

半導體量子點之物理特性與 元件應用

本文介紹半導體奈米結構中量子點相關之製作、檢測技術，以及其物理特性與元件應用，主要對象為利用本實驗室分子束磊晶系統成長之 InAs/GaAs 自組式量子點，並討論其 AFM、TEM 與光激光之量測結果；文中除簡述其物理特性外，並利用這些特性改善傳統元件特性，如量子點雷射及量子點紅外線偵測器，以及設計新穎元件，如量子點穿隧元件。

林聖迪、李建平

一、簡介

二十世紀初期，物質純化技術的進步，使得人們得以發現並研究半導體的有趣特性。利用半導體中特殊之能帶結構，使得我們能夠在高純度半導體中，摻入少量特定雜質來控制其導電度，進而設計製作各種元件。另一方面，隨著磊晶成長技術的日益精進，成長各種半導體異質介面日趨成熟，更為基礎物理研究與新穎元件應用開啟新的世紀。

近年來，隨著積體電路技術的突飛猛進，為了達到高密度、低功率以及低成本的產品需求，各種使元件尺寸不斷縮小的技術成為 IC 工業的重要課題與挑戰。傳統光學微影技術受限於光源波長，最

小尺寸的極限約在 0.1 微米 (μm) 以上，然而，近來各種微影技術不斷改進，如電子束微影、X 光微影等等，將元件可製作的尺寸縮小至 0.1 微米以下，而進入奈米 (nm) 元件的領域。另一方面，藉由磊晶成長條件的精確控制，直接成長奈米結構也被廣泛地研究。此類奈米結構不僅提供了基礎研究重要的素材，並且成功地應用在各種元件上，因而受到廣泛的研究與注意。

由於奈米結構的尺寸約在 5 nm 至 50 nm 之間，遠小於古典物理所能描述之巨觀世界，而進入近代量子力學討論的範疇，所以在奈米結構中量子效應影響顯著，也因此提供各種基礎物理研究一個可控的研究主體，許多新穎元件應用也因而誕生。

奈米結構之材料與範圍甚廣，限於篇幅，本文將僅就半導體奈米結構中之量子點相關物理特性、製作技術、檢測技術以及元件應用，作深入淺出之介紹，並對此一領域目前的困境與挑戰及未來的展望提出一些看法。

林聖迪先生現就讀於國立交通大學電子工程研究所博士班。

李建平先生為美國加州理工學院應用物理博士，現任國立交通大學電子工程研究所教授。

二、量子點之物理特性

考慮一般量子力學所討論之量子井 (quantum well) 結構，如圖 1 所示，由材料 A 與材料 B 形成之位能圖，其中束縛於材料 B 中之粒子，其沿 z 軸方向動量會量子化，而不再是連續的，其量子化所對應之能階值，在材料 A 所形成位能障足夠大時，大致遵守下列關係：

$$E_{zn} = \frac{\hbar^2 k_{zn}^2}{2m^*} = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* L^2}$$

其中， \hbar 為 Planck 常數， k_{zn} 為沿 z 軸方向量子化之波數， m^* 為粒子之等效質量， L 為 B 層之厚度，而 $n = 1, 2, 3, \dots$ 為量子數⁽¹⁾。由於在 x - y 平面並無位能障，故粒子在平行量子井方向之動量對應之能階係連續的，所以粒子之總能量為：

$$E = E_x + E_z = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* L^2}$$

也就是說，總能量仍然是連續的。即使在量子線的情形，也就是有兩個維度均有位能障時，由於仍有一個方向之動量所對應能量之能階是連續的，所以總能量之能階仍為連續之分佈。唯有在三個維度上均有位能障形成時，由於所有方向動量所對應之能量皆已量子化，所以此時總能量亦為不連續之分佈。

以上所述係僅就階之差異討論，在半導體中能態密度對其物理特性有決定性的影響，塊材 (bulk)、量子井，量子線 (quantum wire) 及量子點 (quantum dots) 之示意圖與能階、能態密度之比較如圖 2 所示⁽²⁾。

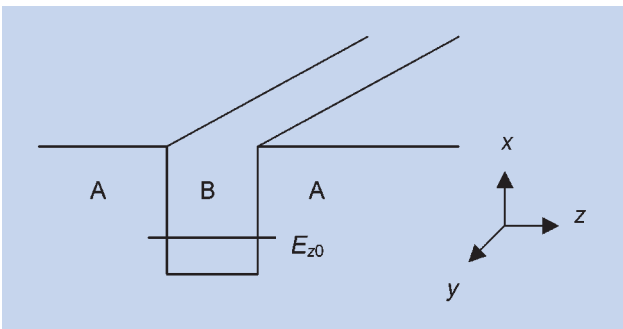


圖 1. 量子井及其量子化能階示意圖。

正因低維度奈米結構具有不同於塊材的能態分佈，使得其能夠提供獨特物性，而在基礎研究與元件應用方面能夠廣受矚目。換言之，奈米結構如同一種全新的材料，而其物理性質能藉由成長或製作的方式來控制，以符合研究與應用的需求，其獨特的性質更能利用來設計新穎的元件，而又兼具高密度與低耗能之優點。

