

單電子電晶體－奈米科技的應用

國立暨南國際大學電機工程學系

吳幼麟副教授

ylwu@ncnu.edu.tw

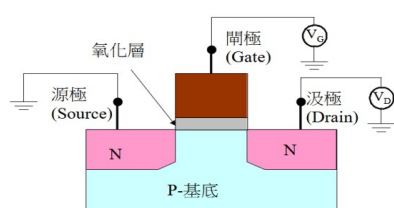
奈米科技的應用範圍非常廣泛，它包括了生物、電機、光學、化工及材料各方面。近來，由於許多奈米科技的應用陸陸續續的被發展出來，使得奈米科技變得十分熱門。所謂奈米（nanometer）是指十億分之一公尺，而奈米科技，簡言之就是極微小化的科技。在傳統的器械或元件製造方式當中，是將矽、鋼鐵或木材切割、研磨成各種形狀，愈做愈小；使用傳統的方式，畢竟有其物理的極限。而奈米科技的概念，則是從物質的最基本單位－原子和分子層次的操控物質，進而組合出極其微小的新材料和新元件。當尺寸小到奈米等級，元件或材料會展現新的特性與現象，並將會對現有技術產生革命的改變。因此，奈米科技不僅是最尖端的科技，也是最尖端的思考，當人類可以操控原子、分子時，理論上就能做出任何東西，甚至「操控」生命，下指令要生物按照人類的意旨運轉。由於奈米科技涵蓋甚廣，無法以一短文盡述，本文僅就奈米科技應用於電機工程中的一種－單電子電晶體(Single Electron Transistor)做一介紹。

自從 1947 年電晶體被發明以後，電晶體製作的技術便不斷的被改進，在幾十年間從早期的單個(discrete)電晶體到積體電路，甚至到今日所謂的超大型積體電路(Ultra Large Scaled Integrated Circuit, ULSI)。以現今的積體電路製作技術，積體電路的廠商已可以在一塊小小的矽晶片中放入近十億顆的電晶體，並使其操作的頻率高達 1 GHz 以上。在矽晶片中的電晶體的最小線寬已從前幾年的 0.25 微米縮小到 0.13 微米，而為了要能在矽晶片中放入更多個電晶體，更有積體電路的廠商及研究學者嘗試朝向 0.1 微米甚至更小的線寬邁進。

但是矽晶片本身有其物理極限，當半導體技術進入 0.13 微米製程以下時，製程技術會遇到瓶頸，於是自然而然的便有這樣的問題產生了：到底電晶體的尺寸可以縮小到多小？現有的半導體製程技術是否仍然可以使用？可以使電晶體的大小縮小到只有幾個原子或是單一個分子的大小嗎？當電晶體的大小接近原子或分子的大小時，是不是電晶體的工作特性就必需從量子效應(Quantum Effect)來加以考慮了呢？事實上，為了尋求上述問題的答案，研究學者已經製作出完全是利用電子的量子特性來工作的電晶體－單電子電晶體，它利用了量子效應中的穿隧(tunneling)來控制並量測單一電子。單電子電晶體的特性是與傳統電晶體的特性完全不同，本文便是針對單電子電晶體作一個初步的介紹。

為了要瞭解單電子電晶體與傳統電晶體的不同，我們先介紹傳統電晶體的工

作原理。目前，在積體電路中最常使用的電晶體是金屬－氧化物－半導體場效應電晶體(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)，它的基本構造如圖一所示。它是在P型的矽基底中植入兩個N型的區域分別作為電晶體的源極(source)及汲極(drain)，源極及汲極中間的區域是電晶體的通道(channel)。通道的上方則是一層絕緣的氧化層，氧化層上方則是金屬(有時是多晶矽以改善電晶體的可靠度)閘極。通常源極是接地的，汲極則加上一個電壓 V_D 。當閘極電壓 V_G 為零時，由於通道中沒有可移動的電子，因此即使源極及汲極間加有電壓，通道中並無電流流過。但是，當閘極加上一個正電壓時，則 V_G 透過氧化層會從源極及汲極吸引電子並累積在氧化層下方的通道中。汲極電壓 V_D 將吸引電子而使源極-通道-汲極間形成電流，此源極及汲極間的電流大小可以由所加的閘極電壓 V_G 的大小來加以控制。我們可以看到此處金屬-氧化物-半導體場效應電晶體的工作幾乎完全不需考慮到量子效應。但是，當電晶體的通道寬度小到差不多等於一個電子的波長(~100 奈米，也就是 0.1 微米)時，電晶體的行為便會因為電子及原子的量子效應而有所不同。此時，電子不能再被視為粒子而應以波的特性來看待。由於通道的寬度與電子的波長接近，些許原子的不規則(disorder)都會影響通過通道的電子。因此，若想縮小電晶體通道尺寸至原子或分子的大小時，勢必必須同時對電晶體的原子結構能夠加以改善(特別是通道與氧化層介面)，就製作的技術而言這並不容易達成。

