

計畫中文摘要：

關鍵詞：DWDM，長波長面射型半導體雷射，磷化銦，砷化鎵，雷射陣列

在本計畫中，我們將配合 DWDM 前瞻性研究計畫，開發出符合 DWDM 系統的長波長面射型半導體雷射，由於長波長面射型雷射的發散角小，波長可調，整合性高，製作成本低，將成為下一代通訊系統主要的訊號源。研究包括完成全使用磷化銦材料製成的結構，或是使用融合鍵結的方式整合長波長主動層到砷化鎵系列的高反射率布拉格鏡面上，並研究多波長面射型半導體雷射陣列的可能性，以實現在 1300nm 或 1550nm 波段室溫連續操作的單或多波長面射型半導體雷射為基本目標。

計畫英文摘要：

Keywords : VCSEL, DWDM, DBR, fusion bonded, VCSEL arrays

The long wavelength vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) has been viewed as the most promising candidate for both data- and tele-communication system for its advantages of small divergence angle, the ability to integrate with other electronics and low cost. In this project, our objective is to develop and realize long wavelength VCSEL that can be used in DWDM system. Our research effort will concentrate on the investigation and development of various DBR VCSEL structures such as dielectric DBR mirror, Sb-based DBR for one step growth technique, and wafer fusion bonded structure. We will also study the feasibility for fabricating multi-wavelength 1300 /1550nm VCSEL array, which can efficiently operate under high temperature environment to meet DWDM requirement.

目錄

計畫中文摘要.....	1
計畫英文摘要.....	2
目錄.....	3
報告內容.....	4
參考文獻.....	12
表一、不同材料組合為達到波長 1550nm 高反射率所需的層數.....	15
圖一、Etched-well 結構的示意圖.....	15
圖二、Etched-well 面射型雷射以 epi-down 的方式封裝之示意圖.....	15
圖三、InGaAsP/InP 及 a-Si/SiO ₂ 結構的面射型雷射.....	16
圖四、再成長 InP 的 SEM 照片.....	16
圖五、Sb-based DBR 鏡面之 1.55um 面射型雷射.....	16
圖六、GaAs/AlGaAs DBR 鏡面與 InGaAsP 主動層融合的 1300nm 面射型雷射.....	17
圖七、應力補償 AlInGaAs 多重量子井之面射型雷射結構.....	17
圖八、雙面融合鍵結式結構.....	17
圖九、橫向 AlGaAs 氧化法產生電流侷限.....	18
圖十、在晶圓上佈上不同大小的遮罩，成長出不同波長的面射型雷射之示意圖.....	18
圖十一、使用微機械的方式控制波長變化.....	18
圖十二、InP-based VCSEL 的結構、電場與能量的模擬.....	18
圖十三、元件出射光強度對入射激發雷射光強度圖.....	19
圖十四、InGaAs 臨界厚度與銻含量的關係圖.....	19
圖十五、不同銻含量的 InGaAs 與 InGaAs:Sb 量子井的光激輝光光譜.....	20
圖十六、InGaAs 與 InGaAs:Sb 的高解析度穿透式顯微鏡照片.....	20
圖十七、InP/airgap 布拉格反射鏡的電子顯微鏡照片.....	20
圖十八、融合鍵結面的電子顯微鏡圖.....	21
圖十九、利用矽 (Si) 離子佈植之面射型雷射在 85 /85 humidity 的操作下之可靠度測試.....	21
圖二十、大出光孔徑(8μm)、高功率(3.8mW)及單模高速(10Gb/s)面射型雷射的光譜圖.....	22
圖二十一、利用氧離子佈植之高速面射型雷射在 10Gb/s 傳輸的眼圖 (eye-pattern)	22
圖二十二、利用 InGaAsP/InGaP 應力補償之高速面射型雷射在 12.5Gb/s 傳輸的眼圖 (eye-pattern)	23
成果自評.....	23
Publication list.....	24

報告內容：

(一) 前言

本計劃預計三年內開發出符合 DWDM 通訊用長波長 1300nm/1550nm 面射型雷射 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)。操作在 1300nm 和 1550nm 的面射型雷射其發散角小、整合能力高，在光纖通訊的應用上極具低成本發光源的潛力。目前在短距離的資料通訊中常用 1300nm LED 和 850nm 面射型雷射作為訊號源；而 1300nm 面射型雷射極有機會取而代之。由於光纖在 1300nm 有較大的距離頻寬乘積，使用 1300nm 面射型雷射將使資料傳輸量至少增加一倍。此外，面射型雷射具有低成本的優勢，容易製成多波長二維雷射陣列及適合和其他元件的整合能力使得單模 1300nm 和 1550nm 面射型雷射可成為下一代 DWDM 系統的訊號源。

(二) 研究目的

目前，國外包括美國、日本、歐洲等研究機構及公司團體熱衷於長波長面射型雷射的研究。其中 UCSB, Walter Schottky Inst., NTT Photonics Lab., Alcatel, Noval Crystal 及 Sandial Lab. 已成功製成以電流驅動室溫下連續操作的長波長面射型雷射 [1] – [4]。其他機構亦均爭相在此領域發展 [49] – [54]，並朝向可供多波長的面射型雷射的應用研究。因此在此時投入相關研究，將可縮短國內研發時程及縮小與各國研究技術的差距。

(三) 文獻探討

在國內的技術及市場現況方面，關於面射型雷射的研究情形，以交通大學、工研院及台灣大學在 850nm 及 980nm 面射型雷射的研究已有相當的成果；而業界方面，有光環科技和全新科技在 850nm 面射型雷射商用產品中開發製程與磊晶；至於長波長邊射型雷射 (Edge Emitting Laser, EEL) 方面，包括交通大學、中央大學、成功大學及工研院等已有不錯的水準，而在市場上包括嘉信光電、聯亞光電及友嘉科技均已推出 1300nm 和 1550nm 邊射型雷射產品及磊晶片。惟目前是國內尚無單波長 1300 和 1550nm 面射型雷射的研究，更無多波長面射型雷射陣列的發展。由於近年來光纖網路及通訊快速發展，對高速度、高頻寬雷射光源將更迫切，因此單波長或多波長之長波長面射型雷射的地位將會日趨重要。

交大在面射型雷射的研究團隊起步甚早，目前已具備製作 GaAs/InGaAs/AlGaAs 邊射型雷射二極體及面射型雷射二極體的設計、磊晶、製程及分析能力，是國內相當具有光電半導體元件經驗的研究團隊，相信在研發磷化銦 (InP) 長波長面射型雷射的過程中，除了能為國家培育相關的光電人才、增加國家在光電世界的水準，更可提昇國家在光電及通訊產品的競爭力。

近紅外 780-980nm 的 GaAs 系列面射型雷射在過去幾年有著極快的進步幅度。相較之下，第一個長波長 1300nm 面射型雷射在 1979 時由日本 Iga 教授發表後 [5]，進展始終緩慢。其主要的原由有兩個，一是製作波段在 1300-1550nm 的高反射鏡面技術上困難高，另一是在高溫操作下主動層的增益不足。成長在 InP 基板上的磊晶材料有兩個主要系統，分別為 InGaAsP 及 AlInGaAs；但這兩種材料系統均無法提供夠大的折射係數差異以供高反射鏡面的製成；到目前為止長波長面射型雷射的研發大多著重在各種垂直共振腔結構的設計上。因此，如何研發高增益的主動層；製作高反射率的 DBR 鏡面以及設計低熱阻抗的面射型雷射結構即為長波長面射型雷射的研究重點。

(四) 研究方法

到目前為止，長波長面射型雷射的結構大致可分為以下三種

1. Etched-well 面射型雷射 (使用全介電材料反射鏡面)

2. 介電材料反射鏡面與磊晶材料反射鏡面混合型面射型雷射
3. 全磊晶材料反射鏡面射型雷射

事實上，由於磊晶技術的進步以及界面融合技術的成熟，促使這幾種結構的特性在最近幾年有著顯著的進步與突破，同時更存在許多值得改善與發揮創意的空間，這也是未來幾年我們必須全力以赴的目標。目前世界各國在長波長面射型雷射元件發展狀況，茲就分為以下四類加以說明：

1. 主動層的設計
2. DBR 反射鏡面的選擇
3. 元件結構的設計
4. 波長可調式面射型雷射陣列

1. 主動層的設計

由於面射型雷射在結構上有相當小的增益長度，需要較高的臨界增益以及相當高的熱阻值，因此面射型雷射的主動層條件比邊射型雷射還要嚴苛。除此之外，長波長雷射一直以來受到 Auger recombination 效應、漏電流(carrier leakage)以及和載子注入有關的光損耗的不良效應影響。隨著磊晶技術的進步，採用具應變多重量子井(Strained multi-quantum well)的主動層成為改善這些問題的重要關鍵，也由於較高的共振腔光損耗以及量子井增益的飽和，長波長面射型雷射結構中量子井數目通常都高達十五個。然而，過多具形變的多重量子井在磊晶成長時容易達到臨界厚度(Critical thickness)，在主動層中產生缺陷。因此，為了抵銷量子井形變造成的應力，須在位障層中採用反方向的形變力量，稱為應力補償多重量子井(Strain compensation multi-quantum well, SC-MQW)[6]-[10]。值得一提的是，傳統應用在邊射型雷射的分開侷限異質結構(Separate confinement heterostructure, SCH)在面射型雷射中並不適用，去除分開侷限異質結構，可減少在侷限層(Confinement layer)中的光損耗，提高操作溫度[11]。然而，多重量子井的載子吸收仍未解決，在長波長面射型雷射中此效應更被正向增強，已有許多關於 InGaAsP 主動層因較差的載子侷限產生的漏電流現象被發表[12]-[13]。這困境可望藉由成長其他不同材料的主動層解決，例如 AlInGaAs 成長在 InP 基板上[6]、或在 GaAs 基板上成長 InGaAs 量子點(Quantum dot, QD)以及 InGaNaNs 摻氮主動層[14]-[15]。

2. 布拉格反射鏡面(Distributed bragg reflector, DBR)的選擇

高反射率 DBR 鏡面的製作需要二種不同的折射系數材料的組合，以厚度為四分之一波長、高低間隔排列的順序，達到高反射率的目的。此高、低折射係數比值愈大，達到高反射率所需的層數就愈少。除了要達到光學的高反射率要求之外，鏡面材料的選擇還需考慮熱阻和電阻的特性。直到現在，長波長面射型雷射的鏡面材料不像 GaAs 材料的面射型雷射，其材料選擇仍是未定之數，各有優缺點。表一顯示出數種不同材料組合為達到高反射率所需的層數。另一方面，若考慮材料的吸收，則折射係數小的組合，其反射率受到材料吸收的影響將更大。長波長面射型雷射的 DBR 反射鏡面可以選擇二面都是非晶相的介電材料；或者是一面是非晶相的介電材料，另一面是半導體磊晶材料；亦可兩面都用半導體磊晶材料。下面即將討論不同鏡面材料的選擇對結構及元件特性的影響。

3. 元件結構的設計

- A. Etched-well 面射型雷射 (使用全介電材料反射的鏡面)

