

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☒ 成果報告
☐ 期中進度報告

特殊堆疊多層量子點之新穎光源研究

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC96-2218-E-009-022-

執行期間：96年9月1日至97年10月31日

計畫主持人：林國瑞

共同主持人：

計畫參與人員：黃俊仁、曾韋智、湯皓玲、鄭旭傑

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：國立交通大學電子工程學系及電子研究所

中 華 民 國 97 年 10 月 28 日

特殊堆疊多層量子點之新穎光源研究

“Novel Light Emitters Based on Specially Stacked Multilayer Quantum Dots”

計畫編號：NSC96-2218-E-009-022

執行期間：96 年 9 月 1 日 至 97 年 10 月 31 日

主持人：林國瑞 國立交通大學電子工程學系及電子研究所 助理教授

一、中文摘要

在本年度計畫中，我們完成了一種特殊設計的啁啾式推疊量子點雷射之設計、製程與量測，主動層中有十層量子點，其中包含三種不同發光波長的InAs-InGaAs量子點結構，我們獲致了常溫下低臨限電流密度、高飽和模態增益及雙基態波長雷射之新穎雷射。變化共振腔長度的雷射頻譜量測顯示該結構增益頻譜寬達125nm。

我們利用經驗上的模態增益來分析不同堆疊量子點之能態間參與雷射發光的行為，分析結果與頻譜量測相當一致。在本計畫中，我們也首度發現此特殊堆疊量子點結構之兩項新穎的雷射頻譜特性。

其一：當共振腔長度為2mm時，於臨限電流附近我們觀察到兩個波長同時雷射發光，增益分析確認是來自於兩種不同堆疊量子點的基態。其二：變電流量測展示隨著溫度的降低，雙波長發光由長波長先雷射切換至短波長先雷射，我們認為這是因為載子在多層量子點堆疊中不均匀分布所造成。

英文摘要

Chirped multilayer (N=10) QD lasers with 2-, 3- and 5-layer of longer-, medium-, and shorter-wavelength QD stacks, respectively, were grown in this work. Low threshold current density and high saturated modal gain were achieved in this specially designed QD structure. The gain spectrum was estimated to be as broad

as 125nm from various cavity-length spectral measurements.

Empirical gain-current analysis was performed on this chirped multilayer QD structure. It was consistent with our spectral observations and provided valuable information on carrier recombination in chirped multilayer QD structure. Two novel spectral characteristics were discovered also for the first time.

First, simultaneous two-wavelength lasing around threshold was observed under particular gain-loss condition at this specific multilayer structure of QD stacking numbers. Second, at cryogenic temperature, simultaneous two wavelength lasing emissions switched from longer-wavelength lasing first to shorter-wavelength lasing first with increasing current injection. Non-uniform carrier distribution among chirped multilayer QD structure is evident at low temperature below 200 K from our analysis.

二、計畫的緣由與目的

理想量子點具有原子般的電子結構，在能量空間上呈現分立的能階（discrete energy levels）及 δ -function 的能態密度（density of states），因此以量子點作為雷射主動區的增益介質理論上具有高材料增益及高微分增益（material gain & differential gain）、低臨限電流密度（threshold current density）、極佳的溫

度穩定性及優良的高頻操作特性。然由於半導體量子點磊晶的自我成長（self-assembled growth）機制，量子點本身的形狀、大小及成份組成呈現寬廣的分布，因此材料增益偏離理論的預測而呈現令人不滿意的低飽和增益（saturated gain），解決方式為多層堆疊來提升元件操作所需的光模增益（optical modal gain）。由於量子點的成長條件及堆疊應力控制需要相當的經驗累積，國內僅少數單位展示 1.3 μm 波段的雷射結果。

近年來光通訊市場雖逐漸復甦，光電元件仍亟需找尋新的出路，而生醫波段恰與光通訊波段一致，是相當有潛力的研究領域，目前備受關注的生醫應用為光學斷層掃描（Optical Coherence Tomography or OCT）的寬頻光源 [1]。OCT 的解析度與光源的頻寬成反比，現有系統大多採用寬頻且高功率的超快雷射為光源，然其缺點為價格高、體積大且操作及維護不易。以砷化鎵為基板材料系統由於 N、Sb 等新元素材料的摻雜使得發光波段可由 600 nm 延伸至 1600 nm，結合新技術 In(Ga)As 量子點成長所造成的 non-homogeneous broadening 特性，甚有機會發展輕薄短小而且低價位的寬頻半導體光源 [2]。

