

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

(計畫名稱)

單一垂直耦合雙量子點之耦合態研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：97-2112-M-009-015-MY2

執行期間：2008年 8月 1日至 2010年 7月 31日

計畫主持人：張文豪

共同主持人：

計畫參與人員：博士班：蔡文哲、林 萱、廖昱安、林家賢

碩士班：陳威宇、張志豪、徐瑋廷、劉鴻璋

周湘諭、陳志豪、趙士興、徐家和、林儒賢

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

中 華 民 國 一 百 年 一 月 三 十 日

目錄

一、 告內容及計畫成果自評	1
二、 計畫中英文摘要	2
(一)、中文摘要	2
(二)、英文摘要	2
三、 報告內容	3
1. 垂直耦合雙量子點分子	3
2. 量子點激子態的磁響應	3
3. 自組式量子點中激子能態細微結構與偏振不對稱性	5
4. 銻化物覆蓋之第二型量子點	6
5. 氮化銦/氮化銦鎵薄膜及氮化銦奈米點的光學性質	9
6. 量子點與共振腔之耦合	11
四、 論文發表 2008 -2010	13
五、 經費使用	16

一、告內容及計畫成果自評

國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

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（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、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。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

- 達成目標
 未達成目標（請說明，以 100 字為限）
- 實驗失敗
 - 因故實驗中斷
 - 其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

- 論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無
專利： 已獲得 申請中 無
技轉： 已技轉 洽談中 無
其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫研究垂直耦合雙量子點分子之耦合能態，亦研究量子點激子態的磁響應、自組式量子點中激子能態細微結構與偏振不對稱性、銻化物覆蓋之第二型量子點、氮化銦/氮化銦鎵薄膜及氮化銦奈米點的光學性質、以及量子點與共振腔之耦合。透過本計畫補助所發表之期刊論文達 27 篇，國際會議 5 個人次，成果豐碩。此研究成果可應用於量子點之固態量子位元，而所發展的實驗技術對於奈米科技領域之人才培訓亦有實質成效。

二、計畫中英文摘要

(一) 計畫中文摘要

本計畫目的是研究由雙層堆疊之砷化銦鎵量子點所形成的單一量子點分子在磁場作用下之耦合態，擬研究主題包含：(1) 量子點分子之激子轉換機制以及 (2) 量子點分子在磁場作用下之耦合效應。本計畫將運用超快時間解析光譜量測技術，研究激子能量轉換的動態行為，並以顯微螢光激發能譜探索選擇性激發QDM 激子態的可能性。此外，我們也將設計極化解析之光子相干量測研究QDM 中雙激子-激子之序列輻射中所隱含的按激子態。顯微磁光光譜技術，藉由外加垂直 (Faraday) 及水平 (Vogit) 方向的磁場，可以用來偵測量子點的反磁能移及奇曼 (Zeeman) 效應。我們將利用這樣的技術，研究量子點大小、形狀及應力分佈對於 g 值的影響，並探討QDM 在磁場作用下的態耦合現象。探討議題包括 g 值的操控、輕-重電洞能帶混和及明-暗激子混和。

關鍵詞：量子點，量子點分子，顯微螢光光譜，顯微磁光光譜

(二) 計畫英文摘要

This project is proposed to study the coupled energy states of single quantum-dot molecules (QDM) formed by single pairs of vertically coupled In(Ga)As quantum dots (QDs). The topics to be studied include: (1) The mechanism of exciton energy transfer in single QDMs and (2) The coupling effects of energy states in single QDMs under the influence externally applied magnetic field. Time-resolved micro-photoluminescence (μ -PL) will be employed to study the dynamics of exciton transfer in single QDMs at different temperatures. The feasibility of selective excitation of exciton states in single QDMs will be explored by μ -PL excitation spectroscopy. In addition, we will also set up an optical system to conduct polarization-resolved photon correlation measurements for the study of underlying dark exciton states involved in biexciton-exciton cascade emission processes in single QDMs. Magneto- μ -PL spectroscopy with external applied magnetic field up to $B=6$ T in either Faraday or Vogit configurations can be utilized to measure the diamagnetic shift and Zeeman splitting in single QDs and QDMs. By these measurements, the impact of dot size, shape as well as non-uniformly strain field distribution on the g factor will also be discussed. The magnetic field induced coupling in energy states of single QDMs will also be investigated. The manipulation of g factor, valence band mixing between heavy-hole and light-hole states, as well as the mixing between bright and dark exciton states under the influence of external applied magnetic field will be discussed.

Keywords: quantum dots, quantum-dot molecules, μ -PL, magneto- μ -PL

三、報告內容

1. 垂直耦合雙量子點分子

我們成功的解析由雙層砷化銻鎵量子點堆疊而成的單一垂直耦合雙量子點的螢光光譜。藉由改變功率和偏振方向分析，觀察譜線強度隨功率的變化以及其精細結構分裂，可分辨出直接單激子和間接單激子及雙激子。透過改變激發光的能量，則進一步辨認出帶負電激子。由圖1所示，在變溫的過程中，由強度的消長發現了直接單激子態和間接單激子態之間具有單一方向的能量轉換。為了解釋這個現象，我們提出速率方程式模型來模擬實驗結果，藉由擬合的參數判斷此轉換是源自於聲子協助的電洞非共振穿隧效應。透過變功率螢光量測，高溫下譜線強度比值會隨著激發功率而改變，可得到此非共振的電洞穿隧效應的輔助證據。由時間解析光譜量測結果，我們得到激子態的半衰期不隨溫度改變，表示激子態佔據量子點分子的機率確實因為溫度的不同而有消長。此成果已發表於2008年的PRB (Chang *et al.*, PRB 77 245314 (2008))。

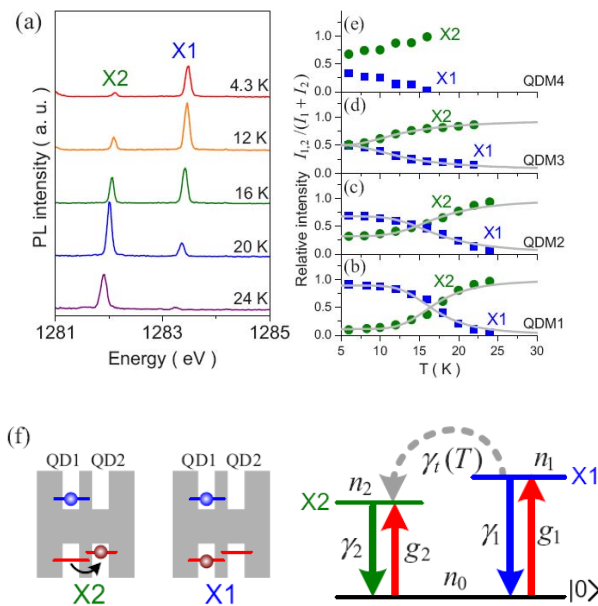


圖 1 (a) 不同溫度下，直接單激子態與間接單激子態的強度消長 (b)-(e) 分別為 QDM1-4 的直接單激子態與間接單激子態的強度消長隨溫度的變化 (f) 能量轉換模型示意圖

2. 量子點激子態的磁響應：

透過國科會計畫的補助 (2006.01 ~ 2008.07)，我們自行設計架設一套顯微螢光光譜偵測系統以及一套低溫高磁場顯微磁光系統，可在外加磁場下 ($B=6\text{ T}$) 偵測單量子點光譜，尤其是能態細微結構及耦合特徵。本系統可外加垂直(Faraday geometry)及水平(Voigt geometry)方向磁場，對研究半導體奈米結構磁場下的效應是一大利器。量子點激

子在外加磁場下會產生逆磁能移 (diamagnetic shift) 以及奇曼分裂 (Zeeman splitting)。逆磁能移與激子波函數的空間延展有關，而奇曼分裂則反映出系統的g factor。我們針對量子點內激子、雙激子及帶電激子在磁場作用下的逆磁能移進行一系列研究，如圖2所示。我們發現逆磁能移會隨著量子點內的激子數目及多餘電荷而改變；此顯示一般認為在強量子侷限下庫倫作用對於反磁能移的影響其實並不能忽略，且庫倫修正項與波函數的三次方成正比，顯示當激子逐漸失去強侷限時，庫倫修正項將更為顯著；此成果已發表於的Phys. Rev. Lett. (Tsai *et al.*, PRL 2008).