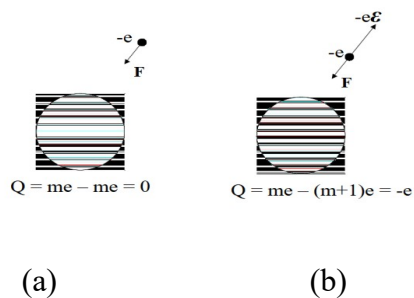


圖一、傳統金屬－氧化物－半導體場效應電晶體構造。

研究學者為了避開製作技術的限制，轉而尋求能同樣達到電晶體功能之新的物理原理。單電子電晶體的原理便是在這樣的一個情況下，於 1985 年被莫斯科大學的 Dimitri Averin 及 Konstantin Likharev 所提出來的。事實上，早在十九世紀初 Millikan 的油滴實驗便是操控單一電子的例子，但是在固態元件中則是到 1987 年才由美國貝爾實驗室的 Theodore Fulton 及 Gerald Dolan 製作出來。這是因為單電子電晶體必須要有能夠重覆製造極細微傳導顆粒(~幾十奈米)的技術。

單一電子的工作原理除了利用量子中的穿隧效應以外，最主要的基本觀念是使用庫倫阻障(Coulomb Blockade)來控制單一個電子。下圖(圖二)說明庫倫阻障的基本原理。我們先考慮一個很小的電中性的導電粒子，此導電粒子通常被稱為”島(Island)”或是”傳導島(conducting island)”。一開始島是電中性的，其中所含

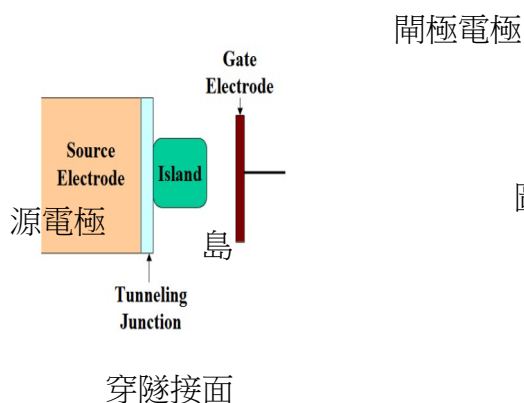
的電子數恰等於其晶格原子中的質子數。在此狀態之下，這個島並不會在超過其邊界以外的區域產生任何明顯的電場。現在假設有一個外力 $\mathbf{F}$ 將一個電子從島的外部加入島中(在大多數的單電子元件中，此外部電子的加入是經由穿隧過由極薄絕緣層所形成的位能障壁來完成的)，這個過程我們稱之為充電(charging)。此時，島的淨電荷變成為 $(-e)$ ， e 為一個電子的電荷量 $e \approx 1.6 \times 10^{-19}$ 庫倫。而島外也



圖二、利用庫倫阻障來控制單一電子的基本原理：(a) 為導電島加入一個電子之前(b) 為導電島加入一個電子之後。

因為此電子的加入而形成一個電場 $\mathbf{E}$ 並排斥其它電子的繼續移入。此電場的大小是與傳導島大小尺寸的平方成反比的，因此當島的尺寸接近~10 奈米時，在傳導島的表面電場可以高達~140KV/cm。

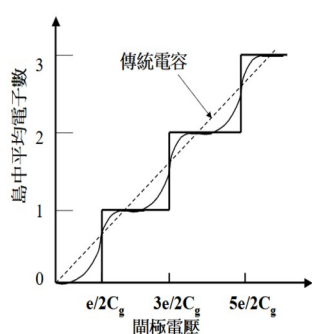
讓我們考慮如圖三所示的一個單電子元件的基本結構，這個結構包含了一個可以提供電子的源電極(source electrode)，一個極薄的絕緣層(~1 奈米厚，大約是一排十個原子左右)所形成的穿隧接面(tunneling junction)用以隔開源電極與一個尺寸很小的島，以及一個閘極電極(gate electrode)。極薄的絕緣層會對源電極中的電子形成所謂的位能障壁(potential barrier)防止它們進入島中，由於絕緣層極薄，當源電極中的電子滿足一定的條件時便可經由穿隧(tunneling)的方式進入島中。由於源電極中含有大量的電子，故可視為是一個電子儲藏所(electron reservoir)，而閘極則是用較厚的絕緣層來將其與島隔開。由於閘極絕緣層較厚，