國內目前雖有工研院開始量子點寬頻光源的研發，仍未對元件的物理特性多所著墨，也因此對於元件的設計與製程尚未最佳化。其他有磷化銦（InP）基板成長非對稱多層量子井 [3] 來製作寬頻超高亮度二極體（SLDs or SLEDs），然因基板成本高且中心波長偏離生醫波段，再者光源強度亦無法有效提高，也因此不列入 OCT 寬頻光源的候選對象。國外近年所開始關注以量子點製作寬頻超高亮度二極體，某些在頻譜的頻寬上取得優勢 [4]，某些則在光源的強度上取得領先 [5]，仍未能同時獲致寬頻、高功率且對稱發散角的光源要求。德國 NL-Nanosemiconductor 公司於 2006 年 6 月新聞發布以量子點雷射在高操作電流下

具有寬廣的雷射發光頻譜 [6]，由於雷射本身高效率及高功率的特性，這將使得此款量子點主動區的半導體雷射更具競爭優勢，而且可以免除超高亮度二極體的傾斜波導在光纖耦合所面臨的耦光對位（alignment）的問題。

以量子點為主動區的寬頻半導體雷射目前僅有非常少量的文獻發表 [7]，國內外也尚未有系統的研究，也因此還未能最佳化雷射元件的結構設計及磊晶和製程等參數，本計劃將以新提之啁啾式堆疊多層量子點雷射為研究起點，透過完整的量測與分析來釐清多層量子點內載子的分佈特性及材料增益，為元件最佳化提供具體可改善的方向，並從中累積研發能量以實現可具體應用的寬頻光源及掃頻式可調光源為研究的目標。

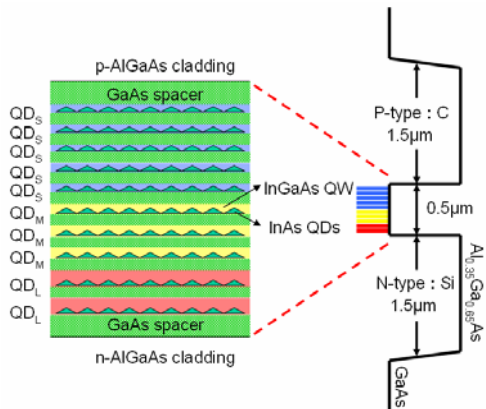
三、研究方法及成果

自組式成長（self-assembled growth）量子點的大小、形狀及成分組成呈現相當寬廣的分佈，加上量子點本身的密度亦受到成長條件的限制而相當有限（ $1\text{E}10\sim1\text{E}11\text{ cm}^{-2}$ ），因此以量子點作為半導體雷射的增益介質（gain medium），其材料增益偏離理論的預測而呈現相當低的飽和增益（saturation gain），解決方式為多層堆疊來提升元件操作所需的光模增益（optical modal gain）。一般來說，傳統量子點雷射的多層堆疊均採用相同的磊晶成長條件，我們稱之為均勻堆疊量子點（uniformly stacked QDs），以符合雷射窄頻的發光特性（narrow-band lasing emission）。

量子點主動區的飽和增益雖然相當有限，然其增益頻譜（gain spectrum）卻相當的寬廣，為充分運用其寬廣的頻譜，L. H. Li and et al. [4] 改變覆蓋於 InAs QDs 上方之 InGaAs QW 的 In 成分（9%, 10.5%, 12%, 13.5%, 15%）來連續調變各層量子點的中心發光波長，獲致發光頻寬高達 121 nm 的超高亮度二極體（Superluminescent Diodes, SLDs or SLEDs），

