

奈 米

許鉦宗

國立暨南國際大學電機工程學系 副教授

E-mail: jtsheu@ncnu.edu.tw

當奈米科技在世界各國工業或學術界引起重大研究投入時，奈米的成果其實早就悄悄在自然界各種方面展現它的影響：我們所熟知的蓮花，所以出汗泥而不染，便是荷葉上佈滿奈米大小的顆粒，以致顆粒較大的水珠與粉塵無處著力。最近一些高級汽車廠正利用這個原理，打算推出廿年不用洗車的車種；鵝與鴨類的羽毛，因排列成奈米間隙，使得它擁有透氣卻不沾水的特性，令鵝與鴨類即使在寒冬亦可悠游水中。而傳遞生命基本訊息的 DNA 四個鹼基（腺嘌呤(A)、胸腺嘧啶(T)、胞嘧啶(C)、鳥嘌呤(G)）長度大約在 50 個原子左右，亦是在奈米尺寸的範疇，這代表我們所知的生命演化過程，也是奈米作用的產物！

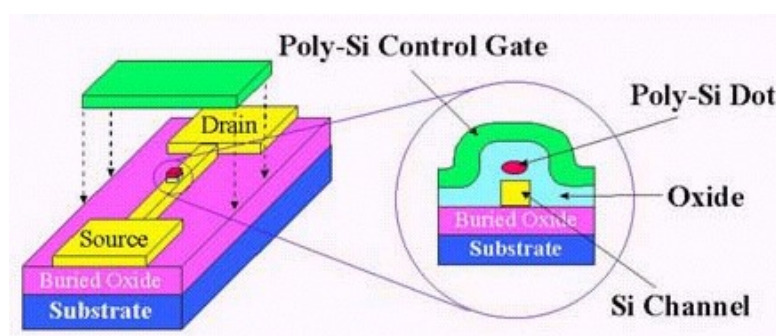
那麼奈米究竟有多大呢？通常我們得到的答案會是“它的英文為 Nanometer，數學符號以 nm 表示，而其大小為十億分之一公尺或寫成 10^{-9} 公尺”。以原子的大小來比喻，大約是 3 到 4 個原子直徑相加。也許換個方式大家對它的感覺會強烈些：一般人的頭髮直徑約為 100 微米，而一奈米的大小是將頭髮沿直徑方向分十萬個等分便是。若以地球的直徑來表示一公尺，那麼一奈米的大小，大約和我們小時候玩的玻璃彈珠一樣。而您在故宮看到米雕上最小文字的大小約是一個奈米的一萬倍大。在奈米這一行，因為材料的許多獨特性質在小於 100 奈米就已出現。因此定義技術達到 100 奈米以下就已進入奈米世界了。或許您也和我一樣興奮，因為我們正處在各行各業進入奈米時代的轉捩點上。

十八世紀初以來，人類在二百多年中，共經歷了三次工業革命：蒸汽機時代機器大規模取代人力、內燃機與石化工業造就了商品與交通工具的多樣性、資訊工業成就了快速且大量的訊息交換。技術革命一次比一次快，且影響力一次比一次深遠，每一次技術的躍進都成就了新社會型態，但也同時付出了龐大代價。有別於前三次工業技術革命，奈米科技的影響將是全面性的，這也是目前世界各國之所以紛紛成立國家型計畫的原因。它的影響到底包括那些呢？除了目前當紅的半導體與資訊工業外，從基礎科學到生物醫學技術、從機械到材料科學都可以看到它所扮演的重要角色。本文僅就半導體技術與生物 DNA 檢測技術的狀況向大家簡述。

微電子技術從 1970 開始至今，基本上是依照莫耳定律(Moore's Law)演進，它估計每隔三年單位面積的電子元件會增加四倍，而單位元件生產成本卻只有原先的二分之一，根據這個速度微電子製造技術今年下半年就會進入 100 奈米，到公元 2015 年會到達 30 奈米或更小。當半導體元件達到 25 奈米時，中央處理器(CPU)的工作速度可以推到 100GHz，記憶體儲存容量可達 1000GB。半導體導線的寬度縮小到幾十奈米時，原先電阻的觀念因電導(Conductance)量子化而不再適用；當半導體元件導線長度縮小到幾十奈米時，因電子在行徑上和晶格缺陷撞擊的機會變得非常小，使得電子在導線中的傳導十分迅速。另外，當材料被製成長、寬、高都在幾十奈米時，因能階形成量化現象，只要少數的電子就會將其填滿，因此元件工作與操控只需要少數的電子即可。目前許多量子元件就是根據上述的量子特性完成的。

