

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告  
非可見光元件與技術之研究及其在植物生長之應用 (3/3) — 子計畫一  
： InAsSb 紅外線元件及奈米量子點結構

**InAsSb Infrared Devices and Quantum Dot Structure**

計畫編號：NSC 90-2215-E-002-014

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：李嗣涔 教授 國立臺灣大學電機工程學系

計畫參與人員：陳顯德,張議聰,蔡秋雲,林澤琦 國立臺灣大學電機工程學系

### 一、摘要

藉由原子力顯微鏡(AFM), 掃描式電子顯微鏡(SEM)及光激發光頻譜(PL)可詳細探討自我形成的砷化銻量子點的成長機制。根據砷化銻的厚度, 量子點的成長機制可分成三個階段：(1)砷化銻的厚度太薄不足以形成量子點。砷化銻會形成一層薄層, 也就是所謂的 wetting layer。(2)砷化銻的厚度足夠形成無錯位的量子點。(3)當砷化銻的厚度再增加時, 鄰近的量子點會合成一個有錯位的三維島狀物。單個量子點的形狀並不是簡單的金字塔形狀, 而是更為複雜。一個量子點至少由兩種以上的面形成。本文詳細探討有鋁砷化銻阻擋層的砷化銻/砷化銻量子點紅外線偵測器。我們在實驗中也觀察到負微分電導效應。增加阻擋層的位能障高度可以增加背景限制性能的溫度(BLIP)。採用 3 ML 量子點比採用 2.2 ML 量子點的紅外線偵測器對極化波的反應較不靈敏, 這是因為 3 ML 的量子點有較高的高度對半徑的比。在量子點下方的 wetting layer 會導致採用沒有摻雜濃度的量子點的紅外線偵測器有光伏特效應, 這是因為 wetting layer 會造成偵測器在零伏特時有不對稱的能帶圖。

### Abstract

The self-assembled InAs quantum dots (QDs) growth mechanisms are investigated by using the Atomic Force Microscopy (AFM), Scanning Electron Microscopy (SEM) and photoluminescence (PL). The growth mechanism

can be separated into three stages depending on the InAs coverage thicknesses: First, when the InAs thickness is too thin to form QDs. The sprayed InAs material forms the thin film, i.e. the wetting layer. (2) The InAs thickness is sufficient to form QDs that are free from dislocations. (3) With further increasing InAs thickness, the neighboring QDs are coalesced to form 3D islands with dislocations. The single QD's shape is not the simple pyramid-like but more complicated. There are at least two facets on the surface of QDs. The InAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors (QDIPs) with two AlGaAs barrier layers are studied. The negative differential conductance (NDC) is observed. Increasing the barrier height will improve the background limiting performance (BLIP) temperature of QDIPs. QDIP with 3 ML InAs QDs are less polarization-sensitive than that with 2.2 ML InAs QDs. It is because the aspect ratio of height to radius of 3 ML InAs QDs is higher than that of 2.2 ML InAs QDs. The photovoltaic effect of QDIPs with undoped QDs results from the wetting layers of QDs, which cause the asymmetrical band diagram at zero bias of the QDIP.

### 二、引言

紅外線光偵測器可以將紅外線輻射轉換成電子信號。量子井紅外線光偵測器焦平面陣列 (quantum well infrared photodetector focal plane array) 已然有商業化的產品出現, 然後其缺點是對於正向入射的紅外線不具有吸光的效果, 而且需要在 77K 以下的溫度來操作。但是量子

點紅外線偵測器 (quantum dot infrared photodetector, QDIP) 可以吸收正向入射的紅外線而且具有可以操作在較高的溫度下、較低的暗電流等優點，所以將研究的重點擺在量子點紅外線偵測器上面。

首先，研究並瞭解砷化銦量子點的成長與結構，然後研究兩邊擋以高能隙材料當作阻擋層的量子點紅外線偵測器的特性，量子點紅外線偵測器的寬頻響應特性也觀察到並加以解釋，不同的量子點覆蓋厚度以及量子點不參雜和不對稱參雜對紅外線偵測器產生的光壓型效應 (photo-voltaic effect) 的影響也都加以實驗並瞭解。

### 三、實驗及成果

圖一所示為單一顆 2.2 層原子層覆蓋率的砷化銦量子點的原子力顯微鏡影像。由圖中可以看出量子點結構並非半球形結構，而是由 [110] 和 [136] 等不同指向的平面所組成，而且在基板的不同指向上的剖面圖呈現不同的切面。

