

國立彰化師範大學物理研究所

碩士論文

指導教授：郭艷光教授

黃綠光磷化鋁鎵銦發光二極體與面射型半導體雷射

光學特性之研究

Optical Properties of the Yellow-Green AlGaInP Light
Emitting Diodes and Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

研究生：黃雅蓮撰

中華民國九十年六月

國立彰化師範大學物理研究所

碩士論文

研究生：黃雅蓮

黃綠光磷化鋁鎵銦發光二極體與面射型半導體雷射

光學特性之研究

Optical Properties of the Yellow-Green AlGaInP Light
Emitting Diodes and Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

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 黃輝芳

委員：林踐 郭艷光

指導教授：郭艷光教授 郭艷光

所長：張惠博主任 張惠博

中華民國九十年六月

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書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在彰化師範大學物理系 89 學年度第二學期取得碩士學位之論文。

論文題目：黃綠光磷化鋁鎵銻發光二極體與面射型半導體雷射

指導教授：郭豔光教授

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文(含摘要)，非專屬、無償授權國家圖書館及本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，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。

- 讀者基於非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人：黃雅蓮

簽名：_____ 中華民國 90 年 7 月 26 日

誌 謝

感謝郭艷光老師兩年來不厭其煩的細心指導，不但讓我獲得許多光電領域的知識，在待人處事及人生觀上也有良多的啟發及學習；在此，致上我最深也最誠摯的感謝。

對於本論文的完成，我特別要感謝黃滿芳博士所提供的黃綠光發光二極體晶片及對光電方面的指導，並且撥冗遠道而來擔任我的論文口試委員兼論文考試委員會主席。在此，我也要感謝本系的林踐老師，特別於生日當天撥空擔任我的論文口試委員。

感謝實驗室的伙伴們：洪國凱學長、黃旭晴、張誌原、張郁妮、林文偉、張詒安、張志康、陳鴻銘，及林嘉慶兩年來的陪伴，以及在實驗、課業、知識上的協助及討論。

也要感謝我的好朋友們：交大電子所林志昌學長、台大光電所陳正言學長，以及彰師物研所同學林士傑在生活上及學問上的鼓勵及幫助；另外，特別要感謝我最可愛且最可靠的大學同學陳介偉，因為有他的協助，使得收集文獻的工作較為輕鬆。

特別要感謝我最親愛的家人：媽媽、爸爸、姊姊、阿弟，以及我最寶貝的狗狗：lucgy、貝貝，由於有他們多年來的陪伴、付出及支持鼓勵，使我在求學過程中得以專心致志，生命也因他們而豐富，在此僅以此論文獻給他們。最後，要感謝所有曾經給予過我幫助的人們。

目 錄

目錄	v
中文摘要	vii
英文摘要	viii
圖表索引	x
第一章 磷化鋁鎵銻之材料特性與發展歷程簡介	1
1.1 磷化鋁鎵銻之材料與光學特性	1
1.1.1 基板	2
1.1.2 折射率	4
1.1.3 能隙	6
1.1.4 能隙補償差	8
1.1.5 載子有效質量	9
1.1.6 磊晶法	10
1.2 磷化鋁鎵銻發光元件之發展歷程	11
1.3 黃綠光發光元件之用途與結構設計	16

	1.3.1 黃綠光發光元件的優點與應用	16
	1.3.2 黃綠光磷化鋁鎵銮之井寬設計	18
第二章	黃綠光磷化鋁鎵銮發光二極體之光激螢光法量測	22
	2.1 光激螢光法之原理與簡介	22
	2.2 實驗儀器簡介	23
	2.3 實驗結果與討論	27
第三章	黃綠光磷化鋁鎵銮面射型半導體雷射之模擬	40
	3.1 面射型雷射之優點與應用	41
	3.2 多層膜反射層之原理與模擬分析	42
	3.2.1 多層膜反射原理	42
	3.2.2 多層膜反射層之設計與模擬	43
	3.3 黃綠光磷化鋁鎵銮面射型雷射之設計與分析	49
第四章	結論	63
	參考文獻	65
	附錄一 利用數學軟體 Mathcad 計算多層膜反射問題	I
	附錄二 實驗儀器實物圖	V

中文摘要

本論文主要在說明黃綠光磷化鋁鎵銮材料元件的光學特性；首先我先簡介磷化鋁鎵銮的材料特性及雷射元件的發展歷程，並對於研究黃綠光發光元件的原因加以說明；在本論文中，我研究的黃綠光磷化鋁鎵銮元件包括發光二極體及面射型半導體雷射，其中我利用光激螢光法實驗來了解黃綠光磷化鋁鎵銮發光二極體隨溫度與激發功率變化的光學性質，另外我使用套裝軟體來模擬 570nm 的面射型雷射，從模擬的結果中去設計出較佳的元件結構，並對其光學性質加以探討。

實驗方面，我挑選了四種不同結構的磷化鋁鎵銮發光二極體加以研究，分別編號為 A、B、C，和 D，其中我令 A 片元件的結構為標準片，先去探討其光學性質與溫度及激發功率間的關係，之後將其他結構的元件與 A 片元件相比較，如此便可清楚的了解到元件基本的光學性質，及不同結構對發光二極體元件光學性質的影響。

模擬方面，我使用購自 Crosslight 公司的 PICS3D 模擬軟體來模擬元件的各項光學與電子特性。首先，我先找出適合 570nm 面射型半導體雷射的活性層及反射層材料，之後參考各文獻以訂出一個初步模擬模型，藉著變化共振腔長度、量子井個數、反射層對數、元件半徑，及 p 態反射層的摻雜濃度，來探討 570nm 面射型半導體雷射的光學性質及得到較佳的元件結構。

ABSTRACT

In this thesis, I mainly study the optical characteristics of the yellow-green AlGaInP semiconductor devices. First of all, I briefly introduce the material characteristics of the AlGaInP and the development history of the AlGaInP semiconductor lasers. A statement of the reason of doing such research about the yellow-green AlGaInP semiconductor devices is followed. In this thesis, the AlGaInP devices I have studied include light emission diodes (LEDs) and vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs). In the experiment, I utilized photoluminescence (PL) method to investigate the optical properties of the AlGaInP LEDs under various temperatures and excitation energies. On the other hand, simulations of VCSEL of wavelength at 570 nm were done by utilizing a commercial software, PICS3D, which enables us to design more comprehensive device structures and have further understanding of their optical properties.

In the experiment, I chose four different structures of AlGaInP LEDs for this thesis research. The structure of sample A was set as a reference, and it was first measured to explore the relations between optical properties and both temperature and excitation energy respectively. Results from other samples are compared with sample A, and through which to understand more detail about the fundamental properties of devices and the influences of structure to optical properties.

In the simulation, I used the PICS3D simulation software purchased from Crosslight Corporation to simulate the optical and electric properties of the VCSEL devices. First, I searched materials of active and reflecting layers suitable for VCSEL of wavelength at 570 nm. Then, with references from literatures I established a preliminary simulation model. By varying the length of cavity, number of quantum wells, number of pairs of reflecting layer, device diameter, and doping concentration of p-type reflecting layer I studied the optical properties of the 570-nm VCSELs and found out better structures of devices.

圖表索引

圖1.1	(a)磷化鎵銻中鎵的比例，(b)磷化鋁銻中鋁的比例，和晶格常數的關係圖	3
圖1.2	不同成分的磷化鋁鎵銻之折射率對入射波長關係圖	5
圖1.3	(a)第一具能在室溫下操作的磷化鋁鎵銻連續波雷射結構圖。 (b)為(a)所示的元件之電流對輸出功率隨溫度變化圖	13
圖1.4	POF 核心材料: PS、PMMA，和 PMMA-d5 的吸收頻譜	16
圖1.5	1988 年國際組織 C.I.E. 公佈人眼晝間視覺效率頻譜圖	18
圖1.6	模擬軟體 PICS3D，模擬井寬與自發輻射頻譜的關係圖	20
圖1.7	模擬軟體 PICS3D，模擬不同量子井材料之寬度對自發輻射特性波長關係曲線	21
圖2.1	光激螢光法實驗量測系統示意圖	26
圖2.2	反射式光柵分光儀內部構造示意圖	26
圖2.3	CCD 整體量子效率對波長的關係圖	27
圖2.4	實驗元件 A 的結構圖	28
圖2.5	實驗元件 A 之均勻性分析測量點分布圖	30
圖2.6	實驗元件 A 之均勻性分析結果圖	31
圖2.7	實驗元件 A 之不同溫度下的頻譜圖	31
圖2.8	溫度對特性波長的關係圖	32
圖2.9	實驗元件 A 之溫度對頻寬的關係圖	32

圖2.10	實驗元件 A 之溫度對發光強度的關係圖	33
圖2.11	實驗元件 A 於低溫 100K 時之不同激發功率的頻譜圖	35
圖2.12	實驗元件 A 於各溫度下之激發功率對特性波長的關係圖	35
圖2.13	實驗元件 A 於各溫度下之激發功率對 PL 發光強度的關係圖	36
圖2.14	元件 A 與元件 B 於室溫及低溫下的發光頻譜圖	37
圖2.15	元件 A 與元件 C 於室溫下的發光頻譜圖	38
圖2.16	元件 A 與元件 D 於室溫下的發光頻譜圖	39
圖2.17	元件 A 與元件 D 之溫度對特性波長發光強度的關係圖	39
圖3.1	光波入射單層薄片的模型圖	45
圖3.2	利用 PICS3D 模擬 $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P$ DBR 於不同對數時的反射頻譜圖	46
圖3.3	DBR 各層厚度皆有 $\pm 1\%$ 誤差時的反射頻譜圖	47
圖3.4	模擬軟體 PICS3D 模擬材料為 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P$ (x 分別為 0.5、0.6 和 0.7) 的 DBR 於 570nm 之穿透率與對數的關係圖	48
圖3.5	初步模擬的元件結構圖	50
圖3.6	不同雷射共振腔長 (一至三個波長) 的輸入電流對輸出功率圖	51
圖3.7	不同量子井個數 (二至八個) 的臨界電流變化圖	53
圖3.8	四個量子井時, 活性層的電子電洞結合率與長晶方向的位置關係圖	53
圖3.9	不同量子井個數的量子井位置與光子駐波的疊合圖	54
圖3.10	不同 p 態 DBR 對數 (25 至 45 對) 的雷射效能圖	56

圖3.11	不同元件半徑(2 至 9 μm)的臨界電流變化圖	57
圖3.12	不同 p 態摻雜濃度 (1×10^{18} 、 2×10^{18} 、 3×10^{18} , 和 $4\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 的輸入電流對輸出功率圖	57
圖3.13	元件之增益頻譜圖	60
圖3.14	模擬元件之共振腔能帶間隙圖	60
圖3.15	輸入電流對次強模式壓制比例與輸出功率的關係圖	61
圖3.16	臨界電流前後的雷射頻譜圖	61
圖3.17	雷射光波強度對元件內部位置的關係圖	62
表1.1	砷化鎵、磷化銦、磷化鎵, 和磷化鋁在室溫 (300K) 及長晶溫度 (975K) 下的晶格常數	4
表1.2	各文獻中 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 能隙與鋁成分比例 x 的表示式	7
表1.3	各文獻中磷化鋁鎵銦能隙值的整理資料	7
表1.4	各文獻中 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 和 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料間能隙補償差與鋁成分比例 x 的表示式	8
表2.1	各光學元件對雷射波長 488.0nm 的穿透(反射)率	35
表3.1	量子井個數對載子溢流的影響表	58
表3.2	p 態 DBR 摻雜濃度對載子溢流的影響表	58

第一章 磷化鋁鎵銻之材料特性與發展歷程簡介

九十年代初期的半導體雷射大多屬於砷化鋁鎵 (AlGaAs) 磷砷化鎵銻 (GaInAsP) 磷化鋁鎵銻 (AlGaInP) 三種材料，三者中以磷化鋁鎵銻材料系統具有最寬的直接能隙 ($\sim 2.31\text{eV}$)，且直接能隙的範圍橫跨紅光到綠光之間；當時為了因應高密度光儲存及通信上對短波長的需求，磷化鋁鎵銻材料便自然躍升為各界對半導體雷射研究的主流。由於磷化鋁鎵銻材料系統具有良好的長晶品質，以及晶格匹配且導電的基板，充分擁有了商業化的實力，因此即使到了今日，這個材料系統依舊深受重視及廣泛的被研究探討。在本章節中，我將對磷化鋁鎵銻系統本身的材料特性、基板、磊晶法、和元件發展的歷程加以詳細說明，並在本章節的最後探討短波長黃綠光的優點應用及結構設計。另外在 1.1 小節中，我會特別說明商用套裝模擬軟體 PICS3D 對磷化鋁鎵銻各種材料參數的設定值，至於這套模擬軟體的介紹，將留待第三章說明。

1.1 磷化鋁鎵銻之材料與光學特性

III-V 族磷化鋁鎵銻材料，是由二元化合物磷化鋁 (AlP) 磷化鎵 (GaP) 與磷化銻 (InP) 所混合而成的四元化合物，其中包含了一個第五族元素，及三個第三族元素。其材料的性質會隨元素所佔的比例不同而有所不同，一般我們為了清楚表示這種材料，所以給予一個通

式： $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{In}_c\text{P}$ ，有時會表示成： $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{(1-y)}\text{P}$ ，其中 a 等於 xy 表示鋁在第三族元素中所佔的百分比， b 等於 $(1-x)y$ 為鎵所佔的百分比，而 c 等於 $1-y$ 為銦所佔的百分比，三者加起來為 1。

1.1.1 基板

擁有合適的基板，是長出高品質光學元件的主要原因之一，因為磊晶層和基板間晶格匹配的程度會直接影響到元件內部缺陷的多寡，進而影響到元件的發光效率與使用壽命；所以如果想得到高品質及高效的磷化鋁鎵銦光學元件，首先必須先找到晶格能和磷化物匹配，且最好是能導電的基板。由表 1.1 中，我們可以發現，砷化鎵（GaAs）的晶格常數介於磷化銦、磷化鎵及磷化鋁間；而就半導體的定義，電阻率（resistivity）會介於 10^{-2} - 10^9 ($\Omega\text{-cm}$)間^[1]，小於 10^{-2} ($\Omega\text{-cm}$)的便可視為導體，今若砷化鎵摻雜濃度為 1×10^{18} (cm^{-3})，我們將會發現電阻率僅為 7.02×10^{-4} ($\Omega\text{-cm}$)^[2]，小於 10^{-2} ($\Omega\text{-cm}$)；另外，砷化鎵價格便宜，且可以直接斷裂形成共振面，使製作過程簡化；因此，砷化鎵對磷化鋁鎵銦雷射而言，可說是相當合適的好基板。目前的磷化鋁鎵銦雷射元件，不論研究用途或商業化，也不管發光波長或用途為何，都是使用砷化鎵作為基板。

由表 1.1 中，我們另外可以發現磷化鎵的晶格常數，和磷化鋁的晶格常數幾乎相等，這也就表示，在磷化鋁鎵銦材料中的鋁鎵比例，並不太會影響整體的晶格常數，所以當我們想要來探討整體的晶格常數

時，只需考慮鋁銻比或鎵銻比。由圖 1.1^[3]的(a)及(b)中，我們可以清楚的看到磷化鎵銻中鎵的比例，和磷化鋁銻中鋁的比例，對晶格常數的影響；由於在長晶溫度下若使晶格完全匹配，降至室溫時磷化鋁鎵銻的磊晶層便會感受到些許的壓力（ $a/a \sim 0.1\%$ ），因此為了使磷化鋁鎵銻層在室溫及長晶溫度下皆能與砷化鎵基板相匹配，減少有斷鍵情形的發生，一般我們都會取銻的成分比例為 50%，這也就是我們常見的表示式 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 的由來。

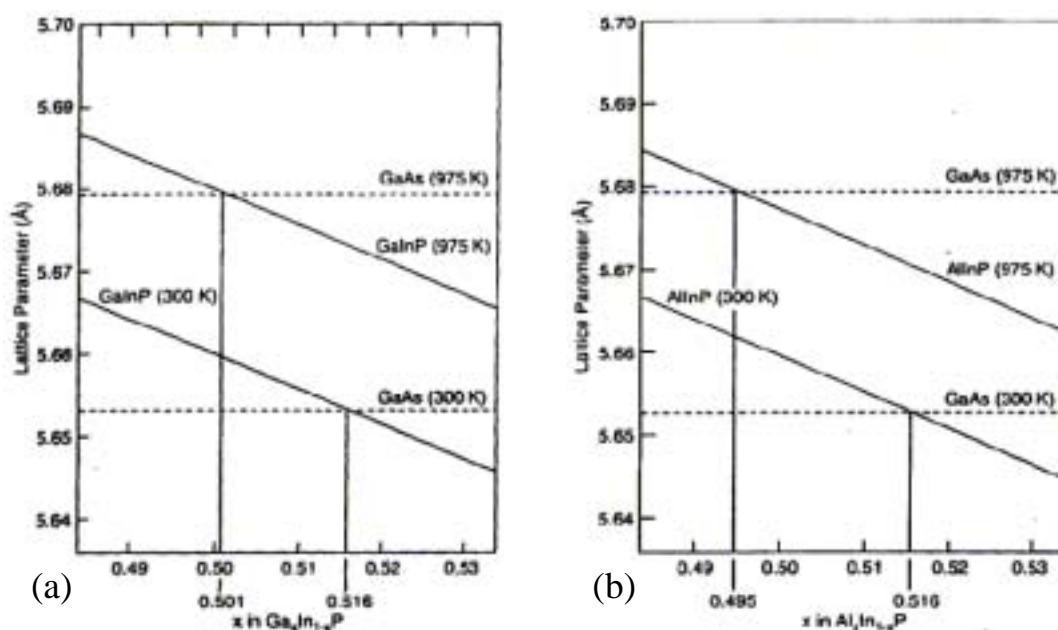


圖 1.1 室溫及長晶溫度下，(a)磷化鎵銻中鎵的比例，(b)磷化鋁銻中鋁的比例，和晶格常數的關係圖。

表 1.1 砷化鎵、磷化銦、磷化鎵，和磷化鋁在室溫（300K）及長晶溫度（975K）下的晶格常數。

成分	300K 時的晶格常數 ^[4]	975K 時的晶格常數 ^[3]
GaAs	56.533 nm	56.795 nm
InP	58.686 nm	58.874 nm
GaP	54.512 nm	54.729 nm
AlP	54.511 nm	54.677 nm

1.1.2 折射率

入射光能量對於共價或離子鍵材料折射率的影響，最早的關係式由 S. H. Wemple 和 M. DiDomenico 於 1971 年提出，如式 1.1 所示， n 為材料折射率， E_p 為入射光子能量， E_0 為震盪能量（oscillator energy）， E_d 為色散能量（dispersion energy）；後人稱此計算方式為 SEO（Single Effective Oscillator）法^[5]，但此計算法僅適用於材料完全不吸收入射光時，當入射光能量接近材料的能隙時，SEO 法便會失去它的準確性。

$$n^2 - 1 = \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - E_p^2} \quad (1.1)$$

為了求得更精確的折射率值，M. A. Afromowitz 於 1974 年，發表修正後的 SEO 法，稱為 MSEO（Modified Single Effective Oscillator）法^[6]，如式 1.2 所示， E_Γ 為材料直接能隙的能隙大小；此法在發表時乃是利用砷化鋁鎵材料系統加以驗證，發現計算結果十分的準確；後來 Y. Kaneko 和 K. Kishino 也驗證了 MSEO 的計算結果與磷化鋁鎵銦折射

率的量測值相符^[7]，其中 $E_0 = 4.17 + 0.49x$ ， $E_d = 35.79 - 1.16x$ ， $E_r = 1.89 + 0.67x$ ， x 為 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 中鋁的成分變數。圖 1.2 為入射光能量對磷化鋁鎵銻折射率的關係圖，是利用 MSEO 法計算出來的

$$n^2 - 1 = \frac{E_d}{E_0} + \frac{E_d E_p^2}{E_0^3} + \frac{E_d E_p^4}{2E_0^3 (E_0^2 - E_r^2)} \ln\left(\frac{2E_0^2 - E_r^2 - E_p^2}{E_r^2 - E_p^2}\right) \quad (1.2)$$

本論文所使用的模擬軟體 PICS3D，對磷化鋁鎵銻材料的折射率參數設定也是使用 1.2 式。

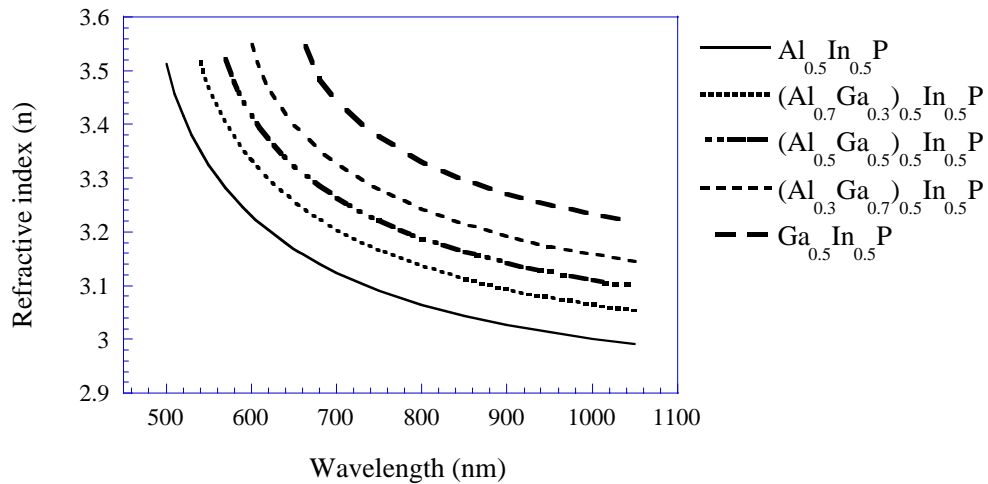


圖 1.2 不同成分的磷化鋁鎵銻之折射率對入射波長關係圖。

1.1.3 能隙

磷化鋁鎵銻材料是由磷化鋁、磷化鎵和磷化銻三者混合而成，其中磷化鋁和磷化鎵屬於間接能隙，而磷化銻為直接能隙，且 $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 是間接能隙^[8]， $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 是直接能隙^[9]，因此我們可以推論得知，當 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 中鋁的成分增加到某一定程度時，能隙一定會由直接轉變為間接，而此轉變點也就是元件性能極度變差的起始點。在各文獻中對於此四元化合物 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 能隙大小及轉變點 x 值的記載不盡相同，但得到的方式可概分為兩種，一種為實驗歸納式，一種為成分比例線性計算式；表 1.2 列出六種不同的文獻記載，我們可以從中發現，間接能隙為實驗歸納的轉變點 x 皆介於 0.5-0.6 間，為線性計算的轉變點 x 皆介於 0.6-0.7 間；而表 1.3 是根據表 1.2 所計算出來的 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (x 分別為 0、0.3、0.5、0.7 和 1) 能隙值，我們可以發現雖然各能隙的表示式不盡相同，但所得到的值都相差不多。

模擬軟體 PICS3D 對磷化鋁鎵銻塊材的能隙設定是採用表 1.2 中編號 6 的表示式；至於磷化鋁鎵銻量子井的直接能隙設定是採用成分比例線性計算的方式，再加上不同成分化合時的修正項 (bowing parameter)，如式 1.3 所示，其中磷化鋁銻的修正項為 0.4，磷化鎵銻的為 0.69，磷化鋁鎵的為 0.01。^[10]

$$E_r(x) = \text{Linear} - \text{Bowing} = 1.891 + 0.49x + 0.0025x^2 \quad (1.3)$$

$$\text{Linear} = E_{\text{AlP}} \times 0.5x + E_{\text{GaP}} \times 0.5(1-x) + E_{\text{InP}} \times 0.5$$

$$\text{Bowing} = b_{\text{AlInP}} \times 0.5x \times 0.5 + b_{\text{GaInP}} \times 0.5(1-x) \times 0.5 + b_{\text{AlGaP}} \times 0.5x \times 0.5(1-x)$$