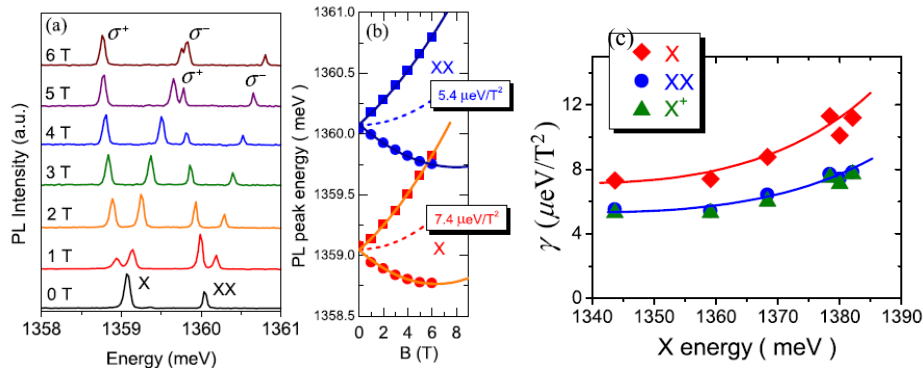


圖 2 (a-b)單激子與雙激子態在磁場作用下的譜線。(c)單激子、雙激子以及帶電激子反磁能移係數。

此外，我們亦研究了量子環內部激子與雙激子的磁響應。不同於量子點，量子環的雙激子的反磁能移明顯比單激子大許多，如圖3所示。透過理論計算，我們得知量子環的結構不對稱扮演著重要的角色。在成長過程中，由於不同晶軸方向的長徑速率不同，會造成量子環位能在[110]及[1-10]方向的不對稱。此不對稱將使電洞傾向被侷限於位能較低點處，進而因庫倫吸引力而使單一激子侷限於同一個位置而無法均勻分佈於量子環。反觀雙激子，因電洞之間的排斥力，電子波函數將較均勻的分佈於量子環中。本研究目前已經發表於Phys. Rev. B (Lin *et al.*, PRB 2009).

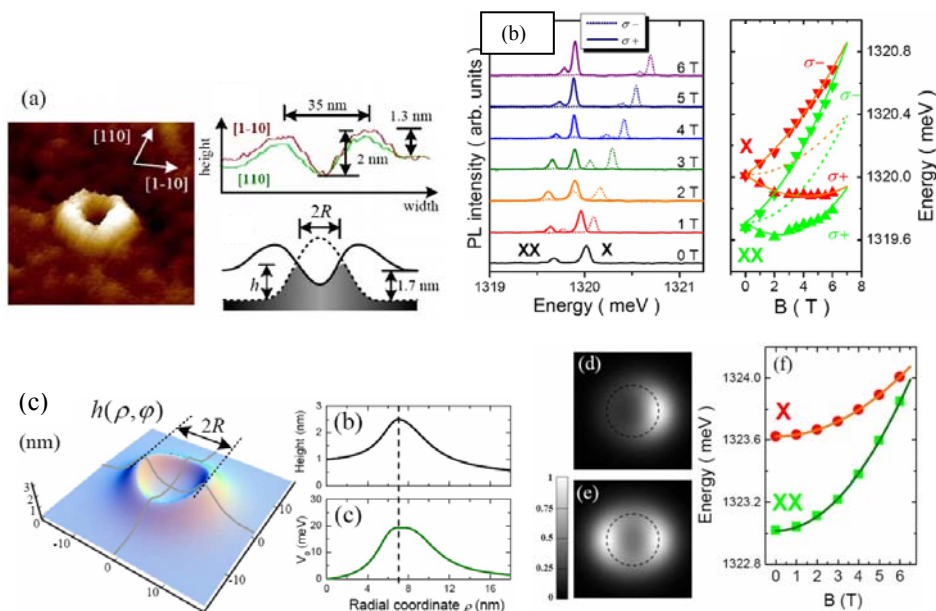


圖 3 (a) (b) (c)不同量子點中延著晶軸[110]及[1-10]方向的偏振螢光光譜，(d)量子點-A 中 I_x 、 I_y 延著不同偏振方向 π_p 的強度分佈。

3. 自組式量子點中激子態細微結構與偏振不對稱性

近年來，在量子通訊與量子計算等理論的提出之後，自組式量子點中激子(Exciton, X)與雙激子(Biexciton, XX)的能態結構被視為實踐該理論的重要途徑之一。對該系統研究的過程中，激子態的細微結構(fine structure splitting)一直是眾人所重視的議題，能態細微結構的往往會伴隨著電子-電動交換作用而出現，並破壞了激子與雙激子糾纏態的特性。過去有許多的文章有提到，要如何的抑制激子態細微結構的出現，其中所使用的方法如：外加水平磁場、外加水平電場、熱退火處理或外加非均向應變，但是抑制的機制仍為大家所不清楚的。我們藉由對量子點激子態的細微結構與偏振不對稱性

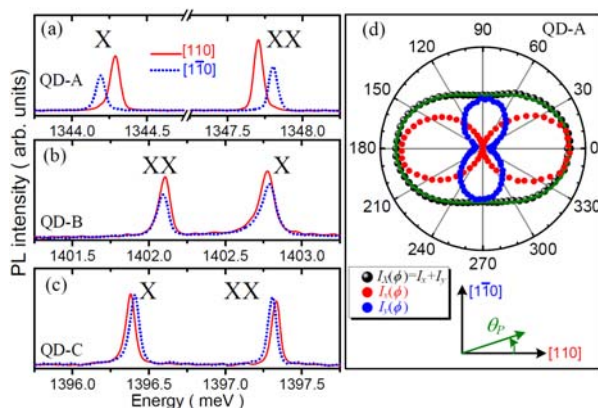


圖 4 (a-c)不同量子點中延著晶軸[110]及[1-10]方向的偏振螢光光譜，
(d)量子點-A 中 I_x 、 I_y 延著不同偏振方向 π_p 的強度分佈。

(polarization anisotropy)作了一系列的探討，並提出了聯接著兩者的機制。

這邊我們所研究的對象為成長在鍍化銦基板上的自組式砷化銦量子點，如同過去的文章中所提到的，我們可以觀察到激子螢光光譜有著能態細微結構，分成高低兩個能量訊號，若以偏振螢光光譜加以分析，可發現兩個訊號為線性偏振光且方向互相垂直，方向分別延著鍍化銦基板的晶軸[110](x)與[1-10](y)，其強度分別為 I_x 、 I_y 。如圖 4 所示。