1979 年，Soda 等人[5]發表了第一次操作在 1300nm 的面射型雷射的研究，此研究即採用 Etched-well 的結構，如圖一。此面射型雷射採用低溫沉積技術在共振腔的二面鍍上非晶相的半導體或是絕緣介電材料。見表一，對長波長面射型雷射而言，最常見的組合材料是使用 SiO₂ 為低折射係數材料及 a-Si 為高折射係數材料。然而此二種材料組合的熱導值非常差，使得應用此材料組合的元件只能限制在脈衝操作。最近亦發表了其他材料的組合以解決熱導的問題；如使用 a-Si/MgO [16]-[17] 以及使用 a-Si/Al₂O₃ [18]。通常為了降低主動層和 heat sink 之間的熱阻值，Etched-well 面射型雷射必須以 epi-down 的方式封裝以增加散熱。如圖二，Uchiyama 等人 [18]發表了此種結構的面射型雷射，在這篇研究論文中，使用 MOCVD 成長 12 個應力補償的 InGaAsP 多重量子井，並以二次再成長的方式製作電流侷限的結構，上下使用 a-Si/Al₂O₃ 製作高反射率 DBR 鏡面，此結構可在連續操作下達到 36 度保持 1300nm 的雷射，而特性溫度約可達 50K。

B. 採用磊晶材料鏡面的長波長面射型雷射

a. 磊晶材料鏡面之特性

使用磊晶材料作為 DBR 鏡面的主要優點在於其鏡面可藉摻雜而可導電，並可能一次成長完所有的結構，以達到易於製程、測試及整合的優點。若要採用可導電的 DBR 反射鏡面，設計時則必須同時考慮鏡面反射率和電阻的相互關係。摻雜會增加鏡面吸收；此外，材料間存在著相當大的能隙差，產生的能障不連續造成大的電阻是採用可導電的 DBR 鏡面的最大困難。使用介面漸變成長和 δ -摻雜可改善高電阻與高吸收的情況。然而，三元或四元的材料製成的反射 DBR 鏡面，其熱導值不如二元的材料好，若採用三元或四元的材料的反射 DBR 鏡面所製程的元件最好藉由 epi-down 封裝或再成長的方式以增加熱導值。

b. 採用 InGaAsP 和 AlInGaAs 材料的面射型雷射

使用 InGaAsP 和 AlInGaAs 材料為鏡面的主要問題是須成長厚度超過 10 μ m 的 DBR 鏡面，由如此厚的磊晶層將因應而生諸如光損耗、高電阻等問題，限制了元件的特性。隨著 MOCVD 成長技術的進步，Streubel 等人 [35]發表了採用 InGaAsP/InP 及 a-Si/SiO₂ 結構的面射型雷射，如圖三。此元件成長 50 個週期的 InGaAsP/InP 四分之一波長 DBR 鏡面及九個應力補償的多重量子井，雷射光由 5 個週期的 a-Si/SiO₂ DBR 鏡面射出。可惜的是此元件仍只能在脈衝下操作，可行的改善方法是將 DBR 鏡面向下蝕刻呈垂直圓柱後再成長 InP 將周圍填平。圖四 [36]即為再成長 InP 的 SEM 照片。a-Si/SiO₂ 恰可做為再成長的遮罩。由於 1300nm 面射型雷射的光波能量較大，因此更難找到適合的磊晶材料鏡面；因此關於 1300nm InGaAsP/InP 材料的鏡面少有研究發表，大多為 1550nm 的結構被提出。實際上，幾乎所有採用 InGaAsP 和 AlInGaAs 的 DBR 鏡面為 n 型，原因是 n 型鏡面擁有較低的光損耗，較佳的電導和較高的反射率。而 p 型長波長用 DBR 鏡面的開發便值得研究。

c. 其它材料組合

(a) Sb-based 材料

對 1300 和 1550nm 的應用，為使 DBR 鏡面的吸收能隙高於雷射光子能量，必須採用 AlGaAsSb 的組合 [30]。此外，AlAsSb 和 GaAsSb 之間存在著相當大的價帶位能差，需要更進一步的研究以降低此種材料製成 DBR 鏡面的電阻值。E.Hall 等人 [20] 於 2000 年時發表了第一個採用 Sb-based DBR 鏡面可在室溫下連續操作的 1.55 μ m 面射型雷射；如圖五，此結構採用和 InP 晶格匹配，一次成長完所有結構的方式製成面射型雷射，可在室溫連續操作到 20 度。不過此元件的

電阻值仍大，造成的熱效應限制了此元件的特性，使得 20 度操作的最大功率只達約 90uW。由於此種結構為一次成長，正如同 850 及 980nm AlGaAs/GaAs 系列的面射型雷射一般，享有製程及測試上的簡易性，使得此種結構有相當大的潛力。

(b) 量子點及摻 N 主動層

實際上，最佳的磊晶材料 DBR 鏡面仍應屬採用 AlGaAs/GaAs 系列的組合，此種材料組合的 DBR 鏡面有著極佳的熱導及優異的折射係數比值。可惜的是，以 InGaAsP 或 AlInGaAs 為主動層的面射型雷射結構必須成長在晶格匹配的 InP 基板上，若能採用可以匹配在 GaAs 基板上的主動層材料則成為極受歡迎的課題。其中，InGaAs 量子點[37]和 InGaNaAs 形變主動層[14]-[15]最為被廣泛研究。

GaAsN 材料其能隙對組成成分的變化關係對研究單位而言是一直想要釐清的一環。對一般傳統的 III-V 族而言，隨著半導體晶格常數(Lattice constance)的變小，能隙(Band gap)會隨之增加。但是摻入了少量的氮，因相當大的 Bang gap bowing 效應，使得 GaAsN 的能隙實際上變小了！因此採用成長在 GaAs 基板上的 InGaAsN 其發光波長比 InGaAs 波長還要長。第一個在室溫操作的 1300nm InGaAsN 脊狀波導雷射在 1997 年由 M. Kondow 等人發表[14]，而真正室溫連續操作 1300um 波段的面射型雷射則由 Sandia 實驗室與共同合作的 Cielo communicatio Inc.在 2000 年時發表 60uW 的面射型雷射元件。由於含氮的主動層結合了 AlGaAs DBR 鏡面以及其應變多重量子井的優異溫度特性，使得此種結構的後續發展，令人矚目。

c. 融合鍵結式結構

(a) 單面融合鍵結式結構

由於半導體材料間以融合鍵結(Fusion Bonded)的介面可導電及導熱，加上光可穿透此介面，使得此種方式非常適合光電元件以及面射型雷射元件的製作。Dudley 等人[38]率先使用 GaAs/AlGaAs DBR 鏡面與 InGaAsP 主動層融合，發表了室溫脈衝操作的 1300nm 面射型雷射，如圖六。上層 DBR 反射鏡為三對 Si/SiO₂，下層為 28 對 N 型 AlAs/GaAs DBR 反射層；主動層採用 MOCVD 成長 300nm 厚的 InGaAsP。其元件的臨界電流為 9mA，臨界電流密度為 9.6KA/cm²。1550nm 面射型雷射亦可採用此種方法製成。圖七為 Qian 等人所提出的改進結構[51]。此結構採用應力補償 AlInGaAs 多重量子井，比 InGaAsP 系列有較佳的載子侷限，並採用氧作離子佈植形成電流侷限，使得此種元件可連續操作的溫度達 40 度，臨界電流密度為 1.57KA/cm²。

(b) 雙面融合鍵結式結構

由於單面融合鍵結式面射型雷射需使用環狀電極，而環狀電極卻會使注入電流不均勻，導致熱導性不佳，以及增加介電性材料鏡面的光損耗。因此融合鍵結式結構為達到導熱與導電的效果必須朝向使用雙面融合鍵結式結構。因此，截至目前為止，就長波長面射型雷射而言，雙面融合鍵結式結構最能成功的達到高溫下連續操作[1]，[50]，[56]-[60]。第一個室溫連續操作在 1550nm 面射型雷射即採用 air-post index-guided 結構[50]，如圖八。由於此種方式的便利性，其他不同結構也可使用融合鍵結的方法將面射型雷射整合到 GaAs 基板上，如此一來，與 GaAs 系列相似的製程及測試封裝的方法及可同樣的應用在長波長面射型雷射上。

Margalit 等人在 1996 年發表如圖九的結構。採用橫向 AlGaAs 氧化法產生電流侷限[64]-[65]。而上層 DBR 反射層採用漸變結構，主動層採用七個應變補償的

InGaAsP 多重量子井，此元件 23 度連續操作的臨界電流為 0.8mA；而高溫連續操作可達 64 度，此結構更由 Karim 等人改良，在主動層上方採用了超晶格位障以降低融合時位錯缺陷遷移到主動層，並採用 6 個應變 InGaAsP 量子井，主動層上方為 25 對 AlGaAs/GaAs DBR，並製作了氧化侷限，下層為 31 對 un-doped DBR，N 型電極則製作在 n-cladding 層上。此元件在室溫連續操作下，輸出功率可達 0.5mW，而最高可連續操作的溫度可到 85 度，這些特性是目前文獻發表中最好的紀錄。

4. 波長可調式面射型雷射陣列

由於面射型雷射陣列可以發出不同波長的雷射光以及其精準控制波長的特性，應用在 DWDM 的面射型雷射陣列可使傳輸頻寬增加，促使 tele-communication 的容量增大、速度增快。因此，如何製作可調波長的面射型雷射陣列便成為極為實用的研究課題。製作可調波長的面射型雷射陣列，其中一個方法是利用 MOCVD 選擇性成長的特性(Selective growth)，藉成長速率的不同來達到多波長的效果。其製作方式在於晶圓表面佈上面積大小不同的遮罩，在 MOCVD 成長時，反應氣體在這些遮罩上的移動速率不同，造成區域性成長速率不同，因此，此法可以用來橫向控制量子井的發光波長。Koyama 等人[67]-[68]即採用此法，在晶圓上佈上不同大小的遮罩，成長出不同波長的面射型雷射，如圖十。其面射型雷射陣列的波長可調範圍為 20nm。

另一方面，雖然 MBE 無法像 MOCVD 可以選擇性成長，但有研究指出[76]，藉著在晶圓背後作遮罩可使晶圓表面的溫度發生變化，因溫度的不同使得磊晶成長速率不同，亦可達到橫向控制波長的目的，應用此法所作成的面射型雷射陣列，其波長變化範圍可達 60nm。

除此之外，還可以使用微機械的方式控制波長變化[70]-[73]。如圖十一所示，以部分 DBR 的薄膜懸空，作為上反射層，藉加入偏壓以改變薄膜和共振腔之間的距離，使得共振波長產生偏移因而可以調制面射型雷射的雷射波長。以此法作成的元件，其波長變化範圍可達 30nm。

到目前為止所發展關於波長可調式面射型雷射陣列，其中心波長都仍侷限在 850nm 及 980nm，長波長面射型雷射則尚無相關波長可調式陣列，因此在這方面的領域非常值得切入研究。

(五)結果與討論

1. 主動層的設計

本計劃在成長於 InP 基板上之系統，一開始先設計符合光激發的雷射結構。在 InP 基板上成長 35 對較大折射係數比值 InGaAlAs/InP 組合的 DBR 鏡面，使用 growth interruption 技術，成長出高品質、高反射率的 DBR 反射鏡面接著是 2λ 的 AlInGaAs 系列共振腔，此種材料具有較高的溫度特性，共振腔中有 3 組 MQW，每組 MQW 有 5 個應變補償量子井，採用週期性的 MQW 避免量子井增益的飽和，接著是 10 對高達 99.9% 反射率的 dielectric SiO₂/TiO₂ DBR 反射鏡面；其結構、電場與能量的模擬如附圖十二。此結構已成功實現了室溫光激發長波長面射型雷射，其發光波長在 1562nm，而臨界光激發功率約 30mW，結果如圖十三。

