

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫四：高速長波長(1.3, 1.55 μm)VCSELs 在都會 DWDM 之研究與實現(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2215-E-009-063-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學光電工程學系(所)

計畫主持人：郭浩中

共同主持人：王興宗

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 6 月 1 日

國科會專題研究計畫成果報告撰寫格式

一、說明

國科會基於學術公開之立場，鼓勵一般專題研究計畫主持人發表其研究成果，但主持人對於研究成果之內容應負完全責任。計畫內容及研究成果如涉及專利或其他智慧財產權、違異現行醫藥衛生規範、影響公序良俗或政治社會安定等顧慮者，應事先通知國科會不宜將所繳交之成果報告蒐錄於學門成果報告彙編或公開查詢，以免造成無謂之困擾。另外，各學門在製作成果報告彙編時，將直接使用主持人提供的成果報告，因此主持人在繳交報告之前，應對內容詳細校對，以確定其正確性。

本格式說明僅為統一成果報告之格式，以供撰寫之參考，並非限制研究成果之呈現方式。**精簡報告之篇幅（不含封面之頁數）以 4 至 10 頁為原則**，完整報告之篇幅則不限制頁數。

成果報告繳交之期限及種類（精簡報告、完整報告或期中報告等），應依本會補助專題研究計畫作業要點及專題研究計畫經費核定清單之規定辦理。

二、內容格式：依序為封面、中英文摘要、**目錄（精簡報告得省略）**、報告內容、參考文獻、計畫成果自評、可供推廣之研發成果資料表、附錄。

(一)報告封面：請至本會網站（<http://www.nsc.gov.tw>）下載製作（格式如附件一）。

(二)中、英文摘要及關鍵詞(keywords)。

(三)報告內容：請包括前言、研究目的、文獻探討、研究方法、結果與討論（含結論與建議）…等。若該計畫已有論文發表者，可以 A4 紙影印，作為成果報告內容或附錄，並請註明發表刊物名稱、卷期及出版日期。若有與執行本計畫相關之著作、專利、技術報告、或學生畢業論文等，請在參考文獻內註明之，俾可供進一步查考。

(四)頁碼編寫：請對摘要及目錄部分用羅馬字 I、II、III……標在每頁下方中央；報告內容至附錄部分請以阿拉伯數字 1.2.3……順序標在每頁下方中央。

(五)附表及附圖可列在文中或參考文獻之後，各表、圖請說明內容。

(六)計畫成果自評部份，請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

(七)可供推廣之研發成果資料表：凡研究性質屬**應用研究及技術發展**之計畫，請依本會提供之表格（如附件二），每項研發成果填寫一份。

三、計畫中獲補助國外或大陸地區差旅費、出席國際學術會議差旅費或國際合作研究計畫差旅費者，須依規定撰寫**心得報告（出席國際學術會議者須另附發表之論文）**，以附件方式併同成果報告繳交，並請於成果報告封面註記。

四、打字編印注意事項

1. 用紙

使用 A4 紙，即長 29.7 公分，寬 21 公分。

2. 格式

中文打字規格為每行繕打（行間不另留間距），英文打字規格為 Single Space。

3. 字體

報告之正文以中英文撰寫均可。在字體之使用方面，英文使用 Times New Roman Font，中文使用標楷體，字體大小請以 12 號為主。

新穎光信號處理元件與模組在光通信中之應用-子計畫四：高速長波 長(1.3, 1.55 μm)VCSELs 在都會 DWDM 之研究與實現(1/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93 - 2215 - E - 009 - 063 -