三、量子點之製作及其光學特性

傳統上製作量子點的方式，可分為 in-situ 與 ex-situ 兩種。其中 ex-situ 的方式，由於量子點之異質介面曾接觸空氣，或是在製作過程易於介面造成晶格缺陷，所以常在介面形成大量表面態 (surface states)，對量子點的特性造成難以預測的效應，使得利用此法製作高品質量子點非常困難。正因如此，ex-situ 製作量子點的方式研究多年，獲得的進展卻始終十分有限。

In-situ 成長量子點的方式也有很多種，其中以自組式 (self-assembled) 量子點之成長與製作最為成

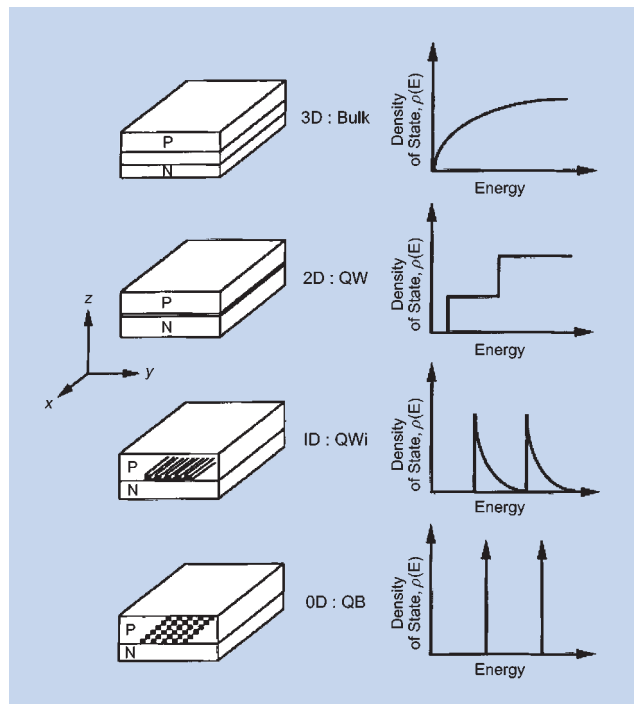


圖 2. 塊材、量子井、量子線及量子點之能態密度分佈示意圖。

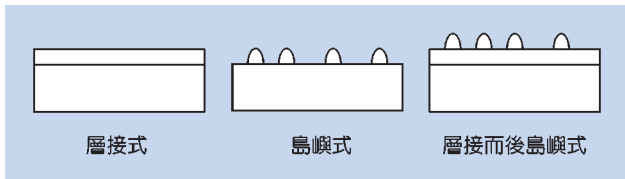


圖 3. 異質介面磊晶成長之三種模式示意圖。

熟，以下就此一方式作一簡介⁽²⁾。

常見的三種異質薄膜磊晶成長模式為：(1) 層接式 (Frank-van der Merwe mode)；(2) 島嶼式 (Volmer-Weber mode)；(3) 層接而後島嶼式 (Stranski-Krastanow mode)，圖 3 是此三種磊晶模式之示意圖。當磊晶層材料的表面能約等於或小於其基板材料的表面能時，有利於層接式的成長模式，例如 AlGaAs/GaAs 系統。反之，當磊晶材料的表面能遠大於基板的表面能時，有利於島嶼式的成長模式，例如 Fe/Si 或 Co/GaAs 系統。層接而後島嶼式成長模式則是介於上述兩種成長模式之間的情況，這牽涉到晶格常數間的匹配程度問題。晶格常數的不匹配會造成彈性應變能的產生，若是磊晶層的表面能較基板的表面能小，但是他們之間有晶格不匹配存在時，那麼最初的成長模式趨向於層接式；但是當磊晶厚度達到一定的程度時，由於彈性應變能增加，導致晶格會藉由晶格鬆弛來降低應變能，使系統的總能量下降，因此使得成長模式轉為島嶼式成長。如果控制磊晶厚度在一定的臨界值以下，這樣的晶格鬆弛並不會產生顯著的缺陷，但是如果厚度持續增加，就會有差排、堆疊錯誤等缺陷產生。

以目前研究最為廣泛的 InAs/GaAs 系統為例，InAs 的晶格常數大於 GaAs 的晶格常數，因此當成長在 GaAs 材料上時，會在平行於長晶的方向上產生壓縮應變，因此只要適當控制磊晶條件與厚度，就可以形成三維島嶼式的成長模式。又因為 InAs 之能隙小於 GaAs 之能隙，所以在成長適當厚度後以 GaAs 覆蓋之，便可形成量子點。

我們利用本實驗室之分子束磊晶系統，在控制適當之磊晶條件下，可成長高品質的 InAs/GaAs 量子點。量子點之形成可利用該系統配備之 RHEED 系統來觀察。在層接式成長模式時，RHEED 會呈

