## [研究新領域報導]

## 單電子電晶體的進展與應用

自從電晶體發明以來逐年的減少尺寸大小 與增快調變速度已成為既定的目標,電晶體如此 快的革新腳步不僅帶動半導體產業發展,更加速 資訊、通訊等相關產業蓬勃發展。而且令人不可 思議的是主導大多數位應用發展的竟是單一種 半導體元件-場效電晶體(FET)。但是當元件尺 寸持續的縮小進而達到奈米尺度,量子效應對元 件的操作上更顯得重要,因此設計概念創新的電 晶體元件有其必要性與急迫性。此外由於現今製 程技術已經可以整合數百萬個電晶體於單一晶 片上,但隨之而來的消耗功率所產生的熱能則是 相當棘手的問題。而單電子電晶體則是令人相當 期待的嶄新電子元件,主要的優點是消耗功率低 及非常高的電荷靈敏度,雖然並不能完全取代傳 統的場效電晶體但卻能在偵測器、邏輯電路及量 子電腦等領域扮演相當重要的角色。

單電子電晶體(Single Electron Transistor, 簡 稱 SET)是一種有源極(source), 汲極(drain)及閘 極(gate)的三極體。它與一般的場效應電晶體 (FET)同樣的是可經由閘極電壓形成的電場控制 源、汲極間的電流,但是在 SET 內一次只能通 過一個電子,這與在 FET 內一次能有成千上萬 個電子同時流動是截然不同的。SET 主要是由一 個尺寸小於數百奈米的中央島(island)透過二個 可讓電子穿透的微小接合(tunnel junction)連結至 電極所構成的。由於中央島的尺寸極小,把一個 電子放進這個島中會把這個島的電位能提高  $E_{C}=e^{2}/2C_{\Sigma}$ 的大小,這裏的 $C_{\Sigma}$ 是指中央島所看到 的所有電容量的總合。爲了要讓一個電子進入這 個島須要付出這個能量,所以在很小的偏壓下電 子是進不去的,這個現象就稱為庫倫阻斷 (Coulomb blockade),也就是一個有電壓但無電 流的狀態。如果把偏壓固定在於一個小偏壓 (V<2E<sub>C</sub>/e)時,改變閘極電壓可控制電晶體的電流 作调期震盪,每一個震盪代表中央島的電子個數 中央研究院物理研究所 吳憲昌 陳啓東

增加或減少一個。我們可以把以上所提到的庫倫 阻斷與庫倫震盪的兩種現象統稱為電荷效應 (charging effect)。這是單電子電子元件(single electronics)所應表現的兩大特徵,有關這方面的 詳細敘述請參考文獻[1]。由於它特殊的結構提供 凝態物理新的研究領域,並且 SET 應用方向對 未來電子元件發展扮演相當關鍵的地位,因此本 文將簡介 SET 的進展與應用相關的研究。

提高 SET 工作溫度是目前最主要的研究課 題,因爲唯有能在室溫操作的 SET 才有應用的 價值。溫度會造成二種效應,一是熱能會幫助電 子穿透而模糊了庫倫阻斷的特性,另一種是會造 成多餘電子數 n 的熱波動(thermal fluctuation)。 以往的 SET 必須在低溫下操作,但不像超導元 件,SET 的工作温度是沒有上限的,只要中央島 夠小,使其電容量達到  $E_C >> k_B T$  的條件即可。 現今的奈米製程技術雖然還無法達到如此小的 尺寸但是由於矽材料可以藉由氧化、蝕刻等製程 技術使得這個目標得以完成。日本 NTT 團隊在 SOI Wafer (Silicon on Insulator)基板上,利用電子 束微影技術定義出奈米矽線並且採用 patterndependent oxidation (PADOX)方法製做出室溫矽 單電子電晶體。圖一(a)為元件結構示意圖,(b) 爲變溫條件下電流對閘極電壓圖可以明顯看出 直到室溫仍保有 SET 特性,這個研究工作主要 是利用不同形狀氧化速率不同因而能定義出中 央島與微小接合(tunnel junction),並且能藉由氧 化過程縮小尺寸因而能達成室溫 SET 的目標, 此外因為 SET 製作於 SOI 基板上能整合於現今 超大型積體電路更增加其優勢[2-4]。

NTT 團隊在室溫 SET 的研究獲得突破,使 得更專注於 SET 邏輯電路的發展。過去的 SET 邏輯電路往往設計去取代現今 MOSFET 架構, 例如文獻[5],但是並沒有充分利用 SET 的優點 及特性,例如 SET 邏輯電路仍需要相同的數量