執行期間：93 年 8 月 1 日至 94 年 7 月 31 日

計畫主持人：郭浩中

共同主持人：王興宗

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：交大光電所

中華民國 94 年 5 月 29 日

中文摘要：

我們成功以有機金屬化學氣相沈積(metalorganic chemical vapor deposition)方式成長1.27 μm 含銻(antimony)的砷化銻鎵(InGaAs)量子井面射型雷射(vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSELs)，其元件呈現出極佳的特性以及優異的溫度穩定性。當環境操作溫度室溫升高至70 $^{\circ}\text{C}$ 時，臨界電流由1.8 mA降低至1.1 mA，相對的差分效率(slope efficiency)僅小幅降低了35%。在驅動電流控制於5 mA所量測得的3 dB調變頻寬(modulation bandwidth)可達8.36 GHz，此結果滿足10 Gbps操作需求。所測得的最大調變頻寬可達10.7 GHz，其調變訊號轉換效率(modulation current efficiency factor, MCEF)為5.25 GHz/(mA)^{1/2}。我們針對這些面射型雷射的高速特性作一完整的驗證與說明。

英文摘要：

1.27 μm InGaAs:Sb-GaAs-GaAsP vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) were grown by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) and exhibited excellent performance and temperature stability. The threshold current changes from 1.8 to 1.1 mA and the slope efficiency falls less than $\sim 35\%$ as the temperature raised from room temperature to 70 $^{\circ}\text{C}$. With a bias current of only 5mA, the 3dB modulation frequency response was measured to be 8.36 GHz, which is appropriate for 10 Gb/s operation. The maximal bandwidth is measured to be 10.7 GHz with modulation current efficiency factor (MCEF) of ~ 5.25 GHz/(mA)^{1/2}. These VCSELs also demonstrate high-speed modulation up to 10 Gb/s from 25 $^{\circ}\text{C}$ to 70 $^{\circ}\text{C}$.

關鍵詞：

有機金屬化學氣相沈積；面射型雷射；砷化銻鎵；高速特性；量子井；

前言：

面射型雷射具有低臨界電流，發散角小，調變頻寬高，製作成本低，將成為下一代數位通訊系統主要的光訊號源。在短距離的資料通訊中 850 nm 面射型雷射以經是標準通訊光源；目前 850 nm 面射型雷射發展已經成熟，無論特性或可靠度均已達商品化階段。然而在中長距離傳輸，例如都會型網路，點對點傳輸應用，則需要 1.3 μm ~ 1.5 μm 的長波長光源。圖 1 為各種半導體雷射傳輸速度與傳輸距離之關係；在 300 公尺的傳輸距離內，850 nm 面射型雷射能提供 10 Gb/s 的高速傳輸速度，若是使用 850 nm 面射型雷射陣列，則可達到 40Gb/s 的傳輸量。在長距離低頻寬應用(< 2.5 Gb/s)目前則以 1.3 μm Fabry-Perot 雷射為主力，而長距離高速傳輸則需要 1.3 DFB 雷射甚至 DFB 雷射外加電光調變(EO)或是電致吸收(EA)調變。但是 DFB 雷射製作不易，導致價格無法降低，且 DFB 雷射溫度漂移係數大($\Delta\lambda/10 \text{ nm}/^\circ\text{C}$)，相較之下面射型雷射可以在大溫度範圍操作，不需溫控，出光口在晶片表面，且發散角小可大量提高耦合至光纖的效率，不需封裝就可以直接在晶片上做元件測試，總總優點均有利於實現低成本、大規模的生產，一般預期未來 1.3 μm Fabry-Perot 雷射與 DFB 雷射將被長波長面射型雷射所取代。

因此目前，國外包括美國、日本、歐洲等研究機構及公司團體莫不對長波長面射型雷射的研究極為熱衷。其中 Agilent, Stanford, Infineon, Sandia Lab/UIUC, Zarlink 等已成功製做電流驅動室溫連續操作的長波長面射型雷射。而在國內的長波長面射型雷射的研究現況方面，工研院也有達到室溫電激發的成果。