由圖5可知，針對許多不同量子點的螢光光譜中，我們可以定義激子的能態細微結構分裂為 $\Delta_{FS}=E_x - E_y$ ，其分布的範圍從+100到-30 μeV ，及激子的線偏振率 $P_l=(I_x - I_y)/(I_x+I_y)$ 約為 0~26%，如圖3所示。藉由將激子螢光能量(E_X)做為判斷的依據，我們發現到當 $E_X < 1.4\text{meV}$

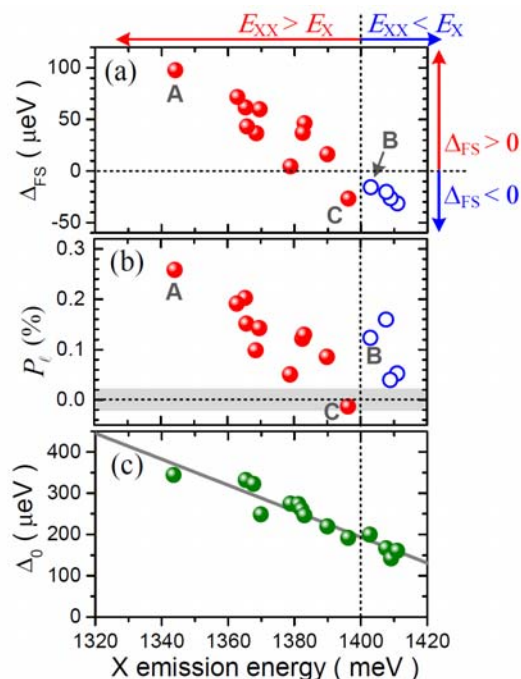


圖 5 不同量子點中激子的(a) Δ_{FS} (b) P_l (c)明激子與暗激子能隙(Δ_0)對激子的螢光能量作圖。

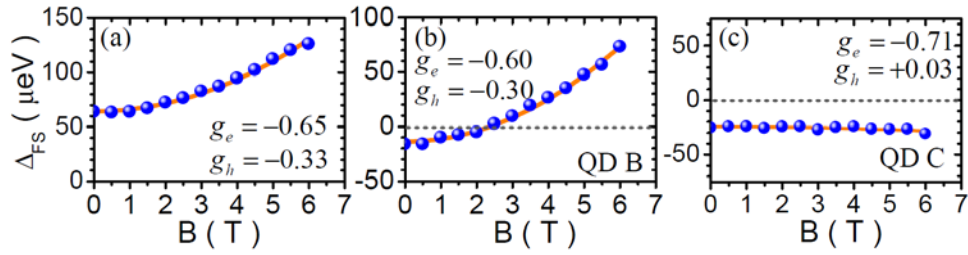


圖 6 不同量子點在水平磁場的作用下，激子能態細微結構隨磁場增加所產生的變化。

時，量子點處在較強的量子侷限效果下，激子能態細微結構與線偏振率及螢光能量均呈現系統性的變化；而當 $E_X > 1.4 \text{ meV}$ 時，激子螢光能量已經接近潤濕層能隙，量子點處於較弱的量子侷限效果，則無明顯的系統變化。

在本實驗中，我們考慮了由應變所造成的重電洞與輕電洞能態混合，即Bir-Pikus 漢米爾頓方程式，與電子-電洞交換作用之漢米爾頓方程式，整理出 Δ_{FS} 與 P_1 將會藉由重電洞與輕電洞能態混合造成的短程電子-電洞交換作用所影響。此外，我們可以利用外加水平磁場改變 Δ_{FS} ，使負值隨磁場增加而變為正值，由圖4所示。當 Δ_{FS} 被補償回零時，激子能態將回到簡併態，如圖6所示。本研究即將刊登於Phys. Rev. B (Lin *et al.*, PRB 2011 *accepted*)。

4. 銻化物覆蓋之第二型量子點

在本部份研究中，我們研究了快速熱退火對於第二型 InAs/GaAs_{1-x}Sb_x 量子點發光特性的影響。除了量子點發光的大量藍移及線寬縮減外，退火也導致輻射復合速率的增加以及消除了 GaAs_{1-x}Sb_x 層中的電洞侷限態。我們論證了透過熱退火可以調變第二型量子點的能帶排列、波函數重疊率及復合動力學。

圖7是在低激發條件下一系列退火樣品以及未退火樣品的低溫光激螢光光譜。隨著

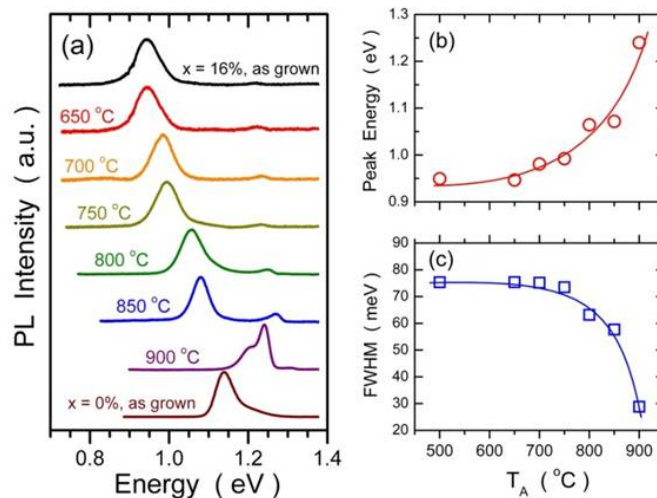


圖 7 各退火樣品之(a)光激螢光光譜，(b)螢光光譜峰值能量(c)螢光光譜半高寬對退火溫度 T_A 作圖。

退火溫度上升，可以觀察到第二型量子點的發光有藍移及半高寬縮減的情形；特別是在 $T_A=850\text{ }^\circ\text{C}$ 到 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 的溫度區間內，樣品的發光波長有較顯著的變化。在經過高溫退火後，發光能量已高於 $x=0\%$ 未退火樣品了。此藍移現象來自於量子點與周圍物質的合金混合(alloy intermixing)。隨著退火溫度 T_A 上升，會有更多的鎘原子擴散進入 InAs 量子點中，使得量子點的侷限能障變得較淺，而發光波長也因此藍移。在此 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 層中的銻原子也會有擴散現象，但由於所含的量較少，因此主要的影響仍來自於鎘原子的擴散。