在 1.3 μm 長波長方面，1.3 μm 發光材料方面依基板分類主要有 GaAs 系統與 InP 系統。傳統成長在 InP 基板的 InGaAsP 與 InGaAlAs 發展較早，但是 InP 系統受限於缺乏折射率差異大的布拉格反射鏡，需要 60 對以上的反射層才能達到 99 % 以上反射率，因而大大增加磊晶的困難，也使電阻增加，劣化了元件的溫度特性。為了克服反射鏡的問題，於是發展出晶元鍵結製程與 AlGaAsSb 布拉格反射鏡。晶元

鍵結製程的好處是可以結合 InP 系統的主動層與 GaAs 系統的布拉格反射鏡，已經證明可達到優異的效能，但是有可靠度與量產困難的議題存在。而利用 AlGaAsSb 布拉格反射鏡成長的雷射結構則缺乏有效的電流侷限技術，因此需開發各種電流侷限制程，也造成製程上的複雜且量產困難。此外，由於材料之價電帶能隙補償差比例(conduction band offset ratio)較小且 Auger 效應嚴重，因此此 InP 系統之面射型雷射普遍存在著特徵溫度低的缺點而使得整個元件對於溫度相當敏感。

由於這些困難，近年來大家紛紛轉向開發成長在 GaAs 基板的長波長材料，主要包跨 1. InGaAs(N) 2. high strain (In)GaAsSb 3. InAs 量子點材料。成長在 GaAs 基板的好處是可使用高能隙 AlGaAs 做為電子侷限，阻止電子外溢，可以高溫操作。而且可延續 850 nm 面射型雷射所建立的製程技術包括：

A. AlGaAs/GaAs DBR：通常為此種材料組合的 DBR 鏡面有著極佳的熱導及優異的折射係數比值。

B. 成熟的 AlAs ($\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$)氧化技術：提供光學侷限與極佳的電流侷限

以上優點使得 GaAs 系統較具吸引力，尤其是在 850 nm 面射型雷射的量產經驗，使在 GaAs 系統面射型雷射比 InP 系統更有實用的潛力。

我們實驗室在成長長波長 InGaAs:Sb 材料方面已經有初步的結果，由於目前此波段的材料大部分為 InGaAs，但是當 In 含量增加超過 40%時，材料的臨界厚度會被限制，因此波長只能勉強達到 1.2 μm ，為了達到更長的發光波段，必須延伸材料的臨界厚度。因此我們在材料內加入 Sb 做為表面活性劑，成功的將 InGaAs 的臨界厚度增加了。圖十四為臨界厚度與銻含量的關係，我們可以發現再加入 Sb 之後，臨界厚度的確增加了，證明此方法的確可以延伸發光波長。圖十五為 InGaAs:Sb 的光激輝光光譜，我們可發現 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ 的發光強度最強，但是當銻含量由 0.41 增加到 0.42 時，發光強度迅速下降，顯示材料因超過臨界厚度而劣化，若在 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ 的材料中加入 Sb，可使波長繼續紅移，且材料發光強度與 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ 材料接近，這也證明 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}:\text{Sb}$ 的活性層比 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ 更適合作為長波長雷射發光介值。圖十六為 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ 與 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}:\text{Sb}$ 的穿透式電子顯微鏡照片，結果顯示 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}:\text{Sb}$ 的介面比 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ 介面更為平整。由於在 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ 中因為晶格係數不匹配，有很大的應力存在，因此造成 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}$ 材料容易形成 3D 成長而非量子井需要的 2D 成長， $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}:\text{Sb}$ 的平整介面證明 Sb 的確有做為表面活性劑的功效。未來我們將藉由降低成長溫度與增加 Sb 的參雜繼續延伸發光波長，另外此 $\text{In}_{0.41}\text{Ga}_{0.59}\text{As}:\text{Sb}$ 材料的最佳化已經完成，元件的成長與製作也持續進行中。

2. 布拉格反射鏡面(Distributed bragg reflector, DBR)

A. Growth of high reflectivity InP/InGaAlAs DBR

由於缺乏折射率差異大的布拉格反射鏡，傳統的 InP/InGaAsP 與 InAlAs/InGaAlAs 材料需要成長 40~60 對的反射層方能達到所需的反射率。但是根據最近幾年發表的報告，InP/InGaAlAs 的折射率差可達到 0.34，且具有較小的導帶差與較高的熱導率，這使的 n-型的布拉格反射鏡具有較低的電阻與散熱

然而在成長 InP and InGaAlAs 時會產生均勻性，介面不平整等問題，長晶方面與五族元素分佈問題，使的布拉格反射鏡的成長困難。為了克服這些問題，我們使用長晶中斷法來控制與切換 InP 與 InGaAlAs，並得到良好的成果，其結果發表在 [77]。我們得到的布拉格反射鏡的反射率與均勻度對於中斷的時間非常的敏感，為了得到高反射率，中斷時間必須大於 12 秒並且與全部的成長時間取得一個最佳化條件。

B. Fabrication of high reflectivity InP/airgap DBR

我們也發展了另一個成長高反射率布拉格反射鏡的方法，即使用 InP/airgap 結構作為反射層[78]。此方法使用 InP/InGaAs 磊晶片，再將 InGaAs 蝕刻掉，因此留下 InP 與空氣的反射介面，其優點為低損失與高折射率差異（高達 2.16）。因此，使用此種方法只需要三層反射層即可達到所需要的反射率 99.9%。在製程上，平常所使用的蝕刻液為 FeCl_3 溶液，但是此溶液蝕刻選擇比低，易使得反射率截止寬度受限與反射率值下降。我們已經發表製造 InP/airgap 高反射率布拉格反射鏡所需的蝕刻比與蝕刻率的參數。圖十七為 InP/airgap 布拉格反射鏡的電子顯微鏡照片，此結構由 MOCVD 成長，具有三層 InP/InGaAs 結構與 1.25 個波長厚度的 InP 層，蝕刻溶液為硫酸。反射率的峰值為 99.9%，座落的波長在 1.54 微米，反射率的截止寬度為 200 奈米。此外值得一提的是此反射鏡機械結構穩定，加以是直立結構，因此極適合用來作為長波長面射型雷射的布拉格反射鏡。

3. 元件結構的設計

A. 融合鍵結：

由於直接使用 InP/InGaAsP 的 DBR 會需要約 47 對才能達到 99.5% 的反射率，而使用折射率差異高的 GaAs/AlAs 為 DBR 只需 25 對就能達到 99.5%。因此我們發展了雙面融合鍵結的技術，成功地將 GaAs/AlAs DBR 和 InGaAlAs/InP MQW 融合鍵結製造了波長 1527nm 的面射型雷射，並以光激發方式觀察到 lasing 的現象，如圖十三所示，其半高寬為 1.8nm，而且由高倍電子顯微鏡（如圖十八）亦證實了融合鍵結的界面非常平整，沒有損壞到元件的結構。

B. 高速面射型雷射的製程

在製作面射型雷射的製程方面，傳統侷限 850nm 面射型雷射的電流之方式有二種，一為氫離子佈植，另一為溼氧化(oxidation)高鋁含量的 DBR。基於元件的取得，及元件的穩定性，以下的研究先在易取得的 850nm 面射型雷射上製作。

a. 改善氫離子佈植之面射型雷射的輸出特性：

氫離子佈植製程較方便，但因缺乏折射率差異(index guiding)，其高頻響應的速率一般只能達到 2.125Gb/s 左右，我們利用在出光口覆蓋透明電極的方式增加電流分佈的均勻性而增加雷射的高頻響應速率達 2.5Gb/s 以上，其結果發表在 Material Science Electronic: B 中[79]。另外，我們亦在 **Solid-State Electronics** 發表了以矽離子(Si^+)佈植取代氫離子佈植，使雷射的高頻響應速率可達 2.5Gb/s 以上，且在 85 /85 humidity 的操作下達到超過 2000 小時的可靠度測試，如圖十九所示。而溼氧化的電流侷限方式因有折射率的差異，所以其面射型雷射的高頻響應一般可達到 2.5Gb/s 以上，但要其氧化的孔徑要小於 $4\mu\text{m}$ 才有機會達單模高速 10Gb/s 的高頻響應速率且其無法具有高功率的輸出[80]。因此，在高速單模面射型雷射的製作方面，我們另外發表二種新穎的製程方法，如下所示。

b. 新穎的製程方式：

(a) 我們利用氧離子佈植的方法，結合離子佈植的製程方便優勢及氧離子較氫離子有較好的折射率差異，配合溼氧化技術成功的製造出大面積(出光孔徑 $8\mu\text{m}$)、高功率(3.8mW，如圖二十所示)的單模高速(10Gb/s)面射型雷射，圖二十一顯示出此雷射操作在 10Gb/s 的眼圖(eye pattern)，其結果則發表在 Electronics Letters [81]及 CLEO 2003[82]。

(b) 利用 InGaAsP/InGaP 應力補償 (strain-compensated) 的方式成長多層量子井(MQW)，取代傳統的 AlGaAs/GaAs MQW，其面射型雷射的高頻響應可高達 12.5Gb/s，如圖二十二所示，其結果發表在 **Electronics Letters**[83]。

