

國立彰化師範大學光電科技研究所

碩士論文

指導教授：郭艷光 教授

光纖通訊用 1300 nm 砷化鋁鎵銦量子井雷射之結構  
設計與特性分析

Design and Characterization of 1300-nm AlGaInAs  
Quantum-Well Lasers Applied in Optical Communications

研究生：謝尚衛 撰

中華民國九十四年六月

國立彰化師範大學光電科技研究所

碩士論文

研究生：謝尚衛

光纖通訊用 1300 nm 砷化鋁鎵銻量子井雷射之結構

設計與特性分析

Design and Characterization of 1300-nm AlGaInAs  
Quantum-Well Lasers Applied in Optical Communications

本論文業經審查及口試合格特此證明

論文考試委員會主席\_\_\_\_\_

委員：\_\_\_\_\_

指導教授：郭艷光博士\_\_\_\_\_

所 長：吳仲卿主任\_\_\_\_\_

中華民國九十四年六月

# 國立彰化師範大學

## 博碩士論文電子檔案上網授權書

(提供授權人裝釘於紙本論文審定頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在 國立彰化師範大學 光電科技 研究所

93 學年度第 二 學期取得 碩 士學位之論文。

論文題目：光纖通訊用 1300 nm 砷化鉛鎘銻量子井雷射之結構設計與特性分析

指導教授：郭艷光 教授

茲 同意將授權人擁有著作權之上列論文全文(含摘要), 授權本校圖書館及國家圖書館, 以電子檔上載網路等數位化方式, 提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

論文電子全文上載網路公開時間：

一、校內區域網路：

<input checked="" type="checkbox"/> 立刻公開	<input type="checkbox"/> 1 年後公開	<input type="checkbox"/> 2 年後公開	<input type="checkbox"/> 3 年後公開
<input type="checkbox"/> 4 年後公開	<input type="checkbox"/> 5 年後公開	<input type="checkbox"/> 不公開	

二、校外網際網路：

<input checked="" type="checkbox"/> 立刻公開	<input type="checkbox"/> 1 年後公開	<input type="checkbox"/> 2 年後公開	<input type="checkbox"/> 3 年後公開
<input type="checkbox"/> 4 年後公開	<input type="checkbox"/> 5 年後公開	<input type="checkbox"/> 不公開	

指導教授：郭艷光 教授

研究生(授權人)簽名：謝尚衛

(請親筆正楷簽名)

學 號：92252005

中 華 民 國 94 年 6 月 20 日

## 誌 謝

在此首先要感謝郭艷光老師在我就讀碩士班期間所給予的指導與協助。從大三寒假進入藍光雷射實驗室以來，郭艷光老師除了教導我們半導體方面的專業知識外，也傳授我們許多面對生活的方法及哲理，讓我們在面對生活或研究的挫敗時，能夠提起精神，積極地往前邁進。除此之外，我也要感謝實驗室的學長姊們，特別是詒安和志康學長，把我從一個懵懂的大三生帶入半導體和雷射的研究領域中。

當然，不可或缺的還要感謝同期畢業的育驊、漢義、秀芬和嫻琳等實驗室的學長和工作夥伴，讓這研究的路走來更加地充實而多彩多姿。特別是育驊學長和秀芬，一路陪伴我進入固態雷射、matlab 以及半導體雷射的領域中，在我遇到困難的時候能夠一起學習和突破。

我也要感謝俊榮、永政、銘偉和少甫等學弟妹的幫忙，特別是感謝銘偉學弟花了相當多的時間協助我完成光電年會以及物理年會等文章的內容，讓這些資訊能夠更完整地與其他研究先進們分享。也要感謝少甫學妹常常為這個實驗室帶來歡笑的氣氛，讓我們這些學長姊在研究的路上多了許多生活的樂趣。

在此，也要特別感謝劉柏挺老師在我們研究的過程中，不斷地為我們打氣以及鼓勵，讓我們始終保持著高昂的研究鬥志。同時也要感謝陳美玲老師在每一次的 group meeting 中陪伴著我們並提供寶貴的意見和方法。

最後我也要感謝我最親的家人：爸、媽、尚育和尚潔對我的支持和鼓勵，雖然從南下彰化唸大學以來彼此相聚的時間變短了，但我還是很感激你們對我的關心以及照顧，尤其是媽媽，還常常為了我和尚潔特別南下來為我們打氣。真的很感謝所有在我這求學過程中給予我幫助以及陪伴過我的人，謝謝你們。

# 目 錄

目錄 .....	I
中文摘要 .....	IV
英文摘要 .....	VI
圖表索引 .....	VIII
第一章 長波長光纖通訊雷射光源之材料特性及發展簡介.....	1
1.1 長波長光纖通訊之應用.....	2
1.1.1 長波長光纖通訊光源之設計.....	2
1.1.2 傳統 InGaAsP 材料系統之特性介紹.....	4
1.1.3 高載子侷限之 InAsP 材料系統之介紹.....	5
1.2 InGaAsN 與 AlGaInAs 材料系統之特性介紹.....	7
1.2.1 InGaAsN 材料系統 .....	7
1.2.2 AlGaInAs 材料系統.....	9
參考文獻 .....	22
第二章 長波長光纖通訊 1.3- $\mu\text{m}$ 雷射光源之活性層材料設計與分	

析.....	26
2.1 Lastip 數值模擬軟體簡介.....	27
2.2 InGaAsP (InAsP)活性層材料系統的設計分析與比較...28	
2.3 InGaAsN 活性層材料系統的設計分析與比較.....	35
2.4 AlGaInAs 活性層材料系統的設計分析與比較.....	40
2.5 三大材料系統的比較分析及結論.....	45
參考文獻 .....	48
第三章	
1.3- $\mu\text{m}$ AlGaInAs 與 InGaAsN 雷射特性之探討 .....	53
3.1 電子溢流對 AlGaInAs 雷射系統的影響與介紹.....	53
3.2 AlGaInAs 雷射特性之探討 .....	59
3.2.1 AlGaInAs 雷射系統模擬結構之介紹.....	59
3.2.2 模擬結果與分析.....	62
3.3 應力補償式 barrier 對 InGaAsN 雷射系統的影響與介紹	
.....	76
3.4 InGaAsN 雷射特性之探討 .....	81
3.4.1 InGaAsN 雷射系統模擬結構之介紹.....	81

3.4.2 模擬結果與分析.....	82
參考文獻 .....	88
第四章 結論 .....	91
附錄一 已發表之相關論文 .....	93



## 中文摘要

在光纖通信的系統中，1.3 和 1.55  $\mu\text{m}$  的雷射光源是不可或缺的關鍵性元件，因為在石英光纖的光傳遞中，他們分別提供了最低的光色散以及最小的能量損失。然而，傳統的 1.3 以及 1.55  $\mu\text{m}$  的通訊用雷射二極體主要是以 InGaAsP 為主要材料，雖然其元件的光電特性良好，但由於抗溫性較差，所以往往需要 TE cooler 來降低其操作溫度，因而增加成本的支出。因此，近年來以 AlGaInAs 以及 InGaAsN 材料為主的雷射二極體在不需要主動式散熱板的情況下，就可以得到優異的光電特性，故有逐漸取代 InGaAsP 的趨勢。本文即以 AlGaInAs 此材料為主軸，並輔以介紹 InGaAsN 以及 InGaAsP (InAsP) 等材料特性，來做一系列的結構設計探討與雷射特性分析。

在第一章中我首先對長波長光纖通訊的三大材料系統：InGaAsP (InAsP)、AlGaInAs 以及 InGaAsN 做相關的材料特性以及參數簡介，並介紹這三大材料系統目前的發展現況。

在第二章中我蒐集了相關的文獻資料，對發光在 1.3  $\mu\text{m}$  的這三大材料系統做一系列的材料增益以及自發輻射率的分析比較，並統整不同的活性層結構設計對其發光特性所造成的影響。

在第三章中，我利用加拿大 Crosslight 公司所發展的 Lastip 數值模擬軟體來探討電子阻礙層對 AlGaInAs 雷射系統性能的影響。此外在

InGaAsN 材料系統方面，我亦探討應力補償式 barrier 對其元件特性所造成的影響。

最後在第四章中，我則綜合前面三章的分析結果做個簡單的綜整與回顧，並提出較佳的 AlGaInAs 與 InGaAsN 的雷射結構設計，以提供給學界先進以及長晶製程者作為參考。

## ABSTRACT

The 1.3- and 1.55- $\mu\text{m}$  semiconductor lasers are important for application in optical interconnection and long-distance optical fiber communications because they provide the lowest dispersion and loss in silica fiber respectively. Although the traditional InGaAsP/InP strained multiple quantum-well lasers have been studied for a long time and applied in many areas, they still suffer from problems of relatively high temperature dependence. Therefore, it does not retain low temperature sensitivity of threshold current and high slope efficiency in the absence of a thermoelectric cooler when the InGaAsP/InP laser systems are operated at elevated temperatures. In recent years, there are two novel material systems utilized to fabricate the 1.3- and 1.55- $\mu\text{m}$  semiconductor lasers. One of the new material systems is AlGaInAs/InP and the other is InGaAsN/GaAs. Both the AlGaInAs/InP and InGaAsN/GaAs lasers show better performance and lower temperature dependence than the conventional InGaAsP/InP lasers, enabling uncooled continuous-wave operation at high ambient temperatures. In this work, I present a complete study for the AlGaInAs material system. Moreover, the InGaAsN and InGaAsP (InAsP) material systems are also systematically analyzed at the same time.

In chapter 1, I first introduce the optical properties and physical parameters of the three material systems, InGaAsP (InAsP), AlGaInAs, and InGaAsN, which are utilized to fabricate the 1.3- $\mu\text{m}$  semiconductor

lasers. Then, the development status of these material systems are also reviewed and described.

In chapter 2, the material gain performances and spontaneous emission rates of these 1.3- $\mu\text{m}$  semiconductor material systems, obtained from real devices fabricated by different researchers, are systematically analyzed and compared. Furthermore, the effect of design of active region on optical properties of each material system is also investigated in this chapter.

In chapter 3, optical properties of a 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs/InP laser structure with an electron stopper layer are studied numerically with the Lastip simulation program developed by Crosslight Inc. On the other hand, the effect of strain compensating barrier layers on the laser performance of InGaAsN/GaAs laser system is also investigated in detail.

Finally, in chapter 4, based on the preceding simulation results and analyses, I make a brief summary and provide the optimized designs of laser structures for 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs and InGaAsN material systems. It is my hope that the researches in this thesis may be helpful to the researchers and crystal growers.

## 圖表索引

圖1.1	在石英光纖中, loss 對 wavelength 的關係圖。 .....	3
圖1.2	在石英光纖中, 材料色散係數對波長的關係圖。 .....	4
圖1.3	InGaAsP 材料系統活性層能帶示意圖。 .....	5
圖1.4	InAsP 雷射系統之 light-current characteristics 性能示意圖。 .....	6
圖1.5	InGaAsN 材料系統活性層能帶示意圖。 .....	8
圖1.6	AlGaInAs 量子井能帶結構示意圖。 .....	10
圖1.7	早期 AlGaInAs 材料系統 band gap energy 對組成成分的關係圖。 .....	11
圖1.8	早期 AlGaInAs 量子井雷射之活性層結構設計。 .....	13
圖1.9	早期 AlGaInAs 量子井雷射之 L-I curve 性能圖。 .....	14
圖1.10	Ridge-waveguide AlGaInAs 量子井雷射之結構設計圖。 .....	15
圖1.11	Ridge-waveguide AlGaInAs 量子井雷射之折射率示意圖。 .....	15
圖1.12	近期 AlGaInAs 量子井雷射之 L-I curve 雷射性能圖。 .....	16
圖1.13	不同時期 AlGaInAs 材料系統的自發輻射率比較圖。 .....	18
圖1.14	極高功率 AlGaInAs 雷射系統的 L-I 性能圖。 .....	19
圖1.15	脈衝式 InGaAsN 雷射系統的 L-I 性能圖。 .....	20
圖1.16	長波長光纖通訊三大材料系統 peak material gain 與 carrier density 之間的關係。 .....	21
圖2.1	半導體側射型雷射的結構示意圖。 .....	27

圖2.2	InGaAsP (InAsP)活性層材料系統的自發輻射率比較圖。 .....	32
圖2.3	InGaAsP (InAsP)活性層材料系統的增益比較圖。 .....	33
圖2.4	InAsP 與 InGaAsP 活性層材料系統的尖峰增益比較圖。 .....	34
圖2.5	InGaAsN 活性層材料系統的自發輻射率比較圖。 .....	39
圖2.6	InGaAsN 活性層材料系統的增益比較圖。 .....	39
圖2.7	AlGaInAs 活性層材料系統的自發輻射率比較圖。 .....	43
圖2.8	AlGaInAs 活性層材料系統的增益比較圖。 .....	43
圖2.9	材料(1)~(4)之 peak material gain 與溫度之間的比較關係圖。 ..	44
圖2.10	三大活性層材料系統 peak material gain 與 carrier density 之間的 比較關係圖。 .....	46
圖3.1	MQB 與傳統 SCH 結構的導電帶示意圖。 .....	54
圖3.2	MQB 與傳統 SCH 結構的臨界電流密度比較圖。 .....	54
圖3.3	With 與 without p-AlInAs 電子阻礙層的導電帶結構示意圖。 ..	56
圖3.4	With 與 without p-AlInAs 電子阻礙層的特性溫度比較圖。 ....	57
圖3.5	With 與 without p-AlInAs 電子阻礙層的斜率效能比較圖。 .....	58
圖3.6	With p-type AlInAs 電子阻礙層雷射系統的 L-I 性能圖。 .....	59
圖3.7	1.3- $\mu\text{m}$ AlGaInAs-InP 量子井雷射之結構設計圖。 .....	60
圖3.8	1.3- $\mu\text{m}$ AlGaInAs 量子井雷射之(a)模擬與(b)實驗性能圖。 ....	62
圖3.9	在不同操作溫度下，所模擬 AlGaInAs 量子井雷射之內部光學 損失係數值。 .....	63
圖3.10	(a) 1.3- $\mu\text{m}$ InGaAsP 與(b) 1.5- $\mu\text{m}$ InGaAs 量子井雷射之內部光	

	學損失係數值與溫度的關係。 .....	64
圖3.11	在原始雷射結構下，所模擬之溢電流百分比與操作溫度以及量子井個數之間的關係圖。 .....	65
圖3.12	在原始雷射結構五個量子井的情況下，總輸入電流與溢電流值的關係圖。 .....	66
圖3.13	在原始雷射結構下加入 p-type $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$ 電子阻礙層的導電帶能帶示意圖。 .....	67
圖3.14	變化不同寬度的 p-type $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$ ESL 的結構設計下，其雷射性能的比較分析圖。 .....	67
圖3.15	變化 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$ 電子阻礙層不同的 p-doping 摻雜濃度時，其雷射性能的比較分析圖。 .....	68
圖3.16	變化 p-type $\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ 電子阻礙層不同的鋁含量時，其雷射性能的比較分析圖。 .....	69
圖3.17	涵蓋最佳化 p-type $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$ 電子阻礙層的能帶示意圖。 .....	70
圖3.18	不同的操作溫度下，有無 p-type $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$ 電子阻礙層的雷射性能比較圖。 .....	71
圖3.19	在變化不同的活性層成分時(original active region 與 number(4))，其臨界電流密度與溫度的關係圖。 .....	73
圖3.20	在變化不同的活性層成分時(original active region 與 number(4))，其斜率效能與溫度的關係圖。 .....	73

圖3.21	在加上電子阻礙層的情況下，以原始活性層結構設計以及材料(4)為 active region 的斜率效能分析圖	74
圖3.22	在變化共振腔長度以及量子井個數的情況下，以材料(4)為 active region 的臨界電流密度分析圖	75
圖3.23	在變化共振腔長度以及量子井個數的情況下，以材料(4)為 active region 的斜率效能分析圖	76
圖3.24	Tansu 等人所設計應用在 InGaAsN 雷射系統的 strain-compensated active region 能帶示意圖	77
圖3.25	在變化共振腔長的情況下，涵蓋與未加上應力補償式 barrier 結構的特性溫度比較圖	78
圖3.26	在固定共振腔長的情況下，涵蓋與未加上應力補償式 barrier 結構的臨界電流密度比較圖	79
圖3.27	Caliman 等人所設計的 high performance InGaAsN 雷射系統之 light-current characteristics 性能示意圖	80
圖3.28	1.3- $\mu\text{m}$ InGaAsN-GaAs 量子井雷射之結構設計圖	81
圖3.29	1.3- $\mu\text{m}$ InGaAsN 量子井雷射之(a)模擬與(b)實驗性能圖	82
圖3.30	在原始的雷射結構下加入應力補償式 barrier ( $\text{GaAs}_{0.99}\text{N}_{0.01}$ ) 的能帶示意圖	83
圖3.31	利用應力補償式與原始活性層結構設計所得到的雷射性能比較圖	84
圖3.32	利用應力補償式與原始雷射結構所得到的受激放射率與 Auger	



	再結合率比較圖。 .....	85
圖3.33	利用應力補償式雷射結構所模擬出來的變溫 L-I curve 性能圖。 .....	86
圖3.34	利用應力補償式雷射結構所得到的臨界電流密度與斜率效能數值。 .....	87
表1.1	$\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ 的 band gap energy 與應力對含量的關係式 ...	12
表1.2	不同時期 AlGaInAs 材料系統的活性層結構設計 (1989–2004) .....	17
表1.3	不同時期 AlGaInAs 材料系統的活性層應力結構設計。 .....	17
表1.4	長波長光纖通訊三大材料系統的活性層結構設計。 .....	20
表2.1	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 相關的二元半導體化合物物理參數值 .....	29
表2.2	五種典型的 InGaAsP (InAsP)材料系統的活性層結構設計 ...	31
表2.3	五種典型的 InGaAsP (InAsP)活性層應力結構設計對照表 ...	32
表2.4	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ 相關的二元半導體化合物物理參數值 .....	36
表2.5	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ 能帶間隙式中的各項物理參數值 .....	37
表2.6	五種典型的 InGaAsN 材料系統的活性層結構設計。 .....	37
表2.7	五種典型的 InGaAsN 活性層應力結構設計對照表 .....	38
表2.8	$\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ 相關的二元半導體化合物物理參數值 .....	41
表2.9	五種典型的 AlGaInAs 材料系統的活性層結構設計。 .....	42
表2.10	五種典型的 AlGaInAs 活性層應力結構設計對照表 .....	42
表2.11	三大活性層材料系統的最佳化結構設計。 .....	45

表2.12	長波長光纖通訊雷射光源使用材料的比較 .....	47
表3.1	MQB 與傳統 SCH 結構的特性溫度對照表 .....	55
表3.2	所模擬 AlGaInAs 雷射系統之詳細結構對照表 .....	61
表3.3	原始與最佳化活性層結構設計之對照表 .....	72

# 第一章 長波長光纖通訊雷射光源之材料特性及發展簡介

在長波長光纖通信的系統中，1.3 和 1.55  $\mu\text{m}$  的雷射光源一直扮演著不可或缺的關鍵性元件，因為在石英光纖(silica fiber)的光傳遞中，他們分別提供了最低的光色散(dispersion)以及最小的能量損失(loss)。在傳統的 1.3 以及 1.55  $\mu\text{m}$  的通訊用雷射二極體主要是以 InGaAsP 為主要材料，雖然其元件的光電特性良好，但由於導電帶(conduction band)的電子侷限較差，雷射效能容易受到溫度的影響，所以往往需要 thermoelectric cooler 來降低其操作溫度，因而增加成本的支出。因此，尋求新的材料系統以達到在不需要主動式散熱板的情況下，就可以得到優異的光電特性成為此方面學者們研究的焦點之一。近年來相關的研究群體提出幾種不同的材料系統來試著取代傳統的 InGaAsP 雷射結構，其中包含三元的 InAsP 材料系統以及另外兩種具有高 conduction band offset 的 AlGaInAs 與 InGaAsN 材料結構。

在本章的內容中，我將以 AlGaInAs 此材料系統為主軸，並針對相關的 InGaAsP (InAsP)與 InGaAsN 材料系統來介紹其特性與發展現況。更進一步地我將根據所蒐集到的參考資料來對這三大材料系統做簡單的分析與比較。

## 1.1 長波長光纖通訊之應用

由於計算機之普及以及網路通訊之發達，人們對於光纖資料傳遞的需求亦日趨提升。在長波長的光纖通訊系統中，由於 1.3 以及 1.55  $\mu\text{m}$  的半導體雷射光源分別擁有較低的光色散以及損失等優勢，因此在中長程光纖通訊上一直扮演著相當重要的角色。然而對於發光在這兩個波段的半導體雷射光源而言，材料的選擇一直是被研究探討的課題。從早期傳統的 InGaAsP 材料系統發展至今日高特性溫度(characteristic temperature)的 InAsP、AlGaInAs 以及 InGaAsN 雷射結構，我們可以明顯地觀察出長波長光纖通訊雷射光源的快速發展與備受重視。

### 1.1.1 長波長光纖通訊光源之設計

為了讓光在傳遞的過程中損失達到最低，波長的選擇就顯得格外地重要。下圖 1.1 為在石英光纖中，損失對波長的關係圖[1]。從圖中我們可以觀察到，石英光纖中的光損失主要是由紅外線吸收(infrared absorption)以及 Rayleigh 散射(Rayleigh scattering)這兩個機制所造成的。很明顯地從圖中我們可以發現到，當傳輸的光波長為 1.3 以及 1.55  $\mu\text{m}$  時，會有一個極低的損失窗，特別是在傳輸波長為 1.55  $\mu\text{m}$  時，其損失將低至每公里 0.2 dB。因此，在長波長光纖通訊傳輸波長的選擇上，1.3 以及 1.55  $\mu\text{m}$  這兩個波段附近的雷射光源設計便顯得相當地重要及值得探討。

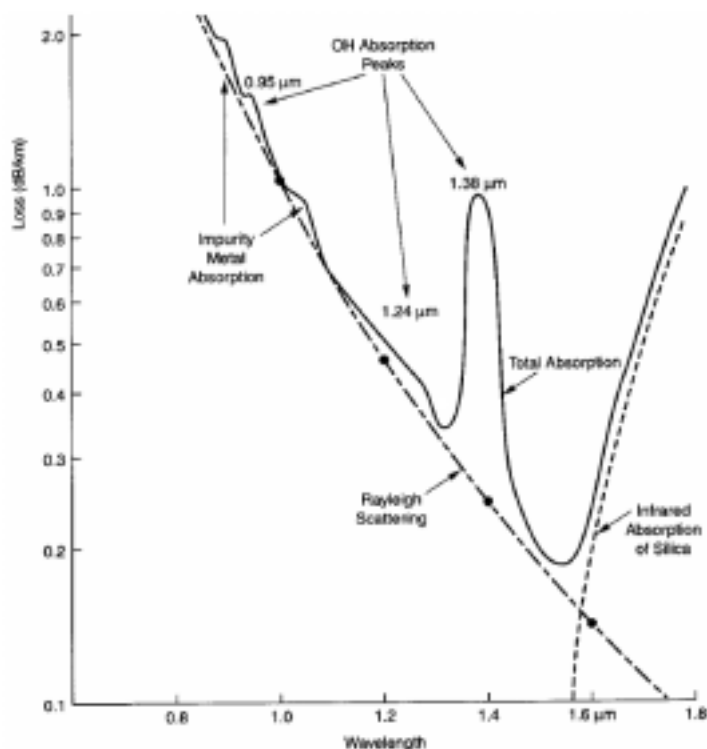


圖 1.1、在石英光纖中，loss 對 wavelength 的關係圖。

除了探討光在傳遞中的損失外，保持訊號波形的完整性也是另一個必須考量的重要因素。圖 1.2 為在石英光纖中，材料色散係數對波長的關係圖[2]。從圖中我們可以知道在石英光纖中，不同波長的光在其中傳遞會有不同的色散程度，若色散程度過大的話，會容易造成傳輸訊號的波形變形，因而限制了傳輸的距離。圖 1.2 顯示當傳輸波長在 1.3  $\mu\text{m}$  附近時，其材料色散係數值為零。因此，雖然從前面光損失的分析中我們可以知道，傳輸波長為 1.3  $\mu\text{m}$  的損失值比 1.55  $\mu\text{m}$  來得大，但由於其色散程度最低，訊號的波形在經過長距離的傳遞後最容易保持其完整性，因此仍然被普遍用來當作中長程光纖通訊的傳輸波長。

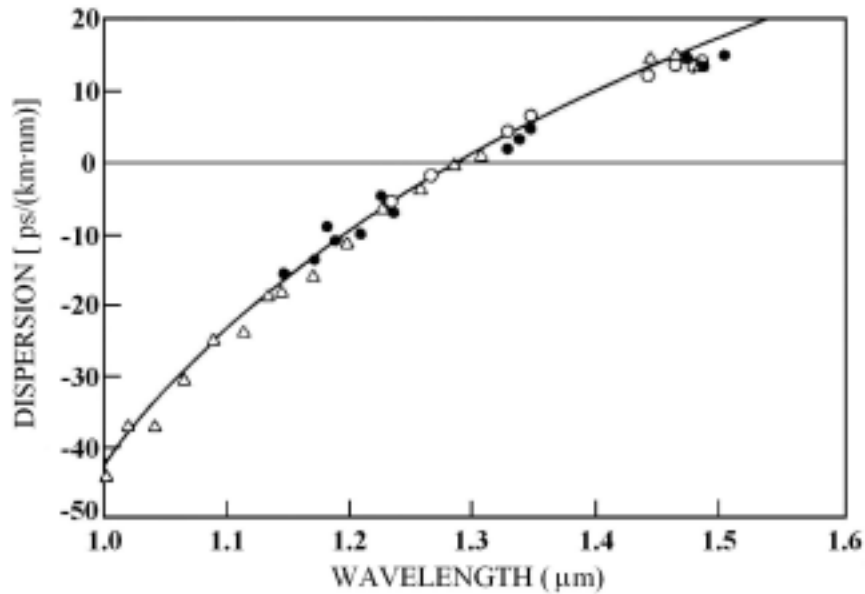


圖 1.2、在石英光纖中，材料色散係數對波長的關係圖。

### 1.1.2 傳統 InGaAsP 材料系統之特性介紹

傳統應用於長波長光纖通訊雷射光源的材料為 InGaAsP 材料系統，其基板為 InP。底下圖 1.3 是摘錄自 Kondow 等人發表論文中的 InGaAsP 活性層(active layer)能帶示意圖[3]，其中 well 的成分為  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ ，而 barrier 的成分則為  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}_{0.2}\text{P}_{0.8}$ 。從圖中我們可以觀察到此 InGaAsP 材料系統的導電帶井深( $\Delta E_c$ )為 100 meV；而價電帶的井深( $\Delta E_v$ )則為 150 meV，是故其導電帶與價電帶的井深比(band offset ratio)為 100 : 150，即  $\Delta E_c : \Delta E_v = 0.4 : 0.6$ ，其中( $\Delta E_c + \Delta E_v$ )的和被稱之為  $\Delta E_{go}$ 。

由於 InGaAsP 材料系統擁有較小的 conduction band offset ( $\Delta E_c =$

$0.4\Delta E_g$ ) [4], 因此無法有效地將導電帶的電子侷限於活性層量子井中而容易造成溢流(overflow)的現象, 故其雷射在高溫操作時, 其效能會大為衰減, 亦即對熱的敏感度(temperature sensitivities)相當地顯著。

有鑒於前述 InGaAsP 雷射系統的熱效應嚴重, 故往往在其高溫操作時, 會利用熱電冷卻裝置(thermoelectric cooler)來提昇其雷射性能, 因而增加成本的支出。因此尋找新的設計方式與材料系統使雷射性能能在缺乏熱電冷卻裝置的高溫操作環境下, 依舊保持低的熱感度, 亦即高的斜率效能(slope efficiency)與低的臨界電流(threshold current), 成為近年來被研究探討的課題之一。

