

## 目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
表目錄.....	xiii
Chapter 1 緒論.....	1
Chapter 2: 量子尖端接觸與量子點系統的特性.....	3
2.1 GaAs/AlGaAs 二維電子氣系統.....	3
2.2 量子尖端接觸(quantum point contact)與量子化電導.....	4
2.3 量子點系統.....	8
2.3.1 開放式量子點系統.....	11
2.3.2 封閉式量子點系統.....	13
Chapter 3: 元件製作與量測系統介紹.....	18
3.1 元件製作.....	18
3.1.1 光微影技術.....	18
3.1.2 電子束微影技術(electron-beam lithography process) .....	24
3.2 量測系統介紹.....	28
3.2.1 低溫系統.....	28
3.2.2 兩點與四點電阻量測.....	30
3.2.3 漏電流測量(leakage current measurement) .....	32
3.2.4 電性量測.....	33
Chapter 4: 實驗數據分析與討論.....	39
4.1 樣品特徵值.....	39

4.2 量子尖端接觸之電性傳輸.....	42
4.2.1 單一量子尖端接觸的電性傳輸.....	42
4.2.2 串聯量子尖端接觸的電性傳輸.....	45
4.3 量子點之電性傳輸.....	48
4.3.1 封閉式量子點之電性傳輸.....	48
4.3.2 量子點之數據分析與討論.....	54
Chapter 5:結論與未來展望.....	61
參考文獻.....	62



## 圖目錄

圖 2.1 二維電子氣系統的結構圖與能帶圖。.....	3
圖 2.2 量子尖端接觸(QPC)示意圖：在一對分離閘極上加負偏壓，使閘極下的電子被閘極產生的電場驅離(虛線部分)，形成量子尖端接觸(圖中的窄通道)。元件的長度定義為 $L$ ，寬度定義為 $W$ 。.....	5
圖 2.3 分離閘極外加電壓之位能圖。(a) $L=200\text{nm}$ ， $W=300\text{nm}$ 之金屬閘極與電場分佈圖之俯視圖。(b) $L=600\text{nm}$ ， $W=300\text{nm}$ 之金屬閘極與電場分佈圖之俯視圖。(c) $L=200\text{nm}$ ， $W=300\text{nm}$ 之金屬閘極的電場分佈立體圖。(d) $L=200\text{nm}$ ， $W=300\text{nm}$ 之金屬閘極的電場分佈立體圖。.....	6
圖 2.4 在窄通道內 $k_x$ 對 $E_n$ 的關係圖，外加的電壓 $V_{SD}$ 使兩邊的化學能不一致， $eV_{SD} = \mu_s - \mu_D$ 。電子可佔據的次能階為費米能量以下， $\mu_s$ 與 $\mu_D$ 之間的能階。.....	6
圖 2.5 電導與閘極偏壓之關係圖。圖中平坦的部分即為量子化平台(plateaus)，電導值為 $2e^2/h$ 的整數倍。.....	8
圖 2.6 金屬閘極在掃描式電子顯微鏡下的影像，白色部分為金屬閘極，分別標示為 1-6。深色部分為 2DEG 的表面。.....	9
圖 2.7 量子點內電荷與閘極電壓之關係。(a)量子點與兩邊通道的示意圖。(b)古典敘述的金屬點可視為一電容，與閘極電壓為線性關係， $Q = C_g V_g$ 。(c)在量子點內，隨著閘極電壓增加，在某些特定電壓下電荷逐一的增加，形成階梯狀關係。(d)當量子點內的電荷進出時，對應的電流對閘極電壓關係，稱為庫侖阻絕(Coulomb Blockade)。.....	10
圖 2.8 電子通過量子點的任兩種可能路徑，因為行走的路徑不同而有相位差，形成量子干涉。電導值決定於所有通過量子點的電子波函數之量子干涉結果。.....	11
圖 2.9 A. Huibers(Marcus Group)在一開放式量子點系統的電導震盪(Universal	