表 1.2 各文獻中 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 能隙與鋁成分比例 x 的表示式，單位為 eV。其中(e)為實驗歸納式，(c)為成分比例線性計算式。

編號	直接能隙 $E_T(x)$	間接能隙 $E_X(x)$	轉變點
1 ^[7]	1.89+0.67x (e)		
2 ^[3]	1.91+0.61x (e)	2.19+0.085x (e)	0.53
3 ^[11]	1.90+0.61x (e)	2.204+0.085x (e)	0.58
4 ^[12]	1.90+0.60x (e)	2.24+0.091x (c)	0.67
5 ^{[13],[14]}	1.91+0.59x (e)	2.26+0.09x (c)	0.70
6 ^[15]	1.91+0.61x (c)	2.25+0.1x (c)	0.67

表 1.3 各文獻中磷化鋁鎵銻能隙值的整理資料，單位為 eV。

編號	GaInP	$(Al_{0.3}Ga_{0.7})_{0.5}In_{0.5}P$	$(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P$	$(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$	AllnP
1 ^[7]	1.89	2.091	2.225	~	~
2 ^[3]	1.91	2.093	2.215	2.25	2.275
3 ^[11]	1.9	2.083	2.205	2.264	2.289
4 ^[12]	1.9	2.08	2.2	2.304	2.331
5 ^{[13],[14]}	1.91	2.087	2.205	2.323	2.35
6 ^[15]	1.91	2.093	2.215	2.32	2.35

1.1.4 能隙補償差

GaInP 和 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 材料間的能隙補償差 (band offset) 在各文獻中的記載也如能隙般不盡相同, 在表 1.4 中列出了四種不同的表示式, 其能隙大小分別對應到 1.1.3 小節中的編號 2^[3]、3^[11]、5^[13]和 6^[15]。由於能隙補償差能利用疊加的方式來計算^[16], 所以可以藉由已知的 GaInP/ $(Al_aGa_{1-a})_{0.5}In_{0.5}P$ 能隙差和 GaInP/ $(Al_bGa_{1-b})_{0.5}In_{0.5}P$ 能隙差, 來推得 $(Al_aGa_{1-a})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_bGa_{1-b})_{0.5}In_{0.5}P$ 間的能隙補償差; 如此一來, 我們只要知道磷化鋁鎵銻材料的 a、b 各為多少, 便可藉由以上的數據來推得兩材料間的能隙差。另外, 由表 1.4 可以看的出來 CBO^Γ 和 VBO 的比例皆不相同, 其中 VBO (Valence Band Offset) 為價電帶能隙差, CBO^X (Conduction Band Offset) 為導電帶能隙差, Γ 表示直接能隙, X 表示間接能隙。也有其它文獻記載 $CBO^\Gamma : VBO$ 為 0.64 : 0.36^[17]、0.65 : 0.35^[18]、0.67 : 0.33^[19]、0.49 : 0.51^[20]、0.43 : 0.57^{[21]-[23]}、0.35 : 0.65^[24], 由這些比例值中, 我們不難看出和能隙的轉變點一樣, 可分為實驗歸納及成分比例線性計算兩派, 而 PICS3D 中是設定為 0.5 : 0.5。

表1.4 各文獻中 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ 和 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 材料間能隙補償差與鋁成分比例x的表示式, 單位為eV。

對應1.1.3 小節編號	VBO	CBO^Γ	轉變點	CBO^X	$CBO^\Gamma : VBO$
2 ^[3]	0.241x	0.369x	0.53	0.27-0.14x	0.6 : 0.4
3 ^[11]	$0.63x+0.157x^2$	$0.547x-0.157x^2$	0.58	~	0.43 : 0.57
5 ^[13]	0.32x	0.271x	0.70	0.353-0.233x	0.46 : 0.54
6 ^[15]	0.35x	0.254x	0.67	0.332-0.242x	0.42 : 0.58

1.1.5 載子有效質量

載子在不同材料中的質量皆不相同，因此在任何有關材料特性的計算中，都必須代入正確的載子有效質量值，如此關於材料特性的計算結果才有可信的推論。

電子在磷化鋁鎵銻直接能隙 Γ 的有效質量如式 1.4^[25]所示，在間接能隙 X 的有效質量則沒有文獻可考，只知道電子在磷化鋁銻間接能隙 X 的有效質量為 $0.35m_0$ ^[13]。式 1.5a^[14]為重電洞有效質量，式 1.5b^[26]為輕電洞有效質量，將兩者代入式 1.6 中，便可得知電洞有效質量 $m_h(x)$ ；式中的 m_0 為電子在自由空間中的質量。至於式 1.6 的由來，乃是因為態密度 (Density Of States, 簡稱 DOS) 正比於載子質量的二分之三次方，而價電帶的 DOS 為輕、重電洞的 DOS 之總和，因此可以將電洞的有效質量表示成式 1.6 的形式。

$$m_{e\Gamma}(x) = (0.11 + 0.00915x - 0.0025x^2)m_0 \quad (1.4)$$

$$m_{hh}(x) = (0.62 + 0.05x)m_0 \quad (1.5a)$$

$$m_{lh}(x) = (0.11 + 0.03x)m_0 \quad (1.5b)$$

$$m_h(x) = [m_{hh}(x)^{3/2} + m_{lh}(x)^{3/2}]^{2/3} \quad (1.6)$$

在模擬軟體PICS3D中的磷化鋁鎵銻電子有效質量定義為：當鋁成分比例x值介於0-0.7間， m_e 為0.11，若x介於0.7-1間，則 m_e 為0.35。而電洞的有效質量定義恰為式1.5a及式1.5b代入式1.6的結果。

1.1.6 磊晶法

磷化鋁鎵銦材料較常使用的長晶法有：有機金屬氣相磊晶法（Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy，簡稱 MOVPE）和分子束磊晶法（Molecular Beam Epitaxy，簡稱 MBE）兩種。

MOVPE 的原理是在低壓下（約 60 torr）利用有機根帶著欲化合的元素進入爐中，和其它氣態的反應物在基板上相化合，而形成想得到的材料層。目前最常被用來帶第三族元素進入的有機根為三甲烷基根（Trimethyl-，簡稱 TM）和三乙烷基根（Triethyl-，簡稱 TE）兩種，雖然其中以 TE 最不易引起嚴重的碳污染[27]，但由於三乙烷基鎵（Triethyl-gallium，TEGa）和三乙烷基銦（Triethyl-indium，TEIn）的蒸汽壓太低，會使得 MOVPE 的長晶速度變的很慢，因此在長磷化鋁鎵銦材料時，普遍還是使用三甲烷基鋁（Trimethyl-aluminum，TMAI）、三甲烷基鎵（Trimethyl-gallium，TMGa）和三甲烷基銦（Trimethyl-indium，TMIIn）來當作第三族鋁、鎵和銦元素的來源。至於磷化鋁鎵銦長晶中其它必須元素的來源：第五族的磷元素是利用磷化氫（phosphine， PH_3 ）來提供；n 態常用的摻雜為矽（Si），由矽甲烷（silane， SiH_4 ）或矽乙烷（disilane， Si_2H_6 ）來提供；而 p 態常用的摻雜為鎂（Mg），則是雙環戊二烯鎂（bismagnesium， Cp_2Mg ）來提供。最後值得一提的是，因為以上反應物中的磷化氫不易分解，所以一般在長晶時都會使 V-III 比大於 200 以上^[3]，如此連帶的也可以利用磷化氫中所帶的氫原子來改善碳污染的情形。

MBE 的原理是在接近真空中（約 10^{-10} torr）^[28] 利用原子或分子束直接射在基板上，形成磊晶層。使用 MBE 磊晶法，在變換磊晶元素時十分的方便，但由於它需要很高真空的反應爐，所以在價格上會較其它磊晶系統來的昂貴。

雖然就長晶溫度而言，MBE 較 MOVPE 的溫度低，但由於 MOVPE 的長晶速度較 MBE 快許多，而且在磷化物材料方面能達到較 MBE 優良許多的磊晶品質，因此磷化鋁鎵銻元件在商業上的生產，主要都採用 MOVPE 長晶法。

1.2 磷化鋁鎵銻發光元件之發展歷程

九十年代以前，半導體雷射的研究重點多著重於砷化鋁鎵材料系統，然而當時此材料系統由於以下的三個原因，使得最短的室溫連續波雷射波長極限為 680nm^[29]；原因一為當發光波長越短，直接能隙的導電帶最低點 Γ ，會越接近間接能隙的導電帶最低點 X ，造成臨界電流嚴重的增加；原因二為在長晶的過程中鋁易與其它原子產生反應，造成活性層中有許多缺陷產生，使發光效率變差；原因三良導電率的高鋁成分 p 態披覆層是不容易得到的。而由於當時高密度光儲存、印表機及通信等方面對短波長發光源迫切的需求，使得各界紛紛將注意力轉向較大能隙的磷化鋁鎵銻材料系統上。

由於磷化鋁鎵銻材料系統有晶格匹配且導電的基板：砷化鎵，因

此本小節參考文獻中的磷化鋁鎵銻元件皆是以砷化鎵作為基板。至於磷化鋁鎵銻材料系統的長晶方法，捨棄了半導體發展之初最普遍被使用的液相磊晶法 (Liquid Phase Epitaxy, 簡稱 LPE), 而改用今日常見的 MOVPE 或 MBE 來磊晶, 是由於 LPE 不適合長量子井或超晶格結構; 且因為 LPE 所採用的是控制基板或融熔液的溫度, 以達到氣相至固態間的平衡, 使材料凝固磊晶於基板上的方式, 但由於鋁和磷之間有強大的束縛能 (bonding energy), 使得磷化鋁和磷化銻個別的固液相平衡條件差異過大, 造成任何接近平衡態長晶的磊晶法都無法同時加以控制, 因此本小節參考文獻中的元件皆是用 MOVPE 或 MBE 所磊晶而成。

1982 年時, 首次於低溫下得到磷化鋁鎵銻雙異質結構的雷射光^[30], 其實驗操作的溫度為 90K, 使用氬離子雷射 (Ar⁺ laser) 的 514.5nm 為激發光源, 得到的雷射波長為 647nm; 而在此實驗中作者發現到, 使用 MOVPE 所長的 Al_{0.5}In_{0.5}P/Ga_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P 雙異質結構的光激發光 (Photoluminescence, 簡稱 PL) 發光強度, 為單一層 Ga_{0.5}In_{0.5}P 的十倍, 因此推論得知在磊晶時使用雙異質結構, 會形成較佳的晶層及晶面品質, 可以提高元件的發光效率, 這也就是為何後來各界在磷化鋁鎵銻元件製作時皆採用雙異質結構的原因。1983 年時, I. Hino^[31]、H. Ashai^[32]和 Y. Kawamura^[33]等人分別成功的製作出在室溫下利用電激發操作的磷化鋁鎵銻脈衝雷射, 其中 I. Hino 的實驗元件是利用 MOVPE 所長成, 而 H. Ashai 和 Y. Kawamura 的實驗元件則是使用 MBE

所長成。於隔年，M. Ikeda 便於低溫下得到了磷化鋁鎵銻的連續波雷射光^[34]，其活性層為 $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.31}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{Ga}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}/\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.31}\text{In}_{0.48}\text{P}$ 雙異質結構，雷射光波長為 653nm。而第一具能在室溫下操作的磷化鋁鎵銻連續波雷射，則是於 1985 年間誕生，分別由 M. Ikeda^[35]、K. Kobayashi^[36]和 M. Ishikawa^[37]等人用 MOVPE 製造而成；其中 M. Ishikawa 所做的元件結構如圖 1.3(a)所示，整個元件為 $7\mu\text{m}\times 250\mu\text{m}$ 的狹長塊，活性層為 $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 雙異質結構，基板為(100)方向的砷化鎵，當操作溫度為 24°C 時，雷射臨界電流為 109mA，波長為 679nm，如果將元件操作溫度提升，我們可以發現隨著溫度的上升，臨界電流會增加，且雷射量子效率也會隨著變差，實驗結果就如圖 1.3(b)所示，此元件操作溫度的最高值為 51°C 。

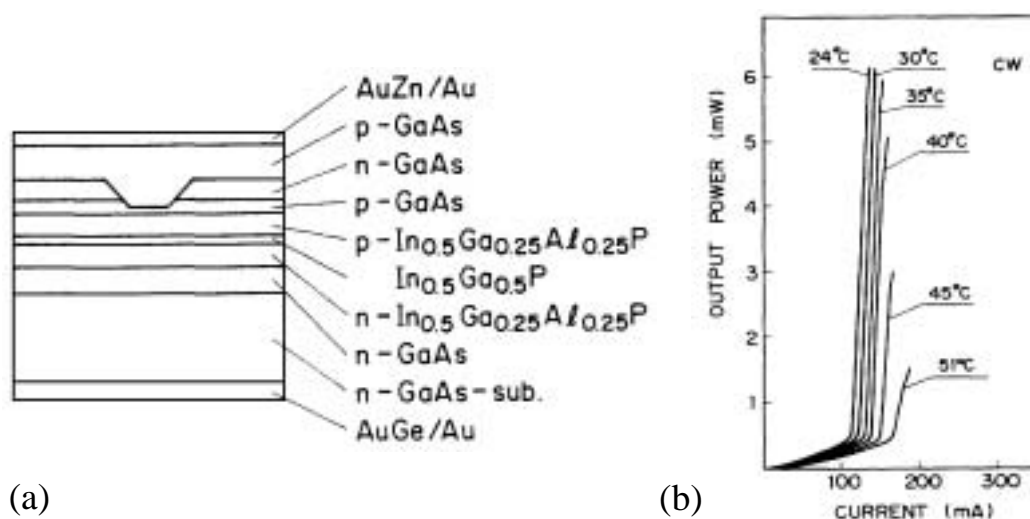


圖 1.3 (a)第一具能在室溫下操作的磷化鋁鎵銻連續波雷射結構圖，由 M. Ishikawa^[37]所製作。(b)為(a)所示的元件之電流對輸出功率隨溫度變化圖。

得到能在室溫下操作的連續波雷射，是磷化鋁鎵銻材料元件發展的一個重要成就，伴隨此成就而來的是更多對於縮短波長及改良元件性能的研究；其中對於縮短波長方面，是以氦氖雷射（He-Ne Laser）的 632.8nm 為目標，當時各界常使用的方法有以下三種：方法一為使用四元的活性層^{[38]-[44]}，由於磷化鋁鎵銻元件發展之初，活性層多採用三元的磷化鎵銻材料，若改用多加了鋁成分的活性層，會使能隙變大，達到波長變短的目的；方法二為使用量子效應^{[45]-[47]}，將活性層厚度變薄，直到能階變成不連續，使第一階能階不再緊貼著導電帶的最低點及價電帶的最高點，如此會導致電子實際跳躍的能隙寬度變大，也可以達到使波長變短的目的；方法三則是將磊晶層長在砷化鎵基板略偏於(100)的方向上^{[48]-[50]}，由於如此會造成磊晶層能帶變化，使得能隙寬度變寬，所以也能達到波長變短的目的。於 1992 年時，室溫下的磷化鋁鎵銻連續波雷射波長，已經可以短至 615nm^[51]。在改良元件性能方面，則可大致分為幾個研究的方向，如提高光輸出功率^{[52]-[56]}、降低臨界電流^{[57]-[59]}、提高操作溫度上限^{[60],[61]}、延長元件使用壽命^{[62]-[66]}等。

在不斷改善磷化鋁鎵銻雷射元件性能的同時，有一個問題一直無法徹底克服，就是雷射輸出光點的形狀，由於活性層在側射方向為一狹長方形，所以射出的雷射光就因為通過狹縫的影響，而呈直立的橢圓形，如此在掃描、列印、儲存資料或聚焦進光纖時，都會帶來極大的困擾。由於此問題的存在，使得各方紛紛將注意力轉向面射型雷射（Vertical Cavity Surface Emitting Laser，簡稱 VCSEL）。

1972 年 H. Soda 等人做出了第一個能在低溫下操作的 VCSEL^[67]，其活性層材料為磷砷化鎵銻，雷射波長為 1300nm，而當時共振腔所使用的反射面為金屬面。於 1982 年時，首度由 R. D. Burnham^[68]設計出在基板上多層膜反射層來取代金屬面的結構，此結構的出現不但奠定了今日 VCSEL 結構的雛形，也徹底改善了發光二極體（Light Emitting Diode，簡稱 LED）基板吸光的問題^[69]。1992 年，由於長晶技術的成熟，R. P. Schneider 發表了第一具能在室溫下操作的光激發磷化鋁鎵銻 VCSEL^[70]；1993 年，K. Tai 製作出能在室溫下利用電激發操作的磷化鋁鎵銻脈衝 VCSEL^[71]；同年，第一具能在室溫下操作的磷化鋁鎵銻連續波 VCSEL 誕生^[72]，由 J. A. Lott 所製作，其多層膜反射層的材料與之前的磷化鋁鎵銻 VCSEL 相同，皆是使用砷化物中的 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{AlAs}$ ，元件半徑為 $7.5\mu\text{m}$ 。

1.3 黃綠光發光元件之用途與結構設計

1.3.1 黃綠光發光元件的優點與應用

黃綠光發光元件的優點及應用，可以就幾個方面來說明，其中對於通訊而言，由於塑膠光纖（Plastic Optical Fiber，簡稱 POF）的成本較氧化矽光纖低很多，容易達成光纖到家（Fiber To The Home，簡稱 FTTH）的目標，且由於 POF 富有彈性，中心核線的半徑大，所以容易接合及操作，且光容易輸入，因此廣泛的被使用在短程的通訊上，如辦公室 研究機關 大樓或社區等。其中以 PS(Polystyrene)^[73]、PMMA (Polymethylmethacrylate)^[74]，和 PMMA-d5(Polymethylmethacrylate-d5)^[75]為核心的 POF，分別於 580nm、570nm，和 565nm 處有低吸收的窗（window），吸收頻譜如圖 1.4 所示，圖中的 PMMA 於 570nm 的衰減（attenuation loss）約為 0.055dB/m，PMMA-d5 於 565nm 的衰減為 0.041dB/m；由此可知 570nm 附近的黃綠光 LED 或雷射，於短程通訊上都是極具發展潛力的。

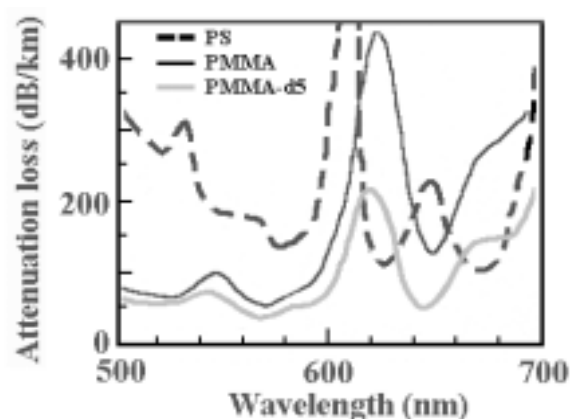


圖 1.4 POF 核心材料：PS、PMMA，和 PMMA-d5 的吸收頻譜。

對於光儲存而言，因為聚焦透鏡非無限大，所以造成聚焦點有半徑 q ，今若聚焦透鏡直徑為 a ，焦距為 f ，利用 Airy Disk 原理^[76]，則可得到如式 1.7 的關係式。現今 CDROM (Compact Disc Read Only Memory) 所使用的是砷化物材料波長為 780nm，容量約 680 MB，而 DVD (Digital Versatile Disk) 所使用的是磷化鋁鎵銻材料，波長為 650nm，容量約為 4700 MB，若能將技術接近成熟的磷化物雷射波長更加縮短，則聚焦的點就越小，相對的能儲存的容量也就變大了。相同的原理也可以運用在條碼機上，如果條碼機聚焦的點變小了，相對的條碼的體積也可以變小許多，如此可增加許多的方便性及美觀商品。

$$q = \frac{1.22 f \lambda}{a} \quad (1.7)$$

黃綠光 LED 除了通信上的用途外，另外的一個重要的用途在於，就人類眼睛的視覺而言，在光亮中人的眼睛對於黃綠光範圍的光線最敏感，所以對黃綠光的反應遠遠超過對紅光或藍光，如圖 1.5 所示，此圖是國際組織 C.I.E. (法文：Commission Internationale de l'Eclairage；英文：International Commission on Illumination-abbreviated) 於 1988 年公佈的人眼晝間視覺效率頻譜圖，由圖中可知 570nm 黃綠光的人眼亮度分別是 670nm 紅光及 480nm 藍光的 29.4 及 6.8 倍^[77]；因此短波長的黃綠光很適合用來作為汽車內裝、工業儀表、電源開關或機器狀態等方面具有顯示、指示或警示的小光源，如此可節省許多的用電量，且能豐富燈飾或電子招牌的色彩。另外由於手機之熱賣及 LED 指示看板

需求呈爆炸性的成長，加上 LED 背光源之應用日漸普及化，色調柔和自然之黃綠光發光元件頓時成為熱門搶手之科技產品。

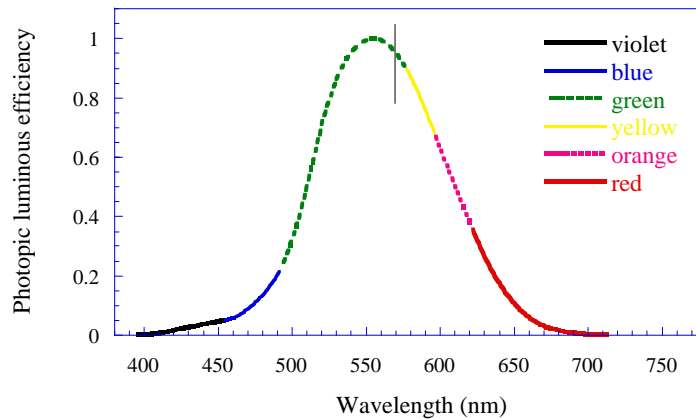


圖 1.5 1988 年國際組織 C.I.E. 公佈人眼晝間視覺效率頻譜圖。

1.3.2 黃綠光磷化鋁鎵銻之井寬設計

常被用來發黃綠光的磷化鎵材料，由於其發光效率差，發光亮度不足，且不能用來製作雷射，因此在本小節中，我們僅討論能製作出黃綠光 LED 及雷射的磷化鋁鎵銻材料，探討此材料系統如何發出 570nm 黃綠光。

由之前的介紹，可以知道若想將元件的發光波長變短至黃綠光 (~570nm)，可直接將活性層材料中鋁的成分比例提高，但在實際長晶的過程中，由於鋁原子易與氧或碳原子結合，導致鋁成分的提升會伴隨著嚴重的晶體缺陷產生，且在能帶方面由於鋁的成分比例提高，導電帶中的 Γ 點會越接近X點，能隙會由直接轉變成間接能隙，使發光效

率大幅變差^[78]；所以一般在結構設計上，我們都會保持低鋁成分的狀態，而改用其他的方式，來讓磷化鋁鎵銻材料的發光波長變短，如以下所提的量子井結構和之後的應力結構都是常被使用的方法。

