

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

氮砷化銦鎵面射型雷射光學特性之探討

Investigation of optical characteristics of InGaAsN
vertical-cavity surface-emitting laser

研究生：邱千芳 撰

中華民國九十七年六月

國立彰化師範大學光電科技研究所

碩士論文

研究生：邱千芳

氮砷化銦鎵面射型雷射光學特性之探討

Investigation of optical characteristics of InGaAsN
vertical-cavity surface-emitting laser

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：洪連輝主任_____

中華民國九十七年六月

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

96 學年度第 二 學期取得 碩 士學位之論文。

論文題目：氮砷化銦鎵面射型雷射光學特性之探討

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：

- 立刻公開 1 年後公開 2 年後公開 3 年後公開
 4 年後公開 5 年後公開 不公開

二、校外網際網路：

- 立刻公開 1 年後公開 2 年後公開 3 年後公開
 4 年後公開 5 年後公開 不公開

指導教授：郭艷光 教授

研究生(授權人)簽名：邱千芳

(請親筆正楷簽名)

學 號：94252020

中 華 民 國 97 年 6 月 15 日

誌 謝

進入郭艷光老師的實驗室到現在，將近三年的時間，老師於平日的生活教導、為人處事的態度更讓我受益良多，亦是佩服老師短短時間內就將彰師大進修學院成長茁壯、甚至實現拓展海外的遠景。謝謝老師在學業上的循循善誘與諄諄教誨，老師公務繁忙之餘，還不忘抽空指導實驗室的每一位同學，尤其難忘三年級的寒假，實驗室的每一成員幾乎天天戰戰兢兢的準備隔天早上所要報的專業內容，早上見面的第一句話多是：你的報告準備好了嗎？那陣子心中擔子真的很重，很高興我撐過來了。走筆至今，更讓我深刻明白體會，老師從我進實驗室後嚴厲地挑報告內容的用意，無疑地是希望習得：懂得走出困境、學會獨立思考與解決問題的能力。

謝謝近三年來劉柏挺老師、張菽萱老師、陳美玲老師於研究會議上給予的指導，從你們身上，我學到了處事態度的認真與對事物熱忱的堅持。黃滿芳老師對教學的執著、專業的能力亦是我學習的目標，每每見到黃啟炎老師笑咪咪的和藹神情，讓我常自我提醒：多點微笑，多些愉悅的心情。感謝其他指導過我的老師們，您們使我習得光電領域的專業知識、教程課堂學到實用多元的教學方法。

謝謝實驗室的學長姐、同學、學弟妹們，有你們的陪伴，讓我有動力完成這篇論文。尤其是勝宏學長對課業、事務處理的縝密思緒，更是影響我看待問題、解決問題的多方向思維，表面看似嚴肅的勝宏

學長，卸下指導面具後，其實是位很搞笑又平易近人的學長。

謝謝耀生兩年來的支持與鼓勵，兩年來發生了不少打擊雙方的事，很高興我們撐過了。私下的我為了研究所課業掉過無數次眼淚，是你，一次又一次地為我鼓勵加油、當我的打氣筒支撐著我，也感謝耀生的家人們，有你們的指引讓我認識了不同社會層面的觀點。

感謝我親愛的家人。三年來的變化很多，唯一不變的是家人對我的愛與付出，爸爸媽媽為了看許久不見的女兒，數次千里迢迢遠從屏東開車到彰化，帶了充滿媽媽味的愛心料理，平凡的料理吃在外出人嘴裡，盪漾著說不出的溫暖與幸福。

謝謝所有陪伴過我的同學與朋友們，有你們的陪伴，真好！

目 錄

目錄	I
中文摘要	IV
英文摘要	VI
圖表索引	VIII
第一章 氮砷化銦鎵之材料特性與發展簡介	1
1.1 前言	1
1.2 長程光纖通訊光源之材料特性比較	2
1.3 氮砷化銦鎵之材料特性	5
1.4 氮含量多寡對氮砷化銦鎵造成之影響	7
1.5 形變之計算	8
1.5.1 形變之效應	9
1.5.2 形變對臨界厚度之影響	12
1.6 氮砷化銦鎵之能帶與形變的影響	13

1.7 結論	15
參考文獻	16
第二章 面射型雷射原理與簡介	21
2.1 前言	21
2.2 面射型雷射之特點及應用	22
2.3 布拉格反射鏡之工作原理	28
2.4 面射型雷射之結構簡介	32
2.5 氮砷化鎵與氮砷化銦鎵面射型雷射	35
2.6 結論	37
參考文獻	38
第三章 參數設定與氮砷化鎵面射型雷射之增益分析	41
3.1 研就動機與前言	41
3.1.1 理論模擬	41
3.2 參數設定	43
3.3 不同材料之活性層比較	48
3.4 氮砷化銦鎵活性層中之氮含量比較	51

3.5 結論	56
參考文獻	57
第四章 氮砷化銦鎵面射型雷射	62
4.1 前言	62
4.1.1 模擬元件之結構	62
4.2 氮砷化銦鎵量子井中氮含量不同對性能之影響	64
4.2.1 氮含量為 0.022 與 0.035 時之情況	66
4.3 結論	71
參考文獻	72
第五章 結論	73
附錄A	i
附錄B	ii

中文摘要

近年來，急速竄起的 InGaAsN 材料因有許多優異的特性與 1.3 μm 的光纖應用，引起了許多研究群的注意。由於 InGaAsN 有比較大的 band offset ratio，使其在高溫操作下較不易產生電子溢流，高溫表現比其他材料來的優異，且使用價格便宜的 GaAs 做為基板亦可降低製造成本，發展前景相當看好。

第一章先對三大光纖通訊材料 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 做一簡略的比較，其後再詳細地介紹 InGaAsN 材料的物理特性。

第二章比較面射型雷射與側射型雷射之間的差異、使用矩陣法介紹布拉格反射鏡的工作原理、介紹 DBRs 材料為半導體或介電質材料時兩者之間的差異、簡介面射型雷射四大結構的特性等，且證實製程中三元 InGaAs 於活性區加入 N 成為 InGaAsN 的可行性。

第三章蒐集 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 相關的參數，列出其相關的半導體物理參數公式，並以模擬觀點探討發光於 1.3 μm InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 之活性區增益及透明載子密度；結果顯示 InGaAsN 有最小的透明載子密度。接著使用 InGaAsN 材料、考量活性區的形變量，探討 InGaAsN 活性區於不同 N 含量時的特性，包含價電帶次能帶結構、透明載子密度及增益頻譜。模擬結果顯示，InGaAsN 量子井之透明載子密度與最大增益值將隨量子井壓縮形變的增加而獲得改善；然而，當壓縮形變為 2.12% 時，InGaAsN 量子井材料的特性改

善有趨近飽和的現象。考慮到實際長晶的情況，較高形變的量子井會影響晶體品質。因此根據模擬結果，InGaAsN 量子井結構的最佳壓縮形變值為 2.12%。

第四章分析 1.3 μm InGaAsN 面射型雷射之量子井於不同 N 含量時的效能表現。模擬結果顯示，InGaAsN 面射型雷射量子井中適量的 N 含量可使載子分佈呈現較均勻的狀態、增加電子電洞結合的機會，因而提升元件效能。從量子井中 N 含量為 0.022 與 0.035 時的元件性能分析發現，N 含量為 0.022 時有最佳的雷射性能輸出，可使元件有最好的發光效率。

ABSTRACT

The InGaAsN material has been intensively studied in the past few years due to its specific property and potential application in 1.3- μm lasers for optical fiber communication. The InGaAsN lighting device, which possesses large conduction band offset ratio, has some advantages, e.g. high characteristic temperature and low-cost GaAs substrate. Therefore, it is a great candidate for optical communication applications.

In chapter 1, firstly, the material gains of InGaAsN, InGaAlAs and InGaAsP materials are analyzed. Then, the physical properties of InGaAsN are briefly introduced.

In chapter 2, the geometric difference between the Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) and the Edge-Emitting Laser (EEL) is introduced. Then, introduction to the design principle of distributed Bragg reflector (DBR) is provided. Furthermore, the dielectric and semiconductor DBRs are introduced and four basic VCSEL structures are presented.

In chapter 3, I firstly show the material parameters of InGaAsN, InGaAlAs and InGaAsP. Secondly, the gain spectra and transparent carrier densities of InGaAsN, InGaAlAs and InGaAsP at 1.3 μm are simulated with the PICS3D simulation program. Thirdly, the transparent carrier densities and optical gain spectra of the compressively strained InGaAsN quantum wells with GaAs barriers are investigated. Finally, the optimized design of InGaAsN with compressive strain is proposed and the physical origins are provided.

In chapter 4, the optical properties of the 1.3- μm InGaAsN VCSEL with different nitrogen concentrations in quantum wells are compared and studied. According to the simulation results, the appropriate design of nitrogen concentration is demonstrated.

In chapter 5, a brief summary to the previous discussion is provided.

圖表索引

圖1.1	石英光纖之損失對波長的關係圖	2
圖1.2	III-V 半導體能帶間隙與晶格常數之關係圖	3
圖1.3	InGaAsN 之能帶變化圖	5
圖1.4	InGaAsN 量子井中不同 N 含量的增益對載子密度關係圖.....	7
圖1.5	晶格常數受到壓縮形變示意圖	9
圖1.6	壓縮與舒張形變對能帶結構的影響圖	11
圖1.7	InGaAsN 之能帶排列關係圖	13
圖2.1	(a) EEL (b) VCSEL 之示意圖	23
圖2.2	(a) EEL (b) VCSEL 之共振腔模頻譜與增益頻譜關係圖	24
圖2.3	溫度 $T_3 > T_2 > T_1$ 時 VCSEL 雷射增益與共振腔模的關係圖	24
圖2.4	長波長 VCSEL 使用三組不同材料的反射率與週期數目的關係圖	26
圖2.5	電磁波經過三層介質的示意圖	28
圖2.6	蝕刻平台結構	32
圖2.7	離子佈值結構	32
圖2.8	氧化侷限結構	32
圖2.9	埋藏型異質結構	32
圖3.1	300 K 下 InGaAsN·InGaAlAs 與 InGaAsP 的增益對注入載子濃度圖	48
圖3.2	300 K 注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ InGaAsN/GaAs 價帶次能帶	

圖	49
圖3.3	300 K 注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ InGaAlAs/InP 價電次能帶圖	49
圖3.4	300 K 注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ InGaAsP/InP 價電次能帶圖	49
圖3.5	InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 量子井為 6 nm 時之透明載子密度對溫度變化圖	50
圖3.6	InGaAsN 量子井之載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量為 0.02、0.017 時的價帶次能帶圖	53
圖3.7	InGaAsN 量子井之載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量為 0.014、0.011 時的價帶次能帶圖	53
圖3.8	InGaAsN 量子井之載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量為 0.01、0.009 時的價帶次能帶圖	53
圖3.9	InGaAsN 量子井之載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量為 0.008 時的價帶次能帶圖	54
圖3.10	InGaAsN 在 300 K 時不同 N 含量的增益對載子密度圖	54
圖3.11	380 K InGaAsN 量子井於不同 N 含量的增益對載子密度圖	55
圖3.12	300 K 下注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 時 InGaAsN 量子井於不同 N 含量的增益對波長關係圖	56
圖4.1	實驗與模擬之輸出功率對照圖	63
圖4.2	發光於 1.3 μm 之不同 N 含量所對應的臨界電流	65
圖4.3	N 含量為 0.022 與 0.035 時的增益對注入載子濃度圖	66
圖4.4	InGaAsN 量子井之載子濃度 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量分別為 (a) 0.022 (b) 0.035 時的價帶次能帶圖	67

圖4.5	InGaAsN 量子井中 N 含量分別為(a) 0.022 與(b) 0.035 時的能帶圖	68
圖4.6	InGaAsN 量子井中 N 含量分別為(a) 0.022 與(b) 0.035 時的載子濃度分佈圖	68
圖4.7	InGaAsN 量子井中 N 含量分別為 0.022 與 0.035 時的受激再結合圖	69
圖4.8	InGaAsN 量子井之 N 含量分別為 0.022 與 0.035 時的 Auger 再結合率圖	69
表2.1	實驗文獻中 InGaAs 與 InGaAsN 面射型雷射之 DBRs、spacer layers 與臨界厚度整理表	36
表3.1	InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 的各項參數設定	44
表3.2	實驗文獻中 InGaAs 與 InGaAsN 所使用的 Auger 再結合率與內部損失的範圍值	47
表3.3	1.3 μm InGaAsN 量子井在不同 N 含量下的形變與臨界厚度值	52
表4.1	1.3 μm 之 InGaAsN 量子井於不同 N 含量時所對應的形變....	64

第一章 氮砷化銦鎵之材料特性與發展簡介

1.1 前言

由於網際傳輸的普遍，人們對光纖資料傳遞品質的要求日趨提升。長波長光纖通訊系統中，1.3 μm 半導體雷射在長程通訊上有相對較低的衰減損失(loss)，且對應的光色散(dispersion)亦趨近零，使得 1.3 μm 光纖通訊用之光源扮演了重要的角色。

長波長光纖通訊中，傳統的 InGaAsP 因發展技術成熟而廣泛地運用於雷射光源，但 InGaAsP 在高溫下的熱效應卻是一大問題，為了克服熱效應問題，許多研究群先後提出了 InGaAlAs 與 InGaAsN 的材料系統來取代傳統的 InGaAsP，此章節會先引介三大長程光纖通訊 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 材料的參數特性。

在 InGaAsN 材料中，In 含量與 N 含量的多寡不僅影響發光波長，而且還會影響材料的能帶分佈，其形變(strain)也因 In 與 N 含量多寡而有所改變，除了上述的材料參數特性，我也會引出形變量的計算與臨界厚度，這些參數的特性都會於第一章詳細地介紹。

1.2 長程光纖通訊光源之材料比較

長波長的光纖通訊系統中，1.3 及 1.55 μm 的通訊用雷射二極體分別有最低的光色散及最小的能量損失，使得這兩個波段的光源探討及應用亦顯重要。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)所造成。圖 1.1 為石英光纖之損失對波長的關係圖[1]。從圖中明顯地可發現，當傳輸的光波長為 1.3 及 1.55 μm 時都有相對低的損失窗，尤其傳輸波長在 1.55 μm 時損失低至每公里 0.2 dB。所以長波長光纖通訊傳輸波長的選擇中，1.3 與 1.55 μm 波段的雷射光源設計顯得相當重要及值得探討。

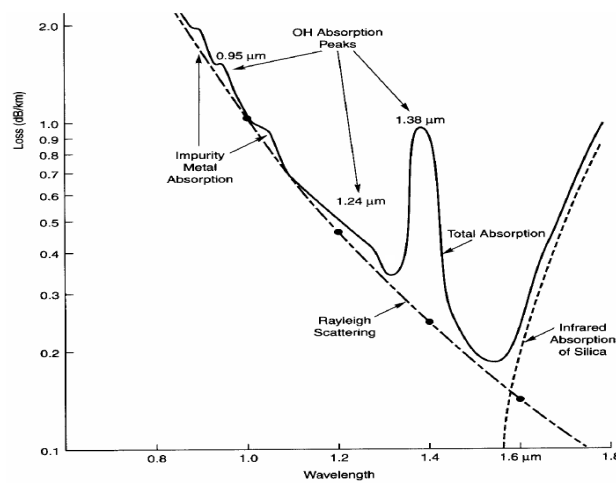


圖 1.1、石英光纖之損失對波長的關係圖

傳統的 InGaAsP 材料，因為 band offset ratio 為 0.4 : 0.6，使得導電帶電子侷限較差，高溫下的熱效應是一大問題，雷射效能容易受到溫度影響[2]。為了克服熱效應的問題，許多研究群投入了有關 InGaAlAs 與

InGaAsN 材料系統的研究，期待可取代傳統的 InGaAsP 材料。在 InGaAlAs 與 InGaAsN 材料中，InGaAlAs 的 band offset ratio 達 0.72:0.28 [3]，InGaAsN 的 band offset ratio 更是高達 0.79:0.21 [4,5]，可有效降低材料對熱的敏感度，相對地改善了高溫時的電子溢流。

InGaAsN 是近幾年才興起的材料，只要適當地調節 In 與 N 之含量，可使晶格常數與 GaAs 基板相匹配。由圖 1.2 的 III-V 族半導體能帶間隙(或稱能隙，energy band gap, E_g)與晶格常數之關係圖可發現[4]，在 GaAs 中加入 In 含量會增加晶格常數、能帶間隙會下降；在 GaAs 中加入 N 含量則會降低晶格常數、能帶間隙也隨之下降。只要適當調整 In 與 N 的含量，就可使 InGaAsN 與 GaAs 晶格匹配。且 InGaAsN 有比 InGaAlAs 與 InGaAsP 還高的特性溫度(characteristic temperature)，更使 InGaAsN 引起學者們的研究興趣。

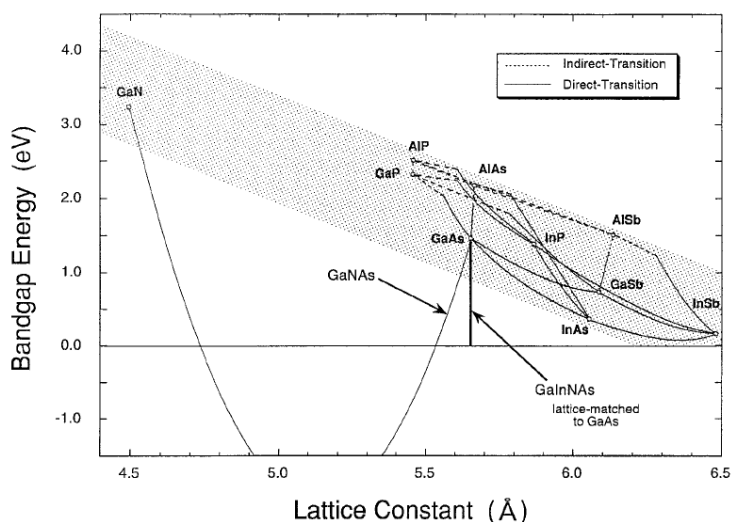


圖 1.2、III-V 半導體能帶間隙與晶格常數之關係圖

一般而言，band offset ratio 之大小影響了特性溫度的高低，特性溫度低主因是導帶能隙差 ΔE_c 小，導致電子的侷限變差；當 band offset ratio 比較大時，可改善高溫下的電子溢流，因而減低了材料對熱的敏感度 [6,7]。根據資料概略值顯示 [8-12]，InGaAsN 的特性溫度約為 70–120 K，高於 InGaAlAs (50–120 K) 與 InGaAsP (40–60 K) 兩種材料，所以 InGaAsN 元件的操作溫度會高於其他兩種材料。除此之外，InGaAlAs 與 InGaAsP 皆成長在 InP 基板上，而 InGaAsN 則使用較低成本的 GaAs 基板，製程上也可節省成本 [13]。

