

目錄

| | |
|--|------|
| 中文摘要..... | i |
| 英文摘要..... | iii |
| 致謝..... | v |
| 目錄..... | vi |
| 圖目錄..... | viii |
| 表目錄..... | xv |
| 第一章 緒論..... | 1 |
| 第二章 二維電子氣系統&理論介紹..... | 4 |
| 2-1 二維電子氣系統介紹..... | 4 |
| 2-2 實驗樣品的特徵值(μ 、 n_s)..... | 5 |
| 2-3 量子化電導..... | 8 |
| 2-4 串聯形式的量子尖端接觸(QPC In series)..... | 10 |
| 2-5 抽運電流(pumping current)..... | 14 |
| 2-5-1 古典抽運..... | 14 |
| 2-5-2 量子抽運..... | 16 |
| I、開放系統(open system)..... | 17 |
| II、封閉系統(close system)..... | 18 |
| (a)封閉系統..... | 19 |
| (b)開放系統..... | 23 |
| 第三章 元件製作..... | 29 |
| 3-1 元件製作流程..... | 29 |
| 第一部份 光微影製作流程(photolithography)..... | 29 |
| 第二部份:電子束微影製作技術(ebeam lithography)..... | 31 |
| 3-2 微影技術(lithography)..... | 37 |

| | |
|---|----|
| I 光微影製程技術(photolithography)..... | 38 |
| II 電子束微影製程(E-Beam lithography process)..... | 41 |
| 3-3 濕式蝕刻(wet etching)..... | 42 |
| 3-4 熱蒸鍍技術(thermal evaporation)..... | 43 |
| 3-5 熱退火(annealing)..... | 45 |
| 3-6 低溫系統(cryostat system)..... | 46 |
| 3-7 實驗量測..... | 48 |
| 3-7-1 歐姆接點檢測..... | 48 |
| 3-7-2 漏電流檢測..... | 49 |
| 3-7-3 電性量測..... | 50 |
| (1)定電流源(AC constant current measurement)..... | 50 |
| (2)定電壓源(AC constant voltage measurement)..... | 51 |
| (3)AC 抽運電流量測(AC pumping current measurement)..... | 52 |
| 第四章 實驗結果分析與討論..... | 55 |
| 4-1 窄通道的量子化電導..... | 55 |
| 4-1-1 窄通道寬度跟平台數目的關係..... | 56 |
| 4-1-2 溫度對量子化電導平台的影響..... | 61 |
| 4-2 串聯量子尖端接觸(QPC in series)..... | 64 |
| 4-3 量子抽運電流(Quantum pumping)..... | 71 |
| 4-3-1 單一指狀閘極對二維電子氣的影響..... | 71 |
| 4-3-2 量子抽運電流量測..... | 73 |
| 第五章 結論與展望..... | 79 |
| 參考文獻..... | 80 |

圖目錄

| | | |
|--------|--|----|
| 圖 2-1 | GaAs/AlGaAs 的異質接面結構..... | 4 |
| 圖 2-2 | GaAs/AlGaAs 的異質接面剖面圖，右圖是相對應的能帶圖，左邊是各個磊晶層的位置。..... | 5 |
| 圖 2-3 | Hall bar 結構圖。量測中，磁場加的方向為垂直紙面之 Z 軸方向。..... | 6 |
| 圖 2-4 | 縱向(ρ_{xx})與橫向(ρ_{yx})電阻率對磁場變化的關係圖，量測溫度在 150mK【13】。.. | 6 |
| 圖 2-5 | 為 1988 年，van Wees 所量測得的電導量子化圖形，隨著閘極的負偏壓改變，窄通道的寬度也隨之改變，其所佔據的次能帶數也跟著改，由圖可以很清楚的看到，G 是以 $2e^2/h$ 的整數倍變化。..... | 9 |
| 圖 2-6 | L.P. Kouwenhoven, B.J. van Wees 等人實驗的元件概要圖，閘極 A 跟 B 各代表一對量子尖端接觸，兩者間隔著一直徑約 $1.5\mu m$ 的腔體 (cavity)【1】。..... | 10 |
| 圖 2-7 | (a) 樣品在加了高磁場後，電子沿著 edge state 傳輸，在腔體裡較少散射發生，此為絕熱傳輸；(b) 在不加磁場的情況下，電子通過第一個 QPC 後，在腔體中成隨機散射，此為歐姆傳輸【1】。..... | 11 |
| 圖 2-8 | 串聯 QPC 的幾何結構圖，陰影部分為 QPC，兩對 QPC 間距 L，電子由 QPC1 流向 QPC2，方向為 X 方向， μ_s, μ_d 為源極-汲極 (source-drain) 的化學位能， μ_l, μ_r 為遠離 QPC 兩端的化學位能，可視為開放端。..... | 11 |
| 圖 2-9 | D. A. Wharam 等人的實驗結構圖及量測結果。(a) 實驗結構圖，兩對閘極相距 $1\mu m$ ，閘極的線寬為 $0.3\mu m$ 。(b) 量測結果，其中曲線 a 為閘極 g2 固定負偏壓在 $-1V$ ，曲線 b 為閘極 g2 不加任何負偏壓【2】。..... | 13 |
| 圖 2-10 | (a) - (f) 古典抽運流程的示意圖。(a) - (f) 為控制三個位能障來促使電子由左往右移動的順序，形成一週期性循環。..... | 15 |
| 圖 2-11 | 電子在穩定及不穩定位障下的散射示意圖。(a) 位障為穩定的情況。(b) 震盪位障的散射示意圖。..... | 16 |
| 圖 2-12 | 開放系統示意圖。圖中的黑跟白點表示準電子-電洞對。..... | 17 |