以上高速的面射型雷射之製作雖是製作在磊晶技術較成熟的 850nm 面射型雷射上，但其將來可應用於製作長波長的高速面射型雷射上，將可促進光纖傳輸系統的速率。

參考文獻：

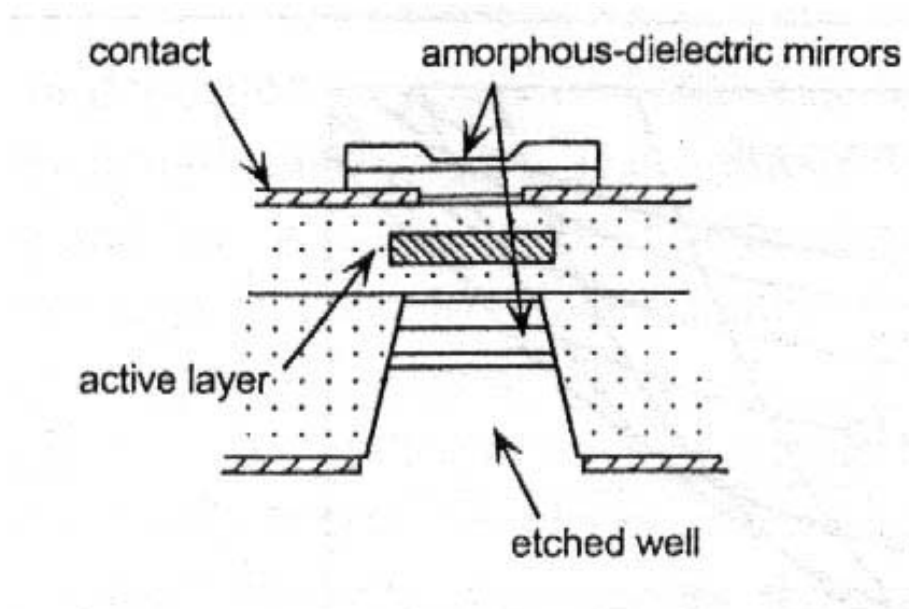
- [1] A. Karim, K. A. Black, P. Abraham, D. Lofgreen, Y. J. Chiu, J. Piprek and J. E. bowers, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 12(11), p.1438(2000)
- [2] R. Shau, M. Ortsiefer, M. Zigldrum, J. Rosskopf, G. Bohm, F. Kohler, M. C. Amann, *Electron. Lett.*, 36(15), p.1286(2000)
- [3] Y. Ohiso, R. Iga, K. Kishi, C. Amano, *Electron. Lett.*, 36(1), p.39(2000)
- [4] J. Boucart, C. Starck, F. Gaborit, A. Plais, F. Brillouet, J. Jacquet, L. Goldstein, C. Fortin, D. Carpentier, P. Salet, F. Brillouet, J. Jacquet, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11(6), p.629(1999)
- [5] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu, *Jpn. J. Appl. Phys.* 18(2) p.2329(1979)
- [6] C. E. Zah, R. Bhat, B. N. Pathak, F. Favire, W. Lin, M. C. Wang, N. C. Andreadakis, D. M. Hwang, M. A. Koza, T. P. Lee, Z. Wang, D. Darby, D. Flanders and J. J. Hsieh, *IEEE J. Quantum Electron.*, 30(2), p.511(1994)
- [7] O. Issanchou, J. Barrau, E. Idiart-Alhor and M. Quillec, *J. Appl. Phys.*, 78(6), p.3925(1995)
- [8] C. H. Lin, C. L. Chua, Z. H. Zhu, F. E. Ejeckam, T. C. Wu, Y. H. Lo and R. Bhat, *Appl. Phys. Lett.* 64(25), p.3395(1994)
- [9] C. L. Chua, C. H. Lin, Z. H. Zhu, Y. H. Lo, M. Hong, J. P. Mannaerts and R. Bhat, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6(12), p.1400(1994)
- [10] C. L. Chua, Z. H. Zhu, Y. H. Lo, R. Bhat and M. Hong, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 7(5), p.444(1995)
- [11] S. Uchiyama and T. Ninomiya, *Optical Rev.*, 3(2) p.59(1976)
- [12] S. Seki, H. Oohashi, H. Sugiura, T. Hirono and K. Yokoyama, *IEEE J. Quantum Electron.*, 32(8) p.1478(1996)
- [13] H. Ishikawa and I. Suemune, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6(3) p.344(1994)
- [14] M. Kondow, T. Kitatani, M. C. Larson, K. Nakahara, K. Uomi and H. Inoue, *LEOS'97 Ann. Mtg*, p.325(1997)
- [15] M. C. Larson, M. Kondow, T. Kitatani, Y. Yazawa and M. Okai, *Electron. Lett.*, 33(11), p.959(1997)
- [16] H. Tanobe, M. Oshikiri, M. Araki, F. Koyama, and K. Iga, *Proc. IEEE Lasers Electro-Optics Soc. Annu. Mtg.*, Boston, MA, Paper DLTA 12.2(1992)
- [17] T. Baba, Y. Yogo, K. Suzuki, F. Koyama, and K. Iga, *Electron. Lett.*, 29(10), p.913(1996)
- [18] S. Uchiyama, N. Yokouchi and T. Ninomiya, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 9(1) p.8(1997)
- [19] O. K. Kwon, B. S. Yoo, J. H. Shih, J. H. Baek, B. Lee, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 12(9), p.1132(2000)
- [20] E. Hall, S. Nakagawa, G. Almuneau, J. K. Kim, L. A. Coldren, *Electron. Lett.*, 36(17), p.1465(2000)
- [21] C. Starck, *LEOS '99 12th Ann. Mtg.*, V. 1, p. 139(1999)
- [22] J. H. Shin, B. S. Yoo, O. K. Kwon, *Electron. Lett.*, 36(6), p.542(2000)
- [23] M. Ortsiefer, R. Shau, G. Bohm, F. Kohler, M. C. Amann, *Electron. Lett.*, 36(5), p.437(2000)
- [24] J. P. Debray, J. Sagnes, G. Le Roux, P. Legay, M. Quillec, C. Kazmierski, R. Madani, J. F. Palmier, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11(7), p.770(1999)
- [25] U. Erksson, P. Evaldsson, K. Streubel, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 11(4), p.403(1999)
- [26] H. Gebretsadik, O. Qasaimh, Jiang Hongtao, P. Bhattacharya, C. Caneau, R. Bhat, *J. Lightwave Technol.*, 17(12), p.2595(1999)
- [27] Jong-Hyeob Baek, Won Seok Han, Hyung Koun Cho, Byeung Su Yoo, Bun Lee, In Hoon Choi, *Conf. on 1999. CLEO/Pacific Rim'99, V.3*, p.892(1999)
- [28] H. W. Song, D. S. Song, I. Y. Han, C. K. Kim, H. Y. Ryu, Y. H. Lee, *Conf. on 1999. CLEO/Pacific Rim'99, V.3*, p.614(1999)
- [29] L. Goldstein, C. Fortin, C. Starck, A. Plais, J. Jacquet, J. Boucart, A. Rocher, C. Poussou, *Electron. Lett.*, 34(5), p.268(1998)
- [30] G. Ungaro, J. C. Hammand, I. Sagnes, B. Sermage, J. P. Debray, C. Meriadec, T. Rivera, J.

- L. Oudar, R. Rai, *Electron. Lett.*, 34(14), p.1402(1998)
- [31] S. Goeman, S. Boons, B. Dhoedt, K. Vandeputte, K. Caekebeke, P. Van Daele, R. Baets, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10(9), p.1205(1998)
- [32] I. F. L. Dias, B. Nabet, A. Kohl, J. L. Benchimol, J. C. Harmand, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10(6), p.763(1998)
- [33] Y. Ohiso, C. Amano, Y. Itoh, H. Takenouchi, T. Kurokawa, *IEEE J. Quantum Electron.*, 34(10), p.1904(1998)
- [34] C. Stark, J. Boucart, F. Gaborif, J. Jacquet, *Semiconductor Laser Conf. 1998 ISLC. NARA. IEEE 16th Int. p.105(1998)*
- [35] K. Streubel, S. Rapp, J. Andre and J. Wallin, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 8(9), p.1121(1996)
- [36] S. Lourdudoss and O. Kjebon, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 3(3), p.749(1997)
- [37] R. P. Mirin, J. P. Ibbetson, K. Nishi, A. C. Gossard and J. E. Bowers, *Appl. Phys. Lett.* 67(25) p.3795(1995)
- [38] J. J. Dudley, D. I. Babic, R. P. Mirlin, L. Yang, B. I. Miller, R. J. Ram, T. E. Reynolds, E. L. Hu, and J. E. Bowers, *Appl. Phys. Lett.*, 64(12), p.1463(1994)
- [39] M. Arzberger, M. Lohner, G. Bohm, M. C. Amann, *Electron. Lett.*, 36(1), p.87(2000)
- [40] S. Sekiguchi, T. Miyamoto, T. Kimura, F. Koyama, K. Iga, *Conf. Proc., 2000 Int. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials*, p.451(2000)
- [41] E. Hall, G. Almuneau, J. K. Kim, O. Sjolund, H. Kroemer, L. A. Coldren, *LEOS '99 12th Ann. Mtg., V. 1*, p. 145(1999)
- [42] G. J. Simonis, J. Pham, B. Koley, P. Shen, J. Pamulapati, Jiang Liu, P. Newman, K. Amarnath, S. S. Saini, W. Lawler, M. Datta, L. Wasiczko, L. Mait, D. Prather, W. Chang, M. Dagenais, *Parallel Interconnects, 1999 Proc. on 6th Int. Conf.*, p.43(1999)
- [43] S. Sekiguchi, T. Miyamoto, T. Kimura, F. Koyama, K. Iga, *Conf. Proc., Indium Phosphide and Related Materials, 1999. IPRM. 11th Int. Conf.* p.211(1999)
- [44] R. Westphalen, G. Landgren, B. Stalnacke, R. Beccard, *Indium Phosphide and Related Materials, 1999. IPRM. 11th Int. Conf.* p.139(1999)
- [45] J. F. Klem, O. Blum, K. Lear, *LEOS'98 Ann. Mtg, V.2*, p.130(1998)
- [46] E. Hall, J. Kim, R. Naone, H. Kroemer, L. A. Coldren, *LEOS'98 Ann. Mtg, V.1*, p.30(1998)
- [47] C. Stark, A. Plais, E. Derouin, A. Piquier, F. Gaborit, C. Fortin, L. Goldstein, J. Boucart, P. Salet, D. Carpentier, J. Jacquet, *Indium Phosphide and Related Materials, 1998 Int. Conf.* p.369(1998)
- [48] H. Gebretsadik, K. Kamath, P. Bhattacharya, C. Caneau, R. Bhat, *Indium Phosphide and Related Materials, 1998 Int. Conf.* p.307(1998)
- [49] J. P. Debray, N. Bouche, G. Le Roux, R. Raj and M. Quillec, *Electron. Lett.*, 33(10), p.868(1997)
- [50] D. I. Babic, K. Streubel, R. P. Mirin, N. M. Margalit, J. E. Bowers, E. L. Hu, D. E. Mars, L. Yang and K. Carey, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 7(11), p.1225(1995)
- [51] K. Uomi, S. J. B. Yoo, A. Scherer, R. Bhat, N. C. Andreadakis, C. E. Zah, M. A. Koza and T. P. Lee, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6(3), p.317(1994)
- [52] O. K. Kwon, B. S. Yoo, J. H. Shin, J. H. Baek and B. Lee, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6(3), p.317(1994)
- [53] J. H. Baek, I. H. Choi, B. Lee, W. S. Han and H. K. Cho, *Appl. Phys. Lett.* 75(11) p.1500(1999)
- [54] J. Piprek, Y. A. Akulova, D. I. Babic, L. A. Coldren and Bowers, *Appl. Phys. Lett.* 72(15) p.1814(1998)
- [55] Y. Qian, Z. H. Zhu, Y. H. Lo, H. Q. Hou, B. E. Hammons, D. L. Huffaker, D. G. Deppe, W. Lin and Y. K. Tu, *Proc. 1997 Conf. Optical Fiber Communications, Dallas, Texas, post-deadline PD14-1*
- [56] Y. Qian, Z. H. Zhu, Y. H. Lo, H. Q. Hou, M. C. Wang, and W. Lin, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 9(1), p.8(1997)