1.3 氮砷化銦鎵之材料特性

InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 三大長程光纖通訊中的電子與電洞有效質量都不盡相同[3,6,14,15]。根據文獻資料顯示，InGaAsN 的電子有效質量比其他兩者材料大，而 InGaAsN 的重電洞(heavy hole)有效質量最小，顯示 InGaAsN 電洞移動率比其他兩者好[6]；有學者從實驗中指出，N 含量多寡會影響 InGaAsN 的電子有效質量與能帶分佈[16-19]。Perlin 等學者則以能帶交叉理論(band anticrossing model)來說明 N 含量多寡與能帶變化的關係；如圖 1.3 所示[16]，當 InGaAs 中加入 N 原子後，N 原子能帶與 InGaAs 的導電帶(E_M)之間會互相影響，混和後的導電帶分裂成 E_+ 與 E_- 兩能帶，且在 Γ 點時的 E_- 能帶比原本的 InGaAs 能帶 E_M 還低，顯示 N 的加入會使能帶間隙下降，實驗結果顯示 N 含量多控制在 3% 以內，以免長晶品質受影響[17]。當 N 含量愈多， E_+ 與 E_- 能帶間的排斥會愈嚴重，使得波長愈往長波長移動[20]。

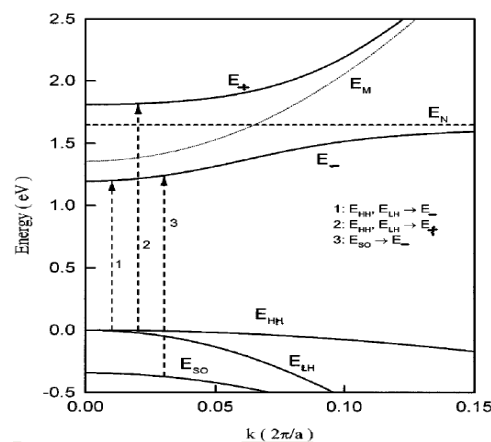


圖 1.3、InGaAsN 之能帶變化圖

量子井結構中，density of states 與載子有效質量的 3/2 次方成正比。其 density of states 的公式如下[7]：

$$\rho_{c,v}(E)dE = \left(\frac{1}{2\pi^2} \right) \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E^{1/2}dE) \quad (1.1)$$

$\rho_{c,v}$ 分別為導電帶與價電帶的 density of states，單位是每立方公尺， E 為能量， m^* 為電子或電洞有效質量， h 為蒲朗克常數(Planck constant)， $\hbar = h/2\pi$ 。由(1.1)式得知，當電子的有效質量愈大時，導電帶的 density of states 愈高；電洞的有效質量愈大時，價電帶的 density of states 愈高。density of states 愈高，需要更多的電子與電洞才可達到雷射所需的居量反轉(population inversion)。

增益(gain)對載子密度的關係可表示為[6]：

$$g = g_0 \cdot \ln\left(\frac{N}{N_{tr}}\right) \quad (1.2)$$

其中 N 是載子密度， N_{tr} 是透明載子密度(transparent carrier density)， g_0 是增益係數(gain coefficient)。透明載子密度是材料增益為零時之載子密度；由(1.2)式得知，當透明載子密度愈大，增益愈小，反之亦然。density of states 愈高時，透明載子密度也會隨之增加，活性區中需注入更多的電子與電洞才可以產生增益，元件的臨界電流也會受到影響[6,7]。

1.4 氮砷化銦鎵量子井中氮含量多寡造成之影響

因為 N 原子大小比 In、Ga 與 As 原子還要小得多，所以 N 在長晶中顯得較難處理，且只要少量 N 的加入，就會影響 InGaAsN 量子井的發光效率。圖 1.4 是 InGaAsN 量子井中不同 N 含量的增益對載子密度關係圖[21]；圖 1.4 可看出，N 含量只增加 1%，增益卻大幅下降，顯示 N 含量的些微增加，足以影響元件的效能[22]。

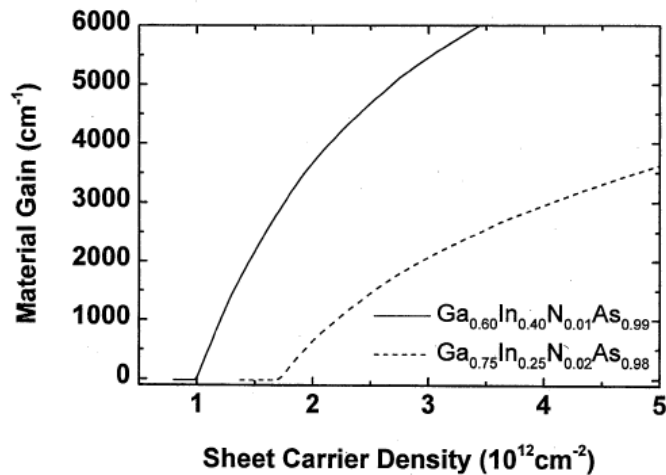


圖 1.4、InGaAsN 量子井中不同 N 含量的增益對載子密度關係圖

發光於 1.3 μm 的 InGaAsN 量子井中，實驗結果顯示 N 含量多控制在 3% 以內，目的就是為了防止長晶品質變差，且較多的 N 含量，會降低發光強度使發光效率變差[17,23,24]。如何利用適量的 N 原子增進元件的效能、使發光波長在 1.3 μm 且必須兼顧晶體品質，正是研究人員們的發展目標。

1.5 形變之計算

半導體元件的製程中，尋找晶格匹配的材料可避免長晶過程的晶格錯位(dislocation)缺陷發生。適當形變的引入可降低次能帶(subband)之間的相互影響，可以使重電洞價帶與輕電洞(light hole)價帶分裂開來、減少受侷限的電洞價帶能階，使電洞比較容易注入，因而降低了 density of states，電洞更均勻地分佈在價帶次能帶中而得到較低的透明載子密度，且可以產生較大的增益，雷射的臨界電流也獲得改善，所以適當的形變可改變元件的性能[7]。

在晶格不匹配的系統中，晶格的對稱性與能帶的結構會受到形變影響，能帶間隙與有效質量亦會有所改變。一般文獻中的形變計算方式通常為[7,25]：

$$\pm \left| \frac{\Delta a}{a} \right| \quad (1.3)$$

其中 a 為成長的薄膜晶格常數， Δa 是兩層晶格不匹配材料的晶格常數差，正負號則視 Δa 如何被定義來決定壓縮(compressive)或舒張(tensile)形變。如果 Δa 的定義為變化後減變化前的晶格常數，則負號代表壓縮形變； Δa 的定義如果是變化前減變化後的晶格常數，此時的負號則是舒張形變。本論文所使用的 PICS3D (Photonic Integrated Circuit Simulator in 3D) 模擬軟體中， Δa 定義為變化後之晶格常數減變化前的晶格常數，所以正值代表舒張形變，負值則表示壓縮形變。

圖 1.5 是晶格常數受到壓縮形變示意圖[7]。所謂壓縮形變，是晶格常數較大的磊晶層與晶格常數較小的磊晶層成長在一起，較大的晶格常數會被壓縮；即垂直於長晶方向的晶格面被壓縮時，為了維持最小能量，平行長晶方向(z 方向)的晶格常數反而被拉長了。

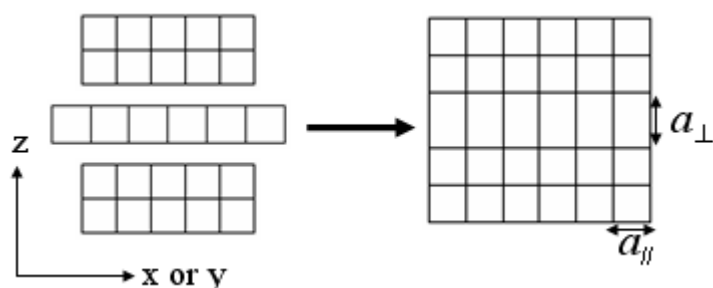


圖 1.5、晶格常數受到壓縮形變示意圖。

1.5.1 形變之效應

晶格不匹配的系統中，晶格的對稱性與能帶結構會受到形變而改變，電子與電洞的能帶間隙與有效質量都會因而受影響。

在未受形變的化合物半導體中，半導體材料的輕電洞價帶(spin 為 $\pm 1/2$)與重電洞價帶(spin 為 $\pm 3/2$)於價電帶頂端會重疊，兩者的能量此時呈現簡併(degenerate)狀態。但當系統產生形變時會破壞晶格的對稱性，而使價電帶的輕電洞與重電洞的能階分裂，簡併也跟著解除，能帶間隙會因而增加或減少。

下圖 1.6 之壓縮與舒張形變對能帶結構的影響圖可看出[26]，當半導體材料受到壓縮形變時，重電洞帶會在輕電洞帶之上，能帶間隙值是

由導電帶底端(E_{c1})至重電洞頂端(E_{hh1})所構成的能隙值；如果材料受到舒張形變，輕電洞帶會在重電洞帶的上面，能帶間隙值是由 E_{c1} 到輕電洞頂端(E_{lh1})所構成的能隙值。受到形變的量子井中其重電洞與輕電洞的有效質量不同，使得兩者的躍遷能量不盡相同。

一般而言， E_{c1} 至 E_{hh1} 的載子躍遷較容易產生 TE 模， E_{c1} 至 E_{lh1} 的載子躍遷較容易產生 TM 模，如(1.4)與(1.5)式所示[7]：

$$\alpha_{TE} = \frac{1}{4}\alpha_{lh} + \frac{3}{4}\alpha_{hh} \quad (1.4)$$

$$\alpha_{TM} = \alpha_{lh} \quad (1.5)$$

α_{TE} 、 α_{TM} 、 α_{lh} 與 α_{hh} 分別為 TE 模、TM 模、輕電洞與重電洞的吸收係數。由(1.4)與(1.5)式中可發現，TE 模的吸收係數主要由重電洞吸收係數主宰，而 TM 模的吸收係數主要受輕電洞吸收係數主宰。

所以對於被 E_{c1} 至 E_{hh1} 能隙值主宰的壓縮形變而言，TE 模的增益比 TM 模還大；反之由 E_{c1} 至 E_{lh1} 能隙值主宰的舒張形變而言，此時的增益則受 TM 模主宰[7]。

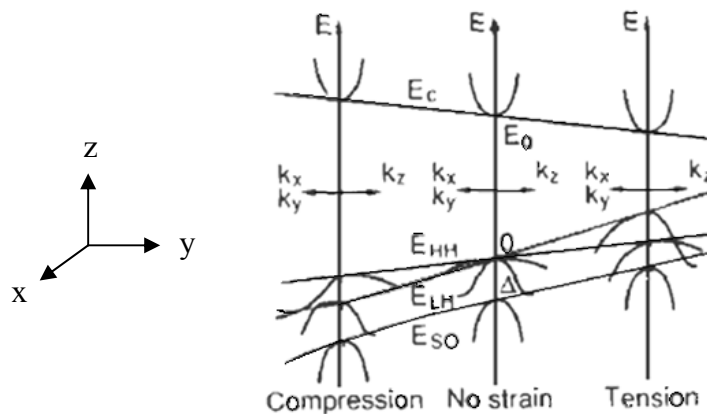


圖 1.6、壓縮與舒張形變對能帶結構的影響圖

導電帶能隙差和價電帶的重電洞與輕電洞能隙值分別用下列數學式表示[7,24,26]：

$$\Delta E_{hh} = -2a_v \left(\frac{C_{11} - C_{12}}{C_{11}} \right) \varepsilon_{//} + b \left(\frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}} \right) \varepsilon_{//} \quad (1.6)$$

$$\Delta E_{lh} = -2a_v \left(\frac{C_{11} - C_{12}}{C_{11}} \right) \varepsilon_{//} - b \left(\frac{C_{11} + 2C_{12}}{C_{11}} \right) \varepsilon_{//} \quad (1.7)$$

其中 a_v 為形變位能(hydrostatic deformation potential), b 為切變位能(shear deformation potential), C_{ij} 為所成長薄膜的彈性係數(elastic stiffness), $\varepsilon_{//}$ 為平行長晶面方向的形變, 定義為 $\pm \left| \frac{\Delta a}{a} \right|$, 正負號的定義與上一小節之定義相同。量子井能帶間隙會受到形變的影響, 而使能帶間隙增加或減少。當量子井存在壓縮形變時, 會使能帶間隙增加; 舒張形變則會使能帶間隙值減少[25]。形變的存在除了改變能帶間隙, 還會改變電洞的有效質量[7]。

1.5.2 形變對臨界厚度之影響

含有形變的材料系統中，必須考量到量子井數目與結構厚度之間的限制，否則容易造成晶格不匹配而造成晶格缺陷。當量子井產生缺陷時，會影響雷射元件的發光效率，因此須考慮臨界厚度(critical thickness)。當磊晶層的厚度超過臨界厚度時會產生大量的缺陷，磊晶層的厚度必須小於臨界厚度才可以避免產生晶格錯位的缺陷。People 與 Baen 等人提出了如下臨界厚度的算法[27,28]：

$$h_c = \frac{a}{32\sqrt{2}\pi\varepsilon^2} \frac{1-\nu}{1+\nu} \left(\ln \frac{h_c\sqrt{2}}{a} \right) \quad (1.8)$$

h_c 是臨界厚度， ε 是形變量，定義為 $\varepsilon = \pm \left| \frac{\Delta a}{a} \right|$ ， ν 是 Poisson's ratio，定義

$$\text{為 } \nu = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}} \text{。}$$

一般而言，形變增加時臨界厚度會隨之減少。所以在成長具形變的材料時需注意臨界厚度的限制，才可以避免含形變之磊晶層產生太大的缺陷。

1.6 氮砷化銦鎵之能帶與形變的影響

下圖 1.7 為 Kondow 等學者提出的 InGaAsN 之能帶排列(band lineup)關係圖[29]。圖 1.7 可看出 GaAsN 的能帶排列在左邊，InGaAs 之能帶排列於右，以 InGaAsN 的 GaAs 基板為準，橫軸中央為 GaAs，平行軸的左右兩側代表形變。在此正值表示壓縮形變，負值為舒張形變；上方與下方的灰色曲線分別為導電帶與價電帶，且 InGaAs 與 GaAsN 的導電帶彎曲(bowing)較大，價電帶的彎曲則較小。

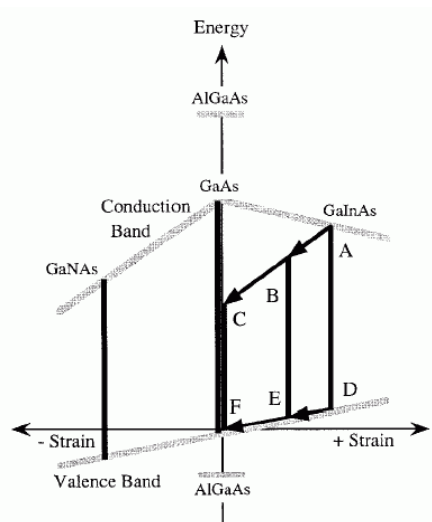


圖 1.7、InGaAsN 之能帶排列關係圖

圖 1.7 可發現，當 In 含量在 GaAs 中增加時，壓縮形變會隨之增加，上方灰色曲線的導電帶會下降，下方灰色曲線的價電帶會上升，能帶間隙值下降；若在 GaAs 中增加 N 含量時，舒張形變會增加，導電帶與價電帶也跟著下降。由於 N 含量增加時能帶相斥作用會愈明顯，導電帶下

降的比價電帶還快，能帶間隙值也會跟著下降。當在 InGaAs 化合物中增加 N 原子成為 InGaAsN 時，導電帶會由圖 1.7 的 A 移到 B 點，價電帶會由 D 移到 E 點。若持續增加 N 含量欲使 InGaAsN 與 GaAs 產生晶格匹配，導電帶與價電帶需繼續移動至 C 點與 F 點。如果將能隙較高的 AlGaAs 位能障與 InGaAsN 相鄰成長，很容易地可形成 type-I 的結構。type-I 的結構對電子而言，發光層的導電帶位能比較低，發光層之價電帶位能比鄰層的價電帶位能高，如此可以有效地將電子與電洞侷限在發光層中。若要 InGaAsN 與 GaAs 相鄰成長，InGaAsN 必會受到壓縮形變的影響，如此才可形成 type-I 的交界型態。因此，多數的 InGaAsN 雷射材料，量子井中多會伴隨著壓縮形變。

1.7 結論

自 1996 年 Kondow 等人發現這項應用於長程光纖通訊的 InGaAsN 光源材料後，已有相當多的研究群投入相關之研究。InGaAsN 材料的優點，是可以用成本較便宜的 GaAs 做為基板、可成為 type-I 的雙異質界面結構而得到較深的量子井、且 InGaAsN 的 band offset ratio 比 InGaAlAs 與 InGaAsP 材料來的大，縱使 InGaAsN 材料在高溫操作下也比較不容易產生電子溢流，高溫中的表現比其他材料還要優異。

採用 InGaAsN 製作成的面射型雷射，也可使用折射率差值極大的 AlGaAs 系統作為布拉格反射鏡(distributed Bragg reflector, DBR)，且採用 GaAs 之基板可幾乎晶格匹配，能使元件效能發展更好[30]。

但 InGaAsN 材料的 N 原子長晶控制比較不容易，少量的 N 原子就足以影響元件的性能，如何有效地利用 N 原子使材料發揮最大的效能，尚需研究人員們的努力才可使材料性能有更大的發揮與改善。

参考文献

- [1] J. Hecht, *Understanding Fiber Optics*, 4nd ed., 2002.
- [2] J. C. L. Yong, J. M. Rorison, M. Othman, H. D. Dawson, and K. A. Williams, “Simulation of gain and modulation bandwidths of 1300 nm RWG InGaAsN lasers,” *IEE Proc.-Optoelectron.*, vol. 150, pp. 80–82, 2003.
- [3] T. Ishikawa, T. Higashi, T. Uchida, T. Yamamoto, T. Fujii, H. Shoji, M. Kobayashi, and H. Soda, “Well-thickness dependence of high-temperature characteristics in 1.3- μm AlGaInAs–InP strained-multiple-quantum-well lasers,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 1703–1705, 1998.
- [4] M. Kondow, T. Kitatani, S. Nakatsuka, M. C. Larson, K. Nakahara, Y. Yazawa, and M. Okai, “GaInNAs: A novel material for long-wavelength semiconductor lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 3, pp. 719–730, 1997.
- [5] G. Dumitras and H. Riechert, “Determination of band offsets in semiconductor quantum well structures using surface photovoltage,” *J. Appl. Phys.*, vol. 94, pp. 3955–3959, 2003.
- [6] J. C. L. Yong, J. M. Rorison, and I. H. White, “1.3- μm quantum-well InGaAsP, AlGaInAs, and InGaAsN laser material gain: a theoretical study,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, pp. 1553–1564, 2002.

- [7] P. S. Zory, Jr., *Quantum Well Lasers*, Academic Press, San Diego, 1993.
- [8] J. Minch, S. H. Park, T. Keating, and S. L. Chuang, “Theory and experiment of $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}$ and $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}_{1-y}$ long-wavelength strained quantum-well lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, pp. 771–782, 1999.
- [9] 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 Photonics Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 597–599, 2002.
- [10] T. Kitatani, M. Kondow, S. Nakatsuka, Y. Yazawa, and M. Okai, “Room-temperature lasing operation of GaInNAs–GaAs single-quantum-well laser diodes,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 3, pp. 206–209, 1997.
- [11] Y. A. Chang, H. C. Kuo, Y. H. Chang, 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. Commun.*, vol. 241, pp. 195–202, 2004.
- [12] T. R. Chen, P. C. Chen, J. Ungar, M. A. Newkirk, S. Oh, and N. B. Chaim, “Low-threshold and high-temperature operation of InGaAlAs–InP lasers,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 9, pp. 17–18, 1997.