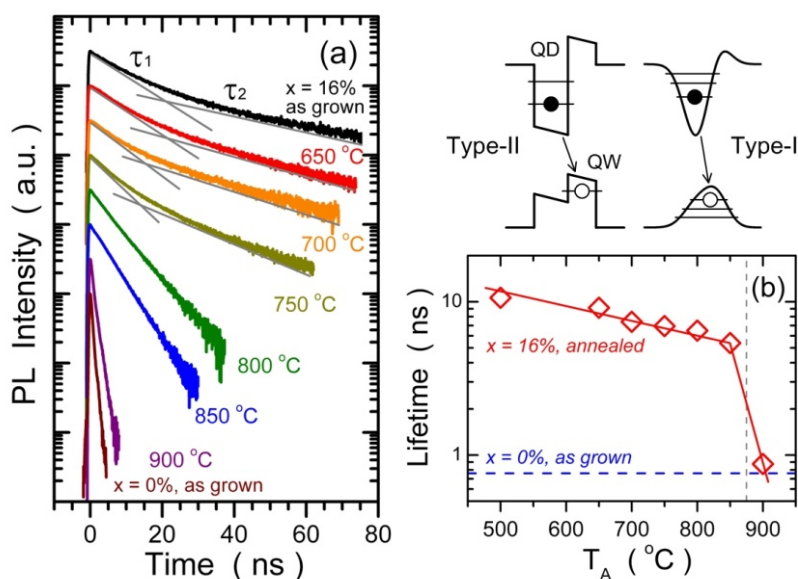


圖 8 各退火樣品之(a)時間解析光譜，(b)各退火樣品的復合速率對退火溫度作圖。

另一方面，為了瞭解快速熱退火對於第二型量子點的復合動力學影響，我們也做了一系列的時間解析光譜量測，其結果如圖 8 所示。由圖 8(a)可看出衰減時間隨著退火溫度上升而變短，而且在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 高溫退火後，生命期已接近第一型量子點了。除此之外，衰減曲線也由未退火時的雙指數衰減，逐漸演變成單一指數衰減。這點意味著在退火處理後，電洞侷限態已緩緩消失。圖 8(b)所示為各樣品的輻射復合速率對上退火溫度作圖，其中紅色方框為各退火樣品的復合速率，並以長晶溫度 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 來代表 $x=16\%$ 未退火樣品，而藍色虛線則為第一型 InAs 量子點的復合速率。由圖可看出，隨著退火溫度上升，輻射復合速率由未退火時的 0.094 ns^{-1} 緩緩增加到退火 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 時的 0.186 ns^{-1} ，但此值相較於第一型 InAs 量子點的復合速率 1.316 ns^{-1} 仍低了許多。此結果表示在 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 以下退火的樣品仍維持著第二型的能帶結構，其電子電洞波函數的重疊率約為第一型量子點的 $30\sim 40\%$ 之間。當退火溫度高達 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 時，復合速率迅速增加到 1.144 ns^{-1} ，非常接近第一型 InAs 量子點，證實了經高溫熱退火後能帶結構將由第二型轉變為第一型，如圖 8(b)所示。此轉變區間位於 $850\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$ 間，且轉變前後復合速率相差相當大，達 6 倍之多。

圖9(a)及(b)分別為低溫低激發條件下，退火 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 及 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 樣品的改變偵測能量之時間解析光譜。每張圖都分為上下兩部份，上方圖所示為光激螢光光譜及載子生命期，

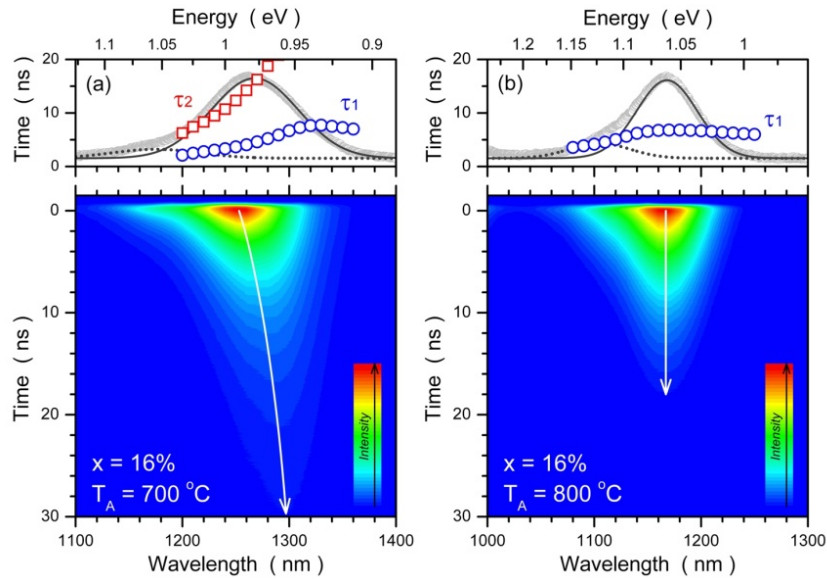


圖 9 退火溫度 $T_A=700$ 、 800°C 樣品之不同能量的時間解析光譜。

下方圖則為螢光光譜隨著時間的演化情形。如圖9(a)所示，其譜線有隨時間演進而紅移的現象，而如圖9(b)所示，我們發現當退火溫度達到 800°C 後，光譜譜線並不隨時間而紅移，表示經過 800°C 以上溫度退火後將可有效去除電洞的侷限態。進一步分析各樣品載子生命期隨發光波長的變化，對 $x = 16\%$ 樣品未退火樣品及 750°C 以下退火樣品，我們使用雙指數衰減函數分析；而對 800°C 以上退火樣品及 $x = 0\%$ 未退火樣品，我們則使用單一指數衰減函數作分析。對 16% 未退火樣品及 650 、 700 及 750°C 退火樣品而言， τ_1 和 τ_2 有明顯的能量相關性。在整個基態發光帶中， τ_1 隨著能量下降而變長，且在低能量端有持平的現象。此現象是來自於 $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 層中電洞在侷限態間的轉換所造成。而隨著退火溫度上升，此生命期變化程度有明顯的下降趨勢；到了 800°C 以上溫度退火後，我們發現 τ_1 在整個基態發光帶內是幾乎不變的，進一步驗證經 800°C 以上溫度退火可有效去除電洞的侷限態。

事實上，在經過 900°C 的高溫熱退火後，量子點與周圍材料的合金混和程度相當嚴重，而我們並不清楚原本的量子點結構是否仍存在，或已經變成類似量子井的結構。因此為了檢查高溫退火後量子點結構是否仍存在，我們利用變功率的光激螢光光譜實驗來做確認。圖 10(a)~4(b)所示為退火 900 、 800 及 700°C 樣品的變功率光激螢光光譜。如圖所示，我們發現光譜中不僅僅只有基態發光，隨著激發功率的增加，第一、第二甚至第三激發態都開始出現。此結果證實了載子仍具有零維的能態密度；意即經過 900°C 的高溫熱退火後，量子點的結構依然存在。

另一方面，各樣品峰值能量隨激發功率上升的變化也為能帶結構的改變提供了證據，我們將峰值能量對激發功率的 $1/3$ 次方作成圖10(d)。如圖所示， 650 、 700 及 750°C 樣品的峰值移動與激發功率的 $1/3$ 次方呈線性關係，為第二型能帶結構的特徵；而對於 900°C 退火樣品而言，其發光峰值並不會隨著功率上升而藍移，證實了此為第一型的能帶結構。而其中最有趣的則是 800°C 、 850°C 樣品了。在低激發功率時，峰值能量隨著激發功率 $1/3$ 次方線性藍移，但當雷射激發功率 $P_{\text{ex}} \geq 5\text{mW}$ 後卻幾乎不再改變。這個行為可以

