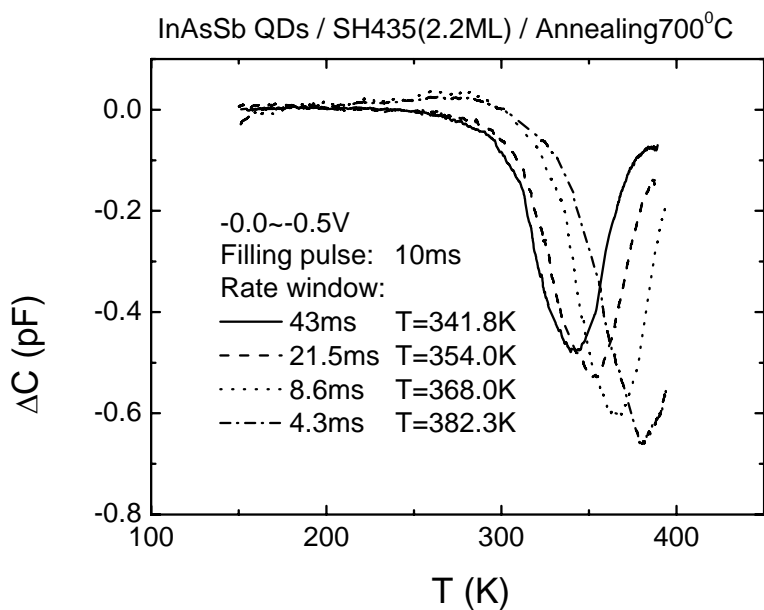


圖3-26(a) InAsSb(2.2ML)- Annealing 700°C -E1 缺陷各速度視窗下之DLTS圖

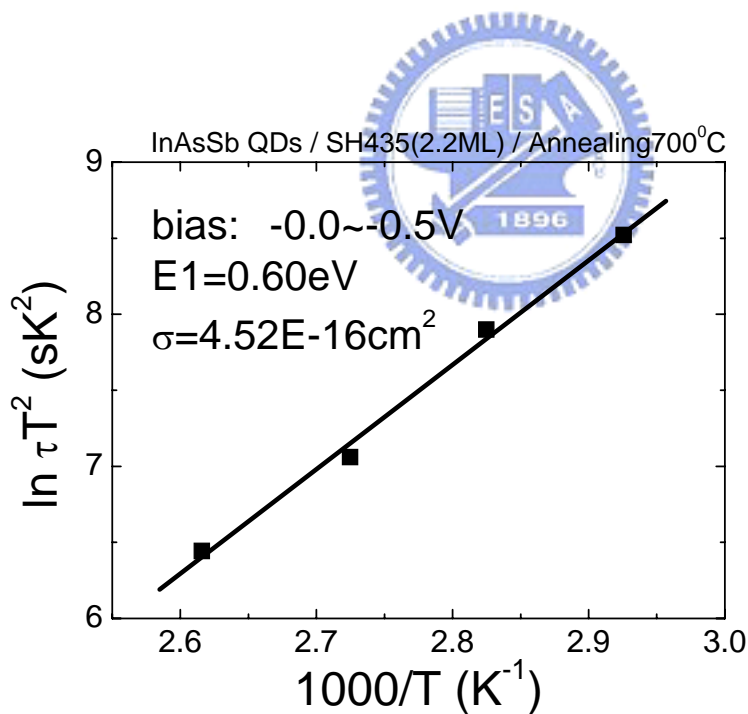


圖3-26(b) InAsSb(2.2ML)- Annealing 700°C - E1 缺陷之Arrhenius plot

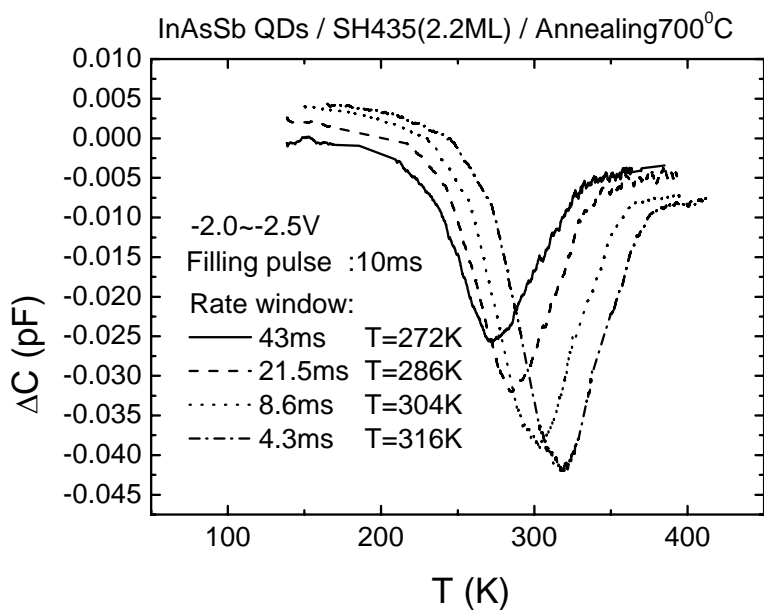


圖3-27(a) InAsSb(2.2ML)- Annealing700°C -E2缺陷各速度視窗下之DLTS圖

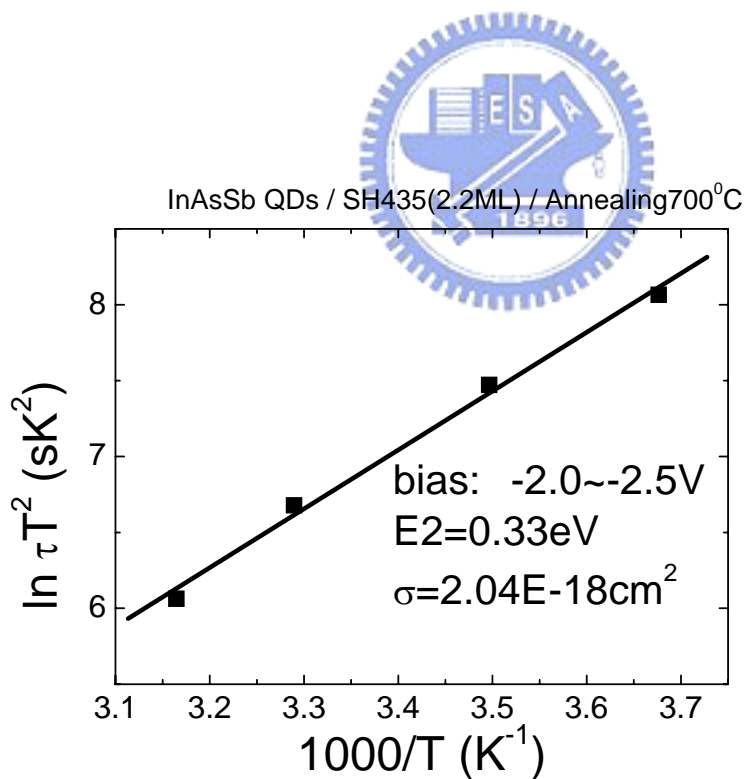


圖3-27(b) InAsSb(2.2ML)- Annealing700°C - E2缺陷之Arrhenius plot

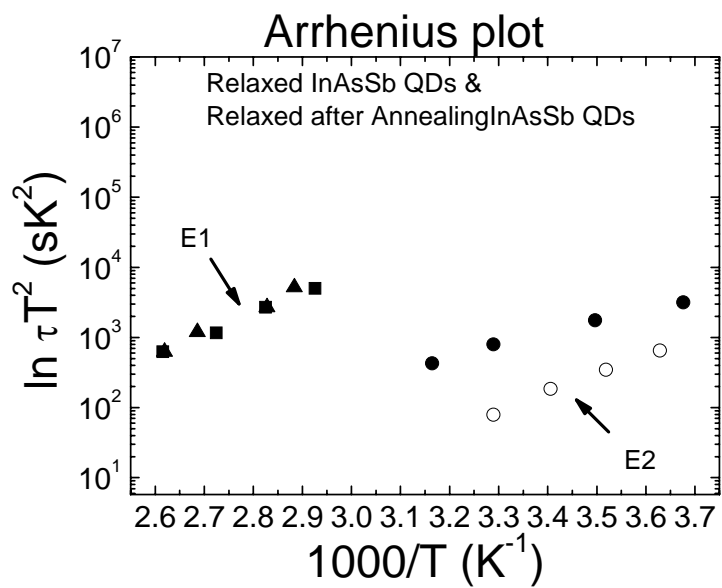


圖3-28(a) Relaxed after annealing InAsSb 與 Relaxed InAsSb QDS  
~E1與E2缺陷之Arrhenius plot比較