Conductance Fluctuations, UCF)。(a)改變閘極電壓。(b)改變垂直磁場。.....	12
圖 2.10 開放式量子點的電導值對垂直磁場之關係。.....	13
圖 2.11 封閉式量子點與源極、汲極、閘極之間的電路示意圖。.....	13
圖 2.12 庫侖阻絕震盪的能階圖。(a)量子點內第 $N+1$ 個能階沒有對準到源極與汲極的化學能之間( $eV_{sd} = \mu_s - \mu_d$ )，電子無法以穿遂的方式進入到量子點內。(b)藉由控制閘極電壓 $V_g$ ，改變量子點內的位能，使第 $N+1$ 個能階對準到源極與汲極的化學能之間，電子以穿遂的方式進出量子點。(c)通過量子點的電導對閘極電壓之曲線圖， $\Delta V_g$ 為相鄰兩個電導峰值之間的電壓差(peak spacing)。.....	15
圖 2.13 庫侖阻絕震盪(Coulomb Blockade Oscillation，CB Oscillation)電導對閘極電壓 $V_g$ 的關係圖。.....	16
圖 2.14 Coulomb Blockade peak 對溫度的關係圖。在 0.1K 的溫度下( $\Gamma < kT < \Delta < U$ )，CB peak 的高度與量子點和源極、汲極通道的耦合強度有關。溫度增加後( $(\Gamma, \Delta) < kT < U$ )，CB peak 的高度相差不多。CB peak 的寬度也隨著溫度的增加而有變寬的趨勢。.....	17
圖 3.1 光學顯微鏡下的平台結構。A 部分為平台結構(MESA)，B 部分為接點平台(ohmic contact)，C 部分為金屬閘極平台(gate)。.....	18
圖 3.2 光學顯微鏡下的金屬閘極。.....	21
圖 3.3 蒸鍍系統前視簡圖。.....	22
圖 3.4 金屬閘極在掃描式電子顯微鏡下的影像，參數設定均為 center-to-center distance : 19.49nm，line spacing : 50.67nm。(a)量子點面積 $1.0 \times 0.45 \mu\text{m}^2$ 。(b)量子點面積 $1.0 \times 0.6 \mu\text{m}^2$ 。.....	26
圖 3.5 金屬閘極在掃描式電子顯微鏡下的影像，參數設定均為 center-to-center distance : 19.49nm，line spacing : 19.49nm。(a)量子點面積 $1.0 \times 0.45 \mu\text{m}^2$ 。(b)量子點面積 $1.0 \times 0.6 \mu\text{m}^2$ 。.....	26
圖 3.6 金屬閘極在掃描式電子顯微鏡下的影像，每個圖形的局域區域的長寬分別	

為：(a) 量子點面積 $1.36 \times 1.7 \mu\text{m}^2$ , (b) 量子點面積 $1.65 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ , (c) 量子 點面積 $1.0 \times 0.45 \mu\text{m}^2$ , (d) 量子點面積 $1.0 \times 0.6 \mu\text{m}^2$ , (e) 量子點面積 $1.0 \times 0.45 \mu\text{m}^2$ 。 .....	27
圖 3.7 為 $^3\text{He}$ cryostat system 的工作簡圖。左邊是 $^3\text{He}$ 在向下凝結(condense)於 $^3\text{He}$ pot 的情形。右邊的圖是將 sorb 溫度降低後， $^3\text{He}$ 開始蒸發向上，離開 $^3\text{He}$ pot, 如此樣品座的溫度可降到 0.3K。.....	29
圖 3.8 (a)兩點(two terminal)量測電路圖 , (b)四點(four terminal)量測電路圖 。Rs 代表黃色區域的電阻值。.....	30
圖 3.9 (a)測量漏電流電路，金屬閘極加正偏壓。(b)測量漏電流電路，金屬閘極加 負偏壓。.....	32
圖 3.10 定電流源四點量測電路圖。.....	33
圖 3.11 定電壓源量測電路的簡圖。.....	34
圖 3.12 抽運閘極(pumping gate)的標示圖。圖(a)和(b)分別為不同幾何形狀的量子 點結構。 .....	35
圖 3.13 (a)在樣品座插上金屬線連接起來，測量交流訊號經過整個低溫系統的 衰減值。(b)在樣品座焊接上金屬線連接起來，測量交流訊號經過整個 低溫系統的衰減值。低溫系統內的同軸電纜線的長度約為 3 米。.....	36
圖 3.14 E8257C 訊號產生器的輸出頻率對頻譜分析儀所測量的訊號衰減值之關 係圖。 Y 軸為 spectrum analyzer 所測量的數據(圖中方形符號曲線為表 3.1 的數據, 圓形符號曲線為表 3.2 的數據), 單位為 dBm。.....	38
圖 4.1 樣品上製作的 Hall bar 結構。.....	39
圖 4.2 二維電子氣系統(樣品編號 5-70)中縱向電阻( $\rho_{xx}$ )與橫向( $\rho_{yx}$ )電阻率對磁場 變化的關係圖，量測溫度為 0.3K。可看到橫向電阻的量子平台出現的磁 場位置與縱向電阻的曲線波谷相對應。.....	40
圖 4.3 利用掃瞄式電子顯微鏡拍攝在平台結構上的量子點元件。左邊為 dot-U , 右邊為 dot-D, 元件的量子尖端接觸的寬度分別為 $0.4 \mu\text{m}$ 與 $0.37 \mu\text{m}$ 。.....	42

圖 4.4 金屬閘極在掃瞄式電子顯微鏡下放大的圖形，可以 U1U2U3U4U5 加負偏壓造成電位牆，使下層的二維電子氣影響。U5 與 U1、U4 分別間距  $0.4\mu\text{m}$ ，可形成兩 QPC。量子點結構大小為  $1.36\mu\text{m} \times 1.0\mu\text{m}$ .....43

