

積體電路技術

■ 林鴻志

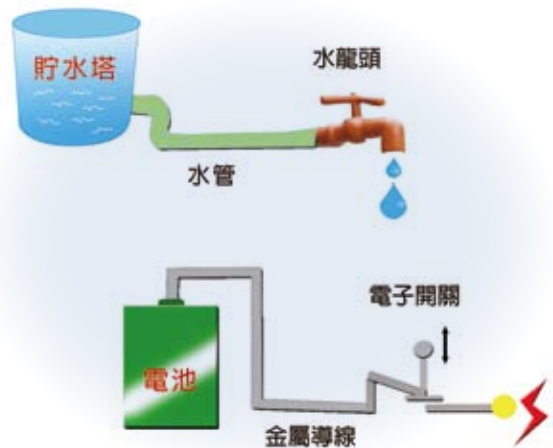
若論過去百年內對人類生活衝擊最大的發明，
建構微電子產業基礎的「電晶體」與「積體電路」應當之無愧！

積體電路就是我們所熟悉的晶片。現在日常所用的手機、個人電腦、數位相機、網路等，都因晶片技術的發展而存在，家電產品、交通運輸、醫療等領域也都大量採用晶片技術來精進其功能。小小不起眼的晶片早已深入文明社會的普羅大眾之中，也潛移默化了人們生活舉止的型態。

微電子的濫觴

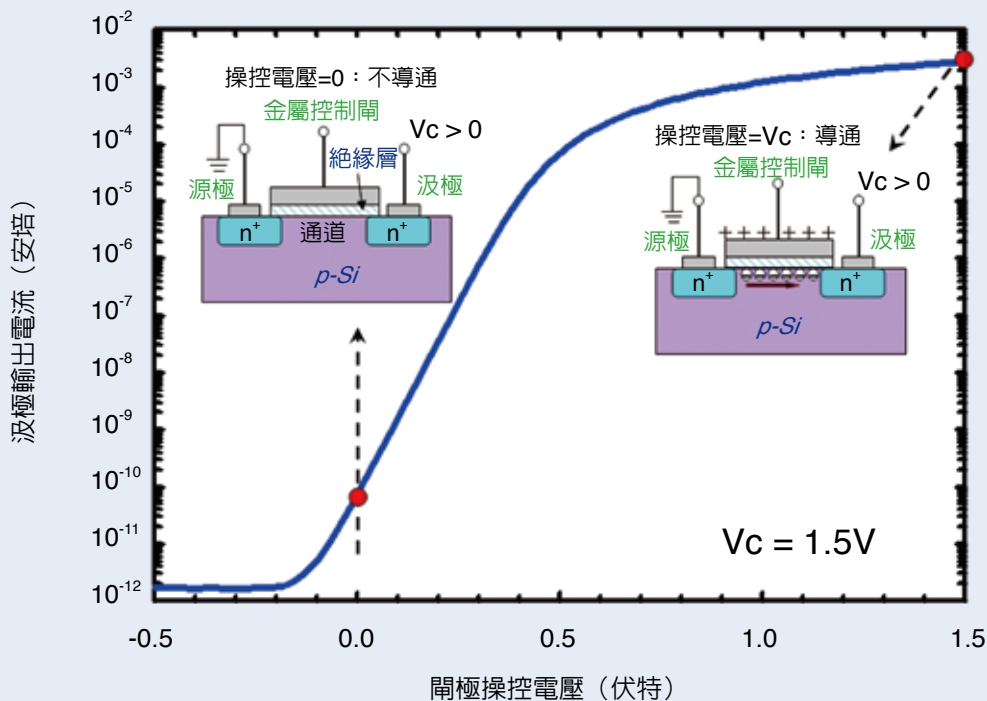
第1顆電晶體是在1947年由美國貝爾實驗室的兩位研究員巴定（John Bardeen）與布拉頓（Walter Brattain）所製作的，目的是用來取代傳統的真空管。真空管是電晶體發明前最重要的電子開關元件，但因為體積龐大、耗電與不穩定，使得科學家一直想發展新的產品來取代它，這時半導體就毫不客氣地展現其優異特性並成為主流材料。