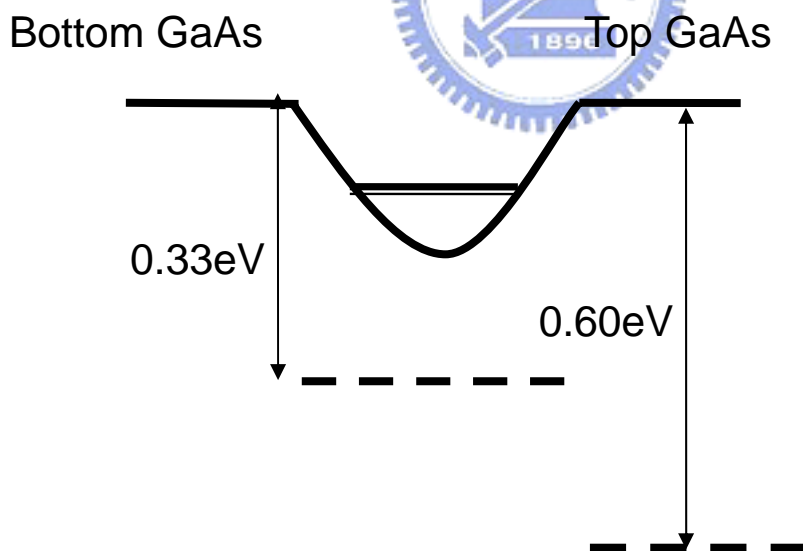


圖3-28(b) Relaxed after annealing InAsSb 能帶圖

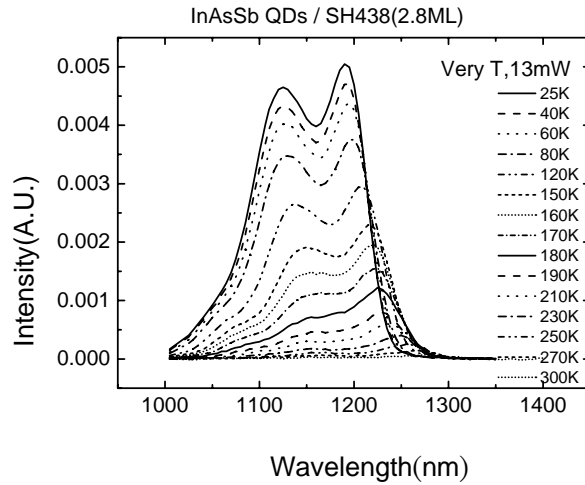


圖4-1 (a) Relaxed InAsSb-as grown – 變溫PL圖

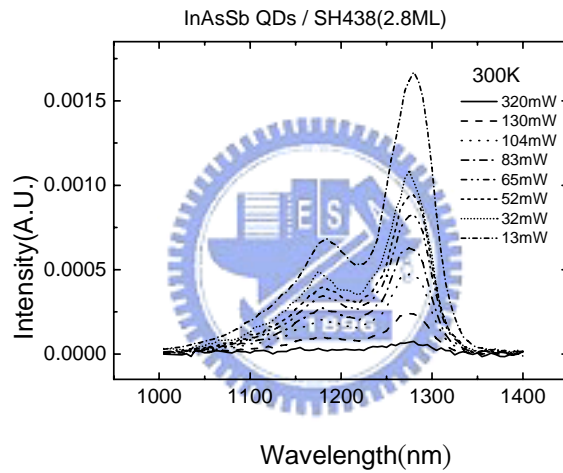


圖4-1 (b) Relaxed InAsSb-as grown – 室溫PL圖

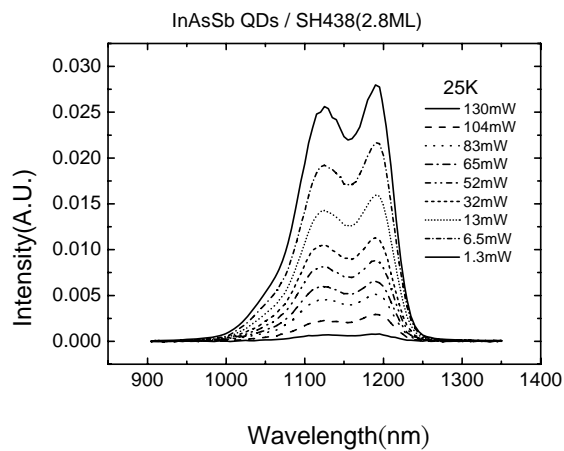


圖4-1 (c) Relaxed InAsSb-as grown – 低溫PL圖



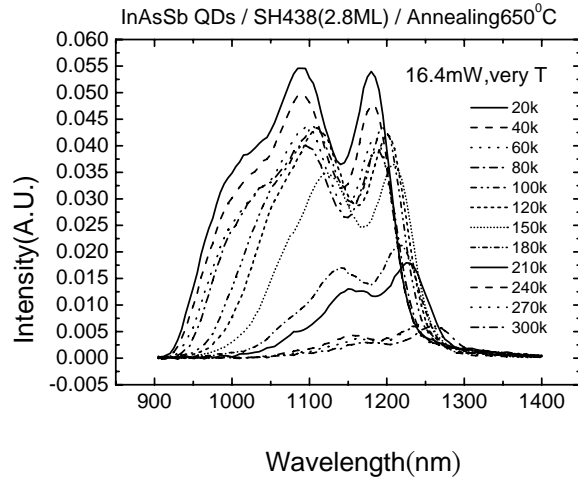


圖4-2 (a) Relaxed InAsSb-Annealing 650°C - 變溫PL圖

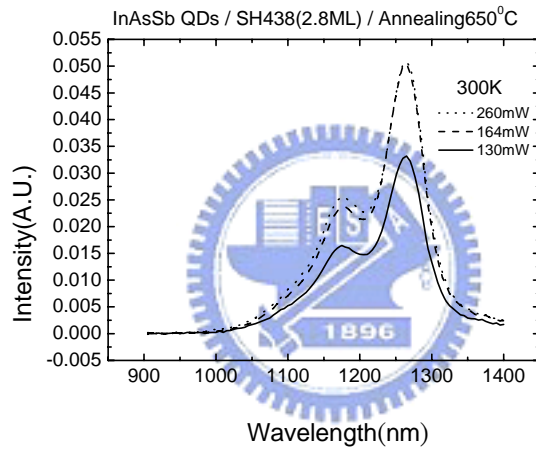


圖4-2 (b) Relaxed InAsSb-Annealing 650°C - 室溫PL圖

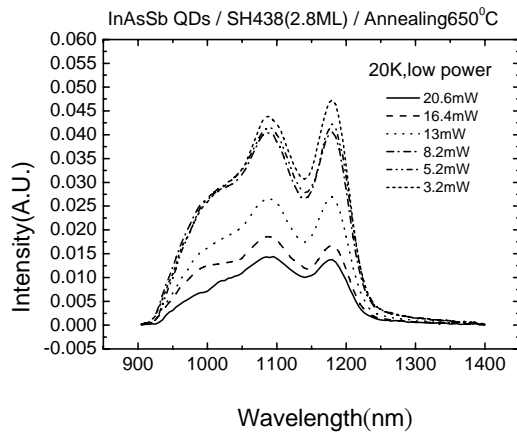


圖4-2 (c) Relaxed InAsSb-Annealing 650°C - 低溫PL圖

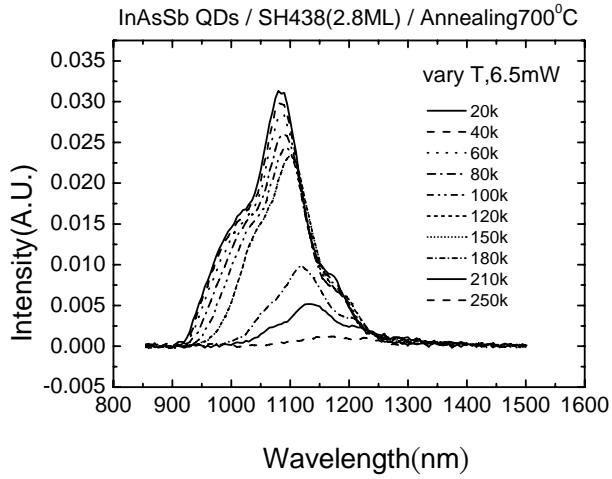


圖4-3 (a) Relaxed InAsSb-Annealing700<sup>0</sup>C - 變溫PL圖

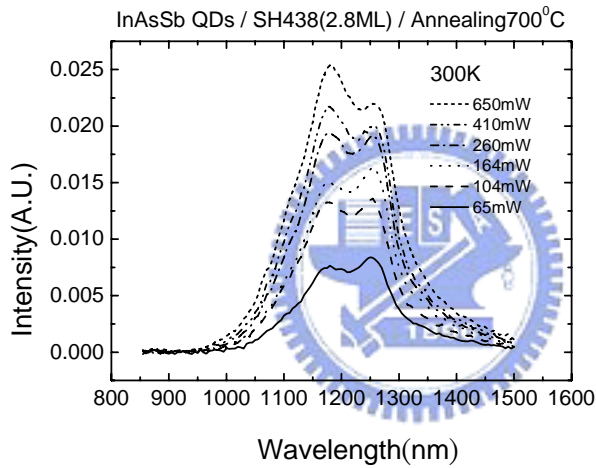


圖4-3 (b) Relaxed InAsSb-Annealing700<sup>0</sup>C - 室溫PL圖

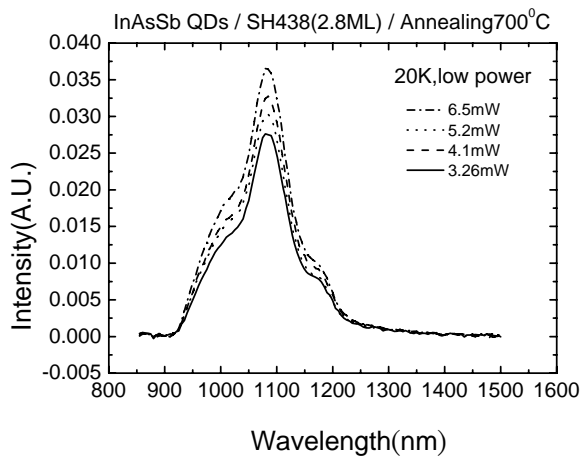


圖4-3 (c) Relaxed InAsSb-Annealing700<sup>0</sup>C - 低溫PL圖

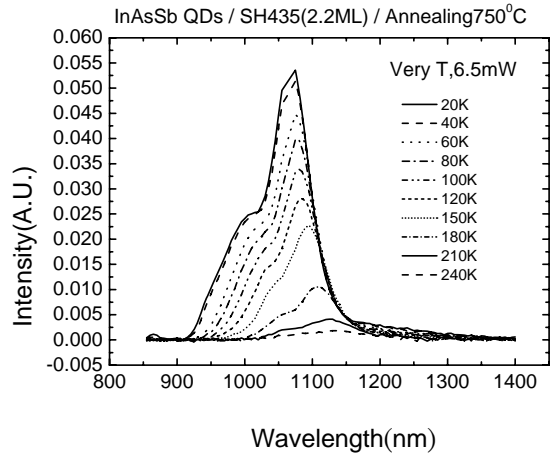


圖4-4 (a) Relaxed InAsSb-Annealing750°C - 變溫PL圖

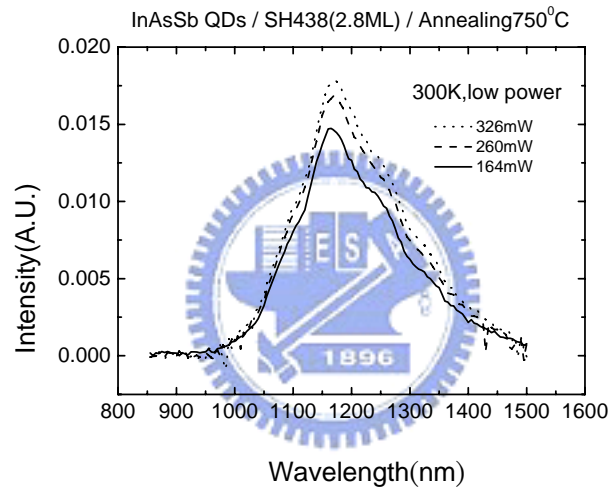


圖4-4 (b) Relaxed InAsSb-Annealing750°C - 室溫PL圖

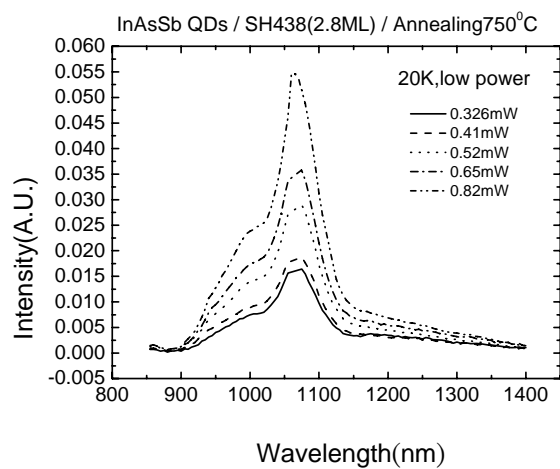


圖4-4 (c) Relaxed InAsSb-Annealing750°C - 低溫PL圖

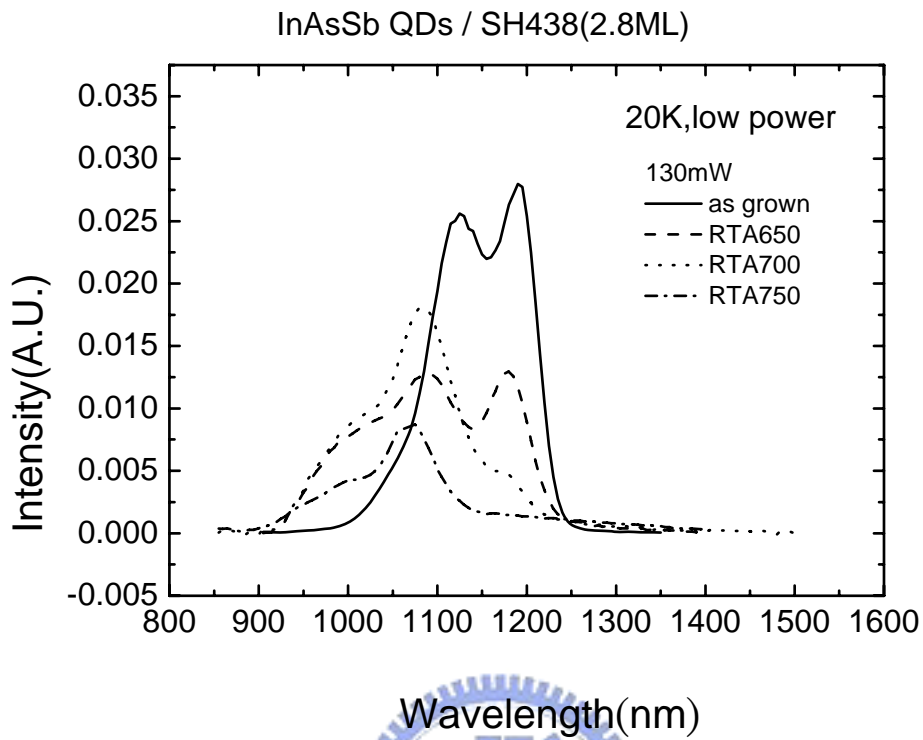


圖4-5 Relaxed InAsSb -四片熱退火樣品 - 低溫PL圖

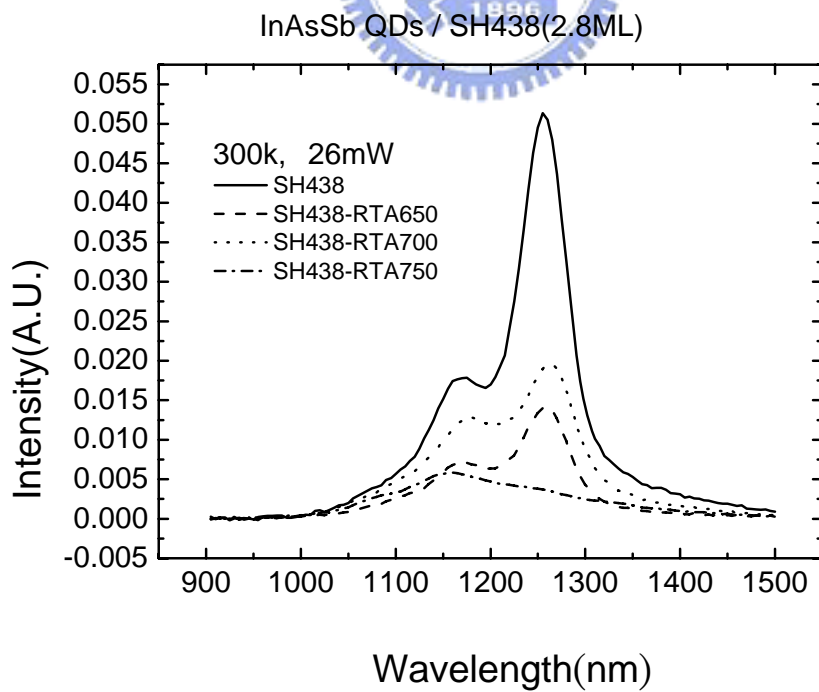


圖4-6 Relaxed InAsSb -四片熱退火樣品 - 室溫PL圖

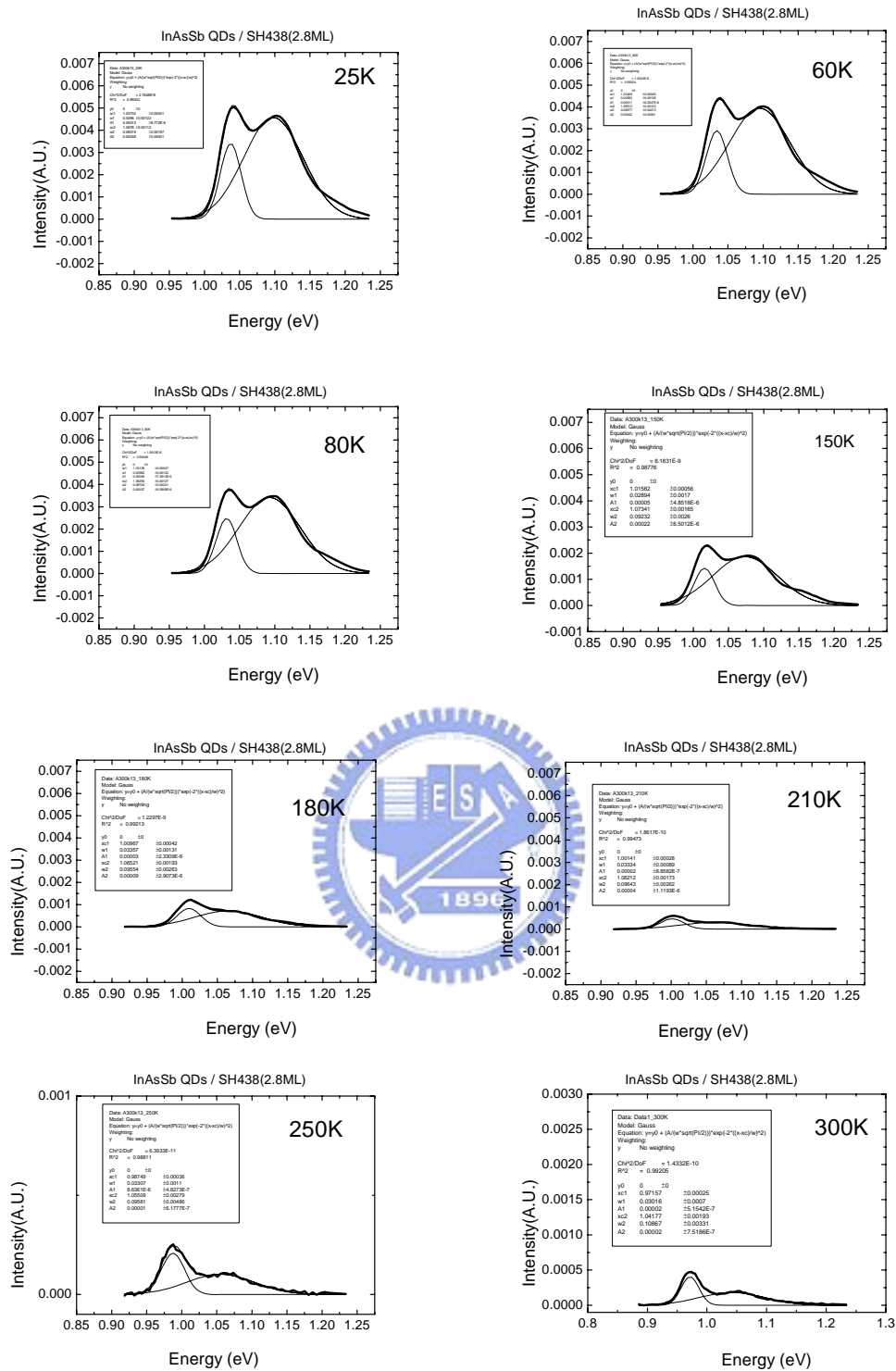


圖4-7 Relaxed InAsSb -as grown ~ Gaussian function 擬合

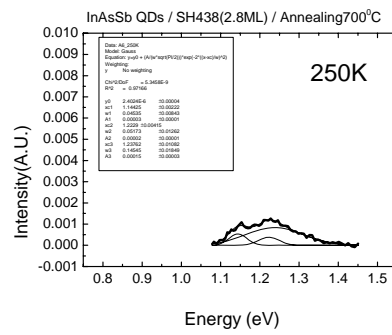
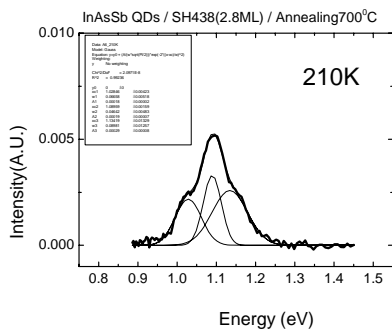
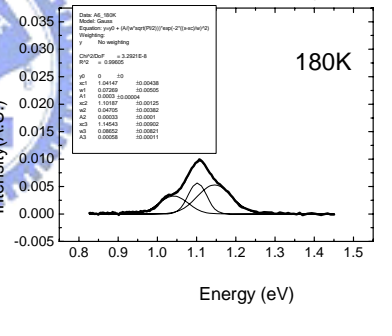
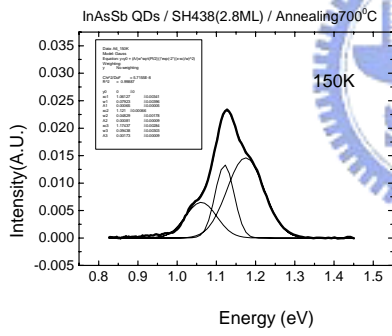
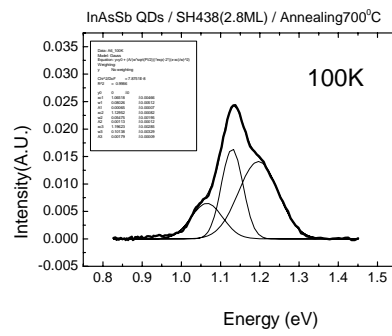
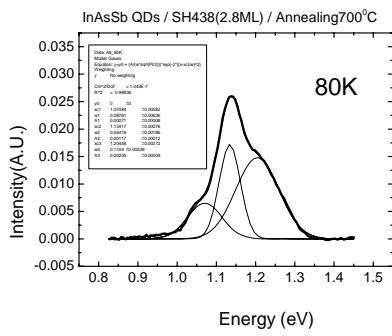
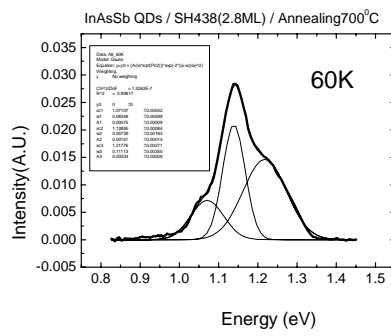
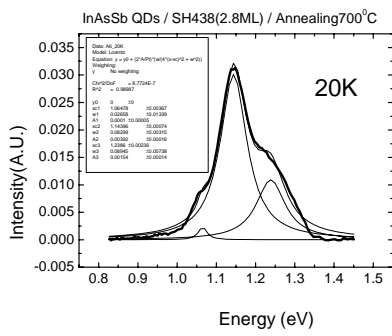