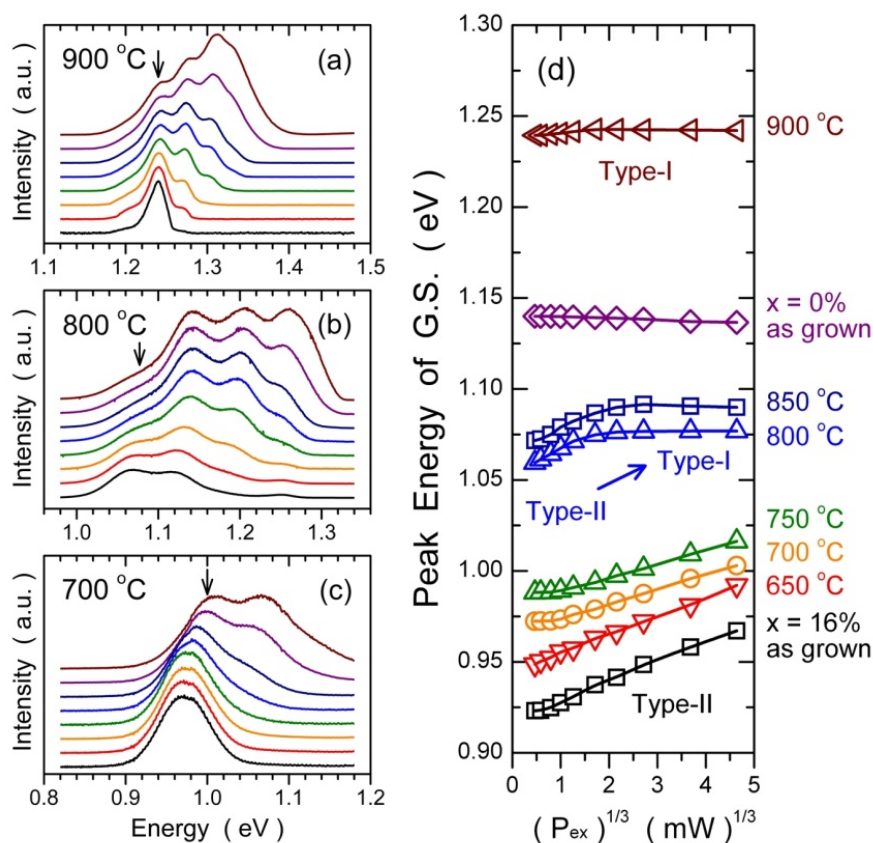


圖 10 (a)900 (b)800 (c)700 °C 退火樣品之改變功率光激螢光光譜(d)各樣品基態峰值對激發功率 1/3 次方作

解釋成第二型到第一型的演化過程：在800 °C退火後，InAs-GaAs_{1-x}Sb_x介面的價帶不連續大小已經由於合金混和而下降許多，若要把電洞侷限在量子點周圍並維持第二型躍遷，則能帶彎曲度就不能太大，因此激發功率必須保持得夠低。當高功率所激發的大量非平衡電子注入量子點中，量子點周圍將產生強大的能帶彎曲，使得微小的價帶不連續無法將電洞侷限在量子點周圍，導致隨著激發功率上升載子復合也從第二型轉變成第一型的躍遷。以上成果已發表於Physica E中(Hsu *et al.*, PE 42, 2524 (2010))。

5. 氮化銦/氮化銦鎳薄膜及氮化銦奈米點的光學性質

除了砷化銦量子點系統外，我們也與本系氮化物研究群(陳衛國、周武清、李明知)合作。最近，我們以拉曼光譜研究以 MOCVD 成長之氮化銦量子點在氮化鎳表面的應變釋放過程。我們發現，不管透過何種方式成長氮化銦量子點，其大部分 InN-GaN 之間的應變是透過介面差排以塑性鬆弛的方式釋放，然而由拉曼光譜發現，其餘殘存應變將隨著奈米點的成長再以彈性鬆弛的方式進行釋放，如下圖11 (a)所示。此結果同時指出氮化銦的殘存應變與量子點尺寸及形狀有密切的關聯。最後透過三維的數值模擬，我們也進一步確認這樣的推論，如下圖9 (b)所示；本成果已發表於 2009 年二月份的 Appl. Phys. Lett. (Tsai *et al.*, APL 94 063102 (2009))。

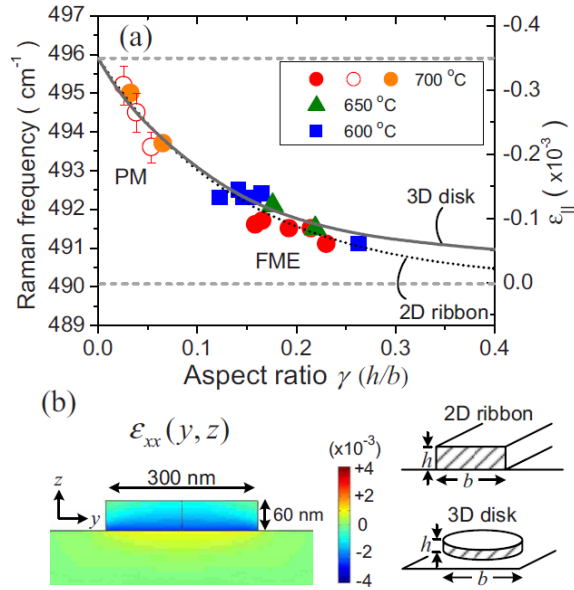


圖 11 (a) 拉曼 E_2 模態位移量(應力)與奈米點高寬比的關係 (b) 氮化銦奈米點應力模擬分佈結果

此外，本系氮化物研究群，更透過自組式 MOCVD 系統，成功地長出高銦組成氮化銦鎵薄膜(x=0.18-0.38)，並將發光波段延伸至紅光範圍，透過 XRD 的導晶格空間描繪，我們發現氮化銦鎵薄膜由於應力釋放的不連續性，而同時存在著應力與鬆弛狀態兩種相位，此結果並可釐清螢光光譜呈現雙譜峰的原因。透過變溫螢光光譜的量測，鬆弛狀態的薄膜其內部量子轉換效率比承受應力狀態下的薄膜還來得高，如圖 12 所示，此外經由時間解析光譜的分析，我們得知鬆弛狀態下的薄膜其侷限態的效果較為明顯。最後我們發現氮化銦鎵薄膜的發光效率與其侷限態的大小程度息息相關；本成果即將整理並進而發表於國際期刊中。

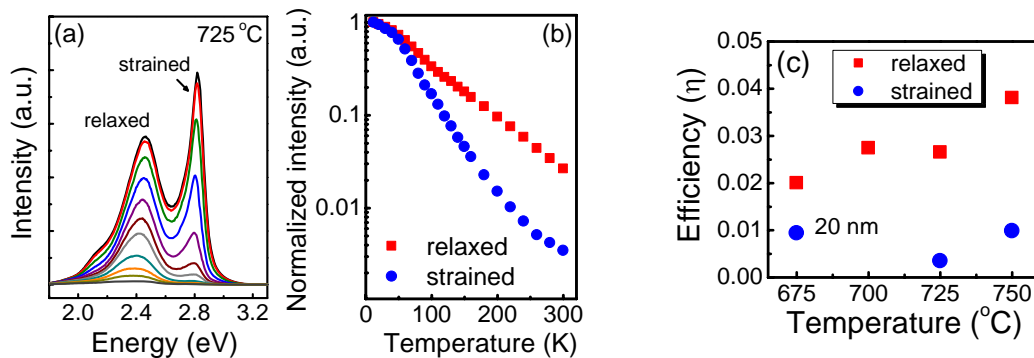


圖 12 (a) 725 °C 成長的氮化銦鎵薄膜之變溫螢光光譜 (b) PL 強度隨量測溫度變化的情況 (c) 氮化銦鎵薄膜在不同成長溫度下之內部量子轉換效率應力模擬分佈結果

