

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， μ_s 與 μ_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， ΔV_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 ^3He cryostat system 的工作簡圖。左邊是 ^3He 在向下凝結(condense)於 ^3He pot 的情形。右邊的圖是將 sorb 溫度降低後， ^3He 開始蒸發向上，離開 ^3He 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(ρ_{xx})與橫向(ρ_{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 利用掃描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 金屬閘極在掃描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 -0.2V ，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 金屬閘極在掃描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 g_4 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 -0.05V 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 U2U3 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 U2U3 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 200kΩ 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 500kΩ 的電導-電壓關係圖。.....	52
圖 4.14 固定 U1U4U5 與 U2 的偏壓，改變 U3 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(ΔV_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 50Ω 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

