



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 超晶格結構之子能帶、雜質能階及生命期的研究

### Study of Subbands, Impurity States, Lifetimes in Superlattices

計畫編號：NSC 89-2112-M-002-033

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：管傑雄 執行機構及單位名稱：台灣大學電機系

計畫參與人員：徐茂傑、陳騰旭 執行機構及單位名稱：台灣大學電機系

#### 一、中文摘要

超晶格結構可改變材料的光電及傳導特性，是值得研究其物理機制且頗具應用空間的領域。目前研究重點仍大部份集中於寬能障的量子井結構；而本計畫的重點則在於薄能障的超晶格結構，尤其是其對量子井中雜質能階的影響。超晶格的子能帶不但可作為電子吸光躍遷之所而且也提供電子傳播的便捷通道；然而躍遷的重要條件之一乃是光的電場必須有分量平行超晶格的成長方向，即所謂量子井的正面入射問題。相對地，若有雜質能階的存在，則電子在雜質能階與子能帶間的躍遷並不受到此條件之限制，如此可大為改變超晶格的吸光特性。但雜質能階有可能與第一子能帶相互混合，又電子在雜質能階與第一子能帶的分佈是如何受到溫度及雜質摻雜濃度的影響，甚至電子在第二子能帶的傳播特性及其生命期是如何受到超晶格內聲子的影響等種種有趣的物理機制問題，都是我們所想要瞭解及探討的。

我們研究的方向將沿著三個主軸同時進行。第一為理論模型的建立：分別利用  $\bar{k} \cdot \bar{p}$  method 及 tight binding method 來建立所用材料的 complex band structure，然後結合 Bloch theorem 及 transfer matrix technique 來計算超晶格的能帶及所相對應的波函數；另一方面則嘗試利用此兩方法計算出雜質能階及其波函數。然後考量預估電子在子能帶間以及雜質能階與子能帶間的躍遷情形。

第二為超晶格結構樣本的實驗：基於

理論程式來設計一系列不同的超晶格結構及井中雜質摻雜濃度，以瞭解能障高度、量子井寬度以及摻雜濃度等參數與雜質能階的關係；又在不同結構中，超晶格聲子頻譜是如何改變，其與電子在高子能帶生命期的關係又如何。而所用材料系統為 GaAs / AlGaAs 或者是 GaInAs / AlInAs。

第三為量測系統的建立：我們即將設立紅外線能階分析系統、紅外線吸收光譜量測系統以及雜訊量測系統。前者乃利用紅外線穿透、外反射及內反射等不同的方式以得知樣本之子能帶、雜質能階間的躍遷情形，以及聲子的能量等參數。中者乃將樣本製作成二極體型式後，以確實量測吸收光譜，並與前者結果互相比對。後者是對樣本二極體量測光電流的雜訊，以得知電子在第二子能帶的生命期，以及第二子能帶對電子傳播的便捷性。

綜合前述三主軸的結果，我們預期可瞭解超晶格中重要的物理機制，其中子能帶與雜質能階的分離與混合所造成光電特性的改變以及電子在第二子能帶的生命期與超晶格聲子頻譜的關係。這些機制的瞭解未來可作為超晶格紅外線偵測器的研發基礎。

**關鍵詞：**量子井、超晶格、子能帶、雜質能階。

#### Abstract

The superlattice structure can be used to change the optical and transport properties of the materials. The implicit physical mechanics in the structure and related applications are worthy of investigation. Recently most of the work has been focused

on the quantum well structure which has wide barriers. However, we are interested in the superlattice structure with thinner barriers and in particular the structure effect on the impurity states in the wells. The minibands of the superlattice can not only offer the path of the optical transition for electrons but also the express channel through the structure. The important condition for the optical transition between minibands is that the incident light beam must have a nonzero component of the electric field along the growth direction of the superlattice, i.e., the problem of the normal incident beam. If there are impurity states within the wells, the transition between the states and the second miniband may not be limited by the condition. The absorption of the normal incident beam may hence increase dramatically for the superlattice with impurity states. In addition, the other related interesting subjects are the possibility of the mixture between the impurity states and the first miniband, the effect of temperature and doping density on the distribution of electrons, and the transportation property and lifetime related with the phonon scattering etc. when electrons are within the second miniband. All involving physical mechanics are necessary for us to understand..