圖4-8 Relaxed InAsSb - Annealing700°C ~ Gaussian function 擬合

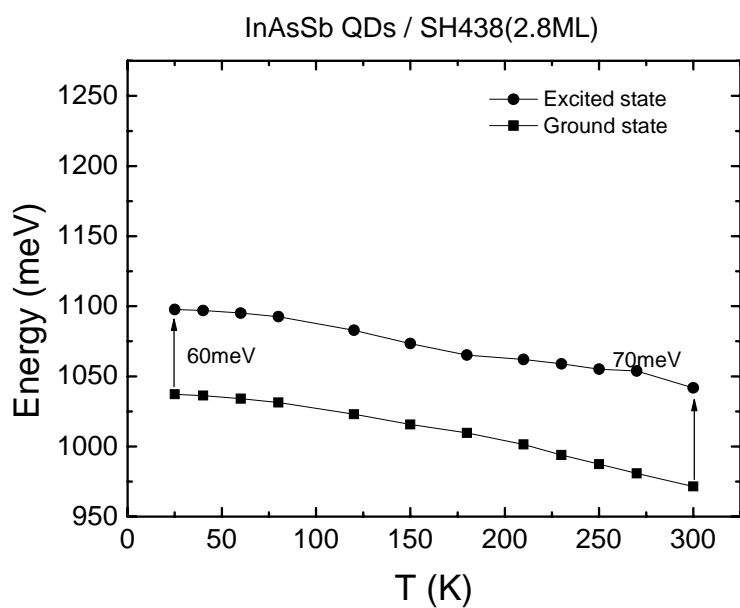


圖4-9(a) Relaxed InAsSb - as grown- 能階隨溫度變化圖

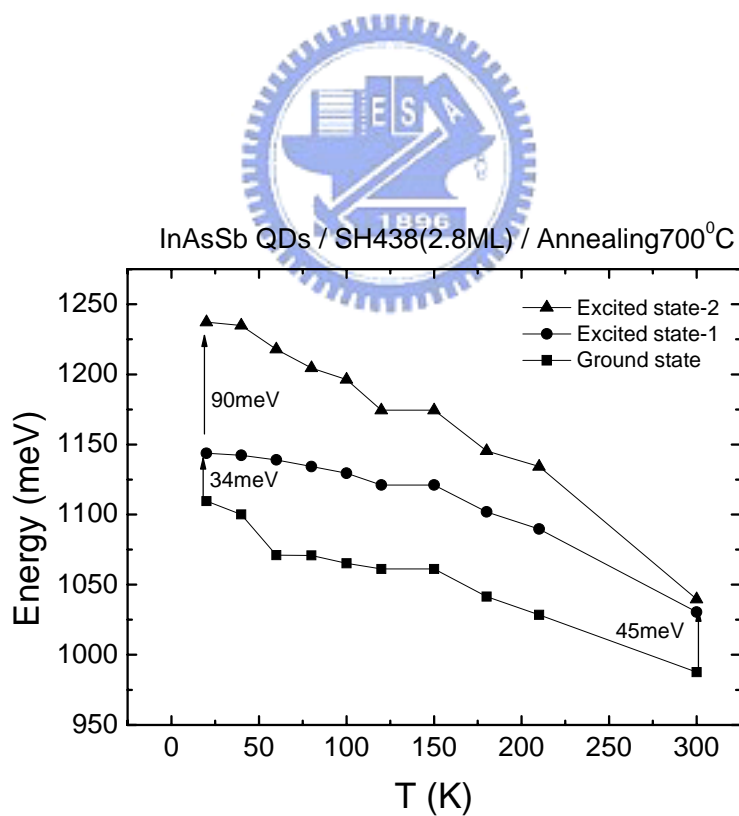


圖4-9(b) Relaxed InAsSb - Annealing700<sup>o</sup>C - 能階隨溫度變化圖

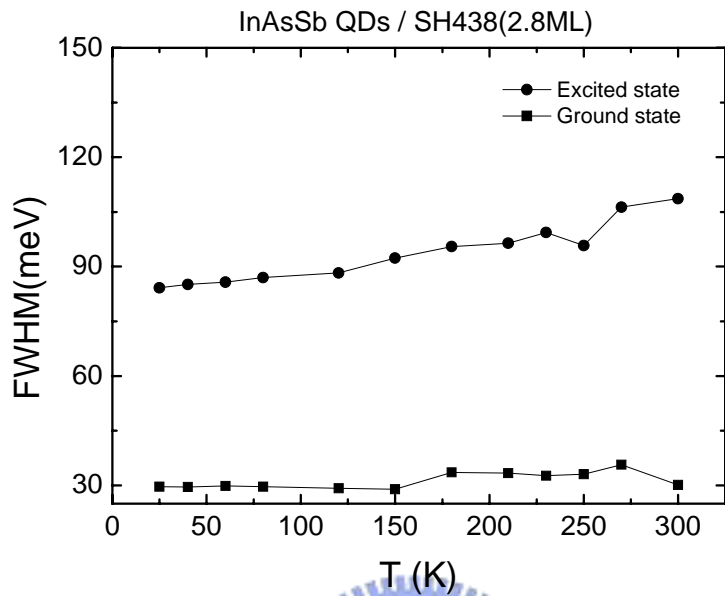


圖4-10(a) Relaxed InAsSb - as grown - 半高寬隨溫度變化圖

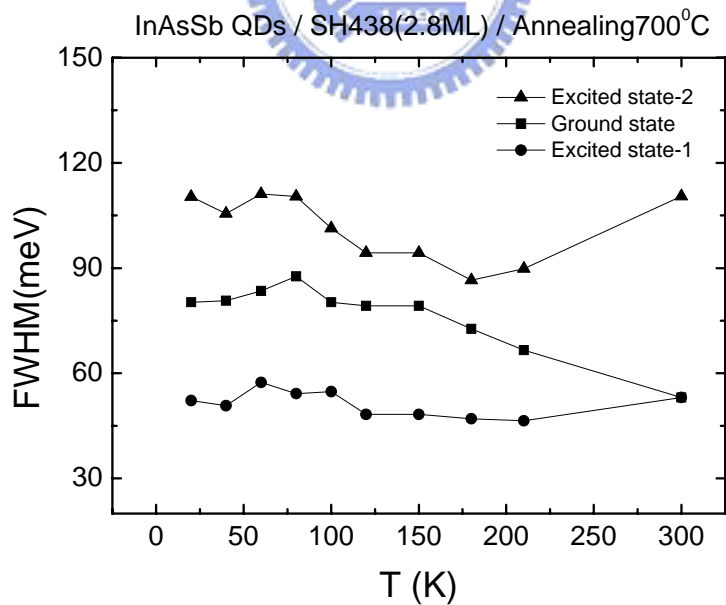


圖4-10(b) Relaxed InAsSb - Annealing 700°C - 半高寬隨溫度變化圖



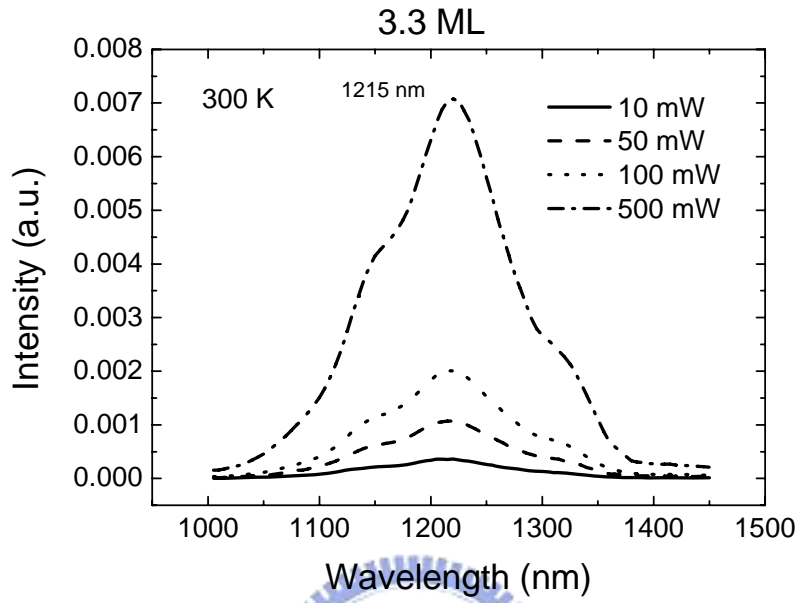


圖4-11 (a) Relaxed InAs-as grown - 室溫PL圖

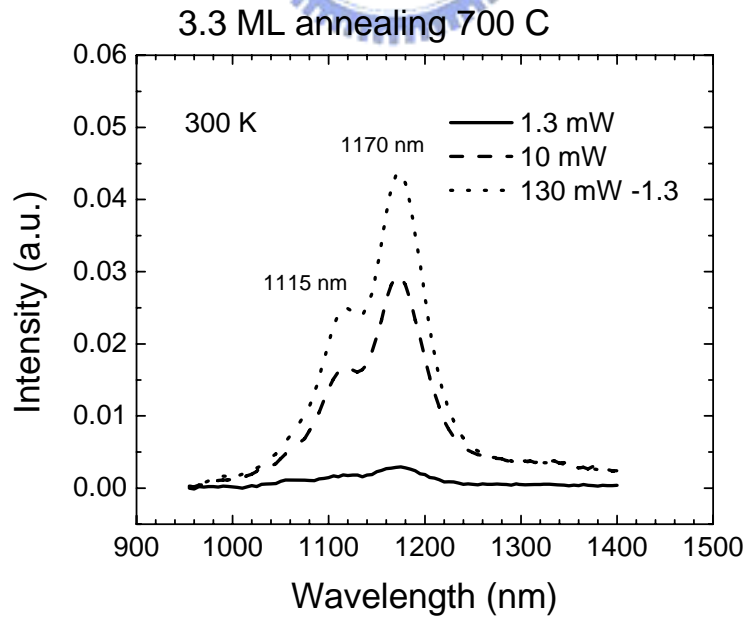


圖4-11 (b) Relaxed InAs- Annealing700°C - 室溫PL圖

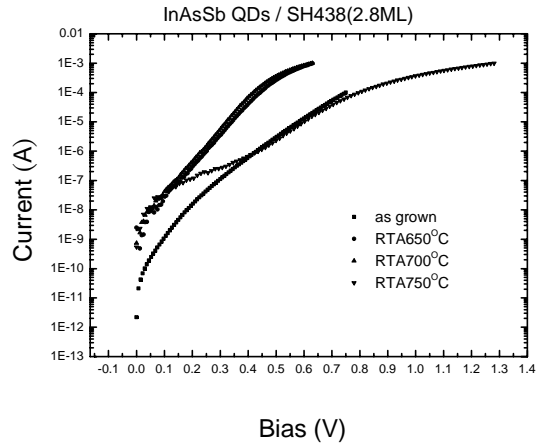


圖4-12 Relaxed InAsSb- 各熱退火溫度下之室溫IV圖

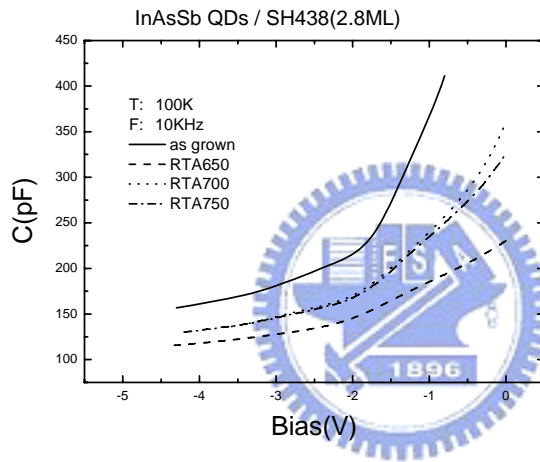


圖4-13(a) Relaxed InAsSb - 各熱退火溫度下-低溫CV圖

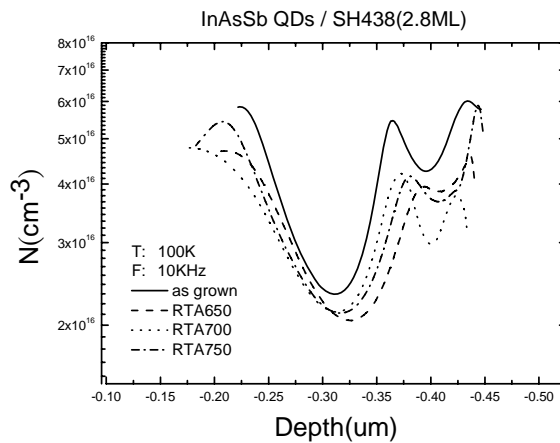


圖4-13(b) Relaxed InAsSb - 各熱退火溫度下 - 低溫CV轉縱深圖

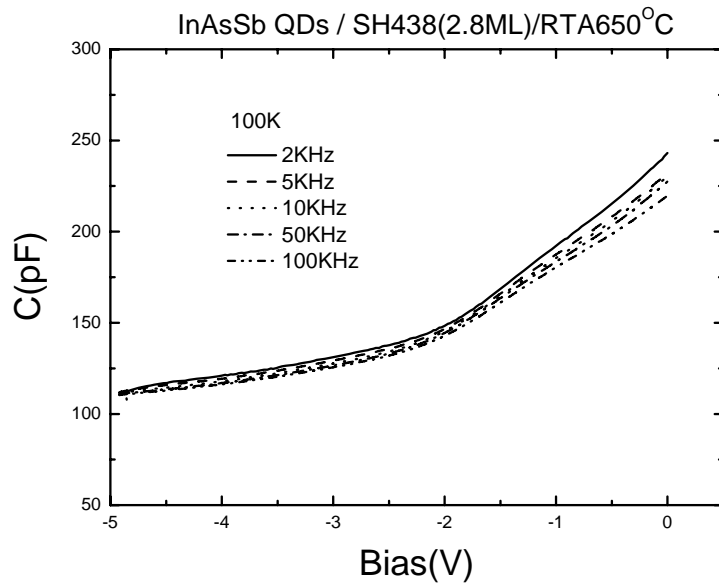