- [13] G. Lin and C. P. Lee, “Comparison of 1300 nm quantum well lasers using different material systems,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 34, pp. 1191–1200, 2002.
- [14] S. T. Ng, W. J. Fan, S. F. Yoon, S. Z. Wang, Y. Qu, C. Y. Liu, S. G. Ma, and S. Yuan, “Investigation of the optical properties of InGaAsN/GaAs/GaAsP multiple-quantum-well laser with 8-band and 10-band $k\cdot p$ model,” *J. Appl. Phys.*, vol. 96, pp. 4663–4665, 2004.
- [15] M. H. Gass, A. J. Papworth, T. B. Joyce, T. J. Bulloug, and P. R. Chalker, “Measurement of the effective electron mass in GaInNAs by energy-loss spectroscopy,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, pp. 1453–1455, 2004.
- [16] P. Perlin, P. Wiśniewski, C. Skierbiszewski, and T. Suski, “Interband optical absorption in free standing layer of $\text{Ga}_{0.96}\text{In}_{0.04}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, pp. 1279–1281, 2000.
- [17] R. S. Williams, W. M. McGee, M. J. Ashwin, T. S. Jones, E. Clarke, P. Stavrinou, J. Zhang, S. Tomić, and C. P. A. Mulcahy, “Wavelength control across the near IR spectrum with GaInNAs,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 032109-1–032109-3, 2007.
- [18] C. Skierbiszewski, S. P. Lepkowski, P. Perlin, T. Suski, W. Jantsch, and J. Geisz, “Effective mass and conduction band dispersion of GaAsN/GaAs quantum wells,” *Opt. Commun.*, vol. 13, pp. 1078–1081, 2002.

- [19] Y. Zhang and A. Mascarenhas, “Formation of an impurity band and its quantum confinement in heavily doped GaAs: N,” *Phys. Rev. B*, vol. 61, pp. 7479–7482, 2000.
- [20] J. M. Sánchez, A. Guzmán, J. M. Ulloa, A. Hierro, and E. Muñoz, “Effect of nitrogen on the optical properties of InGaAsN *p-i-n* structures grown on misoriented (111)B GaAs substrates,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, pp. 2524–2526, 2004.
- [21] C. K. Kim, T. Miyamoto, and Y. H. Lee, “Design considerations of GaInNAs-GaAs quantum wells: Effects of indium and nitrogen mole fractions,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 5994–5996, 1998.
- [22] A. W. Jackson, R. L. Naone, M. J. Dalberth, J. M. Smith, K. J. Malone, D. W. Kisker, J. F. Klem, K. D. Choquette, D. K. Serkland, and K. M. Geib, “OC-48 capable InGaAsN vertical cavity lasers,” *Electron. Lett.*, vol. 37, pp. 355–356, 2001.
- [23] S. Sanorpim, F. Nakajima, W. Ono, R. Katayama, and K. Onabe, “High-nitrogen-content InGaAsN films on GaAs grown by metalorganic vapor phase epitaxy with TBAs and DMHy,” *Phys. Stat. Sol.*, vol. 7, pp 1612–1617, 2006.
- [24] R. M. Gokhale, J. Wei, H. Wang, and S. R. Forrest, “Growth and characterization of small band gap (~ 0.6 eV) InGaAsN layers on InP,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, pp. 1287–1289, 1999.
- [25] H. P. Shiao, H. Y. Lee, Y. J. Lin, Y. K. Tui, and C. T. Lee, “Growth

- and performance study of aluminum-free InGaAs/GaAs/InGaAsP strained quantum-well pump lasers,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, pp. 6384–6390, 2001.
- [26] P. J. A. Thijs, L. F. Tiemeijer, P. I. Kuindersma, J. J. M. Binsma, and T. V. Dongen, “High-performance 1.5 μm wavelength InGaAs-InGaAsP strained quantum well lasers and amplifiers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 1426–1439, 1991.
- [27] R. People and J. C. Bean, “Erratum: Calculation of critical layer thickness versus lattice mismatch for $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained layer heterostructures,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, pp. 229–229, 1986.
- [28] R. People and J. C. Bean, “Calculation of critical layer thickness versus lattice mismatch for $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained-layer heterostructures,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 47, pp. 322–324, 1985.
- [29] 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.*, vol. 35, pp. 1273–1275, 1996.
- [30] H. Riechert, A. Ramakrishnan, and G. Steinle, “Development of InGaAsN-based 1.3 μm VCSELs,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 892–897, 2002.

第二章 面射型雷射原理與簡介

2.1 前言

1979 年，日本學者 H. Soda 與 K. Iga 等人首先提出垂直共振腔面射型雷射(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)的基本概念。他們採用 InGaAsP/InP 做為材料，當時的元件效率低，臨界電流密度高(11 kA/cm^2)且須在 77K 的低溫下才可操作[1]；1984 年時完成室溫脈衝波(pulsed wave)操作的面射型雷射[2]；1988 年時第一個採用 GaAs 材料當做活性層，用半導體做布拉格反射鏡(DBRs)製造了室溫下脈衝震盪的面射型雷射[3]。自此之後，有關面射型雷射的研究進展迅速。

VCSEL 與傳統側射型雷射(Edge-Emitting Laser, EEL)差異在於磊晶層與共振腔相對位置的不同。EEL 的磊晶層與共振腔平行，反射鏡面是利用晶體自然斷裂面與磊晶層垂直，雷射光由側面發出。VCSEL 則是磊晶層與共振腔垂直，反射鏡由磊晶層或介質(dielectric)薄膜組成後形成共振腔，中間夾著發光區域使光在共振腔內來回放大，最後雷射光從正面發出。

一般而言，VCSEL 的共振腔包含了活性層與 spacer layers，spacer layers 的作用在調整共振腔長度，為了考量光子與電子在空間上的侷限及耦合效果，通常會以一個波長的長度去設計共振腔。

2.2 面射型雷射之特點及應用

VCSEL 有上下兩層 DBRs 作為反射鏡，共振腔約只有 $1\ \mu\text{m}$ 左右，所以 VCSEL 的增益區很短，光子在共振腔來回只有約 1% 的增益，如果要有雷射光的輸出，兩個鏡面的反射率都需超過 99% 以上，需要非常高的反射率鏡面才可得到低的臨界電流[4]。VCSEL 與傳統 EEL 相較下，VCSEL 有許多優點[5-9]：

- 1、元件可直接在磊晶片上進行製程，減少了生產成本。
- 2、可做成二維雷射陣列(two-dimensional array)，利於串接或並列式的光纖傳輸。
- 3、不需分割及封裝即可檢測晶片良率，可降低大量生產的成本。
- 4、圖 2.1 (a) EEL 示意圖所示[5]，EEL 的光束是從側邊發出，橫向及側向的模態(transverse and lateral modes)是靠活性層橫向的增益來決定。橫向的載子侷限太小，側向的載子侷限卻太寬造成近似橢圓的光場(field)輸出，與實際所需的圓形光場差異很大，會使設計製造光源和光纖的耦合(coupling)不容易。VCSEL 的主要部份為上下反射鏡及中間的活性層；如圖 2.1 (b) VCSEL 示意圖所示，共振腔垂直且比較短使得雷射光從表面呈圓形對稱光束射出，且發散角小、低光束分歧可使得光纖耦合對準容易、光耦合效率高，節省了光纖對準的封裝成本。
- 5、如圖 2.2 (b) VCSEL 共振腔模頻譜與增益頻譜關係圖所示[7]，VCSEL

的共振腔短，能夠在低電流下操作，單一縱向模態(single longitudinal mode)之間的距離比 EEL 還要長，比較容易得到單一模態。圖 2.2 (a) EEL 共振腔模頻譜與增益頻譜關係圖所示，EEL 因共振腔多達數百 μm ，增益頻譜(gain spectrum)比較不容易維持單一模態。

6、由於 VCSEL 共振腔雷射波長與量子井的增益峰值(gain peak)波長須在雷射操作時盡量符合，共振腔雷射波長隨溫度的升高變化較小，而量子井的增益峰值波長隨著溫度的變化較大，因此兩者之波長在室溫時必須有一定的差距。製造時通常會將共振腔模(cavity mode)與量子井的增益峰偏置，高溫操作時兩者會相遇於同一波長使元件效能表現較佳。VCSEL 量子井增益峰與共振腔模的最強處會隨溫度改變。圖 2.3 為溫度 $T_3 > T_2 > T_1$ 時 VCSEL 雷射增益與共振腔模的關係圖[8]；通常於設計時會將共振腔模設計在比較長的波長($T=T_1$)，當溫度升高至操作溫度($T=T_3$)時增益波峰會因為溫度升高而接近共振腔模，可使增益波峰與共振腔模於雷射出光時的峰值會合在同一處，可得到最佳的性能。

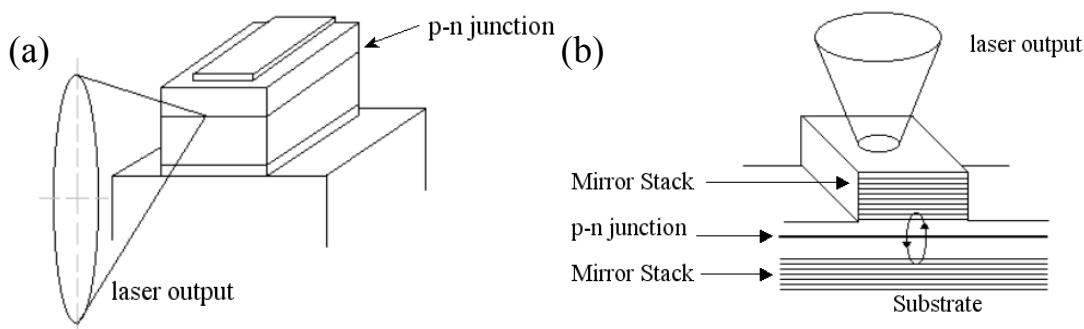


圖 2.1、(a) EEL (b) VCSEL 之示意圖

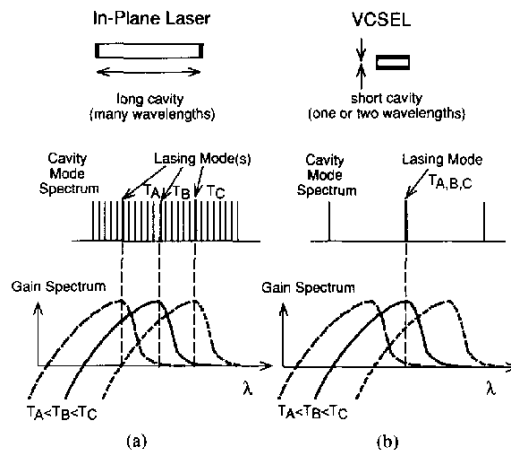


圖 2.2、(a) EEL (b) VCSEL 之共振腔模頻譜與增益頻譜關係圖

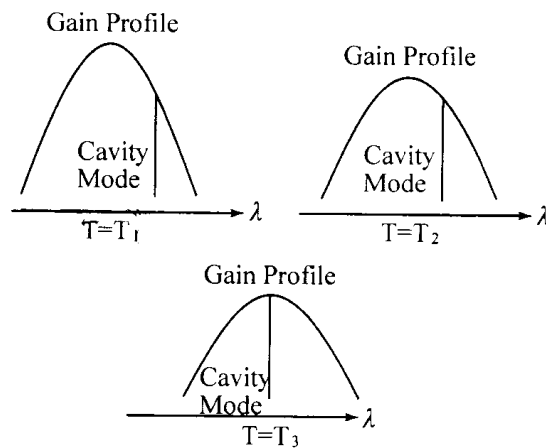


圖 2.3、溫度 $T_3 > T_2 > T_1$ 時 VCSEL 雷射增益與共振腔模的關係圖

但 VCSEL 也有需要克服的缺點，以求元件改良之課題：

- 1、因 VCSEL 活性區短相對地也會減短增益路程的長度 (gain-path length)，使得 VCSEL 需要有極高效率的共振腔，上下反射層需要達到 99% 以上的反射率，增加了製程的困難。
- 2、因 DBRs 有電阻，當電流通過時熱也會隨之產生，過多的熱會對元

件產生不良的影響，如何避開或減少 DBRs 電阻是一重要的課題。

- 3、因 VCSEL 的活性區增益路徑短，活性區需要供給足夠的增益才可貢獻至發光，相對地會增加活性層設計的困難。
- 4、長波長 VCSEL 的製作困難之一，是缺乏能夠在 InP 基板上成長高品質的反射鏡。圖 2.4 是長波長 VCSEL 使用三組不同材料得到的反射率與週期數目的關係圖[4]；使用半導體材料做 DBRs 時，InGaAsP/InP 的折射率差太小(約 0.28)，且 GaAs 與 InP 之間有 3.7%的晶格不匹配，須用晶片熔合(wafer bonding)之技術將其他材料做成的 DBRs 與共振腔的活性層連接起來，常見的作法是先分別成長 GaAs/AlAs DBRs(折射率差約 0.48)，再將其熔合於 InP 材料的共振腔活性層上，增加了製作的困難[10]。
- 5、DBRs 需要有高的反射率、高的熱傳導係數與低電阻。VCSEL 中比較常以半導體材當作 DBRs，是因為可用磊晶法(epitaxy)成長後直接在基板上通電流注入鏡面，但半導體材料的折射率差比較小，至少需要 20 對以上的 DBRs 才可符合要求，增加了製程的難度。使用介質材料作為 DBRs 的折射率差雖然大(如：Si/SiO₂ 差約 2.15)，只需很少的 DBRs 對數就可得到高反射率，但因為介質材料傳熱不佳需要另行成長於活性層，而且受限於介質材料鏡面的光吸收係數需要另外用複雜的方式才可使電流通過；所以目前較常使用半導體材料做 DBRs [4,11]。

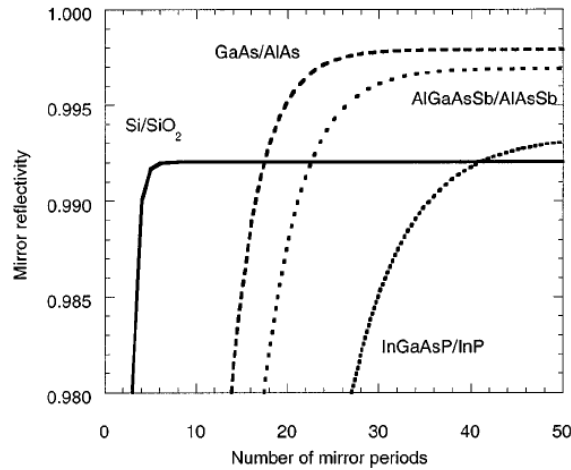


圖 2.4、長波長 VCSEL 使用三組不同材料的反射率與週期數目的關係圖

整體來說，VCSEL 可節省許多組裝成本，包括後段製程、量測、封裝等方面，就某些特性而言，如臨界電流、圓形發光束、高速調變特性及單模態發光等會比傳統 EEL 優異，使 VCSEL 受到各界重視。VCSEL 目前已有不少商業化的應用[12,13]：

- 1、光纖通信網路(optical fiber transmission)的傳輸：加入摻鉕光纖光放大器後可延伸數百公里的傳輸距離。
- 2、光數據鏈路傳輸(serial optical data links)：可取代傳統使用發光二極體作為發光光源的傳輸模組，提升傳輸速率至 Gigabit 的等級而且傳輸距離倍增，大幅改善了光數據鏈路傳輸性能。
- 3、資料儲存(data storage)：資料儲存設備主要為 CD-ROM 或 DVD，使用 VCSEL 不僅可簡化讀寫頭的光學設計，還可節省製造成本。
- 4、並列式光互連(parallel optical interconnection)：並列式光內連接模組

可以加快與提升每一通路傳輸的速率和距離。

- 5、雷射列印(laser printing)：傳統的雷射列印技術是利用一維 EEL，VCSEL 則可以二維列印，可加快列印時間。

2.3 布拉格反射鏡之工作原理

布拉格反射鏡(DBRs)在 VCSEL 活性層上下方各有一個，DBRs 必須有高反射率才可當作 VCSEL 的反射鏡。本小節將以傳輸矩陣(transfer matrix)法來介紹多層結構的反射率。圖 2.5 為電磁波經過三層介質的示意圖。當一束光經過第一個介面其反射率為 n_0 時，有一部分光會穿透到第二層反射率為 n_1 的介面，部分的光會反射回原介面 n_0 ，重複的情形會在下一個介面持續著。

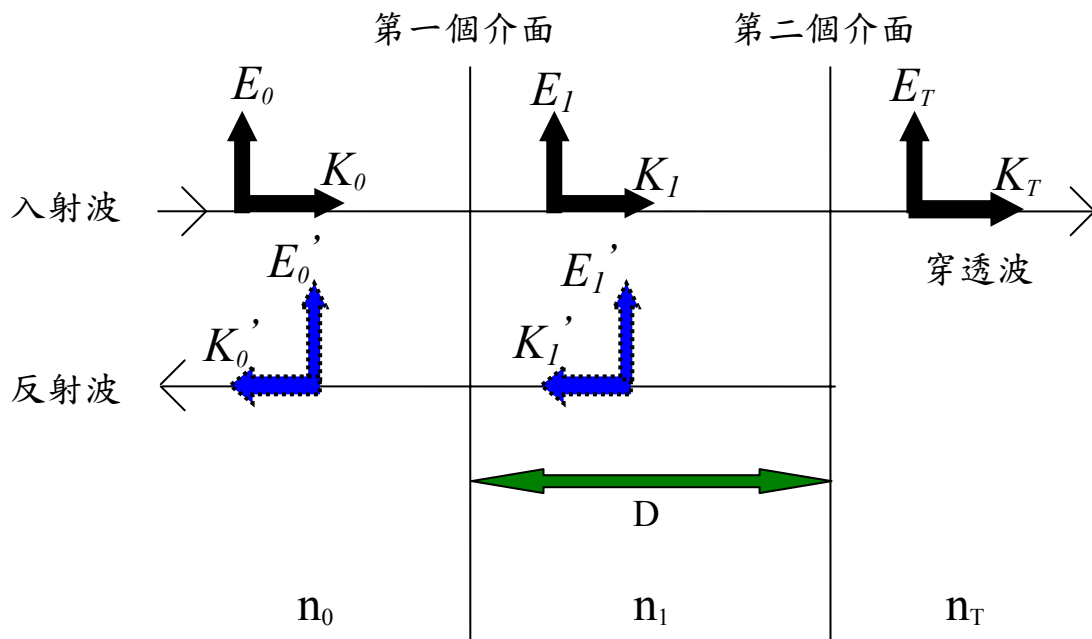


圖 2.5、電磁波經過三層介質的示意圖

電磁場均需要滿足邊界條件且介面上的電磁場需連續，電磁場在邊界上的分佈為：

第一個介面

第二個介面

$$\text{電場： } E_0 + E_0' = E_1 + E_1'$$

$$\text{電場： } E_1 \cdot e^{ik_1} + E_0' \cdot e^{-ik_1} = E_T$$

$$\text{磁場： } H_0 - H_0' = H_1 - H_1'$$

$$\text{磁場： } H_1 \cdot e^{ik_1} - H_1' \cdot e^{-ik_1} = H_T$$

$$\text{即： } n_0 \cdot E_0 - n_0 \cdot E_0' = n_1 \cdot E_1 - n_1 \cdot E_1' \quad \text{即： } n_1 \cdot E_1 \cdot e^{ik_1} - n_1 \cdot E_1' \cdot e^{-ik_1} = n_T \cdot E_T$$

