

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

環保及生化用紅外線光源

GaInAs 量子點光電元件

計畫編號: NSC88-2215-E-002-020

執行期限: 87/8/1~88/7/31

主持人: 李嗣涔教授 台灣大學電機系

一、中文摘要:

本年度的計畫，是利用分子束磊晶 (MBE) 技術在砷化鎵基底上，利用去年進行單層量子點結構的光電物性的分析的結果來成長多層砷化銦量子點結構。開始我們使用原子力顯微鏡 (Atomic Force Microscopy, AFM) 的量測技術來觀察單層砷化銦量子點在砷化鎵上的分佈均勻尚佳 (分佈密度 $\sim 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$)。接著以相同的磊晶條件成長二十週期、載子摻雜濃度在 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 量子點的超晶格結構，利用不同極化偏光以正向照射，進行變溫傅利葉紅外線吸收頻譜分析的研究，以此發現在多層週期性量子點結構成核時無幾何的一致性。

隨之，量測變溫的光激發光頻譜，瞭解能階躍遷時溫度會造成一定程度的影響，這些均是爾後設計量子點元件所必須考慮的。

Abstract

In the project, we have studied InAs quantum dots grown GaAs substrate by MBE. Based on the physical property about opti-electrical measurement of InAs QD

single layer, the multi-layer InAs QD superlattice structure are grown. In the beginning, We observe the well distributed uniformity with the density $\sim 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ single InAs QD layer grown on GaAs using AFM measurement. As followed, the 20-period InAs QD superlattice with a carrier concentration of $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ are grown. With different polarized light, normal incidence mode under the same temperature, it is found the absorption peak position is not obviously changed. The result is suggest non geometric regularity of the nucleation InAs QD.

The photoluminescence measurement suggest that the transition peak position and FWHM of energy band in QD are susceptible to temperature. Those overall effect must be considerable under designing QD superlattice device.

二、計畫緣由與目的

其次是以分子束磊晶 (MBE) 製作出低維半導體結構。因為一維或二維空間內的載子，其波函數受到位障

的限制，會使得能階密度發生改變。若做成光電元件，則電子電洞對波函數重疊較多，互相復合時放光之量子效率大為增加，這將會提昇元件的特性。

法國電信研究機構[1]在 GaAs 上成長不同厚度的 InAs 的表面結構，從二度空間到三度空間的轉換區間，其變溫光激放光(PL)的頻譜會有很明顯的變化。這種因磊晶層間晶格不匹配所自然形成的量子點有很高的量子效率[1-2]。本計畫首先要在砷化鎵晶片上，藉由晶格間的應力來成長砷化銦量子點，並且研製成長出品質良好的 GaAs 覆蓋層。

空氣污染的監控是環保工作的重要課題，尤其是在台灣的大都會中，利用雷達遙測、光偵測及測距技術，亦即所謂的光達技術(LIDAR, light detection and ranging)來監測大氣中之有毒成份、指標污染物、揮發性有機化合物及危險空氣污染物等。已成為勢在必行的工作[3]，如表一所列[4]，由於這些污染物的主要吸光波長皆在紅外線區，因此紅外線發光源在偵測大氣污染源的環保工作上站著極為重要的地位。

本計畫的主要目的即是要研擬開發此種紅外線光源所需的技術及材料，以期應用於環保監控系統中。

在 GaInAs/AlInAs 材料在量子井結構中有所謂的張力自補式(strain self-compensation)成長技術的發展[5,6]，量子井的能障可任意加以調整，甚至可高達 800meV。

本計畫擬將應用此種張力自補式成長技術於雷射光源的設計之中。雷射元件的基本結構將改為 PIN 二

極體，並且在 intrinsic layer 內加入多重量子井的結構，以增加發光的效率。由於我們是採用 GaInAs/AlInAs 材料系統，量子井的能障可調整得夠高，以使量子井內可容納兩個受限能階(bound states)，如此可增加發光率，又使電子有 intersubband emission 的機會[7-9]，而且所放出的光可設計在於更長(大於 3.5 μm)的波長，以補該材料系統的不足。

假如 interband transition 及 intersubband transition 兩者的發光強度可達彼此匹配程度的話，則我們所設計的光源將會是雙波段或是成為寬波段約有用光源，這也將是我們研究努力的主要目標。

三、研究方法與成果

首先是有關 InAs 量子點的成長，我們利用去年的研究成果所得砷化銦磊晶層的最佳成長條件，我們成功地在砷化鎵晶片上，成長 20 個週期的 InAs/GaAs(2.5ML) 載子摻雜濃度在 $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 每層 GaAs 厚度為 30 nm，如圖一所示。經由原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy, AFM)的量測技術，也量測到 2.5 個原子層(ML)砷化銦量子點的表面影像，高度 65Å，底寬約為 150Å，如圖二所示。