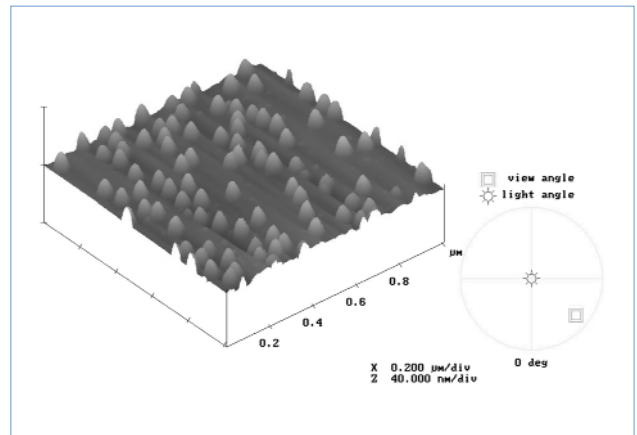


圖 4. InAs/GaAs 自組式量子點之 AFM 觀測圖。

現條狀圖樣，顯示目前基板表面係平整之二維表面；而當島嶼式成長模式開始時，該圖樣會由條狀轉變為點狀，顯示表面以形成量子點之三維表面。而當 InAs 磊晶厚度在 1.4 - 1.6 個原子層厚度以下時 (InAs 一個原子層厚度約為 0.3 nm)，表面仍為二維之層接式成長模式，而當磊晶厚度大於 1.6 - 1.8 個原子層厚度以上時，便轉變成為三維之島嶼式成長模式，此時量子點便已形成。而為了避免產生嚴重之晶格缺陷，一般會控制磊晶厚度在 3 個原子層厚度以下。

圖 4 與圖 5 係在一特定條件下所成長之量子點的原子力顯微掃描 (AFM) 與穿隧式電子顯微鏡 (TEM) 之觀測結果。一般量子點之直徑約在 15 -



圖 5. InAs/GaAs 自組式量子點之 TEM 平面觀測圖。

30 nm 之間，高度約在 3 - 7 nm 之間，而表面密度可控制在 $1 \times 10^9 - 1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 的範圍中。

由於三五族半導體之直接能隙特性，我們可利用一般光激光 (photoluminescence) 之技術來檢測樣品的品質⁽³⁾。本實驗室使用氬離子雷射作為激發光源，利用 InGaAs 光偵測器偵測樣品受激發後產生的放光，配合可將樣品降至溫度約 15 K 之溫控系統，量測樣品在低溫至室溫之光激光特性。圖 6 為其中一個樣品的光激光量測結果，其低溫與室溫之半高寬 (FWHM) 分別約為 28 meV 與 32 meV，顯示該樣品之量子點均勻性良好。值得注意的是，低溫與室溫之半高寬十分接近，此特性與一般量子井半高寬會隨著溫度上升而增加的特性完全不同。在量子井中，由於能階是連續的，樣品溫度上升時，電子會分佈至較高的能階，所以半高寬會明顯的增加；而在量子點中，由於能階係不連續的，所以沒有此明顯之效應。從此亦可知在量子點中，光激光半高寬主要係來自量子點尺寸的不均勻性。另一方面，利用入射至樣品之激發光源的強弱，來觀察量子點光激光結果的變化，亦可看出量子點結構與傳統量子井結構間的明顯差異。圖 7 即為此一量測之結果，從此圖中可以發現，當激發光源較弱時，該量子點樣品只有基態之放光，而當激發光源增強時，基態放光逐漸飽和，而第一激態、第二激態的放光會漸漸增加。此係由於量子點之能態分佈是不連續的，當入射光所產生之載子數量較少時，所有載子皆會鬆弛至量子點之激態後，再經由電子與電

洞之復合而放光。然而，當入射光逐漸增強時，產生之載子數量也逐漸增加，基態放光之速率無法及時消耗所有鬆弛至量子點之載子時，便會有載子堆積在量子點之第一激態中，而發生第一激態之放光。而當入射光繼續增強時，第二激態的放光也會逐漸發生。

四、量子點之元件應用

由於量子點之獨特物理特性與能態分佈，我們可以利用其特性來改善傳統量子井元件之特性，如量子井雷射與量子井紅外線偵測器，進而設計並製作新穎之元件，如量子點穿隧元件。以下分別敘述之。

1. 量子點雷射

傳統半導體量子井雷射的發明，已經普遍地應用在光學讀寫、儀器偵測與光纖通訊等方面，尤其是光纖通訊，近年來更逐漸展現了其不可忽視的影響力。然而在傳統的量子點雷射中，由於能態分佈之連續性，其雷射發光之起始電流密度有其理論之極限，而利用量子點之不連續能態分佈，理論上可以將起始電流 (threshold current) 降至比傳統量子井更低的範圍，而減少元件操作時的耗能，避免因為高耗能而衍生之種種問題，如元件散熱與可靠度問題。目前國際學術期刊所發表之最低起始電流密度值為 19 A/cm^2 ，較一般量子井雷射之 $50 - 60 \text{ A/cm}^2$