K 為 wavenumber，經計算後滿足邊界的條件可得到：

$$1 + \frac{E_0'}{E_0} = [\cos k_1 - i \left(\frac{n_T}{n_1}\right) \sin k_1] \cdot \frac{E_T}{E_0} \quad (2.1)$$

$$n_0 - n_0 \left(\frac{E_0'}{E_0}\right) = [-in_1 \sin k_1 + n_T \cos k_1] \cdot \frac{E_T}{E_0} \quad (2.2)$$

可用矩陣來表示：

$$\begin{bmatrix} 1 \\ n_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -n_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_0' \\ E_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_1 & \frac{-i}{n_1}(\sin k_1) \\ -in_1 \sin k_1 & \cos k_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ n_T \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_T \\ E_0 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

其中 $\left(\frac{E_0'}{E_0}\right) = r$ 為反射係數， $\left(\frac{E_T}{E_0}\right) = t$ 為穿透係數，

$$M = \begin{bmatrix} \cos k_1 & \frac{-i}{n_1}(\sin k_1) \\ -in_1 \sin k_1 & \cos k_1 \end{bmatrix}, \text{ 可簡化為：}$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ n_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -n_0 \end{bmatrix} \cdot r = M \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ n_T \end{bmatrix} \cdot t \quad (2.4)$$

當光經過 N 層，各層反射率為 $n_1, n_2, n_3 \dots n_N$ ，各層厚度為 $D_1, D_2, D_3 \dots D_N$ 的多層傳輸結果後可表示為：

$$\begin{bmatrix} 1 \\ n_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -n_0 \end{bmatrix} \cdot r = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \dots \cdot M_N \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ n_T \end{bmatrix} \cdot t \quad (2.5)$$

$M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \dots \cdot M_N$ 為每一層的傳輸矩陣，令 $M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \dots \cdot M_N = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$

光經過多層的反射係數 r ，與穿透係數 t 後可表示成[8]：

$$r = \frac{An_0 + Bn_T n_0 - C - Dn_T}{An_0 + Bn_T n_0 + C + Dn_T} \quad (2.6)$$

$$t = \frac{2n_0}{An_0 + Bn_T n_0 + C + Dn_T} \quad (2.7)$$

VCSEL 的 DBRs 是用 $\lambda/4$ 厚的高折射率與 $\lambda/4$ 厚的低折射率材料成雙成對地交互成長，每一對即是一週期(period)。矩陣光學中，光於高折射(n_H)層與低折射率(n_L)層的轉換矩陣分別表示為：

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{n_H} \\ in_H & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{n_L} \\ in_L & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

當光經過一組高反射率層與低反射率層的矩陣表示式：

$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{n_H} \\ in_H & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & \frac{i}{n_L} \\ in_L & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-n_L}{n_H} & 0 \\ 0 & \frac{-n_H}{n_L} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

光經過 N 層高反射率層與低反射率層的多層傳輸矩陣後可表示為：

$$\begin{aligned}
 M &= (M_{H1} \cdot M_{L1}) \cdot (M_{H2} \cdot M_{L2}) \cdot \dots \cdot (M_{HN} \cdot M_{LN}) = (M_H \cdot M_L)^N \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{-n_L}{n_H} & 0 \\ 0 & \frac{-n_H}{n_L} \end{bmatrix}^N = \begin{bmatrix} \left(\frac{-n_L}{n_H}\right)^N & 0 \\ 0 & \left(\frac{-n_H}{n_L}\right)^N \end{bmatrix} \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

由(2.6)式與(2.10)式轉換之關係式可得：

$$r = \frac{n_0 \left(\frac{-n_L}{n_H}\right)^N - n_T \left(\frac{-n_H}{n_L}\right)^N}{n_0 \left(\frac{-n_L}{n_H}\right)^N + n_T \left(\frac{-n_H}{n_L}\right)^N} \quad (2.11)$$

隨著 DBRs 對數的增加，反射率也會增加，每一對 DBRs 形成建設性干涉，當反射率達最大值時之波長稱為布拉格波長(Bragg wavelength)，此時的最高正向反射率為[8]：

$$R_{max} = |r|^2 = \left[\frac{\left(\frac{n_0}{n_T}\right) \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2N} - 1}{\left(\frac{n_0}{n_T}\right) \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2N} + 1} \right]^2 \quad (2.12)$$

由 $\lambda/4$ 厚的高-低折射率成對成長的 N 層 DBRs 反射率可由(2.12)式得到。當層數 N 越大時表示反射率會愈高，此時頻譜的中央頻寬會變得更窄，如果對數繼續增加，中央頻寬會趨向固定的最小值。

2.4 面射型雷射之結構簡介

VCSEL 基本上有四種結構。根據不同的電流、光導引與製造過程可大致分成蝕刻平台結構(etched mesa)，離子佈植結構(ion implanted)，氧化侷限結構(oxide confined)，埋藏型異質結構(buried heterostructure)，結構如圖 2.6-2.9 所示[6,11]。

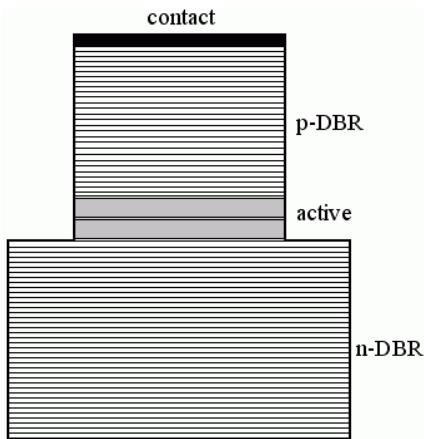


圖 2.6、蝕刻平台結構

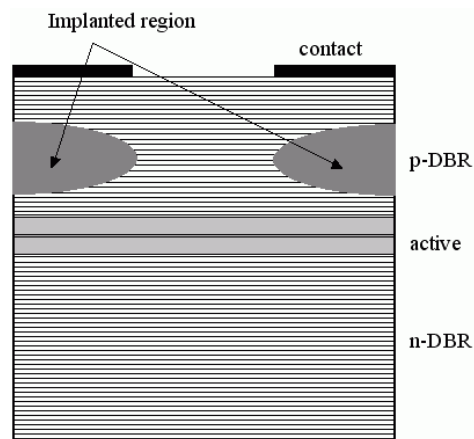


圖 2.7、離子佈植結構

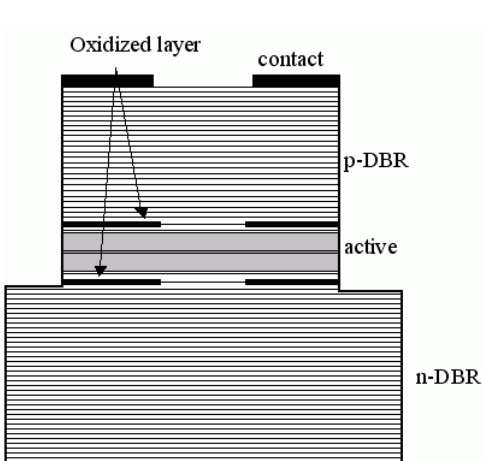


圖 2.8、氧化侷限結構

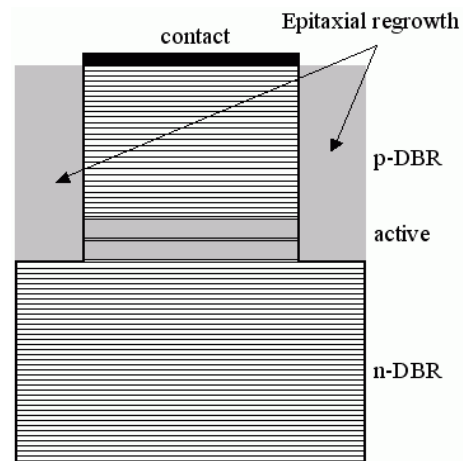


圖 2.9、埋藏型異質結構

1、蝕刻平台結構(etched mesa)：

如圖 2.6 所示。蝕刻平台是最早用來侷限電流的方法，用乾蝕刻(dry etched)方法蝕刻，蝕刻深度到活化層上方停止，可使得電子與電洞在侷限範圍裡結合而發出雷射光。這種結構只可以侷限電流縱向的流動，卻不能侷限電流橫向的流動，以致於電流會往橫向擴散。它兩邊的材料為空氣，由於半導體與空氣有很大的折射率差，所以光導引作用很強。雖然製程方式比較容易，但 p-type DBRs 與空氣接觸易氧化而變質，容易影響雷射的使用壽命。

2、離子佈植結構(ion-implanted)：

圖 2.7 為離子佈植侷限結構。離子佈植法最常用來當作電流侷限的方法，常使用的離子有 H^+ , O^+ , Si^+ , Er^+ 等，經由加速器將這些雜質打入特定的區域內使得離子佈植區產生高電阻或近似絕緣體，當電流注入時不會流至離子佈植區，而是使電流集中流往活性區。由於離子佈植深度不容易控制，離子佈植後易因高溫退火而導致離子擴散，離子經過的區域也會被破壞，但注入雜質的方式可使電流橫向的擴散最小，且雜質的分佈情形可藉由加速器提供的能量來調整，製程比較簡單，容易量產。

3、氧化侷限結構(oxide confinement)：

圖 2.8 為氧化侷限結構。氧化侷限結構在 p-type DBRs 中成長一層高鋁含量的 $Al_xGa_{1-x}As$ ，利用氫氣帶入高溫的水蒸氣時， $Al_xGa_{1-x}As$ 氧化會形成 Al_2O_3 ，因為 Al_2O_3 的電阻值高，電流侷限效果會比較好，可使電流侷限在很小的孔徑中，但必須注意控制氧化層的孔徑大小。當溫

度為 350-500 °C 時，能使 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 轉換成低折射率的絕緣氧化層，但因 Al 含量越高氧化速度越快，氧化時間越久氧化的區域也越多，必須慎選氧化層位置。具有氧化層的 VCSEL 所需的電力小，代表產生的熱能也會比較少，可減小熱造成的共振腔波長與雷射增益峰之間的位移。

4、埋藏型異質結構(buried heterostructure)：

圖 2.9 為埋藏型異質結構，埋藏型異質結構又稱再成長(regrown)結構。顧名思義是將活性層周圍的區域蝕刻後以便絕緣，再將被蝕刻的區域成長且埋入低折射率的材料，活性層被埋在半導體的材料後，使用相對較小的折射率材料環繞著，使周圍形成可同時達到光性與電性侷限良好的光導引結構。雖然有較好的折射率導向，但是有許多再成長上的問題，如再成長前元件表面的處理會影響雷射輸出、需要長在容易產生氧化的 AlGaAs 表面、蝕刻技術尚須結合特殊的清潔處理好去避開空氣暴露所形成的缺陷問題，製作過程會較為繁瑣。

2.5 氮砷化鎵與氮砷化銦鎵面射型雷射

工研院之 H. D. Yang 等人於 2005 年發表使用 MOCVD 法分別成長三元化合物 $\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}/\text{GaAs}$ 與四元化合物 $\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}_{0.993}\text{N}_{0.007}/\text{GaAs}$ 之量子井[14]。此 VCSEL 是以 GaAs 作為 spacer layers，其 DBRs 分別是 25 對 p-type 與 40.5 對 n-type 的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ ，室溫下的雷射波長分別是 1180 與 1303 nm，臨界電流分別是 1.5 與 2.7 mA。

此外，R. S. Hsiao 等人於 2004 年以 MBE 法成長三元 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 與四元 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.978}\text{N}_{0.022}/\text{GaAs}$ 之量子井[15]。此 VCSEL 的 spacer layers 是 12 nm 的 GaAs，上下 DBRs 分別是 25 對 p-type 與 33 對 n-type 的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ ，雷射波長分別是 1130 與 1304 nm，而 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.978}\text{N}_{0.022}/\text{GaAs}$ 的臨界電流為 1.6 mA。

另外，Ricoh 公司的 S. Sato 等人宣佈用 MOCVD 法做成 $\text{In}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}_{0.995}\text{N}_{0.005}/\text{GaAs}$ 之量子井[16]。其 VCSEL 的上下層 DBRs 分別是 22 對 p-type 與 35 對 n-type 的 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ ，兩邊的 spacer layers 是 GaAs，臨界電流是 7.6 mA，雷射波長約為 1262 nm。

G. Steinle 等人於 2001 年用 MBE 法成長 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.982}\text{N}_{0.018}/\text{GaAs}$ 活性層[17]。其 VCSEL 是以 GaAs 作為 spacer layers，上層 DBRs 為 28 對 p-type 之 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ ，下層則是 34 對 n-type 之 AlAs/GaAs ，於室溫中的雷射波長是 1284 nm，臨界電流約為 3.8 mA。

N. Nishiyama 等人於 2001 年成長 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}/\text{GaAs}$ VSCSEL [18]。其發光波長為 1120 nm，兩邊的 spacer layers 為 0.102 μm 的 GaAs，上下層反射鏡分別是 21 對 p-type 與 35 對 n-type 的 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ ，臨界電流約為 0.9 mA。

大體來說，製程中於三元化合物 InGaAs 摻入 N 使之延伸發光波長成為四元 InGaAsN 是可行的。下表 2.1 將 2.5 節所介紹的實驗做一整理表，由學者們的實驗可以發現，三元 InGaAs 製成四元 InGaAsN 時的 DBRs 材料多使用 AlGaAs/GaAs、spacer layers 的材料為 GaAs。

表 2.1、實驗文獻中 InGaAs 與 InGaAsN 面射型雷射之 DBRs、spacer layers 與臨界電流整理表

活性區	N/P type DBRs	spacer layers	I_{th} (mA)
$\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}$	40.5/25 對 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}-\text{GaAs}$	GaAs	1.5
$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	33/25 對 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}-\text{GaAs}$	GaAs	---
$\text{In}_{0.36}\text{Ga}_{0.64}\text{As}_{0.993}\text{N}_{0.007}$	40.5/25 對 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}-\text{GaAs}$	GaAs	2.7
$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.978}\text{N}_{0.022}$	33/25 對 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}-\text{GaAs}$	GaAs	1.6
$\text{In}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}_{0.995}\text{N}_{0.005}$	35/22 對 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}-\text{GaAs}$	GaAs	7.6
$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.982}\text{N}_{0.018}$	34 對 AlAs-GaAs/ 28 對 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}-\text{GaAs}$	GaAs	3.8
$\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ (本論文模擬之原始結構)	35/21 對 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}-\text{GaAs}$	GaAs	1.03

2.6 結論

本章節比較 VCSEL 與傳統 EEL 之間的差異、使用矩陣法介紹布拉格反射鏡的工作原理、介紹 DBRs 材料為半導體或介電質材料時兩者之間的差異、簡介 VCSEL 四大結構的特性等，且證實製程以三元 InGaAs 於活性區加入 N 含量成為 InGaAsN 的可行性。

整體來說，VCSEL 可節省許多組裝成本，包括後段製程、量測、封裝等方面，就某些特性而言，如臨界電流、圓形發光束、高速調變特性及單模態發光等均比傳統 EEL 優異。近年來由於製程的日新月異，VCSEL 效率愈來愈好，但由於共振腔短、元件體積小，電阻產生的熱無法及時排出而造成元件效能變差，所以熱效應是極需被改善的問題。

参考文献

- [1] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, “GaInAsP/InP surface emitting injection lasers,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 18, pp. 2329–2330, 1979.
- [2] K. Iga, S. Ishikawa, S. Ohkouchi, and T. Nishimura, “Room-temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface emitting injection laser,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, pp. 348–350, 1984.
- [3] T. Sakaguchi, F. Koyama, and K. Iga, “Vertical cavity surface-emitting laser with an AlGaAs/AlAs bragg reflector,” *Electron. Lett.*, vol. 24, pp. 928–929, 1988.
- [4] A. Karim, S. Björlin, J. Piprek, and J. E. Bowers, “Long-wavelength vertical-cavity lasers and amplifiers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, pp. 1244–1253, 2000.
- [5] W. W. Chow, K. D. Choquette, M. H. Crawford, K. L. Lear, and G. R. Hadley, “Design, fabrication, and performance of infrared and visible vertical-cavity surface-emitting lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, pp. 1810–1924, 1997.
- [6] C. W. Wilmsen, H. Temkin, and L. A. Coldren, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, 2001.
- [7] D. B. Young, J. W. Scott, F. H. Peters, M. G. Peters, M. L. Majewski,

- B. J. Thibeault, S. W. Corzine, and L. A. Coldren, “Enhanced performance of offset-gain high-barrier vertical-cavity surface-emitting lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, pp. 2013–2022, 1993.
- [8] W. Jiang and M. S. Leiby, *Optical Sources: Light Emitting Diodes and Laser Technology*, 1998.
- [9] K. D. Choquette and H. Q. Hou, “Vertical-cavity surface emitting lasers: Moving from research to manufacturing,” *Proc. IEEE.*, vol. 85, pp. 1730–1739, 1997.
- [10] Y. H. Lo, R. Bhat, D. M. Hwang, C. Chua, and C. H. Lin, “Semiconductor lasers on Si substrates using the technology of bonding by atomic rearrangement,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 1038–1040, 1993.
- [11] H. E. Li and K. Iga, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices*, Springer, 2003.
- [12] R. Szweda, “VCSELs market diversifies for success,” *The Advan. Semicond. Magaz.*, vol. 19, pp. 32–35, 2006.
- [13] R. Szweda, “VCSELs resurgent,” *The Advan. Semicond. Magaz.*, vol. 17, pp. 28–31, 2004.
- [14] H. D. Yang, C. Lu, R. Hsiao, C. Chiou, C. Lee, C. Huang, H. Yu, C. Wang, K. Lin, N. A. Maleev, A. R. Kovsh, C. Sung, C. Lai, J. Wang,

- J. Chen, T. Lee, and J. Y. Chi, "Characteristics of MOCVD- and MBE-grown InGa(N)As VCSELs," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 834–839, 2005
- [15] R. S. Hsiao, J. S. Wang, K. F. Lin, L. Wei, H. Y. Liu, C. Y. Liang, C. M. Lai, A. R. Kovsh, N. A. Maleev, J. Y. Chi, and J. F. Chen, "Single mode 1.3 μm InGaAsN/GaAs quantum well vertical cavity surface emitting lasers grown by molecular beam epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, pp. L1555–L1557, 2004.
- [16] S. Sato, N. Nishiyama, T. Miyamoto, T. Takahashi, N. Jikutani, M. Arai, A. Matsutani, F. Koyama, and K. Iga, "Continuous wave operation of 1.26 μm GaInNAs/GaAs vertical-cavity surface emitting lasers grown by metalorganic chemical vapour deposition," *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 2018–2019, 2000.
- [17] G. Steinle, H. Riechert, and A. Y. Egorov, "Monolithic VCSEL with InGaAsN active region emitting at 1.28 μm and CW output temperature power exceeding 500 μW at room temperature," *Electron. Lett.*, vol. 37, pp. 93–95, 2001.
- [18] N. Nishiyama, M. Arai, S. Shinada, M. Azuchi, T. Miyamoto, F. Koyama, and K. Iga, "Highly strained GaInAs–GaAs quantum-well vertical-cavity surface-emitting laser on GaAs (311)B substrate for stable polarization operation," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 7, pp. 242–248, 2000.