圖三、單電子元件的基本結構

不會有電子穿隧的現象產生，但是閘極的電壓則會透過電容耦合(capacitive coupling)而改變島的能量，進而影響電子由源電極穿隧進入島中的條件。

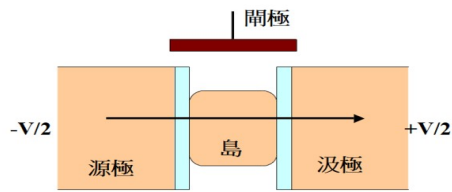
雖然閘極電壓(電荷)可以是連續的變化，但是由基本靜電學的理論可以証明島中的電荷卻是量化的(quantized)，也就是說島中的電荷隨著閘極電壓的增加是以 e 的整數倍增加的， e 是一個電子所帶的電荷量(1.6×10^{-19} 庫倫)。這主要是因為島的尺寸極小，當島的尺寸接近於島內電子的波長時，量子效應使得島內電子的能量會變成為分立的能階(discrete energy levels)。而且，讓島中電荷產生增量變化所需的電壓亦是量化的。所以閘極電壓與島中電荷的關係會呈現一個如下圖(圖四)所示階梯的形狀，這樣的一個關係被稱為庫倫階梯(Coulomb staircase)。



圖四、庫倫階梯(Coulomb staircase)

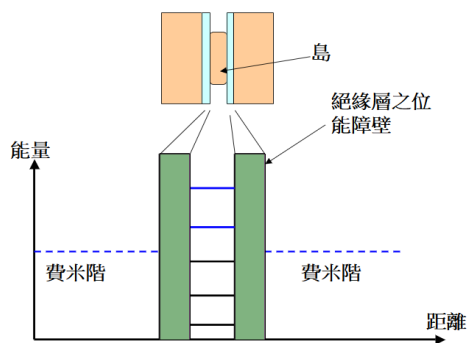
我們可以看出利用庫倫階梯可以準確的量出並操控一個電子。但是，庫倫階梯只有在極低的溫度下才能觀測的到。這是因為若是溫度太高，電子的熱擾動(thermal fluctuation)的能量將高於電子產生穿隧所需的能量，使得穿隧現象變的不明顯。這也是為什麼大部分單電子電晶體必須在極低溫下操作。當溫度越高，其庫倫階梯就變得越不陡峭，最後會成為傳統電容的直線(即：電荷＝電容 $\times$ 電壓)。

但是上述的單電子元件並無法帶有電流。為改善這個缺點，我們將島置放於兩個金屬電極中間，並以兩個穿隧接面將島與兩個金屬電極隔離開來，其中一個電極可以用來提供穿隧進入傳導島之電子，另一個電極則提供穿隧電子的出口。故此兩個電極相當於傳統金屬－氧化物－半導體場效應電晶體中的源極及汲極。



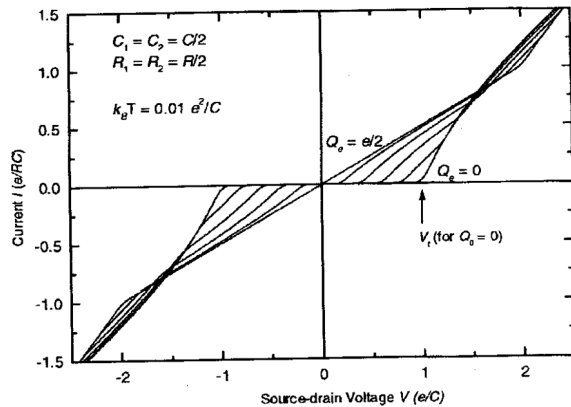
圖五、單電子電晶體

另外，在靠近島及穿隧接面附近放置第三個電極並於此電極加上控制電壓。此第三個電極即類似傳統電晶體中的閘極。其結構如圖五所示，這樣的一個元件便是所謂的單電子電晶體。當電子欲從源極穿隧進入島中時，電子的能量必須等於一個稱為庫倫能量(Coulomb energy)的臨界能量才可以。若閘極電壓及源-汲極間的偏壓均為零，則電子不會有足夠的能量進入島中，也不會有電流的流動。當源-汲極間的偏壓逐漸增加使得一個電子的能量等於庫倫能量時，它便能越過位能障壁進入傳導島中。這個恰好使電子能進入島中的臨界電壓被稱為庫倫能隙電壓(Coulomb gap voltage)。若是我們將源-汲極間的偏壓保持在略低於庫倫能隙電壓，而將閘極上的電壓逐漸增加，則電子也會有足夠的能量進入島中。這個情況可以用圖六中絕緣層的位能障壁、島的量化能階及電子儲藏所中電子的費米階(Fermi level, 費米階是指被電子所佔據的機率恰為 $\frac{1}{2}$ 的能量狀態)來說明。以能階來看，只有當島中的量化能階與費米階對齊時，才會產生電子的穿隧。藉由閘極的電壓因電容耦合使得島中電子獲得能量而使量化能階上升，當上升的量化能階與費米階對齊時，便可有單一電子的穿隧發生，而形成汲-源極間的電流。