接著藉由傅利葉紅外線吸收頻譜實驗，量測從 40 K 至 200 K 下瞭解其 intersubband 的吸收波段分別為 10.8，11.8，12.9 與 14.6 μm 。我們推斷可能有四組不同體積群的量子點所造成的結果，且吸收波段從 10.8 到 14.6 μm 之間，如圖三所示，與 Pan[10]等人成長 InGaAs/GaAs 量子點週期性結構所觀察正向入射波段範圍寬有類似的

大小，而範圍的差異度(~13 到 15 μm)可能取決於 QD 與周邊涵蓋層的應力釋放程度之間的變化，與不同群組大小的變異。更進一步我們利用不同極化偏光以正向照射，進行變溫傅利葉紅外線吸收頻譜分析的研究，以此發現在多層週期性量子點結構成核時分佈確為隨機，並沒有特殊之指向，如圖四之一與之二所示。

接著我們量測砷化銻量子點超晶格結構光激發光頻譜峰值位置與 FWHM，如圖五所示。砷化銻量子點（只有背景濃度摻雜）超晶格結構變溫 10~210 K 的光激發光頻譜，從圖五中發現從 10 到 50 K，PL 頻譜峰值位置幾乎不變的[11]。這顯示激子能階侷限在固定的量子點能階上。溫度從 60 K 到 210 K 時，峰值位置會呈單調函數下降歸因於侷限能障隨溫度升高而縮減。

從圖五我們發現 PL 頻譜的 FWHM 也與溫度呈現有趣的關係。從 10 到 120 K，下降趨勢如高斯分佈線型(Gaussian shaped decrease)，是由於當此溫度區間，不顯著的量子點光激載子結合效率被抑制，造成 FWHM 變小。而在 120 到 150 K 時，因電子聲子間散射效應，造成 FWHM 增加的主因。高於 200 K 時，FWHM 陡降可歸因於熱載子極易於與鄰近量子點重新聚集(repopulate)和電子在垂直方向耦合效應 [11]。

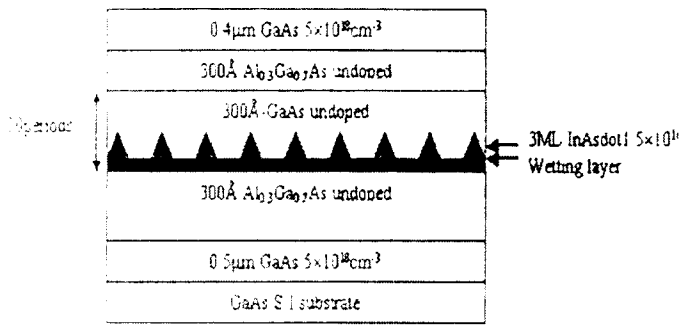
四、結果與討論

我們成功地在砷化銻晶片上，利用 20 週期超晶格結構，分別成長了 2.5 個原子層(ML)的砷化銻量子點。並利用傅利葉紅外線吸收頻譜與光激發光頻譜與溫度的關係瞭解週期性量子點

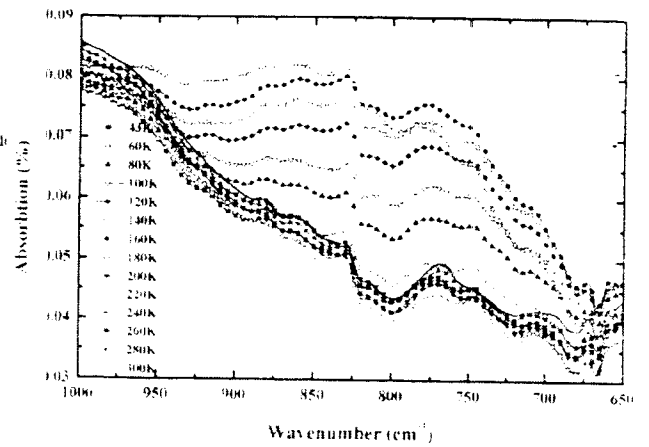
結構基本能量躍遷特性，以及與量子井元件最大的不同就是光能正向入射被此結構所吸收，這是未來製成量子點偵測元件最大的優勢。