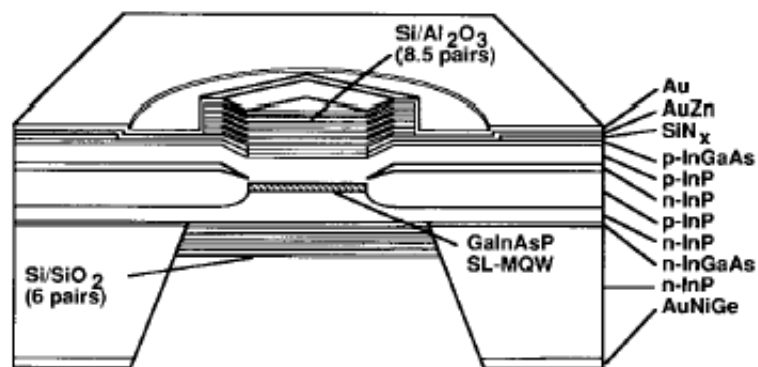
- [57] N. M. Margalit, D. I. Babic, K. Streubel, R. P. Mirin, R. L. Naone, J. E. Bowers and E. L. Hu, *Electron. Lett.*, 32(18), p.1675(1996)
- [58] N. M. Margalit, J. Piprek, S. Zhang, D. I. Babic, K. Streubel, R. P. Mirin, J. R. Wesselmann, J. E. Bowers and E. L. Hu, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 3(2), p.359(1997)
- [59] J. Piprek, A. Black, P. Abraham, E. L. Hu and J. E. Bowers, *Conf. on 1999. CLEO/Pacific Rim'99*, V.3, p.458(1999)
- [60] K. A. Black, P. Abraham, N. M. Margalit, E. R. Hegblom, Y. J. Chiu, J. Piprek, J. E. Bowers and E. L. Hu, *Electron. Lett.*, 34(20), p.1947(1998)
- [61] I. Sabnes, G. Le Roux, P. Legay, C. Kazmierski, J. F. Palmier, J. P. Debray, *Indium Phosphide and Related Materials*, 1999. IPRM. 11th Int. Conf. p.539(1999)
- [62] C. Starck, J. Boucart, A. Plais, N. Bouche, E. Derouin, A. Pinquier, F. Gaborit, J. Bonnet-Gamard, C. Fortin, L. Goldstein, F. Brillouet, P. Salet, D. Carpentier, J. Jacquet, *OFC/IOOFC'99. Tech. Dig.*, V.4, p.90(1999)
- [63] Y. Ohiso, C. Amano, Y. Itoh, K. Tateno, T. Tadokoro, H. Takenouchi and T. Kurokawa, *Electron. Lett.*, 32(16), p.1483(1996)
- [64] K. D. Choquette, W. W. Chow, G. R. Hadley, H. Q. Hou and K. M. Geib, *Appl. Phys. Lett.* 70(7) p.823(1997)
- [65] H. Gebretsadik, K. Kamath, W. D. Zhou, P. Bhattacharya, C. Caneau and R. Bhat, *Appl. Phys. Lett.* 72(2) p.135(1998)
- [66] M. Orenstein, A. C. Von Lehmen, C. Chang-Hasnain, N. G. Stoffel, J. P. Harbison, and L. T. Florez, *Electron. Lett.*, 27(5), p.437(1991)
- [67] F. Koyama, T. Mukaihara, Y. Hayashi, N. Ohnoki, N. Hatori and K. Iga, *Electron. Lett.*, 30(23), p.868(1994)
- [68] F. Koyama, T. Mukaihara, Y. Hayashi, N. Ohnoki, N. Hatori and K. Iga, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 7(1), p.10(1995)
- [69] G. G. Ortiz, S. Q. Luong, S. Z. Sun, J. Cheng, H. Q. Hou, G. A. Vawter and B. E. Hammons, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 9(8), p.1069(1997)
- [70] F. Sugihwo, M. C. Larson and Jr. J. S. Harris, *Appl. Phys. Lett.* 70(5) p.547(1997)
- [71] F. Sugihwo, M. C. Larson and Jr. J. S. Harris, *Appl. Phys. Lett.* 72(1) p.10(1998)
- [72] E. C. Vail, G. S. Li, W. Yuen and C. J. Chang-Hasnain, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 3(2), p.691(1997)
- [73] M. Y. Li, W. Yuen, G. S. Li and C. J. Chang-Hasnain, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10(1), p.18(1998)
- [74] L. A. Coldren, E. M. Strzelecka, B. J. Thibeault and D. A. Loudereback, *Conf. Proc., LEOS'97*, p.343(1997)
- [75] S. Y. Hu, J. Ko and L. A. Coldren, *Conf. Proc., LEOS'97*, p.222(1997)
- [76] Wupen Y., G. S. Li, and C. J. Chang-Hasnain, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 3, p.422(1997)
- [77] T. C. Lu, J. Y. Tsai, H. C. Kuo, S. C. Wang, *Material Sciences & Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology* 107 (1): 66-69 FEB 25 2004
- [78] J.Y. Tsai, T.C. Lu, S.C. Wang, *Solid-State Electronics* 47 : 1825-1828 (2003)
- [79] Fang-I Lai, Y. S. Chang, T. H. Hseuh, H. C. Kuo and S. C. Wang, "Improvement of kink characteristics and high speed performance of implanted VCSEL with a top transparent overcoating" accepted to be published in *Material Sciences & Engineering (B)* in press
- [80] Jung C, Jager R, Grabherr M, Schnitzer P, Michalzik R, Weigl B, Muller S and Ebeling K J *Electron. Lett.* **33**, 1790 (1997)
- [81] T. H. Hsueh, H. C. Kuo, F. I. Lai, L. H. Lai and S. C. Wang, *Electronics Letters*, Vol. 39, (21), 1519-1521, Oct. 16 2003
- [82] Tao-Hung Hsueh*, Hao-Chung Kuo, Fang-I Lai, Li-Hong Lai, and S.C. Wang, *CLEO* 2003.
- [83] H. C. Kuo, Y. S. Chang, F. Y. Lai, T. H. Hsueh, L. H. Lai, and S. C. Wang, *Electronics Letters*, Vol. 39, No. 14, 1051-1053, July (2003)

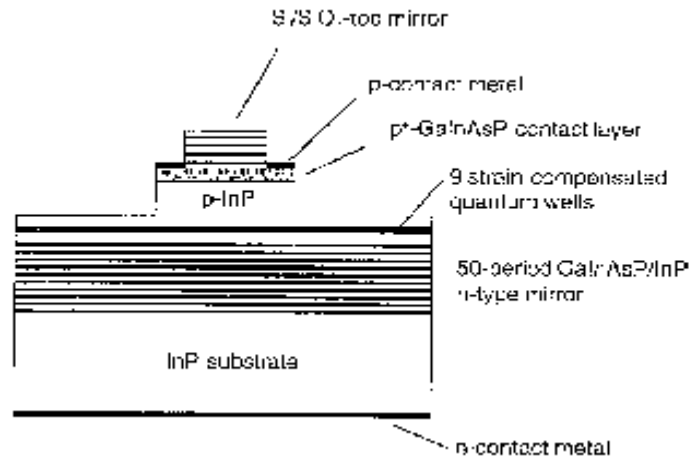
表一、不同材料組合為達到波長 1550nm 高反射率所需的層數

DBR Materials	Index Contrast $\Delta n=(n_H-n_L)$	No. of pairs for 99.9%	Stopband Width *	Total Thickness
InGaAsP/InP	0.178	65	51 nm	12.9 μm
$\text{Al}_{0.25}\text{GaInAs}/\text{InP}$	0.187	63	54 nm	12.3 μm
$\text{Al}_{0.25}\text{GaAsSb}/\text{AlAsSb}$	0.49	27	127 nm	5.2 μm
AlAs/GaAs	0.5	23	158 nm	4.8 μm
$\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$	0.77	9	436 nm	3.3 μm
$\text{InP}(\lambda/4n)/\text{Air}(\lambda/4n)$	2.2	3	1379 nm	1.3 μm
$\text{InP}(5\lambda/4n)/\text{Air}(\lambda/4n)$	2.2	3	337 nm	2.4 μm



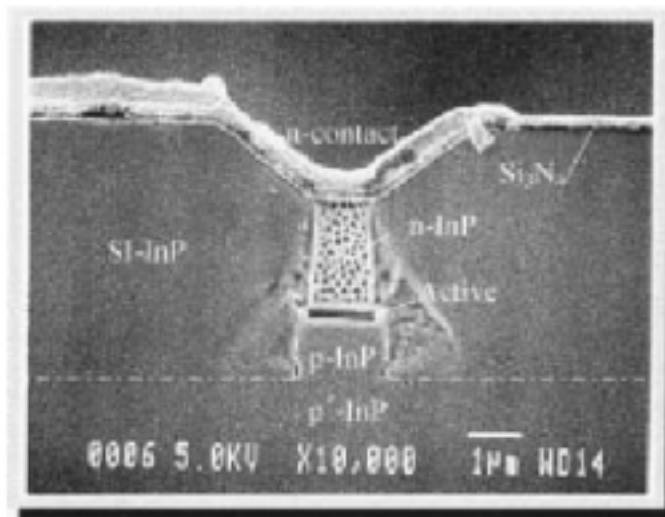
圖一、Etched-well 結構的示意圖



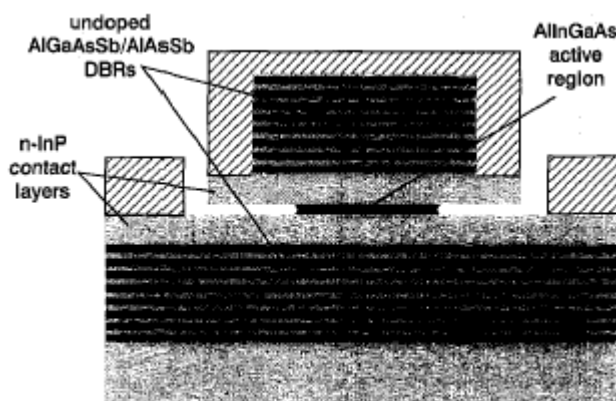


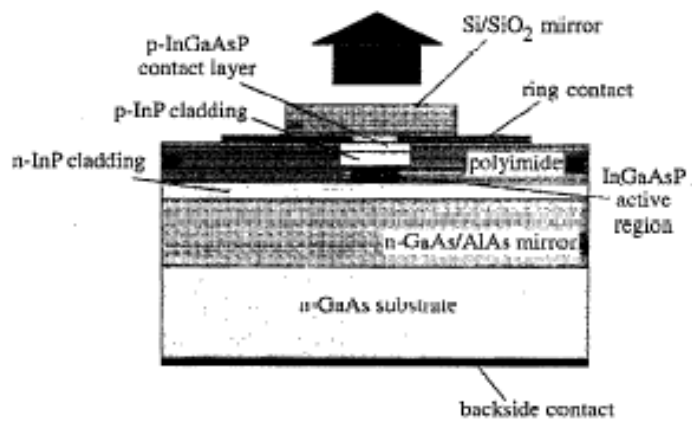
圖二、Etched-well 面射型雷射以 epi-down 的方式封裝之示意圖