| | | |
|------------------|--|----|
| 圖 2-13 | 封閉系統示意圖。 | 18 |
| 圖 2-14(a)(b) | 弱抽運跟強抽運的能階示意圖。 | 19 |
| 圖 2-15 | 量子點的位能概圖，電子分佈在一量子點內， μ_r 、 μ_l 為右邊跟左邊熱庫的化學位能， $V = \mu_l - \mu_r$ 。量子點內有分離的能階間距(level spacing) Δ ，charging energy， U 。圖 (a) 中， μ_r 、 μ_l 之間沒有空的能階，所以電子無法穿遂過去。圖(b)， μ_r 、 μ_l 間存在一空能階，使得電子可以躍遷進入量子點內。 | 20 |
| 圖 2-16 (a) - (d) | 抽運電流的產生流程簡圖， μ_r 、 μ_l 為右邊跟左邊熱庫的化學位能，能階 N 表示 $\mu_d(N)$ ，有 N 個電子被局域在量子點內，能階 $N+1$ 表示 $\mu_d(N+1)$ 。a-d 為 rf 循環的四個步驟，當位障降低時，電子穿遂的機率變大(實線的箭頭)，當位障升高時，電子穿遂的機率變小(虛線的箭頭)。 | 21 |
| 圖 2-17 | L.P. Kouwenhoven、A.T.Johnson 等人的實驗元件結構圖，在 F、1、2、C 等閘極外加負偏壓來形成一量子點，F-1 及 F-2 形成兩對 QPC，電流 I 流動方向如箭頭所示，rf 訊號外加至閘極 1、2，閘極 C 可以調變量子點內的量子點電位能【16】。 | 22 |
| 圖 2-18 (a) | rf 震盪頻率為 10MHz 所量得的 I - V 特性曲線，顯示出電流平台，其平台對應在 ef 的整數倍(點線所示， f 為 10MHz)，五條曲線對應不同的 V_c ，為了可以清楚分析，將其垂直位移。上方插圖為庫侖電導震盪(Coulomb conductance oscillation) vs V_c 。(b) rf 震盪頻率為 5、10 及 20MHz 所量得的 I - V 特性曲線。點線表示 ef 的整數倍(f 為 10MHz)。 | 23 |
| 圖 2-19 | 開放式量子點的外形受到外擾參數 X_1 和 X_2 影響而改變，當 X_1 和 X_2 呈週期性的變化時，便會有電流 I 產生。A、B 為量子點跟熱庫之間的量子尖端接觸【18】。 | 24 |
| 圖 2-20 | 在一震盪週期中，參數 X_1 、 X_2 在參數空間中會形成一封閉路徑。抽運電流跟封閉面積 A 有關【18】。 | 25 |
| 圖 2-21 | 元件的結構以及量測電路配置圖。紅色點標示的閘極為形成開放量子點的閘極，量子點兩邊為跟熱庫連通的一維窄通道， g_1 、 g_2 閘極用來加一相同頻率但 | |