Our primary research directions are divided into three categories. The first one is the building of the theoretical model. The k.p and tight-binding methods are used to calculate the complex band structure of the applied materials. The Bloch theorem and transfer matrix technique are then utilized to find out the band structure of the superlattice and associated wave functions. A tough effort will be applied to find the impurity states with the two methods. The final consideration is the transition rate between impurity states and minibands with the Fermi golden rule.

The second one is the experiment about the superlattice structure. Based on the

theoretical calculation, a lot of samples with different well and barrier widths, barrier height, and doping density will be tested to see the relation between the impurity states and those parameters. Besides, the observation will also be emphasized on the variation of the phonon energy spectrum versus different structures and the relation between the spectrum and the electron lifetime on the second miniband. The material systems we are going to study are GaAs/AlGaAs and GaInAs/AlInAs.

The third direction is the set-up of the measurement systems. We will build up an infrared energy-state analysis system, an infrared absorption spectrum measurement system and a noise power measurement system. The first system is used to find out the transition properties between impurity states and subbands, and the phonon energy of the sample in terms of the transmittance, external and internal reflectance etc. The second one is used to measure the absorption spectrum after the sample is fabricated into a diode. The third system can measure the photocurrent noise of the sample diode in order to find out the lifetime and transport property as electrons are in the second subband.

Combining the results of the above research directions, we expect to understand the important physical mechanics in the superlattice structure including the variation of the optical property under the situation whether the miniband and impurity states are mixed or not, and the relation of the electron lifetime and phonon energy. A good infrared superlattice photodetector will be developed in terms of the results in the future.

Keywords: R quantum well, superlattice, subband, impurity state.

## 二、緣由與目的

量子井紅外線偵測器 (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP) 是應用量子理論設計而成，且對紅外線偵測具極高的靈敏度，因而在物理界不論是學術探討或實際應用上，其最近的發展極為迅速[1-10]。選擇適當的材料，建立所需要的能障高度，利用 MBE 磊晶成長所要的厚度，如此即能控制電子所吸收光子的能量 [11]。此種 QWIP 偵測器有兩個物理機制是學理上重要的課題：它只對 TM mode 的光(即入射光必須有電場分量垂直量子井平面)有反應 [12-13]；電子在高子能帶經過多久的生命期才會重返第一子能帶，亦即所謂的 capture rate 問題 [14-18]。

為解決上述的問題，我們研究的目標有三：

1. 研究瞭解量子井及超晶格結構中，雜質能階與子能帶間躍遷相關選擇律的物理機制，其中包括聲子對 nonradiative 生命期的影響，以作為未來應用在 QWIP 上的基本物理知識。
2. 研究開發量子井相關的理論計算，以便理論與實驗結果相比對，提昇物理機制瞭解的深度。
3. 研究發展與本計畫相關物理特性的測量系統，並從實驗結果中找出重要的物理參數值，以建立相關的物理分析技術。

## 三、結果與討論：

這一年度我們主要研究的對象如圖一(a)、(b)及(c)等三個樣品。基本上三者的超晶格(superlattice)結構是相同的。它的第一子能帶是在 GaAs 導電帶上 47~51 meV，而第二子能帶是在 161~214 meV；它是用來偵測 7~11  $\mu\text{m}$  波長的紅外線。

樣品 A 及 B 的超晶格結構一側有一寬為 1500  $\text{\AA}$  的阻擋層(blocking layer)，此是

用來阻擋流經第一子能帶的暗電流。A 及 B 兩樣品的阻擋層能障高度不同；其中 A 的為 150 meV( $x=0.2$ )，而 B 的為 202 meV( $x=0.27$ )。樣品 C 前後兩側各有一阻擋層，其寬度及能障高度分別是 1500  $\text{\AA}$  及 165 meV、300  $\text{\AA}$  及 187 meV；其功用除了阻擋暗電流外，更有改變雜訊功率的作用。為了證明我們想法的正確性，特對各個樣品進行雜訊的測量。

圖二顯示是 A 及 B 兩樣品的雜訊功率對暗電流的關係圖。量測的溫度是在 77K，所謂的 forward bias 及 reversed bias 是針對阻擋層相對於超晶格結構的能障高度而言。當阻擋層受偏壓而使相對於超晶格的能障高度下降的話，是為 forward bias；反之提高的話，是為 reversed bias。在同一圖上，我們也標示出 shot noise 應有的變化趨勢。很明顯地，兩個樣品均表現出與 shot noise 一致的行為，這意味著暗電流主要是起源於穿隧效應；並非是電子有足夠的能量由第二子能帶越過能障而抵達接點。