圖六、單電子元件絕緣層的位能障壁、島的量化能階及電子儲藏所中電子的費米階。

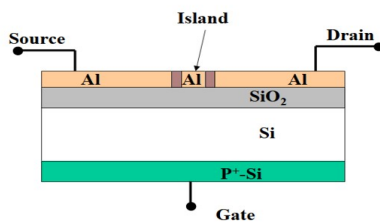
因此，單電子電晶體與傳統金屬－氧化物－半導體場效應電晶體相同也是三個端點的元件，但是它的工作原理卻完全不同。圖七所示為單電子電晶體汲-源極電壓(drain-source voltage) V_{DS} 與汲極電流 I_D 的特性曲線，我們可以看出只有在 V_{DS} 超過一臨界電壓值 V_t 時才会有汲極電流的產生，而這正是因為前述庫倫阻障所



圖七、單電子電晶體汲-源極電壓 (drain-source voltage) V_{DS} 與汲極電流 I_D 的特性曲線

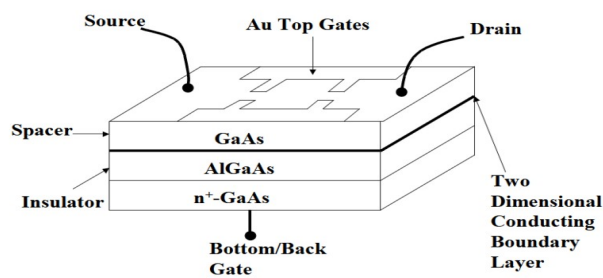
造成的。單電子電晶體的一個最重要的特性便是此臨界電壓 V_t 及其鄰近的 I_D 會是閘極電壓的週期函數，而其週期為 e/C ， e 是一個電子所帶的電荷量， C 為閘極與島間之電容量。

目前單電子電晶體的製作大致上可分成兩大類：一是金屬式(metallic)的，一是半導體式(semiconducting)的。不論是哪一類的單電子電晶體，其基本工作原理是相同的。在金屬式的單電子電晶體中，它是使用某一種金屬(例如：鋁)薄膜來形成所有的電極及傳導島，並利用氧化的方式來形成穿隧接面，圖八是一個金屬式單電子電晶體的例子。



圖八、金屬式單電子電晶體

在半導體式的單電子電晶體中則是在兩種不同能隙(energy gap)的半導體層(例如：砷化鎵及砷鋁化鎵)的介面處形成所謂的二元電子氣體(two-dimensional electron gas)，再將此區域分隔源極、島、汲極及閘極。通常，這些傳導區域是以半導體層上方的電極來定義出來的。當在電極上加上負電壓，電極下方的二元電子氣體便會被空乏(depleted)掉，這些很窄空乏區就形成了穿隧接面。圖九便是半導體式單電子電晶體之一例。通常，在半導體式單電子電晶體中島的大小大約是在 30 奈米到 1 微米的範圍內以便含有一定數目的電子，這個島又被稱為量子點 (quantum dot)，這是因為在這個島中的電子是被侷限在三度空間內。半導體式的單電子電晶體，有時又被稱為量子點元件。



圖九、半導體式單電子電晶體

由前面的敘述，我們看到了與傳統電晶體工作方式是完全不同的單電子電晶體。單電子電晶體能夠成功最重要的地方在於必須能夠重覆且可靠的製作出極小的傳導島，而這完全拜奈米製作技術(nano-fabrication technology)的改進之賜。到目前為止，單電子電晶體不僅是被用來精準的量測電子的電荷，利用單電子電晶體做成的記憶體及簡單的邏輯閘、邏輯電路也都被製作出來。但是，由於汲極電流會隨著閘極電壓作週期性的變化且它們都必須在極低的溫度下操作，所以更複雜的單電子電晶體之電路應用尚難製作。雖然，在室溫下操作的單電子電晶體最近在美國兩所大學的實驗室被製作出來，由於在室溫下操作的單電子電晶體島的大小要小於 10 奈米，要製作這樣小尺寸的島的技術還十分困難且設備昂貴。雖然單電子電晶體的未來發展如何還很難確定，但是至少我們可以斷定，由於元件尺寸越做越小，電子的量子特性將會在未來的電子元件中扮演極重要的角色。