由有限深量子井的公式1.8，我們可知當井寬變窄時，第一階能階將不再緊貼著井底，也就是最低能階將不再緊貼著導電帶的最低點及價電帶的最高點，而此時的能隙寬度會較原本的寬，所以所發出波長也會較原本的短。式1.8中的 h 為Planck's constant， a 為井寬， m 為材料中電子的質量， V_0 為井深， E 為第一階能階距離井底的能量差。

$$\tan \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E}{E_1}} = \sqrt{\frac{V_0 - E}{E}} \quad , \quad E_1 = \frac{h^2}{8ma^2} \quad (1.8)$$

利用模擬軟體PICS3D，我們可以由模擬結果中得知井寬與發出波長間的關係；如圖1.5所示，其井（well）的材料為 $(Al_{0.3}Ga_{0.7})_{0.5}In_{0.5}P$ ，井障（barrier）的材料為 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ ，當井寬為2.98nm時，發光波長會恰好為570nm；而若使用模擬軟體PICS3D對磷化鋁鎵銻所設定的材料參數直接代入式1.8中，我們可以發現發光波長為570nm時，井寬為3.04nm。由於 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 在 $x > 0.3$ 以後，才會明顯的顯現出鋁成分太高的缺點^[12]，因此我選擇 $(Al_{0.3}Ga_{0.7})_{0.5}In_{0.5}P$ 作為量子井的材料。儘管之後有改變鎵和銻的比例，但鋁的比例皆維持在15%。

由圖 1.5 自發輻射的頻譜中我們可以發現，當井寬變窄時，除了波長變短外，發光的效率也會跟著變差，此現象是由於載子溢流所造成的。因此在設計活性層時，為了達到短波長、高效率的雙重目標，我

們一般都會搭配使用應力結構；至於整個活性層的設計，將留待第三章再詳細討論。總之，一旦改變了量子井的材料，就只要再畫出類似圖 1.5 的關係曲線，如圖 1.6 所示，便可以輕易的知道自發輻射波長為 570nm 時該對應的井寬。

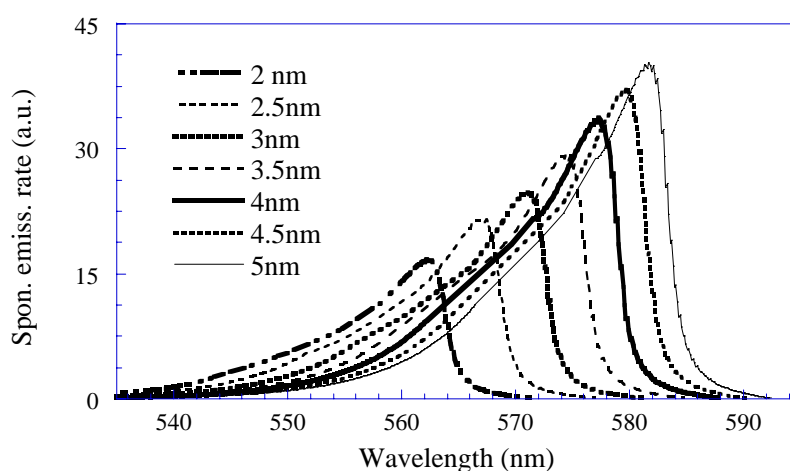


圖 1.6 利用模擬軟體 PICS3D，模擬井寬與自發輻射頻譜的關係圖。模擬結構的井/井障材料為 $(Al_{0.3}Ga_{0.7})_{0.5}In_{0.5}P/(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ ，量子井載子濃度為 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

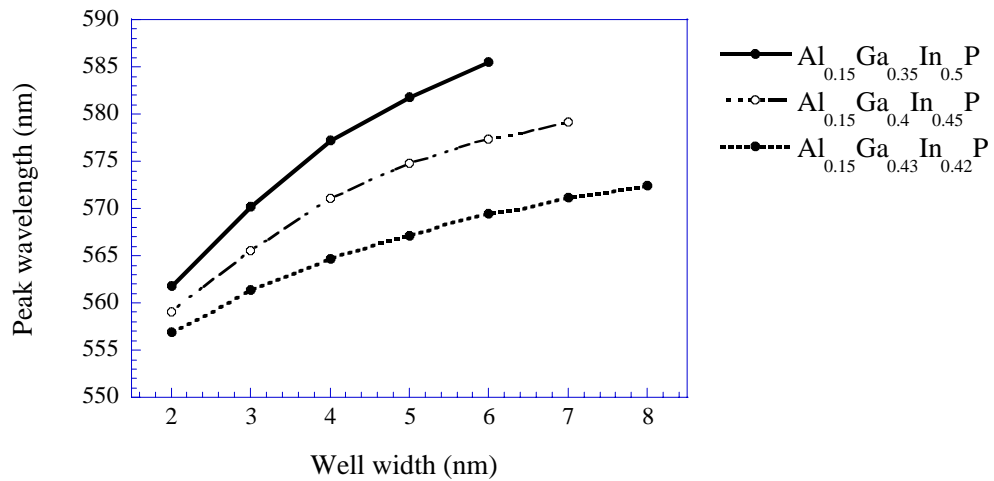


圖 1.7 利用模擬軟體 PICS3D，模擬不同量子井材料之寬度對自發輻射特性波長關係曲線。模擬結構中的井材料分別為 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.35}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 、 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.45}\text{P}$ 和 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.43}\text{In}_{0.42}\text{P}$ ，井障材料皆為 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ ，量子井載子濃度為 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。井的材料為 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.40}\text{In}_{0.45}\text{P}$ ，井寬為 3.78nm 時，或井的材料為 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.43}\text{In}_{0.42}\text{P}$ ，井寬為 6.31nm 時，發光波長會恰好為 570nm。

第二章 黃綠光磷化鋁鎵銮發光二極體之光激螢光法量測

自 1960 年開始研發可見光的 LED 至今，我們不難發現，III-V 族磷化鋁鎵銮材料由眾多材料中脫穎而出，此乃因為此材料有良好的發光效率，且在製成方面，可做出品質良好的 p 態摻雜層，及擁有晶格匹配又可導電的基板，如磷化銮、砷化鎵；另外，可藉由調整鋁、鎵及銮的成分比例，使發光範圍由紅光一直到黃綠光區，涵蓋的波長十分廣泛。至於磷化鋁鎵銮所製成的 LED 本身具有輕、薄、小、省電、亮度高、壽命長、耐衝撞，且閃爍速度快等優異的特性，因此廣泛被應用於製作白光燈泡、交通、通訊、顯示及工業儀表等各種不同的領域中。配合第一章第三小節中曾提及的黃綠光的應用，我們可以知道黃綠光磷化鋁鎵銮 LED 的重要性及發展性。在本章節裏，我先介紹用來量測磷化鋁鎵銮 LED 的光激螢光法之基本原理，然後再介紹整個量測系統及三種主要的實驗儀器，在第三小節中我將針對黃綠光磷化鋁鎵銮 LED 的特性進行研究，利用光激螢光法來瞭解在不同溫度下的元件光學性質，及不同結構的元件特性。

2.1 光激螢光法之原理與簡介

螢光光譜可以非常清楚的顯示材料本質的電子躍遷，或電子在雜質或缺陷所造成的能階躍遷的情形。其中最常被用來量測的方法就是光激螢光法，其基本的原理就是利用光子去激發基態的電子至激發

態，然後藉由電子從激發態躍遷回較低能態時所放出的光子特性來判斷材料的性質；而其實驗的原理乃是利用光源（通常是雷射）去激發樣品，再由透鏡去收集樣品直接發出來的螢光（luminescence），然後經過分光儀分光後由光偵測器量測。

光激螢光法是一種快速、可靠、簡單，且非破壞性的量測法，其量測深度約 $0.1\mu\text{m}$ - $3\mu\text{m}$ ，而實際量測深度則要看光的透徹深度（penetration depth）及材料的載子擴散長度（diffusion length）而定。此量測法最常被用來量測半導體的能隙大小及測定晶體的品質或結構；整套儀器設備約一個光學桌到一個小房間的大小。至於量測樣品可以是固體或液體，只要有電子躍遷放出光子的光學躍遷（optical transition）性質便可，而大小由 2×10^{-4} 到幾公分間皆可量測。

2.2 實驗儀器簡介

本論文中光激螢光法實驗所使用的量測系統如圖 2.1 所示，實物如附錄二所示；當雷射光由雷射腔射出後，經過小反射鏡反射，垂直入射待測樣品，而後利用透鏡組收集螢光並聚焦進光纖，且用小反射鏡擋住雷射的反射光，之後適當的調整單色分光儀、光偵測器及溫控系統，就可以取得樣品在不同溫度下的螢光光譜；其中溫控系統是由閉循環式氮冷卻系統與電熱器所組成，其溫控範圍為 10K-325K。以下針對三種主要的實驗儀器個別詳細的介紹：氬離子雷射、單色分光儀（monochromator），和電耦合器（Charge-Coupled Device，簡稱 CCD）。

氫離子雷射是高電流（20-30A）低電壓（200-300V）的裝置，利用氫離子氣體當作活性介質。其工作的原理是使用電源供應器提供陰極與陽極間一個適當的電壓，使陰極的電子能獲得足夠的能量，加速的衝向陽極，在由陰極衝向陽極的過程中，加速的電子會撞上離子化的氫原子，將氫離子其餘的電子激發至高能態，當電子從不同的高能態躍遷至不同的低能態時就會放出不同波長的光子，而雷射共振腔的長度及共振腔鏡面的特性為決定雷射光波長的條件；另外，我們可以利用布魯斯特角窗（Brewster window），將 TE 模的光濾掉，只剩 TM 模的光能共振成為雷射光。至於氫離子雷射的雷射波長，共多達數百條以上，在可見光部分輸出功率較強且能連續輸出的是 452.9nm、472.7nm、476.5nm、485.6nm、488.0nm、496.5nm、514.5nm、528.7nm 八條波長；在紫外光部分以 351.1/351.4 nm 和 363.8 nm 的輸出功率較強。以下的實驗數據皆是利用氫離子雷射可見光波長 488.0nm 激發。

實驗中所使用的單色分光儀為反射式光柵（grating）分光儀，其內部構造如圖 2.2(a)所示；當光進入分光儀後，由凹面鏡反射入光柵，經光柵分光後，再透過另一個凹面鏡反射入 CCD 中。至於反射式光柵分光的原則會遵守光柵方程式 2.1（grating equation），其中 λ 為入射波長， θ_i 為入射角， θ_m 為反射角， a 為光柵線週期長度；由式 2.1 中可發現當入射角 θ_i 及 m 固定時，不同入射波長會有不同的反射角 θ_m ，於是光柵便產生了分光的作用。另外色散角（angular dispersion） D 定義為 $d\theta/d\lambda$ ，由式 2.1 推算可得 D 反比於 $a \times \cos \theta_m$ ，如式 2.2 所示，當 m 固

定時，光柵線週期長度 a 越小，也就是光柵線密度越高時，色散角會越大，相對的也就是光柵分光的效果會越好。在本實驗室的單色分光儀中裝置有三片反射式光柵，規格分別為適用波長在 500nm - 光柵線密度 300 條/mm、500nm - 光柵線密度 1200 條/mm，和 300nm - 光柵線密度 1200 條/mm。在我所作的實驗當中皆是利用 500nm - 光柵線密度 300 條/mm 的光柵來進行分光。

$$a(\sin \theta_m - \sin \theta_i) = m\lambda, \quad m \text{ 為整數} \quad (2.1)$$

$$D \equiv \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{a \times \cos \theta_m} \quad (2.2)$$

在本實驗中負責量測的光偵測器為 CCD，其具有光電轉換、儲存及傳送信號電荷的功能，以下僅就其光電轉換方面加以介紹。在 CCD 中有縱方向 100 顆、橫方向 1340 顆的矽材料小光偵測器，每個大小約為 $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ ，由圖 2.3 中可知 CCD 的整體量子效率 (quantum efficiency) 對波長的關係；其中由於矽材料的能帶寬度並非無限大，以致在短波長方面的量子效率會變差，所以我們在 CCD 的紫外線部份增加特別的鍍膜，使量子效率保持在 40%；而在長波長的部分，由於矽的能隙為 1.11eV，相當於波長 1117nm，所以越接近此波長的偵測效率就越差，若長於此波長就將完全無法量測。

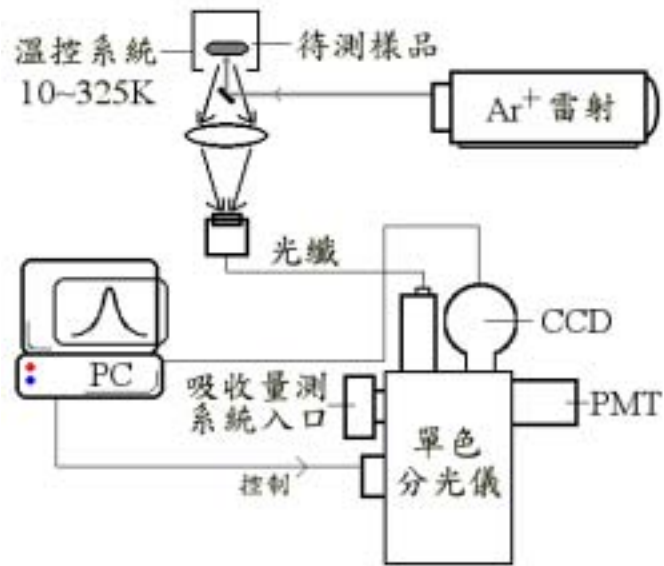


圖 2.1 光激螢光法實驗量測系統示意圖。

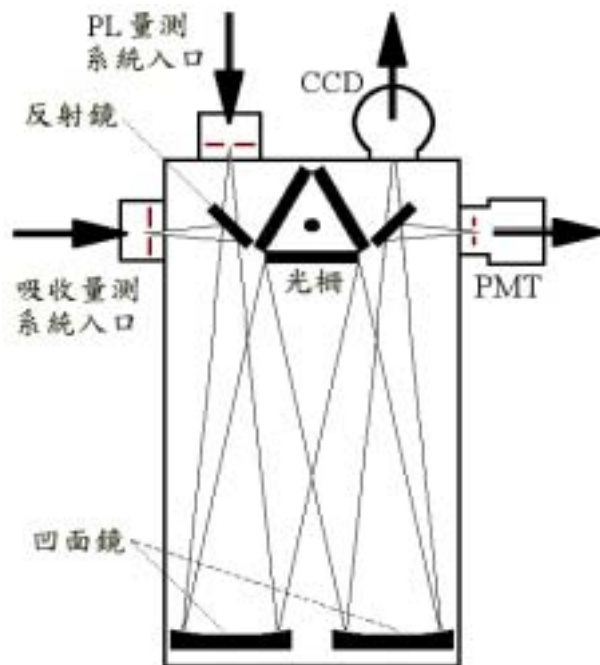


圖 2.2 反射式光柵分光儀內部構造示意圖。

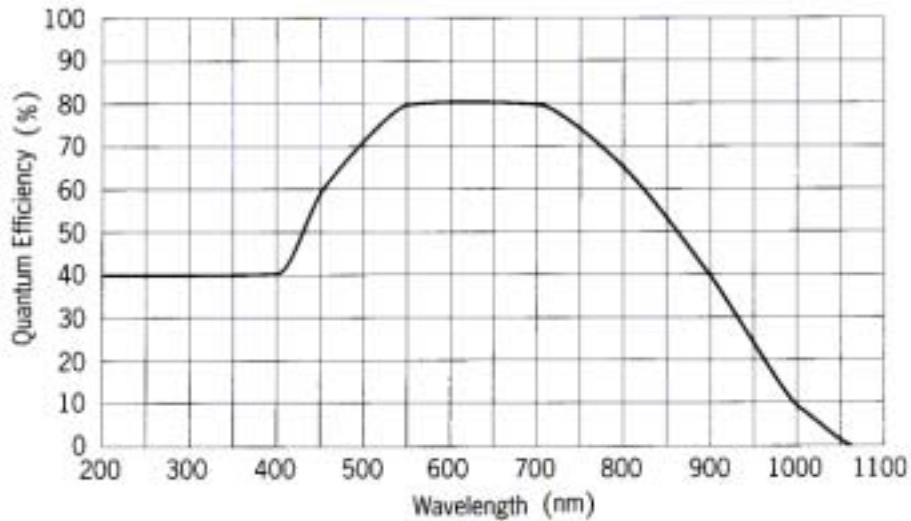


圖 2.3 CCD 整體量子效率對波長的關係圖。

2.3 實驗結果與討論

在本節中，我利用光激螢光法來研究探討黃綠光磷化鋁鎵銻 LED 在不同溫度下的元件光學性質，及其它四種不同結構的元件特性。實驗元件依結構的不同分為 A、B、C、D 四片，其中以 A 片為標準片，其元件結構如圖 2.4 所示，元件基板材料為砷化鎵，並在基板上長有防止基板吸收的高摻雜 n 態砷化鋁鎵 DBR(Distributed Bragg Reflector) 20 對，之上為一層 n 態磷化鋁鎵銻披覆層，及多量子井結構的 $(Al_{0.3}Ga_{0.7})_{0.5}In_{0.5}P / (Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 活性層，接下來是用來防止載子溢流的載子限制層 (carrier block layer) 及一層 p 態磷化鋁鎵銻披覆層，最後則是防止氧化的砷化鎵保護層 (cap layer)，而此層在進行實驗之

前，我們會先利用化學蝕刻的方式，用 5 : 1 : 1 的 $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ 溶液將其去除，以防止其吸收雷射光及元件所發出的螢光；至於 DBR 材料選擇砷化鋁鎵是由於此材料系統的電性性質較磷化鋁鎵鋼材料的電性性質來的佳。元件 B 與標準片 A 的結構不同處，僅在於元件 B 的 DBR 對數為 10 對。元件 C 與標準片 A 的結構不同處，僅在於元件 C 的井障材料之鋁成分較元件 A 的高 10%，材料為 $(\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 。而元件 D 則是在活性層旁邊較標準片 A 多長層感受張力的披覆層（Tensile Strain Barrier Cladding Layer，簡稱 TSBC）。

實驗的激發光源為氬離子雷射之波長 488.0nm，在變溫的過程中雷射輸出功率固定為 90mW，操作電流約為 28A，而溫度由室溫 300K 變化至 14K。在單色分光儀中則是使用規格 500nm - 光柵線密度 300 條/mm 的反射式光柵來分光。

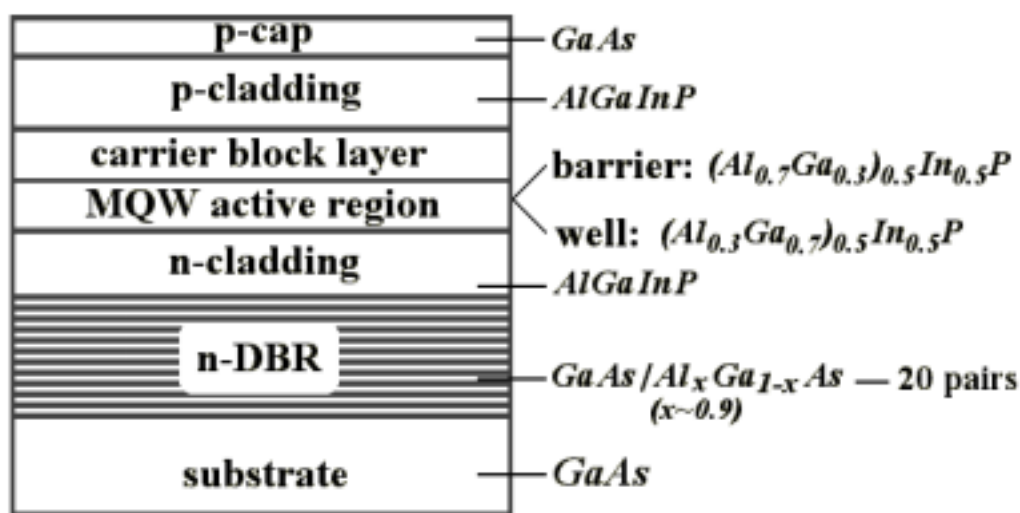


圖 2.4 實驗元件 A 的結構圖。

首先，我們先來探討元件 A 的均勻性，圖 2.5 為均勻性分析測量點的分布圖，圖 2.6 為各點的特性波長、頻寬、特性波長發光強度及整個發光頻譜所覆蓋面積積分值的 PL 發光強度；此處的頻寬是指整個發光頻譜的半高全寬（Full Width at Half Maximum，簡稱 FWHM）。由圖中我們可以清楚的發現，雖然各點的實驗結果不盡相同，不過都相差無幾，就特性波長而言最多相差 1.08nm，頻寬最多相差 0.78nm，而特性波長的發光強度方面，最強點 5 為最弱點 4 的 1.13 倍，PL 發光強度的分布則大致與特性波長發光強度的分佈相同；由這些數據中我們可以知道元件 A 的均勻性十分良好。

再來我們來探討黃綠光磷化鋁鎵銻 LED 在不同溫度下的元件光學性質，以下的實驗點皆以元件的中央點為準；圖 2.7 為元件 A 隨溫度變化的頻譜圖。圖 2.8 為溫度對特性波長的關係圖，由圖中我們可以明顯的看出來特性波長隨著溫度的下降而有藍位移的現象，於室溫 300K 時元件 A 的特性波長為 574.5nm，當溫度一路下降到 14K 時，特性波長則藍位移至 553.2nm；此現象是由於當溫度下降時，晶格的振動減小導致原子間平均距離縮短，使得原子與原子間的鍵結增強，而對於電子的束縛力也跟著增加，因此造成能隙的寬度變寬，也就會造成特性波長隨著溫度的降低而變短。

圖 2.9 為元件 A 之溫度對頻寬的關係圖；由圖中我們可以發現當溫度下降時，頻寬會隨之變窄，這是由於導電帶與價電帶的能帶寬度在低溫時會因為熱效應的減低而變薄，因此導致頻寬變窄。圖 2.10 為

元件 A 之溫度對發光強度的關係圖，其中的發光強度可分為特性波長的發光強度及 PL 發光強度；由圖 2.10(a)及(b)中可知，不論是特性波長的發光強度或 PL 的發光強度都會隨著溫度的下降而快速的增加，這是因為當溫度降低時，放光結合 (radiative recombination) 取得主宰，因此元件的總發光量增加，也就是 PL 發光強度增加，而由於溫度的降低，造成頻寬的變窄，使得大部分的發光會更集中在特性波長處，因此使得特性波長的發光強度也會隨溫度的下降而增加。