第三章 參數設定與氮砷化銦鎵面射型雷射之增益分析

3.1 研究動機與前言

穩定光源是光通訊傳輸的必備條件，長波長 1.3 μm 的面射型雷射發散角小，整合能力高，在光纖通訊上的應用極具低成本發光源的潛力。1.3 μm 面射型雷射市場的佔有率從 1999 年 0% 增至 2004 年的 51%，可見其重要之地位[1]。

本章節使用了 PICS3D 模擬軟體探討 1.3 μm 面射型半導體雷射。首先利用發光 1.3 μm 之不同半導體材料(InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP) 作為活性層，探討使用三種不同活性層時的表現；由活性層的比較中得到 InGaAsN 透明載子密度比其他兩者來的小，之後再變化 InGaAsN 活性層中的 N 含量，探討活性層於不同 N 含量時的增益表現。

3.1.1 理論模型

本研究所使用的模擬軟體為加拿大 Crosslight 公司之商用套裝軟體 PICS3D。在數值模擬的理論中，主要是用 drift-diffusion model 來計算半導體中載子的漂移與擴散；下式(3.1)為描述半導體元件行為的基本方程式 Poisson's equation，(3.2)與(3.3)式分別是電子與電洞的電流連續方程式(continuity equations for electrons and holes)。

$$\nabla^2 V = \frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0} \cdot [n(x) - p(x) - (N_D - N_A)], \quad (3.1)$$

$$\frac{dJ_n(x)}{dx} = q \cdot r(x) \cdot p(x) \cdot n(x), \quad (3.2)$$

$$\frac{dJ_p(x)}{dx} = -q \cdot r(x) \cdot p(x) \cdot n(x), \quad (3.3)$$

V 為位能、 ε_0 為真空介電係數、 ε_r 為材料相對介電係數、 N_D 與 N_A 分別為已游離的施體濃度(ionized donor concentration)和游離的受體(acceptor)濃度、 q 為基本電荷、 n 為電子密度、 p 為電洞密度、 J_n 和 J_p 分別為電子流密度與電洞流密度、 r 為 Langevin 再結合速率參數[2]。

材料增益函數使用 Fermi's golden rule approach 計算[3]，形式為：

$$g(\hbar\omega, E_{eh}) = \frac{\pi \cdot e^2 \cdot \hbar}{\varepsilon_0 \cdot c \cdot m_0^2 \cdot n} \cdot |M_i|^2 \cdot \frac{\rho^{2D}(k)}{\partial E_{eh} / \partial k} \cdot (f_c - f_v), \quad (3.4)$$

其中 E_{eh} 為電子躍遷至電洞的能量，定義為：

$$E_{eh} = E_{cn}(k, n_c) - E_{vn}(k, n_v), \quad (3.5)$$

$E_{cn}(k, n_c)$ 為電子再結合能量， $E_{vn}(k, n_v)$ 是電洞再結合能量， n_c 與 n_v 為相對應的量子數， ρ^{2D} 為 2D 的 density of states， $|M_i|^2$ 為躍遷矩陣元素(transition matrix element)， f_c 與 f_v 分別為電子和電洞的費米分佈函數。

量子井能帶結構計算也考慮了 valence band mixing effects 的 k - p 理論，包括重電洞、輕電洞與自旋軌道的分裂能帶來計算各個活性區價帶的能帶結構，更清楚的物理理論架構可參考 Crosslight 公司提供的理論架構說明手冊[2]。

3.2 參數設定

開始模擬前，須先設定相關參數。表 3.1 是 InGaAsN，InGaAlAs 與 InGaAsP 的各項參數設定[4-11]。

$In_{1-x}Ga_xAs_yN_{1-y}$ 的 band offset ratio ($\Delta E_c = 0.79 \Delta E_g$)，物理參數公式的相關二元半導體化合物依成份的線性疊加可寫成[5]：

$$P(In_{1-x}Ga_xAs_yN_{1-y}) = P(GaAs) \cdot x \cdot y + P(InAs) \cdot (1-x) \cdot y + P(GaN) \cdot x \cdot (1-y) + P(InN) \cdot (1-x) \cdot (1-y), \quad (3.6)$$

由於 $In_{1-x}Ga_xAs_yN_{1-y}$ 材料的能帶間隙 E_g 會隨著 N 與 In 的含量變化而有所彎曲，需考慮彎曲參數(bowing parameters)，其值分別是 -20 eV 與 -0.38 eV [12,13]。下列為 InGaAsN 與溫度相關能帶間隙變化公式[6]：

$$E_g(In_{1-x}Ga_xAs_yN_{1-y}) = E_g(term1) + E_g(term2) + E_g(bowing) + E_g(T), \quad (3.7)$$

$$E_g(term1) = E_g(GaAs) \cdot x \cdot y + E_g(GaN) \cdot x \cdot (1-y), \quad (3.8)$$

$$E_g(term2) = E_g(InAs) \cdot (1-x) \cdot y + E_g(InN) \cdot (1-x) \cdot (1-y), \quad (3.9)$$

$$E_g(bowing) = (-20) \cdot (GaAsN) \cdot x \cdot y \cdot (1-y) + (-0.6)(InGaAs) \cdot (1-x) \cdot x \cdot y, \quad (3.10)$$

$$E_g(T) = -5.5 \times 10^{-4} \cdot \left[\frac{T^2}{T+225} - \frac{300^2}{300+225} \right], \quad (3.11)$$

T 為絕對溫度，單位是 K。

表 3.1、InGaAsN，InGaAlAs 與 InGaAsP 的各項參數設定

Parameter	Symbol (unit)	GaAs	InAs	GaN	InN	AlAs	GaP	InP
Energy band gap (300 K)	E_g (eV)	1.424	0.355	3.42	0.77	3.0	2.78	1.347
Luttinger parameters	γ_1	6.85	20.4	2.70	3.72	3.45	4.05	4.95
	γ_2	2.10	8.30	0.76	1.26	0.68	0.49	1.65
	γ_3	2.90	9.10	1.11	1.63	1.29	1.25	2.35
Elastic stiffness constants	C_{11} (10^{11} dyn/cm ²)	11.88	8.329	28.2	18.2	1.25	14.05	10.11
	C_{12} (10^{11} dyn/cm ²)	5.38	4.526	15.9	12.5	0.53	6.203	5.61
Hydrostatic deformation potential for conduction band	a (eV)	-9.70	-6.08	-6.71	-2.65	-5.64	-7.14	-5.04
Shear deformation potential for valence band	b (eV)	-1.70	-1.80	-1.7	-1.20	-1.5	-1.80	-1.7
Electron effective mass	m_e/m_0	0.067	0.023	0.15	0.07	0.15	0.25	0.077
Heavy-hole effective mass	m_{hh}/m_0	0.50	0.40	0.80	0.80	0.79	0.67	0.60
Lattice constant	a_0 (Å)	5.6533	6.0584	4.52	4.98	5.6611	5.4505	5.8688

接著討論 band offset ratio 為 0.72 ($\Delta E_c = 0.72 \Delta E_g$) 的 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$ 材料系統。四元 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$ 半導體的物理參數公式可寫成[14]：

$$P(In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs) = P(GaAs) \cdot x + P(AlAs) \cdot y + P(InAs) \cdot (1 - x - y), \quad (3.12)$$

由於 $In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs$ 材料系統的能帶間隙 E_g 會隨著 Ga 與 Al 的含量變化而有所彎曲，需考慮不同含量時的彎曲參數，其值分別為 0.51 eV 與 0.65 eV [9]：

$$E_g(In_{1-x-y}Ga_xAl_yAs) = E_g(\text{term}) + E_g(\text{bowing}) + E_g(T), \quad (3.13)$$

$$E_g(\text{term}) = E_g(GaAs) \cdot x + E_g(AlAs) \cdot y + E_g(InAs) \cdot (1 - x - y), \quad (3.14)$$

$$E_g(\text{bowing}) = 0.51 \cdot x \cdot (x - 1) + 0.65 \cdot y \cdot (y - 1), \quad (3.15)$$

$$E_g(T) = -4.1 \times 10^{-4} \cdot \left[\frac{T^2}{T + 136} - \frac{300^2}{300 + 136} \right], \quad (3.16)$$

最後再來討論四元 band offset ratio 為 0.6 ($\Delta E_c = 0.6 \Delta E_g$) 的 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ 的材料系統。半導體 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ 的物理參數公式的相關二元半導體化合物依成份的線性疊加可寫成[8,14]：

$$P(In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}) = P(GaAs) \cdot x \cdot y + P(InAs) \cdot (1-x) \cdot y + P(GaP) \cdot x \cdot (1-y) + P(InP) \cdot (1-x) \cdot (1-y), \quad (3.17)$$

下列為 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ 能帶間隙值 E_g 與溫度相關的計算方式：

$$E_g(In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}) = E_g(\text{term}) + E_g(T), \quad (3.18)$$

$$E_g(\text{term}) = 1.35 - 0.778 \cdot y + 0.149 \cdot y^2, \quad (3.19)$$

$$E_g(T) = -4.1 \times 10^{-4} \cdot \left[\frac{T^2}{T + 136} - \frac{300^2}{300 + 136} \right], \quad (3.20)$$

詳細的材料參數可參考 PICS3D 中的 macro files [2]。

對發光於長波長的雷射來說，Auger 再結合(Auger recombination) 是模擬中須考慮的損失。Auger 再結合率可表示為[15]：

$$R_{Auger} = (C_n n + C_p p) \times (np - n_i^2), \quad (3.21)$$

其中 C_n 與 C_p 分別是電子、電洞的 Auger 係數(Auger coefficient)， n 、 p 及 n_i 分別是電子密度、電洞密度與本質載子密度(intrinsic carrier density)。本文 PICS3D 模擬的 Auger 係數設為 $C = C_n = C_p$ ，其值會隨著溫度的變化而改變，公式如下[3,15]：

$$C(T) = C_0(T_0) \times \exp\left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (3.22)$$

$C_0(T_0)$ 是室溫下的 Auger 係數值， k 為波茲曼常數(Boltzmann constant)， E_A 為 Auger 過程中電洞所處的能階至價帶最高點的能階差， T 與 T_0 分別為絕對溫度與室溫，單位是 K。InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 之 E_A 分別設定為 60 meV [4]、100 meV [15] 與 160 meV [16]，室溫為 300 K 時 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 的 Auger 係數 C_0 分別設定為 $9 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ 、 $5 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ 與 $2.5 \times 10^{-40} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ [17]。

表 3.2 為實驗文獻中關於 InGaAs 與 InGaAsN 所使用 Auger 再結合率與內部損失(internal loss)的範圍值。Auger 再結合率與內部損失是模擬時可調整的自由參數，但是須在合理的範圍調整適當的參數。InGaAs、InGaAsN 在不同的製程或 InGaAsN 於不同的 N 含量等條件下，其 Auger 再結合率與內部損失值亦有差異[18-21]。文獻中提及，InGaAs 的 Auger 再結合率的範圍值範圍為 4×10^{-41} 至 $8 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ [18,21]，而 InGaAsN 的 Auger 再結合率可從 3×10^{-41} 到 $8 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ [17,19]。為了使模擬與實驗結果相近，本論文的 Auger 再結合率與內部損失分別設定為 $9 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ 與 990 m^{-1} 。

但實際的長晶情況中，InGaAsN 量子井中的 N 含量愈多時其內部損失會增加，晶體品質也可能會因為 N 含量的增加而受影響[22,23]。本論文於第三章與第四章的模擬部份，沒有將 N 含量增加時內部損失也隨之增加的條件考慮進去，主要是因為內部損失是於實驗後量測到的值。

我們於模擬中無法得知確切的內部損失值，所以只將內部損失值設定在合理的範圍。

表 3.2、文獻中 InGaAs 與 InGaAsN 所用的 Auger 再結合率與內部損失的範圍值

活性區	Auger 再結合率 (m^6s^{-1})	內部損失(m^{-1})	參考文獻
$In_{0.40}Ga_{0.60}As_{0.995}N_{0.005}$	---	900	L. Xu <i>et al.</i> [11]
$In_{0.34}Ga_{0.66}As_{0.985}N_{0.015}$	5×10^{-41}	---	J. Yong <i>et al.</i> [17]
$In_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.985}N_{0.015}$	---	1000	N. Tansu <i>et al.</i> [18]
$In_{0.36}Ga_{0.64}As_{0.983}N_{0.017}$	8×10^{-41}	1000	R. Fehse <i>et al.</i> [19]
$In_{0.33}Ga_{0.67}As_{0.980}N_{0.020}$	---	1380	J. Gupta <i>et al.</i> [24]
$In_{0.35}Ga_{0.65}As$	---	500	N. Tansu <i>et al.</i> [18]
$In_{0.45}Ga_{0.55}As$	---	1613	W. Choi <i>et al.</i> [20]
$In_{0.40}Ga_{0.60}As$	4×10^{-41}	---	S. Ghosh <i>et al.</i> [21]

3.3 不同材料之活性層比較

由於 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 的 band offset ratio 都不相同，此三種材料會因 band offset ratio 的不同而在表現上會有所差異。在這一小節中，將以模擬觀點來比較三種不同活性層材料之間的表現。

圖 3.1 為發光在 1.3 μm 、室溫 300 K 且其量子井寬度都為 6 nm 之 InGaAsN/GaAs [25]、InGaAlAs/InP [26] 與 InGaAsP/InP [27] 的活性層材料增益對注入載子濃度圖。圖 3.1 可看出 InGaAsP 的透明載子密度明顯地比 InGaAsN 與 InGaAlAs 來的大，是因為 InGaAsP 的 conduction band offset ratio 比其它兩者材料小，使得 InGaAsP 的增益表現比其他兩者材料來的差[17]。

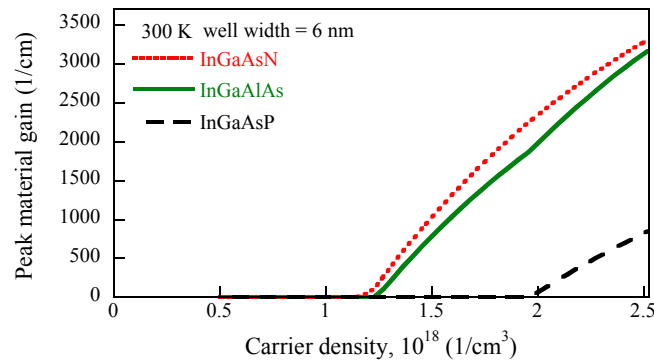


圖 3.1、300 K 下 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 的增益對注入載子濃度圖

圖 3.2 至圖 3.4 分別是 300 K、注入載子密度為 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 時 InGaAsN/GaAs、InGaAlAs/InP 與 InGaAsP/InP 之價帶次能帶圖。在 PICS3D 模擬軟體，以沒有受到形變的價電帶最高點為能量零點(0 eV)。

圖 3.2 至圖 3.4 中可看出，InGaAsP 材料作為活性區時的價電帶次能帶數目比 InGaAsN 與 InGaAsP 來的多，表示 InGaAsP 量子井需要更多載子注入才可達到居量反轉，使得 InGaAsP 活性區的透明載子密度比 InGaAsN 與 InGaAlAs 活性區來的大[14,17]。

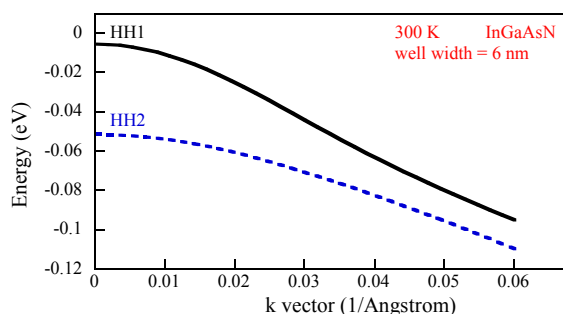


圖 3.2、300 K 注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ InGaAsN/GaAs 價帶次能帶圖

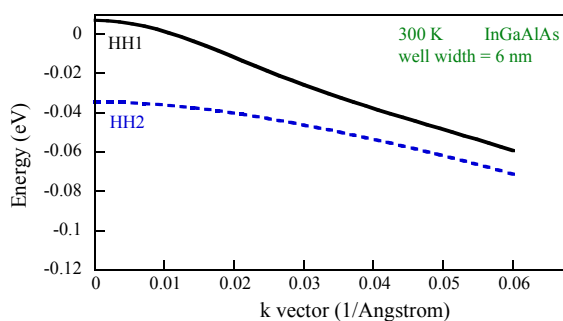


圖 3.3、300 K 注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ InGaAlAs/InP 價帶次能帶圖

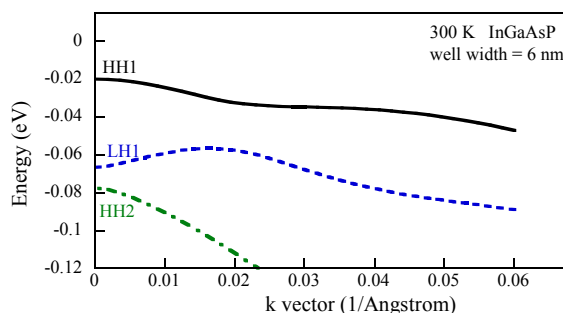


圖 3.4、300 K 注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ InGaAsP/InP 價帶次能帶圖

圖 3.5 是 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 活性區井寬為 6 nm 之透明載子密度對溫度變化圖。圖 3.5 可看出，InGaAsP 的透明載子密度值最高、InGaAsN 有最低的透明載子密度值。這是因為 InGaAsN 有比 InGaAlAs 與 InGaAsP 材料還要大的 band offset ratio，縱使高溫下的操作，電子侷限也比 InGaAlAs 與 InGaAsP 還要好而比較不容易產生電子溢流，因此 InGaAsN 活性區只須注入比較少的載子即可貢獻至發光，相對地降低了 InGaAsN 的透明載子密度，使得 InGaAsN 有最小的透明載子密度。

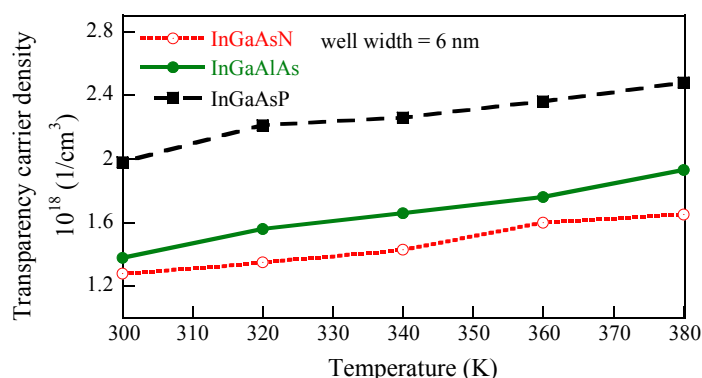


圖 3.5、InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 量子井為 6 nm 時之透明載子密度對溫度變化圖