- 有一相位差的 AC 訊號並量測量子點兩邊的電位壓降。.....26
- 圖2-22 (a) 在不同磁場下， V_{dot} 隨著相位變化量得的曲線。點為實驗上量測的結果，虛線為 $V_{dot} = A \sin \phi + A_0$ 擬和的結果。(b) 抽運電流的振幅 (amplitude) 跟頻率的關係圖，抽運電流的振幅 $\sigma(A)$ 跟抽運的頻率呈現線性關係 (linear)，其斜率約 40nV/MHz 【6】27
- 圖2-23 (a) $\sigma(A_0)$ 、 A_{ac} 的關係圖，點為量測數據，當 A_{ac} 小於 80mV ， $\sigma(A_0)$ 、 A_{ac} 的關係符合 $\sigma(A_0) \propto A_{ac}^2$ ，虛線為擬和曲線；當 A_{ac} 漸大，大於 80mV 時， $\sigma(A_0)$ 、 A_{ac} 的關係漸漸傾向 $\sigma(A_0) \propto A_{ac}^{1/2}$ ， $\sigma(A_0) \propto A_{ac}$ 的擬和曲線為實線；點線為 $\sigma(A_0) \propto A_{ac}^{1/2}$ 的擬和曲線。右下插圖顯示當 A_{ac} 變大時 (260mV)， V_{dot} 跟 ϕ 便不是正弦曲線的關係，但在 $\phi = \pi$ 時， V_{dot} 依然 = 0。(b) $\sigma(A_0)$ 跟溫度 T 的關係，虛線為 power law $\sigma(A_0) = 0.2T^{-0.9}$ 所擬和，在高溫時 (1K-5.5K)， $\sigma(A_0)$ 可以符合 power law，但小於 1K 時， $\sigma(A_0)$ 漸漸不符合 power law，而慢慢趨於飽和狀態【6】。.....28
- 圖 3-1 平台結構示意圖，此圖為光學顯微鏡下所拍攝之照片，中間矩形區域為平台結構，平台寬度約為 $200\mu\text{m}$ ，方形為接點平台。A 為主要部分，但為配合量測需要，同時預留與平台連通的歐姆接點區，為標示 B 的區域，C 為未連通的金屬閘極接點區。.....30
- 圖 3-2 金屬閘極，閘極線寬約為 $3.5\mu\text{m}$ ，四個金屬原點為定位點，在做電子束微影時，用來對準用。.....31
- 圖 3-3 (a) (b) (a) 為未改變設計圖形時的電子顯微鏡下的圖像，sg2、sg3 原應相距 $0.1\mu\text{m}$ ，由於靠近的部分較多，增加近接效應的影響，以致失敗率提高，且也影響到 sg4 的形狀。(b) 為改過後的圖形，sg1、sg2 相距 $0.1\mu\text{m}$ ，但靠近的部分較少，良率也因此有所增加。.....32
- 圖 3-4 (a) (b) 串聯分離閘極結構的影像圖分別為電子顯微鏡下 21k 及 4.2k 放大倍率。.....32

| | | |
|-------------------|--|----|
| 圖 3-5 (a) (b) (c) | (a) 為串聯閘極整體的電子顯微鏡影像圖 (b) 為左半邊分離閘極的放大圖，各閘極線寬約為 $0.4\mu\text{m}$ ，通道寬度約 $0.4\mu\text{m}$ 。(c) 為右邊單獨一對的分離閘極，sg5 和 sg6 相距約 $15\mu\text{m}$ 。 | 33 |
| 圖 3-6 | 分離閘極的電子顯微鏡圖像。四個十字為後續電子束微影所用來對準的對準點。 | 34 |
| 圖 3-7 | 絕緣層之電子顯微鏡照片。圖中黑色部份即為絕緣層，由於絕緣層無法反射二次電子束，因此在電子顯微鏡下所看到的圖像是無訊號的而呈現黑色。 | 35 |
| 圖 3-8 (a) (b) | (a) 指狀閘極的電子顯微鏡影像，放大倍率 8.5k。(b) 指狀閘極，閘極線寬約 50-70nm，間距約 120nm。 | 36 |
| 圖 3-9 | 跨線閘極的電子顯微鏡照片。 | 37 |
| 圖 3-10 | 熱蒸鍍機示意圖。 | 44 |
| 圖 3-11 | 熱退火裝置示意圖。 | 45 |
| 圖 3-12 | ^3He 低溫系統結構圖。 | 47 |
| 圖 3-13 (a) (b) | (a): 兩點量測法。(b) 四點量測法。 | 49 |
| 圖 3-14 | 漏電流檢測電路圖。(a) 閘極加正偏壓，(b) 閘極加負偏壓。 R_s 代表樣品的電阻值。 | 50 |
| 圖 3-15 | 定電流源的量測架構示意圖。 | 51 |
| 圖 3-16 | 定電壓源量測電路圖。 | 52 |
| 圖 3-17 | 低頻 AC 訊號耦合一高頻 AC 訊號示意圖。兩高頻訊號為同頻率及振幅但有一相位差 φ 。 | 52 |
| 圖 3-18 | 高頻訊號產生之儀器配接圖。 | 53 |
| 圖 3-19 | AC 抽運電流量測示意圖。加一固定負偏壓在分離閘極上使窄通道寬度固定，兩支指狀閘極加一固定頻率但有一相位差的 AC 訊號。 | 54 |
| 圖 4-1 | 各元件的電子顯微鏡影像。(a) 串聯分離閘極 I，線寬 $0.5\mu\text{m}$ ，閘極間距 $0.4\mu\text{m}$ 。(b) 雙層分離閘極，線寬 $0.5\mu\text{m}$ ，閘極間距 $0.3\mu\text{m}$ 。(c) 串聯分離閘極 II，線寬 $0.4\mu\text{m}$ ，閘極間距 $0.4\mu\text{m}$ 。 | 55 |