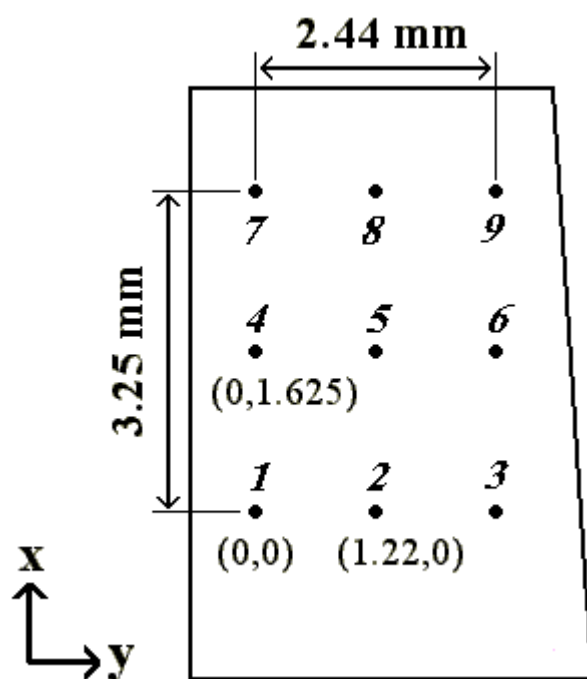


圖 2.5 實驗元件 A 之均勻性分析測量點分布圖。

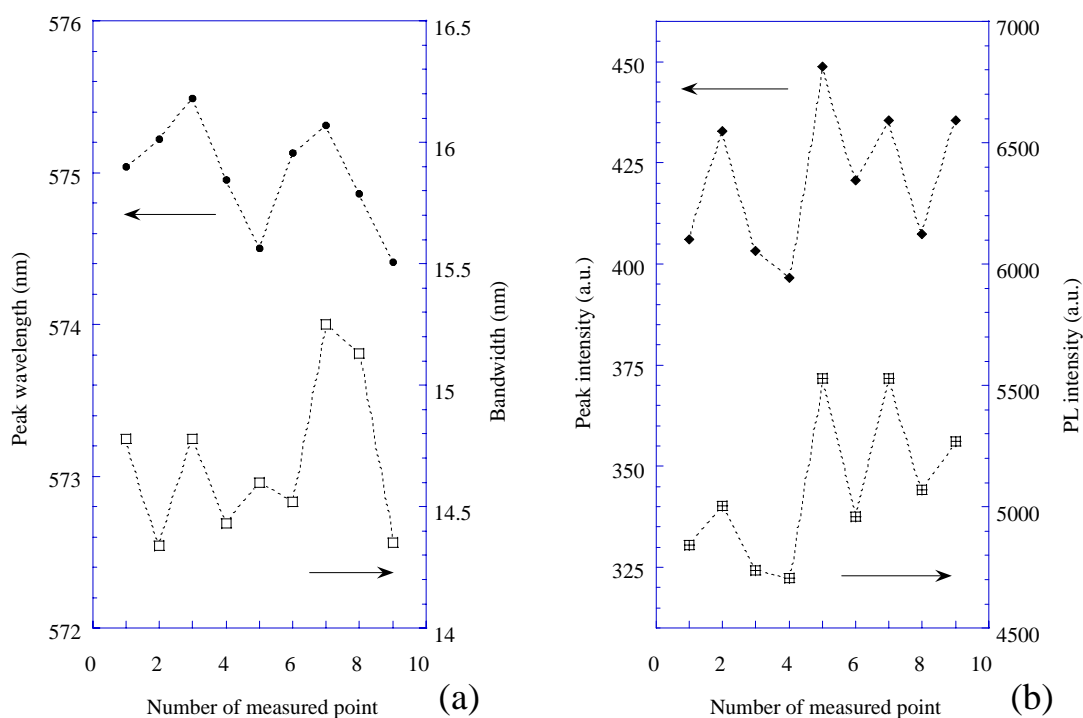


圖 2.6 實驗元件 A 之均勻性分析結果圖；橫軸為量測點的編號，(a)的縱軸分別為特性波長及頻寬，(b)的縱軸分別為特性波長發光強度，及整個發光頻譜所覆蓋面積的積分值，稱 PL 發光強度。

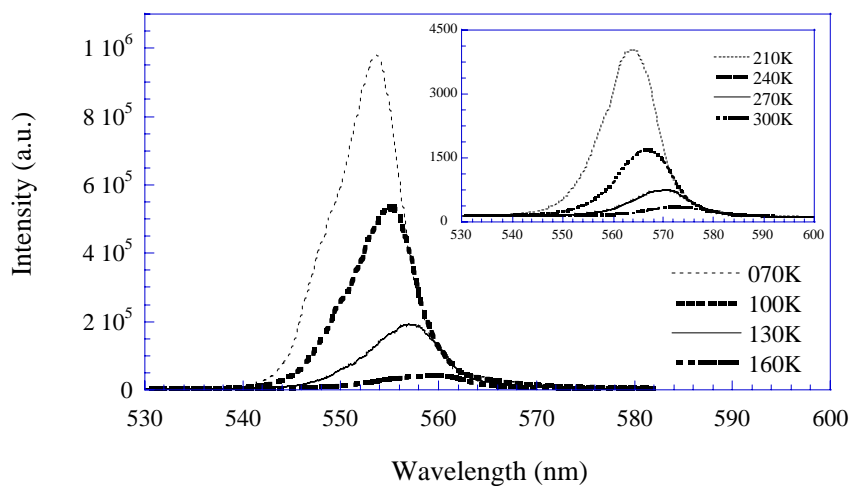


圖 2.7 實驗元件 A 之不同溫度下的頻譜圖。

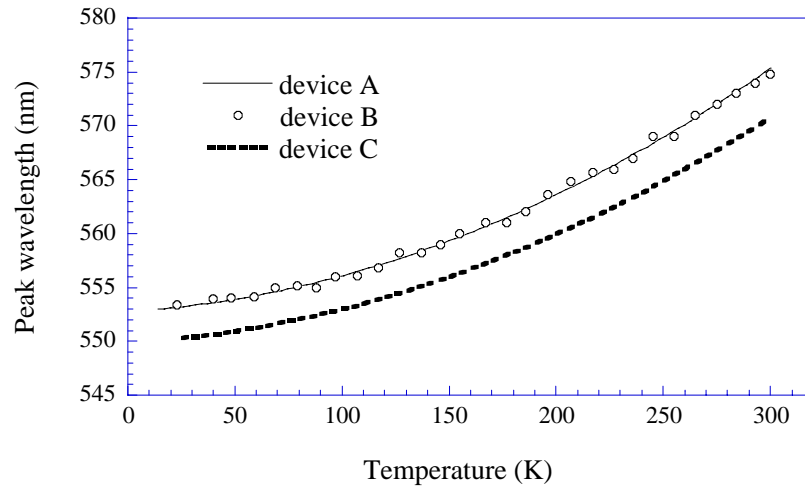


圖 2.8 溫度對特性波長的關係圖；其中由於元件 A 與元件 B 的波長幾乎相同，因此將元件 B 的波長用圓圈表示以利區別。

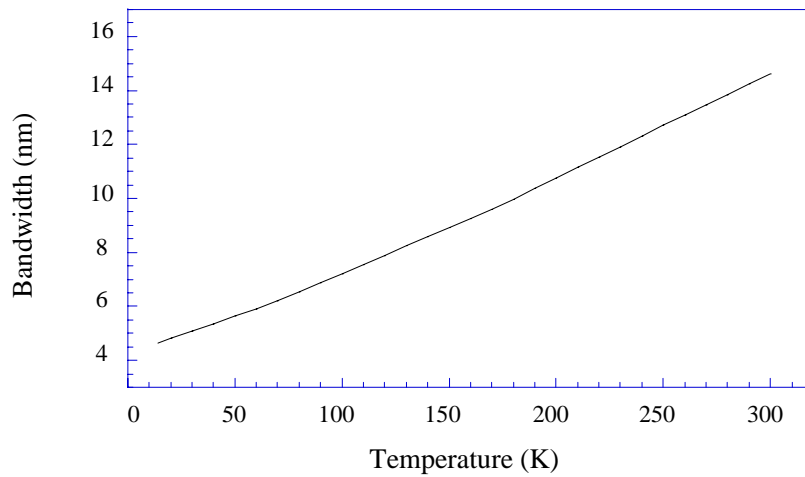


圖 2.9 實驗元件 A 之溫度對頻寬的關係圖。

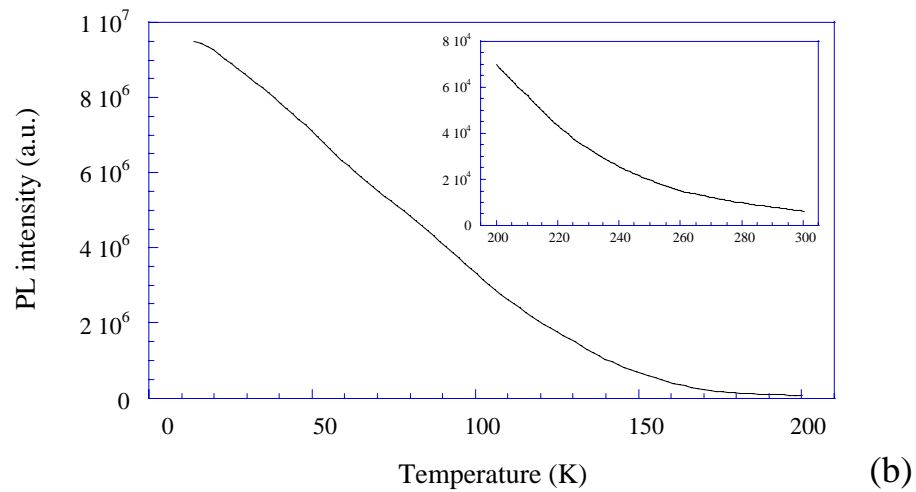
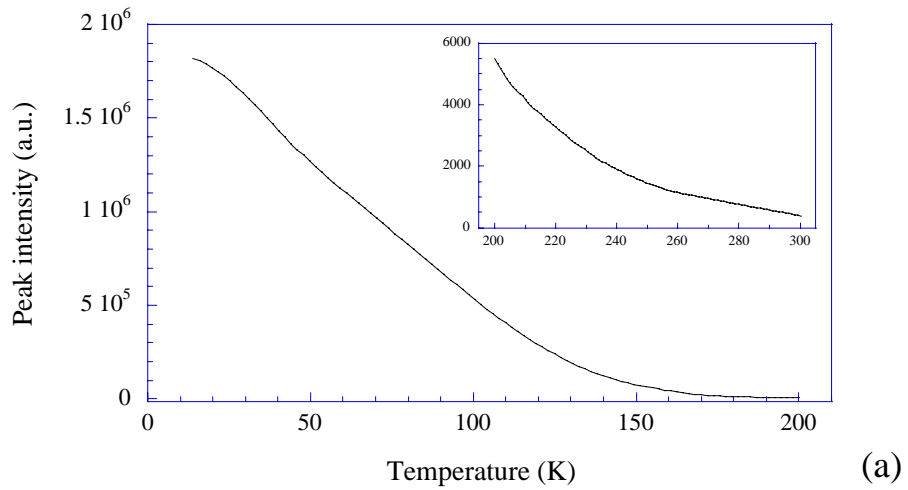


圖 2.10 實驗元件 A 之溫度對發光強度的關係圖;(a)的縱軸為特性波長的發光強度，(b)的縱軸為 PL 發光強度。

在瞭解黃綠光磷化鋁鎵銻 LED 於不同溫度下的元件性質後，我試著變化激發元件的雷射強度，探討在各種溫度下之不同激發功率對元件性質的影響。由於在雷射至實驗元件間有許多的光學元件，因此雷射輸出的功率大小，並不等於元件實際的激發強度，所以我們必須先得到雷射至實驗元件間之各光學元件對 488.0nm 的穿透(反射)率，如此才能準確的得知元件實際被激發的強度；各光學元件對於 488.0nm 的穿透(反射)率如表 2.1 所示，當雷射激發功率為 90mW 時，雷射光點大小為 $6.65 \times 10^{-5} \text{cm}^2$ ，以下各圖中所表示的激發功率為雷射實際所發出的功率。

圖 2.11 為元件 A 在低溫 100K 時之不同激發功率的頻譜圖，由圖中我們可以看出增加激發功率只會改變元件的發光強度，並不會使特性波長有所改變，這是因為磷化物材料的能態密度較大，因此不易造成能隙的改變；此現象於圖 2.12 中更清楚易見，不論是在室溫或在低溫下，元件的特性波長都不會因為激發功率的增加而改變。圖 2.13 為元件 A 於各溫度下之激發功率對 PL 發光強度的關係圖，由圖中我們可發現當激發功率增加，被激發至導電帶的電子數就會越多，因此元件的 PL 發光強度也就會越強，這是在各溫度下我們都會發現的現象，但激發功率與 PL 發光強度間的關係，卻會隨著溫度而有所不同，在低溫時其斜率會較在高溫時略低一點，這就顯示了非放光結合 (nonradiative recombination) 在低溫時較不活躍。 [78]

表 2.1 各光學元件對雷射波長 488.0nm 的穿透(反射)率。

光學元件	濾鏡(bandpass filter) 穿透率	小反射鏡 反射率	聚焦透鏡 穿透率	石英窗 穿透率
穿透(反射)率	52.7%	80.8%	92.2%	87.9%

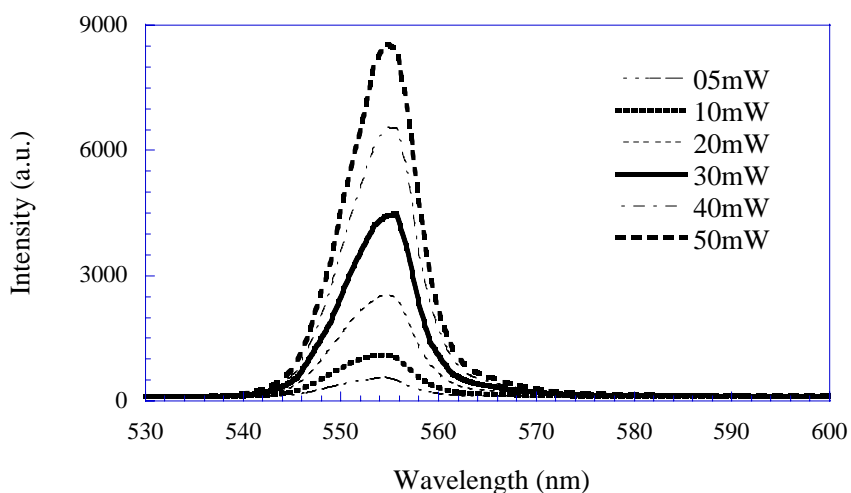


圖 2.11 實驗元件 A 於低溫 100K 時之不同激發功率的頻譜圖。

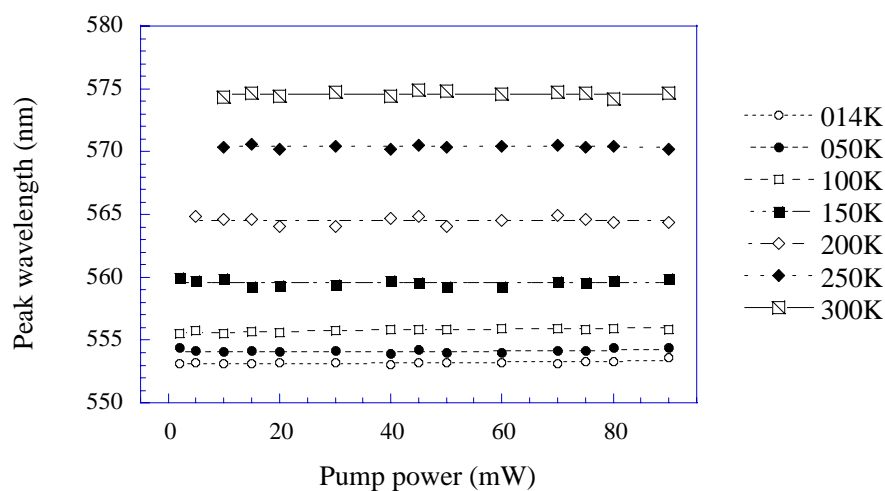


圖 2.12 實驗元件 A 於各溫度下之激發功率對特性波長的關係圖。

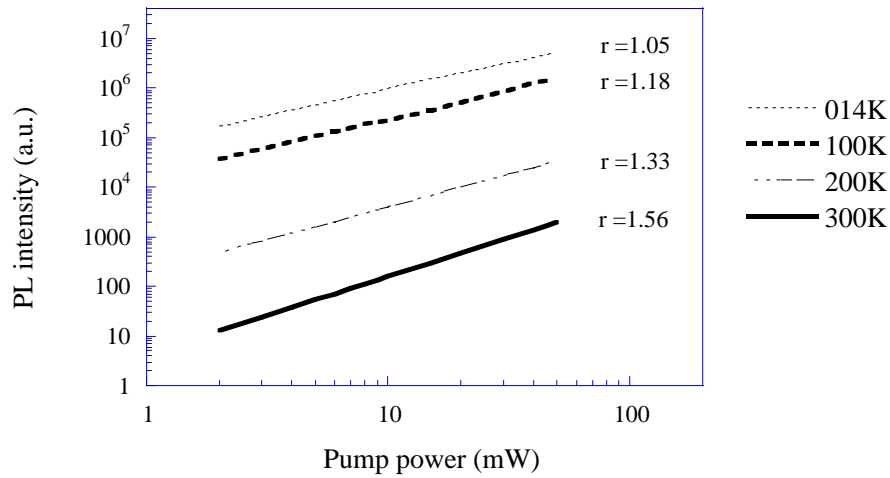


圖 2.13 實驗元件 A 於各溫度下之激發功率對 PL 發光強度的關係圖； r 為圖形斜率。

由於 DBR 會將活性層向基板方向所發出的光反射回正面方向，也就是說 DBR 在 LED 中扮演著防止基板吸收的角色，由此可知若 LED 元件中的 DBR 反射率越好，代表著其發光的強度也就越強。元件 B 的 DBR 對數為標準片 A 的一半，依據多層膜反射的原理，我們可以推測元件 B 的發光強度會較元件 A 來的弱，但特性波長並不會平移，由圖 2.14 中我們可以得到印證，試著比較(a)、(b)圖，我們可以明顯的看出兩元件特性波長隨溫度降低的藍位移現象，另外由圖 2.8 中我們也可以明顯的看出兩元件之特性波長隨溫度的曲線是完全一致的；但是於發光強度方面兩者就相差許多，實驗結果與我們原先預測的一致，元件 A 的發光強度遠遠超過元件 B，但由於兩者強度實在相差太多，且在室溫下特別明顯，因此我推論元件 A 的晶體結構本身就較元件 B 來的佳，再加上 DBR 的效應，造成兩者的發光強度有如此大的差異。

由 1.3.2 小節中的式 1.8，我們可以知道當井深變深時，第一階能階距離井底的能量差會變大，也就是說當井障材料的能隙變大時，元件的發光波長會變短；元件 C 之井障材料為 $(Al_{0.8}Ga_{0.2})_{0.5}In_{0.5}P$ ，其能隙較標準片 A 的井障材料 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 之能隙大，因此如圖 2.8 所示，室溫下元件 C 的發光波長為 571nm，元件 A 為 754.5nm，元件 C 的波長果然較元件 A 來的短，但由於兩者其餘的結構是相同的，因此特性波長隨溫度變化的趨勢有相當的一致性；另外，由圖 2.15 中我們可以知道井障材料的能隙變大時，除了波長變短外，發光的效率也會較好，這是因為電子分佈在量子井的機率增加，且光子的侷限(confine)變好的緣故。

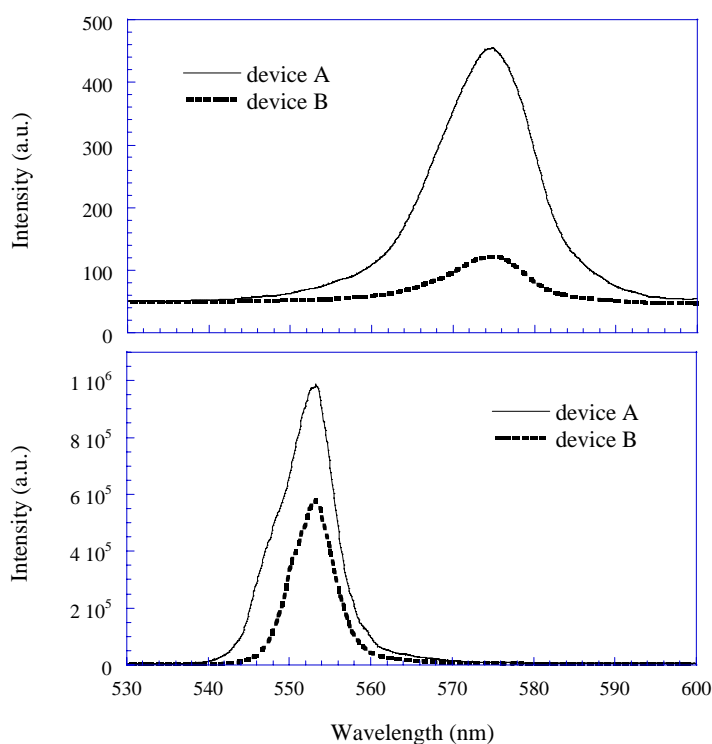


圖 2.14 元件 A 與元件 B 於室溫及低溫下的發光頻譜圖。(a)為 300K 室溫，強度比為 3.7 : 1；(b)為 70K，強度比為 1.7 : 1。

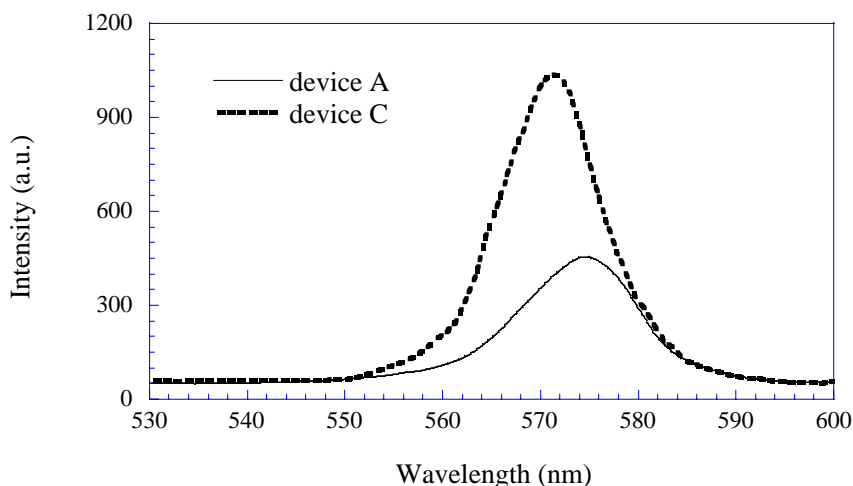


圖 2.15 元件 A 與元件 C 於室溫下的發光頻譜圖。

所謂的 TSBC 就是在活性層旁邊多長一層感受張力 (tensile strain) 的披覆層，其能隙較附近的披覆層來的大，主要的功能在於使活性層中光子和電子的侷限變好，增加元件發光的效率^[79]，另外還可以增加元件設計的彈性^[80]；至於為何要使其感受張力方面，則是因為張力會將導電帶的 Γ 能帶向下拉，將 X 能帶向上拉^[81]，對於間接能隙的披覆層而言，感受張力會使能隙變大，因而使得侷限的效果更佳，且由於 TSBC 的厚度都不會超過臨界厚度，因此在介面上並不會因為應力的影響而產生缺陷。TSBC 對於活性層的另一個影響則是會使發光波長變短，因為 TSBC 的晶格常數較小，相對的也就是會使活性層感受到些微壓力，因此使得能隙變大^[15]，發光波長變短，由圖 2.16 中我們可以明顯的看出波長變短的現象；另外，由圖 2.17 中我們也可以清楚的看到 TSBC 對特性波長發光強度的影響。