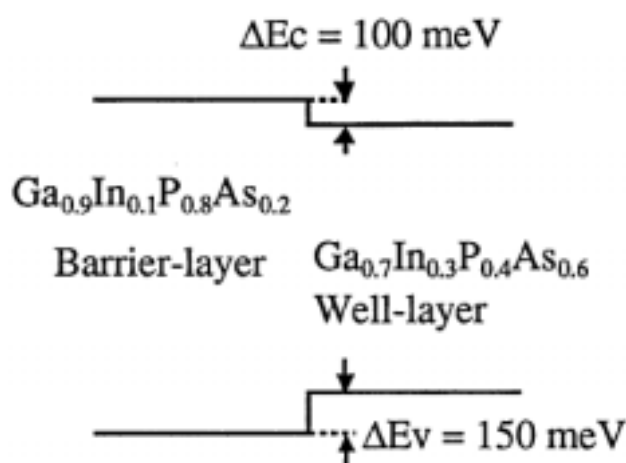


圖 1.3、InGaAsP 材料系統活性層能帶示意圖。

### 1.1.3 高載子侷限之 InAsP 材料系統之介紹

從上一節的介紹中, 我們可以知道傳統 InGaAsP 材料系統由於其 band offset ratio 過低, 所以容易造成電子溢流的現象, 因此其雷射性能

會嚴重受到溫度的影響。然而，從 Zhang 等人所發表的文章內容中，我們可以知道具有應力的 InAsP 材料系統(strained InAsP material system)擁有較傳統 InGaAsP 材料系統較高的 band offset ratio，其值為  $\Delta E_c = 0.65\Delta E_g$  [5]。

底下圖 1.4 為 1.3- $\mu\text{m}$  InAsP 雷射系統的 light-current characteristics 性能示意圖，其中 well 的成分為具有 1.4% 高壓縮應力 (highly compressive strain) 的 InAsP 材料結構，而其 ridge 以及共振腔長 (cavity length) 的寬度則分別為 3 與 300  $\mu\text{m}$  [5]。

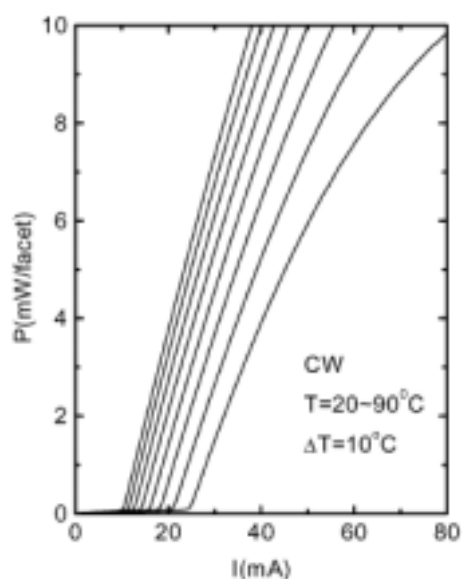


圖 1.4、InAsP 雷射系統之 light-current characteristics 性能示意圖。

在此，為了要與前述傳統 InGaAsP 的雷射效能做比較，將在下面的敘述中引進特性溫度來分析探討。底下式(1)為一般用來研究雷射系統臨界電流對操作溫度 (operating temperature) 的關係式：



$$I_{th}(T) = I_0 \exp(T / T_0) , \quad (1)$$

其中  $I_0$  為一常數值 (constant)，而  $T_0$  則被定義成特性溫度，其值大小為用來判別臨界電流與操作溫度的相關程度。從上式中我們可以觀察到，當特性溫度  $T_0$  值愈大時，其臨界電流愈不容易受到操作溫度的影響，因此其雷射效能較容易保持穩定。一般來說，傳統 InGaAsP 雷射系統的特性溫度都大約落在 50 至 60 K 附近[6]，然而從 Zhang 等人所發表的文章敘述中[5]，我們可以知道圖 1.4 所呈現的 InAsP 雷射系統的 light-current characteristics，其特性溫度值為 81~92 K，較傳統 InGaAsP 雷射系統的特性溫度值要高出許多，因此其雷射性能對操作溫度也較為穩定。

## 1.2 InGaAsN 與 AlGaInAs 材料系統之特性介紹

### 1.2.1 InGaAsN 材料系統

除了利用前述三元的 InAsP 材料系統來增進長波長光纖通訊雷射光源的性能外，另外兩種具有高 conduction band offset 以及高特性溫度的材料系統在近幾年中也廣為受到矚目。

在這一節中，我將先介紹具有極高 conduction band offset ( $\Delta E_c = 0.79\Delta E_g$ ) 的 InGaAsN 材料系統[7]。底下圖 1.5 為依據 Dumitras 等人的文章內容所描繪的 InGaAsN 材料系統活性層能帶示意圖[7]，其中 well 的成分為  $\text{In}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{As}_{0.983}\text{N}_{0.017}$ ，而 barrier 的成分則為 GaAs。

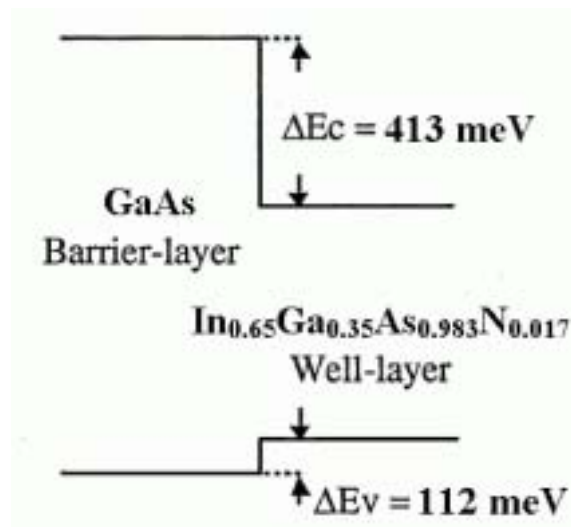


圖 1.5、InGaAsN 材料系統活性層能帶示意圖。

從上圖中我們可以觀察到，InGaAsN 材料系統擁有相當大的 $\Delta E_c$ 值，其大小大略是傳統 InGaAsP 材料系統 $\Delta E_c$ 值(100 meV)的四倍高，因此其導電帶活性層的量子井能夠有效地將電子侷限於井內而不容易產生溢流的現象。故相對於傳統 InGaAsP 材料系統而言，InGaAsN 材料系統較能夠在高溫下進行穩定的雷射操作，且其特性溫度  $T_0$  值在連續波(continue wave)的雷射操作下可達到 70~110 K [8]，而在脈衝式雷射(pulse laser)的操作下更可高達 200 K 以上[8]。

InGaAsN 材料系統除了有上述所介紹的優點外，還具有可利用 low-cost 的 GaAs 來做為基板(substrate)的優勢。由於傳統的 InGaAsP、InAsP 以及 AlGaInAs(將在下一節中做詳細的介紹)等長波長雷射結構都必須利用 InP 來做為基板，因此利用 GaAs 做為基板的 InGaAsN 材料系統可降低成本的支出。

除此之外，利用 GaAs 為基板的 InGaAsN 材料系統也同時擁有可直接利用 AlGaAs 來製作 VCSEL(vertical-cavity surface emitting laser)雷射系統 distributed Bragg reflectors 等的優勢[9]。

雖然 InGaAsN 材料系統擁有以上眾多的優勢，然而由於其氮(nitrogen)原子的大小比其他三者小得許多，因此摻入 N 於長晶的過程中容易造成晶體的缺陷，因此如何在製程中得到較完美的晶體仍是一門值得探討的課題。

### 1.2.2 AlGaInAs 材料系統

在本節中，將要介紹另一個同樣具有高 conduction band offset 的 AlGaInAs 材料系統與其相關的特性。

首先我將針對 AlGaInAs 此材料系統的 band offset ratio (BOR)做詳細的介紹。從 1.1.2 節的介紹中我們可以知道所謂的 band offset ratio 即是指量子井中導電帶井深對價電帶井深的比，即 $\Delta E_c : \Delta E_v$ ，而對於傳統的 InGaAsP 材料系統而言，其比為 0.4 : 0.6，因此容易造成溢電流的現象。然而從眾多文獻的收集中[10]，我們可以明確地知道對於 AlGaInAs 此材料系統其 band offset ratio 為 0.72 : 0.28，因此在高溫操作時，AlGaInAs 材料系統在導電帶有較高的井深可以侷限更多的載子，所以電子溢流的情況較傳統 InGaAsP 材料系統緩和減少了許多，故其發光效率也較 InGaAsP 材料系統提昇了不少。

底下圖 1.6 為摘錄自 Kazarinov 等人文章中所呈現的 AlGaInAs 量

子井能帶結構示意圖[11]。從圖中我們可以看出此 AlGaInAs 材料系統的 conduction band offset  $\Delta E_c$  值為 300 meV，為傳統 InGaAsP 材料系統  $\Delta E_c$  值(100 meV)的三倍高。此外我們也可以計算出此 AlGaInAs 材料系統的 band offset ratio ( $\Delta E_c : \Delta E_v$ )為 0.3 eV/0.12 eV (其值為 2.5)，與一般文獻上所認知的 0.72/0.28 (其值為 2.571)相當地吻合。最後從圖中我們也可以算出電子在導電帶  $n = 1$  的能階躍遷至價電帶重電洞  $n = 1$  的發光波長，其值為 1240/0.932，約等於 1330 (nm)。

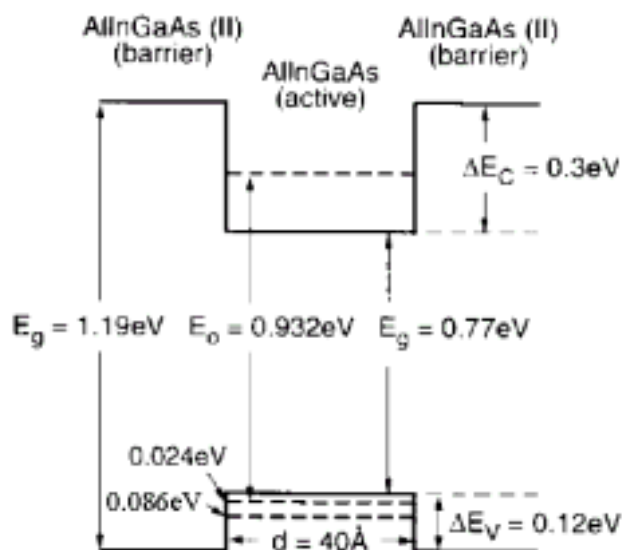


圖 1.6、AlGaInAs 量子井能帶結構示意圖。

接下來所要探討的是 AlGaInAs 材料系統的 band gap energy 對組成成分的關係。在此首先要引進彎曲參數(bowing parameter)的定義與物理意義。

一個多元化合物半導體的能帶間隙  $E_g$  值通常能用幾個二元或三元的化合物半導體  $E_g$  值依成分所組合疊加起來，如下式(2)所示：

$$E_g(A_{1-x}B_x) = (1-x)E_g(A) + xE_g(B) - x(1-x)b \quad (2)$$

其中二次項的係數  $b$  值便是一般學術界所稱謂的彎曲參數，其單位為 eV。在早期 1988 年有關 AlGaInAs 材料系統彎曲參數  $b$  值的研究可由 Praseuth 等人文章內容所做的實驗分析一探究竟[12]，如底下圖 1.7 所示：

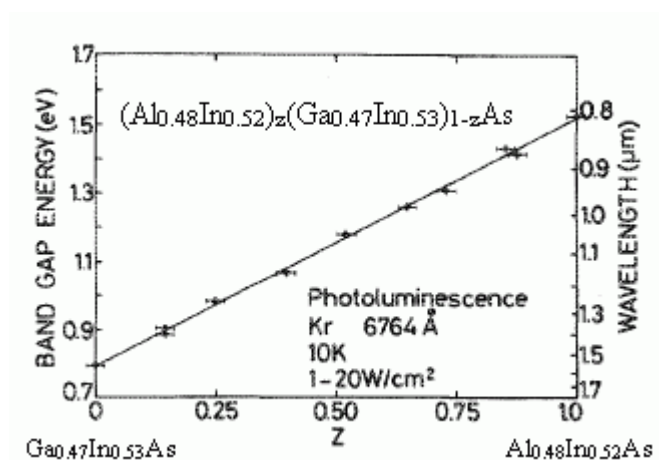


圖 1.7、早期 AlGaInAs 材料系統 band gap energy 對組成成分的關係圖。

從圖中我們可以觀察到此 AlGaInAs 四元的材料系統，其 band gap energy 可用兩個三元的 AlGaInAs 材料結構 ( $Al_{0.48}In_{0.52}As$  與  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ ) 疊加來表示，即  $E_g(z) = z \times E_g(Al_{0.48}In_{0.52}As) + (1-z) \times E_g(Ga_{0.47}In_{0.53}As)$ 。從上圖中我們觀察不到其二次項的係數，故此四元 AlGaInAs 材料系統的 band gap energy 值與組成成分是呈線性的函數關係，因此其彎曲參數  $b$  值為零。

然而我們從 2004 年 Akram 等人的文獻中可以觀察到現今 AlGaInAs 材料系統的彎曲參數  $b$  值已經有了新的認知[13]，如下式(3)所示，其二次項的係數分別是 0.51 與 0.65，共有兩個 bowing parameters

$$E_g(\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}) = xE_g(\text{GaAs})+yE_g(\text{AlAs})+(1-x-y)E_g(\text{InAs})+0.51x(x-1)+0.65y(y-1) \quad (3)$$

在接下來的內容中將要針對其 band gap energy 以及應力(stress)和成分之間的關係做更進一步的分析與探討。底下表 1.1 為 AlGaInAs 的 band gap energy 與應力對 In 含量以及 Al 含量的關係式[14]：

表 1.1、 $\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$  的 band gap energy 與應力對含量的關係式。

Indium composition	Band gap energy	Strain percentage
$1-x-y = 0.82$	$E_g = 0.526+1.516y$	2% compressive strain
$1-x-y = 0.74$	$E_g = 0.572+1.517y$	1.5% compressive strain
$1-x-y = 0.67$	$E_g = 0.638+1.532y$	1% compressive strain
$1-x-y = 0.53$	$E_g = 0.75+1.548y$	lattice matched
$1-x-y = 0.38$	$E_g = 0.79+1.568y$	1% tensile strain
$1-x-y = 0.307$	$E_g = 0.81+1.578y$	1.5% tensile strain
$1-x-y = 0.225$	$E_g = 0.83+1.588y$	2% tensile strain

從表中我們可以很明確地知道不同的 In 含量會造成  $\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$  材料系統不同的應力百分比(strain percentage)值 當 In 含量( $1-x-y$ )佔 0.53 時，AlGaInAs 材料系統晶格常數是與基板 InP 匹配而不含應力的。反之，當 In 含量大於以及小於 0.53 時，則會由於晶格常數與基板不匹配

而分別產生壓縮(compressive)與伸張(tensile)應力。此外在不同的 In 含量時，AlGaInAs 材料系統的 band gap energy 也會隨著不同的數學函式而與 Al 含量成線性變化。

介紹完 AlGaInAs 材料系統相關的物理特性後，接下來將要針對此材料系統的發展歷史及現況做進一步的介紹。

從 Ash 等人所發表的文章中，我們可以一窺早期在 1989 年有關於 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 量子井雷射的發展概況[15]。Ash 等人所設計的雷射結構其活性層為五個 unstrained 的  $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.36}\text{In}_{0.52}\text{As}$  量子井(厚度為 10 nm)以及四個夾雜在井中間的  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.52}\text{As}$  的 unstrained barriers 構造 (厚度為 7 nm)，其圖示如下[15]：

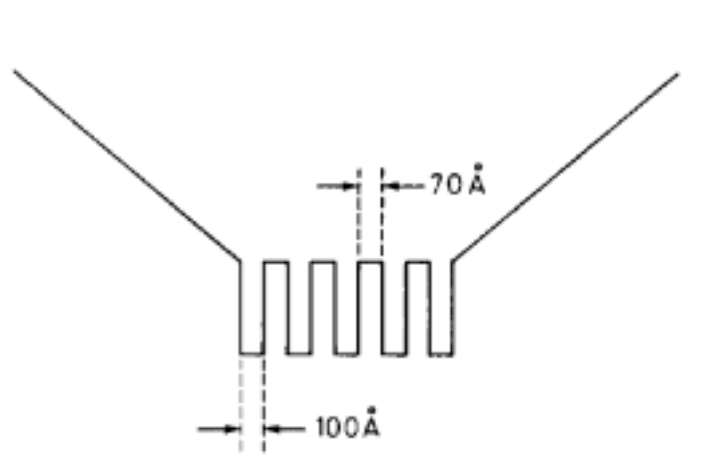


圖 1.8、早期 AlGaInAs 量子井雷射之活性層結構設計。

從上圖中我們亦可觀察到，在量子井結構的兩旁並非是傳統的 SCH (separate confinement hetero-structure)結構，而是具有可得到較小遠場發散角的 GRIN-SCH (graded-index separate confinement hetero-structure)

結構，其在室溫 25 °C 下的實驗 L-I (light-current characteristics) curve 則如下圖 1.9 所示(在連續波的操作下) [15]。

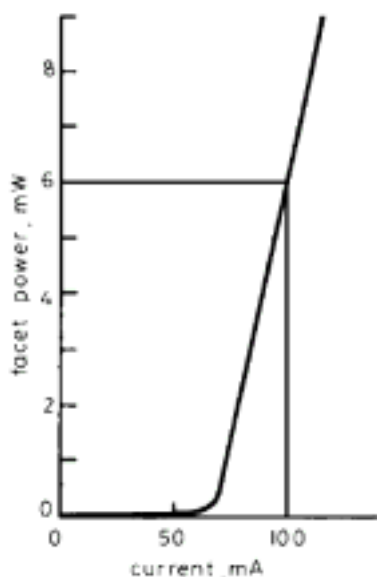


圖 1.9、早期 AlGaInAs 量子井雷射之 L-I curve 性能圖。

從上圖中我們可以觀察到，此雷射系統在室溫操作下其臨界電流與斜率效能分別為 65 mA 以及 0.06 W/A。

介紹完早期 AlGaInAs 量子井雷射的雷射性能後，在接下來的內容中我將會對於 AlGaInAs 材料系統近期的發展現況做進一步的描述與分析。底下圖 1.10 與圖 1.11 為 2001 年 Selmic 等人所設計的 ridge-waveguide 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 多量子井雷射的結構以及折射率  $n$  隨著磊晶方向  $x$  的示意圖[14]。

Selmic 等人所設計的雷射結構其活性層為五個含有 1.44% 壓縮應力的  $\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$  量子井(厚度為 5 nm)以及夾雜在量子井中間



的四個  $\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$  unstrained barriers 結構(厚度為 10 nm), 如下圖 1.11 所示。

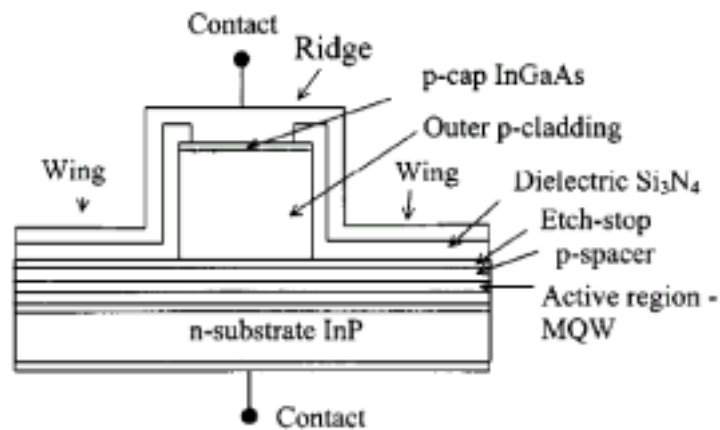


圖 1.10、Ridge-waveguide AlGaInAs 量子井雷射之結構設計圖。

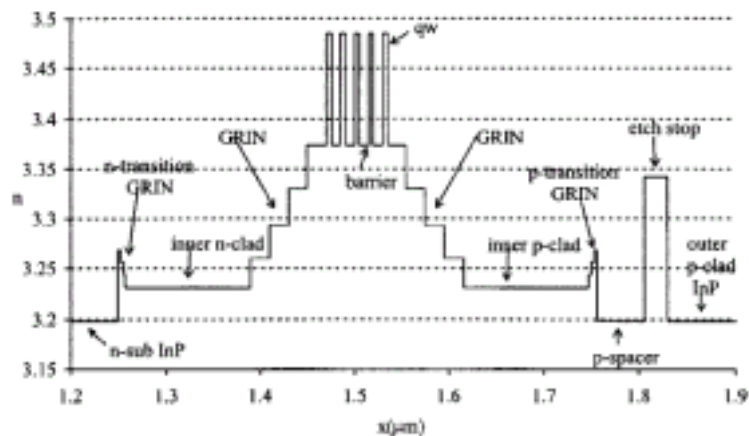


圖 1.11、Ridge-waveguide AlGaInAs 量子井雷射之折射率示意圖。

此外從圖 1.11 中我們亦可觀察到，在活性層兩旁所設計的部分仍具有可得到較小遠場發散角的 GRIN-SCH 階梯式結構，因此，不論是從早期 1989 年 Ash 等人所設計的雷射結構，或是從近期 2001 年 Selmic 等人所提出的結構設計，我們都可以觀察到 GRIN-SCH 結構對

長波長 AlGaInAs 雷射系統扮演著不可或缺的角色。

接下來則是敘述 Selmic 等人應用圖 1.10 以及 1.11 的雷射結構所做的一些比較分析結果。底下圖 1.12 為此 AlGaInAs 雷射系統在不同操作溫度下(15–75 °C)的 L-I curve 雷射性能圖[14]：

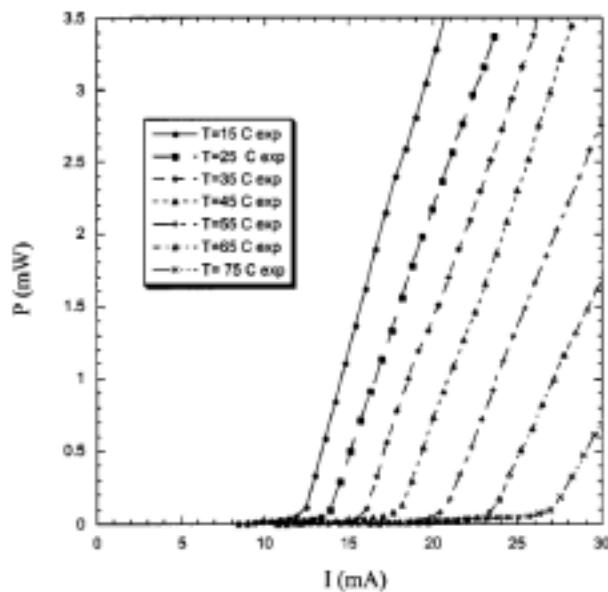


圖 1.12、近期 AlGaInAs 量子井雷射之 L-I curve 雷射性能圖。

其中此雷射結構的 ridge 寬度為 5  $\mu\text{m}$ ，共振腔長度為 250  $\mu\text{m}$ ，而前後鏡的反射率則分別為 30 % 以及 70 %。從圖中我們可以觀察到此雷射系統在室溫 25 °C 的操作下，其臨界電流與斜率效能分別為 12.5 mA 以及 0.43 W/A，與之前 1989 年 Ash 等人所設計的雷射結構性能相比(在 25 °C 下臨界電流與斜率效能分別為 65 mA 以及 0.06 W/A)可說是大為提昇許多。因此，我們也可以發現 AlGaInAs 材料系統在過去眾研究學者的努力下，其研究發展成果相當地豐碩。

在接下來的內容中我將利用 Lastip (LASer Technology Integrated Program) 數值模擬軟體來針對幾種不同的 AlGaInAs 活性層材料進行分析,其材料內容整理如表 1.2 所示。這些活性層材料乃源自於 1989–2004 年間各類期刊雜誌的文獻內容[14–18], 其中亦包含前述 Ash 等人早期所設計的活性層結構(材料 1)以及近期 Selmic 等人所提出的結構設計(材料 4), 而各活性層 quantum well 以及 barrier 所對應的應力百分比則在表 1.3 中加以詳細地描述。根據表 1.2 與 1.3 所設計的活性層結構方式, 可應用 Lastip 數值模擬軟體來探討其自發輻射率(spontaneous emission rate)的比較分析。

表 1.2、不同時期 AlGaInAs 材料系統的活性層結構設計(1989–2004)。

Number	Well composition	Well width	Barrier composition	Barrier width
(1)	$\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.36}\text{In}_{0.52}\text{As}$	10.0 nm	$\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.23}\text{In}_{0.52}\text{As}$	7 nm
(2)	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	5.0 nm	$\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.16}\text{In}_{0.52}\text{As}$	10 nm
(3)	$\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.22}\text{In}_{0.66}\text{As}$	5.5 nm	$\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.2}\text{In}_{0.48}\text{As}$	10 nm
(4)	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	5.0 nm	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	10 nm
(5)	$\text{Al}_{0.175}\text{Ga}_{0.095}\text{In}_{0.73}\text{As}$	6.0 nm	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.21}\text{In}_{0.52}\text{As}$	10 nm

表 1.3、不同時期 AlGaInAs 材料系統的活性層應力結構設計。

Number	QW strain (%)	Barrier strain (%)	Published year
(1)	unstrained	unstrained	1989
(2)	1.44 (compressive)	unstrained	1996
(3)	0.92 (compressive)	0.3 (tensile)	1998
(4)	1.44 (compressive)	unstrained	2001
(5)	1.4 (compressive)	unstrained	2004

有關 AlGaInAs 材料系統的物理參數(physical parameters)設定將會在第二章第 2.4 節中做詳細的介紹。底下圖 1.13 為這五種不同的活性層材料所模擬出來的自發輻射率比較分析圖：

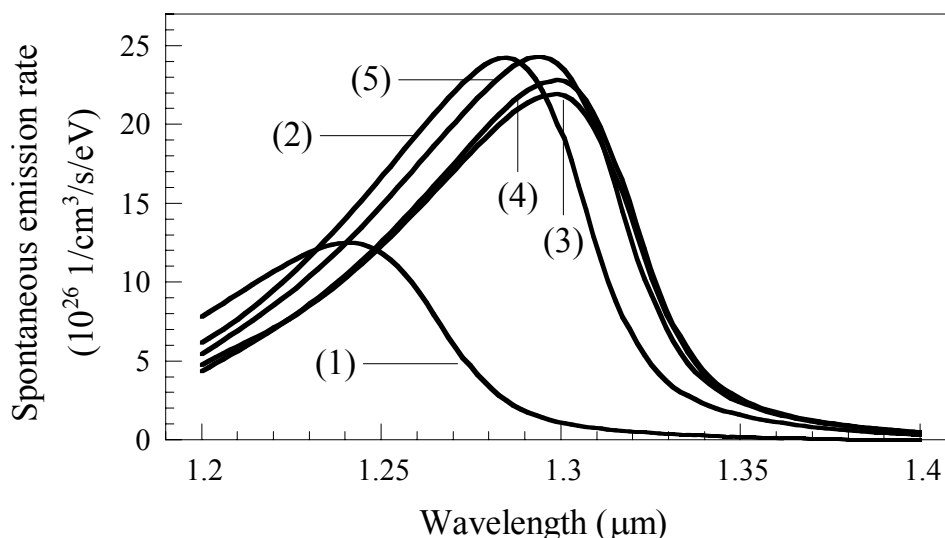


圖 1.13、不同時期 AlGaInAs 材料系統的自發輻射率比較圖。

其中載子密度(carrier density)皆設定為  $1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ ，而操作溫度則固定在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。從圖中我們可以觀察到，早期 1989 年 Ash 等人所設計不含應力的活性層結構(材料 1)，其自發輻射率頻譜值都較後期四種材料結構來得低；而近期 2001 年 Selmic 等人所提出的結構設計(材料 4)則無論在波峰波長(peak wavelength)的選擇或是自發輻射率值的比較上，都較早期的結構設計(材料 1)來得更適合成為高雷射性能輸出的活性層設計方式。此外雖然 AlGaInAs 材料系統的 conduction band offset ( $\Delta E_c = 0.72\Delta E_g$ )以及  $\Delta E_c$  值(300 meV)都較前述 InGaAsN 材料系統( $\Delta E_c = 0.79\Delta E_g$ ； $\Delta E_c$  值為 413 meV)來得低，但是其高雷射功率輸出的特性卻

始終受到研究學者群的青睞。底下圖 1.14 為 2003 年 Li 等人所設計極高功率 AlGaInAs 雷射系統的 L-I 性能圖(在脈衝波雷射的操作下) [19]，其發光波長介於 1400–1500 nm 之間。