6. 量子點與共振腔之耦合

我們亦發展了在常溫下由砷化銾量子點作為一寬頻發光主動層之微碟共振腔。藉由顯微光激螢光光譜，分析不同直徑之微碟共振腔譜線，辨別其為耳語廊模態。透過解析解近似法的計算與三維有限時域差分法的模擬，我們可正確標示出實驗量測耳語廊模態之方位角與徑向模態數。而由時間解析光譜量測結果，我們觀察到室溫下量子點之自發性輻射率受到量子點與共振腔之弱耦合效應而提升。此外，我們使用了近場顯微光學技術，觀察到微碟共振腔表面耳語廊模態的場型分佈與模態數(如圖13所示)。近場光學所掃描出的場強分布並非只由耳語廊模所貢獻，而是由砷化鎵量子點的場與耳語廊模態的場互相疊加後的結果。

另外我們使用了光纖在微碟共振腔的側邊收集其所發出的螢光。藉由特定模態與光纖的耦合可使螢光效率比傳統正向收光高達10倍左右。而近場光學技術則讓我們更加了解微碟共振腔的空間場強分佈。而近場光學所掃描出的場強分布並非只由耳語廊模所貢獻，

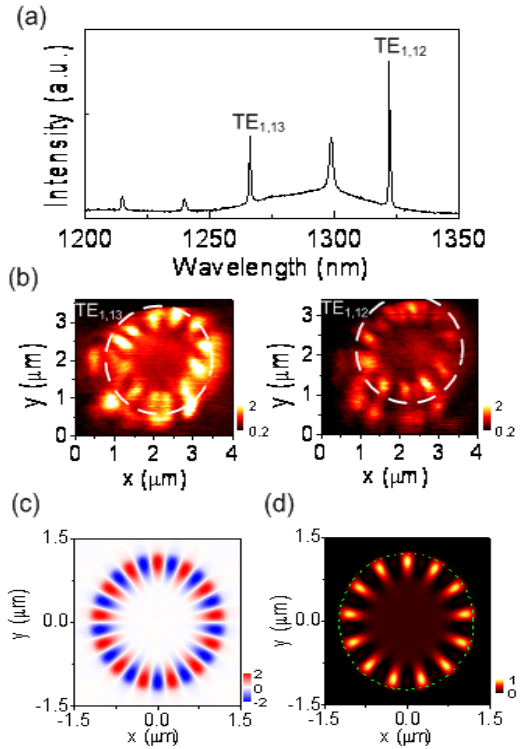


圖 13 (a) 單一微碟的微光基發迎光光譜譜線 (b)- $TE_{1,13}$ 與 $TE_{1,12}$ 近場場圖 (c) 利用 FDTD 所模擬出 $TE_{1,13}$ 的電場圖 (d) 加上定電場 H_0 後的場強圖。

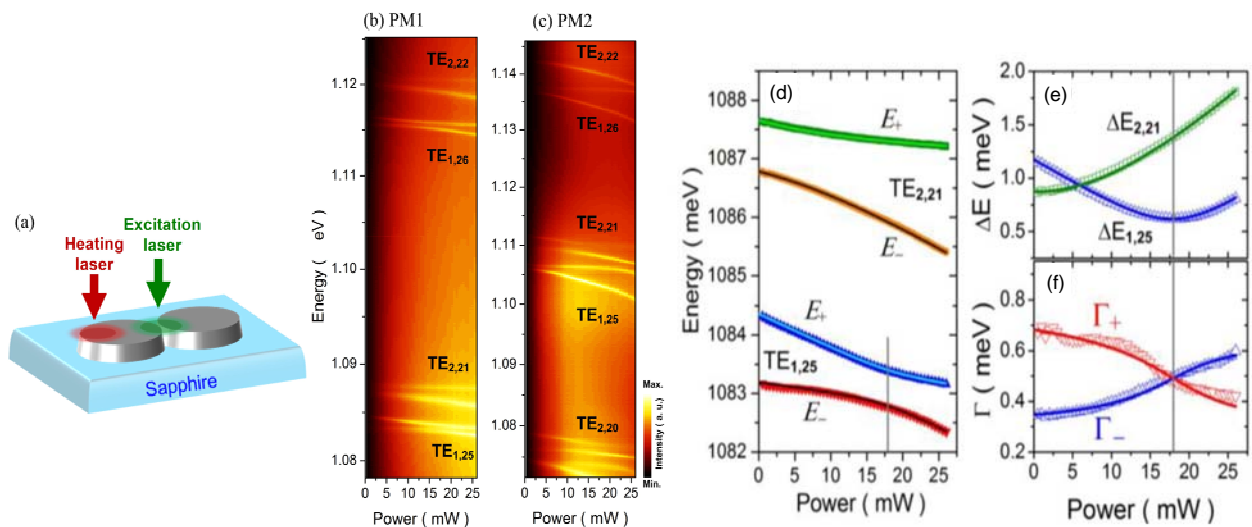


圖 14 (a) 利用雷射局部加熱其中一微碟進而使其折射率穩定改變的示意圖 (b)-(c) 分別為 PM1 與 PM2 在不同加熱雷射功率下的強度等高線圖 (d)-(f) 分別為利用勞倫茲曲線擬合分析 PM1 的模態能量、模態間的能量差以及模態半寬

而是由砷化鎵量子點的場與耳語廊模態的場互相疊加後的結果。此成果正在準備進行發表中。

最後我們也研究了耦合雙微碟共振腔。將微碟轉移至藍寶石基板上，並且利用光纖探針製造耦合雙微碟。透過電場偏振實驗與有限時域差分法，確認實驗量測的耳語廊模態之方位角與徑向模態數。藉由雷射局部加熱效應，穩定地改變其中一個微碟的折射率，觀察到存在於耦合雙微碟中的強耦合效應(如圖14所示)。當耳語廊方位角模態數越大時，其耦合強度越小。此現象是因為模態數越大的模態具有較高的等效位能屏障，故電磁波較不易穿隧與另一微碟的電磁波耦合，所以其模態耦合強度較小。此成果已發表於去年的Optics Express ([Lin et al., OE 18 23948 \(2010\)](#))。

四、論文發表2008-2010

A. 期刊論文

2010

1. H. Lin, J.-H. Chen, S.-S. Chao, M.-C. Lo, S.-D. Lin and **W.-H. Chang**
“Strong coupling of different cavity modes in photonic molecules formed by two adjacent microdisk microcavities”
Optics Express **18**, 23948 (2010)
2. S.-H. Chen, C.-M. Chang, P.-Y. Chiang, S.-Y. Wang, **W.-H. Chang** and J.-I. Chyi*
“DC Characteristics of InAsAs/InGaAsSb/InGaAs Double Heterojunction Bipolar Transistors”
IEEE Trans. Electron Devices **57**, 3327 (2010) (Times cited: 0, IF: 2.445)
3. W.-T. Hsu, Y.-A. Liao, S.-K. Lu, S.-J. Cheng, P.-C. Chiu, J.-I. Chyi, and **W.-H. Chang***
“Tailoring of the Wave Function Overlaps and the Carrier Lifetimes in InAs/GaAs_{1-x}Sb_x Type-II Quantum Dots”
Physica E **42**, 2524 (2010) (Times cited: 0, IF: 1.230)
4. Y. C. Lin, H. L. Chung, H. L. W. C. Chou*, W. K. Chen, **W. H. Chang**, C. Y. Chen and J. I. Chyi,
“Carrier dynamics in isoelectronic ZnSe_{1-x}O_x semiconductors”,
Appl. Phys. Lett. **97**, 041909 (2010). (Times cited: 0, IF: 3.977)
5. H. Y. Ramirez, C. H. Lin, C. C. Chao, Y. Hsu, W. T. You, S. Y. Huang, Y. T. Chen, H. C. Tseng,
W.-H. Chang, S. D. Lin, and S. J. Cheng*
“Optical fine structures of highly quantized InGaAs/GaAs self-assembled quantum dots”,
Phys. Rev. B **81** 245324 (2010) (Times cited: 0, IF: 3.322)
6. H. Y. Ramirez, C.-H. Lin, W.-T. You, S.-Y. Huang, **W.-H. Chang**, S.-D. Lin, S.-J. Cheng*
“Electron-hole symmetry breakings in optical fine structures of single self-assembled quantum dots”
Physica E **42**, 1155 (2010). (Times cited: 0, IF: 1.230)
7. **W.-H. Chang***, C.-H. Lin, Y.-J. Fu, T.-C. Lin, H. Lin, S.-J. Cheng, S.-D. Lin, C.-P. Lee,
“Impacts of Coulomb interactions on the magnetic responses of excitonic complexes in single semiconductor nanostructures”
Nanoscale Res. Lett. **5**, 680 (2010) (Times cited: 0, IF: 2.894)
8. Y. J. Fu, S. D. Lin*, M. F. Tsai H. Lin, C. H. Lin, S. Y. Wang, S. J. Cheng, and **W. H. Chang**
“Anomalous diamagnetic shift for negative trions in single semiconductor quantum dots”
Phys. Rev. B **81** 113307 (2010) (Times cited: 0, IF: 3.322)