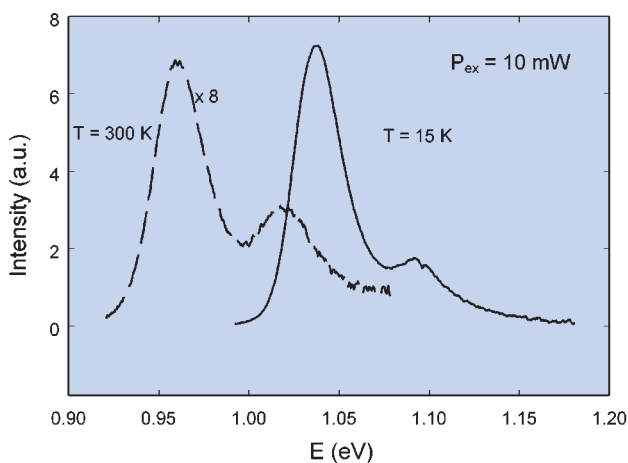


圖 6. 量子點在低溫與室溫之光激光量測結果。

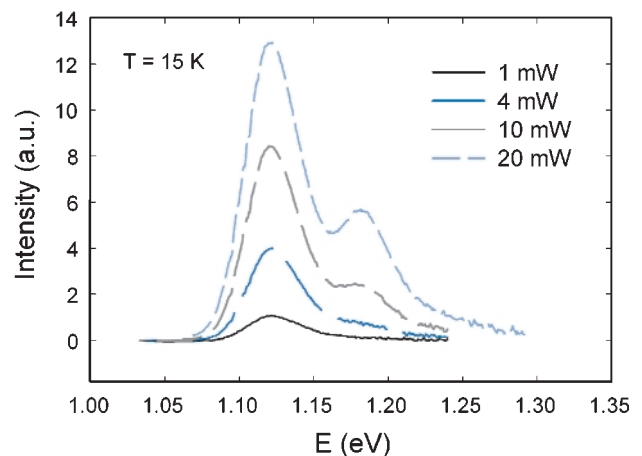


圖 7. 量子點在不同激發功率下之光激光量測結果。

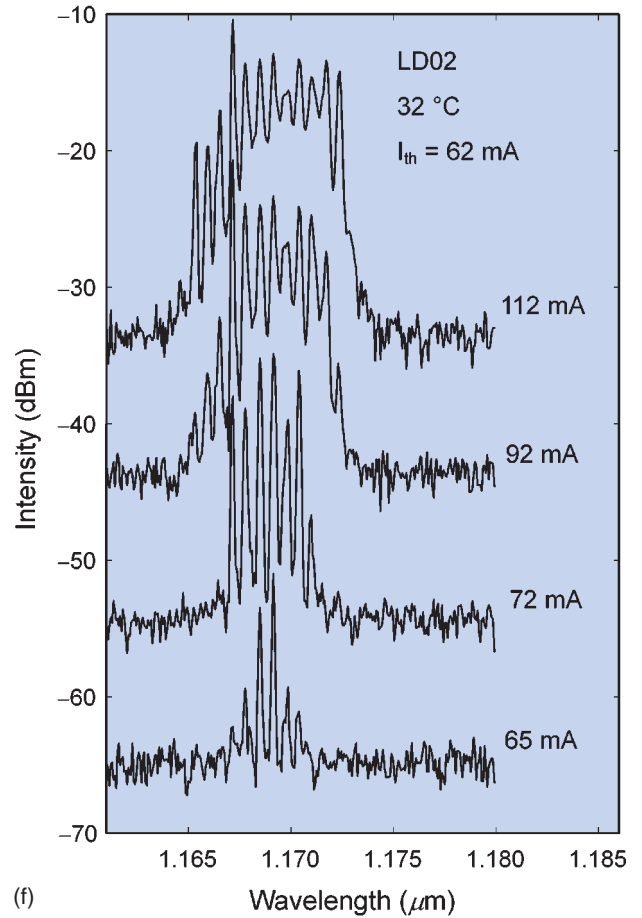
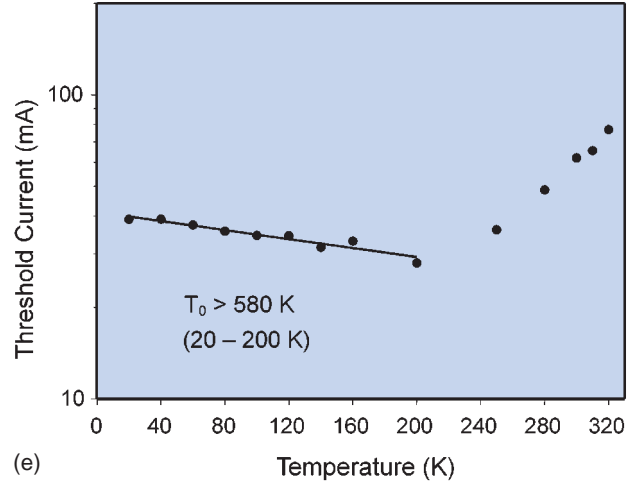
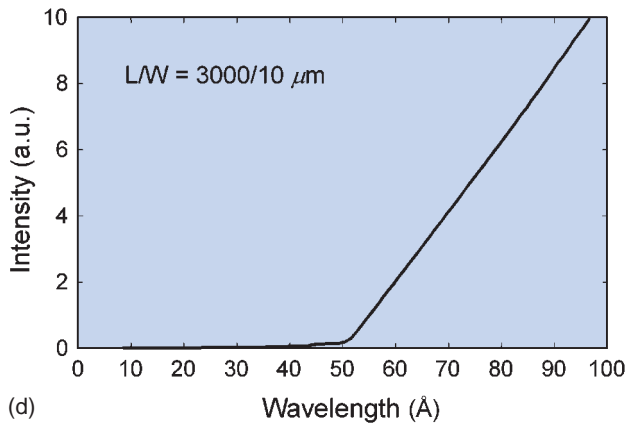
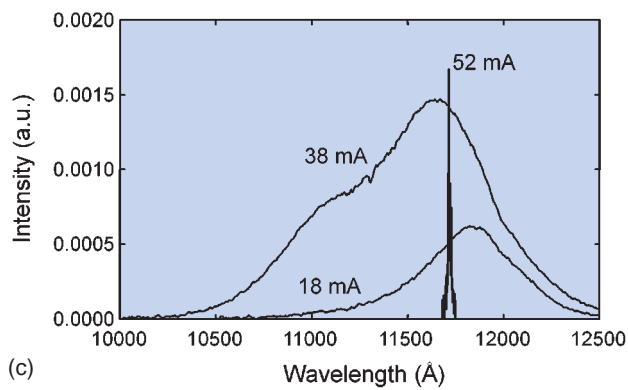
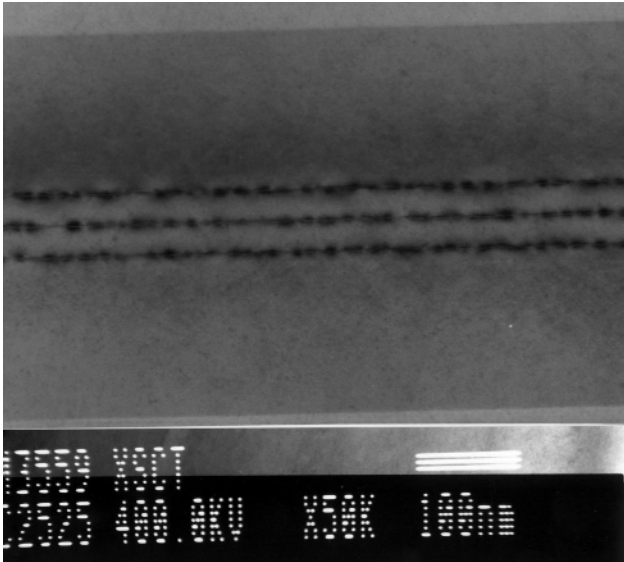
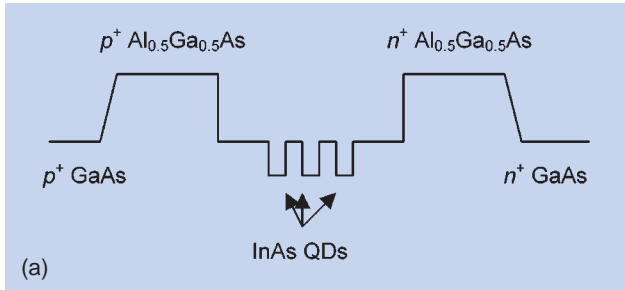


圖 8. (a) 量子點雷射磊晶結構能帶示意圖。(b) 圖 (a) 中樣品之 TEM 截面觀測圖。(c) 量子點雷射元件之發光光譜量測結果。(d) 量子點雷射元件之 L-I 圖。(e) 量子點雷射元件之起始電流隨溫度的變化圖。(f) 量子點雷射發光光譜放大圖。

低了三倍左右⁽⁴⁾。

另一方面，由於量子井雷射之連續態能分佈，使得其特徵溫度 (characteristic temperature) 偏低，不利於元件在環境溫度不穩定的條件下操作，而增加電路設計與元件封裝的困難。利用量子點製作之半導體雷射，理論上可大幅增加其元件之特徵溫度，而解決應用上的問題。圖 8 所示即為本實驗室所製作之量子點雷射結構與元件特性圖。