當電子經過能障的機率  $p$  是很小的話，其雜訊所表現的行為就是 shot noise；反之，當  $p$  接近於 1 時，主要雜訊來源就是超晶格結構。但由於電子在子能帶傳導時，是屬於 coherent 的性質，預期其雜訊應該是較小的。電子穿隧能障的機率通常是甚小於 1，所以會有 shot noise 的表現。

圖三是樣品 C 的雜訊功率除以  $2eI$  對電壓的變化趨勢。測量的溫度也是 77K，而所謂的正負偏壓是針對較大的寬阻擋層而言。這顯示出兩側的阻擋層具有減低雜訊的好處。

欲解釋圖三所得的結果可以使用如圖四所示的雜訊電路模型。其中  $R_1$  及  $R_2$  分別代表著前後兩阻擋層的微分電阻，而電流源則代表著雜訊功率  $2eI$ 。由此電路可得外界所量得的雜訊總功率為

$$S_t = \frac{R_1^2 + R_2^2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot 2eI$$

由上式可以清楚地看出，總雜訊功率與  $2eI$  的比值，確實是比 1 小。實驗結果顯示，最小是可達到 0.5 左右。因此只要適當設計前後兩阻擋層，確實具有減低雜訊功率的效果。

四 圖表及註解：

|  |        |
|--|--------|
| GaAs n+ contact  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 4000 Å |
| $\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ blocking layer |        |
| Undoped  | 1500 Å |
| Superlattice layer (10x)                                   |        |
| GaAs well  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 68 Å   |
| $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ barrier        |        |
| undoped  | 35 Å   |
| GaAs bottom contact  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 5000 Å |

(a) 樣品 A

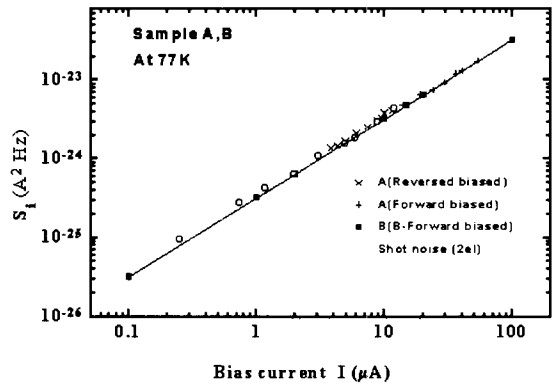
|  |        |
|--|--------|
| GaAs n+ contact  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 4000 Å |
| Superlattice layer (15x)                                   |        |
| $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ barrier        |        |
| undoped  | 35 Å   |
| GaAs well  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 65 Å   |
| $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ blocking layer |        |
| Undoped  | 1500 Å |
| GaAs bottom contact  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 5000 Å |

(b) 樣品 B

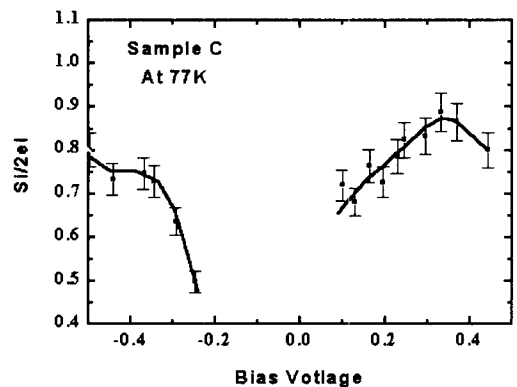
|  |        |
|--|--------|
| GaAs n+ contact  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 2000 Å |
| $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ blocking layer |        |
| Undoped  | 1500 Å |
| Superlattice layer (15x)                                   |        |
| GaAs well  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 65 Å   |
| $\text{Al}_{0.27}\text{Ga}_{0.73}\text{As}$ barrier        |        |
| undoped  | 35 Å   |
| GaAs well  |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                         | 65 Å   |
| $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ blocking layer |        |

|                                    |        |
|------------------------------------|--------|
| Undoped                            | 300 Å  |
| GaAs bottom contact                |        |
| $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ | 4000 Å |