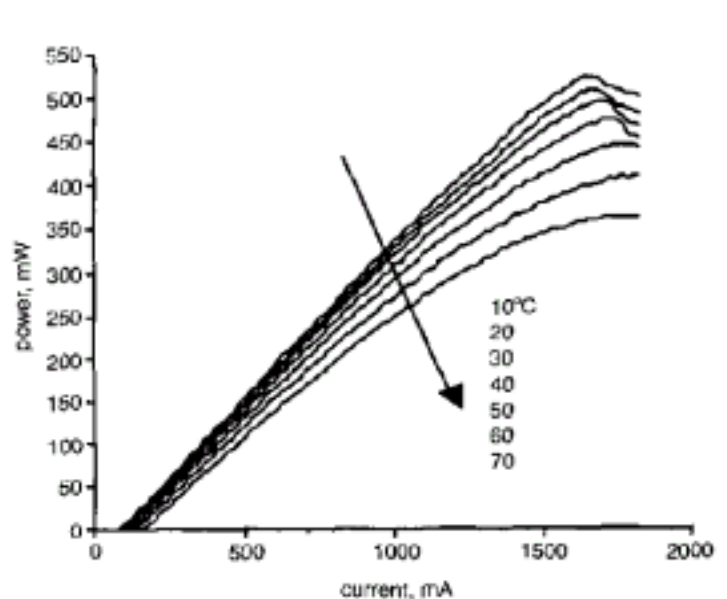


圖 1.14、極高功率 AlGaInAs 雷射系統的 L-I 性能圖。

從上圖以及 Li 等人所發表的文獻內容中我們可以知道，此高功率 AlGaInAs 雷射系統即使在 70 °C 的高溫操作以及 1800 mA 的極高驅動電流(drive current)下，其雷射功率依舊可以保持在 360 mW 以上。對相同是在脈衝式雷射操作下的 InGaAsN 材料系統而言(如下頁圖 1.15 所示) [20]，AlGaInAs 其高功率的輸出可說是毫不遜色。

在介紹完前面 AlGaInAs 材料系統的發展歷史與相關特性後，在這一節的文末，我將要應用 Lastip 數值模擬軟體來針對 AlGaInAs 與其他兩大長波長光纖通訊材料系統進行相關的比較與分析。

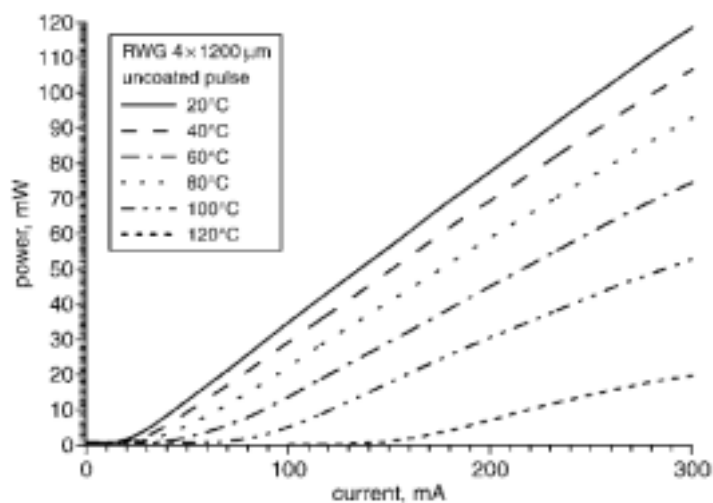


圖 1.15、脈衝式 InGaAsN 雷射系統的 L-I 性能圖。

底下表 1.4 為近幾年具典型長波長光纖通訊三大材料系統的活性層結構設計[14,20,21],其中包含傳統的 InGaAsP 以及具有高 conduction band offset 的 AlGaInAs 與 InGaAsN 材料結構。從表中我們可以觀察到,這三大材料系統的量子井中都含有相當高的壓縮應力。

表 1.4、長波長光纖通訊三大材料系統的活性層結構設計。

Material	InGaAsN	AlGaInAs	InGaAsP
QW material	$\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	$\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.64}\text{P}_{0.36}$
QW length (nm)	6	5	5
QW strain (%)	2.33 (compressive)	1.44 (compressive)	1 (compressive)
Barrier material	GaAs	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	$\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}$
Barrier strain (%)	unstrained	unstrained	unstrained
Electron effective mass (QW)	0.0504 ( $m_e/m_o$ )	0.0476 ( $m_e/m_o$ )	0.0557 ( $m_e/m_o$ )
Heavy hole effective mass (QW)	0.3471 ( $m_{hh}/m_o$ )	0.3595 ( $m_{hh}/m_o$ )	0.3990 ( $m_{hh}/m_o$ )
Light hole effective mass (QW)	0.0747 ( $m_{lh}/m_o$ )	0.0532 ( $m_{lh}/m_o$ )	0.0676 ( $m_{lh}/m_o$ )

根據表 1.4 所提供的活性層設計方式，可應用 Lastip 數值模擬軟體來比較這三大材料系統 peak material gain 與 carrier density 之間的關係，如底下圖 1.16 所示(操作溫度設定在 25 °C)：

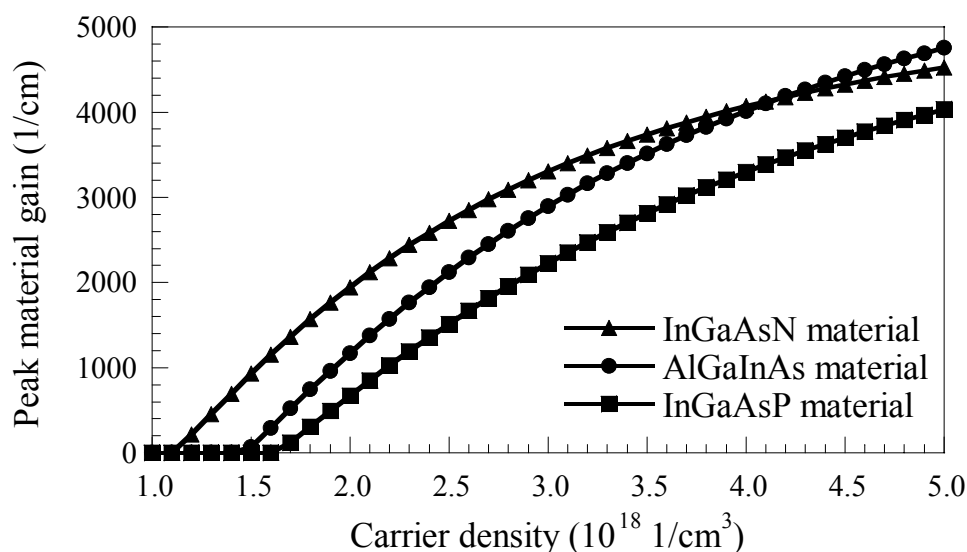


圖 1.16、長波長光纖通訊三大材料系統 peak material gain 與 carrier density 之間的關係。

從上圖中我們可以觀察到，無論是 AlGaInAs 或是 InGaAsN 材料系統其透明載子密度(transparency carrier density)皆比傳統的 InGaAsP 材料系統來得低。此外從圖中我們也可以看到，當載子密度在低於及高於  $4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  時，InGaAsN 與 AlGaInAs 材料系統分別擁有最高的 peak material gain。

## 參考文獻：

- [1] J. Hecht, *Understanding Fiber Optics*, 4<sup>nd</sup> ed, 2002.
- [2] G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*, 2<sup>nd</sup> ed, Van Nostrand Reinhold, USA, 1993.
- [3] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, and Y. Yazawa, “GaInNAs: a novel material for long-wavelength-range laser diodes with excellent high-temperature performance,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, pp. 1273–1275 (1996).
- [4] J. Piprek, P. Abraham, and J. E. Bowers, “Cavity length effects on internal loss and quantum efficiency of multiquantum-well lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **5**, pp. 643–647 (1999).
- [5] Y. G. Zhang, J. X. Chen, Y. Q. Chen, M. Qi, A. Z. Li, K. Fröjdh, and B. Stoltz, “Characteristics of strain compensated 1.3  $\mu\text{m}$  InAsP/InGaAsP ridge waveguide laser diodes grown by gas source MBE,” *J. Crystal Growth* **227–228**, pp. 329–333 (2001).
- [6] S. J. Sweeney, T. Higashi, A. R. Adams, T. Uchida, and T. Fujii, “Improved temperature dependence of 1.3 $\mu\text{m}$  AlGaInAs-based MQW semiconductor diode lasers revealed by hydro,” *Elec. Lett.* **34**, pp. 2130–2132 (1998).
- [7] Gh. Dumitras, and H. Riechert, “Determination of band offsets in



- semiconductor quantum well structures using surface photovoltage,” *J. Appl. Phys.* **94**, pp. 3955–3959 (2003).
- [8] Y. A. Chang, H. C. Kuo, Y. H. Chang, and S. C. Wang, “Simulation of 1300-nm  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.986}\text{N}_{0.014}/\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  quantum-well lasers with various  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  strain compensated barriers,” *Opt. Communi.* **241**, pp. 195–202 (2004).
- [9] J. C. L. Yong, J. M. Rorison, M. Othman, H. D. Sun, M. D. Dawson, and K. A. Williams, “Simulation of gain and modulation bandwidths of 1300 nm RWG InGaAsN lasers,” *IEE Proceedings-Optoelectronics* **150**, pp. 80–82 (2003).
- [10] C. E. Zah, R. Bhat, B. N. Pathak, F. Favire, W. Lin, M. C. Wang, N. C. Andreadakis, D. M. Hwang, M. A. Koza, T. P. Lee, Z. Wang, D. Darby, D. Flanders, and J. J. Hsieh, “High-performance uncooled 1.3- $\mu\text{m}$   $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$  strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications,” *IEEE J. Quantum Electron.* **30**, pp. 511–523 (1994).
- [11] R. F. Kazarinov, and G. L. Belenky, “Novel design of AlGaInAs–InP lasers operating at 1.3  $\mu\text{m}$ ,” *IEEE J. Quantum Electron.* **31**, pp. 423–426 (1995).
- [12] J. P. Praseuth, M. C. Joncour, J. M. Gerard, P. Henoc, and M. Quillec, “Growth and characterization of AlGaInAs lattice matched

- to InP grown by molecular-beam epitaxy,” *J. Appl. Phys.* **63**, pp. 400–403 (1988).
- [13] M. N. Akram, C. Silfvenius, O. Kjebon, and R. Schatz, “Design optimization of InGaAsP–InGaAlAs 1.55  $\mu\text{m}$  strain-compensated MQW lasers for direct modulation applications,” *Semicond. Sci. Technol.* **19**, pp. 615–625 (2004).
- [14] S. R. Selmic, T. M. Chou, J. P. Sih, J. B. Kirk, A. Mantie, J. K. Butler, D. Bour, and G. A. Evans, “Design and characterization of 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs–InP multiple-quantum-well lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **7**, pp. 340–349 (2001).
- [15] R. M. Ash, D. J. Robbins, and J. Thompson, “GRIN-SCH AlGaInAs/InP quantum-well lasers emitting at 1300 nm,” *Elec. Lett.* **25**, pp. 1530–1531 (1989).
- [16] J. W. Pan, and J. I. Chyi, “Theoretical study of the temperature dependence of 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs–InP multiple-quantum-well lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.* **32**, pp. 2133–2138 (1996).
- [17] J. W. Pan, K. G. Chau, J. I. Chyi, Y. K. Tu, and J. W. Liaw, “Suppression of electron and hole leakage in 1.3  $\mu\text{m}$  AlGaInAs/InP quantum well lasers using multiquantum barrier,” *App. Phys. Lett.* **72**, pp. 2090–2092 (1998).
- [18] F. Robert, A. C. Bryce, J. H. Marsh, A. J. SpringThorpe, and J. K.

- White, “Passive mode locking of InAlGaAs 1.3- $\mu\text{m}$  strained quantum wells extended cavity laser fabricated by quantum-well intermixing,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, pp. 374–376 (2004).
- [19] J. Li, A. Hohl-AbiChedid, A. K. Rice, and Y. Qian, “High-power singlemode AlGaInAs/InP 14xx-nm laser for uncooled application,” *Elec. Lett.* **39**, pp. 289-290 (2003).
- [20] C. S. Peng, N. Laine, J. Konttinen, S. Karirinne, T. Jouhti, and M. Pessa, “High-performance singlemode InGaInAs/GaAs laser,” *Electron. Lett.* **40**, pp. 604–605 (2004).
- [21] J. Jin, and D. Tian, “Improved performance of 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP–InP lasers with an AlInAs electron stopper layer,” *Semicond. Sci. Technol.* **18**, pp. 960-963 (2003).

## 第二章 長波長光纖通訊 1.3- $\mu\text{m}$ 雷射光源之活性層材料設計與分析

在前面第一章中主要是介紹長波長光纖通訊雷射光源三大材料系統的基本物理特性與發展歷史。從介紹的內容中我們可以知道，相對於傳統的 InGaAsP 材料結構而言，具有高 conduction band offset 的 InAsP、InGaAsN 以及 AlGaInAs 材料系統由於擁有較高的井深可以侷限導電帶的載子，因此能在缺乏熱電冷卻裝置的高溫操作環境下，依舊保持高的雷射輸出性能與低的熱感度。然而，從上一章的介紹中我們也可以發現到，即使是相同的材料系統或結構，不同的活性層結構設計也會對雷射的發光效率造成莫大的影響。舉上一章對 AlGaInAs 材料系統的活性層設計方式而言，我們可以看出若活性層中的 well 含有些許壓縮應力(compressive strain)的話，其雷射效能會比 unstrained 的 AlGaInAs 活性層來得好(請見第一章第 1.2.2 節)。因此，除了選擇適當的材料系統來製造雷射的結構外，活性層的設計方式也是值得探討的課題之一。所以，在接下來的內容中，我將搜集相關的參考文獻並應用 Lastip (LASer Technology Integrated Program)數值模擬軟體來對 InGaAsP (InAsP)、AlGaInAs、以及 InGaAsN 這三大應用於長波長光纖通訊雷射光源的活性層系統進行一連串的比较與分析，以期獲取較佳的活性層結構設計。

## 2.1 Lastip 數值模擬軟體簡介

在本篇文章中乃應用加拿大 Crosslight 公司所發展的 Lastip 數值模擬軟體來分析 1.3- $\mu\text{m}$  半導體側射型雷射(edge-emitting laser diodes)的發光特性與雷射效能[1]。底下圖 2.1 即為一般半導體側射型雷射的結構示意圖。

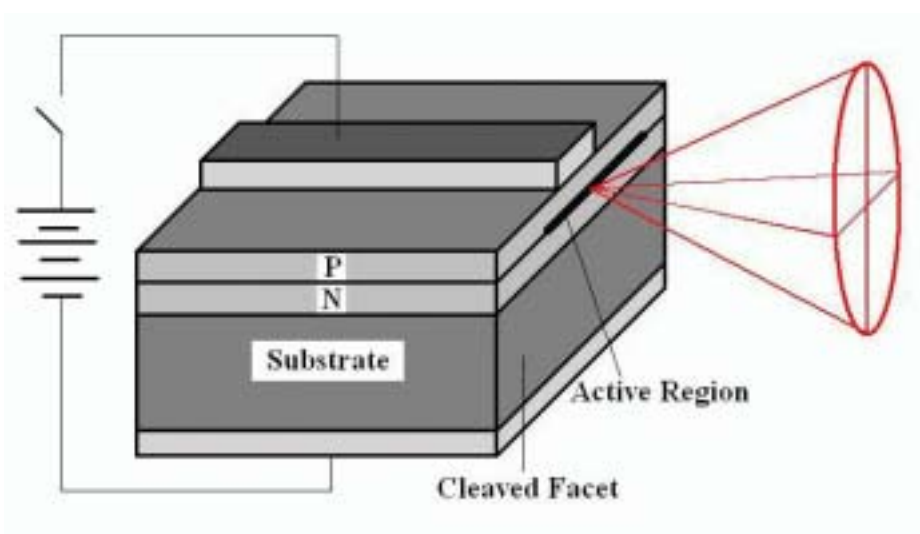


圖 2.1、半導體側射型雷射的結構示意圖。

在 Lastip 數值模擬軟體的程式撰寫中，主要是在半導體側射型雷射的橫截面垂直方向依次設計(由 n-type 撰寫至 p-type)，最後配合上共振腔的長度即可呈現出所設計出來的側射型雷射模型。

此外在 Lastip 數值模擬軟體計算側射型雷射的理論背景方面可分為底下幾個部份來討論。首先，在增益模型(gain model)的部份是利用計算 Coulomb enhanced gain spectral function 來得到在不同波長以及載子密度的情況下，半導體塊材(bulk)與量子井(QW)所產生的材料增益以

及損失[1,2]。在得到所需要的材料增益與波長的關係後，接著 Lastip 數值模擬軟體會利用 finite element method 來計算 Poisson's equation、電子與電洞的電流連續方程式(current continuity equations for electrons and holes)以及相關的 wave 和 rate equations，來模擬所設計元件結構的雷射特性(laser characteristics)。同時在計算雷射特性的過程中，熱效應(heating effect)也會藉由解熱流方程式(heat flow equation)而包含在所模擬的元件特性中，以期達到數值模擬結果能與實驗情況更為接近 [1,3,4]。

有關上述 Lastip 的詳細數學理論方程式可參見 Crosslight 公司所提供的 Lastip 使用者手冊(Lastip User's Manual) [1]。

## 2.2 InGaAsP (InAsP)活性層材料系統的設計分析與比較

從前一節的介紹內容中我們可以知道，不同的活性層結構設計對於雷射的發光效能有顯著的影響。因此，在接下來的內容中我將逐一針對 InGaAsP (InAsP)、AlGaInAs 以及 InGaAsN 這三大長波長光纖通訊雷射光源的活性層材料系統進行相關的比較與分析。

而在這一節中，我將先針對傳統的 InGaAsP (InAsP)活性層材料系統進行分析和討論。在進行底下的研究內容之前，首先我要先引進 InGaAsP (InAsP)材料系統相關的物理參數以及數學方程式。一般在計算求得四元  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  半導體化合物的物理參數時，會利用相關的二元半導體化合物依成分進行線性的疊加，如底下式(4)所示[5]：

$$P(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}) = P(\text{GaAs})xy + P(\text{GaP})x(1-y) + P(\text{InAs})(1-x)y + P(\text{InP})(1-x)(1-y) , \quad (4)$$

其中  $P$  為各相關化合物的物理參數值。底下表 2.1 列舉一般  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  各項二元化合物的物理參數值，其中包含各二元化合物的晶格常數(lattice constant)、導電帶電子的有效質量(effective mass of electrons)以及價電帶重電洞與輕電洞的有效質量(effective masses of heavy holes and light holes)等等[5–7]。

表2.1、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  相關的二元半導體化合物物理參數值。

Parameter	Symbol (unit)	GaAs	InAs	GaP	InP
Luttinger parameters	$\gamma_1$	6.85	20.4	4.05	4.95
	$\gamma_2$	2.1	8.3	0.49	1.65
	$\gamma_3$	2.9	9.1	1.25	2.35
Elastic stiffness constants	$C_{11}$ ( $10^{11}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	11.88	8.329	14.05	10.11
Elastic stiffness constants	$C_{12}$ ( $10^{11}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	5.38	4.526	6.203	5.61
Hydrostatic deformation potential	$a$ (eV)	-9.7	-6.08	-7.14	-5.04
Shear deformation potential	$b$ (eV)	-1.7	-1.8	-1.8	-1.7
Effective mass of electrons	$m_e/m_o$	0.067	0.023	0.25	0.077
Effective mass of heavy holes	$m_{hh}/m_o$	0.50	0.40	0.67	0.60
Effective mass of light holes	$m_{lh}/m_o$	0.076	0.025	0.14	0.12
Lattice constant	$a_0$ (Å)	5.6533	6.0584	5.4505	5.8688

在此值得一提的是，雖然  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  材料系統大部分的物理參數可以用各個相關的二元半導體化合物依成分線性疊加，然而卻有少

部份的物理參數是不適用的。底下式(5)為 unstrained  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  band gap energy 的計算方式(當  $x = 0.1894 \cdot y / (0.4184 - 0.013 \cdot y)$ ) [8] :

$$E_g(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}) = 1.347 - 0.778 \cdot y + 0.149 \cdot y^2 - 4.1 \times 10^{-4} \cdot \left[ \frac{T^2}{T + 136} - \frac{300^2}{300 + 136} \right] eV \quad , \quad (5)$$

從上式中我們可以觀察到，unstrained  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  band gap energy 的計算方式並非是由簡單的二元化合物線性疊加所組成的。因此，在計算InGaAsP材料系統的band gap energy值時，是不可用前述式(4)來加以求得的。此外從式(5)中我們也可以看到band gap energy  $E_g$ 亦會隨著溫度 $T$ 的改變而有所變化。有關式(5)修正成strained  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  band gap energy的近似數學表示項(當 $x = 0.1894 \cdot y / (0.4184 - 0.013 \cdot y)$ )可參考Lastip數值模擬軟體所附加的材料macro file [1]。另外，在本文中Auger再結合率(Auger recombination rate)的計算方式如下式(6)所示[9]：

$$(C_n n + C_p p) \times (np - n_i^2) \quad , \quad (6)$$

其中 $n$ 、 $p$ 以及 $n_i$ 分別代表電子密度(electron density)、電洞密度(hole density)以及本質載子密度(intrinsic carrier density)，而 $C_n$ 和 $C_p$ 則為與溫度相關(temperature dependent)的Auger係數值(Auger coefficients)。在本文Lastip模擬軟體的Auger係數值設定中，是令 $C_n = C_p = C$ 為相同大小的參數值，並應用一與溫度相關的數學函式來加以表達，如底下式(7)所示[9]：



$$C(T) = C_0(T_0') \times \exp\left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_0'} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (7)$$

其中  $k$  和  $E_A$  分別代表波茲曼常數 (Boltzmann constant) 以及 activation energy, 而  $C_0(T_0')$  則是代表在操作溫度為  $T_0'$  時的 Auger 係數值。

在此次 InGaAsP (InAsP) 材料系統的數值模擬分析中, 是令  $C_0$  在  $T_0' = 25^\circ\text{C}$  時為  $2.5 \times 10^{-28} \text{ cm}^6/\text{s}$  [10], 而其 activation energy  $E_A$  則設定為 132 meV [11]。

在介紹完前述有關 InGaAsP (InAsP) 材料系統的相關物理參數與數學函式後, 接下來我便應用 Lastip 數值模擬軟體來進行 InGaAsP (InAsP) active regions 相關的比較分析與特性探討。底下表 2.2 為五種典型的 InGaAsP (InAsP) 材料系統的活性層結構設計 [12–16], 其中材料(a)、材料(b)以及材料(c)為前述第一章所提到的具有高 band offset ratio ( $\Delta E_c = 0.65\Delta E_g$ ) 的 InAsP 材料系統 [17], 而材料(d)與材料(e)則為傳統的 InGaAsP 活性層材料結構 ( $\Delta E_c = 0.4\Delta E_g$ )。

表2.2、五種典型的InGaAsP (InAsP)材料系統的活性層結構設計。

Number	Well composition	Well width	Barrier composition	Barrier width
(a)	InAs <sub>0.45</sub> P <sub>0.55</sub>	4.5 nm	In <sub>0.82</sub> Ga <sub>0.18</sub> As <sub>0.4</sub> P <sub>0.6</sub>	15 nm
(b)	InAs <sub>0.4</sub> P <sub>0.6</sub>	8.0 nm	In <sub>0.72</sub> Ga <sub>0.28</sub> As <sub>0.4</sub> P <sub>0.6</sub>	16 nm
(c)	InAs <sub>0.43</sub> P <sub>0.57</sub>	6.0 nm	In <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> As <sub>0.43</sub> P <sub>0.57</sub>	10 nm
(d)	In <sub>0.85</sub> Ga <sub>0.15</sub> As <sub>0.64</sub> P <sub>0.36</sub>	5.0 nm	In <sub>0.82</sub> Ga <sub>0.18</sub> As <sub>0.4</sub> P <sub>0.6</sub>	10 nm
(e)	In <sub>0.67</sub> Ga <sub>0.33</sub> As <sub>0.72</sub> P <sub>0.28</sub>	6.0 nm	In <sub>0.9</sub> Ga <sub>0.1</sub> As <sub>0.22</sub> P <sub>0.78</sub>	10 nm

底下表 2.3 為這五種典型的 InGaAsP (InAsP)活性層應力結構設計的對照關係。從表中我們可以觀察到, InAsP 材料系統的量子井中都含有高的壓縮應力,而傳統 InGaAsP 材料結構的量子井中則分別含有 1% 以及 unstrained 的壓縮應力。

表2.3、五種典型的InGaAsP (InAsP)活性層應力結構設計對照表。

Number	QW strain (%)	Barrier strain (%)
(a)	1.6 (compressive)	unstrained
(b)	1.3 (compressive)	0.6 (tensile)
(c)	1.4 (compressive)	0.7 (tensile)
(d)	1.0 (compressive)	unstrained
(e)	unstrained	unstrained

因此,由以上表 2.2 與 2.3 所整理的活性層結構資訊,可應用 Lastip 數值模擬軟體來進行這五種典型的 InGaAsP (InAsP)材料系統的自發輻射率與材料增益的分析比較。

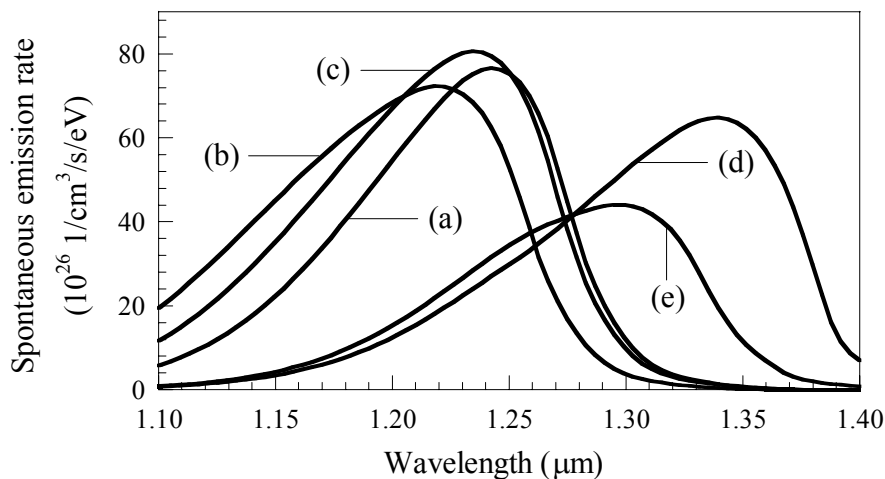


圖2.2、 InGaAsP (InAsP)活性層材料系統的自發輻射率比較圖。

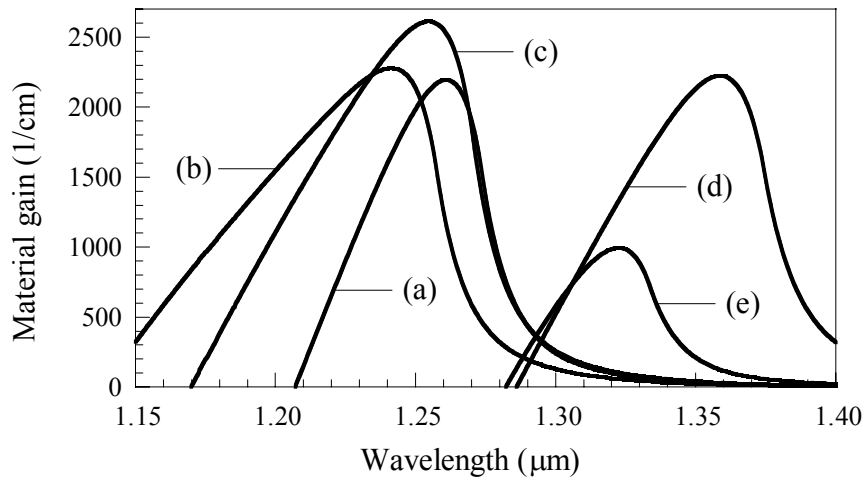


圖2.3、InGaAsP (InAsP)活性層材料系統的增益比較圖。

圖 2.2 以及 2.3 分別為這五種 InGaAsP (InAsP)活性層材料系統的自發輻射率與材料增益的比較圖，其中載子密度皆設定為  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，而操作溫度則固定在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。從圖中我們可以觀察到，無論是分析自發輻射率或者是探討材料增益，InAsP 材料系統都擁有較高的強度且其頻譜所落在波長的範圍都較偏向於短波長。另一方面，相對於具有高 band offset ratio 的 InAsP 材料系統而言，傳統 InGaAsP 材料結構的自發輻射以及增益強度就顯得比較低，且其頻譜所落在波長的範圍都較偏向於長波長。值得注意的是，即使是對相同具有低 band offset ratio 的 InGaAsP 材料系統(材料(d)與材料(e))而言，量子井中含有高壓縮應力的結構設計(材料(d))其自發輻射以及增益頻譜值都較 unstrained 的結構設計(材料(e))來得高。