其中圖 8(a) 為該雷射之磊晶結構，其與一般量子井雷射結構類似，此處利用三層量子點以提高密度，單層量子點之密度約為 $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ，層與層之間距為 30 nm，以避免量子點之應力相互影響。圖 8(b) 為該結構之截面 TEM 照片，可以發現層與層之間的量子點應力分別獨立，並且沒有可見之晶格缺陷產生。圖 8(c) 為該結構製作成為雷射元件後之發光光譜，從此圖中看到雷射之發光 (lasing) 波長與放光 (electroluminescence) 之基態波長一致，可確定該雷射係以基態發光。圖 8(d) 為該雷射在脈衝模式下量測所得之 L-I 圖形，可得該雷射之起始電流約為 50 mA，而由大面積元件 (broad area) 萃取所得之起始電流密度為 70 A/cm^2 ，與一般量子井雷射接近。圖 8(e) 則為測得之起始電流與元件溫度的關係圖，可以發現在元件溫度低於約 200 K 時，起始電流幾乎與溫度無關，顯示元件在該低溫時之特徵溫度極大，符合理論之預測。然而在更高溫時，起始電流則隨元件溫度明顯增加，在室溫附近之特徵溫度約僅為 70 K，較一般量子井雷射之約 200 K 為低，這可能是因為在量子點結構中，非輻射性的電子電洞復合，隨溫度上升而增加所導致的結果，但真正的原因仍需進一步的研究。圖 8(f) 係該雷射在元件溫度 C 時所量測之發光光譜放大圖，可以看見多模態同時發光的有趣特性，初步分析認為此現象與量子點之增益能譜較寬，以及基板共振腔效應有關，詳細的原因仍待進一步理論分析與實驗量測來釐清。