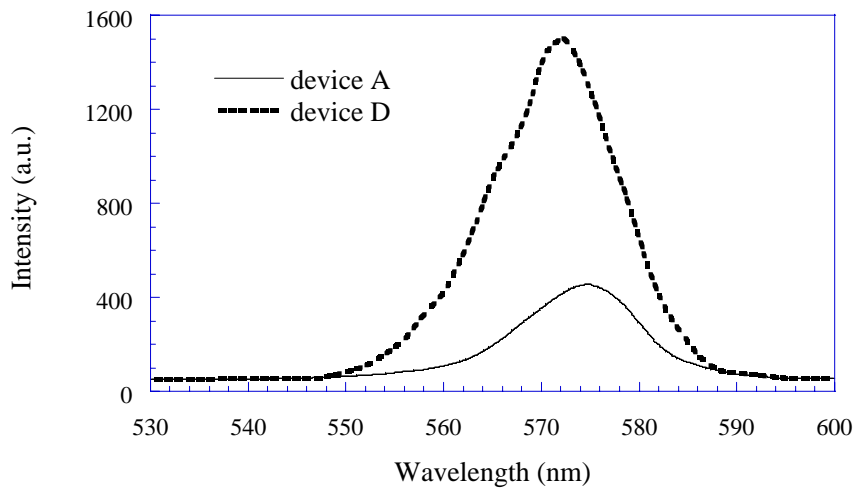


圖 2.16 元件 A 與元件 D 於室溫下的發光頻譜圖。

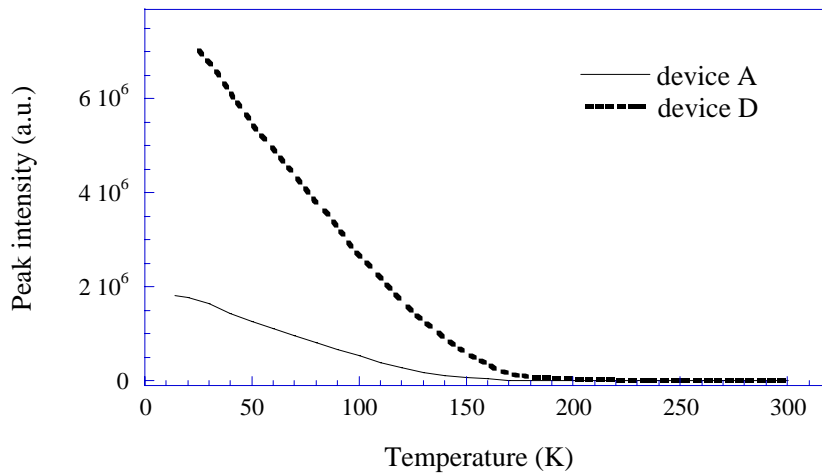


圖 2.17 元件 A 與元件 D 之溫度對特性波長發光強度的關係圖。

第三章 黃綠光磷化鋁鎵銻面射型半導體雷射之模擬

磷化鋁鎵銻 VCSEL 在近幾年引起許多的注意與研究，尤其是偏短波長的方面，更是新起的發展趨勢，因此包括其特性、材料的運用或結構的設計上都有許多值得我們研究及改進的地方。在本章節中，首先說明了 VCSEL 的優點及應用，再配合上第一章第三小節中的黃綠光的優點，使我們能肯定 570nm 黃綠光磷化鋁鎵銻 VCSEL 的重要性，進而利用模擬軟體 PICS3D 來研究其特性及設計出較佳的元件結構。另外，在本章節中還詳細說明了多層膜反射層的基本原理，並設計適用於波長 570nm 的 DBR 並研究其性質。

本篇論文中所使用的模擬軟體為加拿大 Crosslight 公司的商用套裝軟體 PICS3D，全名為 Photonic Integrated Circuit Simulator in 3D，是一套可以模擬三維半導體雷射元件的程式；它能模擬的元件結構包括了 FPL(Fabry-Perot Laser)、DBRL(Distributed Bragg Reflector Laser)、DFBL(Distributed Feedback Laser)、MEDFBL(Multielectrode Distributed Feedback Laser)，和 VCSEL 等，能模擬的材料包括 GaAs、AlGaAs、GaInAsP、InP、AlGaInP、GaInN、AlInN 等，在經過一連串的模擬操作程序後，我們可以得到各項有關元件的光學與電子特性的模擬結果。

3.1 面射型雷射之優點與應用

VCSEL 和側射型雷射 (Edge Emitting Laser, 簡稱 EEL) 最大的不同, 在於 VCSEL 的共振腔方向平行長晶軸方向, 而 EEL 的共振腔方向垂直長晶軸方向。

由於 VCSEL 的發光方向是由正面而非側面, 所以雷射光點會比較圓、發散角比較小, 因此用在光纖耦合上容易對準, 可以節省許多光纖對準的封裝成本; 且 VCSEL 的封裝方式和傳統利用 LED 作為光源的網路系統是完全可以相容的, 故從前的整個裝配線都無須再更改, 但傳輸速率與距離卻可以大幅提升。VCSEL 正面發光的優點, 還可以應用在製作二維通信陣列上, 尤其適合用於板對板 (board to board) 的網路傳輸或二維光纖束的傳輸端, 這是傳統的 EEL 所無法做到的。至於在光儲存方面, 也因為 VCSEL 正面發光的緣故, 可以簡化讀寫頭的光學設計。另外, VCSEL 還有兩個優點: 一為臨界電流很低, 通常不到幾個 mA^[82], 甚至還有的小於 $10\mu\text{A}$ ^[83]; 二為發光的頻寬窄, 此乃由於 VCSEL 的共振腔長度很短, 因此造成縱向模式 (longitudinal mode) 為單一模式 (single mode) 所致。^[84]

若就製成方面而言, EEL 於晶片製造結束後, 必須將晶片劈裂成晶條, 並進行側面的鍍膜, 此製造過程十分複雜且很耗時; 而 VCSEL 因為不是利用晶體自然斷裂面作為共振腔的反射面, 所以無須進行鍍膜或劈裂後才可做元件量測, 如此可節省下可觀的製造及量測時間。^[85]

3.2 多層膜反射層之原理與模擬分析

在 VCSEL 的結構中，最特殊的便是上下的多層膜反射層，又稱為 DBR，由於 DBR 是被當作共振腔兩面的反射鏡來使用，因此其特性、材料的選擇及結構的設計就變的十分的重要。本小節先說明多層膜反射的原理，再利用模擬結果來研究出適用於 570nm 黃綠光磷化鋁鎵銻 VCSEL 的 DBR，由模擬結果中也可以清楚的瞭解到此 DBR 所具有的特性。

3.2.1 多層膜反射原理

想了解多層膜反射的情形，首先必須先了解單層薄片反射的原理及計算的方式，如此才能將原理推廣至多層膜結構，徹底的了解並計算其反射的結果。

有一薄片置於空氣中，空氣折射率為 n_0 ，如圖 3.1 所示，薄片就如同 Etalon 般均勻且上下兩平面互相平行，其厚度為 d ，折射率為 n 。今若有一道電場為 E_0 的光束射入薄片的上平面，根據 Snell 定律可知入射角 θ_i 和折射角 θ_t 的關係，如式 3.1 所示；令空氣對薄片的反射係數為 r 、折射係數為 t ，薄片對空氣的反射係數為 r' 、折射係數為 t' ，另外薄片一平面至另一平面間來回一趟的光程相位差設為 δ ， δ 的表示式為式 3.2，式中的 λ_0 為入射光波長於真空中的值，而一次反射電場設為 E_1 ，二次反射電場設為 E_2 依此類推。根據反射定律我們可知 E_1 、 E_2 、 E_3 ... 等與 E_0 的關係，如式 3.3 所示。

$$n_0 \sin \theta_i = n \sin \theta_t \quad (3.1)$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} 2nd \cos \theta_t \quad (3.2)$$

$$E_1 = E_0 r \quad (3.3a)$$

$$E_2 = E_0 t r' t' e^{-i\delta} \quad (3.3b)$$

$$E_3 = E_0 t r' r' r' t' e^{-2i\delta} \quad (3.3c)$$

將 E_1 、 E_2 、 E_3 ...等疊加後，可得薄片的總反射電場 E_{0r} ，如式 3.4 所示。

$$\begin{aligned} E_{0r} &= E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \cdots \\ &= E_0 r + E_0 t r' t' e^{-i\delta} + E_0 t r'^3 t' e^{-2i\delta} + E_0 t r'^5 t' e^{-3i\delta} \cdots \end{aligned} \quad (3.4)$$

將 $r = -r'$ 及 $tt' = 1-r^2$ 的關係式代入，得總反射電場 E_{0r} 如式 3.5 所示。

$$E_{0r} = E_0 r - E_0 r (1 - r^2) e^{-i\delta} (1 + r^2 e^{-i\delta} + r^4 e^{-2i\delta} \cdots) \quad (3.5)$$

因為 $r < 1$ ，所以總反射電場 E_{0r} 可利用無限等比級數的公式運算，得到式 3.6，接著我們便可知單層薄片整體的反射率如式 3.7 所示。

$$E_{0r} = E_0 \frac{r e^{i\delta/2} - r e^{-i\delta/2}}{e^{i\delta/2} - r^2 e^{-i\delta/2}} \quad (3.6)$$

$$R = \left(\frac{r e^{i\delta/2} - r e^{-i\delta/2}}{e^{i\delta/2} - r^2 e^{-i\delta/2}} \right)^2 \quad (3.7)$$

除了利用疊加各次反射的電場來求得整體的反射率外，尚可利用較簡單明瞭的矩陣方法 (matrix methods) 來求得；我們可以將介面表示成像式 3.8a 的矩陣形式，其中 r 為介面的反射係數，再將材料中的光程表示成像式 3.8b 的矩陣形式，然後沿著光的路徑，將所有行經的矩陣依照先後次序一一相乘，如此便可得到一個 2×2 的矩陣 S ，而矩

陣元素 S_{01} 除以元素 S_{11} ，便正是整體的反射係數。

$$F = \begin{bmatrix} 1 & r \\ r & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8a)$$

$$L = \begin{bmatrix} e^{-i\delta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\delta/2} \end{bmatrix} \quad (3.8b)$$

以上一段的薄片為例子，其光行徑的矩陣 S 如式 3.9 所示，我們將會發現，把矩陣元素 S_{01} 除以元素 S_{11} 後再平方的式 3.10，會等於式 3.7。

$$\begin{aligned} S &= F_1 L F_2 \\ &= \begin{bmatrix} 1 & r \\ r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\delta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\delta/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & r' \\ r' & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} e^{-i\delta/2} - r^2 e^{i\delta/2} & r e^{i\delta/2} - r e^{-i\delta/2} \\ r e^{-i\delta/2} - r e^{i\delta/2} & e^{i\delta/2} - r^2 e^{-i\delta/2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$R = \left(\frac{S_{01}}{S_{11}} \right)^2 = \left(\frac{r e^{i\delta/2} - r e^{-i\delta/2}}{e^{i\delta/2} - r^2 e^{-i\delta/2}} \right)^2 \quad (3.10)$$

有了這個簡單明瞭的矩陣相乘法，不論是多少層數的薄膜，我們都可以很快的推算出它的整體反射率。

另外，由式 3.10 中我們可以發現，當 $\delta = m\pi$ ， m 為奇數整數時， R 會有最大值，如此便是表示當式 3.11 成立時，反射層會達到最大的反射效果，因此當我們在設計結構厚度時，必須特別注意此點。

$$nd = \frac{m\lambda}{4 \cos \theta_t}, \quad m \text{ 為奇數整數} \quad (3.11)$$

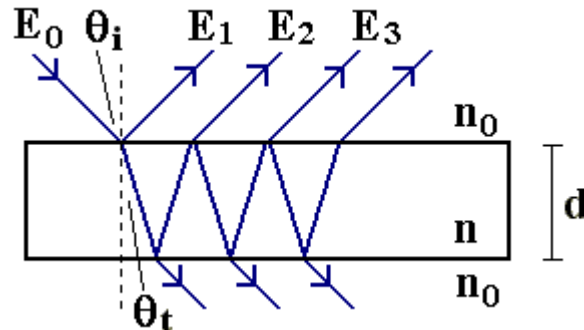


圖 3.1 光波入射單層薄片的模型圖。空氣折射率為 n_0 ，薄片折射率為 n ，薄片厚度為 d ； θ_i 為入射角， θ_t 為折射角； E_0 為入射電場， E_1 、 E_2 、 E_3 ... 為反射電場。

3.2.2 多層膜反射層之設計與模擬

DBR 為高折射率材料和低折射率材料重複週期性排列的多層膜，其反射效果的好壞，取決於材料選擇及單層厚度等結構的設計是否符合欲反射的波長。

若想得到適用於 570nm 黃綠光磷化鋁鎵銻 VCSEL 的 DBR，首先必須決定構成 DBR 的兩種材料為何。由於活性層發射的光為 570nm，因此在選擇 DBR 材料時要考慮晶格匹配且兩者能隙皆大於 2.175eV 者；另外由反射定律可知，當兩者的折射率差越大時，介面的反射效果便會越好。綜合以上幾點，我們評估發現最適合 570nm 黃綠光磷化鋁鎵銻 VCSEL 之 DBR 的兩種材料為： $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P$ （能隙為 2.215eV，對應波長 570nm 的折射率為 3.522）和 $Al_{0.5}In_{0.5}P$ （能隙為 2.35eV，對應波長 570nm 的折射率為 3.282）^[86]，可由圖 3.3 中得到證

實。至於 DBR 各層厚度方面，則必須符合式 3.11，其中為了降低材料成本， m 多取為 1，且由於是垂直入射， $\cos\theta_t$ 會等於 1；經過計算得知，在針對波長 570nm 的 $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P$ DBR 中，各單層厚度為 40.46nm/43.42nm。圖 3.2 為 PICS3D 模擬針對 570nm 所設計的 $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P$ DBR 在不同對數時的反射頻譜。圖 3.4 為 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P$ DBR (x 分別為 0.5 0.6 和 0.7) 於波長 570nm 的穿透率與對數的關係圖，由圖中可發現橫軸所取的對數之穿透率都不到一成，是由於 VCSEL 的共振腔長度短，能產生增益的長度更短，因此共振腔兩平面的損失必須很小，如此才有可能產生雷射光。圖 3.3 則是在實際長晶的過程中，若 DBR 各層厚度皆有 $\pm 1\%$ 誤差時的反射頻譜圖，由圖中可看出厚度誤差對 DBR 反射頻譜的影響。

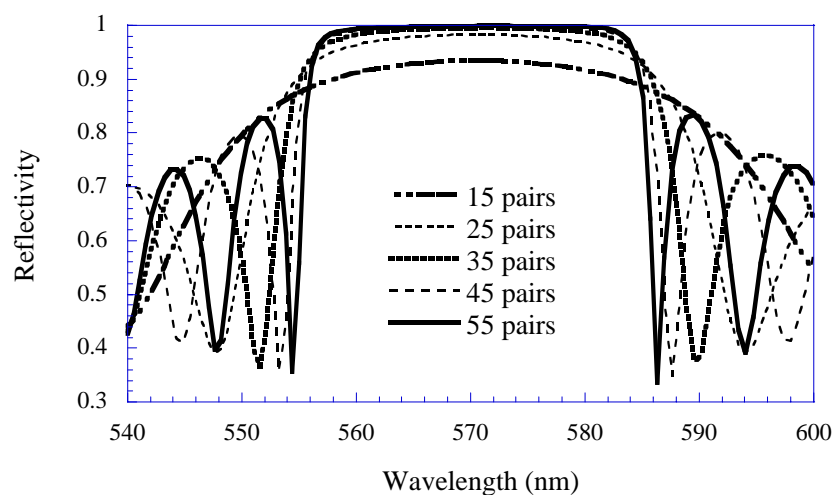


圖 3.2 利用 PICS3D 模擬 $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P$ DBR 於不同對數時的反射頻譜圖；此 DBR 的結構是針對波長 570nm 設計。

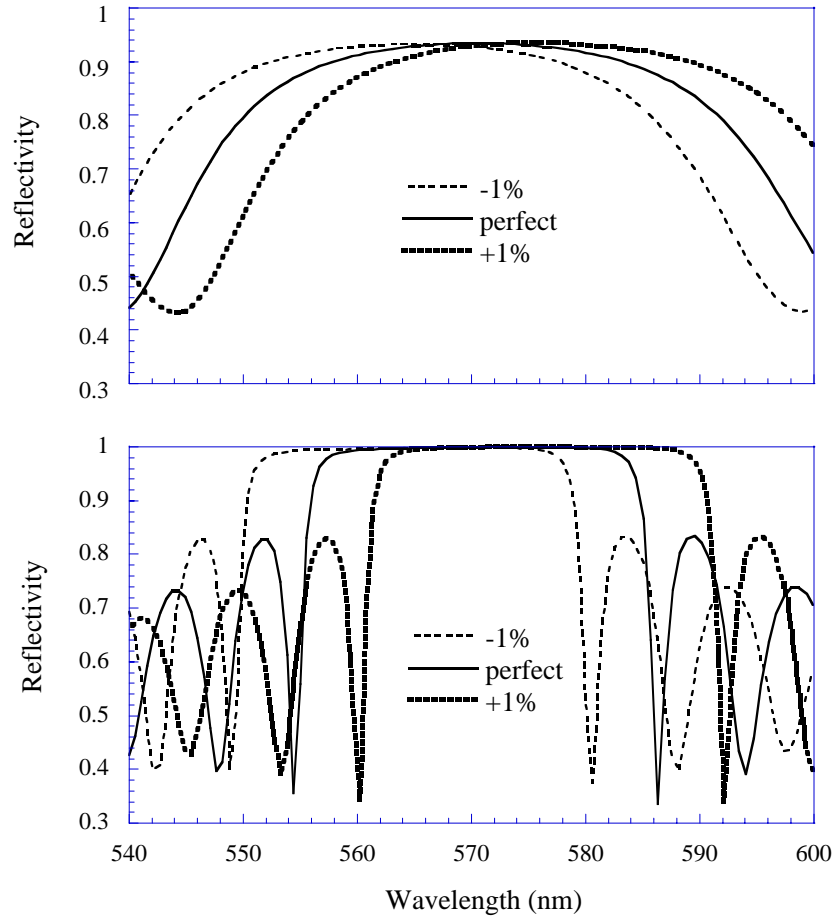


圖 3.3 DBR 各層厚度皆有 $\pm 1\%$ 誤差時的反射頻譜圖，頻譜平移量約為 5nm。上圖為 15 對時， $\pm 1\%$ 的厚度誤差造成 570nm 反射率變化約 0.006；下圖為 55 對時， $\pm 1\%$ 的厚度誤差造成 570nm 反射率變化約 0.0002。

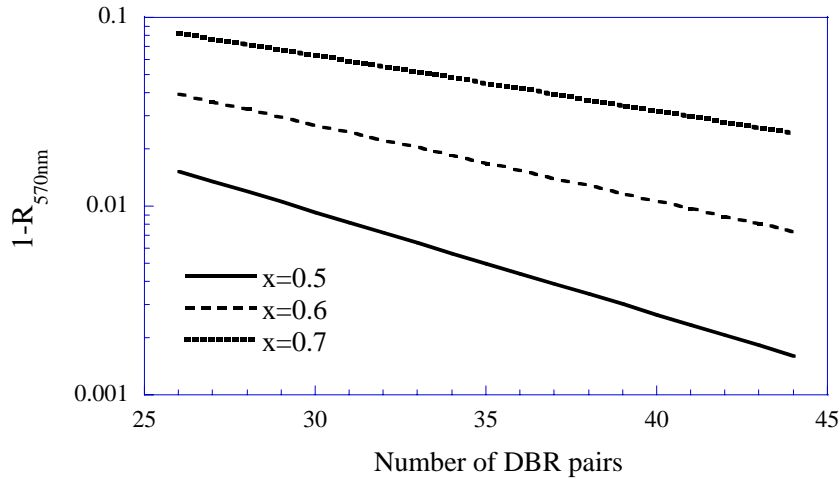


圖 3.4 利用 PICS3D 模擬材料為 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P/Al_{0.5}In_{0.5}P$ (x 分別為 0.5、0.6 和 0.7) 的 DBR 於 570nm 之穿透率與對數的關係圖；這些 DBR 的結構是針對波長 570nm 設計。由此圖可看出當 DBR 兩種材料的折射率越接近時，在同樣對數下波長 570nm 的穿透率會越大，反射的效率會越差，但若使用 $x < 0.5$ 的磷化鋁鎵鋼材料，波長 570nm 的光將大部分會被吸收，而無法達到高反射的效果。

3.3 黃綠光磷化鋁鎵銻面射型雷射之設計與分析

在本節中，我利用商用套裝模擬軟體 PICS3D 來研究探討 570nm VCSEL 的結構設計及元件性質；首先，我先設計一個初步模擬的元件結構，使其能正常的在 570nm 工作；接著變化此元件結構中的共振腔長度，來探討其變化與雷射效能間的關係；之後變化活性層的量子井數目，找到較適合此結構的量子井個數，且去探討其造成的原因；再接下來我採用之前所得的較佳量子井個數結構，去改變其 p 態-DBR 的對數及摻雜濃度，來瞭解其對雷射效能的影響。在經過一些結構上的探討後，我利用已被討論過的較佳結構去進行詳細的元件性質模擬；藉由模擬出來的結果，我們可以對此磷化鋁鎵銻 570nm VCSEL 的元件結構特性與光學特性有更深一步的瞭解。

在實際模擬元件時，發現如果單使用量子井結構使波長短至 570nm，如此的增益 (gain) 會很小無法抵銷損失 (loss) 發出雷射光，因此必須考慮加入應力的結構。初步模擬的元件結構如圖 3.5 所示，量子井的個數就先暫訂為三個；井的材料選擇就如同在 1.1.3 小節中所提的原因，維持鋁成分為 15%，而為了使井的能隙寬度變寬，所以將銻的成分減少至 42%，這在實際長晶的技術上是可以辦到的^[87]；而井障的材料之所以將鋁成分設定為 35%，主要是因為在間接能隙 ($x > 0.7$) 提高鋁成分，對於能隙寬度增加的貢獻較不明顯，因此在衡量了鋁成分太多會造成長晶環境的污染，以及使井深加深的兩個條件後，決定

採用 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 作為井障的材料^[71]；利用 1.1.3 小節中的方法，發現當井的材料為 $Al_{0.15}Ga_{0.43}In_{0.42}P$ ，井障的材料為 $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$ 時，井寬必須為 6.31nm，自發輻射的光波長才會為 570nm。至於 DBR 的兩種材料，便是延續 3.2.2 小節中所選定的 $(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.5}In_{0.5}P$ 和 $Al_{0.5}In_{0.5}P$ ，其中將 $Al_{0.5}In_{0.5}P$ 層緊鄰著共振腔，乃是因為其能隙較大，會有較好的載子與光子侷限；對數方面則暫訂為 n 態 50 對（570nm 反射率：99.9%），p 態 35 對（570nm 反射率：99.5%）。而為了使共振腔中駐波強度的最高點在活性層的中央，因此調整空間層（spacer）的寬度，使整個共振腔長恰為一個波長。最後，在元件半徑的方面，則是先採用文獻中^[83]的半徑值 $3\mu m$ ，之後再進行評估探討。