計畫目的：

本計畫主要工作在於開發成長在 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。其好處為：

1. 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。表 1 比較幾種常使用的布拉格反射鏡特性。

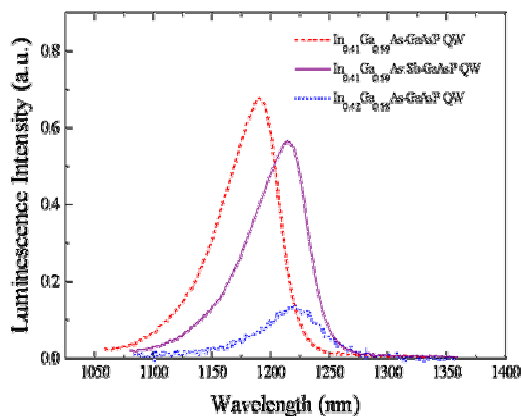
2. 成熟的 AlAs ($\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$) 氧化技術：提供光學侷限與極佳的電流侷限

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。

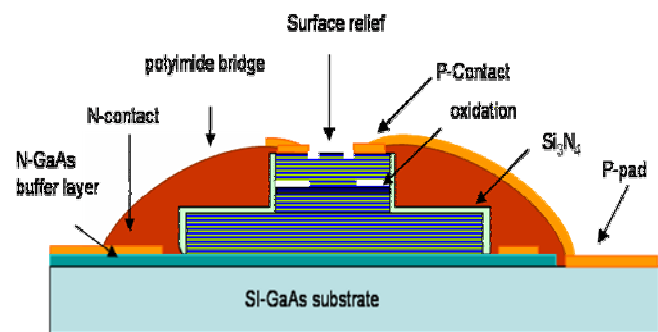
長波長面射型雷射異於 850 nm 面射型雷射之處結構上的差異主要在布拉格反射鏡的設計。布拉格反射鏡主要的要求為高反射率與低電阻，相較於 850 nm 的波長，AlAs/GaAs 的折射率差異在 1.3 μm 波段較小，需要較多層反射層，其次在長波長的反射層本來就較厚，此兩原因造成反射鏡電阻要比 850 nm 反射鏡為大。另一個挑戰是自由載子吸收(free carrier absorption)，自由載子吸收係數與波長平方成正比，而 1.3 μm 的反射鏡又較厚，因此避免自由載子吸收以降低損耗便是 1.3 μm 長波長面射型雷射的重要課題。

研究方法與進度說明：

本實驗室使用MOCVD成長元件與材料於半絕緣(semi-insulating) 砷化鎵(100)基板上。磊晶時通入的原料氣體，五族的氫化物氣體為砷化氫(AsH₃)及磷化氫(PH₃)，而三族的則有鎵(gallium)、鋁(aluminum)、銾(indium)、銻之三甲基烷(trimethyl-alkyls)等氣體。整個磊晶結構中，由下而上分別為n⁺-GaAs 緩衝層、40.5 層n⁺-Al_{0.9}Ga_{0.1}As/n⁺-GaAs 布拉格反射鏡(distributed Bragg reflector, DBR)、無摻雜之主動發光層、p-Al_{0.98}Ga_{0.02}As 氧化層、25 層p⁺-Al_{0.9}Ga_{0.1}As/p⁺-GaAs 布拉格反射鏡以及摻雜碳元素(carbon)之p⁺-GaAs 電極接觸層。漸變折射率分開侷限結構(graded refractive index separated confined heterostructure, GRINSCH)主動層涵蓋了光激螢光波長在1.214 μm之In_{0.41}Ga_{0.59}As:Sb/GaAs/GaAs_{0.85}P_{0.15} 雙重量子井(厚度分別為60 Å/100 Å/100 Å)發光層，嵌入兩個對稱線性漸變Al_xGa_{1-x}As(x由0增加到0.6，以及由0.6減少至0.1)侷限結構層(成長溫度為550 °C，AsH₃/TMSb流量比約為50)。p型布拉格反射鏡中，摻雜碳元素使結構載子濃度增加到2~3×10¹⁸ cm⁻³。在p型及n型Al_{0.9}Ga_{0.1}As 布拉格反射鏡層界面處皆以漸變方式成長，以有效降低界面串聯電阻大小。另外，藉由光激螢光的量測及磊晶結構的分析，可以對量子井的光性進行最佳化。最佳化之磊晶結構成長細節也已發表[14]。在圖一中，我們將比較In_xGa_{1-x}As量子井在不同銾含量(x=0.41以及0.42)下以及摻雜銻元素之In_{0.41}Ga_{0.59}As 量子井的光激螢光頻譜。所有結構