2. 量子點紅外線偵測器

紅外線偵測器除了一般軍事用途外，也可用於夜間偵測、溫度感應與天文研究方面，量子井紅外線偵測器的發明，使得我們可以利用磊晶之成分與

厚度來控制偵測器所偵測的波長範圍。然而，傳統量子井紅外線偵測器有兩個難以克服的缺點。第一，其無法吸收正向入射的紅外線。由於在量子井結構中，吸收紅外線係利用電子在量子井的基態躍遷至第一激態或非束縛之連續態來達成，根據量子力學的計算，此種躍遷無法藉由與量子井平行之電場來達成，所以量子無法吸收正向射入基板的紅外線。此點使得其在應用時必須在外部引入使紅外線斜向入射的結構，增加了設計與製作的難度。第二，量子井紅外線偵測器之暗電流過大，使得其必須在液態氮之冷卻溫度下才能操作，此點使得其操作成本大幅增加，無法廣泛地應用在各個方面。

如果利用量子點取代量子井來製作紅外線偵測器，由於量子點的三維結構，使得其正向入射紅外線之吸收大幅增加，自然地克服了量子井的問題。而量子點中的不連續態能分佈所造成的聲子瓶頸效應 (phonon bottleneck)，使得紅外線偵測器的暗電流降低而光電流不至於大幅下降，可以提高元件之操作溫度，減少低溫冷卻系統的需求與困擾。

許多研究群均已發表證實，量子點正向吸收的特性確實可以改善量子井的缺點，然而，製作成實際元件時，操作溫度卻遠低於量子井紅外線偵測器。探究其原因，發現雖然聲子瓶頸效應使得量子點紅外線偵測器之光電流在相同入射光能量時遠大於量子井紅外線偵測器，但是同時也提高了暗電流。有鑑於此，我們利用結構上的小幅修正，來解決此一問題，現詳述如下⁽⁵⁾。

由於在量子點紅外線偵測器中，暗電流的路徑可分為行經量子點與未經過量子點兩者，如圖 9(a) 所示，其中未經過量子點的路徑，不易被捕捉而形成過大之暗電流，卻又對光電流沒有貢獻。為使電子能如我們所期望的集中至通過量子點的路徑，我們在磊晶結構上作了如圖 9(b) 的修正，在成長完 InAs 量子點之後，先以 3 nm 之 AlGaAs 覆蓋之，由於量子點表面應力分佈的緣故，此層 AlGaAs 會傾向於先覆蓋在沒有量子點的平面上，如此，便形成如圖 9(b) 的情形。電子經過量子點的路徑基本上沒有改變，而在未經過量子點的路徑上，電子會遇到 AlGaAs 層所造成的位能障，所以，便能夠將電子集中至經過量子點的路徑上。

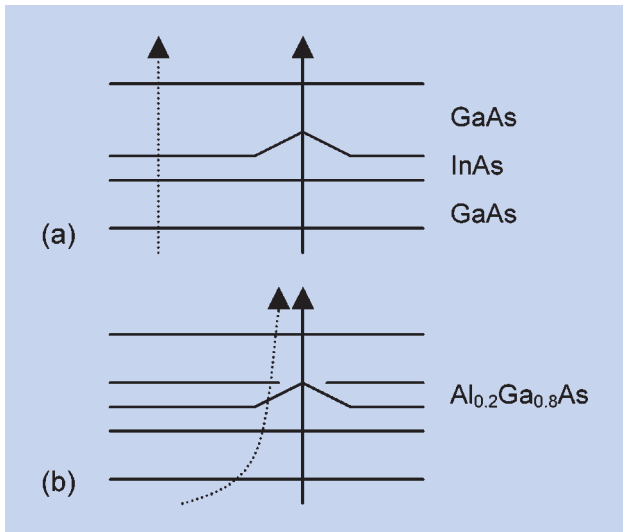
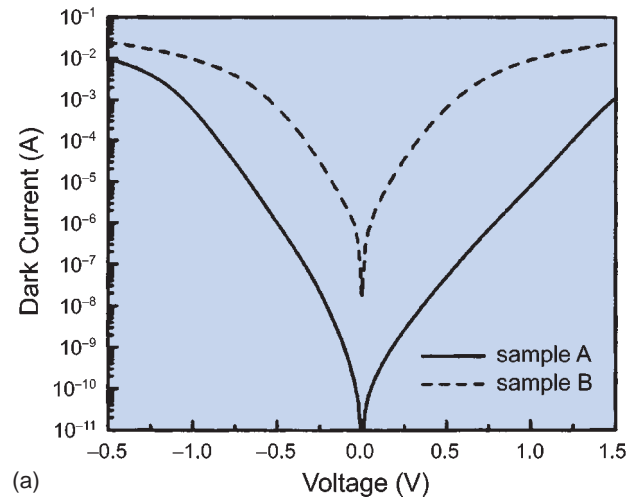