表一為四片不同結構的量子點紅外線偵測器樣品的結構圖及參數。其中，在量子點紅外線偵測器的兩邊成長不同高度的砷化鋁鎵 ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ) 阻擋層， $x$  分別為 (a) 0.2 和 (b) 0.3，藉由量測暗電流可以得到不同的背景限制 (background limited performance, BLIP) 操作溫度，如圖二所示，由此實驗可以得知在設計元件結構時，藉由調整砷化鋁鎵阻擋層的高度來降低暗電流，提高光電流對暗電流的比值，進而使元件可以操作在更高的溫度下。

改變元件結構中量子點的原子層覆蓋率可以得到不同波長的頻譜響應的尖峰值，如圖三所示。由圖可知，2.2 層原子層覆蓋率的量子點紅外線偵測器在零伏特電壓時就對紅外線產生響應，對於響應波長的解釋如下，其 5.3 微米的響應尖峰是電子由量子點局限能階跳到砷化鋁鎵上面的躍遷所造成，施予 -0.05 伏特的偏壓之後所產生的另一個 8.4 微米的響應尖峰則是由量子點局限能階跳到砷化鎵的傳導帶連續能階所致。

由原子力顯微鏡以及掃描式電子顯微鏡的影像可以得知 3 層原子層覆蓋率的量子點相對於 2.2 層原子層覆蓋率的量子點而言，它具有較

高的量子點高度對量子點基底半徑的比值，所以比較不會受到量子井對入射光角度所造成的光吸收選擇律的影響，因此，如圖四所示，在接近正向入射時的頻譜響應尖峰值比 2.2 層原子層覆蓋率的量子點要來得大，而且兩者都比量子井的理論計算值高上許多。

同樣地，由圖三 (b) 中，我們也觀察到元件在零伏特偏壓下就已經具有頻譜響應尖峰，這是由於砷化銦量子點成長在砷化鎵基板上的時候，原子層覆蓋率在 1.7 層之前是二維的成長，超過 1.7 層原子層之後才轉為三維的島狀量子點的成長，所以在元件的能帶圖上，量子點兩邊是呈現不對稱的狀態，由於此能帶的不對稱造成了元件在零伏特的偏壓下即具有頻譜響應尖峰，也就是光壓型效應。

### 四、結論

藉由原子力顯微鏡的量測，我們清楚地得知單一顆砷化銦量子點的形狀，在不同的基板指向上的量子點剖面圖顯示量子點具有不同的切面，量子點的外形是由不同的面所組成，而不是單純的半球形。

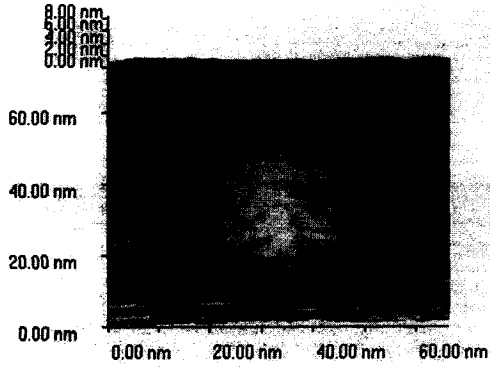
在量子點紅外線偵測器元件中，我們在最外面兩邊加上不同鋁含量的砷化鋁鎵當作阻擋層，此一阻擋層可以用來降低暗電流，調整不同的鋁含量可以得到不同的阻擋層能障高度，進而得出一個最佳值可以提高背景限制的操作溫度，使量子點紅外線偵測器操作在遠高於 77K 的操作溫度，期將來可以在室溫下操作。

接著改變量子點紅外線偵測器中砷化銦量子點的原子層覆蓋率，我們得到了不同，我們得到了不同頻譜響應的尖峰值，分別對應到量子點局限能階到砷化鋁鎵以及砷化鎵的電子能階躍遷。同時，改變紅外線的入射角度，觀察響應值與入射角度的關係，我們發現，傳統的量子井紅外線偵測器受限於量子井對紅外線吸收的選擇律，無法作紅外線的正向入射吸收，但是由於量子點是三維量子局限的結構，所以正向入射時仍有吸收，而且更由於 3 層原子層覆蓋率的量子點具有較大的高度對基底半徑的比值，所以它在接近正向入射時的尖峰響應值大於 2.2 層原子層覆蓋率的量子點，更大於量子井的理論值。

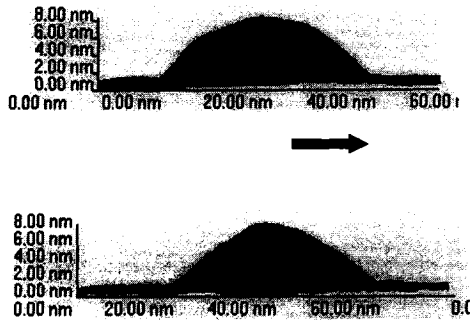
此外，由於成長砷化銦量子點在砷化鎵基板上時會先成長一層 wetting layer，導致量子點兩邊能帶結構的不對稱，因此在零伏特偏壓的時候仍舊有頻譜響應，造成元件的光壓型效應。