圖三、InGaAsP/InP 及 a-Si/SiO2 結構的面射型雷射。



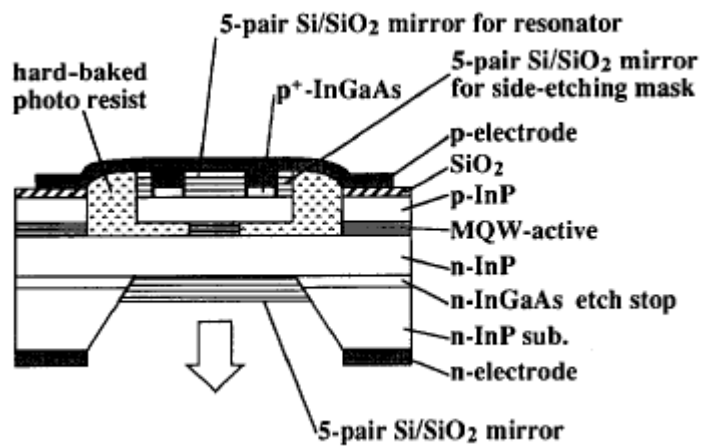
圖四、再成長 InP 的 SEM 照片



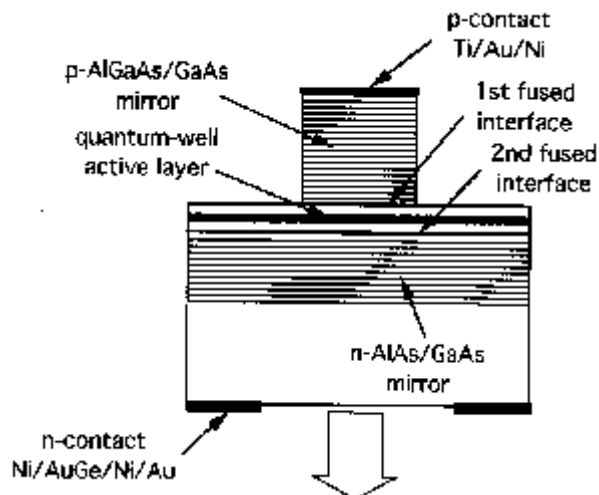


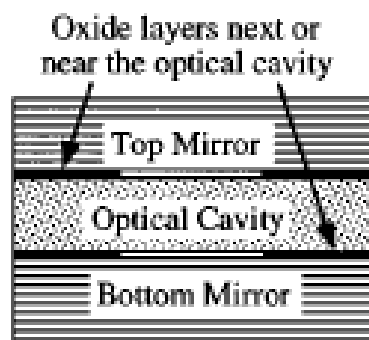
圖五、Sb-based DBR 鏡面之 1.55um 面射型雷射

圖六、GaAs/AlGaAs DBR 鏡面與 InGaAsP 主動層融合的 1300nm 面射型雷射



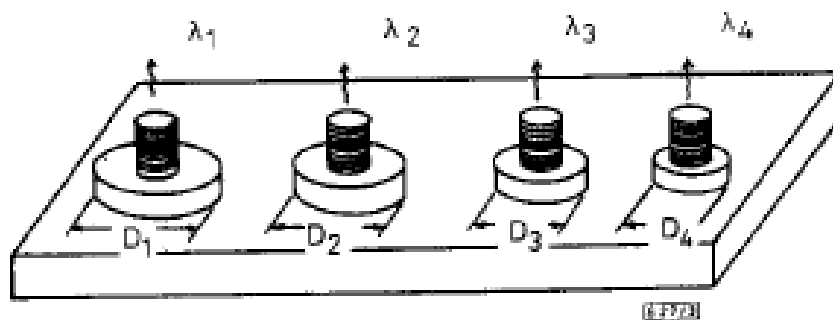
圖七、應力補償 AlInGaAs 多重量子井之面射型雷射結構



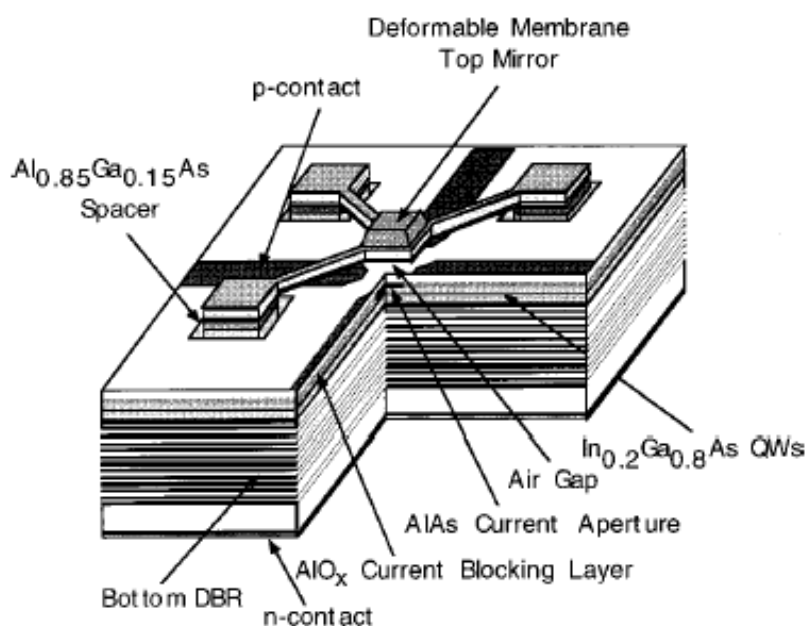


圖八、雙面融合鍵結式結構

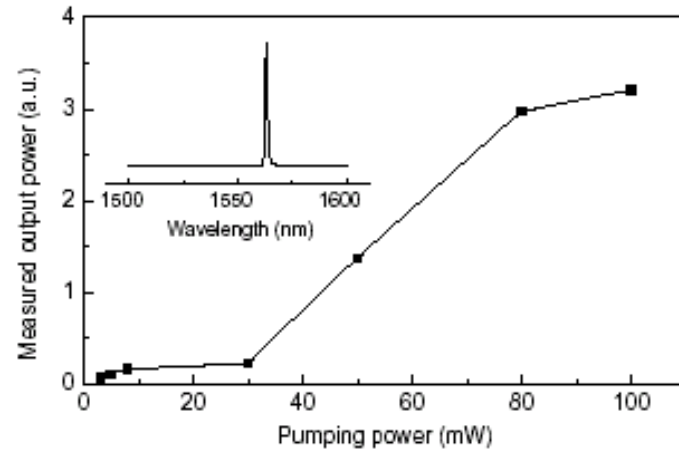
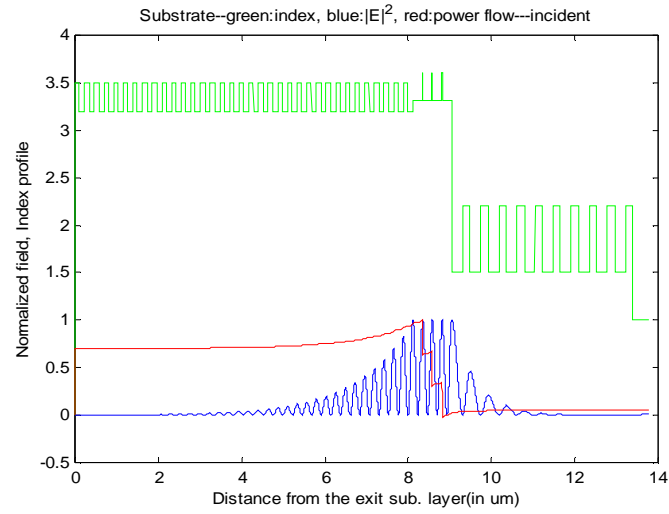
圖九、橫向 AlGaAs 氧化法產生電流侷限



圖十、在晶圓上佈上不同大小的遮罩，成長出不同波長的面射型雷射之示意圖

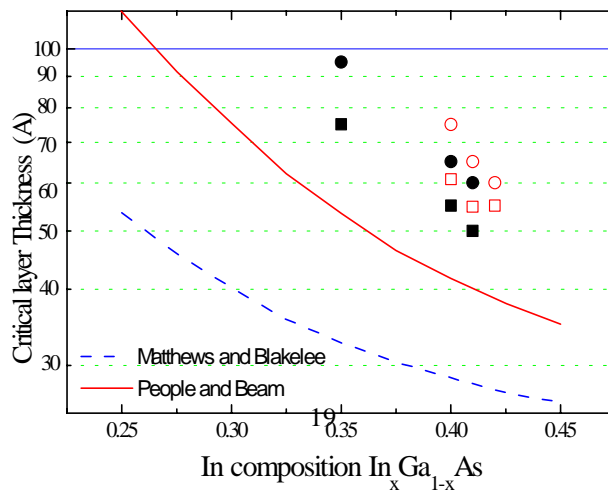


圖十一、使用微機械的方式控制波長變化

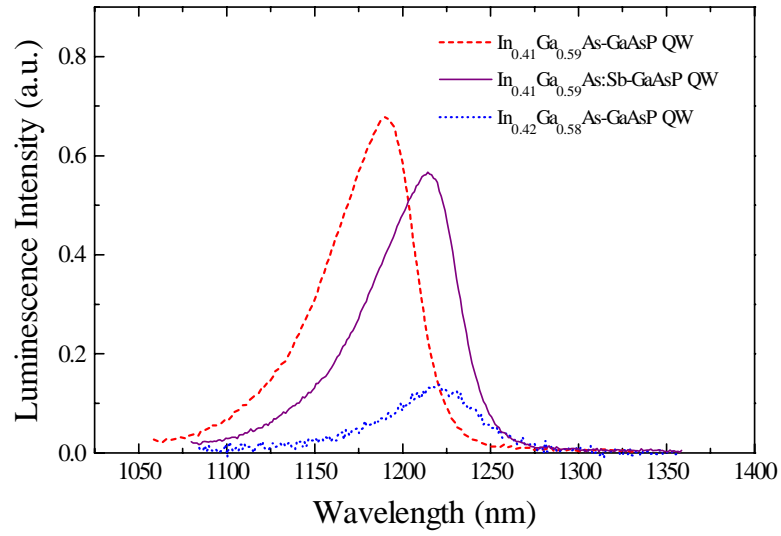


圖十二、InP-based VCSEL 的結構、電場與能量的模擬

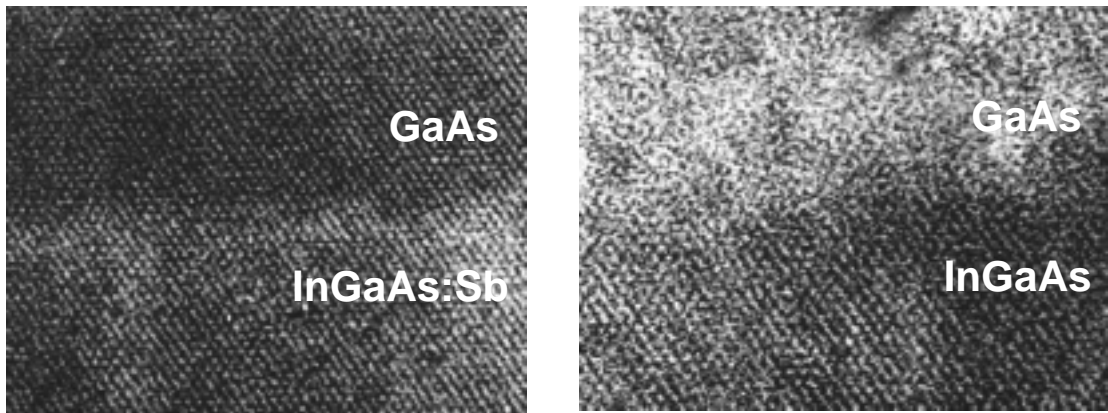
圖十三 元件出射光強度對入射激發雷射光強度圖



圖十四 InGaAs 臨界厚度與銻含量的關係圖。



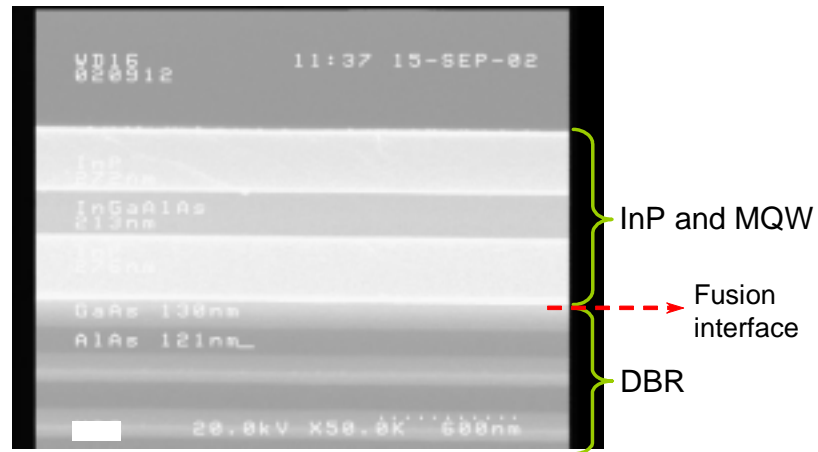
圖十五、不同銻含量的 InGaAs 與 InGaAs:Sb 量子井的光激輝光光譜