圖 4-14(a) Relaxed InAsSb - Annealing650°C - 低溫CV圖

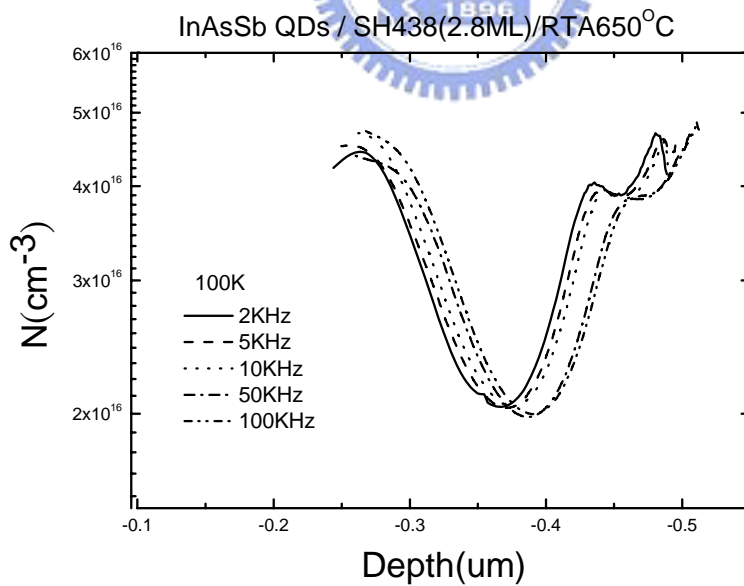


圖 4-14(b) Relaxed InAsSb - Annealing650°C - 低溫CV轉縱深圖

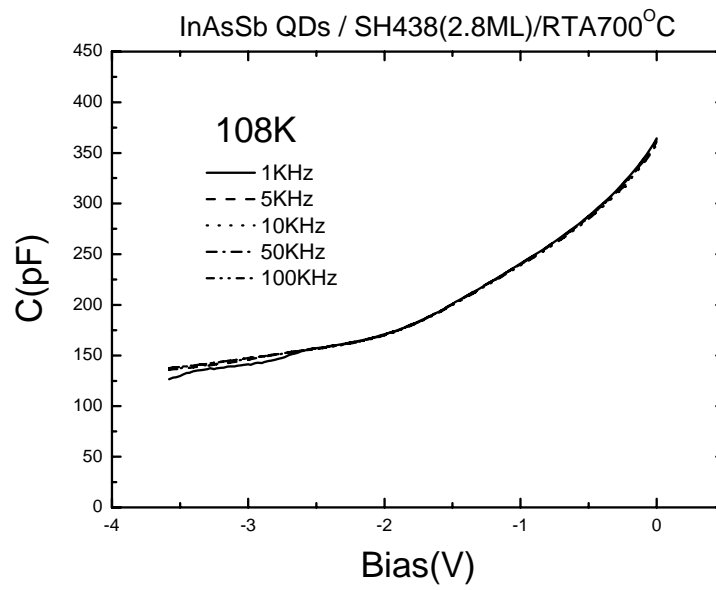


圖 4-15(a) Relaxed InAsSb - Annealing700<sup>o</sup>C - 低溫CV圖

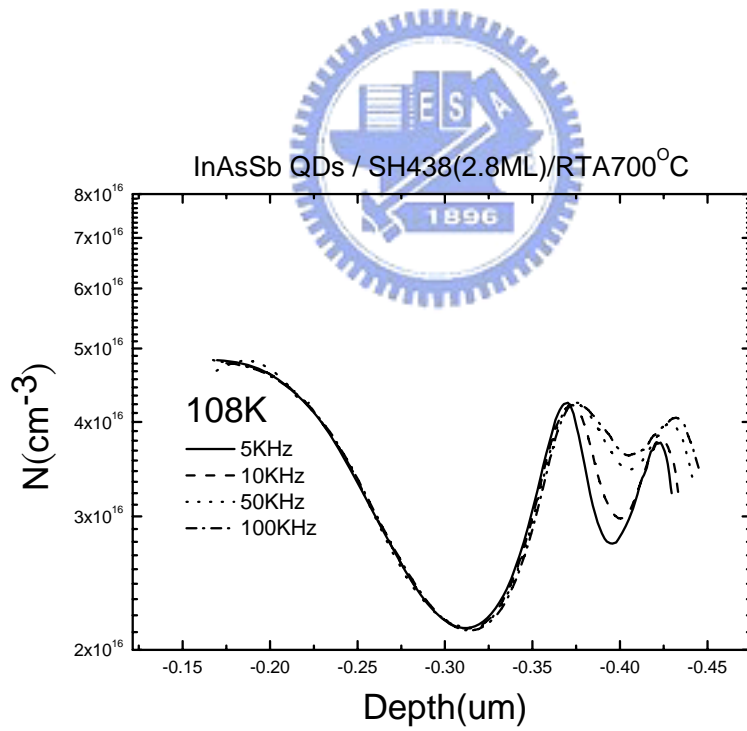


圖4-15(b) Relaxed InAsSb - Annealing700<sup>o</sup>C - 低溫CV轉縱深圖

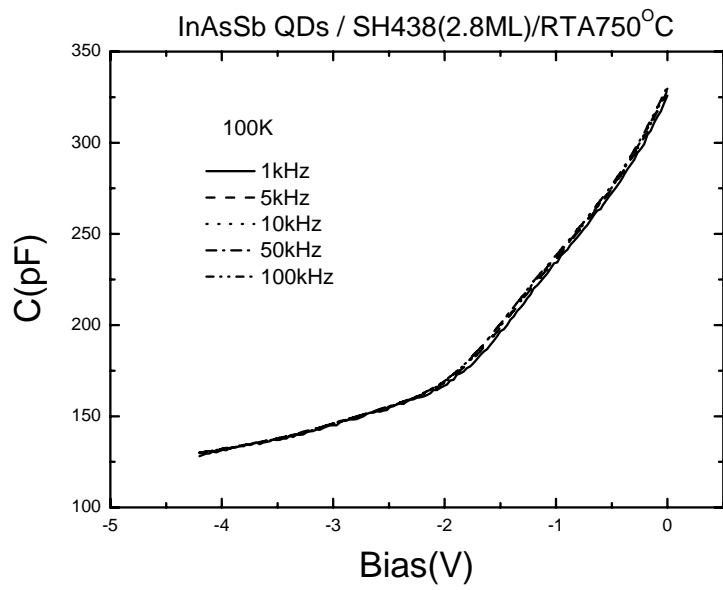


圖 4-16(a) Relaxed InAsSb - Annealing750<sup>o</sup>C - 低溫CV圖

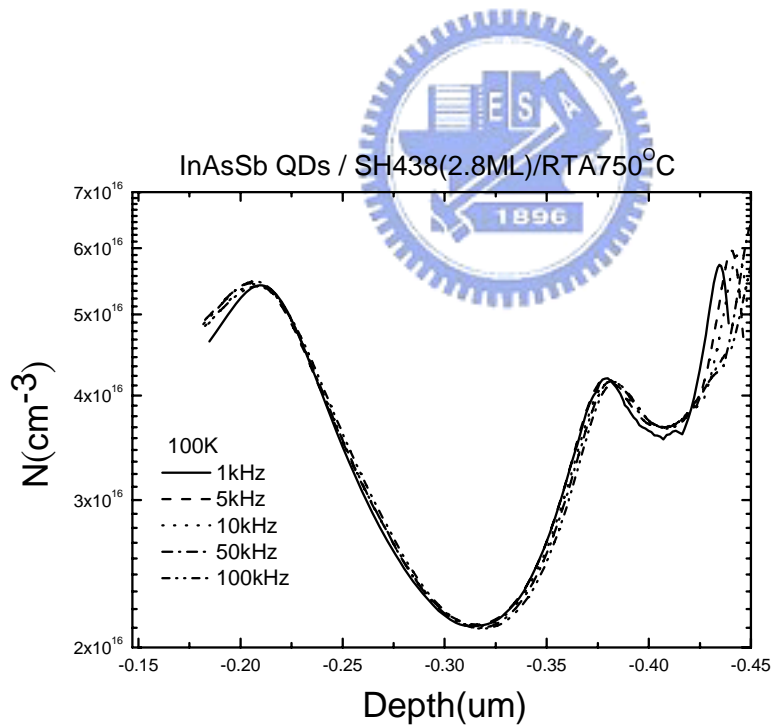


圖4-16(b) Relaxed InAsSb - Annealing750<sup>o</sup>C - 低溫CV轉縱深圖

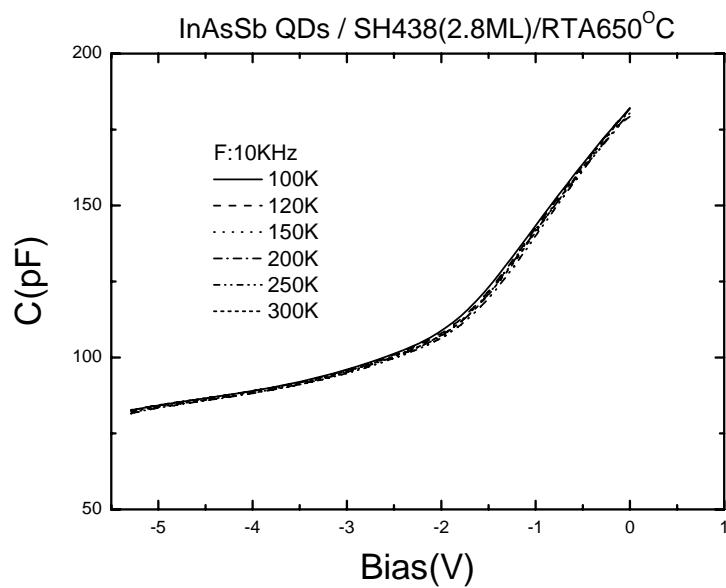


圖 4-17(a) Relaxed InAsSb - Annealing650°C - 變溫CV圖

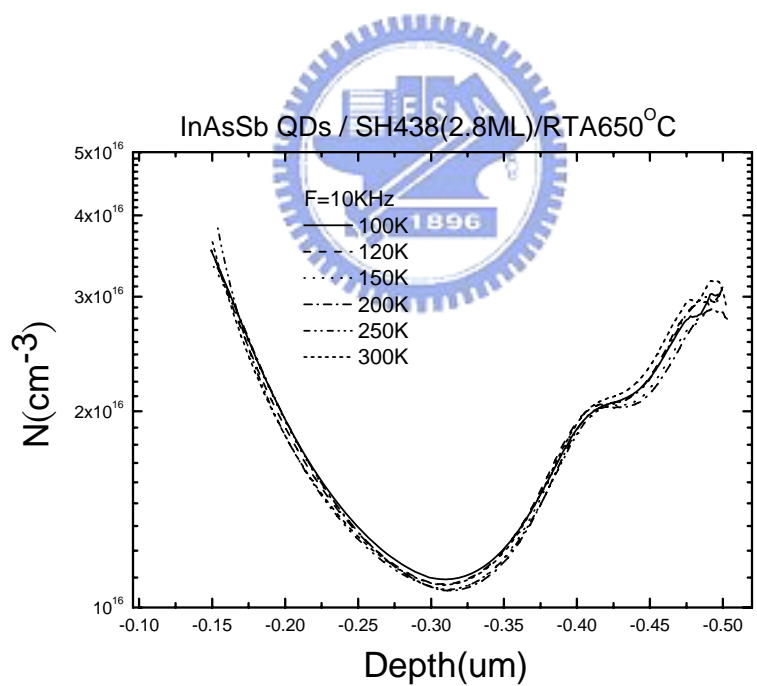


圖4-17(b) Relaxed InAsSb - Annealing650°C - 變溫CV轉縱深圖

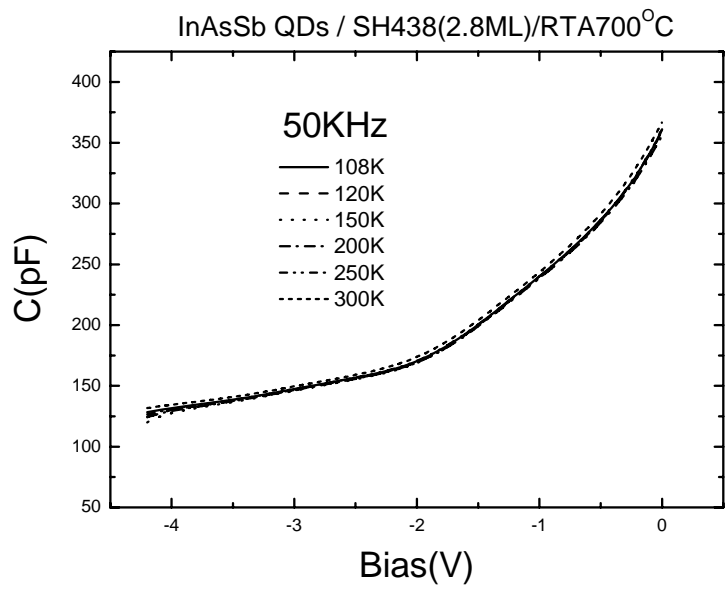


圖 4-18(a) Relaxed InAsSb - Annealing700°C - 變溫CV圖

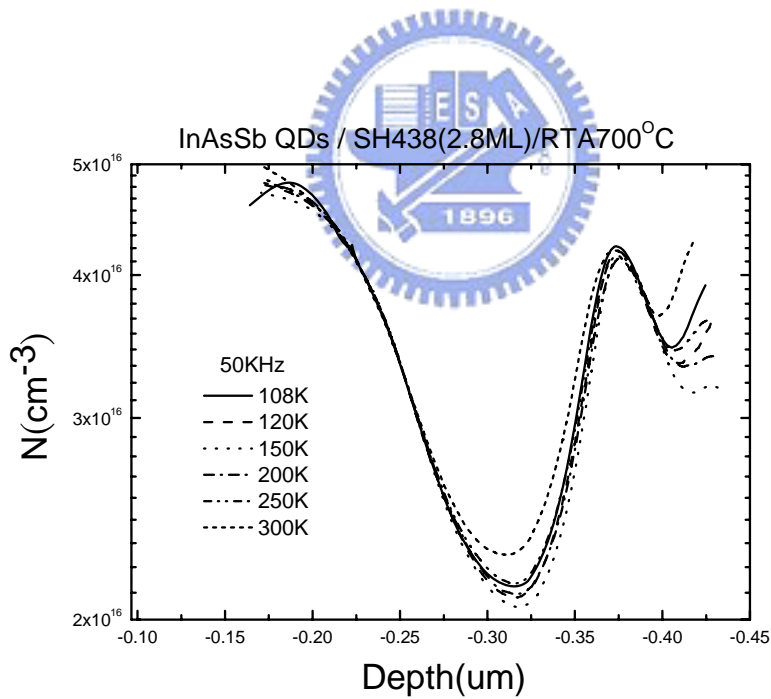


圖4-18(b) Relaxed InAsSb - Annealing700°C - 變溫CV轉縱深圖