上述的討論比較了 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 三種長波長材料，由於 InGaAsN 的 band offset ratio 比其他兩者材料來的大，高溫下的操作比其他兩者材料來的佳，也使得 InGaAsN 有最小的透明載子密度。下一個小節我將以 InGaAsN 材料作為活性層，探討 InGaAsN 活性層於不同 N 含量的增益表現。

3.4 氮砷化銦鎵活性層中之氮含量比較

在 3.4 節將使用 InGaAsN 活性層探討不同 N 含量時的增益表現。本節以 Nishiyama 等學者的活性區結構為依據，其發光波長為 1.12 μm ，活性區是 7 nm 的 3 個 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 量子井，操作溫度為 300 K，輸入載子是 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ [28]。為了將原始結構的發光波長調至 1.3 μm ，會於原始結構 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 中摻入 0.014 的 N 含量成為四元的 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}_{0.986}\text{N}_{0.014}$ 。之後再變化活性區中的 N 含量，將 InGaAsN 活性區的 N 含量由 0.014 遞減至 0.011、N 含量由 0.014 增加至 0.020，此時 In 與 Ga 的含量也會隨著改變以確保發光波長都為 1.3 μm 。

InGaAsN 活性區中的 N 含量減少時其形變量會增加，為了避免活性區的形變量過大，N 含量只遞減至 0.011；當 N 含量為 0.011 時，活性區的形變量已達 2.25%。下表 3.3 為 1.3 μm 之 InGaAsN 量子井在不同 N 含量時的形變與臨界厚度值表。由表 3.3 可看出，當 N 含量減少時，壓縮形變會增加、臨界厚度呈遞減狀態。形變與臨界厚度的算法，可回顧第一章的 1.4 節。

本章節的 InGaAsN 增益探討，主要是討論量子井中 N 含量增加時的所呈現的趨勢；模擬時不同 N 含量所使用的 Auger 再結合率與內部損失分別設為 $9 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ 與 990 m^{-1} 。但實際的長晶情況中，N 含量愈多時的內部損失會增加，晶體品質也可能會因為 N 含量的增加而有變差的現象。

表 3.3、1.3 μm InGaAsN 量子井在不同 N 含量下的形變與臨界厚度值

Well material	Strain (%)	Critical thickness (nm)
$\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{As}_{0.980}\text{N}_{0.020}$	0.81	195.6
$\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}_{0.983}\text{N}_{0.017}$	1.43	48.4
$\text{In}_{0.29}\text{Ga}_{0.71}\text{As}_{0.985}\text{N}_{0.015}$	1.71	29.0
$\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}_{0.986}\text{N}_{0.014}$	1.83	20.9
$\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}_{0.987}\text{N}_{0.013}$	1.94	17.1
$\text{In}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{As}_{0.988}\text{N}_{0.012}$	2.12	14.0
$\text{In}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{As}_{0.989}\text{N}_{0.011}$	2.25	11.6

圖 3.6 至圖 3.9 為 InGaAsN 量子井中之 N 含量分別為 0.020、0.017、0.015、0.014、0.013、0.012 與 0.011 時的價帶次能帶圖。當 N 含量從 0.020 減少至 0.011 時，壓縮形變從 0.81% 增加至 2.25%。由圖 3.6 至圖 3.9 可發現，當壓縮形變逐漸增加時，重電洞能帶與輕電洞能帶會逐漸分裂開來、重電洞的能帶漸漸往上提升，價電帶受侷限的能階數目減少了，重電洞能帶主宰了電洞的結合。這是因為隨著壓縮形變的增加，重電洞能帶會逐漸向上提升、價電帶所受的侷限能階會減少，所以降低了價電帶的 density of states，此時只須注入較少的載子就可使活性區產生增益，也因而減少了透明載子密度[3]。

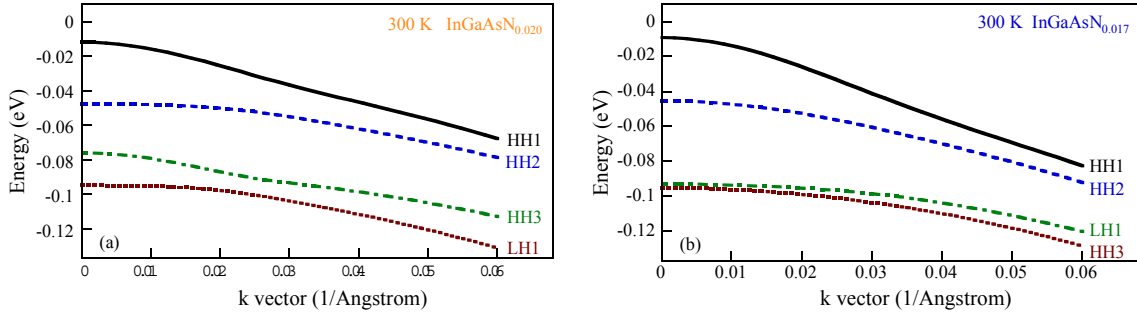


圖 3.6、InGaAsN 量子井之載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量分別為 (a) 0.020 (b) 0.017 時的價帶次能帶圖

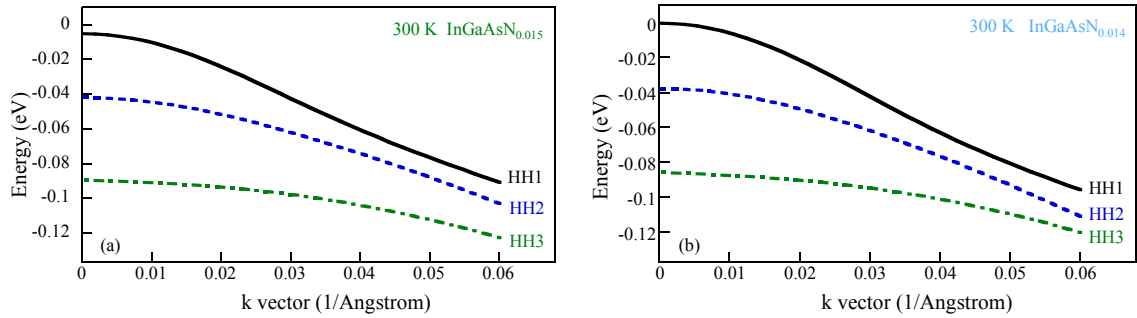


圖 3.7、InGaAsN 量子井之載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量分別為 (a) 0.015 (b) 0.014 時的價帶次能帶圖

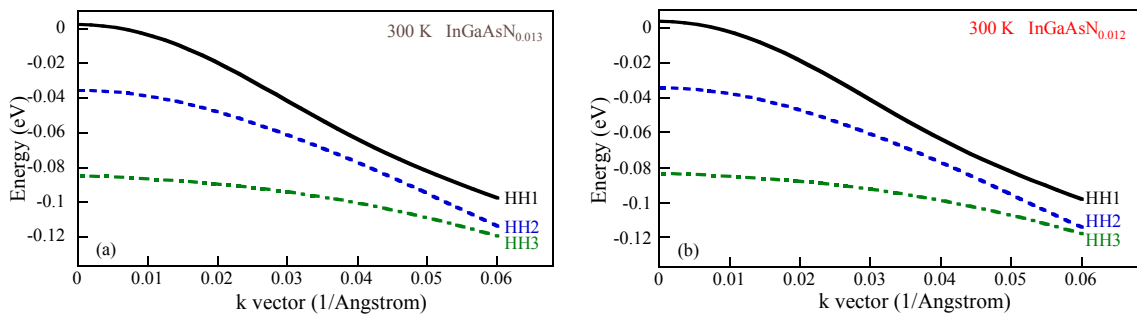


圖 3.8、InGaAsN 量子井之載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量分別為 (a) 0.013 (b) 0.012 時的價帶次能帶圖

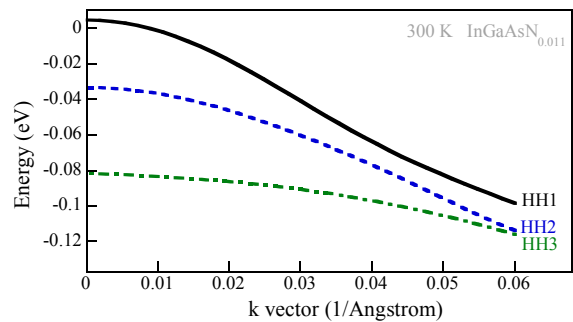


圖 3.9、InGaAsN 量子井之載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量為 0.011 時的價帶次能帶圖

圖 3.10 與圖 3.11 為 InGaAsN 量子井在 300 K 與 380 K 時，不同 N 含量的增益對載子密度圖。圖 3.10 與圖 3.11 可看出，當 N 含量減少、壓縮形變增加時，透明載子密度會逐漸下降，所產生的增益也會逐漸增加，且當 N 含量減少至 0.012 時增益已呈飽和趨勢。

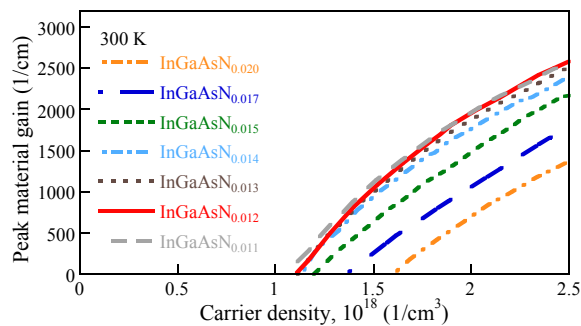


圖 3.10、InGaAsN 在 300 K 時不同 N 含量的增益對載子密度圖

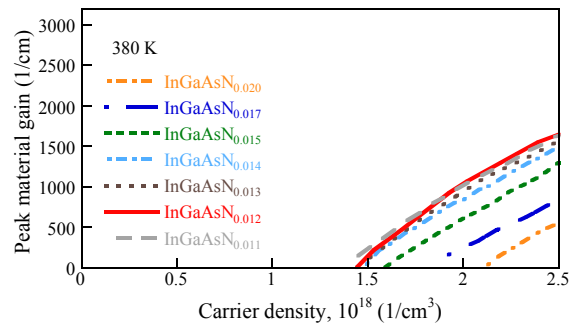


圖 3.11、380 K InGaAsN 量子井於不同 N 含量的增益對載子密度圖

圖 3.12 為 300 K 下注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、InGaAsN 量子井於不同 N 含量的增益對波長關係圖。圖 3.12 中可看出 N 含量愈少，增益愈高；但是當 InGaAsN 量子井的 N 含量達 0.012、壓縮形變為 2.12% 時增益已幾近飽和。由圖 3.12 的趨勢可發現，N 含量減少時增益會增加，其形變量也會隨之增加。模擬結果得知，適當的壓縮形變可改善 InGaAsN 活性區之增益與透明載子密度，但是當 N 含量 0.012 時的形變值已達 2.12%，過大的形變量可能會影響晶體品質。基於形變的考量，InGaAsN 活性區中 N 含量為 0.012 是較適合的選擇。

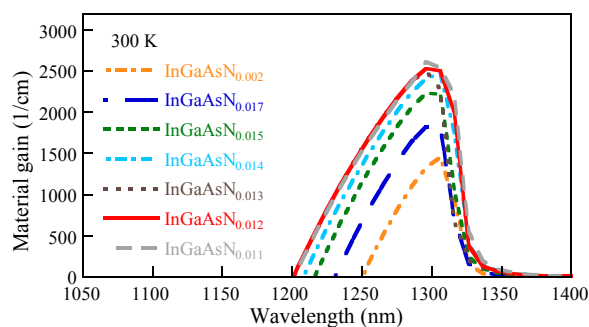


圖 3.12、300 K 下注入載子濃度 $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 時 InGaAsN 量子井於不同 N 含量的增益對波長關係圖

3.5 結論

本章節蒐集 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 相關的參數，列出能帶間隙、Auger 係數與形變等公式，且以模擬觀點比較發光於 1.3 μm InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 活性區的增益與透明載子密度。由於 InGaAsN 有比 InGaAlAs 與 InGaAsP 材料還要大的 band offset ratio，縱使高溫下的操作，也較不容易產生電子溢流，因此 InGaAsN 活性區只須注入比較少的載子即可貢獻至發光，相對地降低了透明載子密度，使得 InGaAsN 有最小的透明載子密度

接著使用 InGaAsN 材料、考慮活性區的形變量，探討 InGaAsN 活性區於不同 N 含量時的特性，包含價帶次能帶結構、透明載子密度及增益頻譜；量子井之 N 含量從 0.0020 調降至 0.011 時，壓縮形變增加、透明載子密度會下降。由模擬結果得知，適當的壓縮形變可使 InGaAsN 活性區的相關特性獲得改善，但是當 N 含量 0.012 時的形變已達 2.12%，考慮實際長晶的情況，過大的形變量可能會影響晶體品質。因此模擬結果中，InGaAsN 活性區之 N 含量為 0.012 時是較適合的選擇。

參考文獻

- [1] 史光國編著, “現代半導體發光及雷射二極體材料技術”, 全華科技圖書股份有限公司, 2002.
- [2] PICS3D Version 2006.11 by Crosslight Software, Inc., Burnaby, Canada. (<http://www.crosslight.com>)
- [3] P. S. Zory, Jr., *Quantum Well Lasers*, Academic Press, San Diego, 1993.
- [4] I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. R. Mohan, “Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys,” *J. Appl. Phys.*, vol. 89, pp. 5815–5875, 2001.
- [5] G. Leibiger, V. Gottschalch, and M. Schubert, “Optical function, photon properties, and composition of InGaAsN single layers derived from far- and near-infrared spectroscopic ellipsometry,” *J. Appl. Phys.*, vol. 90, pp. 5951–5958, 2001.
- [6] S. A. Choulis, T. J. C. Hosea, S. Tomić, M. K. Saadi, A. R. Adams, and E. P. O’Reilly, “Electronic structure of $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x/\text{GaAs}$ multiple quantum wells in the dilute-N regime from pressure and $k\cdot p$ studies,” *Phys. Rev. B.*, vol. 66, pp. 165321-1–165321-9, 2002.
- [7] I. Vurgaftman and J. R. Meyer, “Band parameters for nitrogen-containing semiconductors,” *J. Appl. Phys.*, vol. 94, pp. 3675–3696, 2003.

- [8] 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.*, vol. 35, pp. 771–782, 1999.
- [9] M. N. Akram, C. Silfvenius, O. Kjebon, and R. Schatz, "Design optimization of InGaAsP–InGaAlAs 1.55 μm strain-compensated MQW lasers for direct modulation applications," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 615–625, 2004.
- [10] Y. K. Kuo, S. H. Yen, M. W. Yao, M. L. Chen, and B. T. Liou, "Numerical study on gain and optical properties of AlGaInAs, InGaNAs, and InGaAsP material systems for 1.3- μm semiconductor lasers," *Opt. Commun.*, vol. 275, pp. 156–164, 2007.
- [11] L. Xu, D. Patel, C. S. Menoni, J. Yeh, L. J. Mawst, and N. Tansu, "Optical determination of the electron effective mass of strain compensated $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.995}\text{N}_{0.005}/\text{GaAs}$ single quantum well," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 171112-1–171112-3, 2006.
- [12] R. Chtourou, F. Bousbih, S. B. Bouzid, F. F. Charfi, J. C. Harmand, G. Ungaro, and L. Largeau, "Effect of nitrogen and temperature on the electronic and structure of $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ alloys," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 2075–2077, 2002.
- [13] S. B. Bouzid, F. Bousbih, R. Chtourou, J. C. Harmand, and P. Voisin, "Photocurrent spectroscopy of GaInNAs and GaInNAs(Sb) strained

- quantum wells grown by molecular beam epitaxy,” *Sens. Actuator A-Phys.*, vol. 113, pp. 365–369, 2004.
- [14] G. Lin and C. P. Lee, “Comparison of 1300 nm quantum well lasers using different material systems,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 34, pp. 1191–1200, 2002.
- [15] 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- μm AlGaInAs–InP multiple-quantum-well lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 7, pp. 340–349, 2001.
- [16] J. Piprek, *Semiconductor optoelectronic devices*, Academic Press, San Diego, California, USA, 2003.
- [17] J. C. L. Yong, J. M. Rorison, and I. H. White, “1.3- μm quantum-well InGaAsP, AlGaInAs, and InGaAsN laser material gain: a theoretical study,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, pp. 1553–1564, 2002.
- [18] N. Tansu, Y. Chang, T. Takeuchi, D. Bour, S. Corzine, M. Tan, and L. Mawst, “Temperature analysis and characteristics of highly strained InGaAs–GaAsP–GaAs ($\lambda > 1.17 \mu\text{m}$) quantum-well lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, pp. 640–651, 2002.
- [19] R. Fehse, S. Tomic', A. Adams, S. Sweeney, E. O'Reilly, A. Andreev, and H. Riechert, “A quantitative study of radiative, Auger, and defect related recombination processes in 1.3- μm GaInNAs-based quantum-well lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 8,

pp.801–810, 2002.

- [20] W. Choi, P. Dapkus, and J. Jewell, “1.2- μm GaAsP/InGaAs strain compensated single-quantum-well diode laser on GaAs using metal–organic chemical vapor deposition,” *IEEE Photon. Technol.*, vol 12, pp 1572–1574, 1999.
- [21] S. Ghosh, P. Bhattacharya, E. Stoner, and J. Singh, “Temperature-dependent measurement of Auger recombination in self-organized InGaAs/GaAs quantum dots,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, pp. 722–724, 2001.
- [22] S. Sanorpim, F. Nakajima, W. Ono, R. Katayama, and K. Onabe, “High-nitrogen-content InGaAsN films on GaAs grown by metalorganic vapor phase epitaxy with TBAs and DMHy,” *Phys. Stat. Sol.*, vol. 7, pp. 1612–1617, 2006.
- [23] R. S. Williams, W. M. McGee, M. J. Ashwin, T. S. Jones, E. Clarke, P. Stavrinou, J. Zhang, S. Tomić, and C. P. A. Mulcahy, “Wavelength control across the near IR spectrum with GaInNAs,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 032109-1–032109-3, 2007.
- [24] J. Gupta, P. Barrios, G. Aers, R. Williams, J. Ramsey, and Z. Wasilewski, “Properties of 1.3 μm InGaNAs laser material grown by MBE using a N_2/Ar RF plasma,” *Solid-State Electr.*, vol. 47, pp. 399–405, 2003.
- [25] C. S. Peng, N. Laine, J. Konttinen, S. Karirinne, T. Jouhti, and M.

- Pessa, “High-performance single mode InGaNAs/GaAs laser,” *Electron. Lett.*, vol. 40, pp. 604–605, 2004.
- [26] F. Robert, A. C. Bryce, J. H. Marsh, A. J. SpringThorpe, and J. K. White, “Passive mode locking of InAlGaAs 1.3- μm strained quantum wells extended cavity laser fabricated by quantum-well intermixing,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 374–376, 2004.
- [27] B. Gönül and M. Oduncuoğlu, “A theoretical comparison of the pressure dependence of the threshold current of phosphorus-, aluminium- and nitrogen-based 1.3 μm lasers,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 23–32, 2004.
- [28] N. Nishiyama, M. Arai, S. Shinada, M. Azuchi, T. Miyamoto, F. Koyama, and K. Iga, “Highly strained GaInAs–GaAs quantum-well vertical-cavity surface-emitting laser on GaAs (311)B substrate for stable polarization operation,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 7, pp. 242–248, 2001.