## 圖一 (a)為元件結構示意圖,(b)為變溫條件下 SET 元件電導對閘極電壓圖

的電晶體並未創造新的功能性。但是 NTT 團隊 利用多閘極 SET 完成 exclusive-OR gate (XOR gate)功能[6],完全是利用 SET 基本特性:"庫倫震 盪"即藉由閘極電壓調變中央島內化學位能以致 於源-汲極電流產生震盪變化,圖二(a)為元件結 構示意圖。Exclusive-OR gate 主要的工作原理簡 述如下:利用多閘極調變中央島內化學位能以致 於能使源-汲極電流(Ia)隨閘極改變產生震盪。主 要的原因是施加於多個閘極上的電壓(Vini)產生 感應電荷去影響中央島內化學位能,而感應電荷 量為  $V_{ini} \times C_{gi}$ , 當  $V_{ini}C_{gi}/e$  為整數時因為庫倫阻 斷所以源-汲極電流(I<sub>d</sub>)為最小,反之若為半整數 則 I<sub>d</sub> 最大,其結果顯示於圖二(b)。利用這個效 應,當每個閘極的電容都假設為 Cg 且施加於每 個閘極電壓都為 e/2Cg時,若閘極數目為偶數則 電流在最低狀態(Low state),若為奇數則電流在 高的狀態(High state)。論文中主要是研究兩個閘 極,當其中一閘極施加 Vin 另一閘極為 0 時,因 為閘極為奇數所以在 High state,若兩個閘極都 施加 Vin 時因爲閘極數目爲偶數所以在 Low





state。這樣的操作模式剛好就是大家所熟悉的 XOR gate。

偵測巨觀機械震盪器的量子效應是科學家 長期的目標,在量子力學裡震盪器位置的測量最 後的極限即是"Zero-point motion "fluctuations。 若能發展具有測量位移具有量子極限靈敏的偵 測器將會有相當大的應用價值。主要應用是可以 精密偵測微弱力的變化且能轉換成位移量。而單 電子電晶體就具備有量子極限的靈敏度。加州大 學 Santa barbara 分校物理系團隊,於自然雜誌發 表利用 SET 當作位移感測器[7]。研究中對一個 共振頻率為 116-MHz 機械震盪器於溫度 30mK 時利用 SET 當作位移感測器目靈敏度可以達到2 ×10<sup>-15</sup>mHz<sup>-1/2</sup>。由於 SET 是最靈敏的靜電計,所 展現的靈敏度高於 10<sup>-5</sup>eHz<sup>-1/2</sup>,所以對電荷非常 靈敏。利用此特性當奈米機械震盪器所產生微小 的位移量可以藉由電容耦合加以偵測。由圖三可 以瞭解整個實驗的架構,圖三(a)為奈米位移偵測 器之電子顯微鏡圖,它包含兩個部分:SET 和奈 米震盪器(Beam)。另外圖三(b)為等效電路示意 圖,由圖可知奈米震盪器上施加一交流偏壓  $V_{beam}$ ,而 SET 與奈米震盪器之間的電容為 C, 產生耦合的電荷為  $q=V_{beam}C \circ$  當奈米震盪器往 X 方向晃動時會改變 SET 與奈米震盪器之間的電 容量產生一個微小的電容改變量△C,因此兩者 之間的耦合電荷變為△q=V<sub>beam</sub>△C∘而 SET 對微 小電荷改變有極高的靈敏度,當電荷改變會劇烈 改變源-汲極之間電流,因此能當作位移感測器



圖三 (a)奈米位移偵測器之電子顯微鏡圖,它包 含兩個部分:SET 和奈米震盪器(Beam) (b)為等效電路示意圖

並具有非常好的靈敏度。SET 不只能當位移感測器,也能當作光子偵測器,這主要是利用光子發射進偵測器會產生電荷變化因而造成庫倫震盪曲線移動,只要固定某一個閘極電壓,當光子入射進偵測器時,記錄偏移量即可得知光子數量。 礙於篇幅無法詳細介紹研究論文,請讀者自行參考文獻[8、9]。

由於 SET 特殊的結構可以探討量子力學內 最基礎的問題,研究電子在微小結構中之傳導機 制因此提供凝態物理新的研究領域,以往的研究 著重於超導 SET 例如研究一個超導微粒中電子 個數的奇偶數的問題,但是由於自旋電子學蓬勃 發展,磁性 SET 相當引人注意。圖四為磁性與 超導結合之鈷/鋁/鈷 SET 元件結構圖,主要是利 用電子束微影技術結合雙角度蒸鍍製作而成。磁 性結合超導之 SET 元件中,鋁超導奈米島受到 電子自旋不平衡而造成超導導電性被壓抑。藉由 此種結構之 SET 可以瞭解奈米尺度超導與磁性 之交互作用,進而能控制超導導電性。此外能更 清楚奈米磁區所表現出自旋翻轉機制與弛豫時 間,這對我們發展自旋奈米電子元件是相當有用 的資訊,詳細討論請參考文獻[10]。