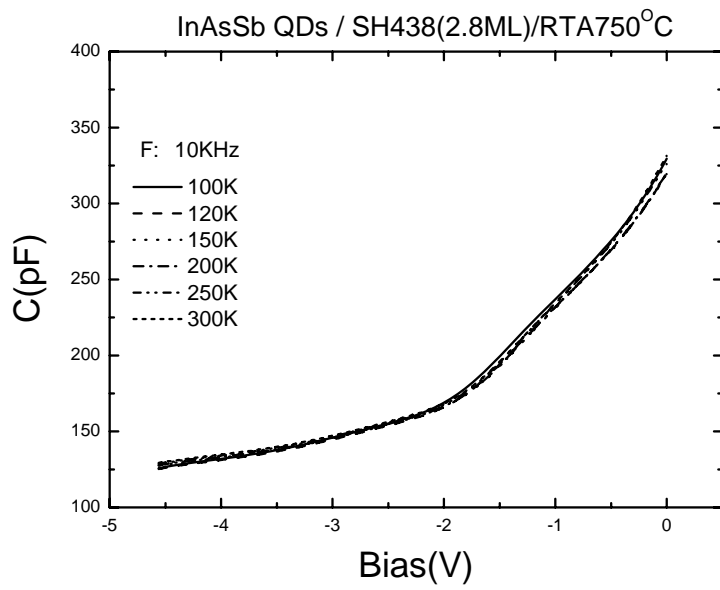


圖4-19(a) Relaxed InAsSb - Annealing750°C - 變溫CV圖

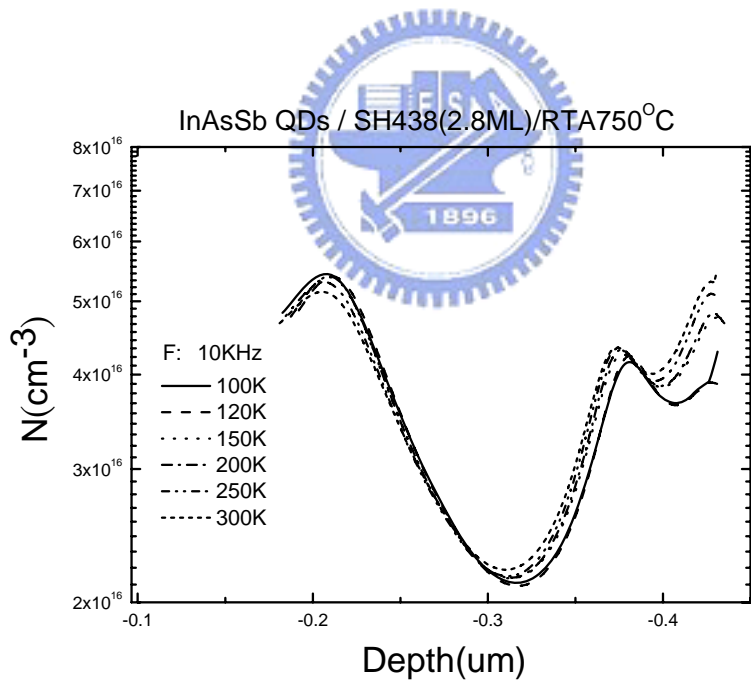


圖4-19(b) Relaxed InAsSb - Annealing750°C - 變溫CV轉縱深圖



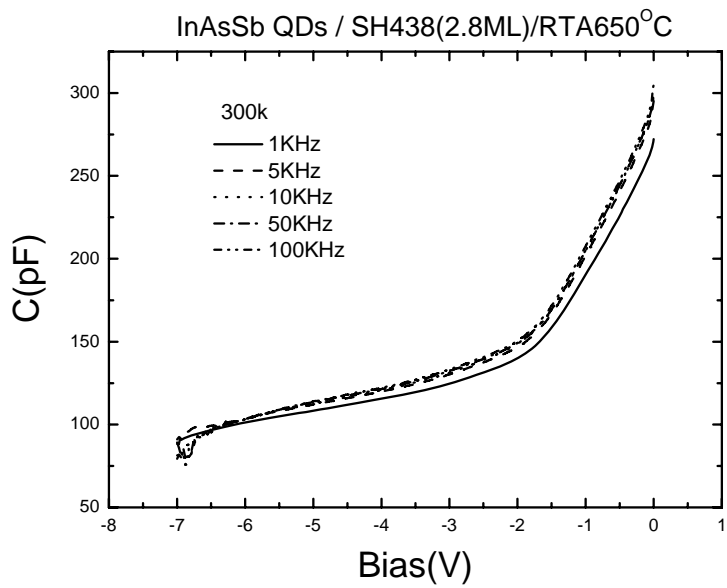


圖4-20(a) Relaxed InAsSb - Annealing650°C - 室溫CV圖

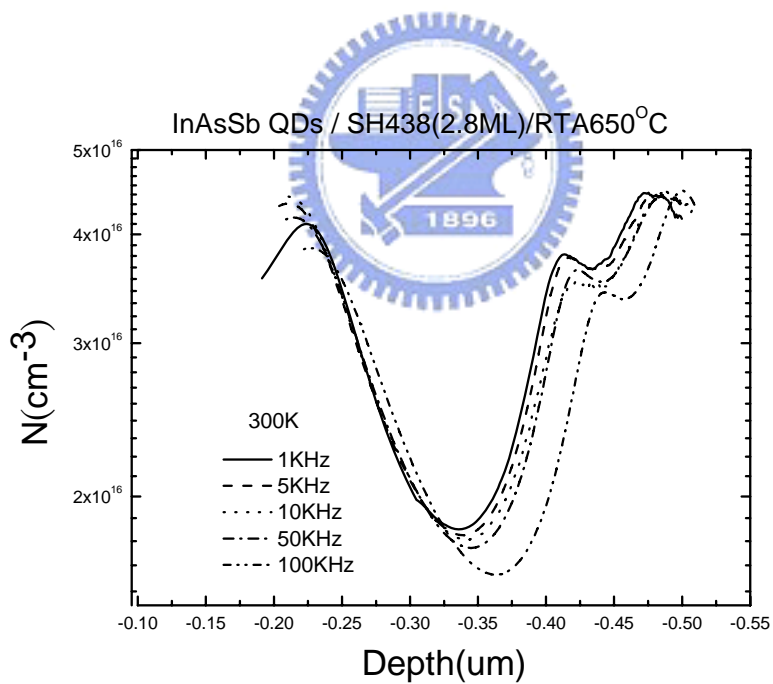


圖4-20(b) Relaxed InAsSb - Annealing650°C - 室溫CV轉縱深圖

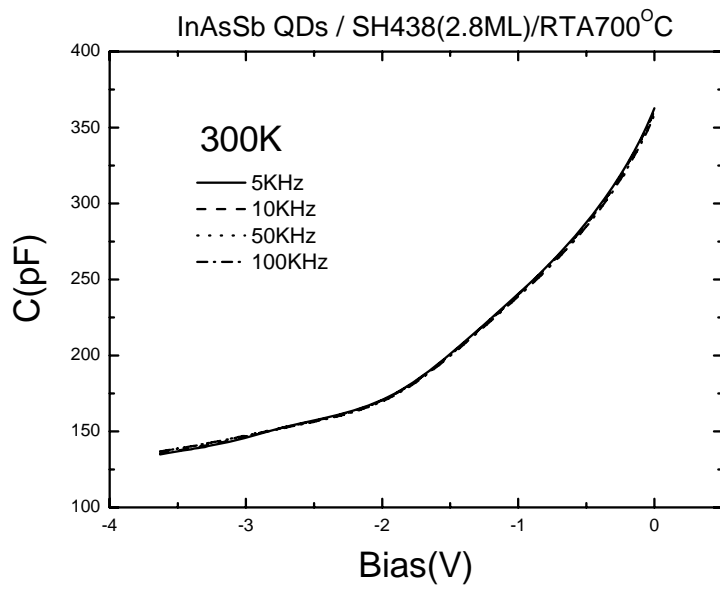


圖4-21(a) Relaxed InAsSb – Annealing700°C – 室溫CV圖

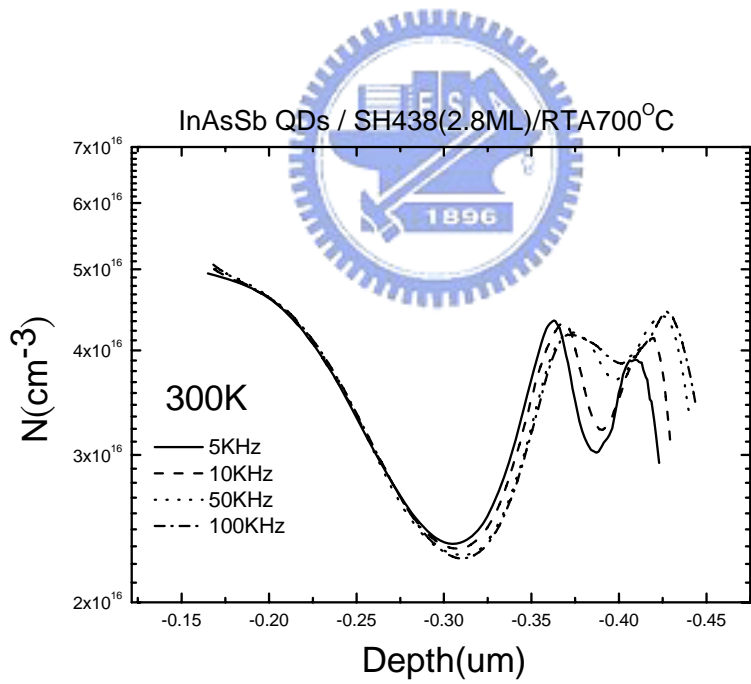


圖4-21(b) Relaxed InAsSb – Annealing700°C – 室溫CV轉縱深圖

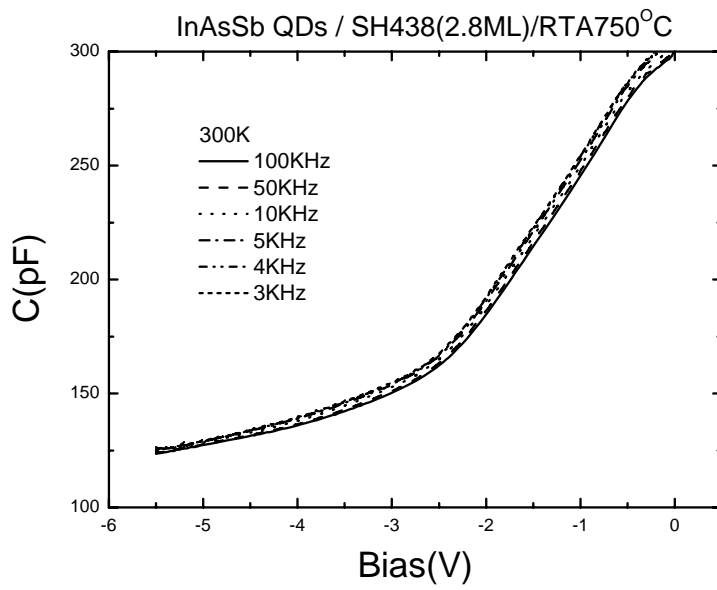


圖4-22(a) Relaxed InAsSb - Annealing750°C - 室溫CV圖

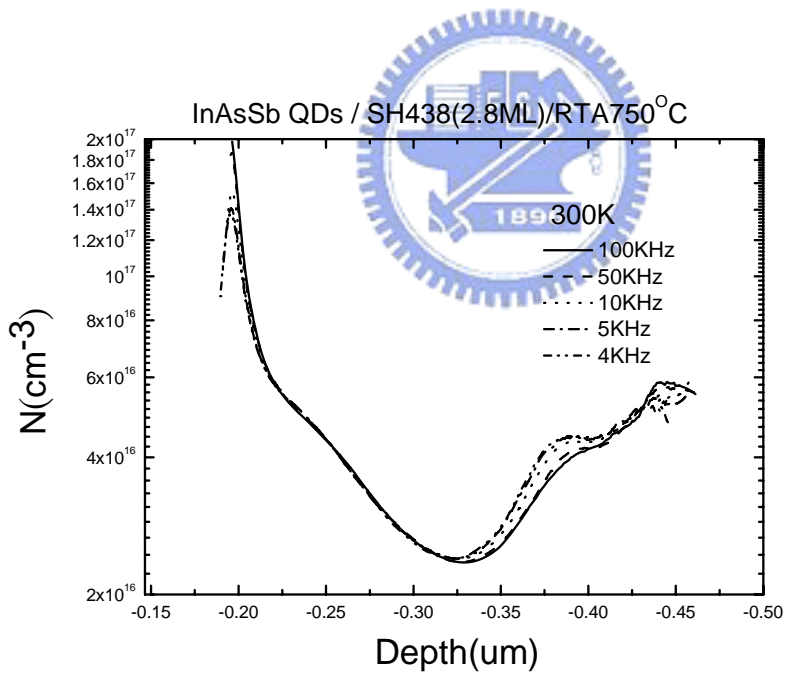


圖4-22(b) Relaxed InAsSb - Annealing750°C - 室溫CV圖

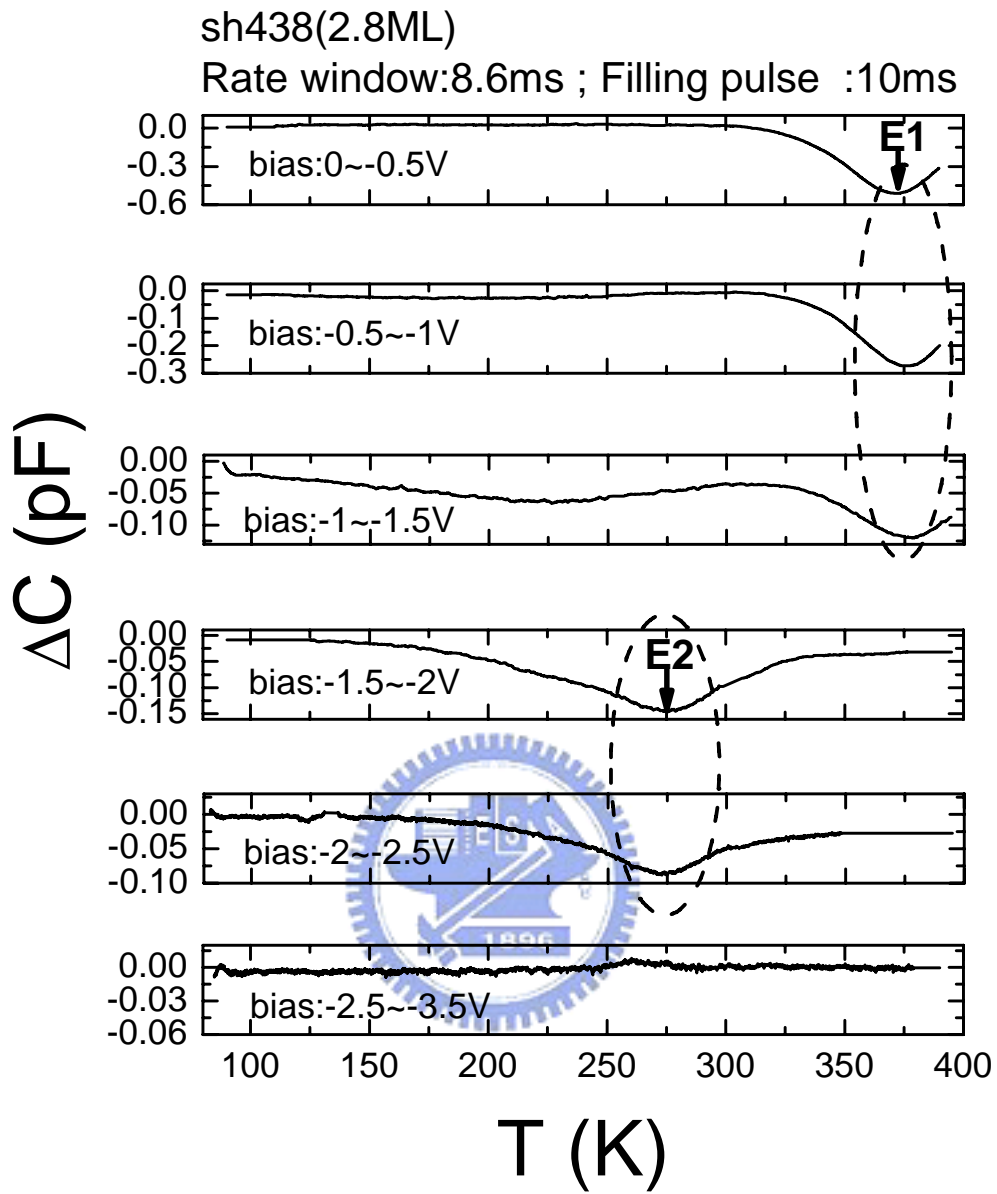


圖4-23 Relaxed InAsSb(2.8ML)~各偏壓範圍下之DLTS圖

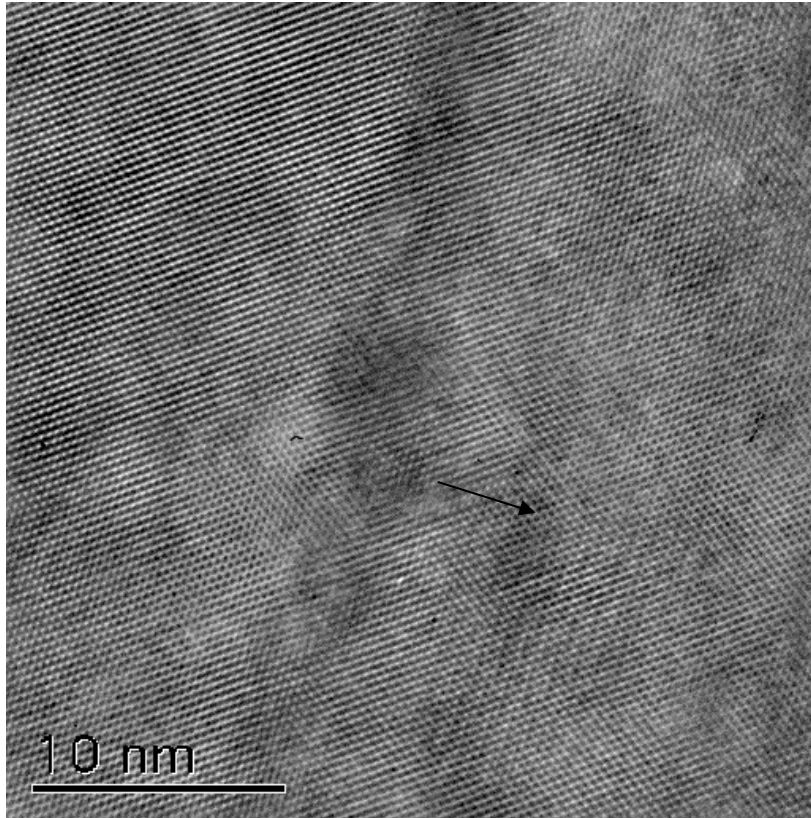


圖4-24(a) Relaxed InAsSb(2.8ML)~HRTEM(未經傅立葉轉換)