五、參考文獻

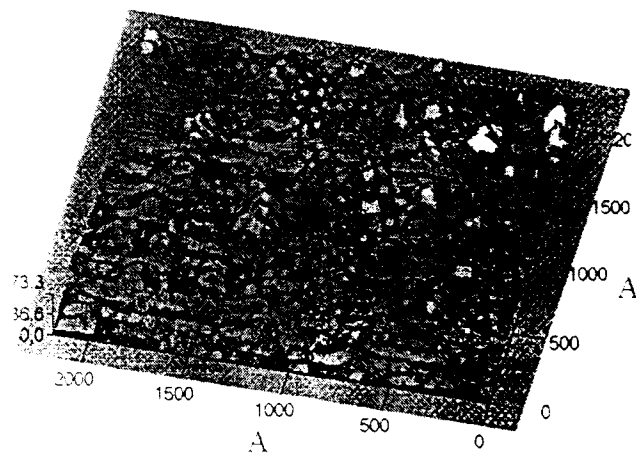
1. L. Goldstein, F. Glas, J. Y. Marzin, M. N. Charasse, and G. Leroux, *Appl. Phys. Lett.*, 1099 (1985).
2. M. Zinke-Allmang, L. C. Feldman, and S. Nakahara, *J. Vac. Sci. Technol. B6*, 1137(1988).
3. 行政院國科會光電小組所發行的『光訊第五十四期』(*Opto News & Letters*), June 1995.
4. *Compound Semiconductor*, Vol. 1, No2, Sept./Oct. 1995, p.12~p.13.
5. S.M Lord, B. Peseshki, and J.S. Harris, Jr., *Electron. Lett.* 28,1193(1992).
6. H.C. Chu, S.M. Lord, E. Martinet, M. M. Fejer, and J. S. Harris, Jr., *Appl. Phys. Lett.* 63, 364(1993).
7. M. Helm, P. England, E. Colas, F. DeRosa, and S. J. Allen, Jr., *Phys. Rev. Lett.* 63, 74(1989).
8. Perng-fei Yuh and K. L. Wang, *Appl. Phys. Lett.* 51, 1404(1987).
9. H. C. Liu, *J. Appl. Phys.* 63, 2856(1988).
10. D. Pan, Y. P. Zeng, M. Y. Kong, J. Wu, Y. Q. Zhu, C. H. Zhang, J. M. Li and C. Y. Wang, *Elec. Lett.* vol.32, no 18, 1726(1996).
11. D.I. Lubyshev, P. P. Gonzalez-Borrero, E. Marega, Jr., E. Petitprez, N. La Scala, Jr. and



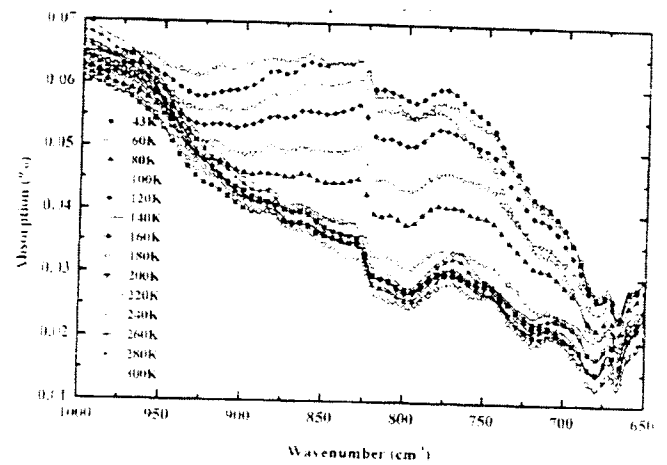
圖一、20 週期量子點超晶格結構示意圖。



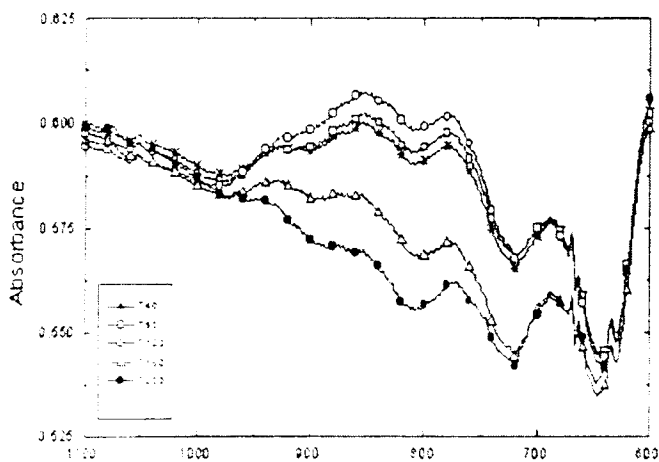
圖四之一、變溫(從 43K 到 300K)正向入射 0 度極化傅立葉紅外線吸收頻譜。

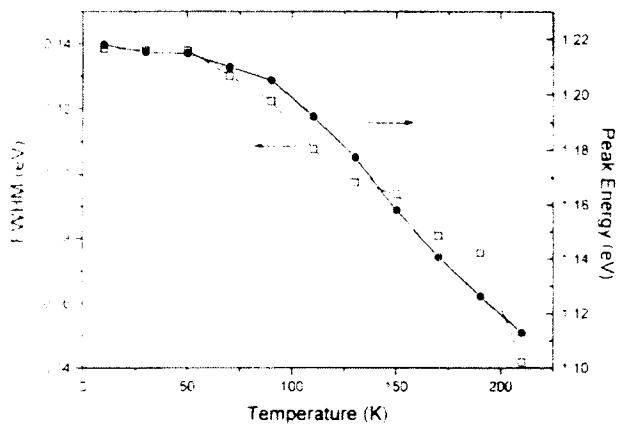


圖二、以 AFM 掃瞄之 2.5 原子層 (ML) InAs/GaAs 量子點的三維圖像。



圖四之二、變溫(從 43K 到 300K)正向入射 90 度極化傅立葉紅外線吸收頻譜。





圖五、變溫(從 10K 到 210K)之光激放光頻譜峰值位置及其 FWHM。