- 圖 4-2 樣品編號 5-70 的分離閘極 A-D 所量測到的 G-V 圖。每一條曲線代表一對分離閘極所量得的結果，可以清楚的看見量子化電導的現象，即 G 為 $2e^2/h$ 的整數倍。.....57
- 圖 4-3 樣品編號 5-98 的分離閘極 E 所量測到的 G-V 圖，扣除串聯電阻約 60Ω 。分離閘極的線寬約為 $0.5\mu\text{m}$ ，閘極間距 $0.3\mu\text{m}$ ，可以清楚看到三個量子化電導平台。.....58
- 圖 4-4 樣品編號 5-98 之分離閘極 F 所量 G-V 圖，扣除串聯電阻約 200Ω 。樣品線寬 $0.4\mu\text{m}$ ，間距 $0.4\mu\text{m}$ 。.....59
- 圖 4-5 雙層分離閘極第二次降溫所量得不同溫度下的 $G-V$ 圖。曲線作了 x 方向的平移 (offset)，以方便比較。隨著溫度的升高，量子化電導的現象漸不明顯。但 0.7 結構隨著溫度升高而更明顯。.....61
- 圖 4-6 雙層分離閘極第三次降溫下所量得的不同溫度之 $G-V$ 圖。量測溫度從 0.27K - 6.8K ，為了使數據方便分析，曲線作 x 方向平移。再次驗證出隨溫度升高，平台結構漸不明顯，且可以發現，當平台結構消失時，0.7 結構依然存在
- 【11】**62
- 圖 4-7 (a) (b) (c) 不同串聯形式的分離閘極電子顯微鏡影像。(a) 樣品編號 5-70 所製作的分離閘極，每對閘極相距約 $20\mu\text{m}$ ，閘極線寬 $0.5\mu\text{m}$ ，間距 $0.4\mu\text{m}$ 。(b) 樣品編號 5-70 製作的串聯形式分離閘極其中 $L_{\text{sg}2\text{-sg}3} : 1.0\mu\text{m}$ ， $L_{\text{sg}3\text{-sg}4} : 0.8\mu\text{m}$ ， $L_{\text{sg}4\text{-sg}5} : 1.1\mu\text{m}$ 。(c) 為以樣品編號 5-98 所製作的串聯形式分離閘極， $L_{\text{sg}1\text{-sg}2} : 0.5\mu\text{m}$ ， $L_{\text{sg}2\text{-sg}3} : 0.9\mu\text{m}$ ， $L_{\text{sg}3\text{-sg}4} : 0.7\mu\text{m}$ ， $L_{\text{sg}4\text{-sg}5} : 1.1\mu\text{m}$ 。.....65
- 圖 4-8 串連 QPC 量測示意圖。外加負偏壓 V_2 固定 QPC2 在特定的次能帶上，量測 QPC1 的 $G-V$ 曲線。.....65
- 圖 4-9 樣品 5-70，L 相距 $0.8\mu\text{m}$ 所量到的串聯 QPC $G-V$ 圖。
- 右圖：未扣掉 QPC2 電阻值的 $G-V$ 曲線， $G = I/R_{I2}$ 。以負偏壓固定 QPC2 在不同的特定次能帶上 (n 從 0.9 到 6)。
- 左圖：扣掉 QPC2 所貢獻電阻值後的 $G-V$ 曲線。 $G = 1/(1/G_1 - 1/G_2)$ ，曲線有經過 x