最後，從前面兩張圖的比較分析中我們也可以發現到，相對於其

他四種活性層的結構設計，材料(c)的設計方式可擁有最高的 peak spontaneous emission rate 以及 peak material gain 值。

接下來在這一節的文末，我將要針對 InAsP 以及 InGaAsP 這兩大活性層材料系統做定量的比較。從前述表 2.2 所提供的活性層結構設計中，可應用材料(c) (InAsP 材料系統)以及材料(d) (InGaAsP 材料系統)來比較其 peak material gain 與 carrier density 之間的關係，如底下圖 2.4 所示：

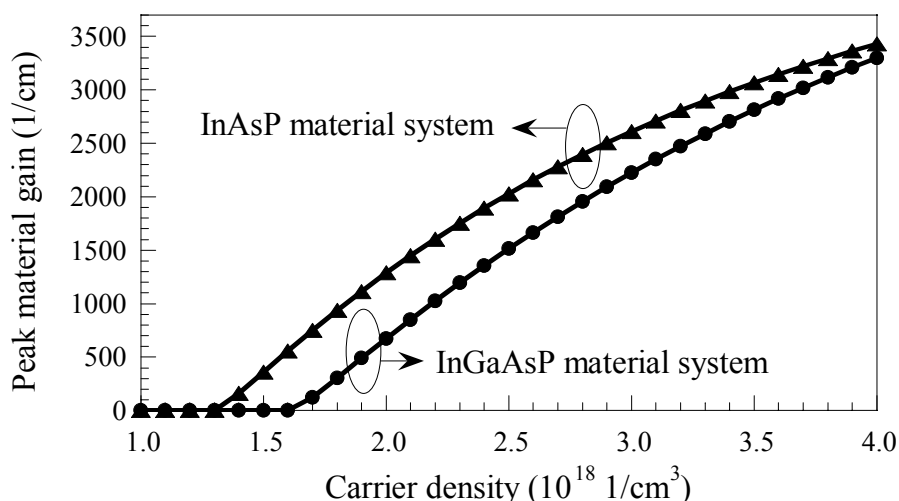


圖2.4、InAsP與InGaAsP活性層材料系統的尖峰增益比較圖。

其中在變化載子密度的過程中，操作溫度皆固定在25 °C。從圖中我們可以觀察到，相對於傳統的InGaAsP材料系統(d)而言，InAsP材料系統(c)擁有較低的透明載子密度。此外在探討的載子密度範圍內 ( $1.0 \times 10^{18} \sim 4.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )，InAsP材料系統(c)也較InGaAsP材料系統(d)擁有相對較高的peak material gain。

## 2.3 InGaAsN 活性層材料系統的設計分析與比較

在上一節敘述完有關傳統的 InGaAsP 以及三元的 InAsP 這兩大活性層材料系統的比較分析後，接著在這一節中我將要針對具有極高 conduction band offset ( $\Delta E_c = 0.79\Delta E_g$ ) [18]的 InGaAsN 材料系統進行討論。

同樣地，在進行底下的分析討論之前，首先我要先介紹 InGaAsN 材料系統相關的物理參數以及數學函式。相同於 InGaAsP (InAsP)材料系統物理參數的計算方式，在求得四元  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  半導體化合物的物理參數時，會利用其相關的二元半導體化合物依成分進行線性疊加，如底下式(8)所示[2,10]：

$$P(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y) = P(\text{GaAs})x(1-y) + P(\text{InAs})(1-x)(1-y) + P(\text{GaN})xy + P(\text{InN})(1-x)y \quad , \quad (8)$$

其中  $P$  為  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  各相關化合物的物理參數值。底下表 2.4 列舉一般  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  各項二元化合物的物理參數值，其中包含各二元半導體化合物的 Luttinger parameters、elastic stiffness constants、hydrostatic deformation potential、shear deformation potential、導電帶電子的有效質量(effective mass of electrons)、價電帶重電洞的有效質量(effective masses of heavy holes)、價電帶輕電洞的有效質量(effective masses of light holes)以及晶格常數(lattice constant)等相關資訊[2,5-7]。

表2.4、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  相關的二元半導體化合物物理參數值。

Parameter	Symbol (unit)	GaAs	InAs	GaN	InN
Luttinger parameters	$\gamma_1$	6.85	20.4	2.70	3.72
	$\gamma_2$	2.1	8.3	0.76	1.26
	$\gamma_3$	2.9	9.1	1.11	1.63
Elastic stiffness constants	$C_{11}$ ( $10^{11}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	11.88	8.329	28.2	18.2
Elastic stiffness constants	$C_{12}$ ( $10^{11}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	5.38	4.526	15.9	12.5
Hydrostatic deformation potential	$a$ (eV)	-9.7	-6.08	-7.4	-3.35
Shear deformation potential	$b$ (eV)	-1.7	-1.8	-2.0	-1.2
Effective mass of electrons	$m_e/m_o$	0.067	0.023	0.2	0.11
Effective mass of heavy holes	$m_{hh}/m_o$	0.50	0.40	1.376	1.595
Effective mass of light holes	$m_{lh}/m_o$	0.076	0.025	0.977	0.513
Lattice constant	$a_0$ (Å)	5.6533	6.0584	4.50	4.98

值得注意的是， $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  材料系統的 band gap energy 是不適用於式(8)線性疊加的計算方式。底下式(9)為 temperature dependent  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  band gap energy 的計算方式[2]：

$$\begin{aligned}
 E_g(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y) &= x \cdot (1-y) \cdot E_g(\text{GaAs}) + (1-x) \cdot (1-y) \cdot E_g(\text{InAs}) \\
 &+ x \cdot y \cdot E_g(\text{GaN}) + (1-x) \cdot y \cdot E_g(\text{InN}) + x \cdot y \cdot (1-y) \cdot b(\text{GaAsN}) \quad , (9) \\
 &+ x \cdot (1-x) \cdot (1-y) \cdot b(\text{InGaAs}) - 5.5 \times 10^{-4} \cdot \left[ \frac{T^2}{T+225} - \frac{300^2}{300+225} \right] eV
 \end{aligned}$$

其中各項二元及三元的物理參數值則整理如下表 2.5 所示[2]。從上式中我們可以觀察到， $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  band gap energy 的計算方式並非是由簡單的二元半導體化合物所線性疊加，而是加上兩個彎曲參數  $b$  值

( $b(\text{GaAsN})$ 與  $b(\text{InGaAs})$ )的項所共同組成的。有關式(9)  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$  詳細的 band gap energy 的計算方式可參考 Chang 等人的文章[2]。

表2.5、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ 能帶間隙式中的各項物理參數值。

Parameters	$E_g(\text{GaAs})$	$E_g(\text{InAs})$	$E_g(\text{GaN})$	$E_g(\text{InN})$	$b(\text{GaAsN})$	$b(\text{InGaAs})$
Values (eV)	1.424	0.355	3.42	0.77	-18	-0.6

此外在 InGaAsN 材料系統 Auger 係數值的設定方面，是令  $C_0$  在  $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$  時為  $4.0 \times 10^{-29}\text{ cm}^6/\text{s}$  [19]，而其 activation energy  $E_A$  則設定為 58 meV [19]。

在介紹完前面有關 InGaAsN 材料系統的相關物理參數與數學函式後，接下來我便應用 Lastip 數值模擬軟體來進行 InGaAsN active regions 相關的比較分析與特性探討。底下表 2.6 為五種典型的 InGaAsN 材料系統的活性層結構設計[19–23]，其中材料(A)、材料(D)以及材料(E)的 barriers 是由二元的 GaAs 所組成，而材料(B)與材料(C)的 barriers 則是由四元的 InGaAsN 材料系統所構成。

表2.6、五種典型的InGaAsN材料系統的活性層結構設計。

Number	Well composition	Well width	Barrier composition	Barrier width
(A)	$\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$	9.0 nm	GaAs	180 nm
(B)	$\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}_{0.983}\text{N}_{0.017}$	6.2 nm	$\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{As}_{0.982}\text{N}_{0.018}$	25 nm
(C)	$\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}_{0.982}\text{N}_{0.018}$	6.2 nm	$\text{In}_{0.045}\text{Ga}_{0.955}\text{As}_{0.985}\text{N}_{0.015}$	25 nm
(D)	$\text{In}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$	7.0 nm	GaAs	100 nm
(E)	$\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$	6.0 nm	GaAs	176 nm

底下表 2.7 為這五種典型的 InGaAsN 活性層應力結構設計的對照關係。從表中我們可以觀察到這五種 InGaAsN 材料系統的量子井中都含有極高的壓縮應力，其值都在 2% 以上，而在 barrier 方面則是由 unstrained 的二元 GaAs 或是四元的 InGaAsN 材料系統所構成(請參照表 2.6)。

表2.7、五種典型的InGaAsN活性層應力結構設計對照表。

Number	QW strain (%)	Barrier strain (%)
(A)	2.05 (compressive)	unstrained
(B)	2.20 (compressive)	unstrained
(C)	2.62 (compressive)	unstrained
(D)	2.40 (compressive)	unstrained
(E)	2.33 (compressive)	unstrained

因此,由以上表 2.6 與 2.7 所整理的活性層結構資訊,可應用 Lastip 數值模擬軟體來進行這五種典型的 InGaAsN 材料系統的自發輻射率與材料增益的比較分析。

底下圖 2.5 以及 2.6 分別為這五種 InGaAsN 活性層材料系統的自發輻射率與材料增益的比較圖，其中載子密度皆設定為  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，而操作溫度則固定在 25 °C。從圖中我們可以觀察到，無論是分析自發輻射率或者是探討材料增益，barrier 為 unstrained GaAs 的活性層結構(材料(A)、材料(D)與材料(E))其頻譜所落在波長的範圍較偏向於短波長。而另一方面，barrier 為四元 InGaAsN 材料系統的活性層結構(材料(B)



與材料(C)其自發輻射以及增益頻譜值波長則相對較長。

最後，從這兩張圖的比較分析中我們也可以發現到，相對於其他四種InGaAsN的活性層結構設計，材料(E)的設計方式可擁有最高的peak spontaneous emission rate以及peak material gain值。

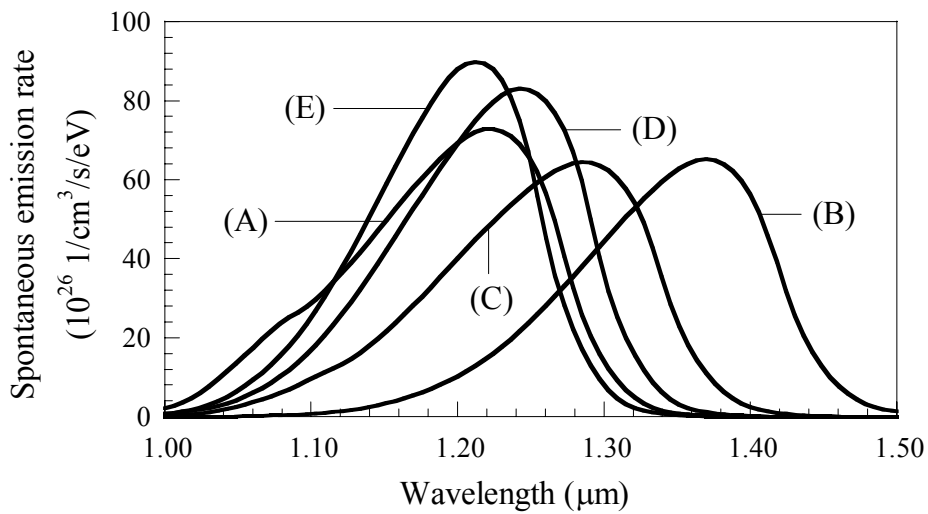


圖2.5、InGaAsN活性層材料系統是自發輻射率比較圖。

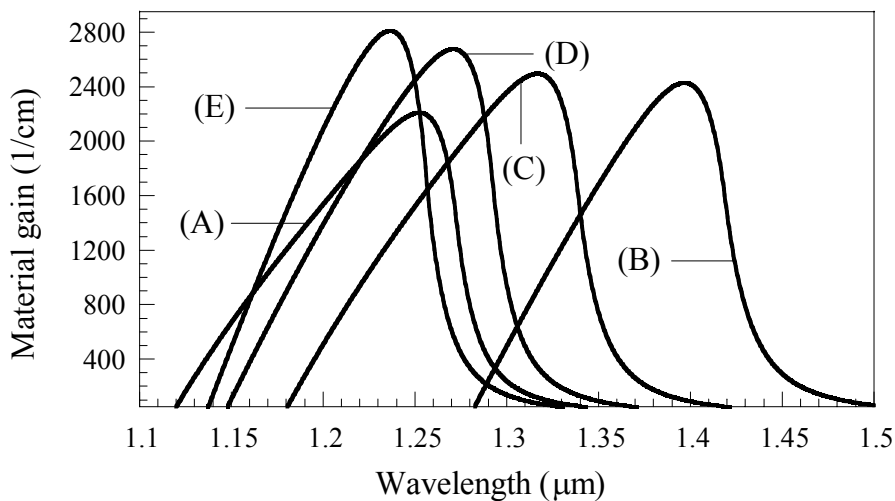


圖2.6、InGaAsN活性層材料系統的增益比較圖。

## 2.4 AlGaInAs 活性層材料系統的設計分析與比較

在前面介紹完有關 InGaAsP (InAsP)以及 InGaAsN 這兩大活性層材料系統的結構設計後，接著在這一節中我將要針對另一種具有高 band offset ratio ( $\Delta E_c = 0.72\Delta E_g$ ) [24]的 AlGaInAs 材料系統進行討論。

同樣地，在進行底下的分析討論之前，首先我要介紹 AlGaInAs 材料系統相關的物理參數以及數學函式。相同於前面兩節 InGaAsP (InAsP)以及 InGaAsN 材料系統物理參數的計算方式，在求得四元  $Al_yGa_xIn_{1-x-y}As$  半導體化合物的物理參數時，亦是利用其相關的二元半導體化合物依成分進行線性疊加，如底下式(10)所示[5,6,10]：

$$P(Al_yGa_xIn_{1-x-y}As) = P(AlAs)y + P(GaAs)x + P(InAs)(1-x-y) , \quad (10)$$

其中  $P$  為  $Al_yGa_xIn_{1-x-y}As$  各相關化合物的物理參數值。下頁表 2.8 列舉一般 AlGaInAs 材料系統各項二元化合物的物理參數值，其中亦包含基板 InP 的各項資訊[5-7]。

在此值得一提的是， $Al_yGa_xIn_{1-x-y}As$  與其他兩大材料系統相同，其  $E_g$  的計算方式是不適用於式(10)線性疊加的組成方法。底下式(11)為 temperature dependent  $Al_yGa_xIn_{1-x-y}As$  band gap energy 的計算方式[25]：

$$E_g(Al_yGa_xIn_{1-x-y}As) = 0.360 + 0.629 \cdot x + 2.093 \cdot y + 0.436 \cdot x^2 + 0.577 \cdot y^2 + 1.013 \cdot x \cdot y - 4.1 \times 10^{-4} \cdot \left[ \frac{T^2}{T + 136} - \frac{300^2}{300 + 136} \right] eV , \quad (11)$$

從上式中我們可以觀察到，temperature dependent  $Al_yGa_xIn_{1-x-y}As$  band

gap energy的計算方式與InGaAsP (InAsP)以及InGaAsN這兩大材料系統相同，都並非是由簡單的二元化合物所線性疊加組成的。有關式(11)  $\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$  詳細的band gap energy的計算方式可參考Olego等人所發表的文章內容[25]。

表2.8、 $\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$ 相關的二元半導體化合物物理參數值。

Parameter	Symbol (unit)	AlAs	GaAs	InAs	InP
Luttinger parameters	$\gamma_1$	3.45	6.85	20.4	4.95
	$\gamma_2$	0.68	2.1	8.3	1.65
	$\gamma_3$	1.29	2.9	9.1	2.35
Elastic stiffness constants	$C_{11}$ ( $10^{11}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	1.25	11.88	8.329	10.11
Elastic stiffness constants	$C_{12}$ ( $10^{11}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	0.53	5.38	4.526	5.61
Hydrostatic deformation potential	$a$ (eV)	-5.64	-9.7	-6.08	-5.04
Shear deformation potential	$b$ (eV)	-1.5	-1.7	-1.8	-1.7
Effective mass of electrons	$m_e/m_o$	0.15	0.067	0.023	0.077
Effective mass of heavy holes	$m_{hh}/m_o$	0.79	0.50	0.40	0.60
Effective mass of light holes	$m_{lh}/m_o$	0.15	0.076	0.025	0.12
Lattice constant	$a_0$ (Å)	5.6611	5.6533	6.0584	5.8688

此外在 AlGaInAs 材料系統 Auger 係數值的設定方面，是令  $C_0$  在  $T_0 = 25$  °C 時為  $5.0 \times 10^{-29}$  cm<sup>6</sup>/s [9]，而其 activation energy  $E_A$  則設定為 100 meV [9]。

在前面介紹完有關 AlGaInAs 材料系統的相關物理參數與數學函式後，接下來我便應用 Lastip 數值模擬軟體來進行 AlGaInAs active regions 相關的比較分析與特性探討。

底下表 2.9 為五種典型的 AlGaInAs 材料系統的活性層結構設計 [6,26–29]。從表中我們可以觀察到這五種活性層結構設計的 wells 以及 barriers 都是由四元的 AlGaInAs 材料系統所構成的。

表2.9、五種典型的AlGaInAs材料系統的活性層結構設計。

Number	Well composition	Well width	Barrier composition	Barrier width
(1)	$\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.22}\text{In}_{0.66}\text{As}$	5.5 nm	$\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.2}\text{In}_{0.48}\text{As}$	10 nm
(2)	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	5.0 nm	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	10 nm
(3)	$\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.19}\text{In}_{0.66}\text{As}$	6.0 nm	$\text{Al}_{0.32}\text{Ga}_{0.38}\text{In}_{0.3}\text{As}$	10 nm
(4)	$\text{Al}_{0.175}\text{Ga}_{0.095}\text{In}_{0.73}\text{As}$	6.0 nm	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.21}\text{In}_{0.52}\text{As}$	10 nm
(5)	$\text{Al}_{0.105}\text{Ga}_{0.225}\text{In}_{0.67}\text{As}$	4.5 nm	$\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.234}\text{In}_{0.466}\text{As}$	7.5 nm

底下表 2.10 為這五種典型的 AlGaInAs 活性層應力結構設計的對照關係。從表中我們可以觀察到材料(1)、材料(3)以及材料(5)的活性層設計為應力補償式(strain-compensated)的結構；而材料(2)與材料(4)則為 strained-layer 的活性層結構設計。

表2.10、五種典型的AlGaInAs活性層應力結構設計對照表。

Number	QW strain (%)	Barrier strain (%)
(1)	0.92 (compressive)	0.3 (tensile)
(2)	1.44 (compressive)	unstrained
(3)	0.89 (compressive)	1.53 (tensile)
(4)	1.4 (compressive)	unstrained
(5)	1.0 (compressive)	0.4 (tensile)

最後,由前面表 2.9 與 2.10 所整理的活性層結構資訊,可應用 Lastip 數值模擬軟體來進行這五種典型的 AlGaInAs 材料系統的自發輻射率與材料增益的比較分析。

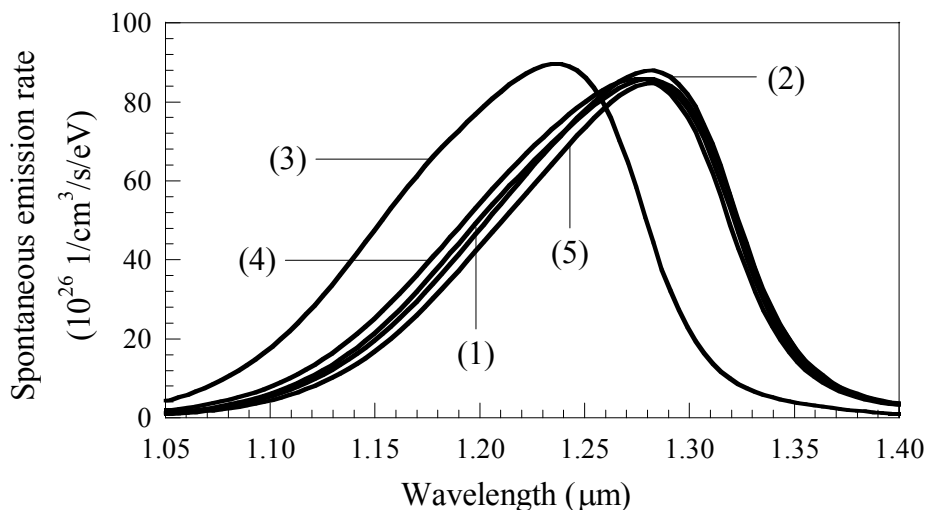


圖2.7、AlGaInAs活性層材料系統的自發輻射率比較圖。

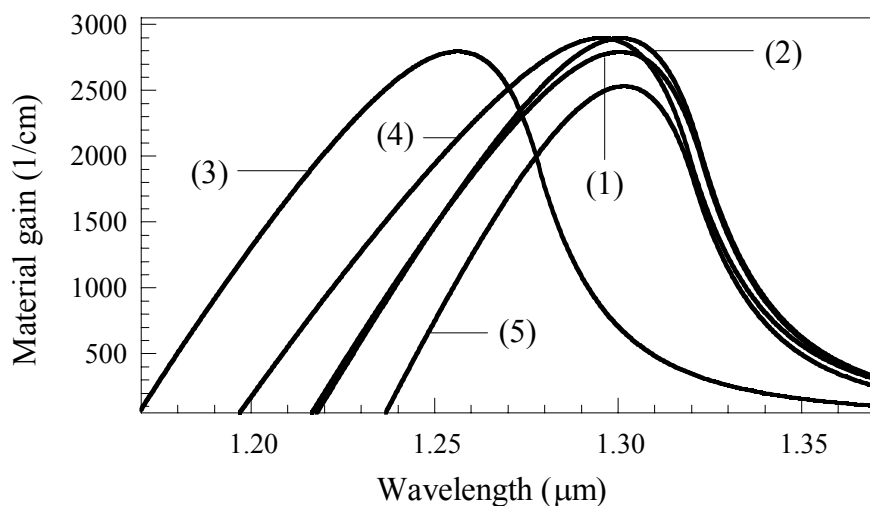


圖 2.8、AlGaInAs 活性層材料系統的增益比較圖。

圖 2.7 與 2.8 分別為這五種 AlGaInAs 活性層材料系統的自發輻射率與材料增益的比較圖，其中載子密度皆設定為  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，而操作溫度則固定在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。從圖中我們可以觀察到，無論是分析自發輻射率或者是探討材料增益，材料(1)、材料(2)、材料(3)與材料(4)的尖峰頻譜強度都相當地高且相當地接近，然而材料(3)頻譜所落在波長的範圍較偏向於短波長。在接下來的研究中，我應用 Lastip 數值模擬軟體來對材料(1)、材料(2)、材料(3)與材料(4)的增益特性做進一步的分析以期得到最佳化的活性層結構設計。底下圖 2.9 為這四種活性層材料結構 peak material gain 與溫度之間的關係圖。

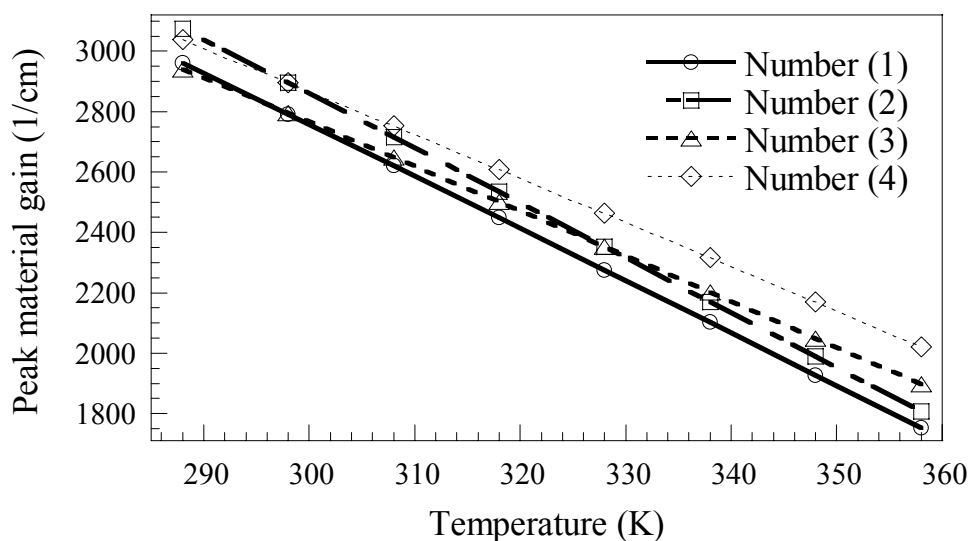


圖2.9、材料(1)~(4)之peak material gain與溫度之間的比較關係圖。

從上圖中我們可以觀察到，在低溫操作時材料(2)與材料(4)的 peak material gain 較其他兩個材料要來得高。然而隨著溫度的提升，材料(2)的增益強度衰減地較材料(4)快。因此當操作溫度高達  $358 \text{ K}$  時，材料

(4)的 peak material gain 已較其他三種材料要高出許多。

## 2.5 三大材料系統的比較分析及結論

在前面介紹完 InGaAsP (InAsP)、InGaAsN 與 AlGaInAs 這三大活性層材料系統的相關特性後，最後在這一節中我將要針對前述這三大活性層材料系統的最佳化結構設計做簡單的分析與比較。底下表 2.11 為這三大活性層材料系統的最佳化結構設計，其中包含各材料系統活性層應力以及載子有效質量等相關資訊。

表 2.11、三大活性層材料系統的最佳化結構設計。

Optimum active region	InAsP (c)	InGaAsN (E)	AlGaInAs (4)
QW material	InAs <sub>0.43</sub> P <sub>0.57</sub>	In <sub>0.36</sub> Ga <sub>0.64</sub> As <sub>0.99</sub> N <sub>0.01</sub>	Al <sub>0.175</sub> Ga <sub>0.095</sub> In <sub>0.73</sub> As
QW length (nm)	6	6	6
QW strain (%)	1.4 (compressive)	2.33 (compressive)	1.4 (compressive)
Barrier material	In <sub>0.7</sub> Ga <sub>0.3</sub> As <sub>0.43</sub> P <sub>0.57</sub>	GaAs	Al <sub>0.27</sub> Ga <sub>0.21</sub> In <sub>0.52</sub> As
Barrier strain (%)	0.7 (tensile)	unstrained	unstrained
Electron effective mass (QW)	0.0538 ( $m_e/m_o$ )	0.0504 ( $m_e/m_o$ )	0.0494 ( $m_e/m_o$ )
Heavy hole effective mass (QW)	0.5140 ( $m_{hh}/m_o$ )	0.3471 ( $m_{hh}/m_o$ )	0.4777 ( $m_{hh}/m_o$ )
Light hole effective mass (QW)	0.0791 ( $m_{lh}/m_o$ )	0.0747 ( $m_{lh}/m_o$ )	0.0517 ( $m_{lh}/m_o$ )

由上表 2.11 所提供的三大活性層結構設計，可應用 Lastip 數值模擬軟體來探討這三個材料系統 peak material gain 與 carrier density 之間的關係，如下頁圖 2.10 所示，其中操作溫度皆設定在 25 °C。從圖中我們可以觀察到相對於 AlGaInAs 以及 InAsP 材料系統而言，InGaAsN 材料系統(E)擁有相當低的透明載子密度。此外從圖中我們也可以發現到