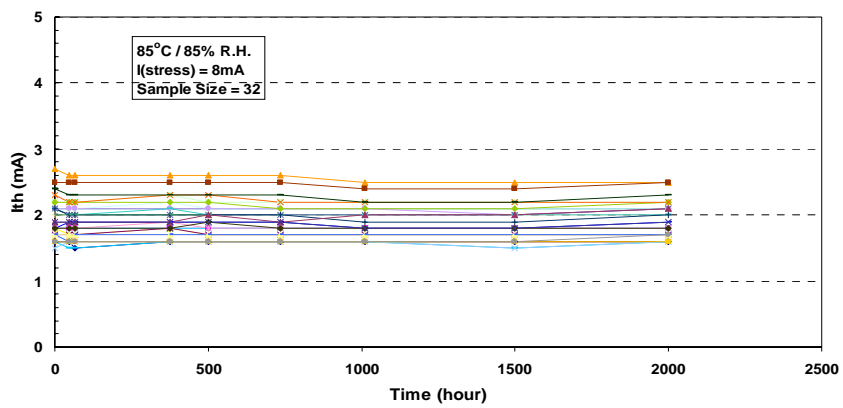
圖十六、InGaAs 與 InGaAs:Sb 的高解析度穿透式顯微鏡照片



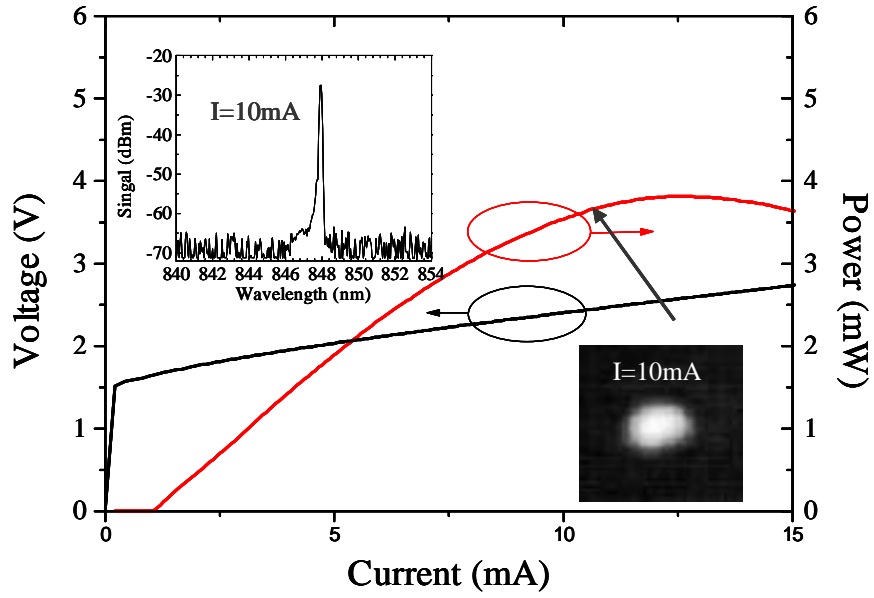
圖十七、InP/airgap布拉格反射鏡的電子顯微鏡照片



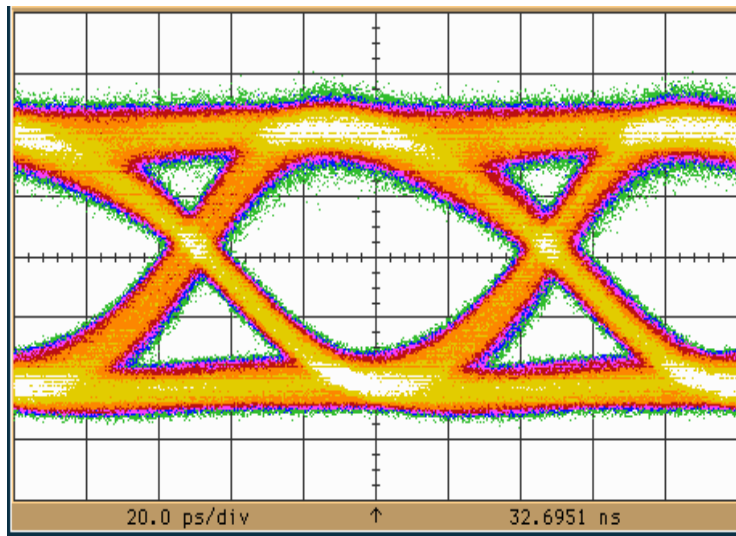
圖十八、融合鍵結面的電子顯微鏡圖



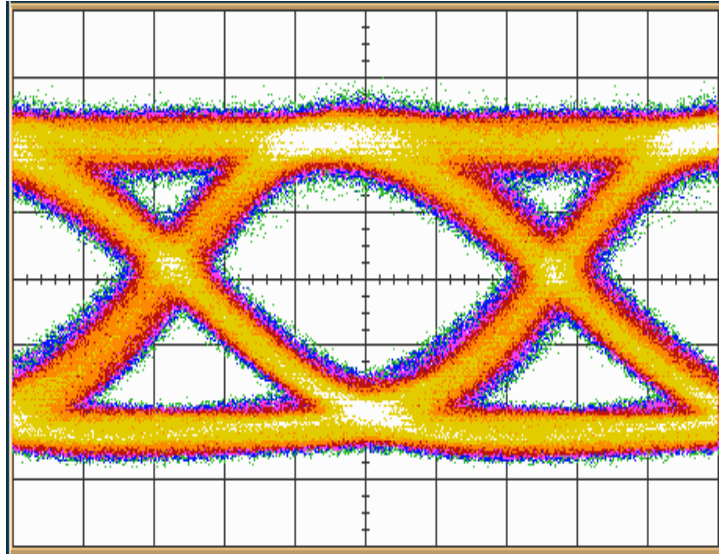
圖十九、利用矽 (Si) 離子佈植之面射型雷射在 85 /85 humidity 的操作下之可靠度測試。



圖二十、大出光孔徑(8 μ m)、高功率(3.8mW)及單模高速(10Gb/s)面射型雷射的光譜圖



圖二十一、利用氧離子佈植之高速面射型雷射在 10Gb/s 傳輸的眼圖 (eye-pattern)



圖二十二、利用 InGaAsP/InGaP 應力補償之高速面射型雷射在 12.5Gb/s 傳輸的眼圖 (eye-pattern)

計畫成果自評

在相關研究人員包括所有計畫共同主持人、博士後研究員、博碩士生在這三年的努力之下，才能有此豐富的成果報告，包括晶片融合鍵結設備的建立，量子井主動層的結構設計，DBR 成長，雷射的製作，所以與原計畫所預定的目標相符程度大約有八成以上，加上所發表的學術論文及國際期刊，可說已經是達到世界水準，但學術研究並不是一蹴可幾的，本計畫只是成功的一小步，在應用方面還相距甚遠，尤其在申請專利上還需多加著墨，雖然在磊晶技術的建立與光學微共振腔結構之特性量測與分析已經完成，包含面射型雷射結構之光學與電性特性量測、分析，面射型雷射結構與磊晶層之表面物理特性分析，但是在電激發長波長雷射與高速特性上還需要大家在未來的日子裡，持續保持合作精神以及繼續努力，以期讓計畫有圓滿的成果。

RECENT PUBLICATIONS (2000-2004)

S. C. Wang (王興宗)

I. JOURNAL PAPERS:

1. H. C. Kuo, H. H. Yao, Y. S. Chang, Y. A. Chang and S. C. Wang, "MOCVD growth of InGaAs:Sb-GaAs-GaAsP Quantum Well Vertical Cavity Surface Emitting Lasers with 1.27 μm Emission Wavelength" accepted to be published in J. of Crystal Growth (2004).
2. Fang-I Lai, Y. S. Chang, T. H. Hseuh, H. C. Kuo and S. C. Wang, Improvement of kink characteristics and high speed performance of implanted VCSEL with a top transparent overcoating" accepted to be published in Material Sciences & Engineering (B) in press
3. H. W. Huang, C. C. Kao, T. H. Hseuh, H. C. Kuo and S. C. Wang, C. C. Yu, C. F. Lin "Fabrication of GaN-based nanorod light Emitting Diodes Using Self-assemble Ni nano-mask and ICP-RIE" accepted to be published in Material Sciences & Engineering (B) (2004) (in press)
4. Yi-An Chang, Hao-Chung Kuo, Ya-Hsien Chang, and Shing-Chung Wang, "Simulation of 1300-nm $\text{In}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}_{0.986}\text{N}_{0.014}$ / $\text{GaAs}_{1-x}\text{Nx}$ quantum-well lasers with various $\text{GaAs}_{1-x}\text{Nx}$ strain compensated barriers," accepted to be published in Optics Communication. (2004) (in press)
5. Gong-Ru Lin, Kuo-Cheng Yu, Chun-Jung Lin, Hao-Chung Kuo, and M.-J. Ou-yang, "Pumping Intensity Dependent Surface Charge Accumulation and Red-Shifted Micro-Photoluminescence of Si-Implanted Quartz", Applied Physics Letters, in press, August 2004.
6. J. T. Chu, H.C. Kuo, C. C. Kao, H.W. Huang, C. F. Chu, C. F. Lin, and S. C. Wang" Fabrication of p-side down GaN Vertical Light Emitting Diodes on Copper Substrates by Laser Lift-off" accepted to be published in physica status solidi (a) (2004)
7. Y. S. Chang, H. C. Kuo, F. I. Lai, T. H. Hseuh and S. C. Wang, "Fabrication of high speed InGaAsP/InGaP strain-compensated VCSELs with 850 nm emission wavelength" accepted to be published in IEEE J. of Light Wave Technologies (2004) (in press)
8. Fang-I Lai, Tao-Hung Hsueh, Ya-Hsien Chang, Hao-Chung Kuo, S C Wang, Li-Hong Lai, C P Song, H P Yang, "10 Gb/s single-mode vertical-cavity surface-emitting laser with large aperture and oxygen implantation," Semiconductor Science and Technology, 19 (8): L86 2004.
9. Y H Chang, Fang-I Lai, C Y Lu, H C Kuo, H C Yu, C P Sung, H P Yang, S C Wang, "High-speed (>10 Gbps) 850 nm oxide-confined vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) with a planar process and reduced parasitic capacitance," Semiconductor Science and Technology, 19 (7): L74-L77 2004
10. L.-H. Lai, H.-C. Kuo, Gong-Ru Lin, L.-W. Lai, and S. C. Wang, "As⁺-implanted AlGaAs oxide-confined VCSEL with enhanced oxidation rate and high performance uniformity", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, No. 6, pp. 1423-1425, June 2004.
11. Chen-Fu Chu, Fang-I Lai, Jung-Tang Chu, Chang-Chin Yu, Chia-Feng Lin, Hao-Chung Kuo, and S. C. Wang, "Study of GaN light-emitting diodes fabricated by laser lift-off technique," Journal of Applied Physics 95 (8): 3916-3922 APR 15 2004
12. Hsin-Chieh Yu, Shou-Jinn Chang, Yan-Kuin Su, Chia-Pin Sung, Hong-Pin Yang, Chun-Yuan Huang, Yu-Wei Lin, Jin-Mei Wang, Fang-I Lai and Hao-Chung Kuo, "Improvement of high-speed oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers," Japanese Journal of Applied Physics paper 1-regular paper short notes & review papers 43 (4B): 1947-1950 APR 2004
13. C. C. Kao, H. W. Huang, J. Y. Tsai, C. C. Yu, C. F. Lin, H. C. Kuo and S. C. Wang, "Study of dry etching for GaN and InGaN-based laser structure using inductively coupled plasma reactive ion etching," Material Sciences & Engineering B107, p. 283-288, 2004 2.5x0.3