| | |
|--|----|
| 方向平移以利比較。..... | 67 |
| 圖 4-10 樣品 5-70，L 相距 $2.9\mu\text{m}$ 所量到的串聯 QPCG-V 圖。 | |
| 右圖：未扣掉 QPC2 電阻值的 $G-V$ 曲線， $G=I/R_{I2}$ 。以負偏壓固定 QPC2 在不同的特定次能帶上（n 從 0.8 到 5）。 | |
| 左圖：扣掉 QPC2 所貢獻電阻值後的 $G-V$ 曲線， $G=1/(1/G-1/G_2)$ 。..... | 68 |
| 圖 4-11 樣品 5-70，L 相距約 $20\mu\text{m}$ 所量到的串聯 QPCG-V 圖。 | |
| 右圖：未扣掉 QPC2 電阻值的 $G-V$ 曲線， $G=I/R_{I2}$ 。以負偏壓固定 QPC2 在不同的特定次能帶上（n 從 0.7 到 13）。 | |
| 左圖：扣掉 QPC2 所貢獻電阻值後的 $G-V$ 曲線， $G=1/(1/G-1/G_2)$ 。曲線經過平移已方便比較，可以清楚看出 QPC2 幾乎不影響 QPC1，即使 QPC2 的 n 值限制在 <1 的地方，QPC1 依然有平台結構。..... | 69 |
| 圖 4-12 固定 $N=2$ ，不同距離（L）下 QPC1 的 $G-V$ 曲線圖。由圖可以看出，隨著 L 變大，電子傳輸屬於歐姆性質；當 L 距離近時，電子是屬於絕熱傳輸。..... | 70 |
| 圖 4-13 固定 $N=2$ ，不同距離（L）下 QPC1 的 $G-V$ 曲線圖。當 QPC 距離近且其中一對的 n 值限制在 <1 的地方時，此時量子化電導便不存在。..... | 70 |
| 圖 4-14 雙層分離閘極電子顯微鏡影像。分離閘極跟指狀閘極中間隔一層絕緣層，厚度約 $800-900\text{\AA}$ ，分離閘極的線寬約 $0.5\mu\text{m}$ ，中間間距 $0.3\mu\text{m}$ 。指狀閘極線寬約 60nm ，兩支指狀閘極間距約 $0.1\mu\text{m}$ 。..... | 71 |
| 圖 4-15 分離閘極與指狀閘極外加負偏壓之示意圖。分離閘極為固定負偏壓，指狀閘極 FG1 負偏壓逐漸增加，漸將通道封閉，虛線跟實線分別表示分離閘極跟指狀閘極的限制位能形式。電流流向為 x 方向。..... | 72 |
| 圖 4-16 固定分離閘極負偏壓，使窄通道存在兩個次能帶（ $n=2$ ），分別對指狀閘極（ $Fg1\&Fg2$ ）增加負偏壓，如預期的，可以看到兩個平台結構。..... | 73 |
| 圖 4-17 固定樣品電阻值在 $4.4\text{k}\Omega$ ，不同頻率下，量得的 $V_{\text{DC}}-\phi$ 關係圖，頻率範圍從 2.5MHz 到 12MHz 。..... | 74 |
| 圖 4-18 抽運強度的標準差 $\sigma(A_0)$ 跟頻率的關係圖。樣品電阻值固定在 $4.4\text{k}\Omega$ （ $n=3$ ）， | |

$V_{p,p}=40\text{mV}$ ，紅線為擬和線，抽運強度的標準差跟頻率為 $\sigma(A_0) \propto f^4$ 。.....75

圖 4-19 固定樣品電阻值在 $8.6\text{k}\Omega$ ($n=1.5$)，不同頻率下，量得的 $V_{\text{DC}}-\phi$ 關係圖。頻率範圍從 5MHz 到 12MHz ，可以發現， V_{DC} 跟相位震盪成正弦曲線的關係，隨著頻率越高， V_{DC} 越大。.....76

圖 4-20 抽運強度的標準差 $\sigma(A_0)$ 跟頻率的關係圖。(a) 樣品電阻值固定在 $4.4\text{k}\Omega$ ， $V_{p,p}=40\text{mV}$ (b) 樣品電阻值固定在 $8.6\text{k}\Omega$ ($n=1.5$)， $V_{p,p}=40\text{mV}$ 。.....76

圖 4-21 樣品電阻固定在 $4.4\text{k}\Omega$ 以及 $8.6\text{k}\Omega$ 時的標準差 $\sigma(A_0)(\mu\text{V})$ 跟頻率的關係圖。...77



表目錄

表 2-1 Umansky 團隊所提供的樣品，在我們實驗室所量得的樣品特徵值。.....7