當載子密度在低於及高於  $2.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  時, InGaAsN 與 AlGaInAs 材料系統分別擁有最高的 peak material gain。

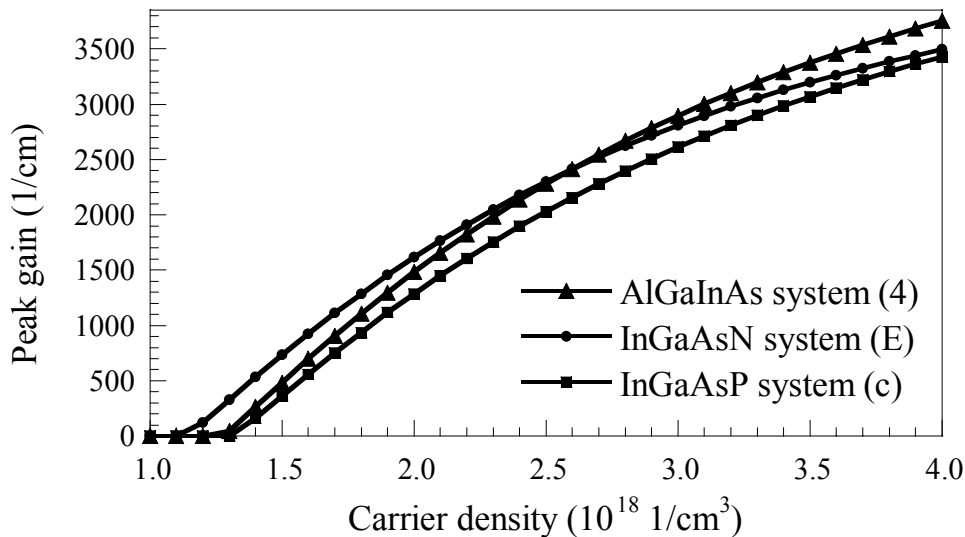


圖2.10、三大活性層材料系統peak material gain與carrier density之間的比較關係圖。

最後在這一章的文末，我綜整了前面兩章有關 InGaAsP (InAsP)、AlGaInAs 以及 InGaAsN 這三大材料系統的結構特性與定性的相關比較，如下頁表 2.12 所示，其中包含各材料系統的特性溫度範圍以及增益性能(gain performance)等相關資訊。從表中我們可以觀察到，相對於傳統的 InGaAsP 材料系統而言，InAsP、AlGaInAs 以及 InGaAsN 這三種新的材料結構與設計方式有較佳的優勢可以成為長波長光纖通訊雷射光源的活性層結構。此外值得一提的是，從表中我們也可以發現到 AlGaInAs 與 InGaAsN 這兩大活性層材料系統除了擁有極高的 conduction band offset  $E_c$  外，其高的增益性能與低的透明載子密度也



較傳統的 InGaAsP 材料系統表現得更為突出。

表 2.12、長波長光纖通訊雷射光源使用材料的比較。

Material	InGaAsP	InAsP	AlGaInAs	InGaAsN
Band offset ratio	0.4 : 0.6	0.65 : 0.35	0.72 : 0.28	0.79 : 0.21
Conduction band offset	100 meV	110 meV	300 meV	413 meV
Characteristic temperature (CW)	50 60 K	81 92 K	50 120 K	70 110 K
Gain performance	Low	Middle	High	High
Transparency carrier density	High	Middle	Low	Quite low
Substrate	InP	InP	InP	GaAs

## 參考文獻：

- [1] Lastip User's Manual Version 2004.08 Crosslight Inc. Software, Canada. Available online at web page <http://www.crosslight.ca>.
- [2] Y. A. Chang, H. C. Kuo, Y. H. Chang, and S. C. Wang, "Simulation of 1300-nm  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.986}\text{N}_{0.014}/\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  quantum-well lasers with various  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  strain compensated barriers," *Opt. Communi.* **241**, pp. 195–202 (2004).
- [3] Y. Yoshida, H. Watanabe, K. Shibata, A. Takemoto, and H. Higuchi, "Theoretical and experimental analysis of leakage current in InGaAsP BH lasers with p-n-p-n current blocking layers," *IEEE J. Quantum Electron.* **35**, pp. 1332–1336 (1999).
- [4] Y. Yoshida, H. Watanabe, K. Shibata, A. Takemoto, and H. Higuchi, "Analysis of characteristic temperature for InGaAsP BH lasers with p-n-p-n blocking layers using two-dimensional device simulator," *IEEE J. Quantum Electron.* **34**, pp. 1257–1262 (1998).
- [5] J. Minch, S. H. Park, T. Keating, and S. L. Chuang, "Theory and experiment of  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  and  $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$  long-wavelength strained quantum-well lasers," *IEEE J. Quantum Electron.* **35**, pp. 771–782 (1999).
- [6] S. R. Selmic, T. M. Chou, J. P. Sih, J. B. Kirk, A. Mantie, J. K. Butler, D. Bour, and G. A. Evans, "Design and characterization of 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs–InP multiple-quantum-well lasers," *IEEE J. Sel.*

- Top. Quantum Electron. **7**, pp. 340–349 (2001).
- [7] J. Piprek, *Semiconductor optoelectronic devices*, Academic Press, San Diego, California, USA, 2003.
- [8] Z. M. Li and T. Bradford, “A comparative study of temperature sensitivity of InGaAsP and AlGaAs MQW lasers using numerical simulations,” *IEEE J. Quantum Electron.* **31**, pp. 1841–1847 (1995).
- [9] J. Piprek, J. K. White, and A. J. SpringThorpe, “What limits the maximum output power of long-wavelength AlGaInAs/InP laser diodes?,” *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, pp. 1253–1259 (2002).
- [10] J. C. L. Yong, J. M. Rorison, and I. H. White, “1.3- $\mu\text{m}$  quantum-well InGaAsP, AlGaInAs, and InGaAsN laser material gain: a theoretical study,” *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, pp. 1553–1564 (2002).
- [11] S. Mogg, and J. Piprek, “Optimization of the barrier height in 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP multiple-quantum-well active regions for high temperature operation,” *Proc. SPIE* **4283**, pp. 227–237 (2001).
- [12] P. Thiagarajan, G. E. Giudice, H. Temkin, and G. Y. Robinson, “Gas-source molecular beam epitaxial growth of low threshold current 1.3  $\mu\text{m}$  InAsP/InGaAsP lasers,” *J. Crystal Growth* **175/176**, pp. 945–947 (1997).
- [13] R. Mottahedeh, S. K. Haywood, K. Woodbridge, M. Hopkinson, G. Hill, and A. Rivers, “1.3  $\mu\text{m}$  InAsP quantum well lasers grown by solid source MBE,” *IEE Proceedings-Optoelectronics* **145**, pp. 3–6

(1998).

- [14] H. P. Lei, H. Z. Wu, Y. F. Lao, M. Qi, A. Z. Li, and W. Z. Shen, “Difference of luminescent properties between strained InAsP/InP and strain-compensated InAsP/InGaAsP MQWs,” *J. Crystal Growth* **256**, pp. 96–102 (2003).
- [15] J. Jin, and D. Tian, “Improved performance of 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP–InP lasers with an AlInAs electron stopper layer,” *Semicond. Sci. Technol.* **18**, pp. 960-963 (2003).
- [16] B. Gönül, and M. Oduncuoğlu, “A theoretical comparison of the pressure dependence of the threshold current of phosphorus-, aluminium- and nitrogen-based 1.3  $\mu\text{m}$  lasers,” *Semicond. Sci. Technol.* **19**, pp. 23–32 (2004).
- [17] Y. G. Zhang, J. X. Chen, Y. Q. Chen, M. Qi, A. Z. Li, K. Fröjdh, and B. Stoltz, “Characteristics of strain compensated 1.3  $\mu\text{m}$  InAsP/InGaAsP ridge waveguide laser diodes grown by gas source MBE,” *J. Crystal Growth* **227–228**, pp. 329–333 (2001).
- [18] Gh. Dumitras, and H. Riechert, “Determination of band offsets in semiconductor quantum well structures using surface photovoltage,” *J. Appl. Phys.* **94**, pp. 3955–3959 (2003).
- [19] R. Fehse, S. Tomić, A. R. Adams, S. J. Sweeney, E. P. O’Reilly, A. Andreev, and H. Riechert, “A quantitative study of radiative, Auger, and defect related recombination processes in 1.3- $\mu\text{m}$  GaInNAs-based quantum-well lasers,” *IEEE J. Select. Topics*

- Quantum Electron. **8**, pp. 801–810 (2002).
- [20] J. Wei, F. Xia, C. Li, and S. R. Forrest, “High  $T_0$  long-wavelength InGaAsN quantum-well lasers grown by GSMBE using a solid arsenic source,” IEEE Photon. Technol. Lett. **14**, pp. 597–599 (2002).
- [21] H. Y. Liu, W. M. Soong, P. Navaretti, M. Hopkinson, and J. P. R. David, “Enhanced optical and structural properties of 1.3  $\mu\text{m}$  GaInNAs/GaAs multiple quantum-well heterostructures with stepped strain-mediating layers,” Appl. Phys. Lett. **86**, pp. 062107-1–062107-3 (2005).
- [22] A. Martinez, J. G. Provost, B. Dagens, V. Sallet, D. Jahan, K. Merghem, L. Ferlazzo, J. Landreau, O. L. Gouezigou, J. C. Harmand, and A. Ramdane, “9.7 GHz small-signal bandwidth of three-quantum well GaInNAs/GaAs laser diodes operating at 1.35  $\mu\text{m}$ ,” Electron. Lett. **40**, pp. 425–426 (2004).
- [23] C. S. Peng, N. Laine, J. Konttinen, S. Karirinne, T. Jouhti, and M. Pessa, “High-performance singlemode InGaNAs/GaAs laser,” Electron. Lett. **40**, pp. 604–605 (2004).
- [24] C. E. Zah, R. Bhat, B. N. Pathak, F. Favire, W. Lin, M. C. Wang, N. C. Andreadakis, D. M. Hwang, M. A. Koza, T. P. Lee, Z. Wang, D. Darby, D. Flanders, and J. J. Hsieh, “High-performance uncooled 1.3- $\mu\text{m}$   $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$  strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications,” IEEE J. Quantum Electron. **30**, pp.

- 511–523 (1994).
- [25] D. Olego, T. Y. Chang, E. Silberg, E. A. Caridi, and A. Pinczuk, “Compositional dependence of band-gap energy and conduction-band effective mass of  $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$  lattice matched to InP,” *Appl. Phys. Lett.* **41**, pp. 476–478 (1982).
- [26] J. W. Pan, K. G. Chau, J. I. Chyi, Y. K. Tu, and J. W. Liaw, “Suppression of electron and hole leakage in 1.3  $\mu\text{m}$  AlGaInAs/InP quantum well lasers using multiquantum barrier,” *Appl. Phys. Lett.* **72**, pp. 2090–2092 (1998).
- [27] J. C. L. Yong, J. M. Rorison, M. Othman, H. D. Sun, M. D. Dawson, and K. A. Williams, “Simulation of gain and modulation bandwidths of 1300 nm RWG InGaAsN lasers,” *IEE Proceedings-Optoelectronics* **150**, pp. 80–82 (2003).
- [28] F. Robert, A. C. Bryce, J. H. Marsh, A. J. SpringThorpe, and J. K. White, “Passive mode locking of InAlGaAs 1.3- $\mu\text{m}$  strained quantum wells extended cavity laser fabricated by quantum-well intermixing,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, pp. 374–376 (2004).
- [29] T. Nakamura, T. Okuda, R. Kobayashi, Y. Muroya, K. Tsuruoka, Y. Ohsawa, T. Tsukuda, and S. Ishikawa, “1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs strain compensated MQW-buried-heterostructure lasers for uncooled 10-Gb/s operation,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **11**, pp. 141–148 (2005).

### 第三章 1.3- $\mu\text{m}$ AlGaInAs 與 InGaAsN 雷射特性之探討

從前面兩章的介紹與分析探討中，我們可以知道 AlGaInAs 與 InGaAsN 材料系統擁有許多優異的材料特性，如具有極高的 conduction band offset、較佳的增益性能以及較低的透明載子密度等，都較傳統的 InGaAsP 材料系統有更好的優勢可以成為長波長光纖通訊雷射光源的活性層結構(請參見第二章表 2.12)。

因此，在這一章中我將針對 AlGaInAs 與 InGaAsN 這兩大活性層材料系統進行一系列雷射特性的探討。在 AlGaInAs 雷射系統方面，我將研究電子阻礙層(electron stopper layer)對電子溢流(overflow current)以及 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 雷射性能的影響；而在 InGaAsN 雷射系統方面，我將探討應力補償式(strain compensating) barrier 對 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsN 雷射性能以及物理相關特性的影響。

#### 3.1 電子溢流對 AlGaInAs 雷射系統的影響與介紹

在探討分析 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 雷射系統的相關特性前，首先我要介紹電子溢流對 AlGaInAs 雷射結構的影響。下頁圖 3.1 為 Pan 等人所設計應用在 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 量子井雷射的 multiquantum barrier (MQB) 結構示意圖[1]，其中亦包含傳統的 step-index separate confinement heterostructure (SCH)的結構設計方式。

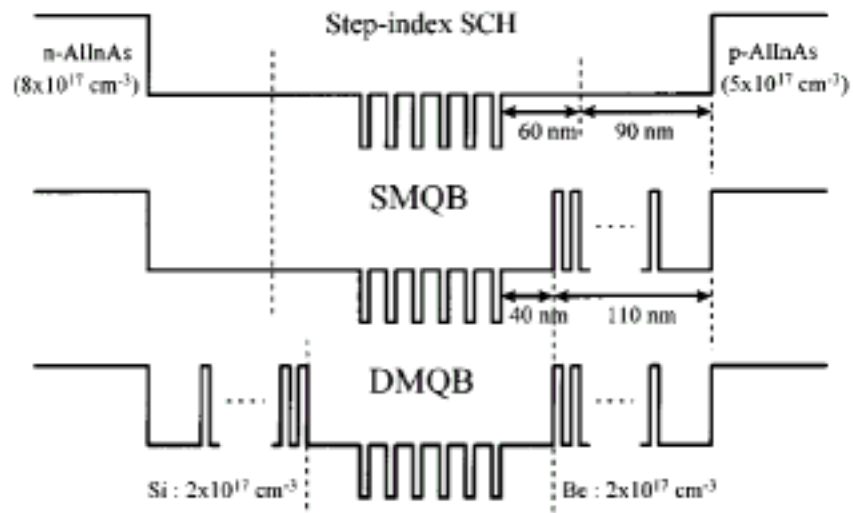


圖 3.1、MQB 與傳統 SCH 結構的導電帶示意圖。

從上圖以及 Pan 等人的文章內容中，我們可以歸納出 MQB 的結構設計可以提供強大的位能障來抑制電子和電洞的溢流狀況，故可以有效地提昇元件的特性溫度  $T_0$  和降低臨界電流密度  $J_{th}$  值，其實驗結果如下圖 3.2 與表 3.1 所示[1]：

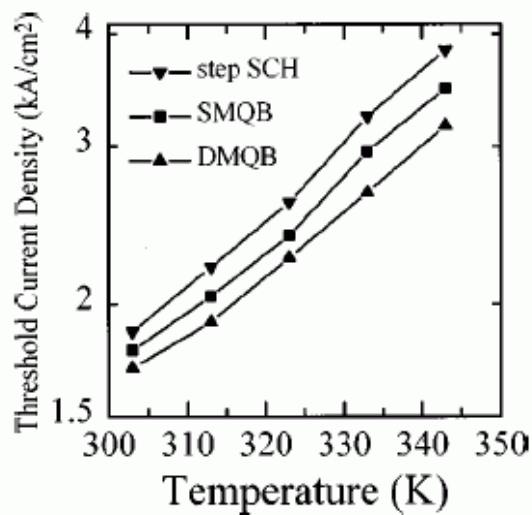


圖 3.2、MQB 與傳統 SCH 結構的臨界電流密度比較圖。



表 3.1、MQB 與傳統 SCH 結構的特性溫度對照表。

Devices	Characteristic temperature (K)	
	300–330 K	330–350 K
Step-index SCH	60	52
SMQB	68	54
DMQB	71	59

從圖 3.2 中我們可以觀察到，傳統 step SCH 的雷射結構擁有最高的臨界電流密度值；而具有抑制載子溢流的 SMQB 以及 DMQB 雷射結構則在相同的操作溫度下擁有較低的臨界電流密度值。此外從表 3.1 中我們也可以發現到，具有抑制載子溢流的 SMQB 與 DMQB 雷射結構其特性溫度值較傳統的 step SCH 結構高出許多(有關特性溫度的詳細介紹請參見第一章第 1.1.3 節)。

除了上述 multiquantum barrier 的設計方式外，Takemasa 等人也提出利用 p-type 電子阻礙層的結構設計來達到抑制電子溢流以及提昇元件性能的效果[2]。下頁圖 3.3 即為 Takemasa 等人所設計應用在 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 量子井雷射的 electron stopper layer (ESL)結構示意圖[2]，其中圖(a)為涵蓋電子阻礙層的活性層結構設計；而圖(b)則是未加上電子阻礙層的設計方式來做為對照組。從圖中我們可以觀察到此 AlGaInAs 雷射結構的活性層內有七個量子井(quantum wells)；而在活性層的兩旁則是具有可得到較小遠場發散角的階梯式 GRIN-SCH 結構設計。在此

值得一提的是，在圖(a)中所加入的 p-type AlInAs 電子阻礙層結構設計其晶格常數是與基板 InP 所匹配的[2]。

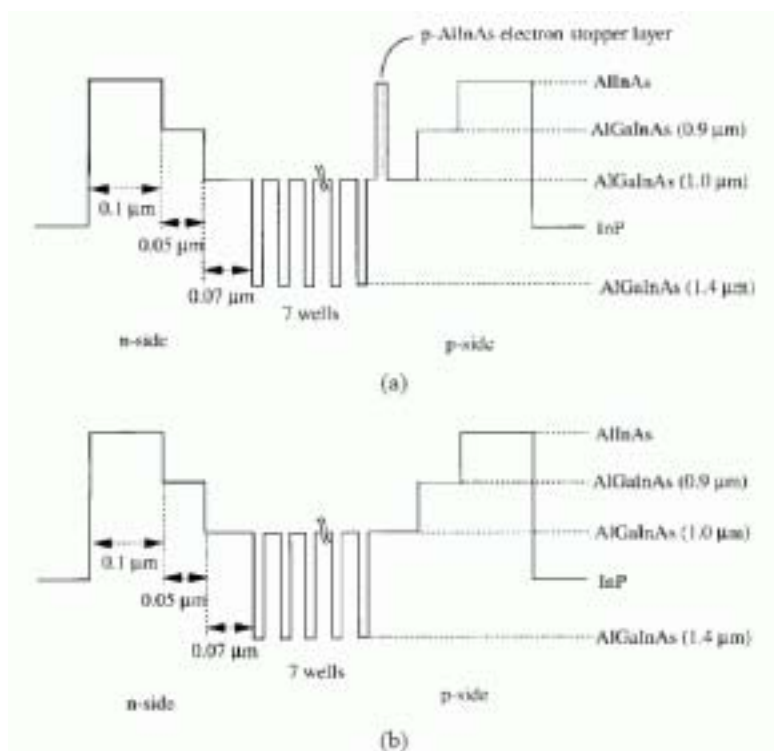


圖 3.3、With 與 without p-AlInAs 電子阻礙層的導電帶結構示意圖。

在接下來的研究中，Takemasa 等人也利用圖 3.3 所設計的結構方式進行一連串相關的比較與分析，其實驗結果如底下圖 3.4、3.5 以及 3.6 所示[2]，其中圖 3.4 中的(a)圖為涵蓋 AlInAs 電子阻礙層的實驗結果；而(b)圖則是未加上電子阻礙層的實驗結果。從圖 3.4 中我們可以觀察到，涵蓋 p-type AlInAs 電子阻礙層的雷射結構其特性溫度值較原始未加上阻礙層的結構設計高出許多。此外值得注意的是，從圖 3.4

中我們也可以發現到，相對於原始未加上阻礙層的結構設計而言，涵蓋 p-type AlInAs 電子阻礙層的雷射結構其特性溫度值隨著操作溫度的提升有較穩定的趨勢。

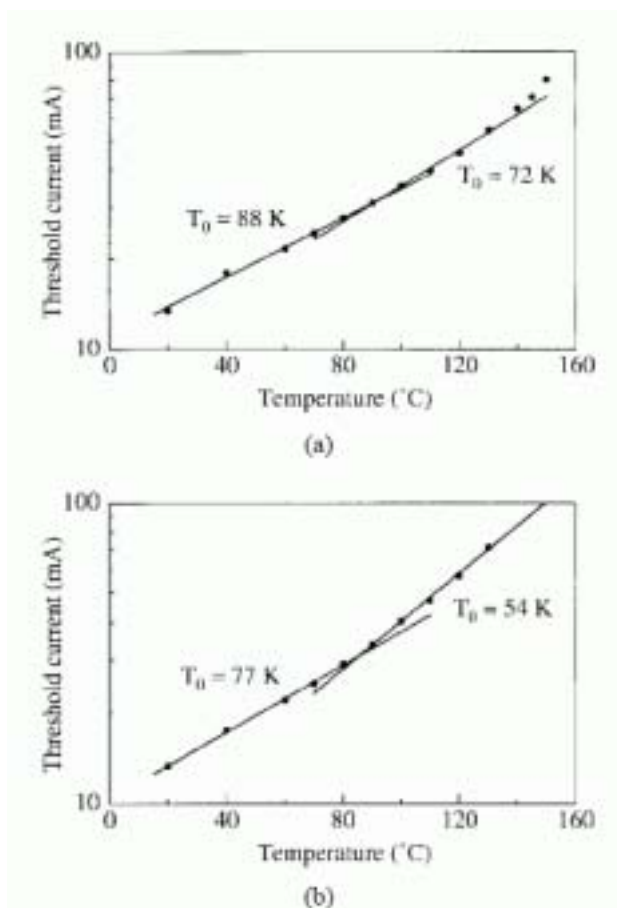


圖 3.4、With 與 without p-AlInAs 電子阻礙層的特性溫度比較圖。

此外 p-type AlInAs 電子阻礙層除了可以提昇雷射結構的特性溫度  $T_0$  外，對於元件的斜率效能也會有所改善，如下頁圖 3.5 所示。從圖中我們可以觀察到，涵蓋 p-type AlInAs 電子阻礙層的雷射結構其 normalized slope efficiency (NSE)較原始未加上阻礙層的結構設計高出

許多，特別是在當操作溫度高於 100 °C 時其兩者 NSE 的差異性更為顯著。因此從圖 3.5 的實驗結果中也可以歸納出 p-type AlInAs 電子阻礙層的結構設計對於在高溫下抑制電子溢流有相當大的助益[2]。

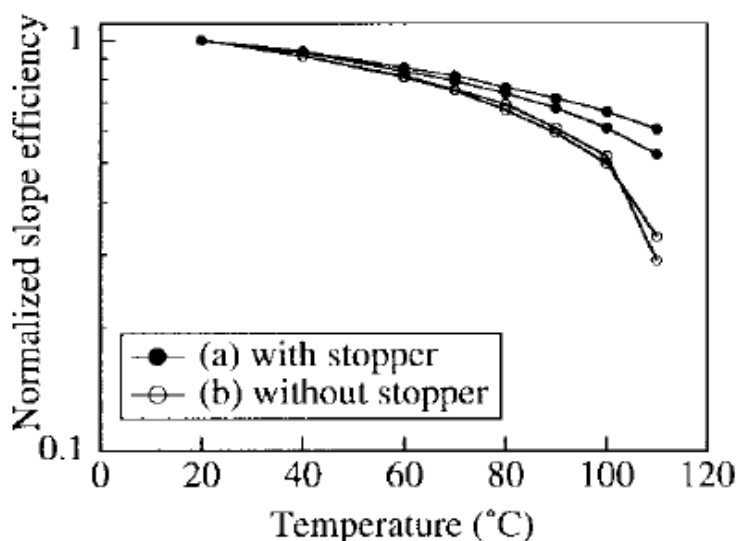


圖 3.5、With 與 without p-AlInAs 電子阻礙層的斜率效能比較圖。

接著由 Takemasa 等人的實驗結果中我們也可以得到涵蓋 p-type AlInAs 電子阻礙層雷射系統的 L-I 性能圖(在連續波的操作下)，如下頁圖 3.6 所示，其中 well 的成分為具有 1% 壓縮應力的 AlGaInAs 材料結構，而其 ridge 以及共振腔長的寬度則分別為 3 與 350  $\mu\text{m}$  [2]。

從圖 3.6 以及 Takemasa 等人的文章中我們可以知道，未加上 p-type AlInAs 電子阻礙層的雷射結構其最大的操作溫度(the maximum operating temperature)是 135 °C；然而當此雷射結構涵蓋 p-type AlInAs 電子阻礙層時，其最大的操作溫度則可向上提昇至 155 °C。

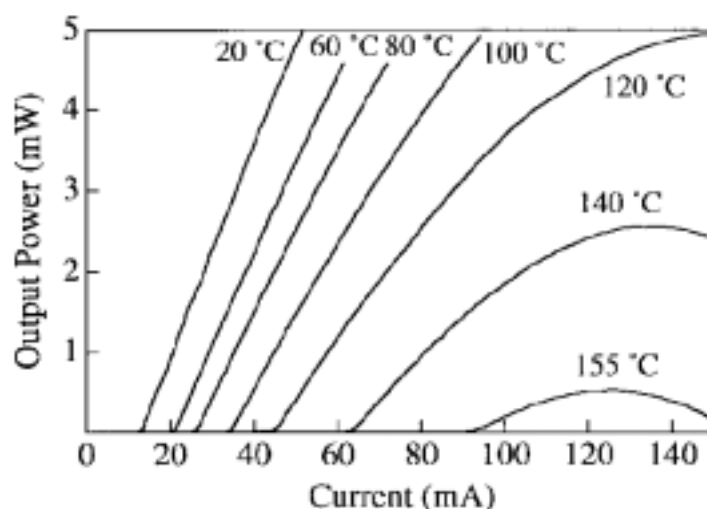


圖 3.6、With p-type AlInAs 電子阻礙層雷射系統的 L-I 性能圖。

最後，由前面 Pan 與 Takemasa 等人的研究分析中我們可以歸納出，雖然 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 雷射系統的 conduction band offset 值為傳統 InGaAsP 材料結構  $\Delta E_c$  值的三倍高，然而高溫下載子溢流對於其雷射性能的影響仍是一個值得探討的課題。因此在接下來的研究中，我將要應用 Lastip 數值模擬軟體來針對電子阻礙層以及電子溢流對 AlGaInAs 材料系統的影響做進一步的分析與探討。

## 3.2 AlGaInAs 雷射特性之探討

### 3.2.1 AlGaInAs 雷射系統模擬結構之介紹

由上一節的介紹內容中我們可以知道，電子溢流對於 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 雷射系統的性能有很大的影響。因此在接下來的研究中我將要選定一個具代表性的 AlGaInAs 雷射結構來對系統溢電流的課題做