2009

9. H. C. Liu, C. H. Hsu, W. C. Chou, W. K. Chen, **W.-H. Chang***,
“Recombination lifetimes in InN films studied by time-resolved excitation-correlation spectroscopy”,
Phys. Rev. B **80** 193203 (2009) (Times cited: 0, IF: 3.107)
10. Y.-A. Liao, W.-T. Hsu, M. C. Lee, P.-C. Chiu, J.-I. Chyi and **W.-H. Chang***,
“Time-resolved photoluminescence of type-II InAs/GaAs quantum dots covered by a thin GaAs_{1-x}Sb_x layer”,
Phys. Stat. Sol. (c) **6**, 1449 (2009). (Times cited: 0, IF: 1.166)
11. Y. C. Lin, W. J. Wang, H. L. Chung, W. C. Chou*, W. K. Chen, **W. H. Chang**, A. S. Susha, and A. L. Rogach,
“Effect of donor-acceptor concentration ratios on nonradiative energy transfer in closely packed CdTe quantum dots”,
Appl. Phys. Lett. **95**, 133123 (2009). (Times cited: 0, IF: 3.977)
12. T.-C. Lin, C.-H. Lin, H.-S. Ling, Y.-J. Fu, **W.-H. Chang**, S.-D. Lin, C.-P. Lee,
“Impacts of structural asymmetry on the magnetic response of excitons and biexcitons in single

- self-assembled In(Ga)As quantum rings*”,
 Phys. Rev. B **80 Rapid Com.** 081304(R) (2009) (Times cited: 0, IF: 3.107)
13. S. F. Fu, S. M. Wang, L. Lee, C. Y. Chen, W. C. Tsai, W. C. Chou, M. C. Lee, **W.-H. Chang**, W. K. Chen*,
 “The structural and optical properties of InN nanodots grown with various V/III ratios by metal-organic
 chemical vapor deposition”,
 Nanotechnology **20**, 295702 (2009). (Times cited: 0, IF: 3.037)
14. H. S. Chang, W. Y. Chen, T. M. Hsu*, T. P. Hsieh, J. I. Chyi, and **W.-H. Chang**,
 “Origins of non-zero multiple photon emission probability from single quantum dots
 embedded in photonic crystal nanocavities”,
 Appl. Phys. Lett. **94**, 163111 (2009). (Times cited: 0, IF:
 3.977)
15. H. Lin, S.-Y. Wang, C.-H. Lin, **W.-H. Chang***, S.-J. Cheng, M.-C. Lee,
 W.-Y. Chen, T. M. Hsu, T.-P. Hsieh and J.-I. Chyi,
 “Exciton fine structures and energy transfer in single InGaAs quantum-dot molecules”,
 Phys. Stat. Sol. (c) **6**, 861 (2009). (Times cited: 0, IF: 1.166)
16. C.-Y. Chen, L. Lee, S.-K. Tai, S.-F. Fu, W.-C. Ke, W.-C. Chou, **W.-H. Chang**,
 M.-C. Lee, and W.-K. Chen*
 “Optical properties of uncapped InN nanodots grown at various temperatures”,
 Jpn. J. Appl. Phys. **48**, 031001 (2009). (Times cited: 0, IF:1.309)
17. W.-C. Tsai, F.-Y. Lin, W.-C. Ke, S.-K. Lu, S.-J. Cheng, W.-C. Chou, W.-K. Chen, M.-C. Lee and **W.-H.
 Chang***,
 “Size-dependent strain relaxation in InN islands grown on GaN by metalorganic chemical vapor
 deposition”,
 Appl. Phys. Lett. **94**, 063102 (2009). (Times cited: 0, IF: 3.977)
18. Y.-A. Liao, W.-T. Hsu, P.-C. Chiu, J.-I. Chyi and **W.-H. Chang***,
 “Effects of thermal annealing on the emission properties of type-II InAs/GaAsSb quantum dots”,
 Appl. Phys. Lett. **94**, 053101 (2009). (Times cited: 1, IF: 3.977)
- 2008**
19. M.-F. Tsai, H. Lin, C.-H. Lin, S.-D. Lin, S.-Y. Wang, S.-J. Cheng, M.-C. Lee, **W.-H. Chang***,
 “Diamagnetic Responses of Exciton Complexes in Semiconductor Quantum Dots”,
 Phys. Rev. Lett. **101**, 267402 (2008). (Times cited: 3, IF: 7.218)
20. Y. C. Lin, W. C. Chou*, W. C. Fan, J. T. Ku, F. K. Ke, W. J. Wang, S. L. Yang, W. K. Chen, **W. H. Chang**,
 and C. H. Chia,
 “Time-resolved photoluminescence of isoelectronic traps in ZnSe_{1-x}Te_x semiconductor alloys”,
 Appl. Phys. Lett. **93**, 241909 (2008). (Times cited: 0, IF: 3.977)
21. **W.-H. Chang***, Y.-A. Liao, W.-T. Hsu, M.-C. Lee, P.-C. Chiu and J.-I. Chyi,
 “Carrier Dynamics of Type-II InAs/GaAs Quantum Dots Covered by a Thin GaAs_{1-x}Sb_x Layer”,
 Appl. Phys. Lett. **93**, 033107 (2008). (Times cited: 2, IF: 3.977)
22. C.-H. Lee, C.-Y. Yu, C.M. Lin, C.W. Liu*, H. Lin and **W.-H. Chang**
 “Carrier gas effects on the SiGe quantum dots formation”,
 Appl. Surf. Sci. **254**, 6257, (2008). (Times cited: 0, IF: 1.406)
23. **W.-H. Chang***, H. Lin, S.-Y. Wang, C.-H. Lin, S.-J. Cheng, M.-C. Lee, W.-Y. Chen, T. M. Hsu, T.-P. Hsieh
 and J.-I. Chyi,
 “Nonresonant Carrier Transfer in Single InGaAs/GaAs Quantum Dot Molecules”,
 Phys. Rev. B **77**, 245314 (2008). (Times cited: 1, IF: 3.107)
24. Y. C. Lin, W. C. Fan, C. H. Chiu, F. K. Ke, S. L. Yang, D. S. Chuu, M. C. Lee, W. K. Chen,
W.-H. Chang, W. C. Chou*, J. S. Hsu and J. L. Shen,