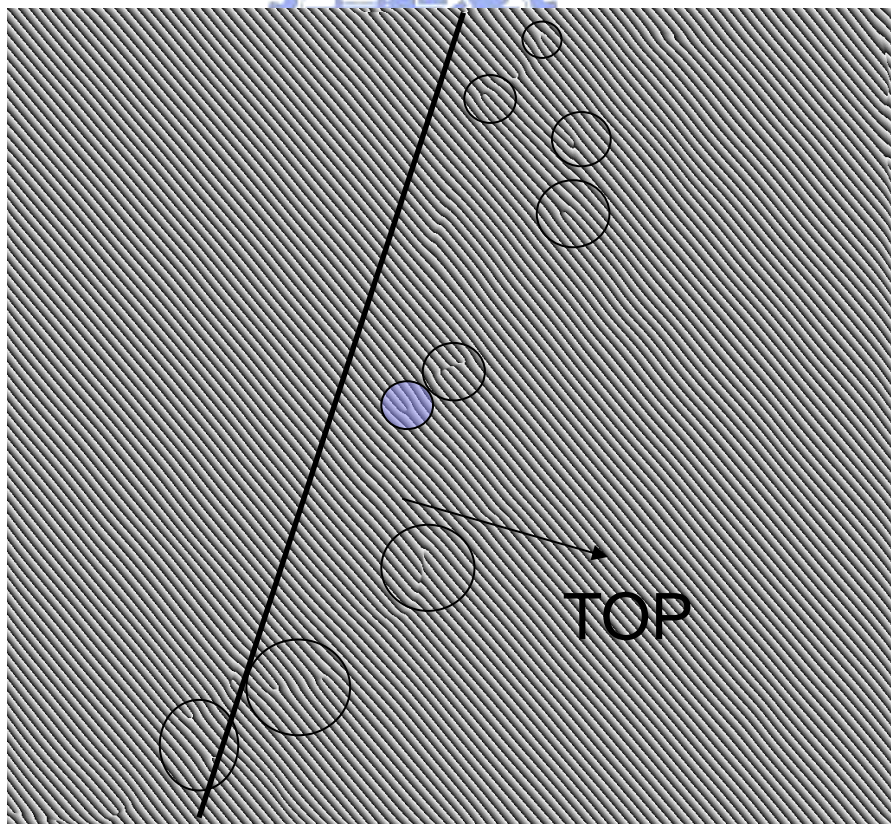


圖4-24(b) Relaxed InAsSb(2.8ML)~HRTEM(經傅立葉轉換)

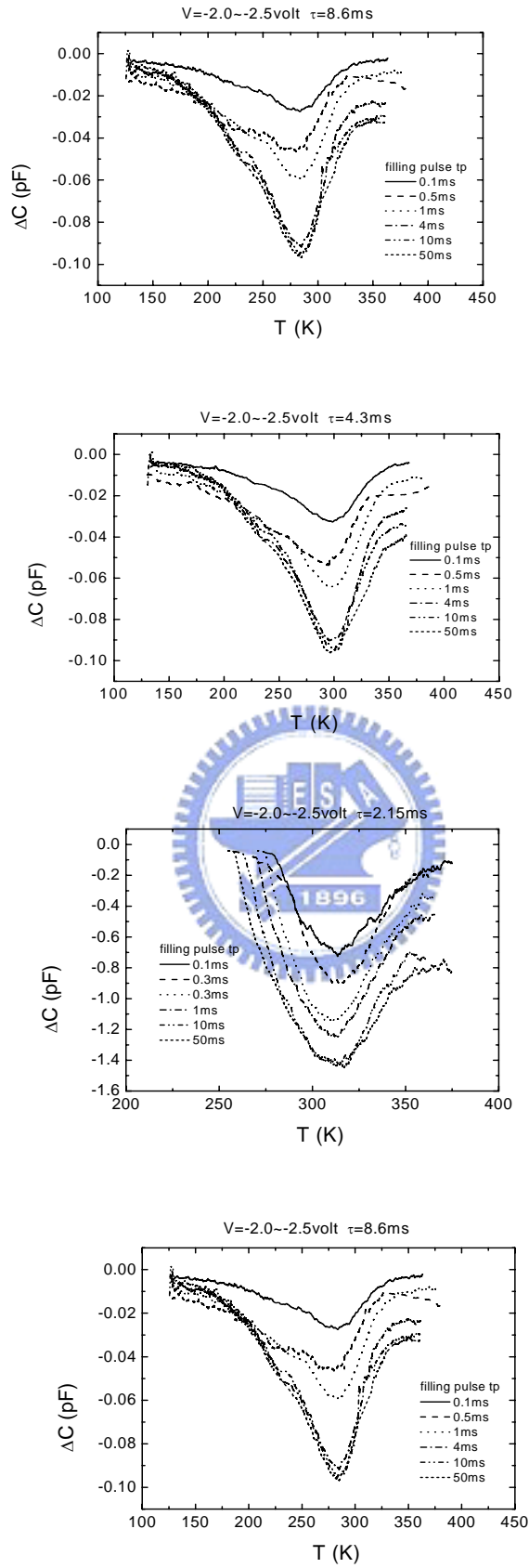


圖4-25 Relaxed InAsSb~四個速率窗下改變填充偏壓DLTS圖

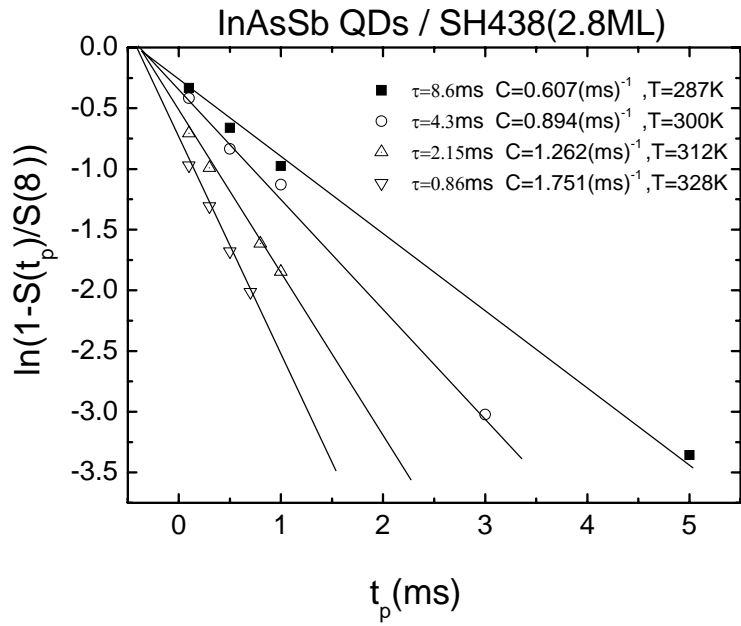


圖4-26(a) Relaxed InAsSb~不同速率視窗之對應溫度及其捕捉速率

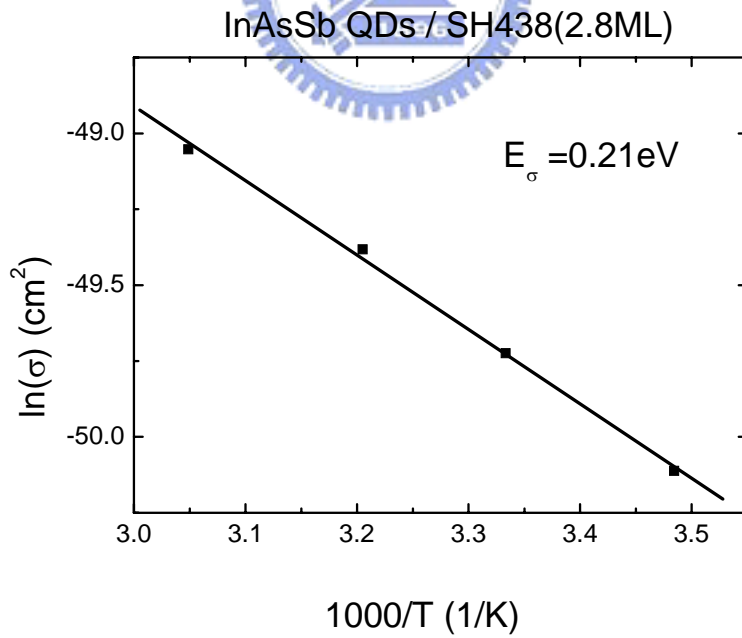
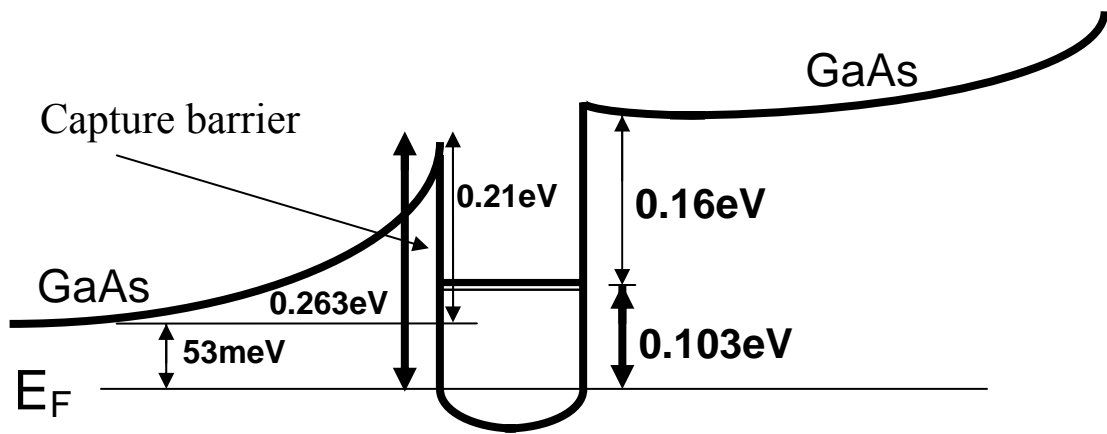


圖4-26(b) Relaxed InAsSb~捕捉位能障擬合



Relaxed InAsSb QDs (as grown)



圖4-27 Relaxed InAsSb~修正後之能帶圖



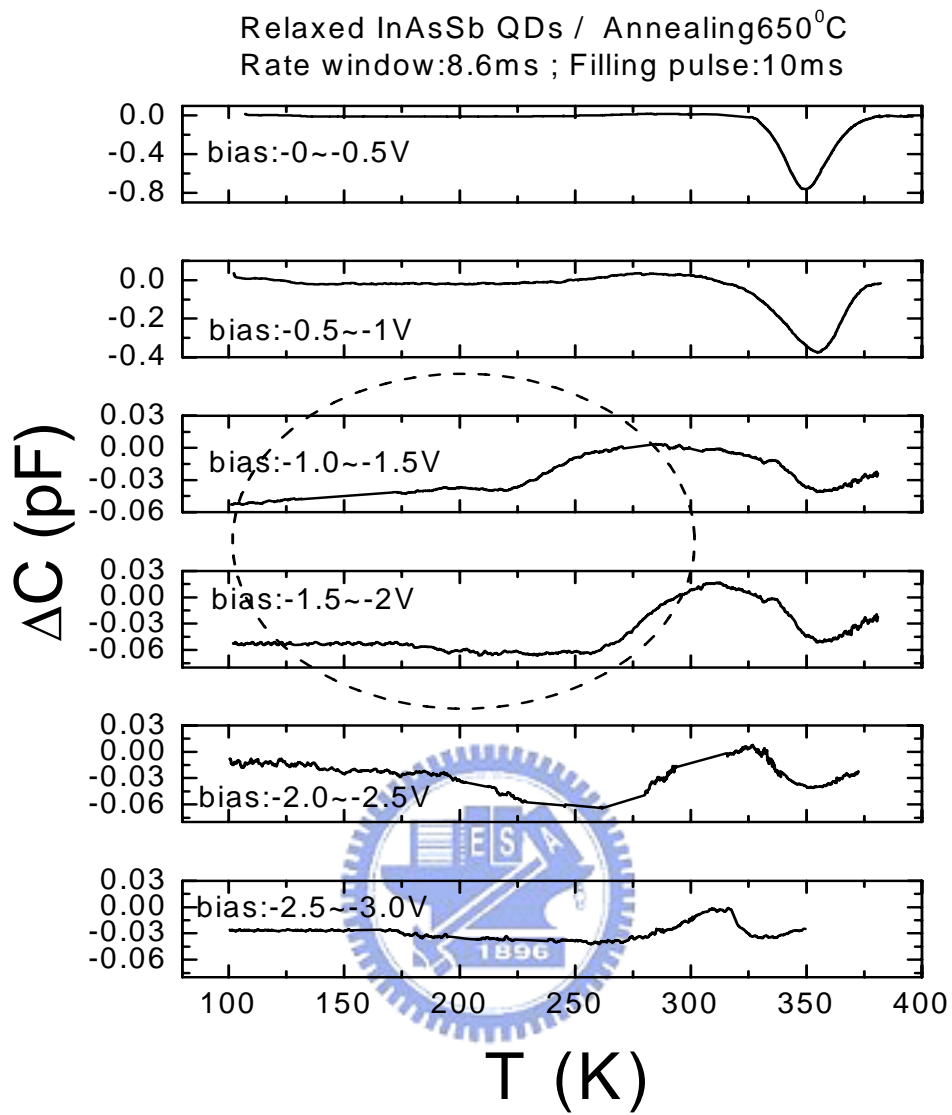


圖4-28 Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing 650°C~各偏壓範圍下之DLTS圖

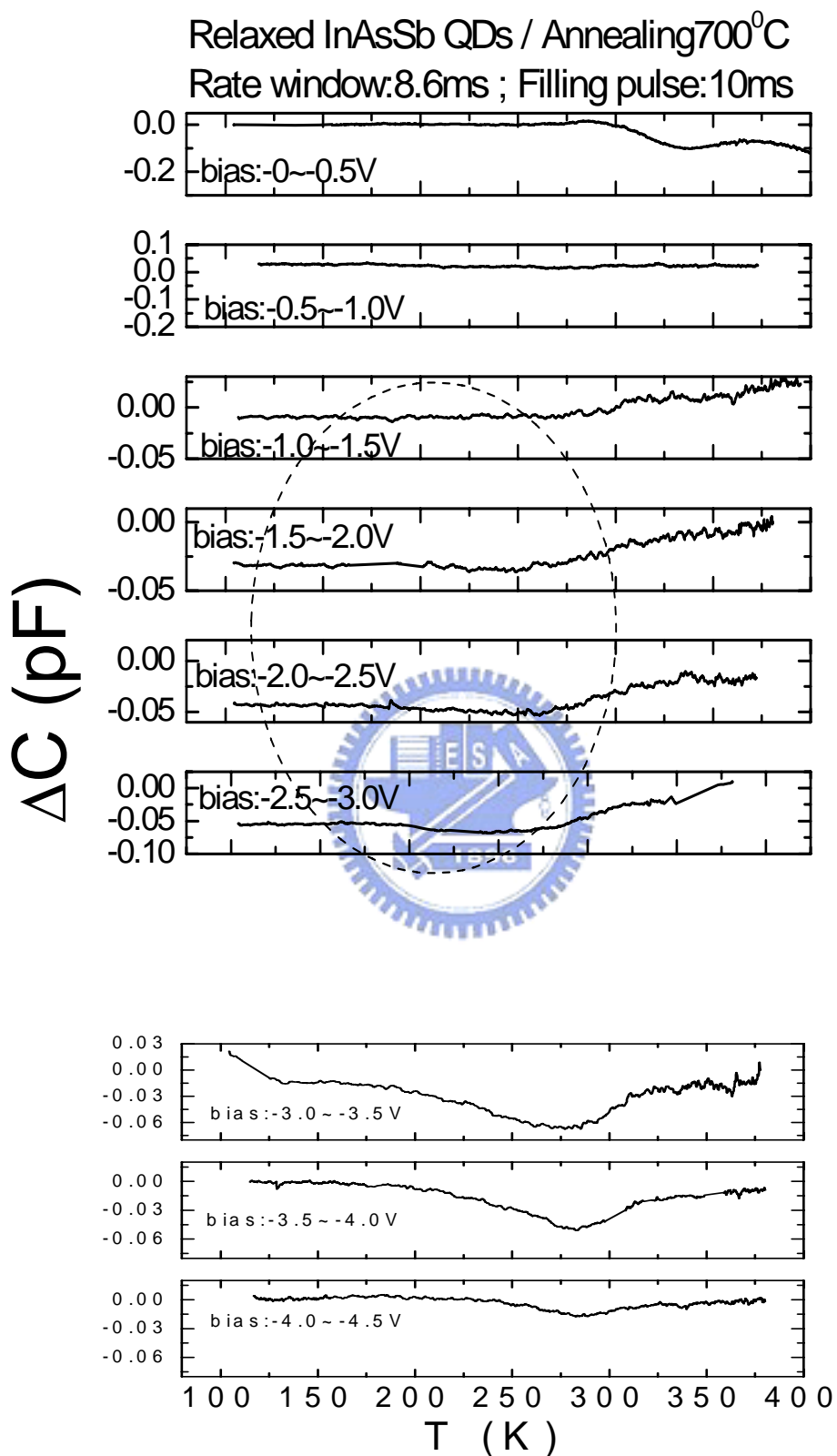


圖4-29 Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing 700°C~各偏壓範圍下之DLTS圖