我們將此調變方式稱之為連續啁啾式堆疊量子點（continuously chirpy-stacked QDs）。

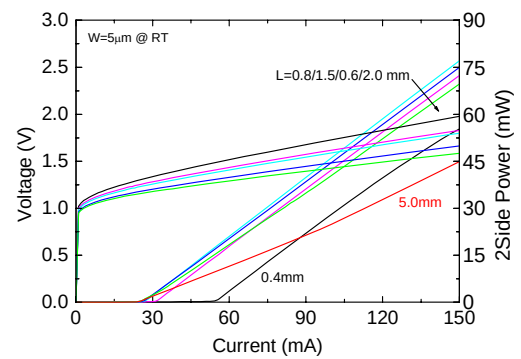
以上述調變方式製程為半導體雷射，一者 In effusion cell 的溫度控制恐因連續改變造成重複性不佳，再者若量子點的磊晶品質改變導致飽和增益太低，都可能造成無法雷射發光。我們提出一種數位啁啾式堆疊量子點（digitally chirpy-stacked QDs）的磊晶結構（見圖一），主動層中有十層量子點，其中包含三種不同的 InAs 量子點結構，依波長的差異標示成 QD_L（波長較長）、QD_M（波長中等）和 QD_S（波長較短），其發光波長藉由改變覆蓋在 InAs 量子點上的 In_{0.15}Ga_{0.85}As 厚度來調整，三種量子點對應的 In_{0.15}Ga_{0.85}As 厚度分別為 4nm、3nm 和 1nm，在我們 PL 的結果中，可看出 QD_L 和 QD_M 的發光波長分別為 1.27 μ m 和 1.215 μ m。而三種波長的量子點所占的層數依序為 2 層、3 層和 5 層，目的是改變不同發光波長的飽和增益，希望可以藉此觀察到三種量子點的基態在不同的共振腔損耗下依序發光。



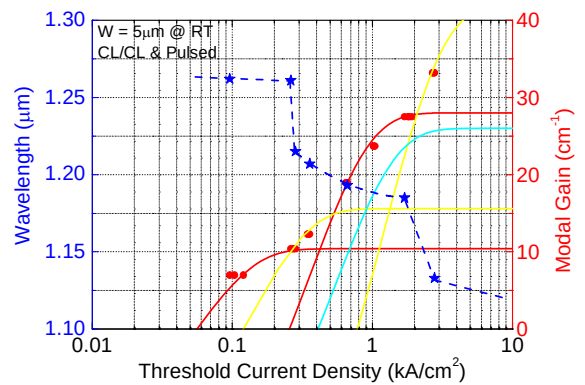
圖一：啁啾式堆疊量子點磊晶結構及能帶示意

在特別的雷射製程下，我們得到了寬度為 5 μ m、共振腔長度 0.6~5mm 的多組 L-I-V 及頻譜量測結果（見圖二）。結果顯示室溫下的臨限電流約 30mA，且在臨限電流附近的發光波長大致可分為三個波長區段，分別在 1260nm、1200nm 與 1135nm 處。值得注意的是，在我們的結構上我們也發現在共振腔長度為 2mm 時於臨限電流附近同時有兩個波長雷射。此多

波長的特性可運用在多波長切換雷射上。在參數分析中，我們得到內部量子效率(internal quantum efficiency)接近 100%，以及當共振腔長度趨近無窮長時的臨限電流密度趨近於 0，這顯示了量子點絕佳的磊晶品質。在模態增益的分析中（見圖三），得到單一層量子點的飽和增益約在 5~6cm⁻¹，並發現共振腔長度於 2 和 0.5mm 時因為增益恰分別達到飽和值為 10.4 與 24.56cm⁻¹ 而進行發光波長的切換，再經對照 PL 結果可以確認切換前後的波長源自於二層 QD_L 的基態與激發態。



圖二：L-I-V 特性圖

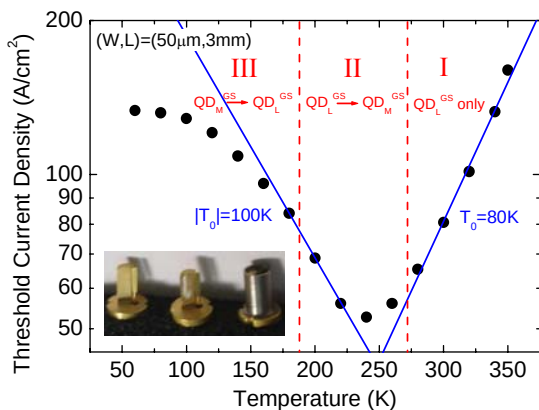


圖三：增益-電流特性分析

我們又以 TO 封裝好(W, L) = (50 μ m, 3mm) 的雷射元件來做變溫的 L-I-V 量測，我們了解在均勻堆疊量子點雷射中有負特徵溫度的現象，利用低溫時非準平衡特性做適當的解釋。而對我們的數位啁啾式堆疊量子點而言，最小的臨限電流密度發生在 240K；而就均勻堆疊量子點來說，最小臨限電流密度之溫度可小於 150K。事實上，非準平衡的載子分布不僅來自