1926年提出的薛丁格方程式，讓科學家有一利器可用來探索量子世界



水流管路系統與電路系統的比較 一個電晶體就是一個電子開關，用來控制電流的導通，作用如同水龍頭控管水流的流動狀態。在電子系統中，電源供應（如電池）與金屬導線的角色，如同水流管路系統中的水塔與水管。

積體電路就是我們所熟悉的晶片，
小小不起眼的晶片早已深入文明社會的普羅大眾之中。



場效電晶體的結構、運作及輸出電流與操控電壓間的關係曲線。輸出電流是由汲極的正電壓（一般是 V_c ，即電路的操作電壓）所造成，它的大小由金屬閘極的電壓來調控。閘極操控電壓設定在0與 V_c ，可以界定「關閉」與「開啓」兩個邏輯態。本圖例中電晶體的通道長度是0.4微米，寬度是10微米，操作電壓 V_c 是1.5 V。

的奧妙，也讓新時代的固態物理逐步成形。但直到40年代，人們對於半導體這種新興材料的認知還相當有限，不過在能帶理論確立後，對它的特性終於能進一步分析與預測。

半導體有一項迥異於導體與絕緣體的性質，就是它的電阻介於金屬與絕緣材料之間，而且可藉由改變環境溫度、照射光的強度、電場的強度，或加入微量雜質等技巧，而呈現大幅度（好幾個數量級）的變化。也因為這樣的性質，科學家相信半導體有做為開關元件的潛力。

半導體的類型可區分為正型與負型兩種，負型中用來導電的載子是帶負電的電子，正型則由稱作電洞的載子來導電。電洞的帶電量與電子相同，但極性是正。當正型與負型半導體接合在一起時就稱作二極體，具有整流的特性，也就是由正型往負型方向流動的電流會遠大於相反方向的電流。

半導體材料中最重要的是矽，目前世界上約有95%以上的半導體產值與它相關。矽的優點包括成本低（因為在地球上含量豐富），具有良好的機械與導熱性質，以及可在表面上形成一特性穩定的二氧化矽絕緣層等。最後一項優點對於積體電路的發展尤其具關鍵性，因為二氧化矽良好的絕緣性可提供電路中元件與元件間有效的電性隔離，避免操作時互相干擾。二氧化矽同時可做為電晶體中隔離控制閘與半導體材料間的絕緣層，大幅簡化了製造的流程。

電晶體其實是一種開關元件，與水龍頭的功能相當類似。差別是水龍頭控制水的流動，電晶體控制的則是電流的大小。此外，電晶體操控的方法是在控制端子施加電流或電壓訊號，水龍頭則是扭動的機械作用。以場效電晶體為例，電晶體內的控制端子稱作閘極，閘極與由半導體組成的通道區之



國家奈米元件實驗室的10級（class 10）潔淨室。進入這環境內的工作人員須穿著規定的潔淨衣、頭套與手套。

間隔著二氧化矽的絕緣層。若通道區是正型的半導體，則通道區兩側會另有兩個電極端子，分別稱作源極與汲極。

源極與汲極區是負型的半導體，且含有大量的電子，因此源極—通道與通道—汲極可看成是兩個背接在一起的二極體。由於整流特性，當閘極電壓是「0」時，源極與汲極呈阻絕狀態，僅有微弱的漏電流流動。但當操控的閘極電壓夠大時，在源極與汲極間通道與絕緣層界面上會感應出一電子層，使源極與汲極兩端子導通，這時輸出的電流可較前述漏電流增加好幾個數量級。

關閉（閘極操控電壓=0）與開啓（閘極操控電壓= V_c ， V_c 是電路的電源電壓）時的電流差

1964年，英特爾的創辦人摩爾發現一項有趣的趨勢，一個晶片包含的電晶體數目每隔一段時間就會呈倍數成長，這就是著名的摩爾定律。

異，可以用來界定邏輯狀態「0」與「1」。一個電晶體代表一個邏輯單元，是建構電路的基本組成。1958年美國德州儀器公司的基爾比（Jack Kilby）與費爾契（Fairchild）公司的諾義斯（Robert Noyce）兩人，不約而同地提出積體電路的概念。

有別於傳統個別元件以焊接的方式把多個獨立的元件連結組成迴路的做法，積體電路是在同一塊半導體基板的表面上建造多個電晶體、電容器、電阻等各種元件，再用金屬導線串接這些元件，組成一個有特定功能的電路。利用這種做法，可把一個複雜的電路乃至於一個系統（或電子產品）壓縮在微小的空間內。