圖 9. (a) 一般覆蓋 GaAs 量子點紅外線偵測器中，電子傳輸路徑之示意圖。(b) 改良型覆蓋 AlGaAs 量子點紅外線偵測器中，電子傳輸路徑之示意圖。

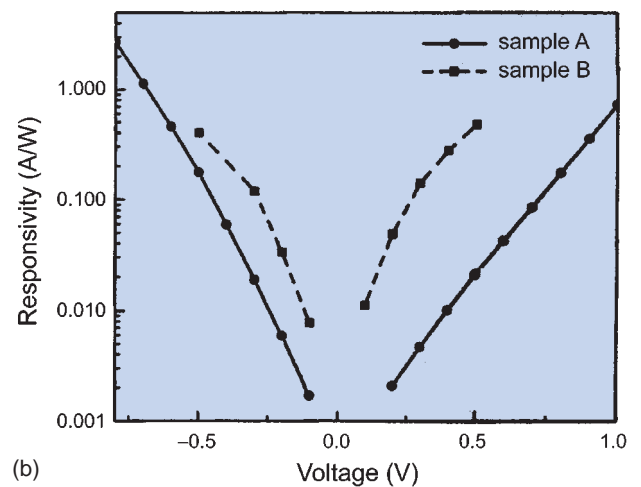
圖 10 所示為比較有 AlGaAs 覆蓋層 (樣品 A) 與僅以 GaAs 覆蓋 (樣品 B) 的元件特性比較圖。圖 10(a) 為元件溫度 77 K 之暗電流結果，可以看出利用 AlGaAs 覆蓋之元件，如我們所預期的，暗電流大幅下降，在 0.5 V 時的暗電流減少了約三個數量級。圖 10(b) 則為兩個元件感應度的量測結果，覆蓋 AlGaAs 之元件，感應度也略微下降，但是，總體元件在 77 K 的偵測度，則大幅提昇至 $2.5 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}^{1/2}$ 。此為目前所發表同類型結構量子點紅外線偵測器之最佳結果。

3. 量子點穿隧元件

雙重位能障共振穿隧 (double barriers resonant tunneling) 元件已經發展多年，其獨特之負微分電阻現象，已經用在基礎物理研究多年，也應用在許多高頻元件上。利用此結構來研究量子井中的電子穿隧及傳輸特性，也已經行之多年。近來，由於自組式量子點成長技術的成熟，利用此結構來瞭解量子點的能階與傳輸特性也廣受矚目。另外由於理論上預測，在 InAs 量子點中因 spin-orbital 交互作用，電子激態能階即使在沒有外加磁場的情形下，不同自旋電子能階仍會分離，此點提供了一個利用



(a)



(b)

圖 10. (a) 覆蓋 GaAs 與覆蓋 AlGaAs 之量子點紅外線偵測器，在 77 K 之暗電流比較圖。(b) 覆蓋 GaAs 與覆蓋 AlGaAs 之量子點紅外線偵測器，在低溫之光感應度比較圖。

量子點穿隧來製作電子自旋元件的可能性。

從目前發表在學術期刊的研究看來，製作量子點穿隧元件仍是一項困難的挑戰。目前一般所使用的結構如圖 11(a) 所示，其中量子點係嵌在 AlGaAs 或甚至 AlAs 的位能障中，雖然如此，從其光激發的結果看來，量子點放光的中心能量仍遠小於 GaAs 的能隙，顯示其電子之基態能階應仍遠在 GaAs 的傳導帶邊緣以下。換言之，由於其射極係使用 GaAs 材料，所以利用此方式來製作量子點穿隧元件，只能利用量子點尺寸的不均勻性，選取到基態能階甚高的極少數量子點作穿隧，不但增加