完整的分析與探討。本文所模擬的 AlGaInAs 雷射系統是引用自 Selmic 等人文章中所設計的實驗結構[3]，其結構示意圖如下所示：

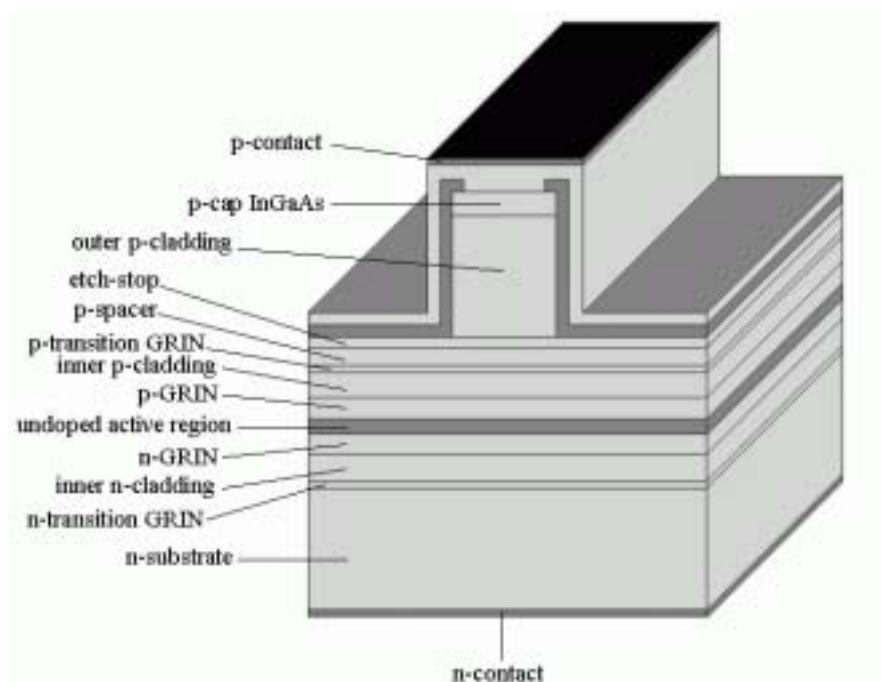


圖 3.7、1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs-InP 量子井雷射之結構設計圖。

其中活性層的材料為  $\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$  wells 以及  $\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$  barriers，其厚度分別為 5 及 10 nm。此外元件的共振腔長為 250  $\mu\text{m}$ 、ridge 的寬度為 5  $\mu\text{m}$ 、而前後雷射鏡面的反射率則分別為 30%以及 70%。有關上述 AlGaInAs 雷射系統每一層結構的詳細資訊可參考下頁表 3.2 [3]。

此外值得一提的是，從 Selmic 等人的文章中我們可以知道為了讓電子流(electron flow)能夠順利地克服位能障(potential barrier)而從 outer n-cladding layer (InP)通過至 inner n-cladding layer ( $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ )，作者

在這兩層的中間設置一 heavily n-doped ( $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )漸變式(graded)的 n-transition layer 來降低其串聯電阻值(series resistance)；此外在 outer 以及 inner p-cladding layer 之間也同樣加入 p-transition layer 來達到降低電阻的效果。

表 3.2、所模擬 AlGaInAs 雷射系統之詳細結構對照表。

Layer	Composition	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Refractive index
n-substrate	InP	1.25	3.1987
n transition GRIN	$\text{Al}_{0.4128}\text{Ga}_{0.0672}\text{In}_{0.52}\text{As}$ to $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$	0.01	3.2689–3.2310
inner n-cladding	$\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$	0.11	3.2310
n-GRIN	$\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ to $\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	0.1	3.2310–3.3728
QW	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	0.005	3.4850
barrier	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	0.01	3.3728
QW	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	0.005	3.4850
barrier	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	0.01	3.3728
QW	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	0.005	3.4850
barrier	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	0.01	3.3728
QW	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	0.005	3.4850
barrier	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	0.01	3.3728
QW	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	0.005	3.4850
p-GRIN	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$ to $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$	0.1	3.3728–3.2310
inner p-cladding	$\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$	0.11	3.2310
p transition GRIN	$\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$ to $\text{Al}_{0.4128}\text{Ga}_{0.0672}\text{In}_{0.52}\text{As}$	0.01	3.2310–3.2689
p-spacer	InP	0.05	3.1987
Etch stop	InGaAsP	0.025	3.3414
outer p-cladding	InP	1.25	3.1987
p-cap	InGaAs	0.2	3.0667

### 3.2.2 模擬結果與分析

在介紹完所模擬的 AlGaInAs 結構設計後，接下來在這一節中我將要應用 Lastip 數值模擬軟體來探討此雷射系統相關的物理特性及其雷射性能。底下圖 3.8 (a)為在原始雷射結構下所模擬的變溫 L-I curve 性能圖，其中在室溫(room temperature) 25 °C 的操作下其臨界電流值為 13.2 mA；而利用第一章式(1)的數學式我們也可以求得在此變溫模擬曲線下的特性溫度  $T_0$  為 76.7 K，這些數值分析結果與 Selmic 等人的實驗數據(圖 3.8 (b))相當地吻合[3]。

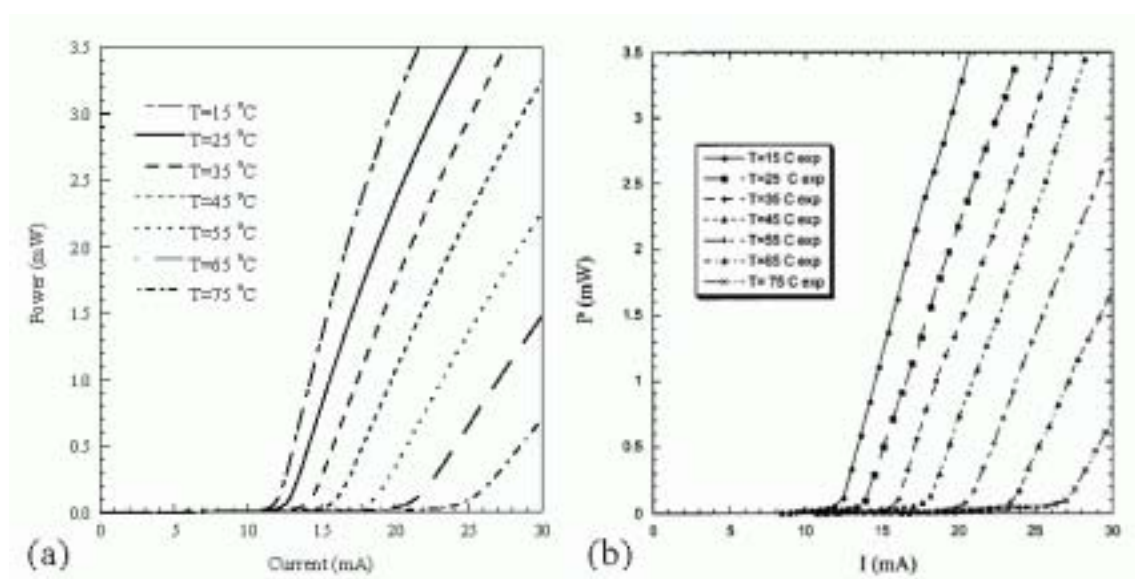


圖 3.8、1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 量子井雷射之(a)模擬與(b)實驗性能圖。

在繼續進行底下的討論之前，首先我要對 internal optical loss coefficient  $\alpha_{int}$  做簡單的介紹，如底下式(12)所示[4]：

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left( \frac{L\alpha_{int}}{\ln R^{-1}} + 1 \right) , \quad (12)$$



其中  $\eta_d$  為微分量子效率(differential quantum efficiency)、 $\eta_i$  為載子的損失(carrier loss)、 $L$  為共振腔的長度(the length of laser cavity)以及  $R$  為反射鏡面的反射率(the facet power reflectivity)。從上式 internal optical loss coefficient  $\alpha_{int}$  的定義以及圖 3.8 模擬與實驗曲線的對照中，可以決定在不同操作溫度下的內部光學損失係數  $\alpha_{int}$ ，如底下圖 3.9 所示：

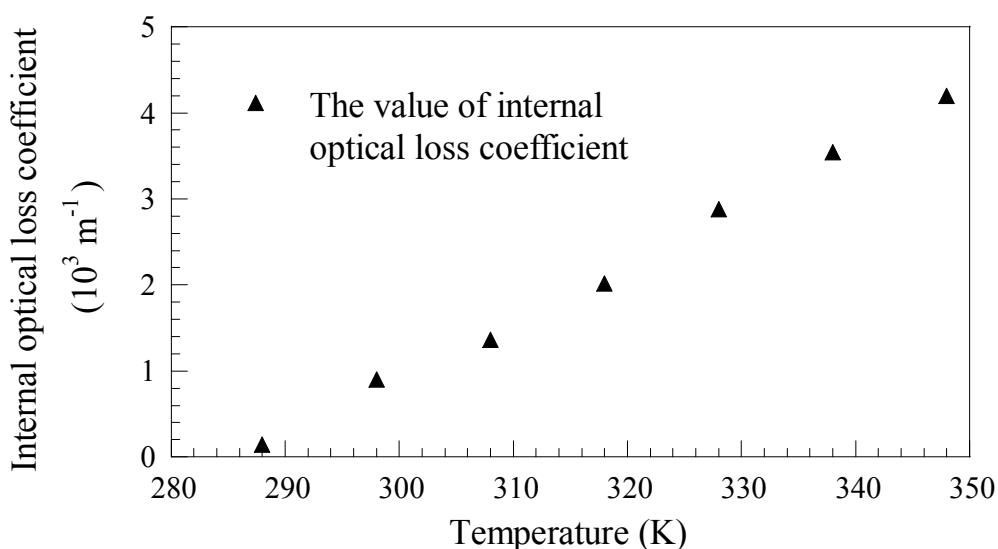


圖 3.9、在不同操作溫度下，所模擬 AlGaInAs 量子井雷射之內部光學損失係數值。

從圖中我們可以觀察到在室溫  $25\text{ }^\circ\text{C}$  下的內部光學損失係數為  $900\text{ m}^{-1}$ ，而此係數值也介於 Pan 等人文章中所提到的內部光學損失係數範圍  $870\text{--}1300\text{ m}^{-1}$  之間[1]。此外從圖 3.9 中我們也可以知道當操作溫度逐漸提升時，其雷射系統的損失係數  $\alpha_{int}$  也會隨之加大，這與 Phillips 等人對於長波長 InGaAsP 以及 InGaAs 雷射系統的研究結果趨勢(下頁圖 3.10)相當地吻合[5]。

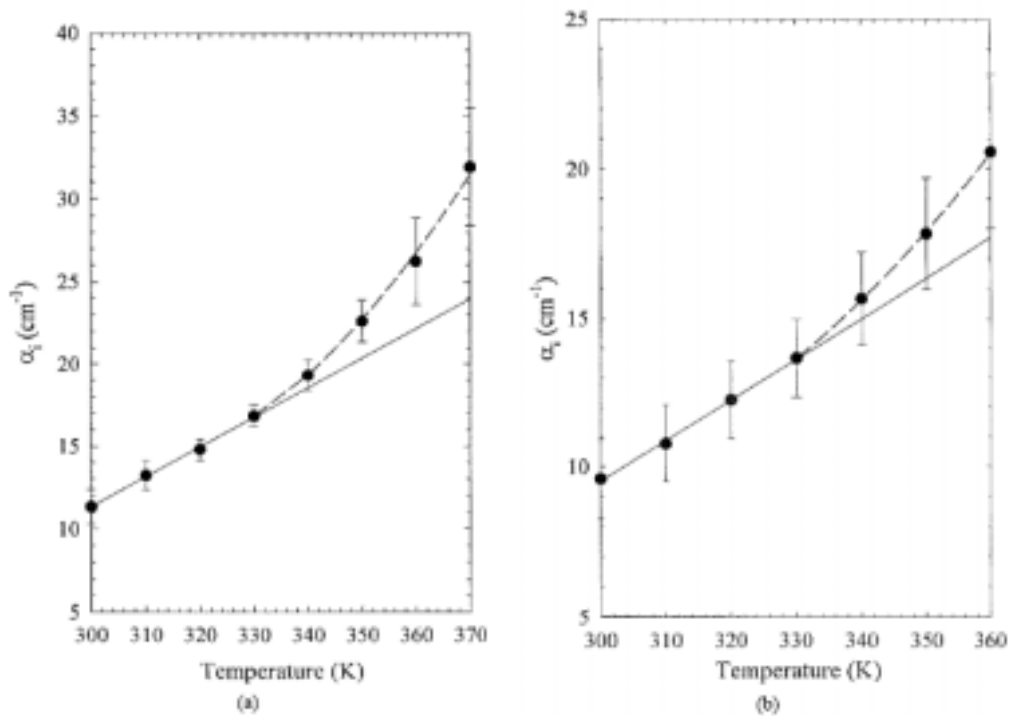


圖 3.10、(a) 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsP 與(b) 1.5- $\mu\text{m}$  InGaAs 量子井雷射之內部光學損失係數值與溫度的關係。

有關 AlGaInAs 雷射系統相關的物理參數與數學函式可參考本文第一章第 1.2.2 節以及第二章第 2.4 節，在此便不再多加贅述。在接下來的研究中我將要探討在上述圖 3.7 所設計的原型雷射結構下，電子溢流百分比(overflow percentage)與操作溫度以及量子井個數(well number)之間的關係。如下頁圖 3.11 所示，從圖中我們可以觀察到，當量子井的個數逐漸減少以及操作溫度逐漸提升時，其電子溢流的情況就愈嚴重。此外從圖中我們也可以知道，當此雷射結構在高溫 348 K 以及單量子井的操作下，其溢電流百分比更可高達 16%。

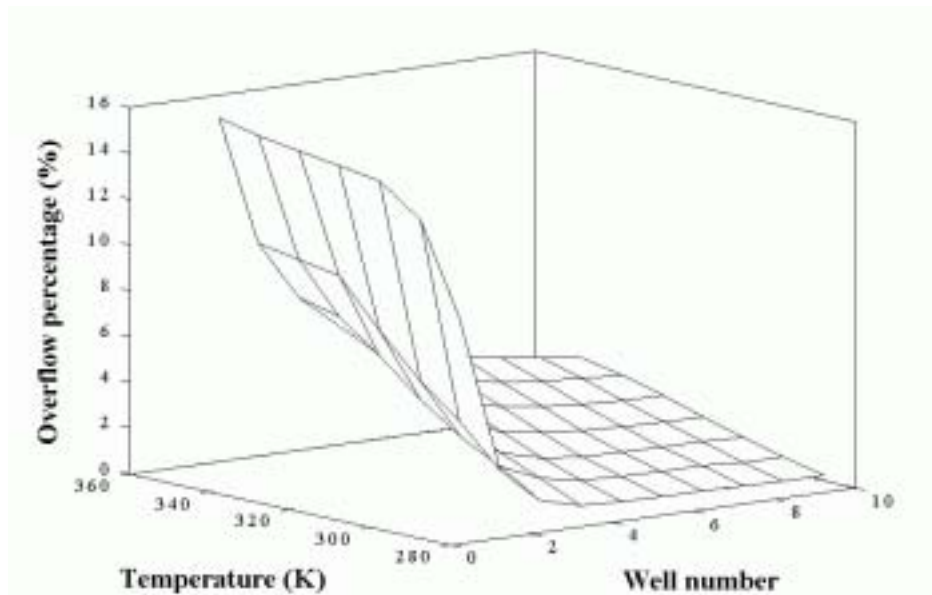


圖 3.11、在原始雷射結構下，所模擬之溢電流百分比與操作溫度以及量子井個數之間的關係圖。

下頁圖 3.12 為在原始雷射結構固定五個量子井的情況下，總輸入電流(total input current)與溢電流值的關係圖，其中操作溫度選定在 25 °C、55 °C 以及 85 °C。從圖中我們可以觀察到隨著總輸入電流的增加，系統溢電流值也會跟著提升。此外當操作溫度愈高時，其溢電流的狀況也會愈加嚴重。而此數值模擬結果也能合理的解釋前述 3.1 節 Takemasa 等人的實驗數據(請參見圖 3.4~3.6 以及本章參考文獻[2])。因此在接下來的研究中，為了讓電子有效地侷限於活性層量子井中而不溢出，我選擇了應用 p-type 電子阻礙層的結構設計來達到抑制電子溢流的效果。由 Takemasa 以及 Jin 等人的文章內容中我們可以知道，以 InP 為基板的雷射系統若利用三元的  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  來做為電子阻礙層的

話，可擁有與基板 InP 晶格匹配的優勢[2,6]。因此，接下來我將要應用 Lastip 數值模擬軟體來探討分析  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層對於  $1.3\text{-}\mu\text{m}$  AlGaInAs 雷射系統的影響。

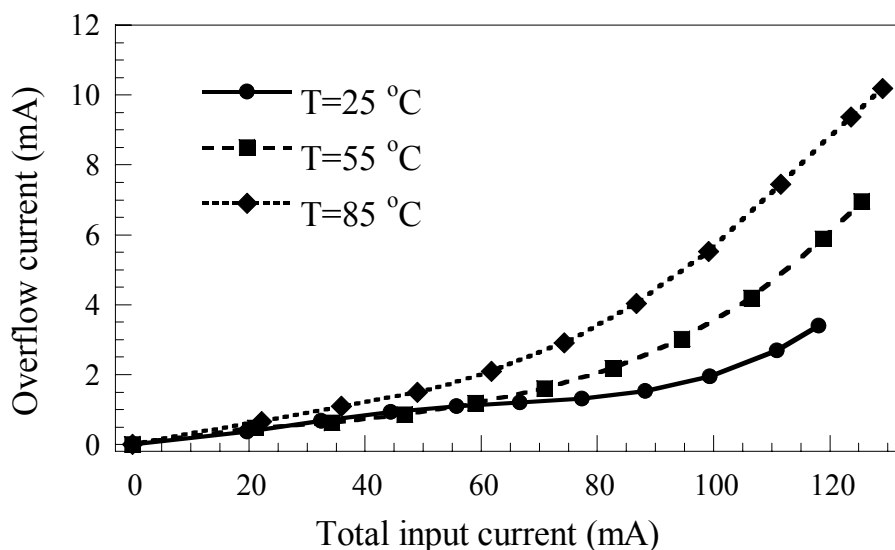


圖 3.12、在原始雷射結構五個量子井的情況下，總輸入電流與溢電流值的關係圖。

下頁圖 3.13 為在原始雷射結構下加入 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  ESL 的導電帶能帶示意圖。從這一節圖 3.11 以及 3.12 的模擬分析中，我們可以知道當操作溫度愈高時，其溢電流的情況也會愈加嚴重。因此，在接下來的研究中，我將要針對 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  ESL 在高溫操作的情況下 ( $T = 75\text{ }^\circ\text{C}$ )，其寬度以及 p-doping 摻雜濃度的最佳化設計分析。下頁圖 3.14 為在不同寬度的 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  ESL 的結構設計下，其雷射效能的比較分析圖。從圖中我們可以觀察到，當此 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  ESL 的寬度為 20 nm 時，其在高溫操作 ( $T = 75\text{ }^\circ\text{C}$ ) 的雷射效能有最佳值。

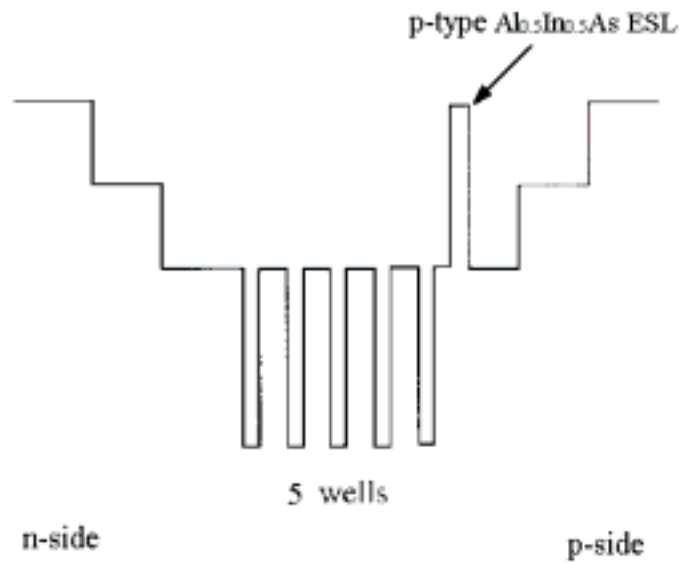


圖 3.13、在原始雷射結構下加入 p-type  $Al_{0.5}In_{0.5}As$  電子阻礙層的導電帶能帶示意圖。

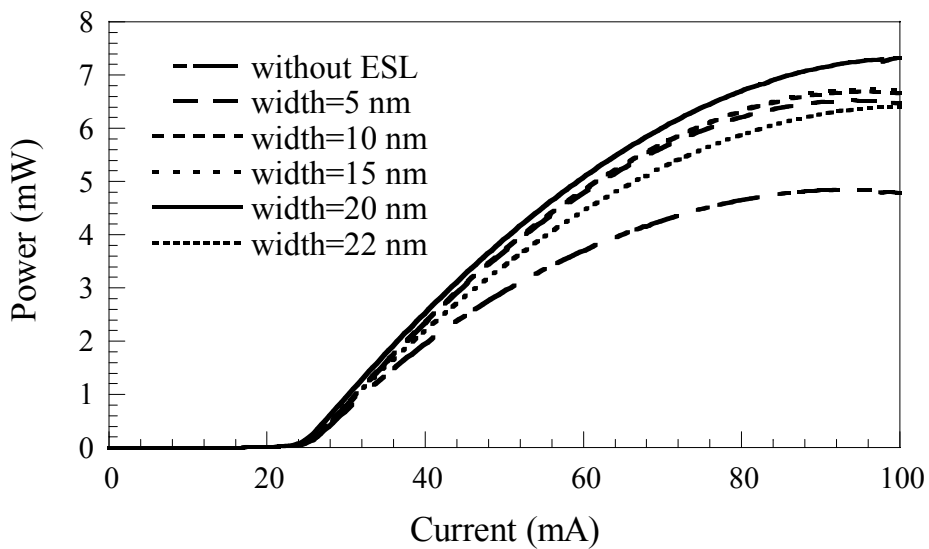


圖 3.14、變化不同寬度的 p-type  $Al_{0.5}In_{0.5}As$  ESL 的結構設計下，其雷射性能的比較分析圖。

此外值得注意的是，從圖 3.14 中我們也可以發現到當 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的寬度大於 20 nm 時，其雷射性能反而會逐漸降低。這是由於過寬的電子阻礙層亦會造成來自 p-type 電洞行進的不易以及增加元件電阻值等負面的影響。

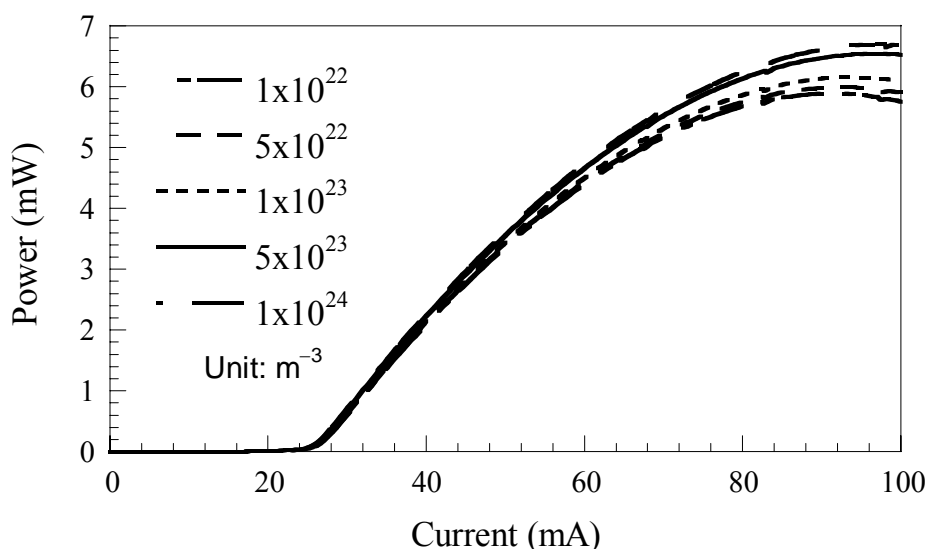


圖 3.15、變化  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層不同的 p-doping 摻雜濃度時，其雷射性能的比较分析圖。

上圖 3.15 為在變化  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層不同的 p-doping 摻雜濃度時，其雷射性能的比较分析圖，其中操作溫度皆設定在 75 °C；而阻礙層的寬度則固定在 20 nm。從圖中我們可以觀察到，當  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  阻礙層的濃度摻雜至  $5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$  時，其高溫操作的雷射性能達到一個飽和值。此外當摻雜濃度繼續向上提升而高於  $5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$  時，其雷射效能特性的改善並無顯著的效果。最後，在最佳化設計 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的寬度以及 p-doping 摻雜濃度後，我也對此 p-type

$\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$  電子阻礙層的鋁濃度進行相關的分析與討論，如底下圖 3.16 所示：

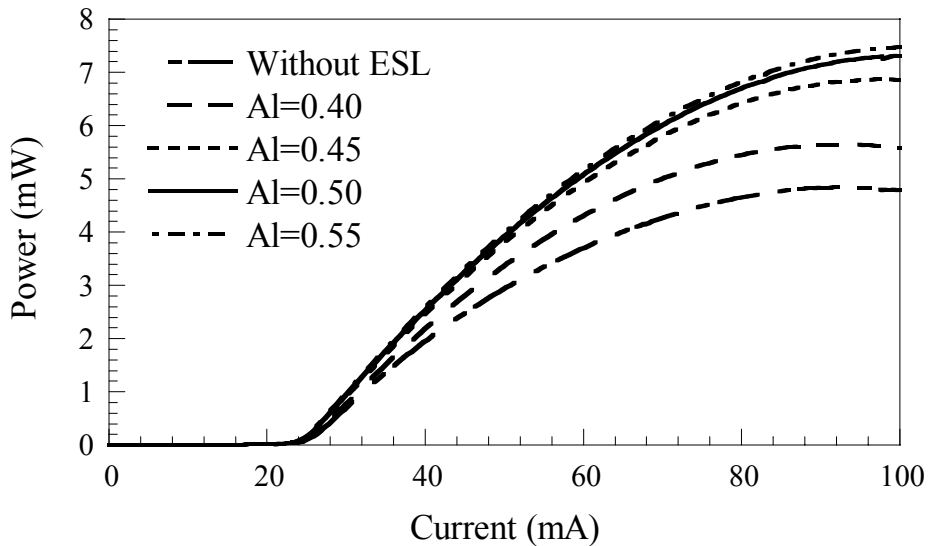


圖 3.16、變化 p-type  $\text{Al}_y\text{Ga}_x\text{In}_{1-x-y}\text{As}$  電子阻礙層不同的鋁含量時，其雷射性能的比较分析圖。

其中操作溫度設定在  $75\text{ }^\circ\text{C}$ ；而阻礙層的寬度以及 p-doping 摻雜濃度則分別固定在  $20\text{ nm}$  與  $5\times 10^{23}\text{ m}^{-3}$ 。此外值得注意的是，在圖 3.16 的比較中，除了當鋁的含量為 0.55 時，銻的含量為 0.45，其餘的狀況銻的含量皆設定為 0.50。從上圖中我們可以觀察到，當阻礙層的鋁含量為 0.50 時確實能夠有效地抑制高溫溢電流的狀況而使雷射性能達到最佳值；而當阻礙層的鋁含量繼續向上提升而高於 0.50 時，其對雷射效能的改善已無顯著的成效。

總結以上圖 3.14~3.16 的分析結果，我們可以知道對本文  $1.3\text{-}\mu\text{m}$   $\text{AlGaInAs}$  雷射系統而言，其 p-type 電子阻礙層最佳化的寬度、p-doping

摻雜濃度以及鋁含量分別為  $20 \text{ nm}$ 、 $5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$  與  $0.50$ 。因此在接下來的分析中，我將固定這最佳化的電子阻礙層結構設計於所模擬的研究內容中。底下圖 3.17 為加上最佳化 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的能帶示意圖，其中操作溫度設定在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，而注入電流為  $35 \text{ mA}$ 。