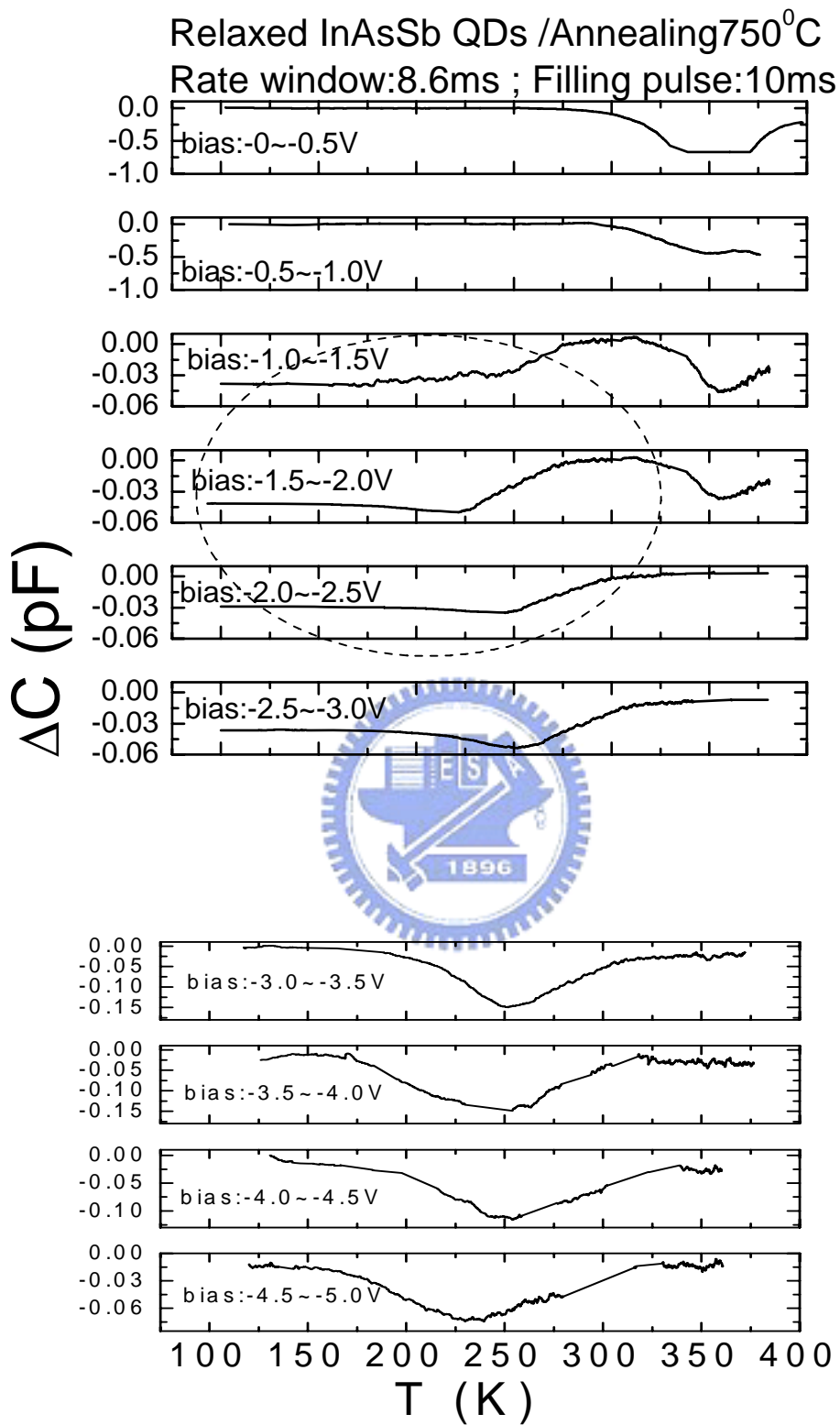


圖4-30 Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing 750°C~各偏壓範圍下之DLTS圖

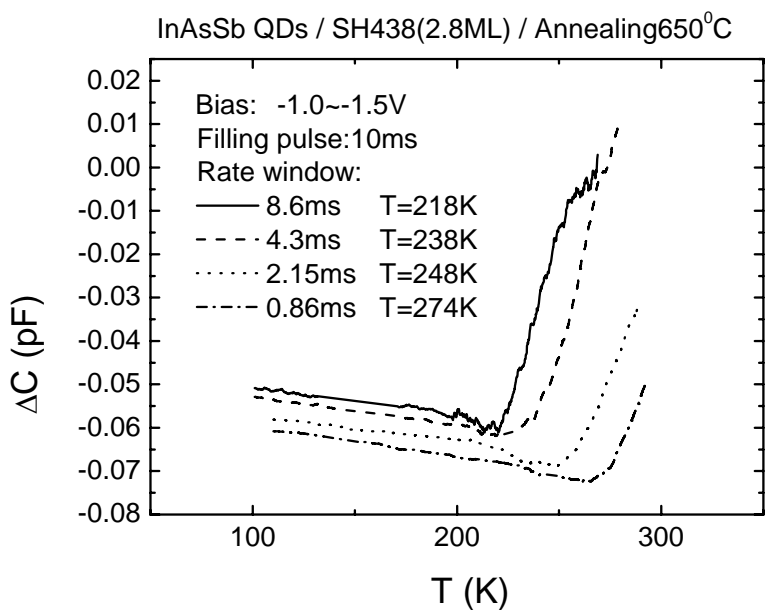


圖4-31(a) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing650°C~  
 量子點附近偏壓下各速度視窗之DLTS圖

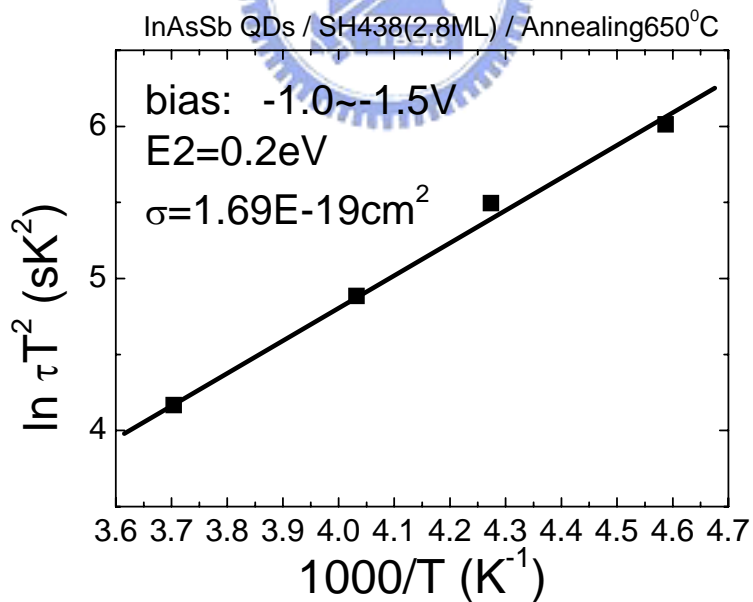


圖4-31(b) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing650°C~  
 量子點附近偏壓下之Arrhenius plot

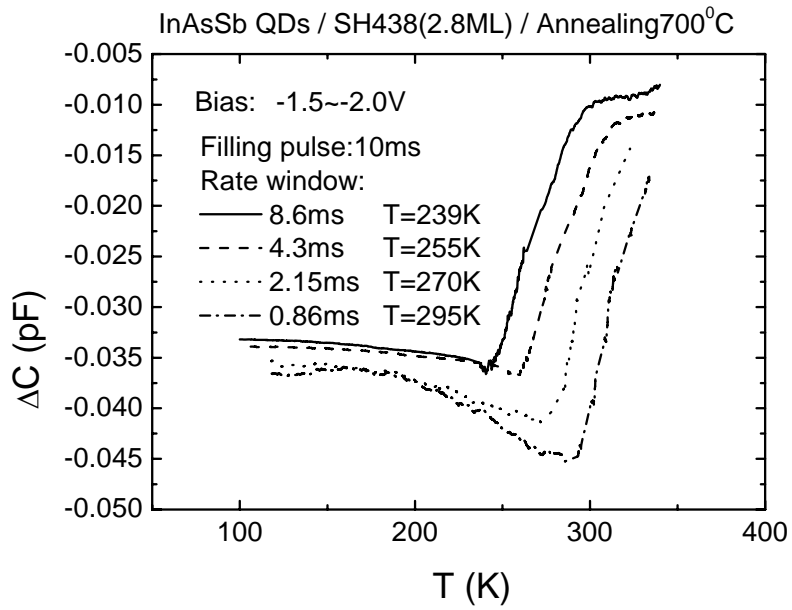


圖4-32(a) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700°C~  
量子點附近偏壓下各速度視窗之DLTS圖

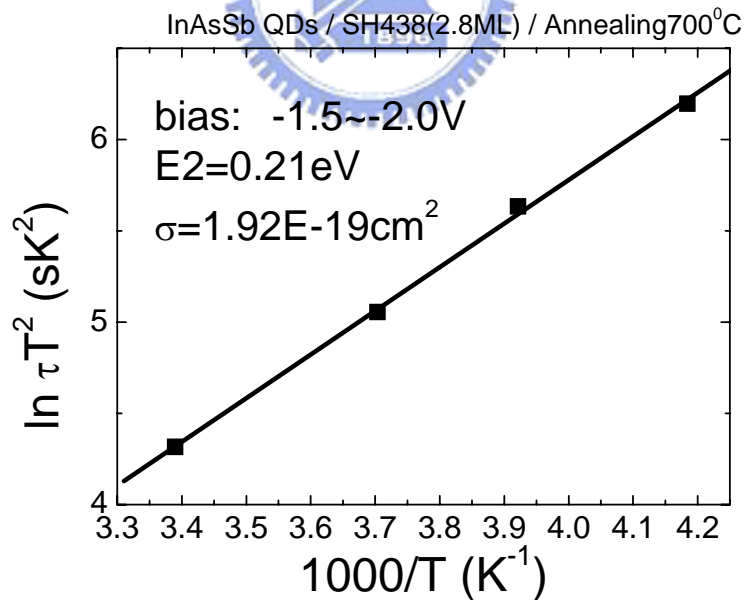


圖4-32(b) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700°C~  
量子點附近偏壓下之Arrhenius plot

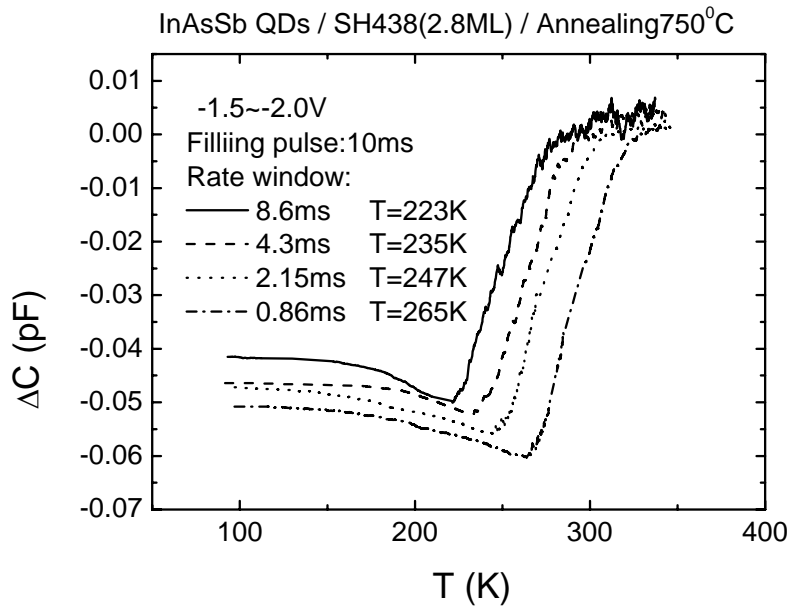


圖4-33(a) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing750°C~  
量子點附近偏壓下各速度視窗之DLTS圖

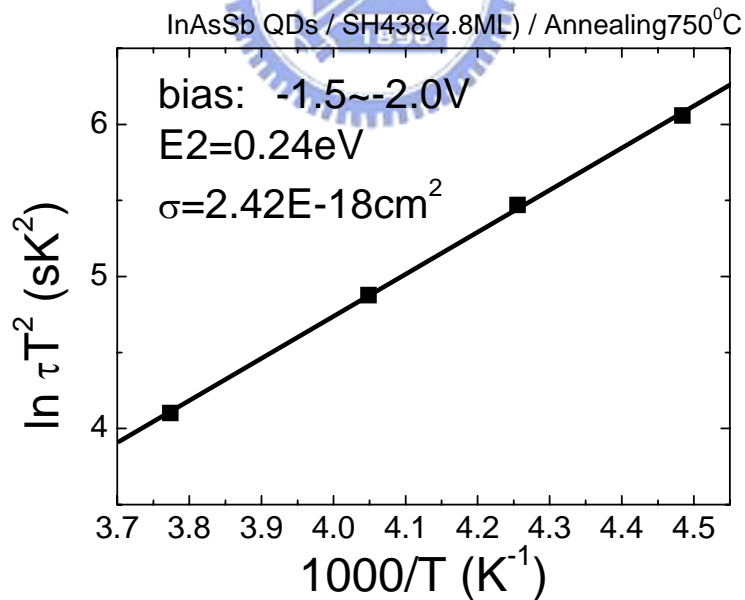


圖4-33(b) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing750°C~  
量子點附近偏壓下之Arrhenius plot

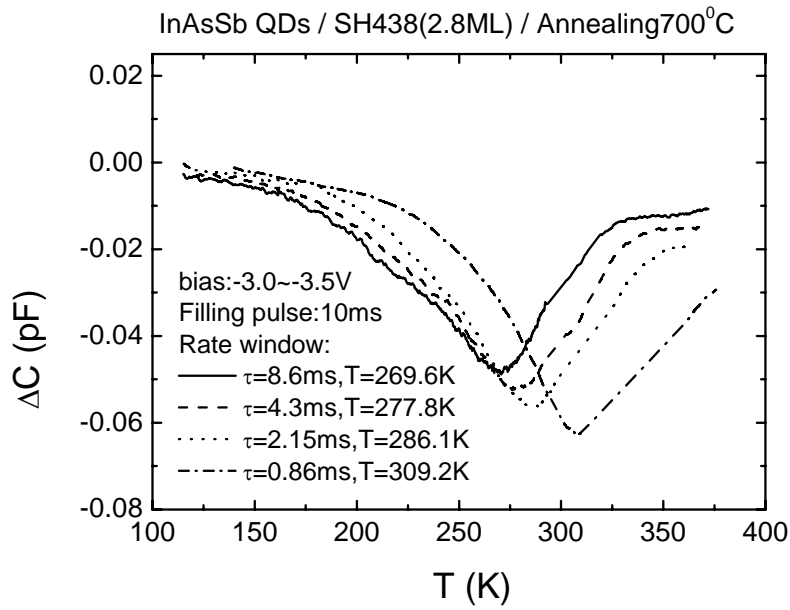


圖4-34(a) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700°C~  
較大偏壓下各速度視窗之DLTS圖

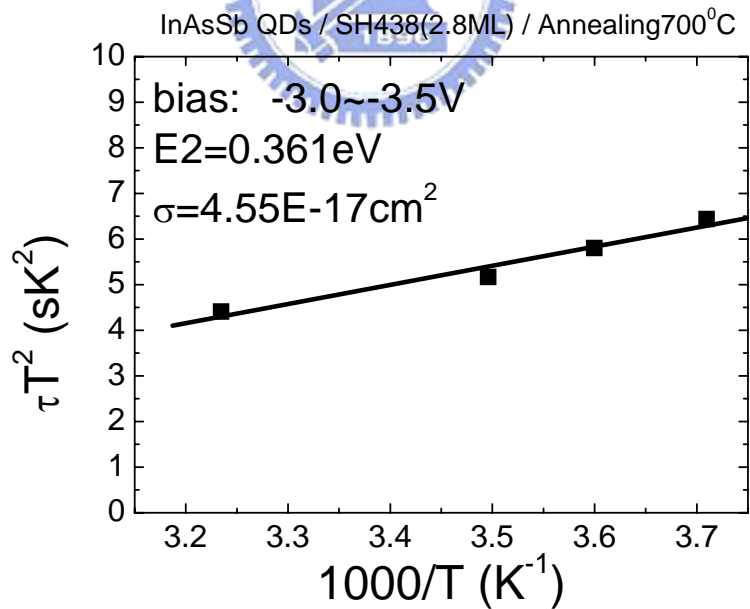


圖4-34(b) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing700°C~  
較大偏壓下之Arrhenius plot