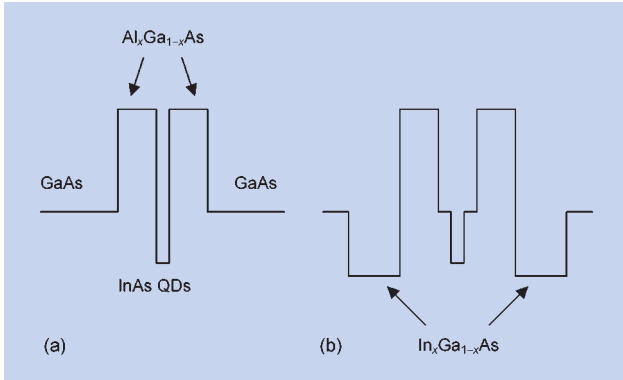


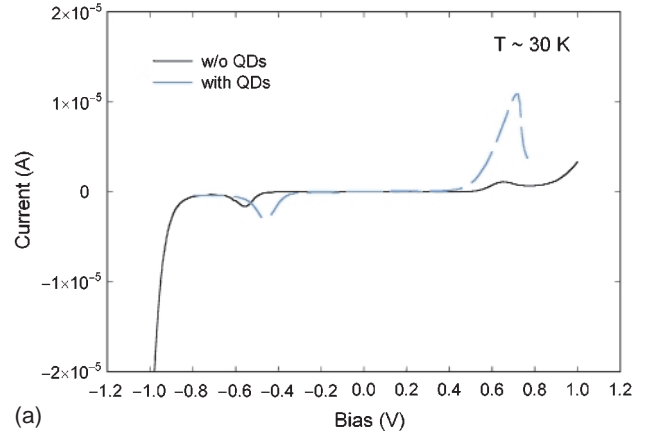
圖 11. (a) 一般量子點穿隧元件之能帶結構示意圖。(b) 改良式量子點穿隧元件之能帶結構示意圖。

理論上分析的困難與不確定性，更遑論利用此方式製作單一量子點穿隧之電子自旋元件。

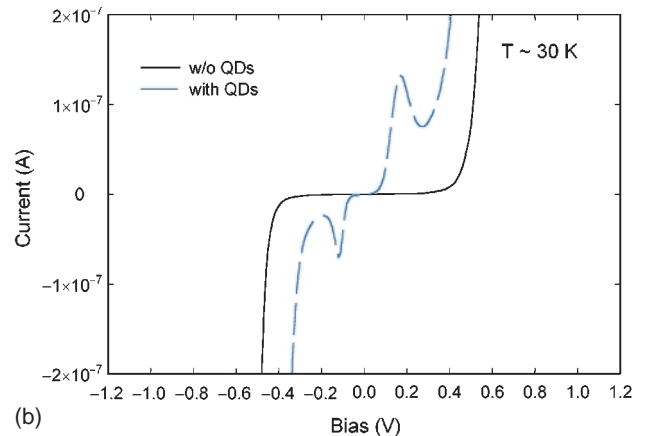
為了解決此一問題，我們利用 InGaAs 量子井作為射極，並將 InAs 量子點嵌在 GaAs 中，避免 AlGaAs 中缺陷的影響，其結構於圖 11(b) 所示。適當地調整各層厚度，便可以得到電子經由 InGaAs 量子井穿隧至 InAs 的穿隧電流。圖 12 所示為該結構做成元件後，在元件溫度約 30 K 下測得的 I-V 特性，其中元件面積為 $(120 \mu\text{m})^2$ 。為了比較，我們同時製作了一個結構相同，但是其中沒有量子點的元件。從圖 12(a) 中，可以看出在兩個結構中的特性基本上十分相似，但是如果將縱軸放大 100 倍，如圖 12(b)，便可以發現兩個結構有非常明顯的差異。沒有量子點的元件，在 $V = 0$ 附近的曲線幾乎完全水平，而嵌有量子點的元件，則有相當清楚的負微分電阻特性。這樣清楚的結果，是目前所發表的相關文獻中僅見的，如果能將元件之製作面積縮小，並將量測溫度繼續降低，應該可以用來檢測量子點的能階與傳輸特性，並發展成為電子自旋元件。

五、結語

奈米結構具有許多前所未有的物理特性，不僅是基礎研究的有趣素材，更有許多元件應用上的潛力。雖然，由於奈米結構的許多特性至今仍未十分清楚，需要更多深入的研究來釐清，另一方面，奈



(a)



(b)

圖 12. (a) 一般與改良式量子點穿隧元件在約 30 K 測得之 I-V 曲線圖。(b) 一般與改良式量子點穿隧元件在約 30 K 測得之 I-V 曲線放大圖。

米結構的製作與設計，也還有許多尚待努力的空間，但是各式各樣製作奈米結構的技術漸趨成熟，昭示著此一時代的即將到來。尤其是自組式量子點在元件應用方面的成功，為我們增添了無比的信心，相信不久的未來，會有更多令人興奮的研究成果，甚至是實際的產品出現。

參考文獻

1. L. I. Schiff, *Quantum Mechanics*, 3rd Ed., McGraw-Hill, Inc. (1975).
2. M. Sugawara, *Self-assembled InGaAs/GaAs Quantum Dots*, Academic Press (1999).
3. D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons, Inc. (1990).
4. D. L. Huffaker, G. Park, Z. Zou, O. B. Shchekin, and D. G. Deppe, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **6**, 452 (2000).
5. S. Y. Wang, S. D. Lin, H. W. Wu, and C. P. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1023 (2001).