“Pressure-induced metallization and resonant Raman scattering in $Zn_{1-x}Mn_xTe$ ”
J. Appl. Phys. **104**, 013503 (2008). (Times cited: 0, IF: 2.316)

25. **W.-H. Chang***, L. Lee, C.-Y. Chen, W.-C. Tsai, H. Lin, W.-C. Chou, W.-K. Chen, M.-C. Lee,
“Structural and Optical Properties of InN/GaN Islands Grown by Metalorganic Chemical Vapor
Deposition”,
Phys. Stat. Sol. (c) **5**, 3014 (2008). (Times cited: 0, IF: 1.166)
26. **W.-H. Chang***, W.-C. Ke, L. Lee, C.-Y. Chen, W.-C. Tsai, H. Lin, W.-C. Chou, W.-K. Chen and M.-C. Lee,
“Effects of Growth Temperature on InN/GaN Nanodots Grown by Metalorganic Chemical Vapor
Deposition”,
J. Appl. Phys. **103**, 104306 (2008) (Times cited: 4, IF: 2.316)
27. W.-C. Tsai, H. Lin, W.-C. Ke, **W.-H. Chang***, W.-C. Chou, W.-K. Chen and M.-C. Lee,
“Structural and Optical Properties of Indium-Rich InGaN Islands”,
Phys. Stat. Sol.(c) **5**, 1702 (2008) (Times cited: 0, IF: 1.166)

B. 研討會論文

1. **W.-H. Chang***, C.-H. Lin, Y.-J. Fu, T.-C. Lin, H. Lin, S.-J. Cheng, S.-D. Lin, C.-P. Lee,(2009)
“Magnetic responses of excitonic complexes in single semiconductor nanostructures”
2009 Collaborative Conference on Interacting Nanostructures, (CCIN'09), San Diego, USA
2. W.-T. Hsu, Y.-A. Liao, S.-K. Lu, S.-J. Cheng, P.-C. Chiu, J.-I. Chyi, and **W.-H. Chang***
“Tailoring of the Wave Function Overlaps and the Carrier Lifetimes in InAs/GaAs_{1-x}Sb_x Type-II Quantum
Dots”
18th Electronic Properties of 2 Dimensional Systems (EP2DS-18) and 14th Modulated Semiconductor
Structures (MSS14), Kobe, Japan
3. Y.-J. Fu*, S.-D. Lin, M.-F. Tsai, H. Lin, C.-H. Lin, S.-Y. Wang, S.-J. Cheng, **W.-H. Chang**, (2009)
“Diamagnetic shift of exciton complexes in InAs quantum dots”
18th Electronic Properties of 2 Dimensional Systems (EP2DS-18) and 14th Modulated Semiconductor
Structures (MSS14), Kobe, Japan
4. H. Y. Ramirez*, C.-H. Lin, W.-T. You, S.-Y. Huang, **W.-H. Chang**, S.-D. Lin, S.-J. Cheng (2009)
“Electron-hole symmetry breakings in optical fine structures of single self-assembled quantum dots”
18th Electronic Properties of 2 Dimensional Systems (EP2DS-18) and 14th Modulated Semiconductor
Structures (MSS14), Kobe, Japan
5. W.-C. Tsai*, F.-Y. Lin, W.-C. Ke, W.-C. Chou, W.-K. Chen, M.-C. Lee and **W.-H. Chang**, (2008)
“Strain Analysis of InN Islands Grown on GaN by Micro-Raman scattering”,
The 35th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2008), Freiburg, Germany
6. Y.-A. Liao*, W.-T. Hsu, **W.-H. Chang**, M.-C. Lee, P.-C. Chiu and J.-I. Chyi, (2008)
“Carrier Dynamics of Type-II InAs/GaAs Quantum Dots Covered by a Thin GaAs_{1-x}Sb_x Layer”,
The 35th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2008), Freiburg, Germany
7. H. Lin*, S.-Y. Wang, C.-H. Lin, **W.-H. Chang**, S.-J. Cheng, M.-C. Lee, W.-Y. Chen, T. M. Hsu, T.-P. Hsieh
and J.-I. Chyi,(2008)
“Exciton fine structures and energy transfer in single InGaAs quantum-dot molecules”
The 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots (QD2008), Gyeongju, Korea
(H. Lin: Best Student Awards)
8. Y. C. Tseng*, C. J. Wang, P. C. Chiu, T. P. Hsieh, W. Y. Chen, M. H. Shih, **W. H. Chang**, T. M. Hsu, and
J.-I. Chyi,(2008)
“Quasi-1D photonic crystal micro-cavities with an extremely low mode-volume for 1.3 μm InAs QD single
photon sources”
The 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots (QD2008), Gyeongju, Korea

五、經費使用狀況

(1) 本計畫經費使用均依規定採購與核銷。

(2) 出席國際會議之經費使用：

- **W.-H. Chang***, C.-H. Lin, Y.-J. Fu, T.-C. Lin, H. Lin, S.-J. Cheng, S.-D. Lin, C.-P. Lee, (2009)
“Magnetic responses of excitonic complexes in single semiconductor nanostructures”
2009 Collaborative Conference on Interacting Nanostructures, (CCIN'09), San Diego, USA
- W.-T. Hsu, Y.-A. Liao, S.-K. Lu, S.-J. Cheng, P.-C. Chiu, J.-I. Chyi, and **W.-H. Chang***
“Tailoring of the Wave Function Overlaps and the Carrier Lifetimes in InAs/GaAs_{1-x}Sb_x Type-II Quantum Dots”
18th Electronic Properties of 2 Dimensional Systems (EP2DS-18) and 14th Modulated Semiconductor Structures (MSS14), Kobe, Japan
- W.-C. Tsai*, F.-Y. Lin, W.-C. Ke, W.-C. Chou, W.-K. Chen, M.-C. Lee and **W.-H. Chang**, (2008)
“Strain Analysis of InN Islands Grown on GaN by Micro-Raman scattering”,
The 35th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2008), Freiburg, Germany
- Y.-A. Liao*, W.-T. Hsu, **W.-H. Chang**, M.-C. Lee, P.-C. Chiu and J.-I. Chyi, (2008)
“Carrier Dynamics of Type-II InAs/GaAs Quantum Dots Covered by a Thin GaAs_{1-x}Sb_x Layer”,
The 35th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2008), Freiburg, Germany
- H. Lin*, S.-Y. Wang, C.-H. Lin, **W.-H. Chang**, S.-J. Cheng, M.-C. Lee, W.-Y. Chen, T. M. Hsu, T.-P. Hsieh and J.-I. Chyi, (2008)
“Exciton fine structures and energy transfer in single InGaAs quantum-dot molecules”
The 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots (QD2008), Gyeongju, Korea
(H. Lin: Best Student Awards)

(3) 儀器採購—紅外線光譜偵測陣列：

量測範圍由 800 ~ 1700 nm (如下譜線，此譜線為量測白光光源之結果)，測試結果正常。L-N₂ cooling system：可降溫至-100°C 並且 locked 住工作溫度。Blemish specifications: 1024 pixels 裡面僅 3 個 pixels 有異常，defect <1 % (如下譜線，有峰值處為異常處)，符合規格。採購如期完成。