14. H. W. Huang, C. C. Kao, J. Y. Tsai, J. Y. Lee, S. Y. Kuo, H. C. Kuo and S. C. Wang, C. C. Yu, C. F. Lin, "Effect of rapid thermal annealing on beryllium implanted p-type GaN" *Material Sciences & Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology* 107 (3): 237-240 MAR 25 2004
15. T. C. Lu, J. Y. Tsai, H. C. Kuo, S. C. Wang, "Comparisons of InP/InGaAlAs and InAlAs/InGaAlAs distributed Bragg reflectors grown by metalorganic chemical vapor deposition," *Material Sciences & Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology* 107 (1): 66-69 FEB 25 2004 2.5x0.3
16. H. H. Yao, C. F. Lin, H. C. Kuo and S. C. Wang, "MOCVD growth of AlN/GaN DBR structures under various ambient conditions," *J. of Crystal Growth*, 262 (1-4): p.151-156, 2004 (SCI)
17. C. F. Lin, H. H. Yao, J. W. Lu, Y. L. Hsieh, H. C. Kuo and S. C. Wang, "Characteristics of stable emission GaN-based resonant-cavity light-emitting diodes," *J. of Crystal Growth*, 261 (2-3): 359-363 JAN 19 2004 (SCI)
18. H. C. Kuo, Y. S. Chang, C. F. Lin, T. C. Lu, and S. C. Wang, "MOCVD growth of high-performance InGaAsP/InGaP strain-compensated VCSELs with 850 nm emission wavelength," *J. of Crystal Growth*, 261 (2-3) 355-358 JAN 19 2004
19. H. C. Kuo, Y. S. Chang, F. Y. Lai, Tao-Hung Hseuh, L. T. Chu, L. H. Lai, and S. C. Wang, "High Speed Performance of 850 nm VCSEL silicon-implanted AlGaAs/GaAs vertical cavity emitting lasers," *Solid-State Electronics* 48(3): Dec, 483-485 MAR 2004 (SCI)
20. T. H. Hsueh, H. C. Kuo, F. I. Lai, L. H. Lai and S. C. Wang, "High-speed characteristics of large-area single-transverse-mode vertical-cavity surface-emitting lasers," *Electronics Letters*, Vol. 39, (21), 1519-1521, Oct. 16 2003
21. Fang-I Lai, Tao-Hung Hsueh, Ya-Hsien Chang, Wen-Chun Shu, Li-Hung Lai, H. C. Kuo and S. C. Wang, "Performance of 850 nm AlGaAs/GaAs implanted VCSEL utilizing Si implantation induced disordering," *Solid-State Electronics* 47 (10): 1805-1809 OCT (2003)
22. H. C. Kuo, Y. S. Chang, F. Y. Lai, T. H. Hsueh, L. H. Lai, and S. C. Wang, "High-speed modulation of 850 nm InGaAsP/InGaP strain-compensated VCSELs," *Electronics Letters*, Vol. 39, No. 14, 1051-1053, July (2003)
23. H. C. Kuo, Y. H. Chang, H. H. Yao, Y. A. Chang, M. Y. Tsai, and S. C. Wang, "High-Speed modulation of InGaAs:Sb-GaAs-GaAsP Quantum Well Vertical Cavity Surface Emitting Lasers with 1.27 μm Emission Wavelength" revised at *IEEE Photonics Technology Letter*.(2004)
24. Hao-Chung Kuo, Ya-Hsien Chang, Yi-An Chang, Jung-Tang Chu, Min-Ying Tsai, and Shing-Chung Wang, "Single mode 1.27- μm InGaAs:Sb-GaAs-GaAsP Quantum Well Vertical Cavity Surface Emitting Lasers" submitted to *IEEE J. Selected Topic of Quantum Electronics* (2004)
25. Yi-An Chang, Chuan-Yu Luo, Hao-Chung Kuo, Ya-Hsien Chang, Yen-Kuang Kuo, and Shing-Chung Wang, "Effect of (In)AlGaIn Electronic Blocking Layers on InGaIn Quantum Well Laser Performance" submitted to *IEEE J. Selected Topic of Quantum Electronics* (2004)
26. T. C. Lu, W. C. Hsu, Y. S. Chang, H. C. Kuo and S. C. Wang, "Spectrally resolved spontaneous emission patterns of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser," revised at *Journal of Applied Physics* (2004)
27. S. Bahl, N. Moll, H.C. Kuo, B.G. Moser, and G.E. Stillman " Be Diffusion in InGaAs/InP Heterojunction Bipolar Transistors" *IEEE Electron Device Letter*, Vol 21, No.7, 332 (2000).
28. J. Franklin, H. C. Kuo, J. Liu, R. Vizcarra, Y. C. Pao, K. Y. Cheng, and G. Pickrell "Gas source molecular beam epitaxial growth of 77 GHz InP Gunn diodes for automotive forward looking radar applications" *J. Vac. Sci. Tech. B* 18 (3), 1645 (2000).

II. CONFERENCE PAPERS:

2002

1. F. G. Lai, M. C. Lin, L. H. Lai, and S. C. Wang, "Effect of various implantation energies on the performance of 850 VCSELs," Optics and Photonics Taiwan '02, paper TF2-4, December 2002
2. H. K. Kuo and S. C. Wang, "Growth, fabrication, and characteristics of oxide-confined VCSEL for 10 Gb/s OC-192 applications," Optics and Photonics Taiwan '02, paper TF2-6, December 2002
3. W. C. Hsu, Y. L. Lee, T. C. Lu, Y. H. Chang, L. H. Lai, and S. C. Wang, "Temperature dependent near field profiles of oxide-confined vertical cavity surface emitting lasers," Optics and Photonics Taiwan '02, paper TF2-7, December 2002
4. Y. H. Yao, C. F. Lin, S. C. Wang, C. Y. Fang, Y. C. Hsieh, "Ambient gas effect of AlN/GaN DBR structure," Optics and Photonics Taiwan '02, paper FA1-2, December 2002
5. J. T. Chu, T. C. Lu, L. H. Lai, C. F. Chu, and S. C. Wang, "Wafer bonding of GaAs on InP for long-wavelength VCSELs application," Optics and Photonics Taiwan '02, paper FD1-5, December 2002
6. S. P. Tseng, L. F. Lai, and S. C. Wang, "Effect of mismatch between gain peak and F-P dip on 850 nm VCSEL performance," Optics and Photonics Taiwan '02, paper PA-41, December 2002
7. T. C. Lu, Y. R. Lee, Y. H. Chang, W. C. Hsu, and S. C. Wang, "Temperature dependent near-field emission profiles of oxide-confined vertical cavity surface emitting lasers," Photonics West 2003, paper 4994-15, January 2003
8. H. H. Yao, C. F. Lin, and S. C. Wang, "MOCVD growth of AlN/GaN DBR structure under various ambient conditions," MRS 2003, paper PM C2.5, April, 2003
9. H.-C Kuo, Y.-H Chang, T.-H. Hseuh, F. Lai ,and S.-C. Wang. "Development of 850nm VCSELs for OC-192 Application," ECS 2003, November 2003
10. Fang-I Lai, Li-Hong Lai, T. H. Hsueh, S. P. Tseng, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Performances and reliability of 850nm VCSELs with various offset in gain peak and Fabry-Perot dip," PR/CLEO 2003, paper THP-(2)-5, December 2003
11. H. C. Kuo, W. C. Shu, T. C. Lu, Ya-hsien Chang, Fang-i Lai, Li-Hung Lai, and S. C. Wang, "Characterization of 850nm AlGaAs/GaAs implant vertical cavity emitting lasers utilizing silicon implantation induced disordering," PR/CLEO 2003, paper THP-(2)-6, December 2003
12. Tao-Hung Hsueh, Hao-Chung Kuo, Fang-I Lai, Li-Hung Lai, and S. C. Wang, "High performance large-area single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers," PR/CLEO 2003, paper W2B-(2)-3, December 2003
13. H. C. Kuo, T. C. Lu, Y. S. Chang, F. Y. Lai, G. C. Kao, L. H. Lai, and S. C. Wang, "Growth and characterization of 850nm InGaAsP/InGaP strain-compensated VCSELs by MOCVD," PR/CLEO 2003, paper W2B-(2)-7, December 2003
14. Fang-I Lai, L. H. Lai, Y. S. Chang, T. H. Shei, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Enhancement of proton-implanted GaAs VCSEL performance by transparent overcoating," PR/ CLEO 2003, paper WP-(2)-9, December 2003

15. Y. H. Chang, C. C. Kao, T. H. Hsueh, T. C. Lu, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "High speed modulation of InGaAsP/InGaP strain-compensated VCSELs," Optics and Photonics Taiwan '03, paper TB2-6, December 2003
16. C. L. Luo, G. F. Zeng, Y. H. Chang, F. Y. Lai, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Simulation of multimode operation effects on modulation response of VCSEL," Optics and Photonics Taiwan '03, paper FA2-6, December 2003
17. F. Y. Lai, T. H. Hsueh, Y. H. Chang, W. C. Hsu, L. H. Lai, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Performance of enhancement of AlGaAs/GaAs VCSEL utilizing silicon implantation induced disordering," Optics and Photonics Taiwan '03, paper FB3-1, December 2003
18. R. T. Chu, T. C. Lu, L. H. Lai, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Optically pumped double-fused 1.52 μm vertical cavity," Optics and Photonics Taiwan '03, paper FB3-3, December 2003
19. W. Y. Chen, F. Y. Lai, Y. H. Chang, L. H. Lai, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Performance of GaAs VCSEL with a top transparent," Optics and Photonics Taiwan '03, paper FB3-8, December 2003
20. J. Y. Lu, Y. H. Chang, F. Y. Lai, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Small signal modulation response of oxide-confined VCSEL with different aperture size," Optics and Photonics Taiwan '03, paper FB4-2, December 2003
21. J. Y. Tsai, T. C. Lu, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "MOCVD growth of high quality distributed Bragg reflectors for 1.55- μm VCSEL application," Optics and Photonics Taiwan '03, paper PA1-18, December 2003
22. Y. H. Chang, C. W. Chang, C. C. Yu, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Observation of enormous blue-shift in photoluminescence spectrum of Mg-doped GaN Nanorods," Optics and Photonics Taiwan '03, paper PA1-10, December 2003
23. T. C. Lu, Y. H. Chang, C. W. Chang, W. C. Hsu, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Spectrally resolved spontaneous emission patterns of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers," Optics and Photonics Taiwan '03, paper PA1-11, December 2003
24. W. L. Peng, L. H. Lai, F. Y. Lai, T. H. Hsueh, H. C. Kuo, and S. C. Wang, " As^+ implanted AlGaAs oxide-confined VCSEL," Optics and Photonics Taiwan '03, paper PA2-10, December 2003
25. Y. Chang, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Improvement of high speed performance for 10-Gb/s 850 nm VCSELs," SPIE Photonic West, Conference 5364, paper 5364-10, Jan. 2004
26. F. Y. Lai, H. C. Kuo, and S. C. Wang, "Improvement of kink characteristics of proton implanted VCSEL with ITO overcoating," SPIE Photonic West, Conference 5364, paper 5364-28, Jan. 2004

III PROCEEDINGS EDITOR

1. G. T. Burnham, Xiaoguang He, K. J., Linden, and S. C. Wang, "Laser diodes and LEDs in

Industrial, Measurement, Imaging, and Sensors Applications II, Testing, Packaging and Reliability of Semiconductor lasers V," Proc. SPIE, Vol. 3945, Jan. 2000

2. A. K. Chin, N. K. Dutta, K. J. Linden, and S. C. Wang, "Testing, Reliability, and Applications of Optoelectronic Devices," Proc. SPIE, Vol. 4285, May 2001

3. H.C. Kuo and S. C. Wang, "MOCVD growth and fabrication of GaN based nanostructures" (2004) in preparation