第四章 氮砷化銦鎵面射型雷射

4.1 前言

第三章探討不同 N 含量時 InGaAsN 的增益影響，得知於活性區加入適當的形變，可以降低 density of states、使透明載子密度下降，材料增益特性也會改變。

2006、2007 年已有文獻顯示，InGaAsN 量子井中的 N 含量分別以 MOVPE 與 MBE 法將 N 增加至 3.6% 及 5%，雖然已有實驗成功地將 N 含量提升，但較高的 N 含量不僅會影響晶體品質，發光強度也會降低 [1,2]。本章節將探討 InGaAsN 量子井中不同 N 含量對 1.3 μm InGaAsN 面射型雷射元件效能的影響，並找出 InGaAsN 量子井中 N 含量的最佳化。

4.1.1 模擬元件之結構

第四章所使用的結構，是參考 Nishiyama 等人成長的面射型雷射 [3]。基板為 GaAs，上層為 35 對的 n-type GaAs-Al_{0.8}Ga_{0.2}As DBRs，接著是 0.102 μm 的 n-type GaAs spacer layer，活性區是 3 個 7 nm 的 In_{0.32}Ga_{0.68}As 量子井，兩旁夾著 20 nm 的 GaAs 位障層，再加上 0.102 μm 的 p-type GaAs spacer layer 與 21 對的 p-type GaAs-Al_{0.8}Ga_{0.2}As DBRs，發光波長為 1.12 μm 。

本章節於不同N含量之情況下所設定的 Auger 再結合率與內部損失都為固定值，分別是 $9 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ 與 990 m^{-1} 。然而以實際的長晶情況而言，N 含量愈高晶體的缺陷會愈多、發光強度也會愈差[1,2,4]，其 Auger 再結合率與內部損失值也會因為 N 含量的增加而提高。

圖 4.1 為實驗與模擬之輸出功率對照圖，圖 4.1 顯示模擬值與實驗值有很相近的結果。

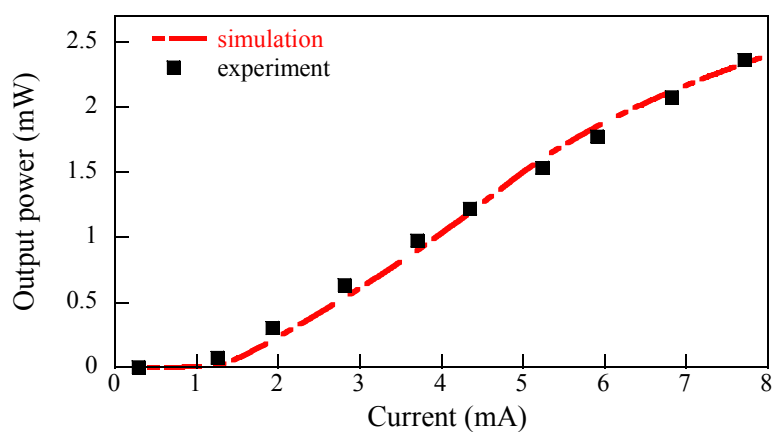


圖 4.1、實驗與模擬之輸出功率對照圖

4.2 氮砷化銦鎵量子井中氮含量不同對性能之影響

此章節的模擬研究中，為了延伸發光波長至光纖通訊常用的波段（1.3 μm ），需將 N 摻入至原始結構的 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 量子井中；量子井中 In 與 Ga 的含量不會改變，將 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}_{0.971}\text{N}_{0.029}$ 量子井取代原始的 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 量子井。

之後，為了比較量子井 N 含量多寡對元件效能的影響，N 含量從 0.029 減少至 0.022、N 含量從 0.029 增加至 0.035，此時 In 與 Ga 也將隨之改變，以確保發光波長都固定在 1.3 μm 。N 含量減少至 0.022 與 N 含量增加至 0.035 後不再遞減或增加其含量，是因為 N 含量減少，形變量會增加，愈多的 N 含量長晶品質會受到影響。表 4.1 是 1.3 μm 之 InGaAsN 量子井於不同 N 含量時所對應的形變（Strain）。

表 4.1、1.3 μm 之 InGaAsN 量子井於不同 N 含量時所對應的形變

Well material	Strain (%)
$\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}_{0.965}\text{N}_{0.035}$	1.29
$\text{In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}_{0.968}\text{N}_{0.032}$	1.49
$\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}_{0.971}\text{N}_{0.029}$	1.66
$\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}_{0.974}\text{N}_{0.026}$	1.80
$\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.978}\text{N}_{0.022}$	2.02

一般而言，形變增加時的臨界厚度會隨之減少。原始結構的 $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{As}$ 量子井厚度為 7 nm；表 4.1 中 1.3 μm 之 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.978}\text{N}_{0.022}$ 量子井經計算後的臨界厚度為 23 nm，表示表 4.1 中每個不同 N 含量的 InGaAsN 量子井厚度都在安全範圍之內。

圖 4.2 為不同 N 含量所對應的臨界電流圖。當 N 含量為 0.022 時臨界電流為 1.09 mA，N 含量增至 0.035 時其臨界電流為 3.90 mA。我將分析 N 含量為 0.022 與 0.035 時的情況。

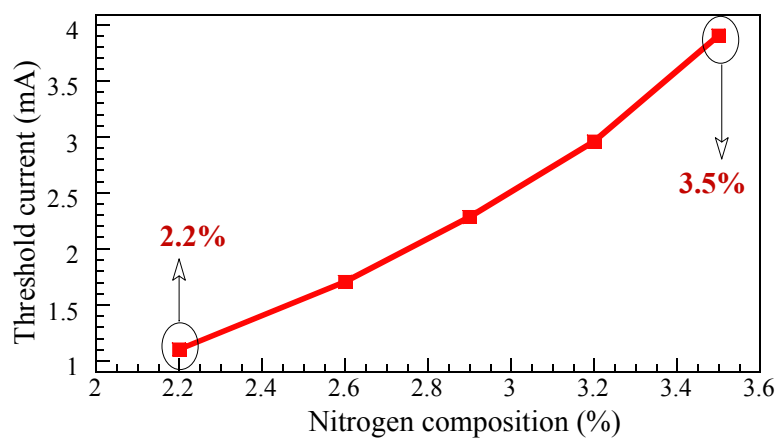


圖 4.2、發光於 1.3 μm 之不同 N 含量所對應的臨界電流

4.2.1 氮含量為 0.022 與 0.035 時之情況

由於 N 含量為 0.022 與 0.035 時的臨界電流分別為 2.95 及 3.90 mA，所以注入電流將取 4.10 mA 來觀察 N 含量為 0.022 與 0.035 時的性能。圖 4.3 是 300 K 下注入電流 4.1 mA、N 含量為 0.022 與 0.035 時的增益對注入載子濃度圖。圖 4.3 很明顯地看出當 N 含量為 0.022 時，透明載子密度比 N 含量 0.035 時小很多、增益表現比 N 含量 0.022 時來得好。這是因為 N 含量為 0.022 的形變比 N 含量 0.035 之形變來的大，使得價電帶的重電洞與輕電洞能階會因形變增加而分離、價電帶所受的侷限能階會減少，可降低價電帶的 density of states，因此 N 含量為 0.022 有比較小的透明載子密度。

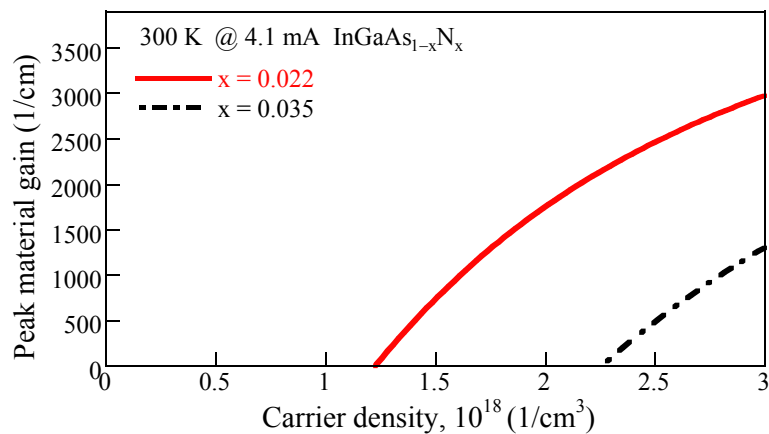


圖 4.3、N 含量為 0.022 與 0.035 時的增益對注入載子濃度圖

圖 4.4 為 InGaAsN 量子井之載子濃度為 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量分別為(a) 0.022 與(b) 0.035 時的價電帶能帶圖。圖 4.4 (a)中可看出 N 含量

為 0.022 時有較少的能階數目；是因為 N 含量減少時形變量會增加，重電洞與輕電洞的能階會因形變增加而逐漸分離，減少了價電帶的電洞侷限能階數目，因而降低了 density of states。此時只需較少的載子就可以達到居量反轉及產生增益，因此較少的 N 含量可以降低透明載子密度與臨界電流[4]。

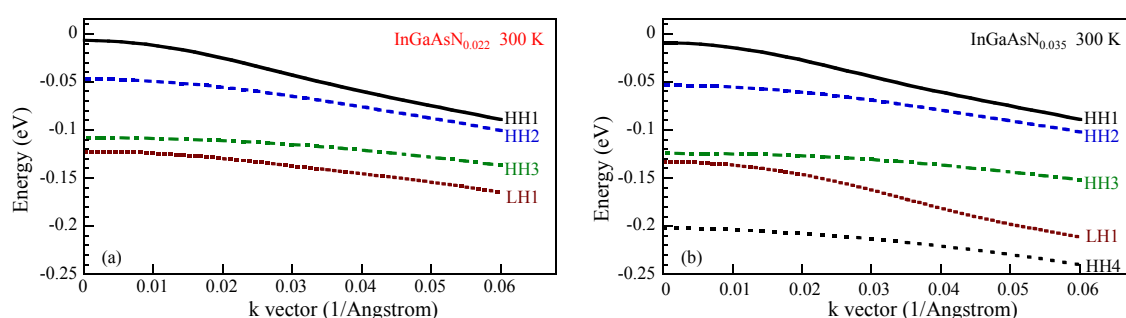


圖 4.4 InGaAsN 量子井之載子濃度 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、井中 N 含量分別為(a) 0.022 (b) 0.035 時的價帶次能帶圖

圖 4.5 是注入電流 4.1 mA、InGaAsN 量子井中 N 含量分別為(a) 0.022 與(b) 0.035 時的能帶圖。由圖 4.5 (b)的導電帶的準費米能階可看出，N 含量 0.035 時量子井中的載子分佈很不均勻，第三個量子井與第一個量子井內的電子、電洞差異尤其是明顯。

圖 4.6 是 InGaAsN 量子井中 N 含量分別為(a) 0.022 與(b) 0.035 時的載子濃度分佈圖；由圖 4.6 (a)與(b)都可發現，電子、電洞都聚積在 n-side，電子聚積尤其是明顯，與圖 4.5 (a)與(b)的能帶分佈圖相對應。圖 4.6 (a) N 含量為 0.029 時載子聚積的情況更是明顯，顯示 N 含量越多會使活性區的載子分佈愈不均勻。可預測的是，隨著活性區中 N 含量減

少，可使量子井內之載子分佈呈現較均勻的狀態，因此降低了臨界電流。

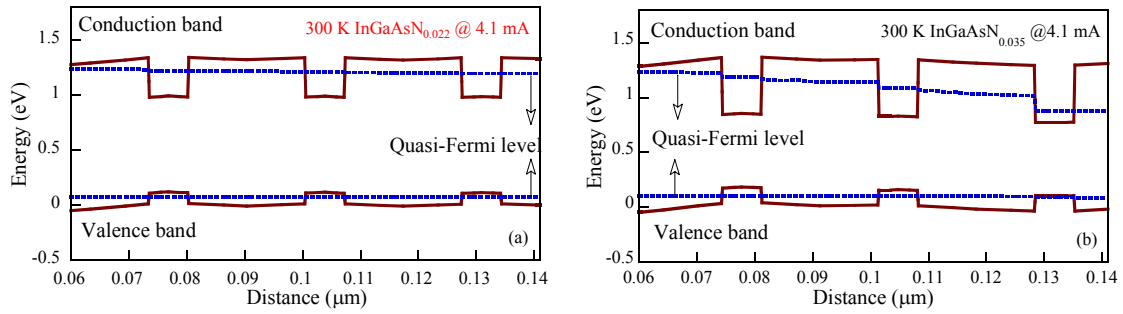


圖 4.5 InGaAsN 量子井中 N 含量分別為(a) 0.022 與(b) 0.035 時的能帶圖

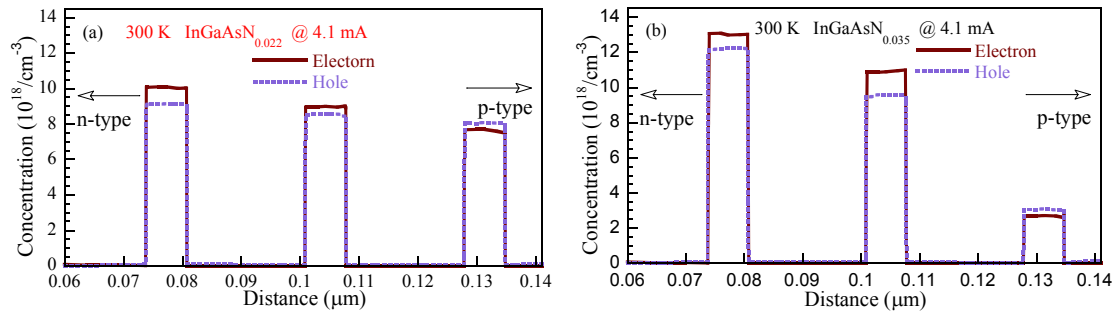


圖 4.6 InGaAsN 量子井中 N 含量分別為(a) 0.022 與(b) 0.035 時的載子濃度分佈圖

圖 4.7 是 InGaAsN 量子井中 N 含量分別為 0.022 與 0.035 時的受激再結合圖。由圖 4.7 可發現，量子井中 N 含量為 0.035 時的受激再結合率比 N 含量 0.022 時小很多，是由於較多的 N 含量會使載子分佈呈現不均勻的狀態，使得電荷載子的注入以及量子井中載子的分佈受到影響，因此元件受激放射的能力變差，降低了雷射性能。

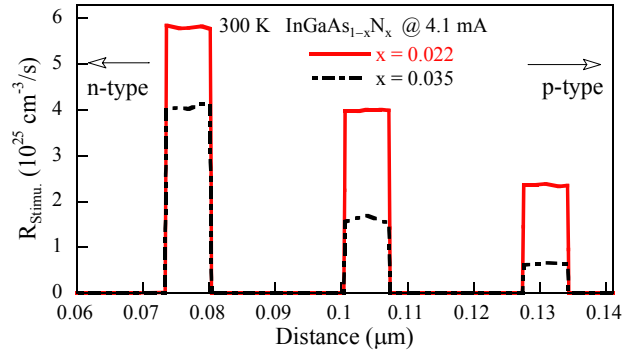


圖 4.7、InGaAsN 量子井中 N 含量分別為 0.022 與 0.035 時的受激再結合圖

圖 4.8 為 InGaAsN 量子井中 N 含量分別為 0.022 與 0.035 時的 Auger 再結合率圖。由圖 4.8 中可看出，N 含量 0.035 時比 N 含量為 0.022 之 Auger 再結合率大很多，是因為較多的 N 含量會使量子井中存在著無法與電洞有效結合的電子，雷射開始產生時的增益需先彌補 Auger 再結合的損失，增加了非輻射再結合的機會，因此 N 含量增加時臨界電流也會增加。

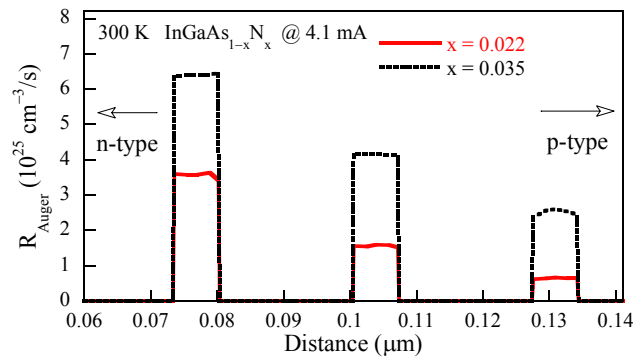


圖 4.8 InGaAsN 量子井之 N 含量分別為 0.022 與 0.035 時的 Auger 再結合率圖

上述因素使得 N 含量為 0.035 的效能變差。當量子井中 N 含量愈多，載子的分佈愈不均勻、density of states 會增加，會使量子井中的受激再結合率受到影響，量子井中的載子無法有效產生輻射再結合，導致 Auger 再結合的機率增加。元件開始產生雷射光之前需要先彌補 Auger 再結合的非輻射再結合損失，也因此增加了元件的臨界電流。

4.3 結論

本章節分析 1.3 μm InGaAsN 面射型雷射，其量子井於不同 N 含量下的效能表現。模擬結果顯示，InGaAsN 面射型雷射量子井中適當的 N 含量可使載子分佈呈現較均勻的狀態、增加電子電洞結合的機會，因而提升了元件效能。量子井中 N 含量為 0.022 與 0.035 時的元件性能分析發現，N 含量為 0.022 時有最佳的雷射性能輸出，可使元件有最好的發光效率。

参考文献

- [1] S. Sanorpim, F. Nakajima, W. Ono, R. Katayama, and K. Onabe, “High-nitrogen-content InGaAsN films on GaAs grown by metalorganic vapor phase epitaxy with TBAs and DMHy,” *Phys. Stat. Sol.*, vol. 7, pp. 1612–1617, 2006.
- [2] R. S. Williams, W. M. McGee, M. J. Ashwin, T. S. Jones, E. Clarke, P. Stavrinou, J. Zhang, S. Tomić, and C. P. A. Mulcahy, “Wavelength control across the near IR spectrum with GaInNAs,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 032109-1–032109-3, 2007.
- [3] N. Nishiyama, M. Arai, S. Shinada, M. Azuchi, T. Miyamoto, F. Koyama, and K. Iga, “Highly strained GaInAs–GaAs quantum-well vertical-cavity surface-emitting laser on GaAs (311)B substrate for stable polarization operation,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 7, pp. 242–248, 2001.
- [4] W. M. McGee, P. A. Bone, R. S. Williams, and T. S. Jones, “Atomic scale morphology of thin GaNAs films: Effects of nitrogen content and growth temperature,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, pp. 181905-1–181905-3, 2005.