圖一、量子井 PL 發光波長

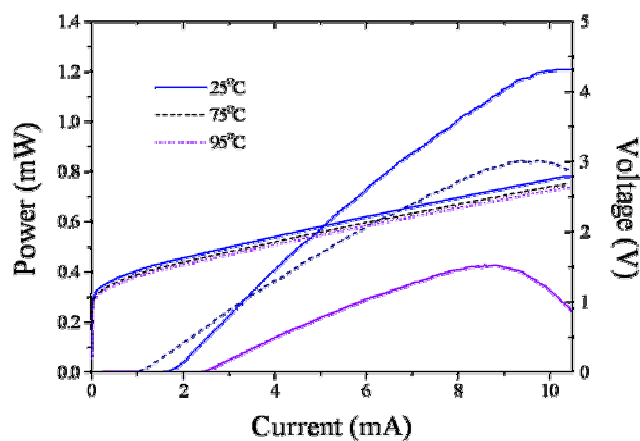


圖二、面射型雷射元件結構

量子井寬度皆為60 Å，包含一層GaAs的空間層(spacer)以及GaAs_{0.85}P_{0.15}應力補償層(strain-compensating layer)。成長的In_{0.41}Ga_{0.59}As/GaAs/GaAs_{0.85}P_{0.15}和In_{0.41}Ga_{0.59}As:Sb/GaAs/GaAs_{0.85}P_{0.15}量子井測量到的光激螢光波長分別為1.194及1.214 μm，並觀察到有20 nm的紅移現象。In_{0.41}Ga_{0.59}As:Sb量子井所測量得到光激螢光峰值的半高寬很大，而峰值強度僅些微的降低。銻元素的摻雜使得In_{0.41}Ga_{0.59}As:Sb的光激螢光有紅移情形，因此可以確定發光波長可以延展至較長的波長。當我們將量子井中的銾元素含量比例提高到0.42，光激螢光峰值的半高寬明顯的增大，而峰值強度則以驚人的速度滑落。這些特性上的改變皆可解釋為受到60 Å厚度之In_{0.41}Ga_{0.59}As/GaAs/GaAs_{0.85}P_{0.15}量子井內晶格錯位dislocation，以及一些缺陷而形成非自發性再結合所造成的影響。從面射型雷射結構的反射頻譜來看，設計出光的共振腔模為1.266 μm。由於構成布拉格反射鏡的AlGaAs/GaAs有著極大的折射率差異，所以抑制帶寬(stop bandwidth)達90 nm。共振腔模與雷射增益的補償錯位則設定在52 nm。