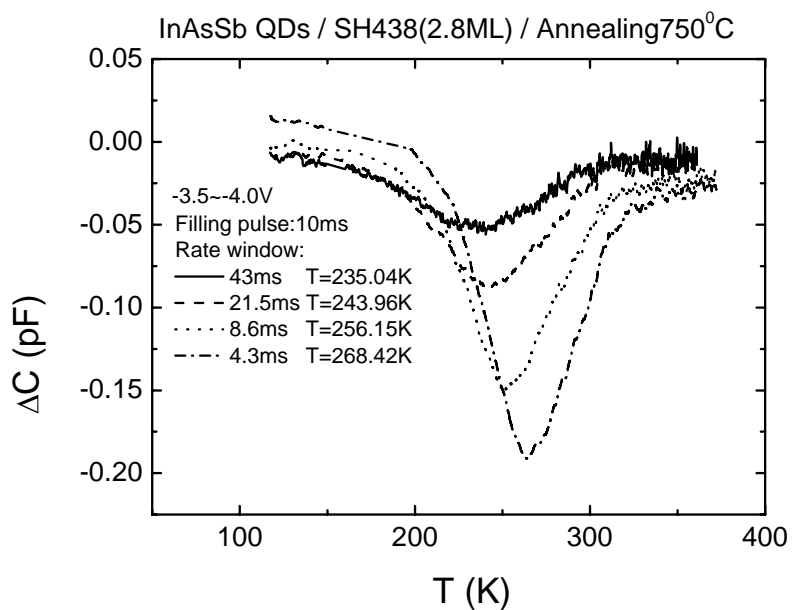


圖4-35(a) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing 750°C~  
較大偏壓下各速度視窗之DLTS圖

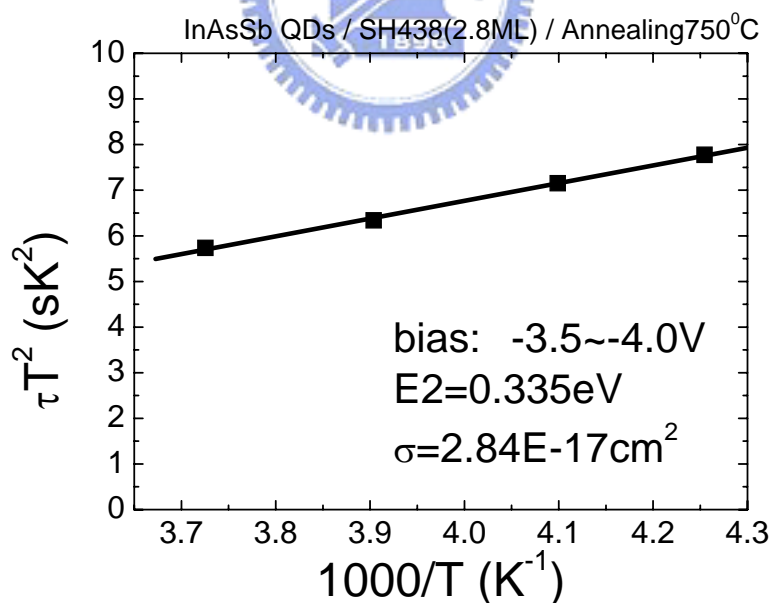
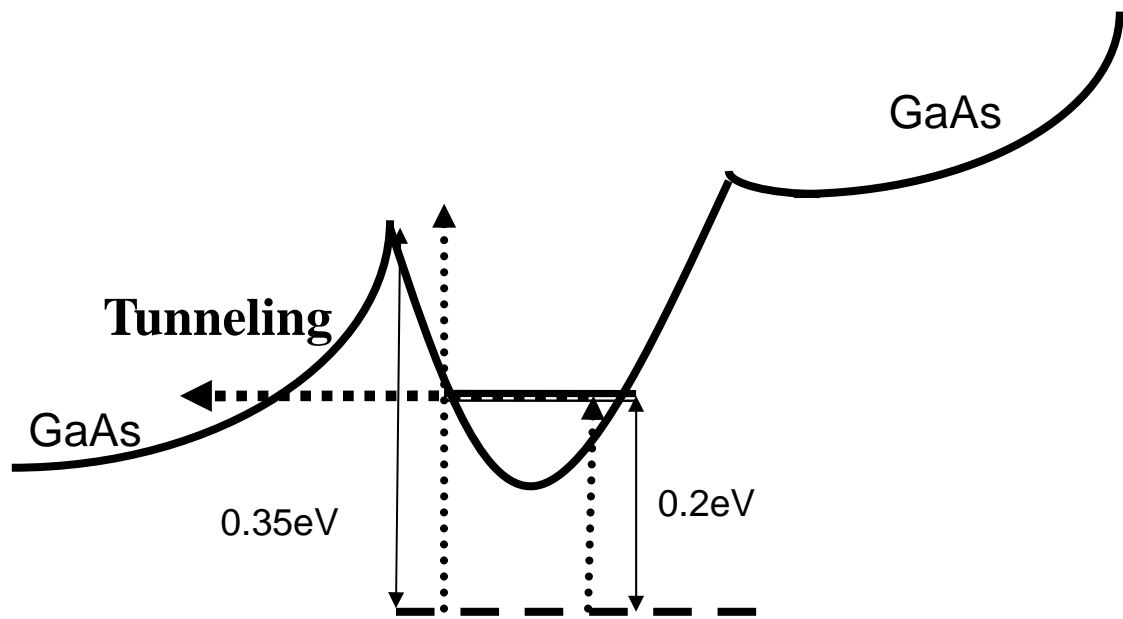


圖4-35(b) Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing 750°C~  
較大偏壓下之Arrhenius plot





InAsSb QDs  
2.8ML(Annealing)

圖4-36 Relaxed InAsSb(2.8ML)~ Annealing後之能帶圖

## 參考文獻

- [1] F.C.Frank, and J.H.van der Merwe,Proc.Roy.Soc..London A 19205 (1949).
- [2] M.Volmer, and A. Weber,Z.Phys.Chem. 119,277 (1926).
- [3] I.N.Stranski, and Von L.Krastanow,Akad.Wiss.Lit.Mainz Math.Natur.K1.Iib 146,797 (1939).
- [4] J.M.Moison,F.Houzay,F.Barthe,L.Leprince, and O.Vatel, “Self-organized growth of regular nanometer-scale InAs dots on GaAs” , Appl. Phys. Lett. 64,196 (1994).
- [5] L.Goldstein,F.Glas,J.Y.Marzin,M.N.Charasse, and G.Le Roux, “Growth by molecular beam epitaxy and characterization of InAs/GaAs strained-layer superlattices” ,Appl. Phys. Lett. 47,1099 (1985).
- [6] A. Stintz, and G.T.Liu , “Low-Threshold Current Density 1.3 $\mu$ m InAs Quantum-Dot Lasers with tht Dots-in-a-Well(DWELL) Structure” , IEEE Photon Technol. Lett. 12,591 (2000).
- [7] Y. Arakawa and H. Sakaki, “Multidimensional quantum well lasers and temperature dependence of its threshold current” ,Appl. Phys.Lett. 40, 939 (1982).
- [8] M. Sugawara, “Self-Assembled InGaAs/GaAs Quantum Dots.”, Academic Press, 241-249 (1999).
- [9] D.L.Huffaker,G.Park,Z.Zou,O.B.Shchekin and D.Deppe, “1.3 $\mu$ m room-temperature GaAs-based quantum-dot laser” ,Appl. Phys. Lett. 73,2564 (1998)..
- [10] G.Park,D.L.Huffaker,Z.Zou,O.B.Shchekin and D.Deppe, “Temperature Dependence of Lasing Characteristics for Long-Wavelength(1.3 $\mu$ m) GaAs-Based Quantum-Dot Lasers” ,IEEE Photon Technol. Lett. 11,301 (1999).
- [11] Rudin AM, Guo LJ, Glazman LI et al., Appl. Phys. Lett. 73,3429 (1998).
- [12] Xu SJ, Chua SJ,Mei T et al.,Appl. Phys. Lett. 73,3153 (1998).
- [13] J.C. Harmand, L.H. Li, G. Patriarche, and L. Travers, “GaInAs/GaAs quantum-well growth assisted by Sb surfactant: Toward 1.3 $\mu$ m emission” ,

- Appl. Phys. Lett. 84, 3981 (2004).
- [14] T.Kageyama, T.Miyamoto, M.Ohta, T.Matsuura, Y.Matsui, T.Furuhata, and F.Koyama, “Sb surfactant effect on GaInAs/GaAs highly strained quantum well lasers emitting at 1200nm range grown by molecular beam epitaxy” ,J. Appl. Phys. 96,44 (2004)
- [15] X. Yang, J.B. Heroux, L. F. Mei and W. I. Wang, “InGaAsNSb/GaAs quantum wells for 1.55 $\mu$ m lasers grown by molecular-beam epitaxy” ,Appl. Phys. Lett. 78, 4068 (2001).
- [16] H. Shimizu, K. Kumada, S. Uchiyama and A. Kasukawa, “High performance CW 1.20 $\mu$ m GaInAsSb-SQW ridge lasers” ,Electron. Lett. 36, 1701 (2000).
- [17] X. Yang, M. J. Jurkovic, J. B. Heroux and W. I. Wang, “Molecular beam epitaxial growth of InGaAsN:Sb/GaAs quantum wells for long-wavelength semiconductor lasers” ,Appl. Phys. Lett. 75, 178 (1999).
- [18] J. M. Ripalda, D. Granados, and Y. González, “Room temperature emission at 1.6  $\mu$ m from InGaAs quantum dots capped with GaAsSb”, Appl. Phys. Lett. 84, 2 (2006)
- [19] Masahiko Ohta, Toru Kanto and Koichi Yamaguchi, “Self-Formation of High-Density and High-Uniformity InAs Quantum Dots”, Japanese J. Appl. Phys. 45, 4B (2006)
- [20] H. Y. Liu and M. J. Steer, “Long-wavelength light emission and lasing from InAs/GaAs quantum dots covered by a GaAsSb strain-reducing layer” , Appl. Phys. Lett. 86, 143108 (2005)
- [21] Hitoshi Shimizu and Shanmugam Saravanan, “Buffer-material dependence of InAs quantum dots on GaAs substrate”, Appl. Phys. Lett. 88, 041119 (2006)
- [22] K. Suzuki and Y. Arakawa , “Near 1.3 $\mu$ m Emission at Room Temperature from InAsSb/GaAs Self-Assembled Quantum Dots on GaAs Substrates”, Appl. Phys. Stat. Sol. (b) 1, 139 (2001).
- [23] Iroyuki Miyoshia, Ryo Suzukia, Hidetoshi Amanoa, Yoshiji Horikoshi “Sb surface segregation effect on the phase separation of MBE grown InAsSb”, Journal of Crystal Growth 237–239 (2002)
- [24] B. P. Tinkham, B. R. Bennett, R. Magno, V. Shanabrook, and J. B. Boos “Growth of InAsSb-channel high electron mobility transistor structures”, J. Vac. Sci. Technol. B 234 (2005)

- [25] J. F. Chen, R. S. Hsiao, and W. D. Huang, "Strain relaxation and induced defects in InAsSb self-assembled quantum dots", *Appl. Phys. Lett.* 88, 233113(2006)
- [26] X. Yang, J. B. Heroux, L. F. Mei, and W. I. Wang "InGaAsNSb/GaAs quantum wells for 1.55  $\mu\text{m}$  lasers grown by molecular beam epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* 78, 26, 4086 (2001)
- [27] X. Yang, M. J. Jurkovic, J. B. Heroux, and W. I. Wang, "Molecular beam epitaxial growth of InGaAsN:Sb/GaAs quantum wells for long-wavelength semiconductor lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 75, 2, 178(1999)
- [28] J. C. Harmand, L. H. Li, G. Patriarche, and L. Travers, "GaInAs/GaAs quantum-well growth assisted by Sb surfactant: Toward 1.3  $\mu\text{m}$  emission", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 84, Num. 20, 3981(2004)
- [29] Takeo Kageyama, Tomoyuki Miyamoto, Masataka Ohta, et al. "Sb surfactant effect on GaInAs/GaAs highly strained quantum well lasers emitting at 1200 nm range grown by molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.* Vol 96, Num 1, Page44(2004)
- [30] H. Shimizu, K. Kumada, S. Uchiyama and A. Kasukawa, "1.2 $\mu\text{m}$  range GaInAs SQW lasers using Sb as surfactant", *IEEE, ELECTRONICS LETTERS*, Vol. 36, No. 16, 1379,(2000)
- [31] H. Shimizu, K. Kumada, S. Uchiyama and A. Kasukawa, "High performance CW 1.26 $\mu\text{m}$  GaInNAsSb-SOW and 1.20 $\mu\text{m}$  GaInAsSk-SQW ridge lasers", *IEEE, ELECTRONICS LETTERS*, Vol.36, No.20,1701(2000)
- [32] X. Yang, M.J. Jurkovic, J.B. Heroux and W.I. Wang, "Low threshold InGaAsN/GaAs single quantum well lasers grown by molecular beam epitaxy using Sb surfactant", *IEEE, ELECTRONICS LETTERS*, Vol.35, No.13, 1082(1999)
- [33] N. Grandjean, J. Massies, and V. H. Etgens "Delayed relaxation by surfactant action in highly strained III-V semiconductor epitaxial layers" *Phys. Rev. Lett.* 69, 5, 796 (1992)
- [34] Y. Sun, S. F. Cheng, G. Chen, R. F. Hicksa!, J. G. Cederberg and R. M. Biefeld, "The effect of antimony in the growth of indium arsenide quantum

- dots in gallium arsenide (001)", J. Appl. Phys. 97, 053503 (2005)
- [35] Tetsuya MATSUURA, Tomoyuki MIYAMOTO, Takeo KAGEYAMA, et al. "Surfactant Effect of Sb on GaInAs Quantum Dots Grown by Molecular Beam Epitaxy", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 5A, pp. L605–L607(2004)
- [36] 黃文鎬, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "InAsSb/GaAs 自聚式量子之電性研究" (2005).
- [37] 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).
- [38] Q. W. Mo, T. W. Fan, Q. Gong, J. Wu, and Z. G. Wang, "Effects of annealing on self-organized InAs quantum islands on GaAs(100)", Appl. Phys. Lett. 73, 24(1998)
- [39] R. Leon, Yong Kim, and C. Jagadish, "Effects of interdiffusion on the luminescence of InGaAs/GaAs quantum dots", Appl. Phys. Lett. 69, 13(1996)
- [40] 黃任鋒, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "InAs/GaAs 自聚式量子點摻入銻與氮之特性研究" (2005).
- [41] Chii-Chang Chen, Kun-Long Hsieh, and Gou-Chung Chi, "Effect of thermal annealing on high indium content InGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>GaN single quantum well structures", J. Appl. Phys. 89, 10(2001)
- [42] 汪炎宗, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "InAs/InGaAs 量子點應力鬆弛引發之缺陷對量子躍遷的影響" (2007).
- [43] Y. Uchida, H. Kakibayashi, and S. Goto, "Electrical and structural properties of dislocations confined in a InGaAs/GaAs heterostructure", J. Appl. Phys. 74, 6720 (1993).
- [44] C. M. A. Kapteyn, F. Heinrichsdorff, O. Stier, R. Heitz, M. Grundmann, N. D. Zakharov, and D. Bimberg, "Electron escape from InAs quantum dots", PHYSICAL REVIEW B. 60, 20 (1999).
- [45] 江振豪, 交通大學電子物理研究所碩士論文, "分子束磊晶成長 InAs/InGaAs 量子點之銻表面活化效應" (2006).