由於 SET 具有量子極限的靈敏度,所以不 只可以當作偵測器,還可以作為固態量子電腦的 讀取元件。過去幾年間科學家對量子電腦的實現 充滿極大興趣,量子電腦的基本單元為量子位元 (quantum bit),量子位元的成立條件是可以做任 意方式疊加(superposition)的雙能階系統(twolevel system)。所謂的疊加正是古典位元和量子



<sup>動四 動/站/站車電子電晶體と原子刀組成現点 片</sup>

位元的差異處,我們可以利用 W 形位能阱模型 來描述。想像一質點放置於 W 形位能阱中。在 古典物理中,該質點可以在左或右兩個谷底獲得 穩定狀態,但僅能存在左或右兩個位能井中的一 個,我們將這兩個狀態記為 lo>和 l1>。然而相同 的模型在考慮量子現象時,必須考慮質點能夠穿 隧中央位能障壁的事實。假設在中央位能障壁無 限高的情況下,系統在左邊和右邊位阱各有一量 子狀態。當中央位能障壁降低時,質點開始能夠 穿隧中央位能障壁。因此眞正的物理狀態無法區 分爲單純的 lo>或 l1>,而可能是 lo>和 l1>的任意疊 加態。要進一步進行量子計算則必須同時控制多 個量子位元,利用彼此之間耦合形成纏繞態 (entangled states),來展示邏輯運算。

由於有較長的同調時間,量子電腦在光學系 統方面的實驗是比在固態系統方面更爲成熟。但 最近在超導量子系統中有關量子電腦的研究也 逐漸獲得重視,在超導單電子箱(Cooper pair box,可視為一個零偏壓的超導 SET 的中央島) 中,上述的雙能階系統可視為箱中電荷數為 0> 或<sup>1</sup>)的兩種狀態。在超導量子位元中,如何去 讀取這兩種狀態是非常重要的工作,最容易可以 想到的作法,就是利用超導單電子電晶體來量測 電荷位元[11]。如果以直流技術操作超導 SET 它 偵測電荷的速度會被 SET 的阻抗決定。而單電 子電晶體的阻抗則有先天的限制。要能夠具有電 荷效應,約瑟芬接面的電阻不能太低,必須至少 和電阻量子的數量級等同。電阻量子的的大小為 6.5kΩ。因此一個好的單電子電晶體至少有 10~100 kΩ的電阻。在實際一般的低溫量測系統 中,接線的電容可以達到 nF 的大小,這使得單 電子電晶體的工作速度僅能達到 kHz 的程度。要 提高 SET 偵測器的工作速度,可以利用不同的 方向來思考。就單電子電晶體而言,直接的電性 量測速度很慢。如果我們設計一個包含單電子電 晶體的高頻共振腔,那麼單電子電晶體的阻抗變 化應該會改變高頻共振腔的共振頻率。如果我們 能夠設計共振腔的共振頻率達到微波頻率,便可 以運用微波技術將單電子電晶體的量測速度提 高到微波頻率。這樣的觀念做出來的偵測器稱為 高頻單電子電晶體(RF-SET)[12],它實際上已經 成為一種的高速量子位元的讀取裝置。

單電子電晶體開創起了一個完全新的研究 領域,讓我們能用一個巨觀的系統觀測並控制單 一個電子的行動。雖然發展的時間並不長久,但 是不論在基礎研究或應用領域都有突破性的進 展。因此,在這個要求體積小、消耗功率小的電 子元件的時代,SET 更有可能是 21 世紀新一代 的奈米電子元件。

## 參考文獻

[1] H. D. Jensen and J. M. Martinis, Phys. Rev. B,

**46**, 13407 (1992).

- [2] Y. Takahashi et al, *Electronics. Lett.*, **31**, 136 (1995).
- [3] Y. Takahashi et al, *IEEE transactions on Electron Device*, **43**, 1213 (1996).
- [4] Y. Takahashi et al, Jpn. J .Appl. Phys, 37, 3257 (1998).
- [5] J. R. Tucker, J. Appl. Phys, 72, 4399, (1992)
- [6] Y. Takahashi et al, *Applied Physics Letters*, 76, 637 (2000).
- [7] R. G. Knobel and A. N. Cleland, *Nature*, 424, 291 (2003).
- [8] S. Komiyama et al, *Nature*, **403**, 405 (2000).
- [9] O. Astafiev et al, *Applied Physics Letters*, 80, 4250 (2002).
- [10] C. D. Chen, et al, *Physical Review Letters*, **88**, 047004, (2002).
- [11] M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, *Nature*, 406, 1039 (2000).
- [12] A. Aassime et al., *Phys. Rev. Lett.*, **86**, 3376 (2001).