整個面射型雷射結構，如圖二所示。一個具有共平面波導電極、以有機高分子橋接電極之氧化型面射型雷射，需使用到六道光罩來製作。這種製程是以維持在合理的低電阻值下，將電容值有效的壓低的方式之一[15]。在元件的製程上，先採用電感耦合電漿離子蝕刻系統(inductively-coupled plasmareactive ion etching, ICP-RIE)，蝕刻出直徑 $30\mu\text{m}$ 、深達n型布拉格反射鏡(深度 $5\mu\text{m}$)之圓柱型蝕刻平台。雷射在 $420\text{ }\mu\text{J}$ 的水蒸氣環境下進行濕氧化製程20分鐘，以定義出電流開口並提供橫向的折射波導來限制輸出的雷射模態。在此氧化條件下，對鋁含量達98%的 $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$ 氧化層而言，其氧化速率可穩定維持在每分鐘氧化深度 $0.6\mu\text{m}$ ，因此我們可以準確的控制氧化深度在 $12.5\mu\text{m}$ ，以符合實驗上的要求。在電極部分，以蒸鍍方式製作p型環狀電極，材料採用鈦金合金，而n型電極則採用金鍍鎳金合金蒸鍍在結構底層之半絕緣基板上。在完成蒸鍍電極後，置入快速熱退火(rapid thermal annealing, RTA)系統以 420°C 、30秒進行合金溶接。完成金屬電極後，以旋轉塗佈方式覆蓋有機高分子層，在元件結構上形成一絕緣層，之後在此絕緣層之上鍍厚約 200 \AA 橋接金屬線，以及提供下探針、 3000 \AA 厚的共平面波導電極。至於元件產生的熱則藉由鋪於有機高分子層上的金屬電極導出散熱。最後，在表面以蝕刻方式浮雕出一直徑 $3.5\mu\text{m}$ 、厚約 $\lambda/2$ 的結構，以利元件在單模下操作[16]。

在元件的量測上，以Probe station、Agilent4145A半導體參數分析儀以及InGaAs光偵二極體來測量面射型雷射的DC特性，其完整的DC特性結果如圖三所示。另外，以

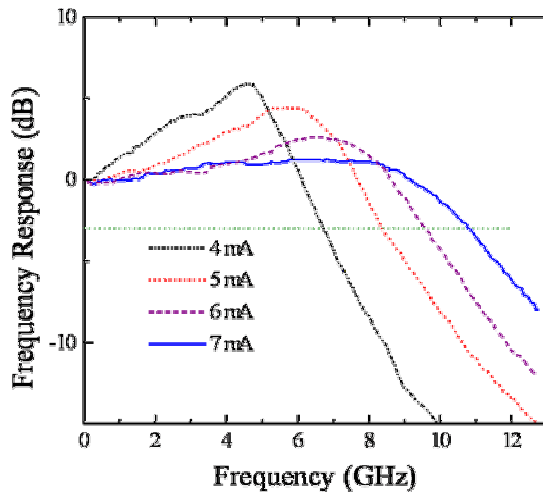


圖三、雷射輸出功率與電壓電流關係

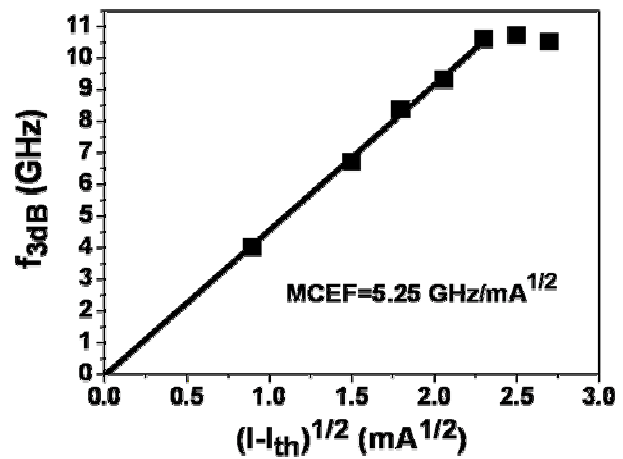
AdvantestQ8381A 光譜分析儀來測InGaAs:Sb/GaAs/GaAs_{0.85}P_{0.15} 面射型雷射光譜，發現此元件在光譜儀量測頻段內，有著發光波長約在 $1.27\mu\text{m}$ 、邊模壓縮比(side mode suppression ratio, SMSR)大於30 dB之單一橫向模態，如圖三所示。此元件隨功率耗損而產生發光波長平移速率為 0.105 nm/mW 。以脈衝電流測試大面積面射型雷射，得到波長偏移對溫度的改變量為 0.074 nm/K ，經計算可得熱阻抗為 1.42 K/mW 。在室溫下，最大之單模輸出功率明顯的超越 1.2 mW ，而在 70°C 下亦有 0.8 mW 的表現。當溫度為 25°C 時，輸出功率反轉發生在操作電流為 10 mA ；溫度為 70°C 時，則發生在 9.5 mA 。隨著溫度由 25°C 升高到 70°C ，臨界電流則由 1.8 mA 降至 1.1 mA ，同時元件特性之差分效率由 0.17 mW/mA 下降35%至 0.11 mW/mA ，此乃肇因於較大的共振腔模與雷射增益偏移量。此面射型雷射所量測到的串接阻值約為 120 ohm 、電感大小約為 0.1 pF ，由此可知，雷射的頻率響應約達 13 GHz 是受限於寄生效應(parasitic effect)的影響。