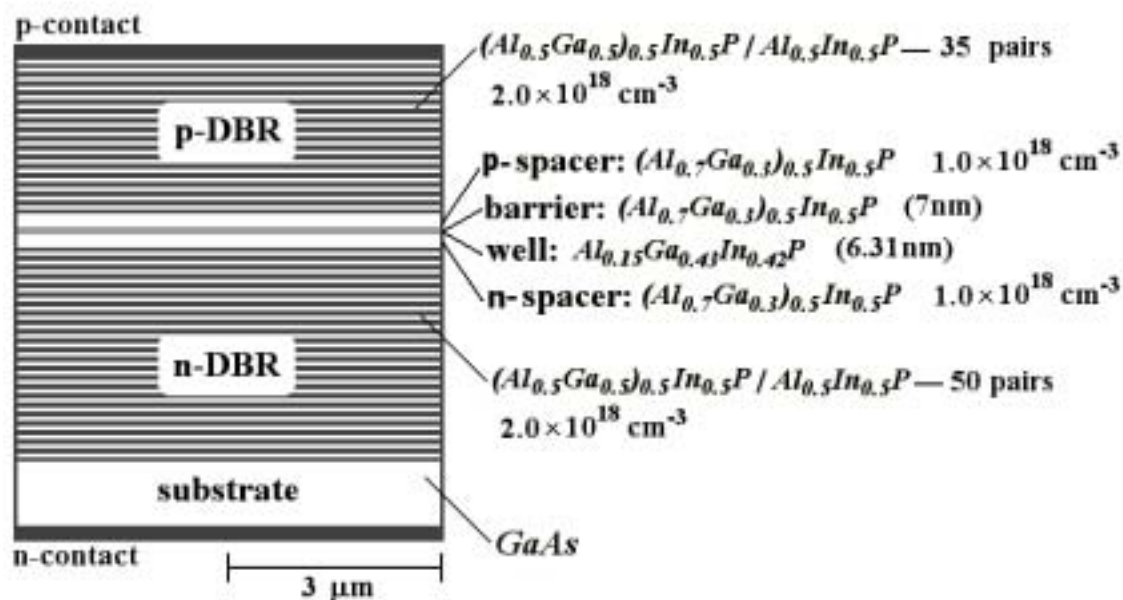


圖 3.5 初步模擬的元件結構圖。

首先，我先變化初步模擬元件的共振腔長，調整 n 及 p 態的空間層寬度為 60.31nm、144.08nm，和 227.86nm，對應共振腔長分別為一個波長（兩個駐波）、兩個波長（四個駐波），和三個波長（六個駐波），看其輸入電流對輸出功率間的關係，如圖 3.6 所示；由圖中我們可以看到，當腔長變長時，臨界電流明顯的增加且量子效率也變差，這是由於共振腔的長度增加時，上下空間層的總損失會增加，且光波每來回增益區一趟的時間會增長，因此使臨界電流增加，且量子效率變差；所以在設計共振腔長的方面，我選擇將其固定為一個波長。另外，由於縱向模式的 $\Delta\lambda$ 正比於共振腔長，因此較短的共振腔長除了可以提高雷射效能外，還可以維持雷射光的縱向模式是單一模式。

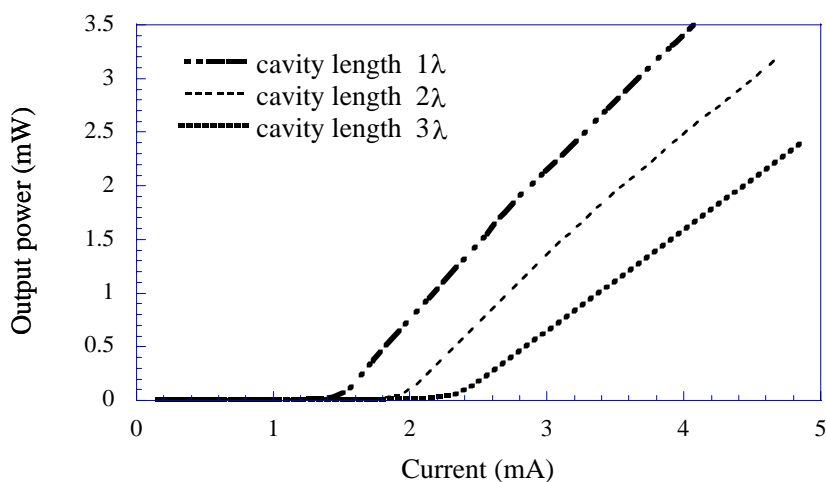


圖 3.6 不同雷射共振腔長（一至三個波長）的輸入電流對輸出功率圖。臨界電流分別為 1.4mA、1.9mA，和 2.3mA；量子效率分別為 1.24mW/mA、1.12mW/mA，和 0.88mW/mA。

在磷化鋁鎵銻 VCSEL 的文獻中，實際元件的量子井個數不盡相同，有一個^[88]、二個^{[89],[90]}、三個^{[70],[72],[91]-[93]}、四個^{[94],[95]}，或五個^[96]等，在這裡我改變量子井的個數由一個至八個，個別的臨界電流值如圖 3.7 所示，其中以四個量子井的臨界電流最低，這是由於少量子井個數時，載子溢流的情性會很嚴重，如表 3.1 所示；而當量子井個數增多時，偏離活性層中央的量子井和光子駐波的疊合很差，如圖 3.9 所示，因此在相同的注入電流下，多量子井個數會造成活性層的增益減低；由於這兩個條件的相互作用，造成不同量子井個數的臨界電流曲線在四個時產生最小值；在之後的模擬元件中，我將量子井的個數皆改為最佳值：四個。圖 3.8 為四個量子井時的活性層電子電洞結合率，由圖中可以看得出來，除了右邊也就是靠近 p 態的量子井結合率稍微高了一點外，其他量子井的結合率幾乎是相等的，這與在模擬氮化物時所得到的結果大不相同^[97]，由於氮化物的電子電洞質量相差很大^[98]，使得電子電洞在氮化物中的移動率（mobility）相差很大，所以造成靠近 p 態的量子井結合率相當的大，依此向圖的左邊也就是向靠近 n 態的區域遞減，但磷化鋁鎵銻材料的電子電洞有效質量相差不大，其中輕電洞的質量甚至和電子的有效質量相同，所以此情形在圖 3.8 中並不明顯。

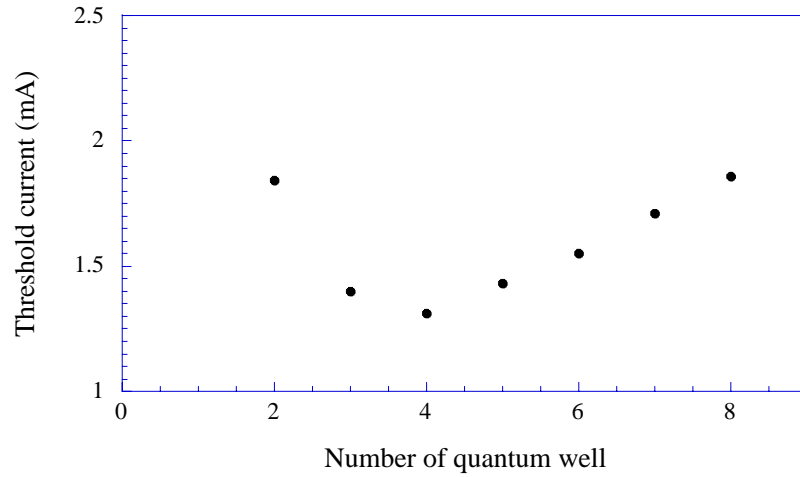


圖 3.7 不同量子井個數（二至八個）的臨界電流變化圖。其中以四個量子井的臨界電流最低，其次是三個量子井。

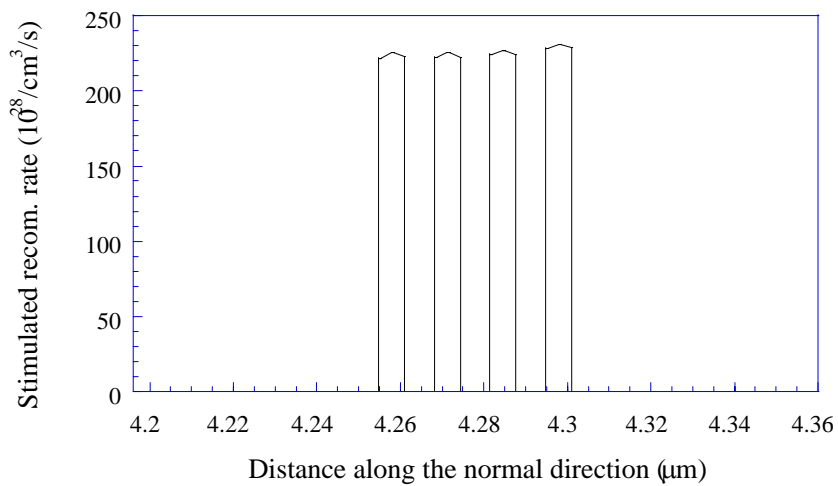


圖 3.8 四個量子井時，活性層的電子電洞結合率與長晶方向的位置關係圖；x 軸表示長晶方向，數值為與基板的距離，圖的左邊為 n 態，右邊為 p 態。輸入電流為 $1.1 \times I_{th}$ 約 1.44mA。

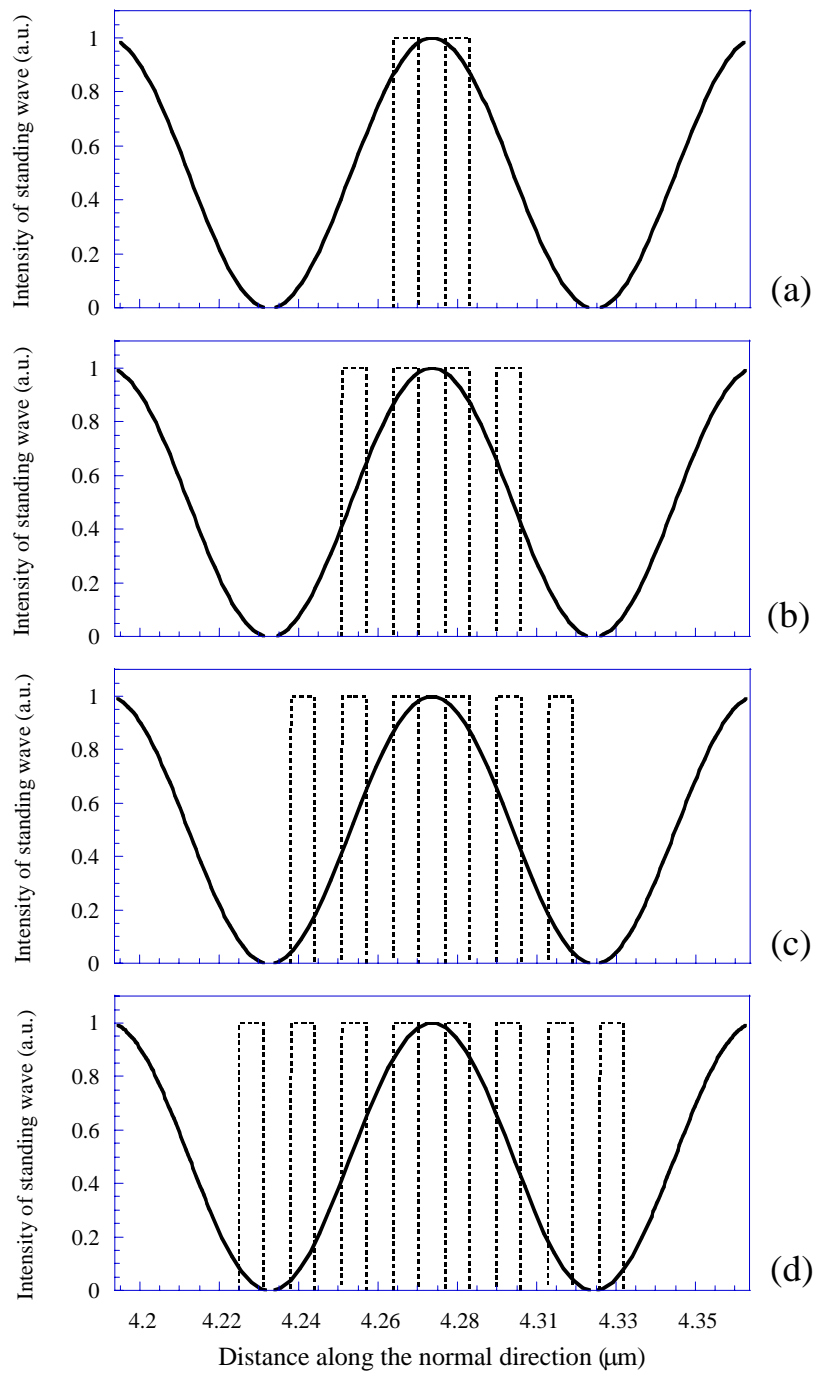


圖 3.9 不同量子井個數的量子井位置與光子駐波的疊合圖。(a)兩個，(b)四個，(c)六個，(d)八個量子井；x 軸表示長晶方向。

除了將初步模擬元件的量子井個數改為四個外，其他結構條件依舊如圖 3.5，共振腔為一個波長，半徑為 $3\mu\text{m}$ 。由於 50 對的 $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ DBR 於波長 570nm 的反射率已高達 99.9%，因此將 n 態 DBR 固定設為 50 對，試著變化 p 態 DBR 的對數，看其對雷射的效能有何影響；如圖 3.10 上圖所示，p 態 DBR 對數越多時，臨界電流越低，這是由於 p 態 DBR 的對數多寡，對於雷射腔而言代表著損失的多寡，所以當 p 態 DBR 對數越多時，越容易達到增益與損失間的平衡而發出雷射光，因此臨界電流也就理所當然的隨著 p 態 DBR 對數的增加而變小。至於在量子效率的方面，如圖 3.10 下圖所示，當 p 態 DBR 為 35 對時出現了最佳值，這是因為在每輸入相同電流後，雷射整體輸出改變的大小除了受到雷射本身的增益大小影響外，也同時受到輸出端的輸出能力好壞影響，也就是說雷射的量子效率，是會受到輸出端的穿透能力影響的，因為輸出鏡的穿透率既代表著共振腔的損失，也代表著雷射腔的輸出，在這兩者的影響下，出現了 p 態 DBR 對數對量子效率的最佳值。此現象不只在我的模擬中出現，在固態雷射的資料^[99]及模擬^[100]中，也可以見到類似的現象。在考慮工程上必須節省原料及長晶時間，且必須顧及雷射的臨界電流及量子效率，因此我依舊採用 DBR 為 50 對及 35 對。

在 VCSEL 的文獻中，實際元件的半徑也如其他結構條件般不盡相同，一般常見的在 $2\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ 間^{[72],[82],[101]-[106]}，但也有半徑為 $15\mu\text{m}$ 的^[105]，甚至還有 $20\mu\text{m}$ 的^[106]；在這裡我改變半徑由 2 至 $9\mu\text{m}$ ，個別的

臨界電流如圖 3.11 所示，當模擬元件半徑越小時，我們會發現臨界電流就越小，這是由於元件的半徑越小，在輸入相同電流下的電流密度就會相對的越高，如此便越容易達到巨量反轉（population inversion）而產生雷射，因此由圖中我們可以看得出來臨界電流約和元件半徑的平方成反比；但當元件半徑過小時，事實上是會導致表面結合（surface recombination）及光學繞射（optical diffraction）等額外的損失遽增，造成臨界電急速的上升，因此在設計元件半徑時並不能無限制的減小。

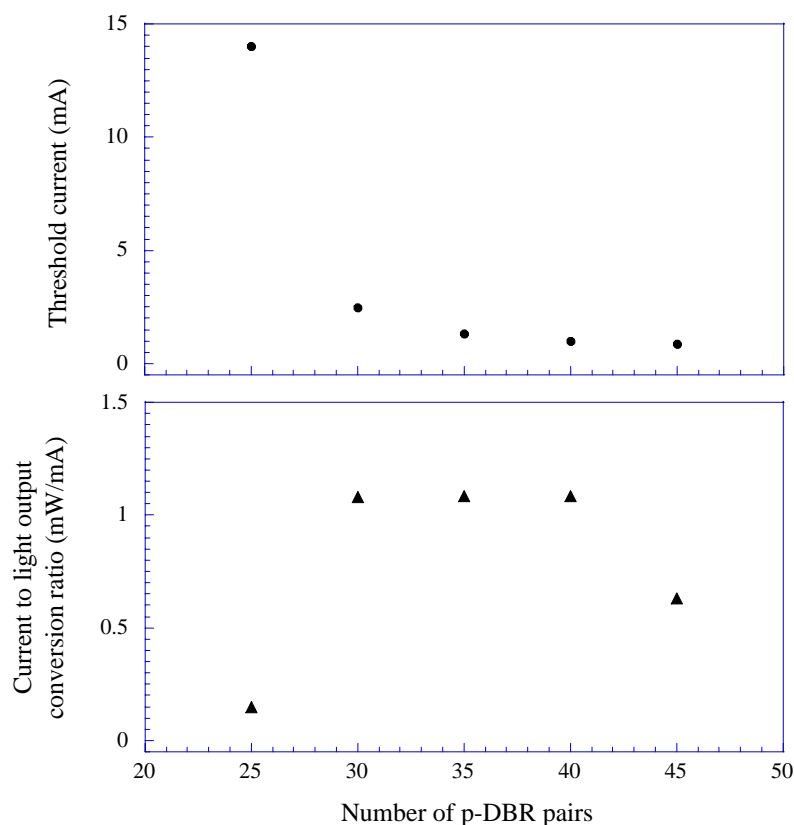


圖 3.10 不同 p 態 DBR 對數（25 至 45 對）的雷射效能圖；n 態 DBR 對數皆固定為 50 對。上圖為 p 態 DBR 對數對臨界電流；下圖為 p 態 DBR 對數對量子效率，於 35 對時有極佳值。

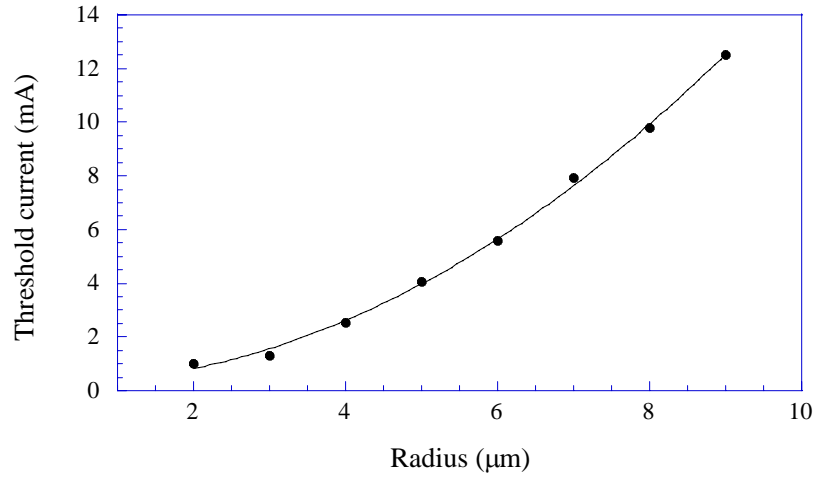


圖 3.11 不同元件半徑 (2 至 9 μm) 的臨界電流變化圖。

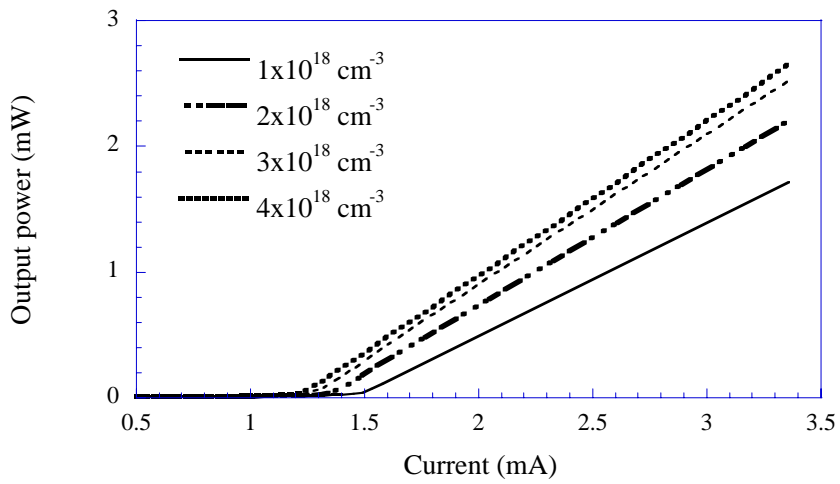


圖 3.12 不同 p 態摻雜濃度 (1×10^{18} 、 2×10^{18} 、 3×10^{18} , 和 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 的輸入電流對輸出功率圖。臨界電流分別為 1.49mA、1.31mA、1.26mA , 和 1.2mA ; 量子效率分別為 0.9mW/mA、1.08mW/mA、1.2mW/mA , 和 1.24mW/mA。

為了降低臨界電流,我試著依照文獻中^{[58],[107]}的方法改變 p 態 DBR 的摻雜濃度由 1×10^{18} 至 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 此時 n 態 DBR 的摻雜濃度為 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 半徑為 $3 \mu\text{m}$, 其輸入電流對輸出功率的關係如圖 3.12 所示;我們可以由圖中發現,當 p 態 DBR 的摻雜濃度增加時,臨界電流變小且量子效率也變的較好,這是由於當 p 態 DBR 的摻雜濃度增加時,可以有效的防止載子溢流的現象,如表 3.2 所示;但在實際的長晶上,並沒有辦法無限制的提高摻雜濃度,因此在我的初步模擬元件中, n、p 態皆採用 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 但以下我將 p 態 DBR 改為 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 而 n 態 DBR 依舊採用 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 來進行詳細的元件性質模擬。

表 3.1 量子井個數對載子溢流的影響表。表中所示為電子流溢流佔總輸入電流的百分比;以長晶方向距離基板 $4.362 \mu\text{m}$ 處為參考點,也就是 p 態 DBR 與 p 態空間層交界的介面。

量子井個數(個)	一	二	三	四	五	六	七	八
電流 $I=4.3\text{mA}$	23.9%	16.7%	12.7%	10.1%	8.4%	7.1%	6.2%	5.4%

表 3.2 p 態 DBR 摻雜濃度對載子溢流的影響表 表中所示為電子流溢流佔總輸入電流的百分比;以長晶方向距離基板 $4.362 \mu\text{m}$ 處為參考點,也就是 p 態 DBR 與 p 態空間層交界的介面。

p 態 DBR 摻雜濃度(cm^{-3})	1×10^{18}	2×10^{18}	3×10^{18}	4×10^{18}
電流 $I=3.5\text{mA}$	11.0%	9.1%	8.0%	7.3%

以下模擬的元件結構如圖 3.5，其中不同之處在於量子井個數改為四個及 p 態 DBR 摻雜濃度改為 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ；元件的形狀為半徑 $3 \mu\text{m}$ 、高 $7.297 \mu\text{m}$ 的圓柱體，共振腔位於距離基板 $4.194 \mu\text{m}$ 至 $4.362 \mu\text{m}$ 間，其中包括上下空間層各 $0.0537 \mu\text{m}$ 。圖 3.13 為此元件之活性層的增益頻譜圖，其中波長大於 580nm 的部份，由於不吸收也不放射，因此增益值為零；而在小於 580nm 的部分，我們可由圖中發現波長 570nm 的增益是最大的，因此對此元件而言，雷射光波長最有可能出現在 570nm 。圖 3.14 為共振腔能帶間隙圖，由圖中可以清楚的看出活性層中有四個量子井，且能隙補償差約 $0.5 : 0.5$ 。圖 3.15 為輸入電流對輸出功率與次強模式壓制比例 (Side mode suppression ratio) 的關係圖，圖 3.16 為臨界電流前後的雷射頻譜圖，由此二圖中可以看的出來，一旦當輸入電流大於臨界電流後，雷射的主要輸出模式強度會快速的增加，以致遠遠大於次強模式 (Side mode) 的強度；於圖 3.16 中我們還可以清楚的看出雷射的輸出波長為 570nm ，像這樣子的頻譜圖，在實際元件的量測中也可以得到^[104]。另外，由於上下電極的設計皆是包括整個圓柱面，且橫向模式 (transverse mode) 的基本模式為高斯模式 (Gaussian mode)，因此在共振腔 (y 軸的 $4.194 \mu\text{m}$ 至 $4.362 \mu\text{m}$ 間) 越靠近中心軸處 (x 軸的 $0 \mu\text{m}$) 的光波強度應該會最強，此推論可由圖 3.17 雷射光波強度對元件內部位置的關係圖中得到驗證。