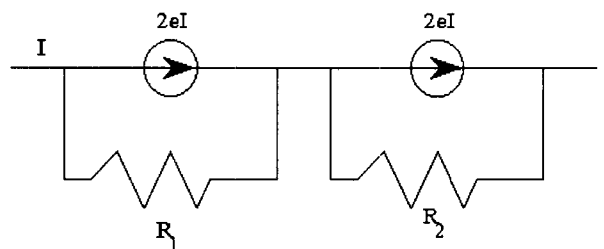
(c) 樣品 C  
圖一 樣品結構



圖二 樣品 A 及 B 的雜訊功率



圖三 樣品 C 的雜訊功率



圖四 樣品 C 的雜訊功率模型

五、計畫成果自評

在本報告中，我們量測電子經過超晶格及阻擋層時所造成的雜訊。對暗電流而言，由於電子是以穿隧的機制經過阻擋層，所以雜訊的表現是屬於 shot noise。利用前後兩阻擋層的結構是可以減低此雜訊

功率的。這項重大的發現，對於我們使用超晶格結構來製作偵測器而言，是一極大的助益。未來我們將繼續研究及量測光電流的雜訊，以作為設計偵測器之重要參考資訊。

## 六、參考文獻

- [1] B. F. Levine, C. G. Bethea, G. Hasnain, V. O. Shen, E. Pelve, R. R. Abbott and S. J. Hseih, *Appl. Phys. Lett.* 56, 851 (1990).
- [2] B. K. Janousek, M. J. Daugherty, W. L. Rosenbluth, M. J. O'Loughlin, H. Kanter, F. J. De Luccia and L. E. Perry, *J. Appl. Phys.* 67, 7608 (1990).
- [3] J. Y. Andersson and L. Lundqvist, *Appl. Phys. Lett.* 59, 857 (1991).
- [4] S. D. Gunapala, B. F. Levine, D. Ritter, R. Hamm and M. B. Panish, *Appl. Phys. Lett.* 58, 2024 (1991).
- [5] S. R. Andrews and B. A. Miller, *J. Appl. Phys.* 70, 993 (1991).
- [6] K. K. Choi, M. Dutta, P. G. Newman, M. L. Saunders and G. J. Iafrate, *Appl. Phys. Lett.* 57, 1348 (1990).
- [7] L. S. Yu and S. S. Li, *Appl. Phys. Lett.* 59, 1332 (1991).
- [8] H. Schneider, F. Fuchs, B. Dischler, J. D. Ralston and P. Koidl, *Appl. Phys. Lett.* 58, 2234 (1991).
- [9] G. Bethea, and B. F. Levine, V. O. Shen, R. R. Abbott and S. J. Hseih, *IEEE Trans. Electron. Devices* 38, 1118 (1991).
- [10] L. J. Kozlowski, G. M. Williams, G. J. Sullivan, C. W. Farley, R. J. Andersson, J. K. Chen, D. T. Cheung, W. E. Tennant and R. E. DeWames, *IEEE Trans. Electron. Devices* 38, 1124 (1991).
- [11] "The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy" edited by E. H. C. Parker, 1985, London.
- [12] L. C. West and S. J. Eglash, *Appl. Phys. Lett.* 46, 1156 (1985).
- [13] J. Y. Andersson and G. Landgren, *J. Appl. Phys.* 64, 4123 (1988).
- [14] J. Y. Tang, K. Hess, N. Holonyak, Jr, J. J. Coleman, P. D. Dapkus, *J. Appl. Phys.*, 53, 6043 (1982).
- [15] N. Ogasawara, A. Fujiwara, N. Ohgushi, S. Fukatsu, Y. Shiraki, Y. Katayama, T. Ito, *Phys. Rev.*, B42 (1990).
- [16] J. Feldmann, G. Peter, E. O. Gobel, K. Leo, H. J. Polland, K. Ploog, K. Fujiwara, T. Nakayama, *Appl. Phys. Lett.*, 51, 226 (1987).
- [17] H. Uchiki, T. Kobayashi, E. Tokunaga, *Phys. Stat. Solidi (b)* 150, 667 (1988).
- [18] D. J. Westland, D. Milailovic, J. F. Ryan, M. D. Scott, *Appl. Phys. Lett.*, 51, 590 (1987).