圖 4.5 通過 QPC 的電阻對外加負偏壓( $V_g$ )的關係圖。左邊黑色曲線為 QPC1 對  $V_g$  的關係圖，右邊紅色曲線為 QPC2 對  $V_g$  的關係圖。圖中可看到當  $V_g$  約  $-0.2\text{V}$ ，電阻開始增加，表示  $V_g$  開始影響底下的 2DEG，使閘極下的電子被排開，電子由二維轉換為一維通道的現象。.....44

圖 4.6 通過 QPC 的電導對外加負偏壓( $V_g$ )的關係圖。左邊黑色曲線為 QPC1 對  $V_g$  的關係圖，右邊紅色曲線為 QPC2 對  $V_g$  的關係圖。在圖中 QPC1 可以看到約 7 個清晰的量子化平台(plateau)，在 QPC2 可看到約 5 個清晰的量子化平台(均已扣除起始電阻值)。.....44

圖 4.7 金屬閘極在掃瞄式電子顯微鏡下放大的圖形，量子點結構大小為  $1.0\mu\text{m} \times 0.6\mu\text{m}$ .....45

圖 4.8 通過 QPC 的電導對外加負偏壓( $V_g$ )的關係圖，分別各做兩次測量觀察其重複性。.....45

圖 4.9 固定 QPC1 的電導值後，改變外加在 g4 的負偏壓，測量電導對負偏壓( $V_g$ )的關係圖。我們固定 QPC1 的電導值分別為  $(2e^2/h) \times n$ ,  $n=2, 1, 0.6$ 。.....46

圖 4.10 固定進出口端 QPC1 與 QPC2 的寬度後(固定 U1、U4、U5 的電壓)，電導對外加偏壓於 U2U3 的關係圖。初始電阻分別設定在  $100\text{k}\Omega$ 、 $200\text{k}\Omega$  與  $500\text{k}\Omega$ ，可看到外加偏壓約  $-0.05\text{V}$  之後的電導值開始減小，表示閘極產生的電場開始深入二維電子氣，使閘極下的電子被排開而開始形成量子點系統。通過封閉式量子點系統的電導值約在  $0.0002 \times (2e^2/h) \sim 0.0010 \times (2e^2/h)$  的範圍之間震盪。.....48

圖 4.11 通過兩個 QPC 的初始電阻設定為  $100\text{k}\Omega$  的電導-電壓關係圖(G-V curve)。我們將 U1U4U5 外加一固定負偏壓，使兩個 QPC 的電導值均小於  $(2e^2/h)$ ，再在 U2U3 閘極上外加偏壓，測量通過量子點系統的電導-電壓關係圖。

圖中可以看到改變 U <sub>2</sub> U <sub>3</sub> 的外加偏壓，電導產生振盪現象，另一組無劇烈震盪曲線。而穩定量子點的電導值是 U <sub>2</sub> U <sub>3</sub> 外加偏壓固定下的電導對時間關係圖。.....	50
圖 4.12 通過兩個 QPC 的初始電阻設定為 200k $\Omega$ 的電導-電壓關係圖。.....	52
圖 4.13 通過兩個 QPC 的初始電阻設定為 500k $\Omega$ 的電導-電壓關係圖。.....	52
圖 4.14 固定 U <sub>1</sub> U <sub>4</sub> U <sub>5</sub> 與 U <sub>2</sub> 的偏壓，改變 U <sub>3</sub> 偏壓，測量的電導對閘極偏壓的關係圖。.....	53
圖 4.15 S. R. Patel ( Marcus group)在二維電子氣上製作的量子點結構。(a)量子點結構在 SEM 下的影像，量子點面積約 0.47 $\mu\text{m}^2$ 。(b)測量到的 Coulomb Blockade Oscillation，其中峰值間距( $\Delta V_g$ )約 6meV 的大小。.....	55
圖 4.16 溫度對 Coulomb Blockade Oscillation 的影響。測量溫度分別為(a)45mK 和(b)400mK。.....	57
圖4.17 S. R. Patel所製作的量子點結構在SEM下的影像。(a)Dot 6，量子點面積為 0.47 $\mu\text{m}^2$ 。(b) Dot 4，量子點面積為 0.34 $\mu\text{m}^2$ 。.....	59



## 表目錄

表 3.1 頻譜分析儀測量圖 3.13(a)電路的訊號衰減值。在 $50\Omega$ 匹配的系統內, Source 端輸出(-10dBm)相對於電壓 $V_{rms}$ 約 0.071volt。.....	37
表 3.2 頻譜分析儀測量圖 3.13(b)電路的訊號衰減值。.....	37
表 4.1 Umansky 團隊所提供的二維電子氣樣品(樣品編號 5-70, 5-90)的樣品特徵 值。.....	41
表4.2 不同的量子點面積大小所對應的特性參數。表中的參數依序為：量子點 面積(A) , 2DEG的深度(d) , level spacing( $\Delta = \frac{\hbar^2 \pi}{m^* A}$ ) , charging energy $(E_c = \frac{e^2}{C_{dot}})$ 與量子點內的電子數目(N)。.....	59