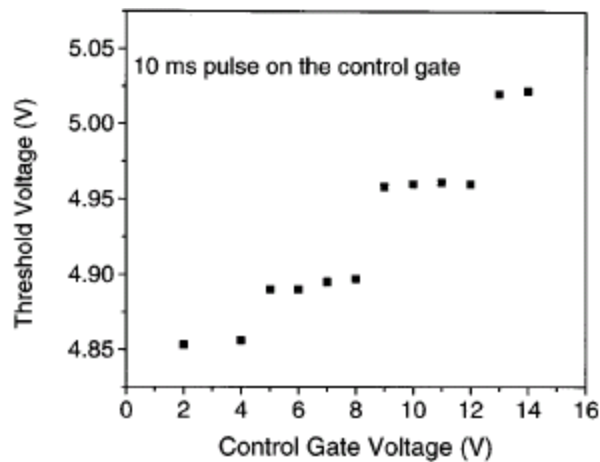
利用量子特性來製造奈米電晶體目前有兩個做法：第一種為穿隧式單電子電晶體，它主要結構兩個穿隧接面包住一個奈米點而成，其工作原理則是利用奈

米點的有限能階被填滿後造成的庫倫阻障與外加電位的大小來操控電流的有無。這個部分在暨大電子雜誌第十七期中吳幼麟教授的“單電子電晶體－奈米科技的應用”一文已有詳細的介紹。第二種為奈米金氧場效電晶體 (NanoMOSFET)，有別於穿隧式單電子電晶體，它在金氧場效電晶體的控制閘與奈米線 (Nanowire) 間加入一個奈米點做為電晶體的懸浮閘(Floating gate)，由穿隧進入奈米點中穿隧電子的數量，形成大小不同的電場，進而改變奈米點下方奈米通道載子的傳導行為。它的基本構造如圖一所示。



圖一、奈米場效電晶體構造。

如果懸浮閘的直徑為 7~10 奈米，那麼它的電容量(capacitance)的大小約為 10^{-18} 法拉，這時只要一個電子穿隧進入懸浮閘，就會造成電位數十毫伏特(mV) 的變化，這樣的電位變化是足夠影響下方奈米通道電流，進而改變啟動電晶體工作的臨界電壓(Threshold Voltage)，而且值得一提的是這時每一個電子的進入或拉出懸浮閘都十分重要，單一電子造成的量子現象均可以清楚看到。圖二顯示奈米金氧場效電晶體的臨界電壓的因穿隧電子而量子化現象。奈米金氧場效電晶體除了可以做為電晶體應用之外，更可以利用電子穿隧進入懸浮閘的現象當做記憶體使用，所以許多國內外專家大致認定它為終極元件。



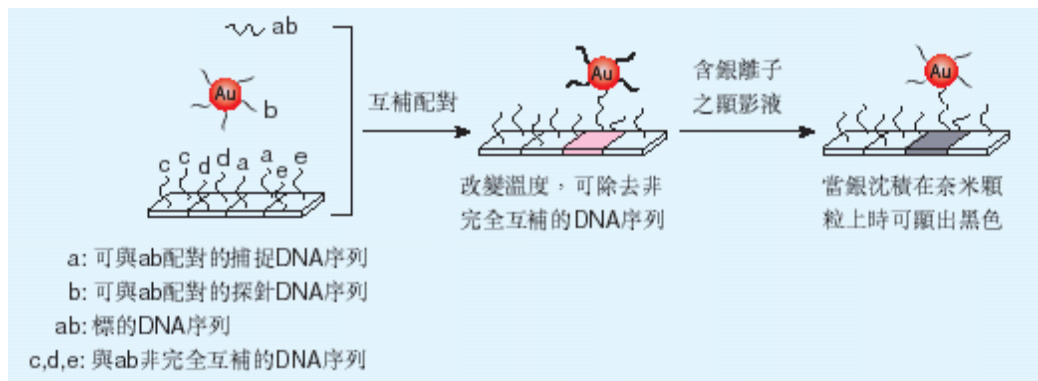
圖二、奈米金氧場效電晶體的臨界電壓的量子化現象。

奈米元件在生醫方面的亦是蓬勃發展，其中用來檢驗特定基因中去氧核糖核酸(DNA)序列的奈米 DNA 感應器技術更是一日數變。由於了解基因就是一段特定序列的 DNA，科學家可由一股已知的 DNA 鹼基序列，推測出互補的另一股 DNA 鹼基序列。例如，一條 DNA 序列為 ATTACGCA，其互補序列就是 TAATGCGT。當二者序列完全吻合時，其間氫鍵吸引的力量最強；反之，即使只有一個鹼基無法配對，就會使結合力減弱，在這種狀況下可以藉由基材電極極性改變、增高溫度或是改變溶液中的離子濃度，均可使錯誤配對的 DNA 序列脫離。圖三為利用基材電極極性改變使錯誤配對的 DNA 序列脫離的示意圖。某些遺傳疾病可藉由 DNA 的檢驗早期發現及時治療。另外，細菌所釋出的致命因子或是特定病毒的 DNA 片斷亦可以被早期發現與篩選，如日前名噪一時的 911 的炭疽菌或亞洲流行極廣的 B 型肝炎病毒均可以用這個方式檢測。