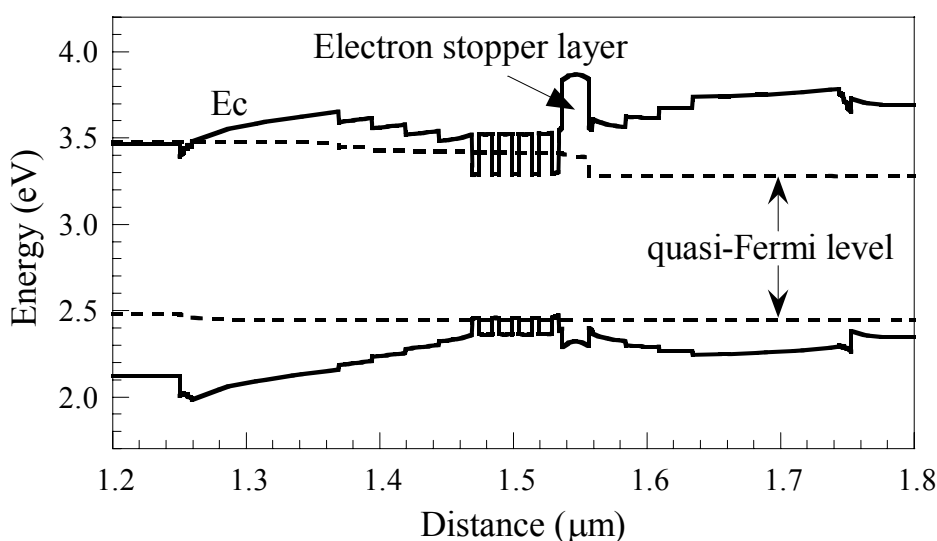


圖 3.17、涵蓋最佳化 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的能帶示意圖。

下頁圖 3.18 為在不同的操作溫度下，有無 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的雷射性能比較圖。從圖中我們可以觀察到，相對於原始未加上電子阻礙層的雷射結構性能，涵蓋  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的雷射結構其輸出功率(output power)有相當明顯地提昇。此外從圖 3.18 中我們也可以知道，隨著操作溫度的升高，p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層對於雷射性能的改善更為顯著。最後值得注意的是，該雷射系統的特性溫度  $T_0$  也從未加上電子阻礙層的  $76.7 \text{ K}$  升高至涵蓋 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的  $82.3 \text{ K}$  (在操作溫度  $288 \sim 348 \text{ K}$  之間)。



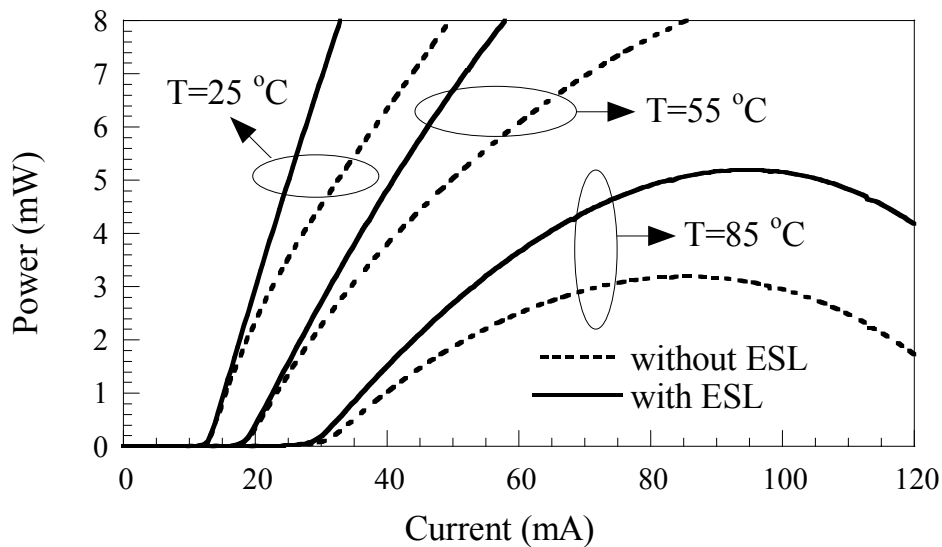


圖 3.18、不同的操作溫度下，有無 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的雷射性能比較圖。

在繼續進行底下的討論之前，首先我們先回顧到第二章第 2.4 節中對  $\text{AlGaInAs}$  活性層材料系統的探討內容。從這一節的研究中我們可以知道材料(4)的結構設計不但擁有高的自發輻射以及材料增益頻譜值，且其 peak material gain 隨著操作溫度的變化也較其他四種結構設計更為穩定(請參見第二章 pp. 42~45, 其中材料(2)即為本章所模擬的原始活性層結構設計)。因此在接下來的研究內容中，我將要探討在不同的活性層結構設計下其雷射性能的分析與比較。下頁表 3.3 為本章所模擬的原始活性層結構設計與第二章所提出的最佳化活性層材料結構(材料(4))之對照表。從表中我們可以觀察出，雖然兩個活性層材料結構的應力關係相當地接近，然而材料(4)的電子與重電洞有效質量都相對於原始的結構設計來得大。

表 3.3、原始與最佳化活性層結構設計之對照表[3,7]。

Material	Original active region	Number (4)
QW material	$\text{Al}_{0.161}\text{Ga}_{0.102}\text{In}_{0.737}\text{As}$	$\text{Al}_{0.175}\text{Ga}_{0.095}\text{In}_{0.73}\text{As}$
QW length (nm)	5	6
QW strain (%)	1.44 (compressive)	1.4 (compressive)
Barrier material	$\text{Al}_{0.267}\text{Ga}_{0.203}\text{In}_{0.53}\text{As}$	$\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.21}\text{In}_{0.52}\text{As}$
Barrier strain (%)	unstrained	unstrained
Electron effective mass (QW)	0.0476 ( $m_e/m_o$ )	0.0494 ( $m_e/m_o$ )
Heavy hole effective mass (QW)	0.3595 ( $m_{hh}/m_o$ )	0.4777 ( $m_{hh}/m_o$ )
Light hole effective mass (QW)	0.0532 ( $m_{lh}/m_o$ )	0.0517 ( $m_{lh}/m_o$ )

因此在接下來的研究中,我將利用圖 3.7 的雷射結構設計來探討在變化不同的活性層成分時(original active region 與 number (4)), 其雷射性能的比較關係。下頁圖 3.19 與 3.20 分別為這兩種不同的活性層成分在變化操作溫度下(288~348 K), 其臨界電流密度與斜率效能的比較關係圖(都未涵蓋電子阻礙層)。從圖 3.19 中我們可以觀察到,使用材料(4)結構設計的臨界電流密度值較原始活性層結構設計的數值來得低,且當操作溫度愈高時,兩者的差異性更為顯著。此外從圖中我們也可以得到在此操作溫度範圍內,使用材料(4)結構設計的特性溫度  $T_0$  為 91 K,較原始活性層結構設計的特性溫度值(76.7 K)高出許多。另外從圖 3.20 中我們也可以看到,使用材料(4)結構設計的斜率效能也較原始活性層結構設計的效能提昇許多。因此,在接下來的內容中,我將利用材料(4)的結構設計來置換原始的活性層結構設計,並探討其在加上 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的結構下所呈現的雷射特性。

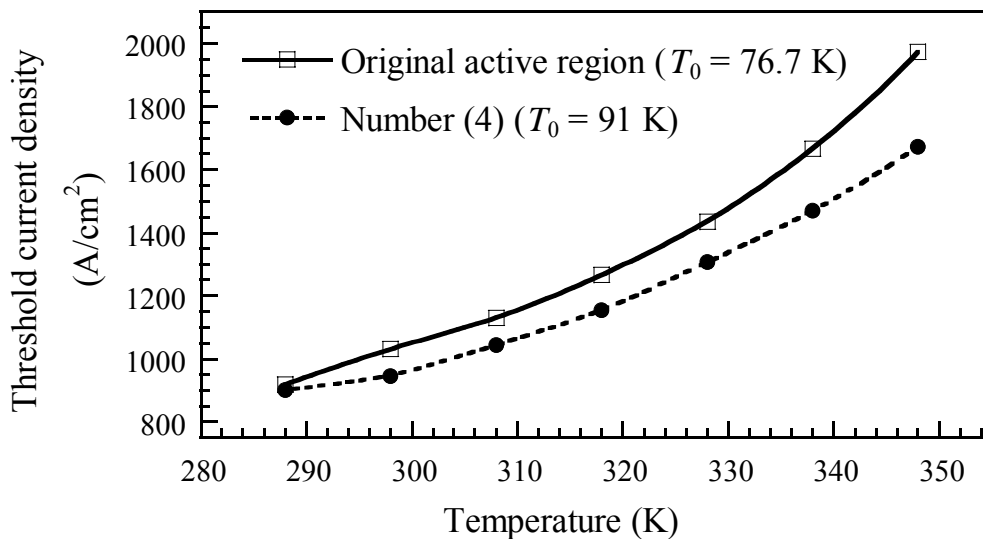


圖 3.19、在變化不同的活性層成分時(original active region 與 number (4))，其臨界電流密度與溫度的關係圖。

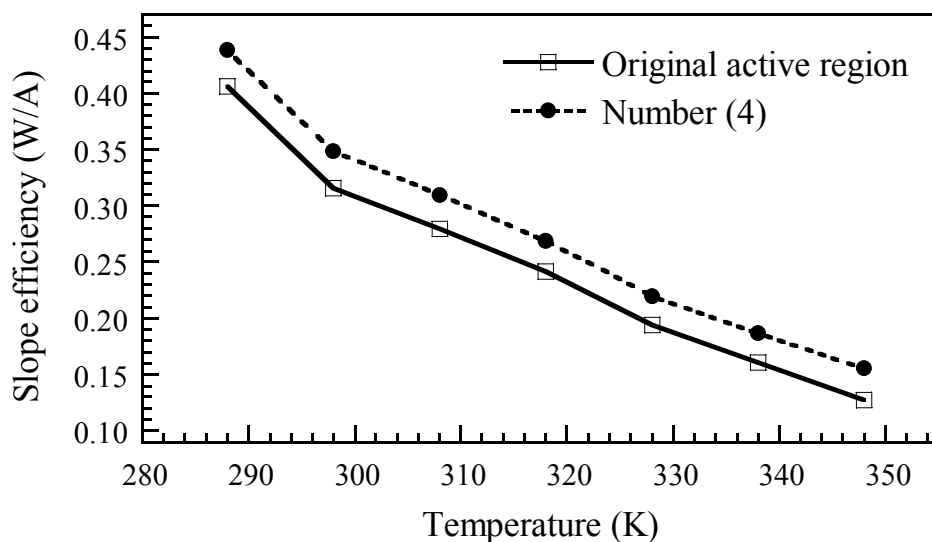


圖 3.20、在變化不同的活性層成分時(original active region 與 number (4))，其斜率效能與溫度的關係圖。

底下圖 3.21 為在加上 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的情況下，以原始活性層結構設計以及材料(4)為 active region 的斜率效能分析圖。從圖中我們可以觀察到，在操作溫度 288~348 K 間，利用材料(4)為活性層結構設計的斜率效能較原始活性層材料的效能要高出許多。此外值得一提的是，該雷射系統的特性溫度  $T_0$  也從利用原始活性層結構設計的 82.3 K 升高至改用材料(4)為活性層結構設計的 94.7 K。

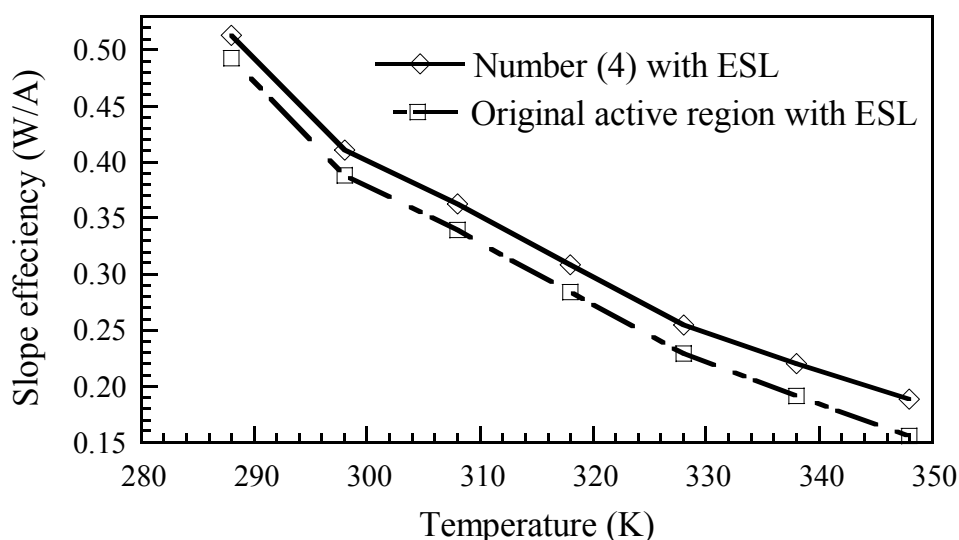


圖 3.21、在加上電子阻礙層的情況下，以原始活性層結構設計以及材料(4)為 active region 的斜率效能分析圖。

底下圖 3.22 與 3.23 分別為在變化共振腔長度以及量子井個數的情況下，以材料(4)為活性層結構設計的臨界電流密度和斜率效能分析圖，其中 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層的結構設計亦被考慮到所模擬的雷射系統中，而操作溫度則固定在 55 °C。從圖 3.22 中我們可以觀察到，當量子井的個數增加時，所需要注入的電流值也會跟著提升，因

此臨界電流密度也會隨之增加。此外當共振腔的長度逐漸縮短時，雷射系統的臨界電流密度值也會快速地向上提升，這是由於在短共振腔長時熱效應(thermal effect)顯著所造成的影響。而這樣的模擬結果也與 Springthorpe 等人所得到的實驗數據趨勢相當地吻合[8]。

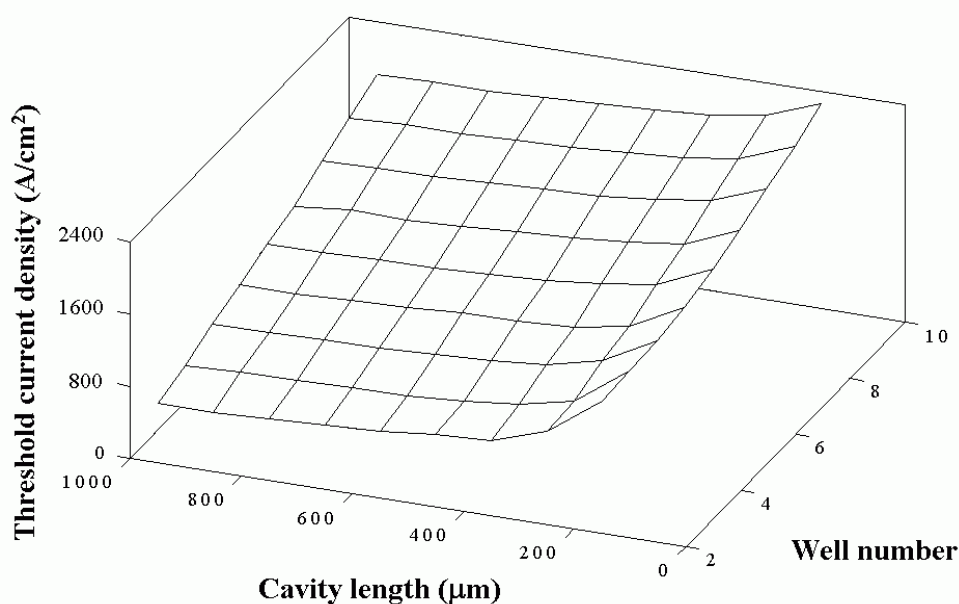


圖 3.22、在變化共振腔長度以及量子井個數的情況下，以材料(4)為 active region 的臨界電流密度分析圖。

另外從圖 3.23 中我們也可以觀察到，隨著量子井個數的增加以及共振腔長度的縮短時，雷射系統的斜率效能也會有向上提昇的趨勢。因此從圖 3.22 與 3.23 的模擬結果中我們可以知道，適當地設計此雷射系統的共振腔長度以及量子井個數是相當地重要的。最後對於本節所設計的 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 最佳化雷射結構也希望能提供給學界先進以及長晶製程者作為參考。

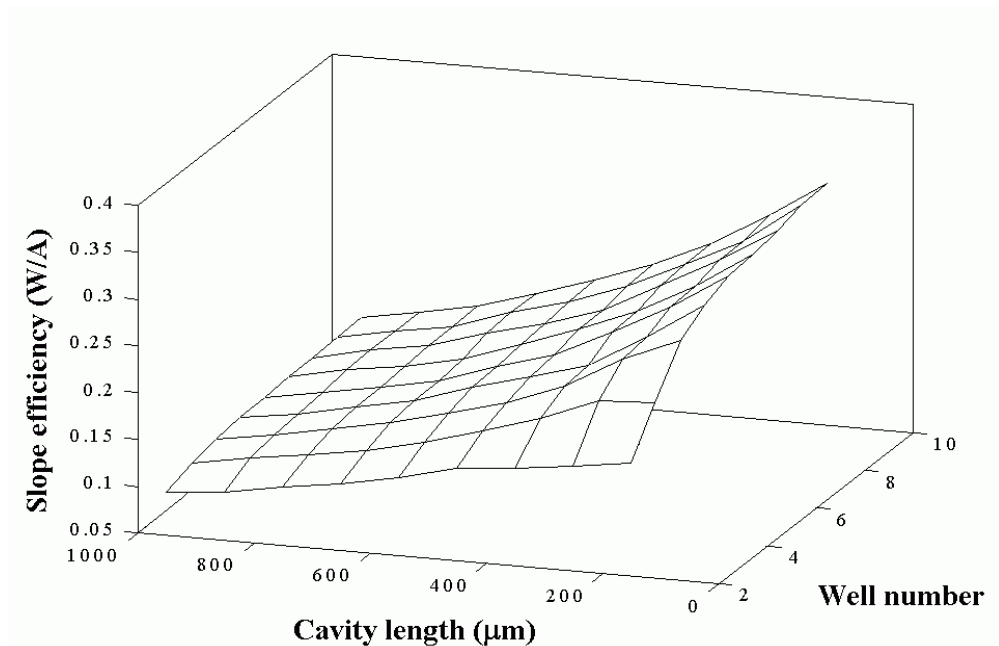


圖 3.23、在變化共振腔長度以及量子井個數的情況下，以材料(4)為 active region 的斜率效能分析圖。

### 3.3 應力補償式 barrier 對 InGaAsN 雷射系統的影響與介紹

在前一節介紹完 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層對 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 雷射系統的影響後，在這一節中我將要針對 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsN 雷射系統的應力補償式活性層結構(strain-compensated active region)來進行相關的研究與分析。

同樣地，在探討分析 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsN 雷射系統的相關特性前，首先我要介紹應力補償式 barrier 對 InGaAsN 雷射結構的影響。底下圖 3.24 為 Tansu 等人所設計應用在 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsN 量子井雷射的 strain-compensated active region 能帶示意圖[9]，其中 well 為具有 2.69%

高壓縮應力的  $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.995}\text{N}_{0.005}$  結構設計；而 barrier 則是具有 0.61% 伸張應力(tensile strain)的應力補償式結構。

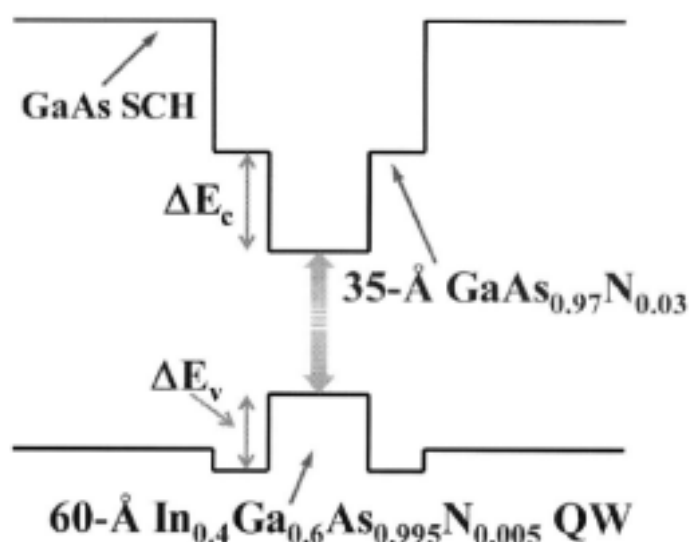


圖 3.24、Tansu 等人所設計應用在 InGaAsN 雷射系統的 strain-compensated active region 能帶示意圖。

下頁圖 3.25 則是 Tansu 等人利用他們所設計的應力補償式活性層結構所做的分析結果，其中所量測的操作溫度範圍為 10 到 50 °C [9]。從圖中我們可以觀察到，在變化共振腔長的過程中(750~2000 μm)，應力補償式的活性層結構設計都擁有較高的特性溫度  $T_0$  值；而反觀一般未加上應力補償式 barrier 的結構設計(即 barrier 為單純 unstrained 的 GaAs)，其特性溫度值都相對較低。此外從圖中我們也可以看到，涵蓋應力補償式活性層結構設計的雷射系統在腔長為 1000 μm 時，其特性溫度  $T_0$  會有極大值(大約為 102 K)。

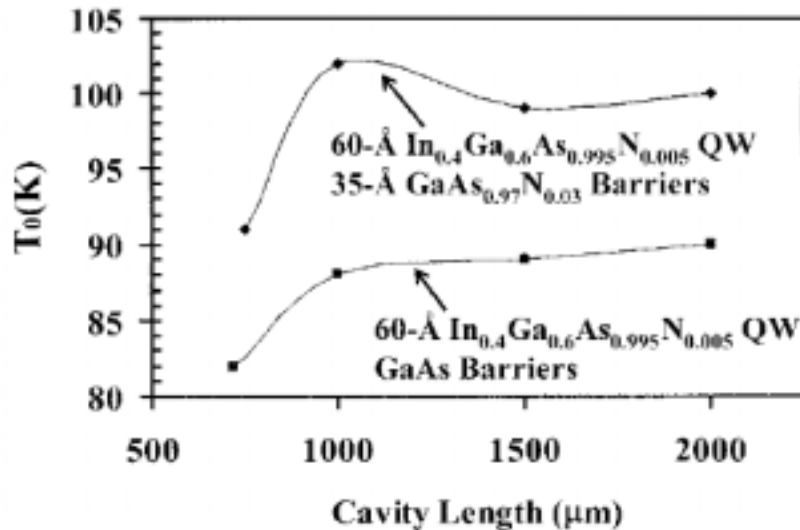


圖 3.25、在變化共振腔長的情況下，涵蓋與未加上應力補償式 barrier 結構的特性溫度比較圖。

下頁圖 3.26 則是承接上述所設計的應力補償式結構所做的另外一項分析，其中共振腔長固定在 750 μm；而所測量的操作溫度範圍則擴大至 90 °C [9]。從圖中我們可以觀察到，應力補償式的雷射結構在低溫的操作範圍(10 到 50 °C)其特性溫度  $T_0$  為 88 K；而在較高溫的操作情況下(50 到 90 °C)則為 78 K，這些數據都較一般未加上應力補償式 barrier 結構的特性溫度值要高出許多。此外從圖中我們也可以看到，應力補償式的雷射結構在操作溫度 10 到 90 °C 的範圍間，其臨界電流密度值都較未加上應力補償式 barrier 的雷射結構要來得低，且當操作溫度愈高時，兩者之間的差異性更為顯著。最後在圖中的數據整理中我們也能看到，應力補償式的結構設計在 20 °C 的雷射波長為 1311 nm；而在 10 到 90 °C 的操作溫度範圍內其整體的特性溫度  $T_0$  為 84 K。



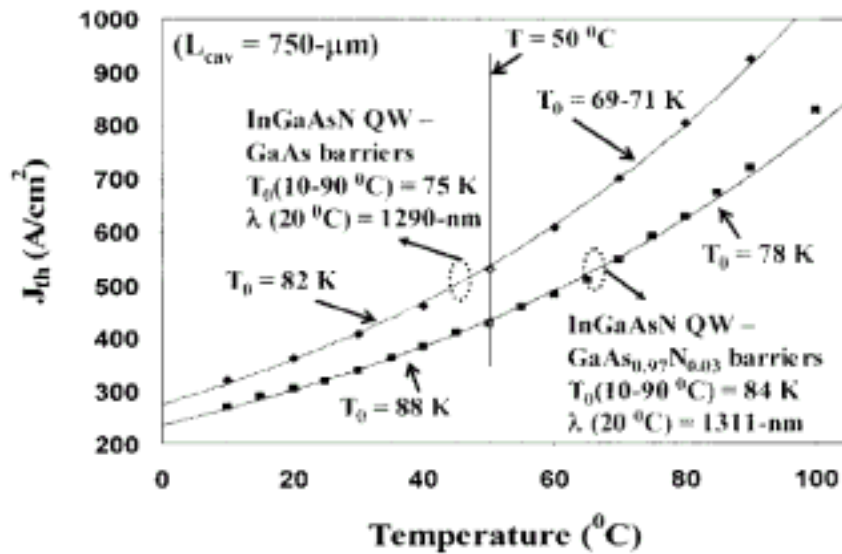


圖 3.26、在固定共振腔長的情況下，涵蓋與未加上應力補償式 barrier 結構的臨界電流密度比較圖。

另外從其他研究學者的實驗結果中我們也可以發現應力補償式結構設計其高雷射性能的特性。下頁圖 3.27 為 Caliman 等人所設計的高性能 InGaAsN 雷射系統之 light-current characteristics 性能示意圖[10]，其中 well 為具有 2.0% 高壓縮應力的  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.993}\text{N}_{0.007}$  結構設計；而 barrier 則是具有 0.2% 伸張應力的應力補償式結構，其成分為  $\text{GaAs}_{0.99}\text{N}_{0.01}$ 。此外此雷射結構的 ridge 以及共振腔長的寬度則分別為 2 及  $425 \mu\text{m}$ 。從圖 3.27 中我們可以觀察到，利用此應力補償式的結構設計所得到的最大操作溫度為  $100^\circ\text{C}$ ，且其在此操作溫度範圍內 ( $20\sim 100^\circ\text{C}$ ) 的特性溫度  $T_0$  也可高達 85 K。另外在 Caliman 等人的文章內容中也宣稱利用此應力補償式的結構設計在共振腔長為  $400 \mu\text{m}$  的情況下，可得到極低的臨界電流值 (9 mA) 以及極高的斜率效能 ( $0.3 \text{ W/A}$ ) [10]。

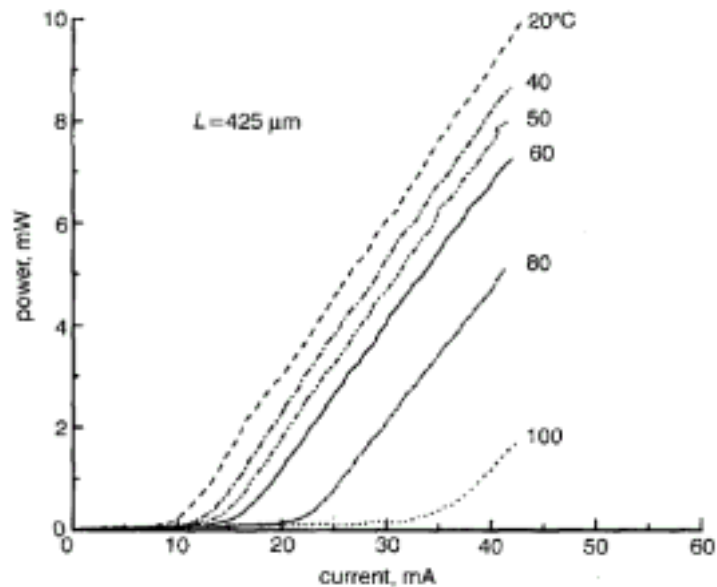


圖 3.27、Caliman 等人所設計的高性能 InGaAsN 雷射系統之 light-current characteristics 性能示意圖。

因此，雖然由前面第二章第 2.3 節的研究內容中我們可以知道，利用 unstrained GaAs 為 barrier 的量子井結構設計可以得到相當高的自發輻射率以及材料增益頻譜值，然而從前述 Tansu 以及 Caliman 等人的研究結果中我們也可以歸納出，相較於一般利用 unstrained GaAs 為 barrier 的雷射結構設計，應力補償式的 InGaAsN 雷射系統似乎可以得到更高的特性溫度  $T_0$  以及相對較低的臨界電流(密度)值。所以在接下來 3.4 節的研究內容中，我將要利用 Lastip 數值模擬軟體來分析探討應力補償式 barrier 對 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsN 雷射系統性能所造成的影響以及相關的物理特性。

### 3.4 InGaAsN 雷射特性之探討

#### 3.4.1 InGaAsN 雷射系統模擬結構之介紹

由上一節的介紹內容中我們可以知道，應力補償式 barrier 對於 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsN 雷射系統的性能有很大的影響。因此在接下來的研究內容中我將要選定一個具代表性的 InGaAsN 雷射結構來對應力補償式的活性層結構設計做完整的分析與探討。本文所模擬的 InGaAsN 雷射系統是引用自 Peng 等人文章中所設計的實驗結構[11]，其結構示意圖如下所示：