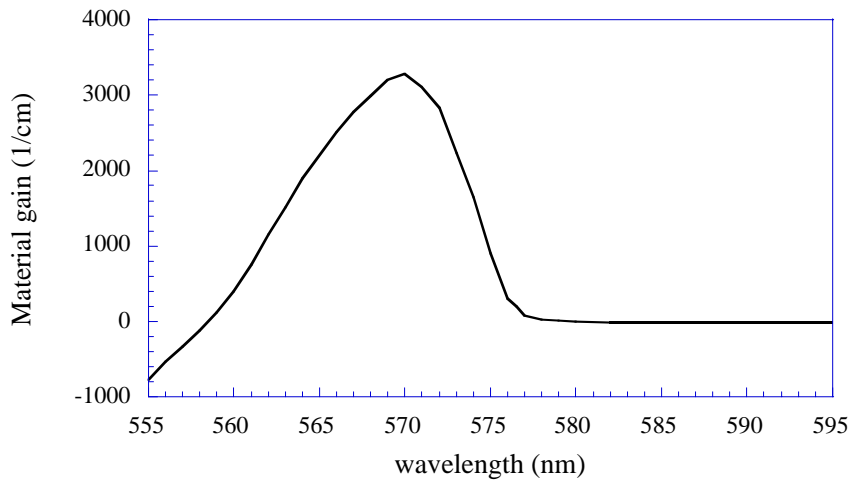


圖 3.13 元件之增益頻譜圖。輸入載子濃度為 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

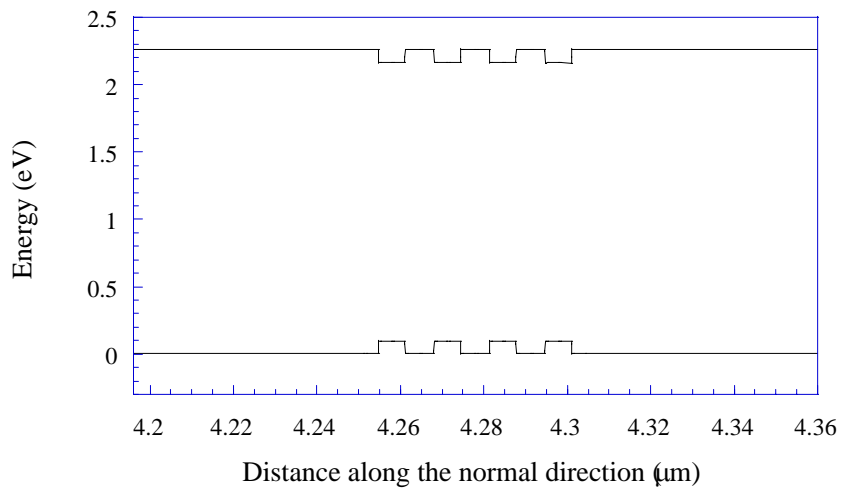


圖 3.14 模擬元件之共振腔能帶間隙圖；x 軸表示長晶方向。

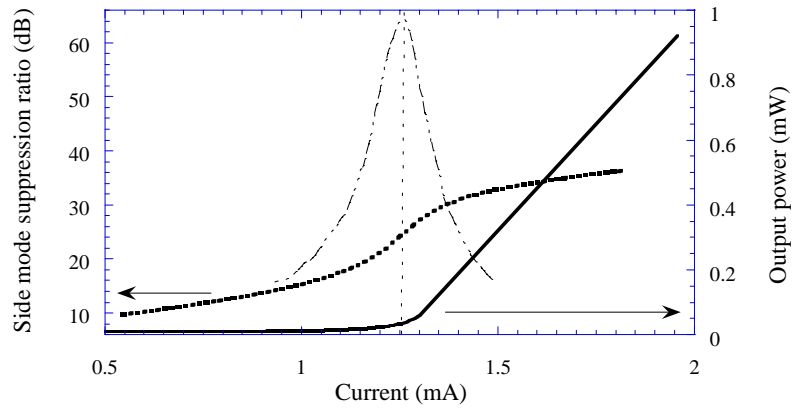


圖 3.15 輸入電流對次強模式壓制比例與輸出功率的關係圖；臨界電流為 1.26mA，呈高斯分布的虛線為次強模式壓制比例之斜率。

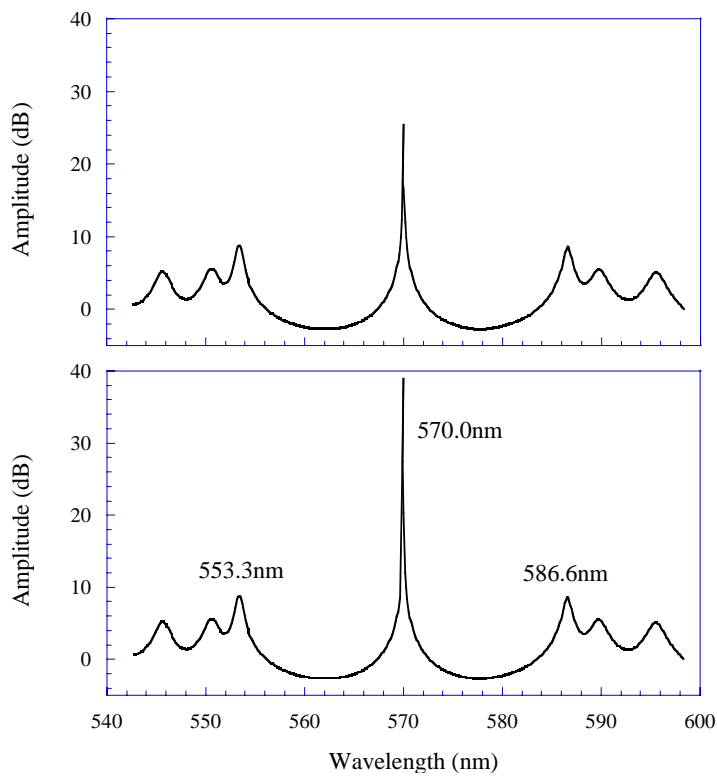


圖 3.16 臨界電流前後的雷射頻譜圖。上圖的輸入電流為 $0.9 \times I_{th}$ ，約為 1.13mA，下圖的輸入電流為 $1.1 \times I_{th}$ ，約為 1.39mA。

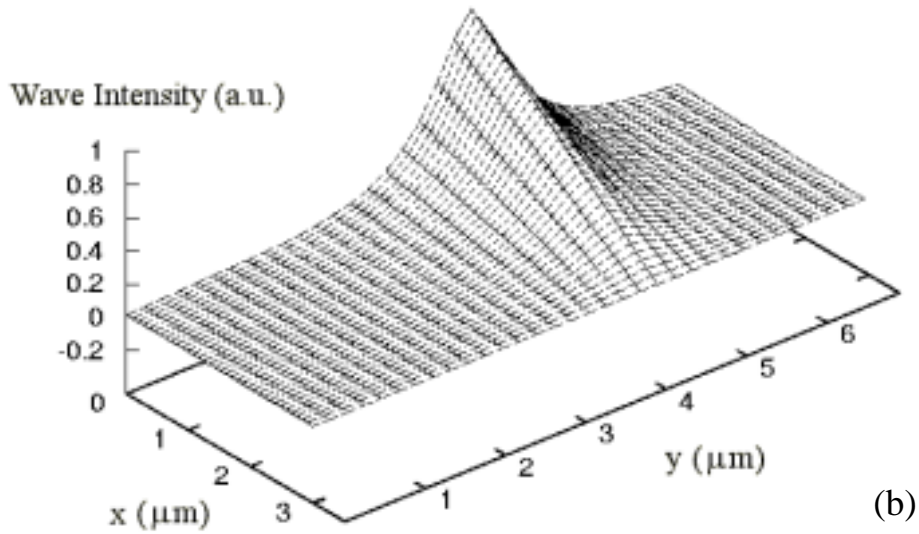
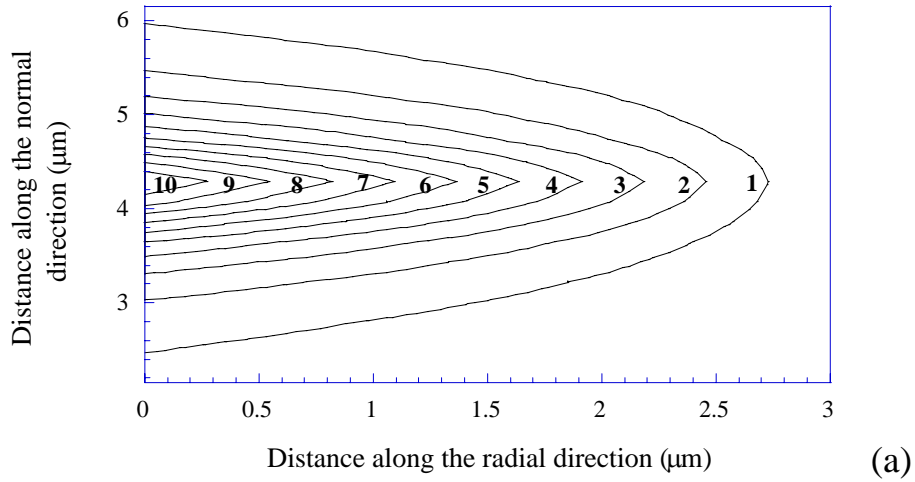


圖 3.17 雷射光波強度對元件內部位置的關係圖。圖(a)中命名為 10 的等強度線為最強，依次遞減；圖(b)為(a)的光波強度立體圖，光強度經過歸一化，最強處為 1，其軸線的定義和圖(a)相同，x 軸代表 VCSEL 元件的半徑方向，y 軸表示長晶方向。輸入電流為 $1.1 \times I_{th}$ ，約為 1.39mA。

第四章 結論

以往由於磷化鋁鎵銻材料在短波長黃綠光部分長晶不易，因此在此波段並未受到極度的重視，而各界紛紛將注意力轉向能發出更短波長的氮化物，但現今由於結構設計及長晶方面技術成熟，且對黃綠光源需求增加，使得磷化鋁鎵銻材料有機會於紅光波段外大放異彩。

本論文先就磷化鋁鎵銻的材料特性加以分析說明，藉著蒐集來的資料先對此材料系統有個初步的瞭解，之後並對於此材料發光元件的發展歷程作一個較有系統的回顧。在實驗方面，我利用光激螢光法對黃綠光磷化鋁鎵銻發光二極體進行研究及分析，藉由不同的操作溫度及激發功率來探討元件的發光性質，並在各種不同的結構中瞭解黃綠光磷化鋁鎵銻發光二極體的特性，如此使得我們更能掌握黃綠光磷化鋁鎵銻發光二極體元件的光學性質及研究方向。在模擬方面，我利用套裝軟體 PICS3D 證明了 570nm 面射型半導體雷射的可行性，並進一步去探討及瞭解其光學性質，且在探討的過程中設計出較佳的元件結構，如此可以替欲研究此波段面射型半導體雷射的學者節省許多長晶的成本，且可以幫助其有效掌握元件的特性及研究的方向。

對於磷化鋁鎵銻材料特性的基本瞭解，不僅可以用於研究黃綠光的發光元件上，對於紅黃光部分的磷化鋁鎵銻元件來說，也是一種必備的知識，我在本論文中將蒐集到的資料加以分類及整理，希望對於欲研究磷化鋁鎵銻材料元件者有所幫助；除此之外，在本論文中我亦

將多層膜反射層的原理加以詳細推導，此原理的瞭解對於研究面射型半導體雷射之 DBR 有極大的幫助。另外對於黃綠光方面，此論文乃是採用磷化鋁鎵銻為材料，至於使用氮化物來製作黃綠光發光元件，進而與磷化鋁鎵銻材料比較，這將可以成為未來模擬研究的方向。

在附錄一中，我提供了運算多層膜問題的 Mathcad 運算式，可運算多層膜在各種入射波長下的反射率，也可以在已知入射波長的情況下設計出最佳反射的材料厚度。另外在附錄二中我附上實驗元件的實物圖，我們可將這些實際圖樣與第二章中的示意圖相比較，如此可對於實驗室的實驗系統及儀器更為瞭解。

參考文獻

- [1] Peter Y. Yu, and Manuel Cardona, *Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1996.
- [2] B. G. Streetman, *Solid State Electronic Devices*, 4nd ed., Prentice-Hall, USA, 1995.
- [3] G. B. Stringfellow, and M. George Craford, *High Brightness Light Emitting Diodes: Semiconductors and Semimetals Volume 48*, Academic Press, San Diego, California, USA, 1997.
- [4] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., John Wiley, New York, 1981.
- [5] S. H. Wemple, and M. Didomenico, Jr., “Behavior of electronic dielectric constant in covalent and ionic materials,” *Physical Review B*, Vol. 3, pp. 1338-1350, 1971.
- [6] M. A. Afromowitz, “Refractive index of $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$,” *Solid State Communications*, Vol. 15, pp. 59-63, 1974.
- [7] Y. Kaneko, and K. Kishino, “Refractive indices measurement of $(\text{GaInP})_m/(\text{AlInP})_n$ quasi-quaternaries and $\text{GaInP}/\text{AlInP}$ multiple quantum wells,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 76, pp. 1809-1818, 1994.
- [8] A. Onton, and R. J. Chicotka, “Conduction bands in $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{P}$,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 41, pp. 4205-4207, 1970.

- [9] R. J. Nelson, and N. Holonyak, Jr., "Effect of crystal composition on the optimization of radiative recombination in N-free and N-doped $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ light-emitting diodes," *Journal of Applied Physics*, Vol. 47, pp. 1704-1707, 1976.
- [10] A. A. Mbaye, and C. Verié, "Electronic structure of trimetallic III-V alloys: The $\text{Al}_{1-x-z}\text{Ga}_x\text{In}_z\text{P}$ system," *Physical Review B*, Vol. 29, pp. 2756-2758, 1984.
- [11] A. T. Meney, A. D. Prins, A. F. Phillips, J. L. Sly, E. P. O'Reilly, and D. J. Dunstan, "Determination of the band structure of disordered AlGaInP and its Influence on visible-laser characteristics," *IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics*, Vol. 1, pp. 697-706, 1995.
- [12] D. S. Cao, A. W. Kimball, and G. B. Stringfellow, "Atmospheric pressure organometallic vapor-phase epitaxial growth of $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ (x from 0 to 1) using trimethylalkyls," *Journal of Applied Physics*, Vol. 67, pp. 739-744, 1990.
- [13] M. O. Watanabe, and Y. Ohba, "Interface properties for GaAs/InGaAlP heterojunctions by the capacitance-voltage profiling technique," *Applied Physics Letters*, Vol. 50, pp. 906-908, 1987.
- [14] M. Honda, M. Ikeda, Y. Mori, K. Kaneko, and N. Watanabe, "The energy levels of Zn and Se in $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{P}$," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 24, pp. L187-L189, 1985.
- [15] Peter S. Zory, Jr., *Quantum Well Lasers*, Academic Press, Boston, USA, 1993.
- [16] S. H. Wei, and A. Zunger, "Calculated natural band offsets of all

- II-VI and III-V semiconductors: chemical trends and the role of cation d orbitals,” *Applied Physics Letters*, Vol. 66, pp. 2011-2013, 1998.
- [17] X. H. Zhang, S. J. Chua, and W. J. Fan, “Band offsets at GaInP/AlGaInP(001) heterostructures lattice matched to GaAs,” *Applied Physics Letters*, Vol. 73, pp. 1098-1100, 1998.
- [18] C. T. H. F. Liedenbaum, A. Valster, A. L. G. J. Severens, and G. W. 't Hooft, “Determination of the GaInP/AlGaInP band offset,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 57, pp. 2698-2700, 1990.
- [19] M. D. Dawson, and Geoffrey Duggan, “Exciton localization effects and heterojunction band offset in (Ga,In)P-(Al,Ga,In)P multiple quantum wells” *Physical Review B*, 47, 12598-12604, 1993.
- [20] H. K. Yow, P. A. Houston, and M. Hopkinson, “Conduction band discontinuities in $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}-\text{Al}_x\text{Ga}_{0.52-x}\text{In}_{0.5}\text{P}$ heterojunctions measured by internal photoemission,” *Applied Physics Letters*, Vol. 66, pp. 2852-2854, 1995.
- [21] H. Tanaka, Y. Kawamura, S. Nojima, K. Wakita, and H. Asahi, “InGaP/InGaAlP double-heterostructure and multiquantum-well laser diodes grown by molecular-beam epitaxy,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 61, pp. 1713-1719, 1987.
- [22] H. Tanaka, Y. Kawamura, and H. Asahi, “Observations of room-temperature excitons in InGaP/InGaAlP MQW structures,” *Electronics Letters*, Vol. 23, pp. 166-168, 1987.
- [23] H. Tanaka, Y. Kawamura, and H. Asahi, “Room-temperature operation of MBE-grown InGaP/InGaAlP MQW visible laser

- diodes,” *Electronics Letters*, Vol. 22, pp. 707-708, 1986.
- [24] O. P. Kowalski, J. W. Cockburn, D. J. Mowbray, M. S. Skolnick, and R. Teissier, “GaInP–AlGaInP band offsets determined from hydrostatic pressure measurements,” *Applied Physics Letters*, Vol. 66, pp. 619-621, 1995.
- [25] J. Rennie, M. Okajima, M. Watanabe, and G. I. Hatakoshi, “High temperature (74⁰C) cw operation of 634nm InGaAlP laser diodes utilizing a multiple quantum barrier,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 29, pp. 1857-1862, 1993.
- [26] P. Lawaetz, “Valence-band parameters in cubic semiconductors,” *Physical Review B*, Vol. 4, pp. 3460-3467, 1971.
- [27] T. F. Kuech, D. J. Wolford, E. Veuhoff, V. Deline, P. M. Mooney, R. Potemski, and Bradley, “Properties of high-purity Al_xGa_{1-x}As grown by the metal-organic vapor-phase-epitaxy technique using methyl precursors,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 62, pp. 632-643, 1987.
- [28] Kenichi Iga, and Susumu Kinoshita, *Process Technology for Semiconductor Lasers: Crystal Growth and Microprocesses*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1996.
- [29] S. Yamamoto, H. Hayashi, T. Hayakawa, N. Miyauchi, S. Yano, and T. Hijikata “Room-temperature cw operation in the visible spectral range of 680-700 nm by AlGaAs double heterojunction lasers,” *Applied Physics Letters*, Vol. 41, pp. 796-798, 1982.
- [30] T. Suzuki, I. Hino, A. Gomyo, and K. Nishida, “MOCVD-grown Al_{0.5}In_{0.5}P-Ga_{0.5}In_{0.5}P double heterostructure lasers optically pumped

- at 90 K,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 21, pp. L731-L733, 1982.
- [31] I. Hino, A. Gomyo, K. Kobayashi, T. Suzuki, and K. Nishida, “Room-temperature pulsed operation of AlGaInP/GaInP/AlGaInP double heterostructure visible light laser diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition,” Applied Physics Letters, Vol. 43, pp. 987-989, 1983.
- [32] H. Asahi, Y. Kawamura, and H. Nagai, “Molecular beam epitaxial growth of InGaAlP visible laser diodes operating at 0.66-0.68 μm at room temperature,” Journal of Applied Physics, Vol. 54, pp. 6958-6964, 1983.
- [33] D. C. Tran, K. H. Levin, C. F. Fisher, M. J. Burk, and G. H. S. Jun, “0.66 μm room-temperature operation of InGaAlP DH laser diodes grown by MBE,” Electronics Letters, Vol. 19, pp. 163-164, 1983.
- [34] M. Ikeda, Y. Mori, M. Takiguchi, K. Kaneko, and N. Watanabe, “Cw operation of an AlGaInP double heterostructure laser diode at 77K grown by atmospheric metalorganic chemical vapor deposition,” Applied Physics Letters, Vol. 45, pp. 661-663, 1984.
- [35] M. Ikeda, Y. Mori, H. Sato, K. Kaneko, and N. Watanabe, “Room-temperature continuous-wave operation of an AlGaInP double heterostructure laser grown by atmospheric pressure metalorganic chemical vapor deposition,” Applied Physics Letters, Vol. 47, pp. 1027-1028, 1985.
- [36] K. Kobayashi, S. Kawata, A. Gomyo, I. Hino, and T. Suzuki, “Room-temperature cw operation of AlGaInP double-heterostructure

- visible lasers,” *Electronics Letters*, Vol. 21, pp. 931-932, 1985.
- [37] M. Ishikawa, Y. Ohba, H. Sugawara, M. Yamamoto, and T. Nakanisi, “Room-temperature cw operation of InGaP/InGaAlP visible light laser diodes on GaAs substrates grown by metalorganic chemical vapor deposition,” *Applied Physics Letters*, Vol. 48, pp. 207-208, 1986.
- [38] M. Ikeda, M. Honda, Y. Mori, K. Kaneko, and N. Watanabe, “Yellow-emitting AlGaInP double heterostructure laser diode at 77 K grown by atmospheric metalorganic chemical vapor deposition,” *Applied Physics Letters*, Vol. 45, pp. 964-966, 1984.
- [39] I. Hino, S. Kawata, A. Gomyo, K. Kobayashi, and T. Suzuki, “Continuous wave operation (77 K) of yellow (583.6 nm) emitting AlGaInP double heterostructure laser diodes,” *Applied Physics Letters*, Vol. 48, pp. 557-558, 1986.
- [40] K. Kobayashi, S. Kawata, A. Gomyo, I. Hino, and T. Suzuki, “661.7nm room-temperature cw operation of AlGaInP double-heterostructure lasers with aluminium-containing quaternary active layer,” *Electronics Letters*, Vol. 21, pp. 1162-1163, 1985.
- [41] S. Kawata, K. Kobayashi, A. Gomyo, I. Hino, and T. Suzuki, “621nm cw operation (0⁰C) of AlGaInP visible semiconductor lasers,” *Electronics Letters*, Vol. 22, pp. 1265-1266, 1986.
- [42] S. Kawata, H. Fujii, K. Kobayashi, A. Gomyo, I. Hino, T. Suzuki “Room-temperature continuous-wave operation of a 640nm AlGaInP visible-light semiconductor laser,” *Electronics Letters*, Vol. 23, pp. 1327-1328, 1987.