第五章 結論

自 1996 年 Kondow 等人發現這項應用於長程光纖通訊的 InGaAsN 光源材料後，已有相當多的研究群投入相關研究。InGaAsN 材料的優點之一是可以利用 GaAs 做為基板，使之成為 type-I 的雙異質界面結構而得到較深的量子井，使得 InGaAsN 的 band offset ratio 比 InGaAlAs 與 InGaAsP 材料來得大，即使 InGaAsN 材料在高溫操作也較不易產生電子溢流，高溫表現比其他材料來得優異。

第一章中先對三大光纖通訊材料 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 做概略的比較，因 InGaAsN 有比其他兩種材料還大的 band offset ratio，使得 InGaAsN 性能表現較傑出。由於 InGaAsN 材料是由四個特性相差很多的元素組成，具有許多的物理特性，這些參數的特性都已經於第一章詳細地介紹。

第二章比較 VCSEL 與傳統 EEL 之間的差異、使用矩陣法介紹布拉格反射鏡的工作原理、介紹 DBR 材料為半導體或介電質材料時兩者之間的差異、簡介 VCSEL 四大結構的特性等，且證實製作以三元 InGaAs 於活性區加入 N 含量成為 InGaAsN 的可行性。VCSEL 可節省許多組裝成本，包括後段製程、量測、封裝等方面，就某些特性而言，如臨界電流、圓形發光束、高速調變特性及單模態發光等，均比傳統 EEL 優異。但由於 VCSEL 共振腔較短，元件體積小，電阻所產生的熱無法及時排出而造成元件效能變差，所以熱效應是極需被改善的問題。

第三章蒐集 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 相關的參數，列出能

帶間隙、Auger 係數與形變等公式，且以模擬觀點探討發光波長於 $1.3\ \mu\text{m}$ 的 InGaAsN、InGaAlAs 與 InGaAsP 的活性層表現；由於 InGaAsN 有較大的 band offset ratio，縱使高溫下的操作也比較不容易產生電子溢流，因此 InGaAsN 活性區只須注入較少的載子即可貢獻至發光，相對地降低了透明載子密度，使得 InGaAsN 的透明載子密度最小。接著使用 InGaAsN 材料考量活性區的形變，探討 InGaAsN 活性區於不同 N 含量時的特性，包含價電帶次能帶結構、增益頻譜及透明載子密度。模擬結果顯示，InGaAsN 量子井之透明載子密度與最大增益值將隨量子井壓縮形變的增加而獲得改善。但是考慮到實際長晶的情況，較高形變的量子井會影響晶體品質。因此，根據模擬結果，InGaAsN 活性區中的 N 含量為 0.012 時是較適合的選擇。

第四章分析 $1.3\ \mu\text{m}$ InGaAsN 面射型雷射，其量子井於不同 N 含量的效能表現。模擬結果顯示，InGaAsN 面射型雷射量子井中適量的 N 含量可使載子分佈呈現較均勻的狀態、增加電子電洞結合的機會，因而提升元件效能。量子井中 N 含量為 0.022 與 0.035 時的元件性能分析發現，N 含量為 0.022 時有最佳的雷射性能輸出，可使元件有最好的發光效率。

附錄 A 論文發表清單

- (1) Ming-Wei Yao (姚銘偉), Chien-Fang Chiu (邱千芳), Bo-Ting Liou (劉柏挺), and Yen-Kuang Kuo (郭艷光), 2007, “Numerical simulation of InGaAsN semiconductor lasers with GaAsN and GaAsP barriers”, 2007 年中華民國物理年會, paper PE-76. (註：本論文榮獲2007年「中華民國物理年會最佳壁報論文獎」)
- (2) 陳俊榮、李忠憲、邱千芳、郭艷光、劉柏挺, 2005, “Strained InGaAlAs/AlGaAs active layers for 850-nm VCSELs”, 2005年台灣光電科技研討會, paper A3N-53809.

附錄 B 程式檔

B.1、InGaAsN_{0.022} 1300 nm 面射型雷射

B.1-1、layer 檔

```
begin_layer
$
column column_num=1 w=7.5 mesh_num=10 r=1.
$
bottom_contact column_num=1 from=0 to=7.5 contact_num=1
$
vcsel_section vcsel_type=n-dbr &&
grating_model=2layers active=no &&
layer1=0.08904e-6 layer2=0.10600e-6 index1=3.65 index2=3.066 &&
mesh_points=10
layer_mater macro_name=algaas.temp var1=0.4 column_num=1
var_symbol1=x
layer d=6.8264 n=10 r=0.9 xp1=1 xp2=1 n_doping1=1e24
vcsel_type=n-dbr
$
vcsel_section vcsel_type=n-spacer &&
grating_model=1layer active=no &&
section_index=3.65 mesh_points=5
layer_mater macro_name=algaas.temp var1=0 column_num=1
var_symbol1=x
layer d=0.127 n=5 r=0.8 xp1=1 xp2=1 n_doping1=1e24
vcsel_type=n-spacer
$
vcsel_section vcsel_type=mqw_active &&
```

```

grating_model=1layer active=yes &&
section_index=3.66 mesh_points=10
include file=cylselt.bar
include file=cylselt.well
include file=cylselt.bar
include file=cylselt.well
include file=cylselt.bar
include file=cylselt.well
include file=cylselt.bar
$
vtsel_section vtsel_type=p-spacer &&
grating_model=1layer active=no &&
section_index=3.65 mesh_points=5
layer_mater macro_name=algaas.temp var1=0 column_num=1
var_symbol1=x
layer d=0.127 n=5 r=1.1 xp1=1 xp2=1 p_doping1=1.e24
vtsel_type=p-spacer
$
$layer_mater macro_name=algaas.temp &&
$var1=0.98 column_num=1 var_symbol1=x
$layer d=0.03 n=5 r=1.1 p_doping1=2e24 vtsel_type=oxide
$
vtsel_section vtsel_type=p-dbr &&
grating_model=2layers active=no &&
layer1 =0.10600e-6 layer2 =0.08904e-6 index1 =3.066 index2 =3.65 &&
mesh_points=10
layer_mater macro_name=algaas.temp var1=0.4 column_num=1
var_symbol1=x
layer d=4.09584 n=10 r=1.1 xp1=1 xp2=1 p_doping1=1.e25
vtsel_type=p-dbr
$end listing

```

```
$
top_contact column_num=1 from=4 to=7.5 contact_num=2
$
end_layer
```

B.1-2、sol 檔

```
$file:cylselt.sol
$*****
begin
load_mesh mesh_inf=cylselt.msh
output sol_outf=cylselt.out
include file=cylselt.gain
include file=cylselt.doping
$
$self_consistent wave_range=0.001
$
auger_n mater=1 value=9d-41
auger_p mater=1 value=9d-41
auger_n mater=2 value=9d-41
auger_p mater=2 value=9d-41
auger_n mater=3 value=9d-41
auger_p mater=3 value=9d-41
$
$contact type=ohmic num=2 thermal_type=3 thermal_cond=0.
$ -----these are for vcsel-----
heat_flow damping_step=1
set_active_reg thickness=0.007 tau_scat=3.5e-13 dip_factor=1.2
contact num=2 type=ohmic thermal_type=3 &&
thermal_cond=100 extern_temp=300
contact num=1 type=ohmic thermal_type=1 &&
```

```

lattice_temp=300
$
cylindrical axis=y
vcSEL_model index_core=3.3653 index_cladding=1.0 &&
core_radius =7.5  bessell_order=0
sor_par  max_iter=0 print_sor=noprint
init_wave backg_loss=990 init_wavel=1.3  &&
wavel_range=(1.1, 1.5)
$
$tau_energy value=1e-12
$ Turn on heating transfer
$heat_flow damping_step=5 max_iter=10
newton_par damping_step=5 var_tol=1e-9 res_tol=1e-9 &&
max_iter=100 opt_iter=15 stop_iter=50 print_flag=3
equilibrium
rtgain_phase  density=5e24
$stop
newton_par damping_step=1 var_tol=1e-4 res_tol=1e-4 &&
max_iter=30 opt_iter=15 stop_iter=10 print_flag=3
scan var=voltage_1 value_to=-1.3 print_step=1.3 &&
init_step=0.2 min_step=1e-5 max_step=0.5
scan var=current_1 value_to=0.1e-3  print_step=0.1e-3 &&
init_step=1e-4 min_step=1e-6 max_step=1.5e-3
$
scan3d current_from=0.1e-3  current_to=4e-3  &&
3d_points=41 photon_scan=0.1 photon_scan_num=6 bias_scan_num=2
&&
precalculated_gain=yes
$
end
begin_zsol

```

```

longitudinal ref_wavel=1.3d-6 left_f_refl=0.32 right_f_refl=0.32 &&
ref_index=3.2 ref_midpoint=0.55
$
include file=cylselt.vcsl
$
mode_srch omega_yrange=10 &&
tolerance=1e-3 iter_num=75 &&
wavel_xrange=(1.0e-6 1.3e-6) fix_spon_para=yes
bias3d step_num=15
end_zsol

```

B.1-3、plt 檔

```

$file:cylselt.plt
begin_pstprc
3dplot_data plot_device=postsript
3dget_data main_input=cylselt.sol sol_inf=cylselt.out &&
3ddata_set=29
$
end_pstprc
$
begin_zplot
plot_bias variable=delta_freq data_file=delta_freq.txt
plot_bias variable=power_right data_file=L-I.txt
plot_bias variable=sms_ratio data_file=sms_ratio.txt
plot_bias variable=linewidth_spon data_file=linewidth_spon.txt
plot_bias variable=linewidth_carrier data_file=linewidth_carrier.txt
plot_bias variable=linewidth_cross data_file=linewidth_cross.txt
plot_bias variable=linewidth_sidemode &&
data_file=linewidth_sidemode.txt
plot_bias variable=linewidth_total data_file=linewidth_total.txt

```

```
plot_bias variable=effective_alpha      data_file=effective_alpha.txt
plot_bias variable=power_right_1       data_file=power_right_1.txt
plot_bias variable=power_right_2       data_file=power_right_2.txt
plot_bias variable=sms_ratio           data_file=sms_ratio.txt
plot_z variable=delta_density data_set=5 data_file=delta_density.txt
plot_z variable=right_wave data_set=5   data_file=right_wave.txt
plot_z variable=left_wave data_set=5    data_file=left_wave.txt
plot_z variable=total_wave data_set=5   data_file=total_wave.txt
plot_z variable=sm_right_wave data_set=5 data_file=sm_right_wave.txt
plot_z variable=sm_left_wave data_set=5  data_file=sm_left_wave.txt
plot_z variable=sm_total_wave data_set=5 data_file=sm_total_wave.txt
data_file=right_wave_left_wave.txt
sm_left_wave.txt
plot_spec variable=mode_spectrum data_set=1 &&
data_file=mode_spectrum_low.txt
plot_spec variable=mode_spectrum data_set=5 &&
data_file=mode_spectrum_high.txt
end_zplot
```


B.2、InGaAsN_{0.029} 1300nm 面射型雷射

B.2-1、layer 檔

```
begin_layer
$
column column_num=1 w=7.5 mesh_num=10 r=1.
$
bottom_contact column_num=1 from=0 to=7.5 contact_num=1
$
vcsel_section vcsel_type=n-dbr &&
grating_model=2layers active=no &&
layer1=0.08904e-6 layer2=0.10600e-6 index1=3.65 index2=3.066 &&
mesh_points=10
layer_mater macro_name=algaas.temp var1=0.4 column_num=1
var_symbol1=x
layer d=6.8264 n=10 r=0.9 xp1=1 xp2=1 n_doping1=1e24
vcsel_type=n-dbr
$
vcsel_section vcsel_type=n-spacer &&
grating_model=1layer active=no &&
section_index=3.65 mesh_points=5
layer_mater macro_name=algaas.temp var1=0 column_num=1
var_symbol1=x
layer d=0.127 n=5 r=0.8 xp1=1 xp2=1 n_doping1=1e24
vcsel_type=n-spacer
$
vcsel_section vcsel_type=mqw_active &&
grating_model=1layer active=yes &&
section_index=3.66 mesh_points=10
```

```

include file=cylselt.bar
include file=cylselt.well
include file=cylselt.bar
include file=cylselt.well
include file=cylselt.bar
include file=cylselt.well
include file=cylselt.bar
$
vcsel_section vcsel_type=p-spacer &&
grating_model=1layer active=no &&
section_index=3.65 mesh_points=5
layer_mater macro_name=algaas.temp var1=0 column_num=1
var_symbol1=x
layer d=0.127 n=5 r=1.1 xp1=1 xp2=1 p_doping1=1.e24
vcsel_type=p-spacer
$
$layer_mater macro_name=algaas.temp &&
$var1=0.98 column_num=1 var_symbol1=x
$layer d=0.03 n=5 r=1.1 p_doping1=2e24 vcsel_type=oxide
$
vcsel_section vcsel_type=p-dbr &&
grating_model=2layers active=no &&
layer1 =0.10600e-6 layer2 =0.08904e-6 index1 =3.066 index2 =3.65 &&
mesh_points=10
layer_mater macro_name=algaas.temp var1=0.4 column_num=1
var_symbol1=x
layer d=4.09584 n=10 r=1.1 xp1=1 xp2=1 p_doping1=1.e25
vcsel_type=p-dbr
$end listing
top_contact column_num=1 from=4 to=7.5 contact_num=2
end_layer

```

B.2-2、sol 檔

```
$file:cylselt.sol
$*****
begin
load_mesh mesh_inf=cylselt.msh
output sol_outf=cylselt.out
include file=cylselt.gain
include file=cylselt.doping
$
$self_consistent wave_range=0.001
$
auger_n mater=1 value=9d-41
auger_p mater=1 value=9d-41
auger_n mater=2 value=9d-41
auger_p mater=2 value=9d-41
auger_n mater=3 value=9d-41
auger_p mater=3 value=9d-41
$
$contact type=ohmic num=2 thermal_type=3 thermal_cond=0.
$ -----these are for vtsel-----
heat_flow damping_step=1
set_active_reg thickness=0.007 tau_scat=3.5e-13 dip_factor=1.2
contact num=2 type=ohmic thermal_type=3 &&
thermal_cond=100 extern_temp=300
contact num=1 type=ohmic thermal_type=1 &&
lattice_temp=300
$
cylindrical axis=y
vtsel_model index_core=3.3653 index_cladding=1.0 &&
core_radius =7.5  bessell_order=0
```

```

sor_par max_iter=0 print_sor=noprint
init_wave backg_loss=990 init_wavel=1.3 &&
wavel_range=(1.1, 1.5)
$
$tau_energy value=1e-12
$ Turn on heating transfer
$heat_flow damping_step=5 max_iter=10
newton_par damping_step=5 var_tol=1e-9 res_tol=1e-9 &&
max_iter=100 opt_iter=15 stop_iter=50 print_flag=3
equilibrium
rtgain_phase density=5e24
$stop
newton_par damping_step=1 var_tol=1e-4 res_tol=1e-4 &&
max_iter=30 opt_iter=15 stop_iter=10 print_flag=3
scan var=voltage_1 value_to=-1.3 print_step=1.3 &&
init_step=0.2 min_step=1e-5 max_step=0.5
scan var=current_1 value_to=0.1e-3 print_step=0.1e-3 &&
init_step=1e-4 min_step=1e-6 max_step=1.5e-3
$
scan3d current_from=0.1e-3 current_to=4e-3 &&
3d_points=41 photon_scan=0.1 photon_scan_num=6 bias_scan_num=2
&&
precalculated_gain=yes
$
end
begin_zsol

```

B.2-3、plt 檔

```
begin_pstprc
3dplot_data plot_device=postsript
3dget_data main_input = cylselt.sol sol_inf = cylselt.out  &&
3ddata_set = 29
$ Plot at xy cross sections first
lplot_xy variable=band xy_from=(0.5 6.9)  xy_to=(0.5 7.1)      &&
data_file=band.txt
lplot_xy variable=hole_conc xy_from=(0.5 0)  xy_to=(0.5 9.7161)  &&
data_file=hole_conc.txt
lplot_xy variable=elec_conc xy_from=(0.5 0)  xy_to=(0.5 9.7161)  &&
data_file=elec_conc.txt
lplot_xy variable=potential xy_from=(0.5 0)  xy_to=(0.5 9.7161)  &&
data_file=potential.txt
lplot_xy variable=wave_intensity xy_from=(0 0)  xy_to=(0.5 9.7161)
&&
data_file=wave_intensity.txt
lplot_xy variable=local_gain xy_from=(0.5 6.9)  xy_to=(0.5 7.1)  &&
data_file=local_gain.txt
lplot_xy variable=recomb_st xy_from=(0.5 6.9)  xy_to=(0.5 7.1)  &&
data_file=recomb_st.txt
lplot_xy variable=recomb_rad xy_from=(0.5 6.9)  xy_to=(0.5 7.1)  &&
data_file=recomb_rad.txt
lplot_xy variable=recomb_aug xy_from=(0.5 6.9)  xy_to=(0.5 7.1)  &&
data_file=recomb_aug.txt
lplot_xy variable=linear_elec_conc xy_from=(0.5 6.9)  xy_to=(0.5 7.1)
&&
data_file=linear_elec_conc.txt
lplot_xy variable=linear_hole_conc xy_from=(0.5 6.9)  xy_to=(0.5 7.1)
```

```

&&
data_file=linear_hole_conc.txt
lplot_xy variable=linear_rec_elec xy_from=(0.5 6.9) xy_to=(0.5 7.1)
&&
data_file=linear_rec_elec.txt
lplot_xy variable=linear_rec_hole xy_from=(0.5 0) xy_to=(0.5 9.7161)
&&
data_file=linear_rec_hole.txt
lplot_xy variable=rec_elec_conc xy_from=(0.5 0) xy_to=(0.5 9.7161)
&&
data_file=rec_elec_conc.txt
lplot_xy variable=rec_hole_conc xy_from=(0.5 0) xy_to=(0.5 9.7161)
&&
data_file=rec_hole_conc.txt
lplot_xy variable=recomb_srh xy_from=(0.5 0) xy_to=(0.5 9.7161) &&
data_file=recomb_srh.txt
vplot_xy variable=total_curr grid_sizes=(35, 35) &&
xrange=(0.5 0) yrange=(0.5 9.7161) &&
data_file=total_curr.txt
cplot_xy variable=wave_intensity grid_sizes=(35, 35) &&
xrange=(0 7.5) yrange=(0 9.7161) data_file=wave_intensity.txt
splot_xy variable=elec_conc grid_sizes=(35, 35) &&
xrange=(0.5 6.3) yrange=(0.5 6.8) view_xrot=-20 view_zrot=20 &&
data_file=elec_conc.txt
splot_xy variable=potential grid_sizes=(35, 35) &&
xrange=(0.5 6.3) yrange=(0.5 6.8) view_xrot=-20 view_zrot=20 &&
data_file=potential.txt
splot_xy variable=donor_conc grid_sizes=(35, 35) &&
xrange=(0.5 6.3) yrange=(0.5 6.8) view_xrot=-20 view_zrot=20 &&
data_file=donor_conc.txt
splot_xy variable=acceptor_conc grid_sizes=(35, 35) &&

```

```
xrange=(0.5 6.3) yrange=(0.5 6.8) view_xrot=-20 view_zrot=20    &&
data_file=acceptor_conc.txt
splot_xy variable=wave_intensity grid_sizes=(35, 35) &&
xrange=(0 7.5) yrange=(0 10.52968) view_xrot=-20 view_zrot=20    &&
data_file=wave_intensity.txt
splot_xy variable=local_gain grid_sizes=(35, 35) &&
xrange=(0.5 6.3) yrange=(0.5 6.8) view_xrot=-20 view_zrot=20    &&
data_file=local_gain.txt
vplot_xy variable=total_curr grid_sizes=(35, 35)
cplot_xy variable=lattice_temp grid_sizes=(35, 35)
end_pstprc
begin_zplot
end_zplot
```