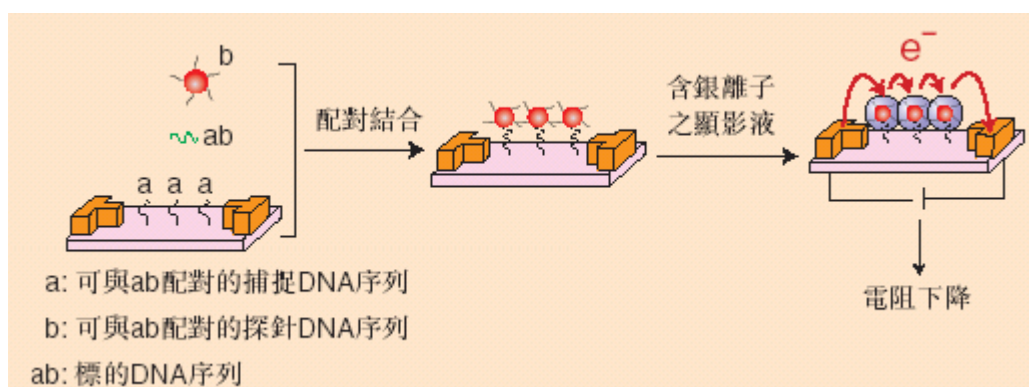
圖三、分子診斷:在基材加正電性時左圖中顯示即使部分錯誤配對亦結合成功。圖右顯示利用基材電極極性改變迫使部分錯誤配對成功分離。

目前奈米 DNA 感應器可大致分成二大類：第一類是以金奈米粒子呈色不同為基礎。這個方法是預先在基材上將許多不同的 DNA 序列(a)、(c)、(d)、(e)等予以固定。其中只有序列(a)才能與標的 DNA 序列(ab)的一端形成互補配對。當序列(ab)分別和玻片上序列(a)與(Au-b)三者混合形成結合後，原先的(a)從基材向上會形成(a-ba-b-Au)的配對，而其它序列則沒有。再用緩衝溶液將未配對或多餘的 DNA 序列清除。若樣品中標的 DNA 序列的濃度夠高，則會顯出淡淡的粉紅色，再以含有硝酸銀的溶液處理，由於金奈米粒子可促進銀的沈積，便可呈現黑色。圖四說明 DNA 感應器配對與呈色流程。另外，這個方法也可以利用金奈米粒子大小不同而呈色不同(50 奈米金粒子呈現綠色，而 100 奈米的金粒子則呈現橘色)，同時檢測兩種不同標的 DNA 序列。上述奈米 DNA 檢測方法的缺點是必須採用 PCR (Polymerase Chain Reaction)，將(a)序列濃度提昇才容易經由大量金奈米粒子呈色來顯出差異。



圖四、DNA 感應器配對與呈色流程。

奈米 DNA 感應器的第二個方法是在鍍有一層氧化矽的矽基材上，以半導體微影蝕刻法製造出微小電極，在兩電極間形成一奈米級間隙。在間隙中先固定一特定的 DNA 序列(a)，再將電極浸入一種含有標的 DNA 序列(ab)與帶有另一特定序列(b)的金奈米粒子的溶液中。當序列(ab)分別和矽基材上序列(a)與(Au-b)三者混合形成結合後，原先的(a)從基材向上會形成(a-ba-b-Au)的配對，因此可將金奈米粒子固定在電極間隙之間並形成緊密排列，再以含硝酸銀的顯影液加以處理認沈積的銀粒。隨著銀沈積時間加長，電子便可在兩極間形成通路傳導，電極間的電阻隨即大幅降低。因此經由測量電阻即可偵測出 DNA 序列配對成功與否。這個方法的靈敏度極高，樣品量低至 5×10^{-13} 莫耳濃度，仍然可以檢測出來，而且持續改進中。同時這個技術本身可以和半導體製程技術匹配，應是未來奈米 DNA 感應器的主流。圖五是電子式 DNA 感應器的工作示意圖。



圖五、電子式奈米 DNA 感應器的工作示意圖。

從半導體技術與生物 DNA 檢測技術的狀況來看，在科技上我們可能很快會進入即時傳譯(**Real-time translation**) 的時代，但人與人或國與國的溝通是否更加順暢？人們的壽命將因疾病預防與治療的進步更加延長，這是否代表生活將更美滿呢？多數人常常會問奈米科技的可能產品有那些？可能帶來的技術衝擊會如何？等等問題，我倒不擔心這些問題，因為人類在面對這類瓶頸時，突破困難的能力與日俱增，更何況今年下半年半導體製程技術就會進入奈米時代，我們有生之年都會逐漸看見它的影響。人類往外追尋探索宇宙了解到它的浩瀚，往微小化的追求也略有成就，在這個科幻與科技漸漸模糊的時代裏，奈米科技除了技術本身外，究竟讓我們體會到什麼呢？！是老子的“至大無外，至小無內”？還是佛陀的“色不異空，空不異色”？亦或是我們終於可以和造物主溝通了呢？聰明的你認為如何？