- [43] M. Ishikawa, H. Shiozawa, Y. Tsuburai, and Y. Uematsu, "Short-Wavelength (638nm) room-temperature cw operation of InGaAlP laser diodes with quaternary active layer," *Electronics Letters*, Vol. 26, pp. 211-213, 1990.
- [44] K. Itaya, M. Ishikawa, and Y. Uematsu, "636nm room temperature cw operation by heterobarrier blocking structure InGaAlP laser diodes," *Electronics Letters*, Vol. 26, pp. 839-840, 1990.
- [45] M. Ikeda, A. Toda, K. Nakano, Y. Mori, and N. Watanabe, "Room-temperature continuous-wave operation of a GaInP/AlGaInP multiquantum well laser grown by metalorganic chemical vapor deposition," *Applied Physics Letters*, Vol. 50, pp. 1033-1034, 1987.
- [46] J. M. Dallesasse, D. W. Nam, D. G. Deppe, and N. Holonyak, Jr., "Short-wavelength ($<6400\text{\AA}$) room-temperature continuous operation of p-n $\text{In}_{0.5}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{P}$ quantum well lasers," *Applied Physics Letters*, Vol. 53, pp. 1826-1828, 1988.
- [47] S. Kawata, K. Kobayashi, H. Fujii, I. Hino, A. Gomyo, H. Hotta, and T. Suzuki, "Room-temperature, continuous-wave operation formode-stabilised AlGaInP visible-light semiconductor laser with a multiquantum-well active layer," *Electronics Letters*, Vol. 24, pp. 1489-1490, 1988.
- [48] M. Ikeda, E. Morita, A. Toda, T. Yamamoto, and K. Kaneko, "GaInP/AlGaInP double-heterostructure laser grown on a (111)B-orienten GaAs substrate by metalorganic chemical vapour deposition," *Electronics Letters*, Vol. 24, pp. 1094-1095, 1988.
- [49] T. Tanaka, S. Minagawa, T. Kawano, and T. Kajimura, "Lasing

- wavelengths of index-guided AlGaInP semiconductor lasers as functions of off-angle from (100) plane of GaAs substrate,” *Electronics Letters*, Vol. 25, pp. 905-907, 1989.
- [50] S. Minagawa, T. tanaka, and M. Kondow, “Room-temperature continuous-wave operation of short-wavelength GaInP/AlGaInP laser grown on (511)A GaAs substrate by metalorganic vapour phase epitaxy,” *Electronics Letters*, Vol. 25, pp. 925-926, 1989.
- [51] H. Hamada, K. Tominaga, M. Shono, S. Honda, K. Yodoshi, and T. Yamaguchi, “Room-temperature cw operation of 610nm band AlGaInP strained multiquantum well laser diodes with multiquantum barrier,” *Electronics Letters*, Vol. 28, pp. 1834-1836, 1992.
- [52] Y. Ueno, K. Endo, H. Fujii, K. Kobayashi, K. Hara, and T. Yuasa, “Continuous-wave high-power (75mW) operation of a transverse-mode stabilized window-structure 680nm AlGaInP visible laser diode,” *Electronics Letters*, Vol. 26, pp. 1726-1728, 1990.
- [53] H. Fujii, K. Kobayashi, S. Kawata, A. Gomyo, I. Hino, H. Hotta, and T. Suzuki, “High-power operation of a transverse-mode stabilized AlGaInP visible light ($\lambda_L = 683\text{nm}$) semiconductor laser,” *Electronics Letters*, Vol. 23, pp. 938-939, 1987.
- [54] A. Gomyo, T. Suzuki, K. Kobayashi, S. Kawata, and I. Hino, “Evidence for the existence of an ordered state in $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ grown by metalorganic vapor phase epitaxy and its relation to band-gap energy,” *Applied Physics Letters*, Vol. 50, pp. 673-675, 1987.
- [55] K. Itaya, Y. Watanabe, M. Ishikawa, G. Hatakoshi, and Y. Uematsu,

- “High-power operation of heterobarrier blocking structure InGaAlP visible light laser diodes,” *Applied Physics Letters*, Vol. 56, pp. 1718-1719, 1990.
- [56] K. Itaya, G. Hatakoshi, Y. Watanabe, M. Ishikawa, and Y. Uematsu, “High-power cw operation of broad area InGaAlP visible light laser diodes,” *Electronics Letters*, Vol. 26, pp. 214-215, 1990.
- [57] K. Nakano, M. Ikeda, A. Toda, and C. Kojima, “Very low threshold current density of a GaInP/AlGaInP double-hererostructure laser grown by MOCVD,” *Electronics Letters*, Vol. 23, pp. 894-895, 1987.
- [58] I. Nomura, K. Kishino, A. Kikuchi, and Y. Kaneko, “600-nm-range GaInP/AlInP strained quantum well lasers grown by gas source molecular beam epitaxy,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 33, pp. 804-810, 1994.
- [59] H. D. Summers, and P. Blood, “Strain effects in $(\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y})_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ lasers operating at fixed threshold gain,” *Electronics Letters*, Vol. 30, pp. 236-238, 1994.
- [60] H. Shiozawa, H. Okuda, M. Ishikawa, G-I. Hatakoshi, and Y. Uematsu, “High-temperature cw operation of visible light-emitting GaInP/AlGaInP inner stripe laser diodes,” *Electronics Letters*, Vol. 24, pp. 877-879, 1988.
- [61] H. Hamada, R. Hiroyama, S. Honda, M. Shono, K. Yodoshi, and T. Yamaguchi, “AlGaInP strained multiple-quantum-well visible laser diodes ($\lambda_L < 630$ nm band) with a multiquantum barrier grown on misoriented substrates,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.

- 29, pp. 1844-1850, 1993.
- [62] K. Itaya, M. Ishikawa, H. Okuda, Y. Watanabe, K. Nitta, H. Shiozawa, and Y. Uematsu, "Effect of facet coating on the InGaAlP visible light laser diodes," *Applied Physics Letters*, Vol. 53, pp. 1363-1365, 1988.
- [63] M. Ishikawa, H. Okuda, K. Itaya, H. Shiozawa, and Y. Uematsu, "Long-term reliability tests for InGaAlP visible laser diodes," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 28, pp. 1615-1621, 1989.
- [64] H. Okuda, M. Ishikawa, H. Shiozawa, Y. Watanabe, K. Itaya, K. Nitta, G.-I. Hatakoshi, Y. Kokubun, and Y. Uematsu, "Highly reliable InGaP/InGaAlP visible light emitting inner stripe lasers with 667nm lasing wavelength," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 25, pp. 1477-1482, 1989.
- [65] A. Gomyo, K. Kobayashi, S. Kawata, I. Hino, T. Suzuki, "Aging characteristics of AlGaInP/GaInP visible-light lasers ($\lambda_L = 678$ nm)," *Electronics Letters*, Vol. 23, pp. 85, 1988.
- [66] M. Ikeda, H. Sato, T. Ohata, K. Nakano, A. Toda, O. Kumagai, and C. Kojima, "680-nm band GaInP/AlGaInP tapered stripe laser," *Applied Physics Letters*, Vol. 51, pp. 1572-1573, 1987.
- [67] H. Soda, K. I. Ige, and C. Kitahara, "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 18, pp. 2329-2330, 1979.
- [68] R. D. Burnham, U.S. Pat. 4.309.670, 1982.
- [69] F. A. Kish, F. M. Steranka, D. C. DeFevere, D. A. Vanderwater, K. G. Park, C. P. Kuo, T. D. Osentowski, M. J. Peanasky, J. G. Yu, R. M.

- Fletcher, D. A. Steigerwald, and M. G. Craford, "Very high-efficiency semiconductor wafer-bonded transparent-substrate $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaP}$ light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, Vol. 64, pp. 2839-2841, 1994.
- [70] R. P. Schneider, Jr., R. P. Bryan, and J. A. Lott, "Visible (657 nm) $\text{InGaP}/\text{InAlGaP}$ strained quantum well vertical-cavity surface-emitting laser," *Applied Physics Letters*, Vol. 60, pp. 1830-1832, 1992.
- [71] K. Tai, K. F. Huang, C. C. Wu, and J. D. Wynn, "Continuous wave visible $\text{InGaP}/\text{InGaAlP}$ quantum well surface emitting laser diodes," *Electronics Letters*, Vol. 29, pp. 1314-1316, 1993.
- [72] J. A. Lott, R. P. Schneider, Jr., K. D. Choquette, S. P. Kilcoyne, and J. J. Figiel, "Room temperature continuous wave operation of red vertical surface emitting laser diodes," *Electronics Letters*, Vol. 29, pp. 1693-1694, 1993.
- [73] T. Kaino, M. Fujiki, and S. Nara, "Low-loss polystyrene core-optical fibers," *Journal of Applied Physics*, Vol. 52, pp. 7061-7063, 1981.
- [74] T. Kaino, K. Jinguji, and S. Nara, "Low loss poly(methyl methacrylate-d8) core optical fibers," *Applied Physics Letters*, Vol. 42, pp. 567-569, 1983.
- [75] T. Kaino, K. Jinguji, and S. Nara, "Low loss poly(methyl methacrylate-d5) core optical fibers," *Applied Physics Letters*, Vol. 41, pp. 802-804, 1982.
- [76] Eugene Hecht, *Optics*, 3rd ed., Addison-Wesley, Massachusetts,

USA, 1998.

- [77] 國際組織 C.I.E.網站 : www.cie.co.at/cie/
- [78] S. Naritsuka, Y. Nishikawa, H. Sugawara, M. Ishikawa, and Y. Kokubun, "Photoluminescence studies on InGaAlP layers grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition," *Journal Electronic Materials*, Vol. 20, pp. 687-690, 1991.
- [79] S. J. Chang, and C. S. Chang, "642-nm AlGaInP laser diodes with a triple tensile strain barrier cladding layer," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, pp. 651-653, 1998.
- [80] G. C. Osbourn, "Strained-layer superlattices from lattice mismatched materials," *Journal of Applied Physics*, Vol. 53, pp. 1586-1589, 1982.
- [81] S. J. Chang, C. S. Chang, Y. K. Su, P. T. Chang, Y. R. Wu, K. H. Huang, and T. P. Chen, "AlGaInP yellow-green light-emitting diodes with a tensile strain barrier cladding layer," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 9, pp. 1199-1201, 1997.
- [82] C. Chang-Hasnain, "VCSELs : applications and advances," *International Photonics Conference*, short course, 1998.
- [83] G. M. Yang, M. H. MacDougal, and P. D. Dapkus, "Ultralow threshold current vertical-cavity surface-emitting lasers obtained with selective oxidation," *Electronics Letters*, Vol. 25, pp. 886-888, 1995.
- [84] 廖虹惠, 林多常, 王志銘, "850nm VCSEL 之特性量測及應用分析," 台灣光電科技研討會暨國科會光電學門研究成果發表會,

論文集(上), TH- I 1-A-2, pp. 7-10, 1999.

- [85] K. D. Choquette, and H. Q. Hou, "Vertical-cavity surface emitting lasers: moving from research to manufacturing," Proceedings of the IEEE, Vol. 85, pp. 1730-1739, 1997.
- [86] R. P. Schneider, Jr., and J. A. Lott, "InAlP/InAlGaP distributed Bragg reflectors for visible vertical cavity surface-emitting lasers," Applied Physics Letters, Vol. 62, pp. 2748-2750, 1993.
- [87] H. Sugawara, and M. Ishikawa, "Compensated-strain multiquantum-well active layer for InGaAlP-based visible light emitting diodes," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 34, pp. L1458-L1460, 1995.
- [88] R. P. Schneider, Jr., M. H. Crawford, K. D. Choquette, K. L. Lear, S. P. Kilcoyne, and J. J. Figiel, "Improved AlGaInP-based red (670-690 nm) surface-emitting lasers with novel C-doped short-cavity epitaxial design," Applied Physics Letters, Vol. 67, pp. 329-331, 1995.
- [89] P. O. Kellermann, A. Golshani, A. Kock, and E. Gornik, "Single-mode and single-beam surface emission from visible red GaInP/AlGaInP laser diodes," Applied Physics Letters, Vol. 70, pp. 2374-2376, 1997.
- [90] P. O. Kellermann, N. Finger, W. Schrenk, and E. Gornik, "Wavelength-adjustable surface-emitting single-mode laser diodes with contradirectional surface-mode coupling," Applied Physics Letters, Vol. 75, pp. 3748-3750, 1999.
- [91] R. P. Schneider, Jr., and J. A. Lott, "Cavity design for improved

- electrical injection in InAlGaP/AlGaAs visible (639-661 nm) vertical-cavity surface-emitting laser diodes,” *Applied Physics Letters*, Vol. 63, pp. 917-919, 1993.
- [92] R. P. Schneider, Jr., K. D. Choquette, J. A. Lott, and K. L. Lear, “Efficient room-temperature continuous-wave AlGaInP/AlGaAs visible (670nm) vertical-cavity surface-emitting laser diodes,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 6, pp. 313-316, 1994.
- [93] D. M. Kuchta, R. P. Schneider, K. D. Choquette, and S. Kilcoyne, “Large- and small-signal modulation properties of red (670 nm) VCSEL’s,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 8, pp. 307-309, 1996.
- [94] S. J. Sweeney, G. Knowles, and T. E. Sale, “Evaluating the continuous-wave performance of AlGaInP-based red (667 nm) vertical-cavity surface-emitting lasers using low-temperature and high-pressure techniques,” *Applied Physics Letters*, Vol. 78, pp. 865-867, 2001.
- [95] M. H. Crawford, R. P. Schneider, Jr., K. D. Choquette, K. L. Lear, S. P. Kilcoyne, and J. J. Figiel, “High efficiency AlGaInP-based 660-680 nm vertical-cavity surface emitting lasers,” *Electronics Letters*, Vol. 31, pp. 196-197, 1995.
- [96] M. H. Crawford, R. P. Schneider, Jr., K. D. Choquette, and K. L. Lear, “Temperature-dependent characteristics and single-mode performance of AlGaInP-based 670-690-nm vertical-cavity surface-emitting lasers,” *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 7, pp. 724-726, 1995.

- [97] 洪國凱,張誌原,黃旭晴,郭艷光,“紫外光氮化鎵面射型半導體雷射之設計與分析,” 將發表於光學工程季刊, 第 74 期, 2001 年 6 月.
- [98] Jacques I. Pankove and Theodore D. Moustakas, *Gallium Nitride (GaN) I - Semiconductors and Semimetals Volume 50*, Academic Press, San Diego, California, USA, 1998.
- [99] Walter Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 3rd ed., Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1992.
- [100] Y. K. Kuo, J. Y. Chang, C. C. Lin, and H. M. Chen, “Tunable Cr:YSO Q-switched Cr:BeAl₂O₄ laser: numerical study on laser performance along three principal axes of the Q switch,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 39, pp. 4002-4005, 2000.
- [101] K. D. Choquette, R. P. Schneider, M. H. Crawford, K. M. Geib, and J. J. Figiel, “Continuous wave operation of 640-660nm selectively oxidized AlGaInP vertical-cavity lasers,” *Electronics Letters*, Vol. 31, pp. 1145-1146, 1995.
- [102] 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 Journal of Quantum Electronics*, Vol. 33, pp. 1810-1824, 1997.
- [103] Govind. P. Agrawal, *Semiconductor Lasers*, American Institute of Physics, New York, USA, 1994.
- [104] H. P. Yang, Y. S. Su, W. C. Jiang, M. L. Wang, S. J. Yu, and C. P. Sung, “Continuous-wave characteristics of two-dimensional vertical cavity surface emitting laser arrays,” 台灣光電科技研討會暨國科會光電學門研究成果發表會, 論文集(上), TH- I 1-A-1, pp. 3-6,

1999.

- [105] B. J. Koch, J. R. Leger, A. Gopinath, and Z. Wang, "Single-mode vertical cavity surface emitting laser by graded-index lens spatial filtering," *Applied Physics Letters*, Vol. 70, pp. 2359-2361, 1997.
- [106] C. J. Chang-Hasnain, M. Orenstein, A. V. Lehmen, L. T. Florez, J. P. Harbison, and N. G. Stoffel, "Transverse mode characteristics of vertical cavity surface-emitting lasers," *Applied Physics Letters*, Vol. 57, pp. 218-220, 1990.
- [107] G. I. Hatakoshi, K. Itaya, M. Ishikawa, M. Okajima, and Y. Uematsu, "Short-wavelength InGaAlP visible laser diodes," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 27, pp. 1476-1482, 1991.

附錄一 利用數學軟體 Mathcad 計算多層膜反射問題

磷化鋁鎵銻折射率對應入射波長的公式是參考 Ref. [7]；砷化鋁鎵、磷砷化鎵，和磷化鎵銻的折射率對應入射波長公式是參考 Ref. [6]。如 II 頁所示，將參數 E_p 、 E_o 、 E_d 、 E_r ，和折射率 n 定義，輸入數學軟體 Mathcad 中，只要代入指定的 x 及 λ ，便可以得到欲知的材料折射率。

利用 3.2.1 小節中的矩陣相乘法，我們可以計算多層膜在不考慮吸收下的整體反射率。接續在之上已寫好的折射率參數值後，將各層折射率、厚度，及入射角度設定好，定義光會經過的所有介面及材料中光程的矩陣，依照光通過的先後次序一一相乘，如此便可得到一個矩陣 S ，而矩陣元素 S_{01} 除以元素 S_{11} 的平方，便是整體的反射率。寫入 Mathcad 中的方式，如 III 頁的例子所示。

我將材料的折射率及整體的反射率都寫成入射波長 λ 的函數，是因為如此可以作出材料折射率或整體反射率的頻譜圖。如 III 頁後半部所示，利用 Mathcad 畫出整體反射率的頻譜圖，如此可有助我們更瞭解整個結構的反射情形。另外，如果想要知道反射的極值會出現在那個波長，只要利用求根的方式，求 $R(\lambda)$ 對 λ 一次微分後等於零的根便可。

同樣的，如果今天我們已知入射波長，想知道厚度對整體反射率的影響，便如 IV 頁所示寫入 Mathcad 中。在 IV 頁的例子中，發現當介質二的厚度為四分之一波長除以折射率及 $\cos\alpha$ (α 為折射角) 時，整體的反射率會最大，驗證的式 3.11。



Refractive Index of $(Al_x Ga_{1-x})_{0.5} In_{0.5} P$

- 入射光波長定義： λ (nm)
- 則入射光能量： $E_p(\lambda) = \frac{1.239852066}{\lambda} \cdot 10^3$ (eV)
- Oscillator energy： $E_o(x) = 4.17 + 0.49 \cdot x$ (eV)
- dispersion energy： $E_d(x) = 35.79 - 1.16 \cdot x$ (eV)
- 直接能隙能量： $E_\Gamma(x) = 1.897 + 0.67 \cdot x$ (eV)

則 $(Al_x Ga_{1-x})_{0.5} In_{0.5} P$ 隨入射波長變化的折射率：

$$n(x, \lambda) = \sqrt{\frac{E_d(x) \cdot E_d(x) \cdot E_p(\lambda)^2}{E_o(x)} + \frac{E_d(x) \cdot E_p(\lambda)^4}{E_o(x)^3} + \frac{E_d(x) \cdot E_p(\lambda)^4}{2 \cdot E_o(x)^3 \cdot (E_o(x)^2 - E_\Gamma(x)^2)} \ln \left(\frac{2 \cdot E_o(x)^2 - E_\Gamma(x)^2 - E_p(\lambda)^2}{E_\Gamma(x)^2 - E_p(\lambda)^2} \right)} + 1$$

例子： $(Al_{0.5} Ga_{0.5})_{0.5} In_{0.5} P$ 於波長 570nm 處的折射率：

$$n(0.5, 570) = 3.523$$

- 若要改變材料：
- | | |
|----------------------|---|
| $Al_x Ga_{1-x} As$ ： | $E_o(x) = 3.65 + 0.871 \cdot x + 0.179 \cdot x^2$ (eV) |
| | $E_d(x) = 36.1 - 2.45 \cdot x$ (eV) |
| | $E_\Gamma(x) = 1.424 + 1.266 \cdot x + 0.26 \cdot x^2$ (eV) |
| $GaAs_{1-x} P_x$ ： | $E_o(x) = 3.65 + 0.721 \cdot x + 0.139 \cdot x^2$ (eV) |
| | $E_d(x) = 36.1 + 0.35 \cdot x$ (eV) |
| | $E_\Gamma(x) = 1.441 + 1.091 \cdot x + 0.21 \cdot x^2$ (eV) |
| $Ga_x In_{1-x} As$ ： | $E_o(x) = 3.391 + 0.524 \cdot x + 0.595 \cdot x^2$ (eV) |
| | $E_d(x) = 28.91 + 7.54 \cdot x$ (eV) |
| | $E_\Gamma(x) = 1.34 + 0.668 \cdot x + 0.759 \cdot x^2$ (eV) |

例子：

入射波長定義： λ (nm)
 介質一：空氣 折射率： $a = 1$
 介質二： $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 折射率： $b(\lambda) = n(0, \lambda)$ 厚度： $d = 857.66$ (nm)
 介質三： $\text{Al}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 折射率： $c(\lambda) = n(1, \lambda)$

入射角定義： $\theta = 45 \left(\frac{2\pi}{360} \right)$ (radians)

介質一至二的折射角定義： $\alpha(\lambda) = \text{asin} \left(\frac{a}{b(\lambda)} \cdot \sin(\theta) \right)$ (radians)

介質一至二間介面的矩陣： $A(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{a - b(\lambda)}{a + b(\lambda)} \\ \frac{a - b(\lambda)}{a + b(\lambda)} & 1 \end{bmatrix}$

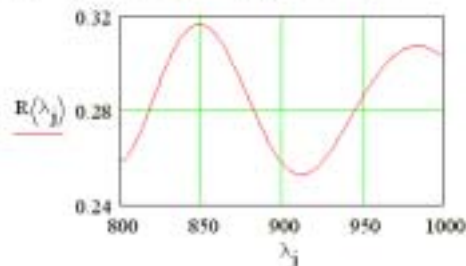
介質二中的光程矩陣： $B(\lambda) = \begin{bmatrix} e^{-i \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot b(\lambda) \cdot d \cdot \cos(\alpha(\lambda))} & 0 \\ 0 & e^{i \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot b(\lambda) \cdot d \cdot \cos(\alpha(\lambda))} \end{bmatrix}$

介質二至三間介面的矩陣： $C(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{b(\lambda) - c(\lambda)}{b(\lambda) + c(\lambda)} \\ \frac{b(\lambda) - c(\lambda)}{b(\lambda) + c(\lambda)} & 1 \end{bmatrix}$

則定義： $S(\lambda) = A(\lambda) B(\lambda) C(\lambda)$

整體反射率： $R(\lambda) = \left| \frac{S(\lambda)_{(0,1)}}{S(\lambda)_{(1,1)}} \right|^2$

入射波長對整體反射率作圖： $j = 1..199 \quad \lambda_j = 800 + 1 \cdot j$



波長850nm的反射率：

$$R(850) = 0.317$$

波長950nm的反射率：

$$R(950) = 0.286$$

例子：

入射波長定義： $\lambda = 850$ (nm)

介質一：空氣 折射率： $a = 1$

介質二：Ga_{0.5}In_{0.5}P 折射率： $b = n(0, \lambda)$

厚度定義： d (nm)

介質三：Al_{0.5}In_{0.5}P 折射率： $c = n(1, \lambda)$

入射角定義： $\theta = 45 \left(\frac{2\pi}{360} \right)$ (radians)

介質一至二的折射角定義： $\alpha = \text{asin} \left(\frac{a}{b} \sin(\theta) \right)$ (radians)

介質一至二間界面的矩陣：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{a-b}{a+b} \\ \frac{a-b}{a+b} & 1 \end{bmatrix}$$

介質二中的光程矩陣：

$$B(d) = \begin{bmatrix} e^{-i \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot b \cdot d \cdot \cos(\alpha)} & 0 \\ 0 & e^{i \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot b \cdot d \cdot \cos(\alpha)} \end{bmatrix}$$

介質二至三間界面的矩陣：

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \frac{b-c}{b+c} \\ \frac{b-c}{b+c} & 1 \end{bmatrix}$$

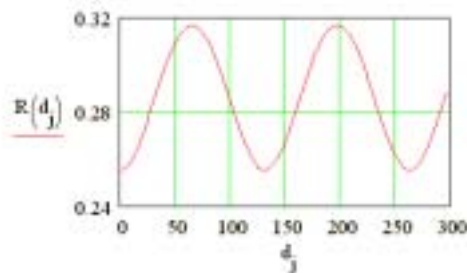
則定義：

$$S(d) = A \cdot B(d) \cdot C$$

整體反射率：

$$R(d) = \left| \frac{S(d)_{(0,1)}}{S(d)_{(1,1)}} \right|^2$$

入射波長對整體反射率作圖：
 $j = 2..298 \quad d_j = 0 + 1 \cdot j$



$$\frac{850}{4 \cdot b \cdot \cos(\alpha)} \cdot 1 = 65.97$$

$$\frac{850}{4 \cdot b \cdot \cos(\alpha)} \cdot 3 = 197.92$$

附錄二 實驗儀器實物圖

實驗量測系統



氫離子雷射



單色分光儀內部



單色分光儀



抽真空馬達、 平移台



樣品放置腔



CCD