#### 參考文獻

- [1] S. F. Tang et al, Appl. Phys. Lett. 78, 2428 (2001).
- [2] S. Y. Lin et al., Appl. Phys. Lett. 78, 2784 (2001).
- [3] S. D. Chen et al, IEEE-Nano 2002, pp. 341 (2002)



(a)



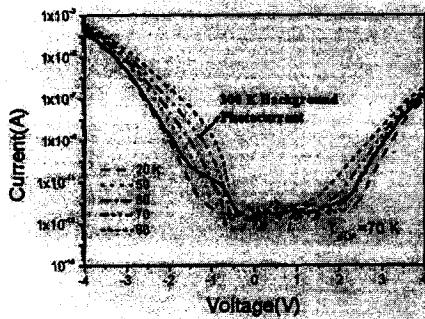
(b)

圖一 單顆砷化銦量子點的原子力顯微鏡影像。(a) 三維立體影像, (b) 上方為[01-1]指向的剖面圖, 下方為[011]指向的剖面圖。

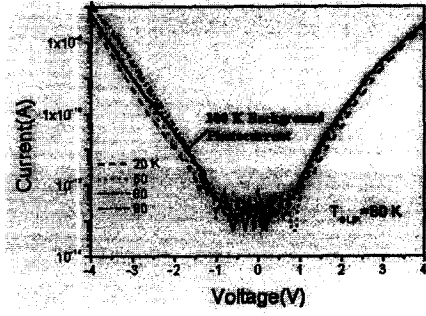
Sample	A	B	C	D
Top Contact		500 nm GaAs $n = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$		
Undoped 50 nm $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(X=)$	0.1	0.2	0.3	0.1
30 nm GaAs		Undoped		
InAs QDs Doping $= 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	3 ML	3 ML	3 ML	2.2 ML
30 nm GaAs		Undoped		
Undoped 50 nm $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(X=)$	0.1	0.2	0.3	0.1
Bottom Contact		1 $\mu\text{m}$ GaAs $n = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$		
Substrate		450 $\mu\text{m}$ Semi-insulating GaAs Substrate		

The dopant in InAs QD is Si.

表一 四片不同結構的量子點紅外線偵測器樣品的結構圖及參數。

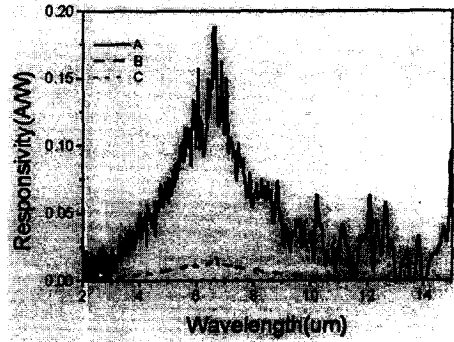


(a)

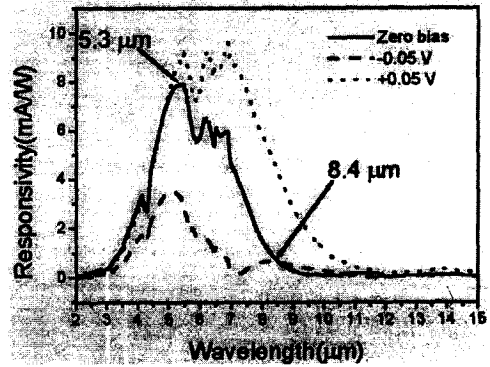


(b)

圖二 元件(a)B、(b)C之暗電流與背景限制操作溫度。

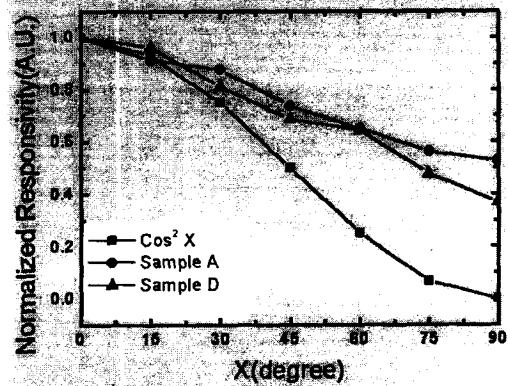


(a)



(b)

圖三 (a) 3層與 (b) 2.2層原子層覆蓋率元件之頻譜響應。



圖四 紅外線入射角度與頻譜響應強度之關係圖,  $\text{Cos}^2 X$  為量子井的理論計算值。