面射型雷射的小訊號響應(small signal response)量測可藉由Agilent 8720ES向量網路分析儀，以高速探針下於元件上，再以50 μm 多模光纖進行收光，將收到的光訊號由NewFocus 25 GHz高速光偵測器轉換成電訊號回傳到網路分析儀進行分析。由於頻率響應為偏壓電流的函數，因此以變電流方式進行量測元件頻寬，操作環境溫度則控制在25 μC 。調變頻率隨著偏壓電流增加，到10 mA時曲線趨於平坦，如圖四所示。當偏壓電流為5 mA時，元件3 dB調變頻寬8.36 GHz，此特性已符合10Gb/s操作需求。3 dB頻寬呈現出近似於偏壓電流的函數，如圖五，在低偏壓電流下，頻寬與偏壓電流的平方倒數成比例增加，此亦可由rate equation分析而得知。偏壓電流增加到7 mA以上時，可以明顯發現調變頻寬增加速度趨於緩和，此可歸因於元件所產生的熱或空間燒洞效應所致。元件所測得的最大調變頻寬為10.7 GHz，其調變訊號轉換效率為5.25 GHz/(mA)^{1/2}，此時估計其室溫下的差分增益約為 $2 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-3}$ 。

接著，由10 Gbps波形產生器(Anritsu MP1763)產生 $2^{23}-1$ 個偽隨機二進制序列(pseudorandom bit sequence, PRBS)所構成的大訊號，以高頻探針進行點測，由12.5 GHz光偵測器來收取光訊號來觀察面射型雷射的高速調變特性。面射型雷射的眼圖可由Back-to-back