於不同大小量子點間的載子獲取機率差異，也源於不同層量子點間非均勻的載子分布。

在我們的結構中，臨限電流隨溫度的變化分析裡，我們發現大抵呈現 V 字型分布(見圖四)，特徵溫度分別約為 80K 及 100K，最小的臨限電流密度為 $50\text{A}/\text{cm}^2$ 發生在 240K。值得注意的是，於臨限電流附近的頻譜變化特性在此溫度區間內被區分為三個區域，於第一個區域中(280k~350k)，僅 QD_L 的基態波長雷射；第二個區域中(200k~260k)，於臨限電流附近先是 QD_L 基態發光，緊接著 QD_M 的基態跟著發光，L-I 圖中並伴隨 kink 的產生；第三個區域中(60k~180k)，情況與第二區域恰相反， QD_M 的基態先發光，再來是 QD_L 基態，L-I 圖顯示了吸收飽和 (absorption bleaching) 的現象。



圖四：臨限電流隨溫度變化特性

在量測雷射光同調長度的系統方面，我們已購置 Thorlabs 之 MZI-VAR-1300 可調光延遲干涉儀，唯現在仍在系統之測試階段，欲配合待購買的 align laser 將系統光路最佳化，將於不久的將來可應用在光源同調性量測上。

四、結論與討論

於我們的實驗中，我們成功的展示了數位啁啾式多層量子點雷射，其中包含了三種不同量子點與不同堆疊。變化共振腔長度的雷射頻譜量測顯示出該結構約 125nm 的寬廣增益頻譜。其中共振腔長度為 2mm 時更於臨限電流附近有兩基態波長同時發光。於增益-電流的

分析中使我們確認出不同堆疊量子點中基態與激發態彼此的發光順序。變溫量測也看出 V 形的臨限電流密度隨溫度的變化關係，最小的臨限電流密度發生在相對高的 240K 左右。其中更發現在低溫時於臨限電流後先短波長再長波長的不尋常發光頻譜演化現象，用非準平衡的載子分布都可做適當地解釋。

本計劃對啁啾式堆疊的多層量子點光源進行完整的量測與分析，有助於釐清多層量子點內載子的分佈特性及材料增益，為元件最佳化提供具體可改善的方向及萃取元件模擬所需的參數。本計劃相關研究結果，已於本年度發表國內外會議論文共3篇，並準備投稿相關期刊論文。

五、參考文獻

- [1] A. M. Rollins, M. V. Sivak, Jr., S. Radhakrishnan, J. H. Lass, D. Huang, K. D. Cooper, and J. A. Izatt, "Emerging clinical applications of optical coherence tomography," *Optics & Photonics News*, pp. 36-41, 2002.
- [2] W. Ha, V. Gambin, M. Wistey, S. Bank, S. Kim, and J. S. Harris, Jr., "Superluminescent LED allows early dental diagnosis," *Compound Semiconductor*, vol. 14, pp. 591-593, 2005.
- [3] C. F. Lin, Y. S. Su, C. H. Wu, and G. S. Shmavonyan, "Influence of separate confinement heterostructure on emission bandwidth of InGaAsP superluminescent diodes/ semiconductor optical amplifiers with nonidentical multiple quantum wells," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, pp. 1441-1443, 2004.
- [4] L. H. Li, M. Rossetti, A. Fiore, L. Occhi and C. Velez, "Wide emission spectrum from superluminescent diodes with chirped quantum dot multilayers," *Electron. Lett.*, vol. 41, pp. 41-43, 2005.
- [5] D. C. Heo, J. D. Song, W. J. Choi, J. I. Lee, J. C. Jung and I. K. Han, "High power broadband InGaAs/GaAs quantum dot superluminescent diodes," *Electron. Lett.*, vol. 39, pp. 863-865, 2003.
- [6] http://www.innolume.com/news_060630.htm, "NL Nanosemiconductor announces Broad Band Lasers based on Quantum Dot Technology," June 7, 2006.
- [7] H. S. Djie and B. S. Ooi, X.-M. Fang, Y. Wu, J. M. Fastenau, and W. K. Liu, "Room-temperature broadband emission of an InGaAs/GaAs quantum dots laser," *Opt. Lett.*, vol. 32, pp. 44-46, 2007.