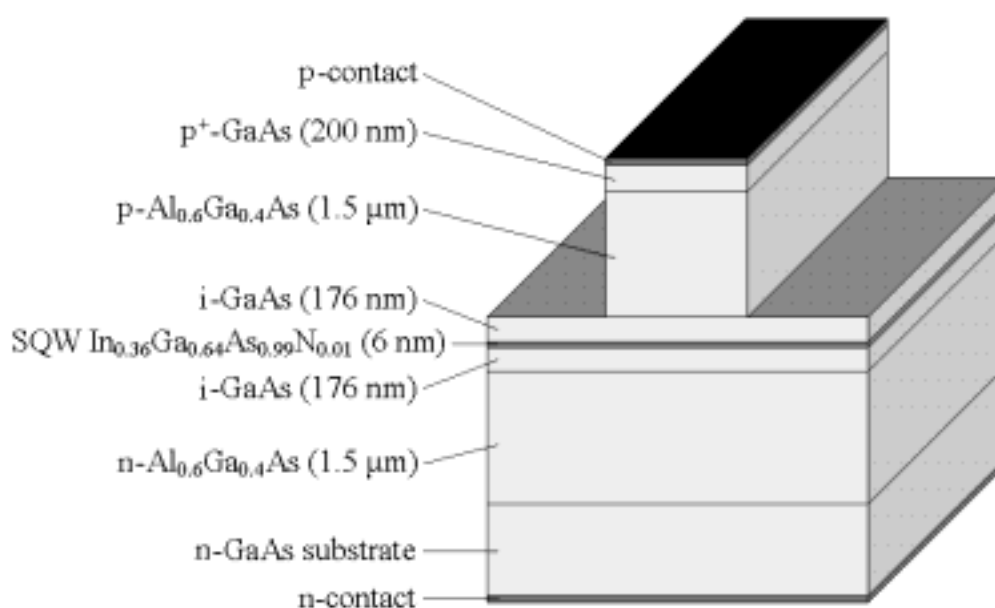


圖 3.28、1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsN-GaAs 量子井雷射之結構設計圖。

其中活性層的材料為 In<sub>0.36</sub>Ga<sub>0.64</sub>As<sub>0.99</sub>N<sub>0.01</sub> wells 以及 GaAs barriers，其厚度分別為 6 及 176 nm。此外元件的共振腔長為 1200  $\mu\text{m}$ ；ridge 的寬

度為  $4\ \mu\text{m}$ ；而前後雷射鏡面的反射率則分別為 10% 以及 60%。此外值得注意的是，本文所模擬雷射系統的活性層結構設計是相同於第二章第 2.3 節所提到的最佳活性層材料，亦即材料(E)。有關 InGaAsN 雷射系統相關的物理參數與數學函式可參考本文第一章第 1.2.1 節以及第二章第 2.3 節，在此便不再多加贅述。

### 3.4.2 模擬結果與分析

在介紹完所模擬的 InGaAsN 結構設計後，接下來在這一節中我將要應用 Lastip 數值模擬軟體來探討此雷射系統相關的物理特性及其雷射性能。

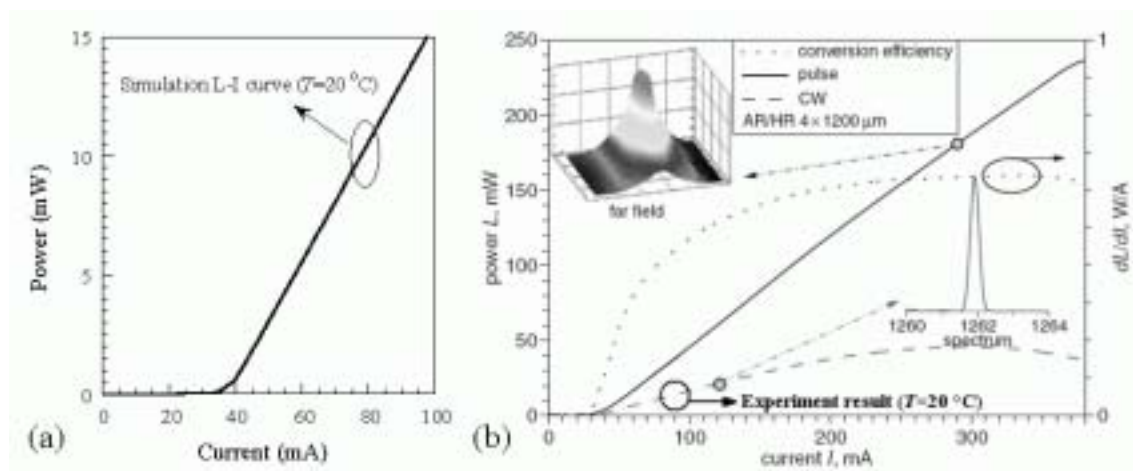


圖 3.29、1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsN 量子井雷射之(a)模擬與(b)實驗性能圖。

上圖 3.29 (a)為在原始雷射結構下所模擬的 L-I curve 性能圖(在連續波的操作下)，其中操作溫度設定為  $20\ ^\circ\text{C}$ ；而圖 3.29 (b)所圈選的 L-I 曲線則是在相同的操作溫度下( $T=20\ ^\circ\text{C}$ )，Peng 等人的實驗結果[11]。

從圖中我們可以發現到，利用 Lastip 所模擬分析出來的結果與 Peng 等人的實驗數據相當地吻合。

在接下來的研究內容中，我將要利用圖 3.28 的原始雷射結構以及前述 Caliman 等人所提出的應力補償式 barrier 來探討 InGaAsN 雷射系統相關的物理特性與雷射性能[10]。底下圖 3.30 為在原始的雷射結構下加入應力補償式 barrier ( $\text{GaAs}_{0.99}\text{N}_{0.01}$ )的能帶示意圖，其中補償式 barrier 的厚度為 10 nm，而操作溫度及注入電流則分別設定在 20 °C 與 55 mA。

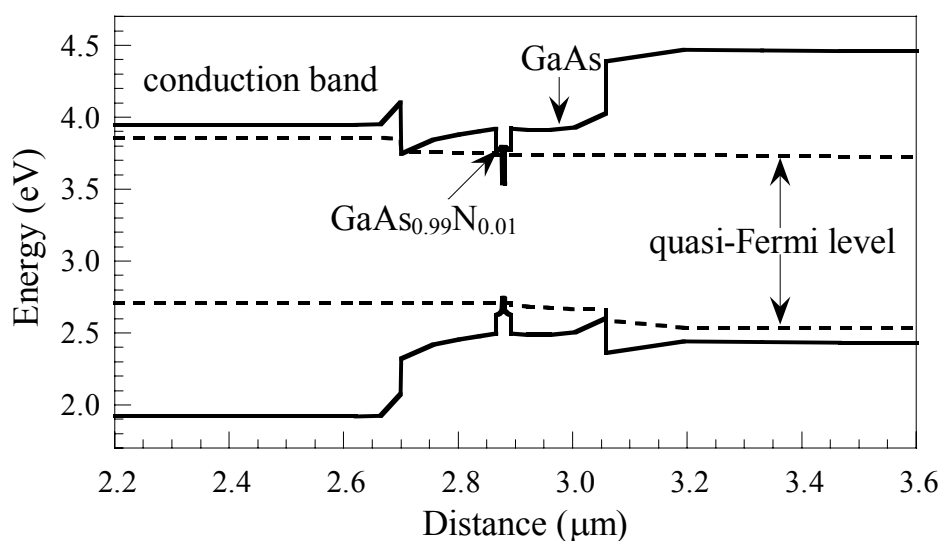


圖 3.30、在原始的雷射結構下加入應力補償式 barrier ( $\text{GaAs}_{0.99}\text{N}_{0.01}$ ) 的能帶示意圖。

下頁圖 3.31 則是利用前述所設計的應力補償式雷射結構所得到的模擬結果，其中操作溫度設定在 20 °C。從圖中我們可以觀察到，利用應力補償式 barrier 的雷射結構其臨界電流值(實心的曲線)較原始的結

構設計(單純利用 GaAs 為 barrier)降低許多，而這樣的模擬結果也與前述 Tansu 等人所得到的實驗數據趨勢相當地吻合(請參見圖 3.26) [9]。此外從圖中我們也可以看到，利用應力補償式 barrier 的雷射結構其斜率效能(0.262 W/A)也較原始的結構設計(0.256 W/A)略為提昇。而圖 3.31 左上方的插圖(inset)則是在應力補償式雷射結構 lasing 的情況下，所得到的能帶示意圖，其中注入電流為 85 mA。

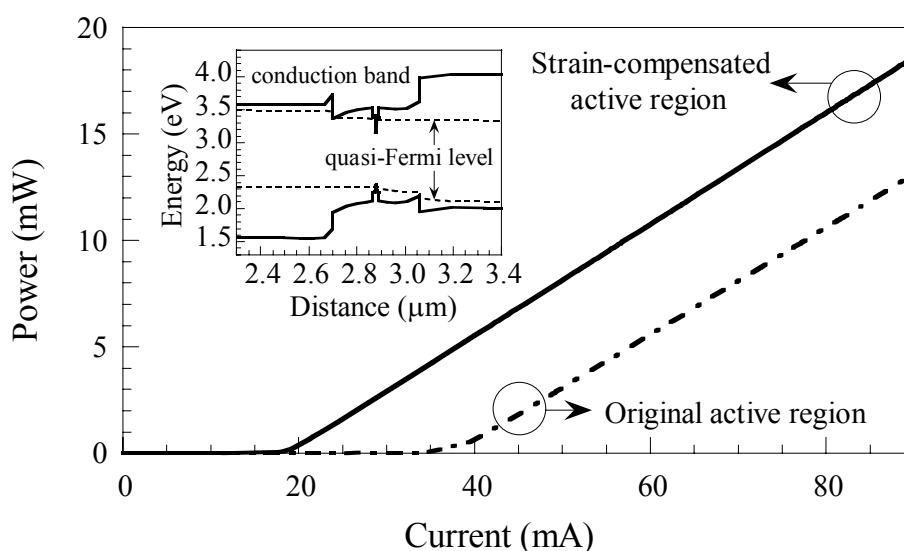


圖 3.31、利用應力補償式與原始活性層結構設計所得到的雷射性能比較圖。

下頁圖 3.32 為同樣利用上述應力補償式雷射結構與原始的結構設計所模擬出來的受激放射率(stimulated emission rate)與 Auger 再結合率(Auger recombination rate)比較圖，其中操作溫度與注入電流分別設定在 20 °C 以及 85 mA。從圖中我們可以觀察到，利用應力補償式 barrier 的雷射結構其受激放射率(實心的線條)較原始的結構設計高出許多。此

外在圖 3.32 右上方的插圖中我們也可以知道，利用應力補償式 barrier 的雷射結構其 Auger 再結合率也較原始的結構設計降低許多，而這樣的物理現象可歸因於應力補償式的  $\text{GaAs}_{0.99}\text{N}_{0.01}$  barrier (相對於原始的 GaAs barrier 而言)能夠幫助提升價電帶重電洞的有效質量而減少電洞溢流的情況[12,13]。

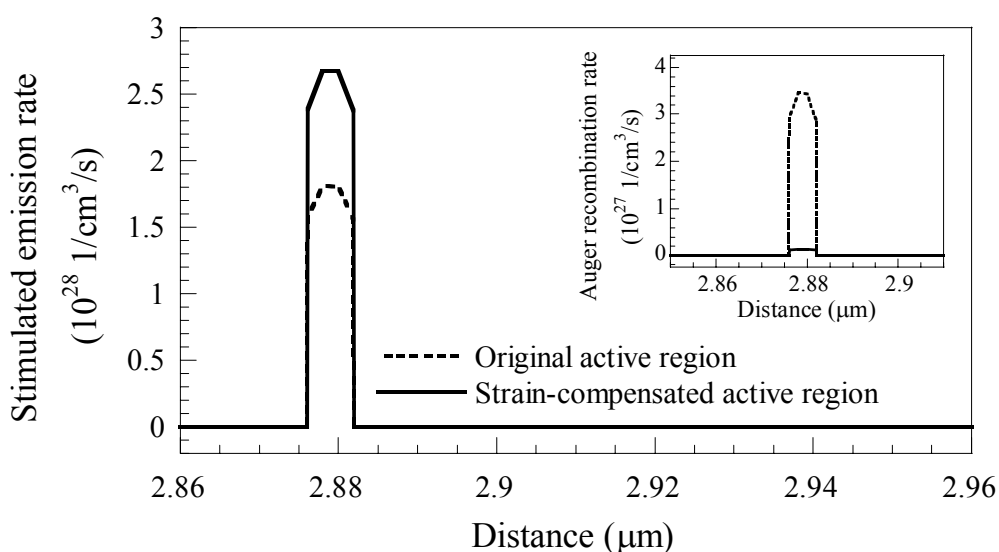


圖 3.32、利用應力補償式與原始雷射結構所得到的受激放射率與 Auger 再結合率比較圖。

在探討完定溫  $20^\circ\text{C}$  下雷射結構的性能與相關物理特性後，在接下來的研究中我將要分析應力補償式雷射結構在變溫的情況下所呈現的雷射性能。底下圖 3.33 為利用上述應力補償式 barrier 的雷射結構所模擬出來的變溫 L-I curve 性能圖，其中實心的曲線為在室溫  $298\text{ K}$  的操作下所得到的雷射輸出效能；而利用第一章式(1)的數學式我們也可以求得在此變溫模擬曲線下的特性溫度  $T_0$  為  $139\text{ K}$ 。

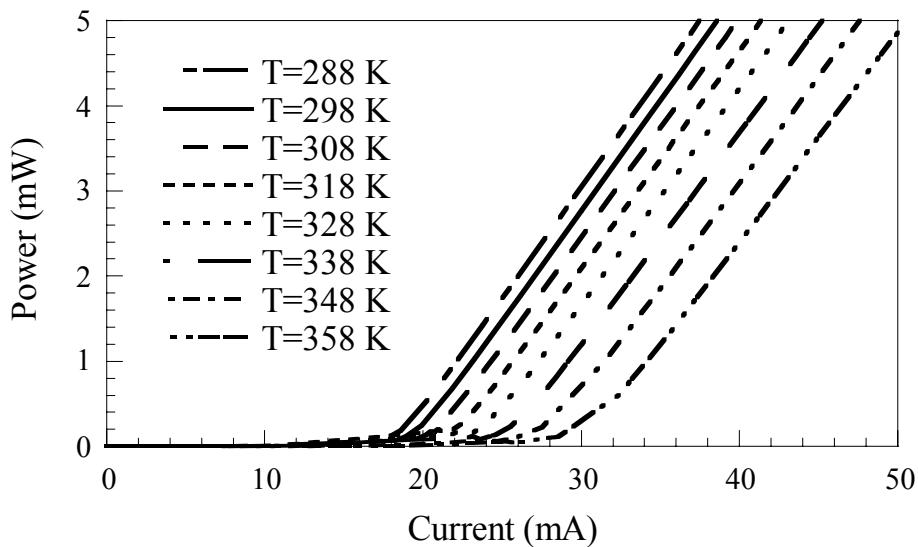


圖 3.33、利用應力補償式雷射結構所模擬出來的變溫 L-I curve 性能圖。

下頁圖 3.34 則是根據圖 3.33 的變溫 L-I curve 曲線所得到的臨界電流密度與斜率效能數值，其中實心三角形的數據點(original active region)代表 Peng 等人在操作溫度 293 K 下所得到的實驗結果[11]。從圖中我們可以觀察到，利用應力補償式雷射結構所模擬出來的斜率效能相當地穩定，並不會隨著溫度的提升而有劇烈的變化(從 288 K 到 358 K，斜率效能僅降低了 0.018 W/A)。

綜合以上圖 3.31~3.34 的模擬分析結果，我們可以歸納出，利用應力補償式  $\text{GaAs}_{0.99}\text{N}_{0.01}$  barrier 的雷射結構確實能夠有效地增進 InGaAsN 雷射系統的性能。此外從微觀的物理特性中，我們也可以知道，利用應力補償式 barrier 的雷射結構其受激放射率與 Auger 再結合率也較原始的結構設計改善許多。最後對於本節所探討的 1.3- $\mu\text{m}$  應力



補償式的 InGaAsN 雷射結構也希望能夠提供給此方面的學界先進以及長晶製程者作為參考。

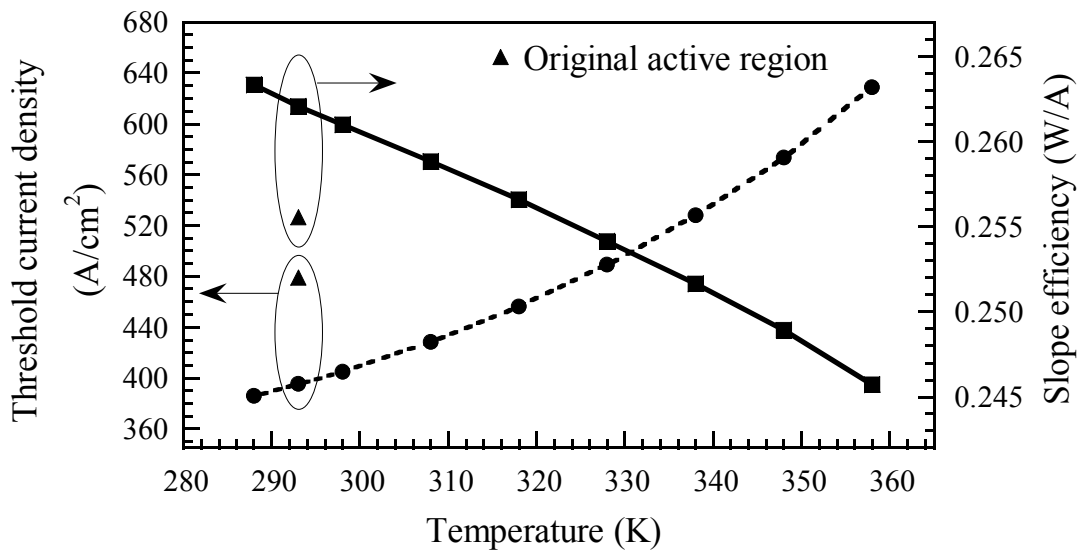


圖 3.34、利用應力補償式雷射結構所得到的臨界電流密度與斜率效能數值。

## 參考文獻：

- [1] J. W. Pan, K. G. Chau, J. I. Chyi, Y. K. Tu, and J. W. Liaw, “Suppression of electron and hole leakage in 1.3  $\mu\text{m}$  AlGaInAs/InP quantum well lasers using multiquantum barrier,” *Appl. Phys. Lett.* **72**, pp. 2090–2092 (1998).
- [2] K. Takemasa, T. Munakata, M. Kobayashi, and H. Wada, “1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs–AlGaInAs strained multiple-quantum-well lasers with a p-AlInAs electron stopper layer,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, pp. 495–497 (1998).
- [3] S. R. Selmic, T. M. Chou, J. P. Sih, J. B. Kirk, A. Mantie, J. K. Butler, D. Bour, and G. A. Evans, “Design and characterization of 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs–InP multiple-quantum-well lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **7**, pp. 340–349 (2001).
- [4] J. Piprek, P. Abraham, and J. E. Bowers, “Cavity length effects on internal loss and quantum efficiency of multiquantum-well lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **5**, pp. 643–647 (1999).
- [5] A. F. Phillips, S. J. Sweeney, A. R. Adams, and P. J. A. Thijs, “The temperature dependence of 1.3- and 1.5- $\mu\text{m}$  compressively strained InGaAs(P) MQW semiconductor lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **5**, pp. 401–412 (1999).

- [6] J. Jin, and D. Tian, "Improved performance of 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP–InP lasers with an AlInAs electron stopper layer," *Semicond. Sci. Technol.* **18**, pp. 960-963 (2003).
- [7] F. Robert, A. C. Bryce, J. H. Marsh, A. J. SpringThorpe, and J. K. White, "Passive mode locking of InAlGaAs 1.3- $\mu\text{m}$  strained quantum wells extended cavity laser fabricated by quantum-well intermixing," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**, pp. 374–376 (2004).
- [8] A. J. Springthorpe, T. Garanzotis, P. Paddon, G. Pakulski, and K. I. White, "Strained 1.3  $\mu\text{m}$  MQW AlGaInAs lasers grown by digital alloy MBE," *Elec. Lett.* **36**, pp. 1031–1032 (2000).
- [9] N. Tansu, J. Y. Yeh, and L. J. Mawst, "Low-threshold 1317-nm InGaAsN quantum-well lasers with GaAsN barriers," *Appl. Phys. Lett.* **83**, pp. 2512–2514 (2003).
- [10] A. Caliman, A. Ramdane, D. Meichenin, L. Manin, B. Sermage, G. Ungaro, L. Travers, and J. C. Harmand, "High performance GaInNAs/GaNAs/GaAs narrow ridge waveguide laser diodes," *Electron. Lett.* **38**, pp. 710–712 (2002).
- [11] C. S. Peng, N. Laine, J. Konttinen, S. Karirinne, T. Jouhti, and M. Pessa, "High-performance singlemode InGaNAs/GaAs laser," *Electron. Lett.* **40**, pp. 604–605 (2004).

- [12] W. J. Fan, S. T. Ng, S. F. Yoon, M. F. Li, and T. C. Chong, “Effects of tensile strain in barrier on optical gain spectra of GaInNAs/GaAsN quantum wells,” *J. Appl. Phys.* **93**, pp. 5836–5838 (2003).
- [13] N. Tansu and L. J. Mawst, “The role of hole leakage in 1300-nm InGaAsN quantum-well lasers,” *Appl. Phys. Lett.* **82**, pp. 1500–1502 (2003).

## 第四章 結論

在介紹完 1.3  $\mu\text{m}$  半導體雷射相關的物理特性與模擬分析後，最後在這一章中我將要做個簡單的綜整與回顧。

從第一章的介紹中我們可以知道，在長波長光纖通信的系統中，1.3 和 1.55  $\mu\text{m}$  的雷射光源一直扮演著不可或缺的關鍵性元件，因為在石英光纖的光傳遞中，他們分別提供了最低的光色散以及最小的能量損失。因此，對於發光在這兩個波段的半導體雷射光源而言，材料的選擇一直是被研究探討的課題。近年來相關的研究學者提出幾種不同的材料系統來試著取代傳統低 conduction band offset 的 InGaAsP 雷射結構，其中包含三元的 InAsP 材料系統以及另外兩種具有高雷射功率輸出與低透明載子密度的 AlGaInAs 和 InGaAsN 材料系統。在本章的內容中，我根據所蒐集到的文獻資料來對這三大材料系統的特性與發展現況做簡單的介紹，最後並應用 Lastip 數值模擬軟體來對這三大材料系統的增益做定量的分析與比較。

接著在第二章的研究內容中，有鑑於不同的活性層設計方式也會對雷射的發光效能造成相當的影響，所以我應用 Lastip 數值模擬軟體來對 InGaAsP (InAsP)、AlGaInAs、以及 InGaAsN 這三大應用於長波長光纖通訊雷射光源的活性層材料系統進行一連串的分析探討，其中包含各材料系統增益以及自發輻射率的頻譜比較，以期獲取最佳化的活性層結構設計。而對於這三大材料系統的結構特性與定性的相關比較

也在本章的文末列表綜整以供參考。此外有關 Lastip 數值模擬軟體的理論背景以及這三大材料系統相關的物理參數與數學函式也在這一章中做詳盡的介紹。

最後在第三章的研究內容中，我應用 Lastip 數值模擬軟體來對 AlGaInAs 與 InGaAsN 這兩大活性層材料系統進行一系列雷射特性的分析。在 AlGaInAs 雷射系統方面，我研究 p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層對系統電子溢流以及 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 雷射性能的影響；而在 InGaAsN 雷射系統方面，我則是探討應力補償式的  $\text{GaAs}_{0.99}\text{N}_{0.01}$  barrier 對 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsN 雷射性能以及物理相關特性的影響，其中包含分析應力補償式雷射結構與原始結構設計的受激放射率以及 Auger 再結合率的比較等。從本章的模擬結果中我們可以觀察到，p-type  $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  電子阻礙層與應力補償式  $\text{GaAs}_{0.99}\text{N}_{0.01}$  barrier 的結構設計分別對於 AlGaInAs 以及 InGaAsN 雷射系統的性能提昇有莫大的幫助。而對於本章所設計的 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs 最佳化雷射結構以及應力補償式的 InGaAsN 雷射系統也希望能夠提供給此方面的學界先進以及長晶製程者作為參考。

## 附錄一 已發表之相關論文

1. **Shang-Wei Hsieh**, Hsiu-Fen Chen, Ming-Wei Yao, and Yen-Kuang Kuo, January 2005, “Simulation of 1.3- $\mu\text{m}$  AlGaInAs/InP strained MQW lasers”, Proceedings of SPIE, Vol. 5628 (Semiconductor Lasers and Applications II), pp. 318–326. (EI)
2. Hsiu-Fen Chen, **Shang-Wei Hsieh**, and Yen-Kuang Kuo, January 2005, “Simulation of tunable Cr:YSO Q-switched Cr:LiSAF laser”, Proceedings of SPIE, Vol. 5627 (High-Power Lasers and Applications III), pp. 488–498. (EI)
3. 陳秀芬、**謝尚衛**、劉柏挺、郭艷光, 2003 年 12 月, “導電帶與價電帶井深比例對藍光氮化鎢鎵量子井雷射載子分佈與光學特性的影響”, 光學工程, 第 84 期, 第 70 至 80 頁.
4. **Shang-Wei Hsieh**, Ming-Wei Yao, Hsiu-Fen Chen, and Yen-Kuang Kuo, 2005, “Analysis of strain-compensated structures for 1.55- $\mu\text{m}$  AlGaInAs quantum-well lasers”, 2005 年中華民國物理年會, paper PD-29.
5. **謝尚衛** 姚銘偉 郭艷光, 2004, “電子阻礙層對 1.55- $\mu\text{m}$  AlGaInAs-InP 量子井雷射性能之影響”, 2004 年台灣光電科技研討會, paper PA-SA1–17, OPT’04 Proceedings.
6. Hsiu-Fen Chen, **Shang-Wei Hsieh**, Bo-Ting Liou, and Yen-Kuang Kuo, 2004, “Effect of band-offset ratio on carrier distribution and optical properties of blue InGaN quantum-well lasers”, 2004 年中華民國物理

- 年會, paper PD-28.
7. **Shang-Wei Hsieh**, Hsiu-Fen Chen, Yi-An Chang, and Yen-Kuang Kuo, 2003, “Numerical study of Cr:LiSAF passive Q-switching with a Cr:YSO solid-state saturable absorber”, 2003 年中華民國物理年會, paper PE62.
  8. Hsiu-Fen Chen, **Shang-Wei Hsieh**, Yi-An Chang, Yen-Kuang Kuo, Man-Fang Huang, Hwei-Heng Wang, and Pin-Hwei Liu, 2003, “Experimental and numerical investigation of 590-nm AlGaInP light emitting diodes and vertical-cavity surface-emitting lasers”, 2003 年中華民國物理年會, paper PD1.
  9. **謝尚衛**, 張志康, 屠嫻琳, 郭艷光, 2002, “固態可飽和吸收體 Cr:YSO 在 Cr:LiSAF 雷射之效用”, 2002 年台灣光電科技研討會, paper TG2-7, OPT’02 Proceedings I, pp. 340–342.
  10. 張詒安、陳秀芬、**謝尚衛**、吳佩璇、蔡孟倫、張誌原、郭艷光、劉柏挺, 2002, “415 nm 紫光氮化銦鎘量子井雷射電子溢流特性之探討”, 2002 年台灣光電科技研討會, paper TA1-3, OPT’02 Proceedings I, pp. 7–9.
  11. 屠嫻琳、張志康、**謝尚衛**、郭艷光、劉柏挺, 2002, “PMMA-d8 光纖通信用紅光面射型半導體雷射的設計與分析”, 2002 年台灣光電科技研討會, paper PA-32, OPT’02 Proceedings III, pp. 94–96.
  12. 顏勝宏、林文偉、**謝尚衛**、陳秀芬、吳育驊、郭艷光、劉柏挺, 2002, “Zinc-blende 氮化硼鎘 bowing parameter 的研究”, 2002 年台灣光電科



技研討會, paper PA-34, OPT'02 Proceedings III, pp. 100–102.