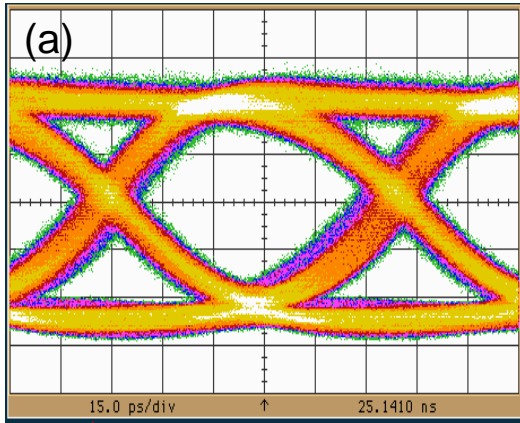


圖四、面射型雷射小信號調變

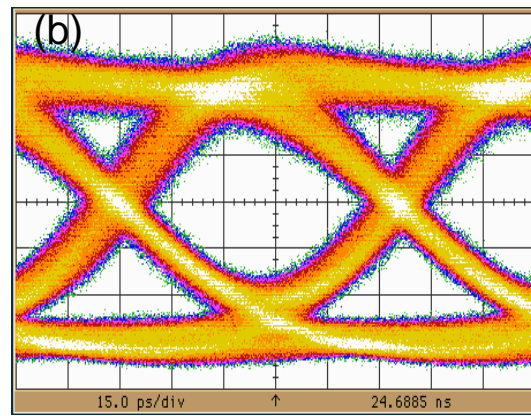


圖五、3-dB 頻寬與與偏壓電流的平方倒數關係圖

(BTB)傳輸方式取得，如圖五(a)所示，室溫下、偏壓電流為6 mA所獲得的量測結果滿足10 Gbps規格，消光率(extinction ratio, ER)亦達到6 dB，而清晰的眼圖呈現出InGaAs:Sb面射型雷射擁有不錯的高速特性，如上升時間(rising time, Tr)為30 ps、下降時間(falling time, Tf)為41 ps，Jitter (p-p)則低於20ps。此外，在70 $^{\circ}\text{C}$ 高溫下InGaAs:Sb面射型雷射仍保有一定操作特性，如圖五(b)，在7 mA之偏壓電流操作下仍可通過10 Gbps的規格要求，消光率仍保有6 dB，唯有Jitter隨著溫度增加明顯的上升。這樣的結果並不讓人感到意外，因為隨著溫度的增加，差分增益以及輸出光功率會同時降低，這直接對Jitter值的增加以及overshoot效應產生直接的影響。一般而言，如想要在高溫下維持較高消光率，亦表示需要犧牲Jitter以及overshoot的表現。要進一步的瞭解元件的高速特性，誤碼率(Bit error rate, BER)的測試分析是有其必要的。圖六顯示出在10 Gbps調變下誤碼率隨著接收到發自元件的平均光功率的變化，同樣的以BTB傳輸方式進行量測，而測試環境溫度分別為20 $^{\circ}\text{C}$ 以及70 $^{\circ}\text{C}$ 。實際測量到的誤碼率為 10^{-12} 。在整個實驗過程，是以多模光纖的精確校準來達到高的光纖耦合效率。



圖五(a)、面射型雷射室溫眼圖



圖五(b)、面射型雷射高溫眼圖(70 °C)

結果與討論：

我們成功以有機金屬化學氣相沈積(metalorganic chemical vapor deposition)方式製作出長波長 $1.27\mu\text{m}$ 含銻(antimony)的砷化銦鎵(InGaAs)量子井面射型雷射(vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSELs)，其元件呈現出極佳的特性以及優異的溫度穩定性。當環境操作溫度室溫升高至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 時，臨界電流由 1.8 mA 降低至 1.1 mA ，相對的差分效率(slope efficiency)僅小幅降低了35%。在驅動電流控制於 5 mA 所量測得的3 dB調變頻寬(modulation bandwidth)可達 8.36 GHz ，此結果滿足 10 Gbps 操作需求。所測得的最大調變頻寬可達 10.7 GHz ，其調變訊號轉換效率(modulation current efficiency factor, MCEF)為 $5.25\text{ GHz}/(\text{mA})^{1/2}$ 。

參考文獻：

- [1] T. Takeuchi, Y.-L. Chang, M. Leary, A. Tandon, H.-C. Luan, D. Bour, S. Corzine, R. Twist, M. Tan, “ $1.3\text{ }\mu\text{m}$ InGaAsN vertical cavity surface emitting lasers grown by MOCVD”, *Electron. Lett.*, vol. 38, pp.1438 – 1440, 2002.
- [2] M. Kondow, T. Kitatani, S. Nakatsuka, M.C. Larson, K. Nakahara, Y. Yazawa, M. Okai, and K. Uomi, “GaInNAs: a novel material for long-wavelength semiconductor lasers”, *IEEE J. Select. Topic Quantum Electron.*, vol. 3, pp. 719–730, 1997.
- [3] K. D. Choquette, J.F. Klem, A.J. Fischer, O. Blum, A.A. Allerman, I.J. Fritz, S.R. Kurtz, W.G. Breiland, R. Sieg, K.M. Geib, J.W. Scott, and R.L. Naone, “Room temperature continuous wave InGaAsN quantum well vertical-cavity lasers emitting at $1.3\text{ }\mu\text{m}$ ”, *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 16, pp. 1388–1390, 2000.
- [4] Nobuhiko Nishiyama, Masakazu Arai, Satoshi Shinada, Munechika Azuchi, Tomoyuki Miyamoto, Fumio Koyama, and Kenichi Iga, “Highly strained GaInAs–GaAs Quantum-Well Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser on GaAs (311)B substrate for stable polarization operation”, *IEEE J. Select. Topic Quantum Electron.*, vol. 7, pp.242–248, 2001.
- [5] M. Kawaguchi, T. Miyamoto, E. Gouardes, D. Schlenker, T.Kondo, F. Koyama and K. Iga “Lasing Characteristics of Low-Threshold GaInNAs Lasers Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition”, *Jpn. J. Appl.Phys.*, vol. 40, pp. L744–L746, 2001.

- [6] N. Tansu and L. J. Mawst, "Temperature sensitivity of 1300-nm InGaAsN quantum-well lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp.1052–1054, 2002.
- [7] F. Koyama, D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, A. Matsutani, T. Sakaguchi, and K. Iga, "1.2 μm highly strained GaInAs/GaAs quantum well lasers for single mode fiber datalink," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 13, pp.1079–1081, 1999.
- [8] N. Tansu, J. Y. Yeh, and L. J. Mawst, "Extremely-Low Threshold-Current-Density InGaAs Quantum Well Lasers with Emission Wavelength of 1215-1233 nm," *Appl. Phys. Lett.*, vol.82(23), pp. 4038-4040, 2003.
- [9] P. Sundgren, R.M. von Wurtemberg, J. Berggren, M. Hammar, M. Ghisoni, V. Oscarsson, E. Odling, and J. Malmquist, "High-performance 1.3 μm InGaAs vertical cavity surface emitting lasers", *Electron. Lett.*, vol. 39, pp. 1128 – 1129, 2003.
- [10] V. Gambin, Ha Wonill, M. Wistey, Yuen Homan, S.R. Bank, S.M. Kim, and J.S. Harris, "GaInNAsSb for 1.3-1.6 μm -long wavelength lasers grown by molecular beam epitaxy", *IEEE J. Select. Topic Quantum Electron.*, vol. 8, pp. 795 – 800, 2002.
- [11] J. C. Harmand, L. H. Li, G. Patriarche, and L. Travers, "GaInAs/GaAs quantum-well growth assisted by Sb surfactant: Toward 1.3 μm emission", *Appl. Phys. Lett.*, vol 84, pp. 3981- 3983, 2004.
- [12] J. Massies, N. Grandjean, and V. H. Etgens, "Surfactant mediated epitaxial growth of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ on GaAs (001)", *Appl. Phys. Lett.* vol. 61, pp. 99- 101, 1992.
- [13] H.C. Kuo, Y.S. Chang, H. H. Yao and S. C. Wang to be presented in ICMOVPE XII conference, 2004
- [14] 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. " *Electron. Lett.*, vol. 39, pp. 1051 – 1053, 2003.
- [15] Heiko J. Unold, Safwat WZ Mahmoud, Roland Jäger, Martin Grabherr, Rainer Michalzik, and Karl Joachim Ebeling, "Large-Area Single-Mode VCSELs and the Self-Aligned Surface Relief", *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 7, pp. 386-392, 2000.
- [16] T. Aggerstam, R. M. V. Wütemberg, C. Runnström, E. Choumas, "Large aperture 850 nm oxide-confined VCSELs for 10Gb/s data communication", Photonics West, San Jose, CA, p.p 19 Proc. SPIE Vol. 4649 (2002)

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，包括磊晶成長、製程設備的建立，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已經相符，所發表的學術論文及國際期刊，已經達到世界水準，並受到世界各地研究團隊包跨日本 NEC、Furukawa 與瑞典、美國研究團隊的注目，但學術研究並不是一蹴可幾的，本計畫只是成功的一小步，尚須再往下扎根，尤其在申請專利上還需多加著墨，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，但是在發光波長的延伸與高速特性的改進與實際應用的展示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。