積體電路製程

積體電路的製造必須在異常乾淨的環境（稱為潔淨室）中進行，其中的空氣經過精細濾網過濾，因此含塵量非常少，溼度、溫度與壓力也有嚴格的控管。潔淨室很早就用於外科手術病房，以減少開刀病患受感染的機率。由於積體電路製造過程中掉落的粉塵會造成線路的燒毀或電晶體特性的劣化，因此潔淨室等級較手術病房還要高。以國家奈米元件實驗室的潔淨室為例，其中每立方英尺內0.5微米大小的塵粒數並不多於10顆。

蓋一棟房子須經過挖地基、填水泥、塑牆等程序，製作一顆晶片的過程也很類似，要在矽基板（即矽晶圓）的表面上進行多道蝕刻挖洞、薄膜沉積、微影照像成形、雜質摻入、加熱處理等繁雜程序，以完成積體電路的結構。製程中以微影程序最為關鍵與昂貴，它的做法與傳統照像術原理一致。

設計完成的電路先經由電腦軟體轉換成實體

的結構圖案，再把它製作成一模片，稱作光罩。光罩的主體是一透明的石英基材，上面有不透光的薄金屬（鉻）層組成前述電路的結構圖案。微影照像時，矽晶圓表面上須先塗一層光阻（等同照像時所用的底片），再把光罩置放在光阻的上方，用紫外線光照射光罩與晶圓。這時被光罩上不透光圖案擋住的光阻將不感光，其餘部位則感光。在後續的顯影藥水浸泡（類似洗底片程序）時，光阻不感光與感光部分會有不同的溶解率，顯影後留下來的光阻就能呈現出光罩上的圖案。

一顆先進的晶片製作往往需要30至40道光罩與微影程序，不難了解它的複雜性與困難度。除了微影外，其他步驟也相當重要。這些技術須大量使用先進靈巧的真空系統，由於積體電路的生產，使得半導體製程設備蓬勃發展，且已演變成另一個重要的高科技產業。

1961年第1顆積體電路產品上市時，內部僅有6顆電晶體。當時社會大眾對它所投注的目光相當有限，只知道是一項先進科技的結晶，但一些較具真知卓見的人卻有不尋常的感受，摩爾（Goden Moore）就是其中的一人。

摩爾定律的威力

積體電路的發明促成了微電子產業的起飛。1964年，英特爾（Intel）的創辦人摩爾發現一項有趣的趨勢，一個晶片包含的電晶體數目每隔一段時間就會呈倍數成長，他也預測這樣的趨勢會持續一段時日，這就是著名的摩爾定律（Moore's law）。

乍看之下可能難以了解摩爾定律的意義與重要性，以下的例子或許能幫助讀者了解。若把一張

1980年代的個人電腦，1990年代的網際網路與無線通訊產業，都是拜積體電路的技術精進才開始蓬勃發展的。

厚度僅0.4毫米的紙張，連續對折40次後，它的厚度會超越地球與月亮間的距離（約38萬4,400公里）！積體電路發展至今近半世紀，現在一塊晶片內包含上億顆電晶體已是稀鬆平常的事，展現的強大功能與影響已遠遠超越發展初期多數人的想像。

當然要持續這定律並非易事，首先元件的尺寸必須要微縮，以免晶片的面積增加到不合理的地步。一般對於新一代技術的要求，是使電晶體平面上兩個維度的長度微縮成0.7倍，因此它的平面面積可縮小近一半，約0.49倍，如此可在不增加晶片面積的要求下讓晶片內電晶體數目倍增。電晶體縮小後衍生的一項優勢就是提升切換速度，道理很簡單，因為載子在電晶體中運行的距離變短了，所以訊號的傳輸時間也縮短了。

此外，電晶體密度的提升也有助於增加電路設計的彈性與應用的多樣化，因此晶片的功能也隨時間演進而日新月異。實際上，由於摩爾定律的加持，積體電路的發展造就了許多重要電子產業的崛起，例如：1980年代的個人電腦，1990年代的網際網路與無線通訊產業，都是拜積體電路的技術精進才開始蓬勃發展的。

2000年左右，全世界電子業整體的產值已超越汽車業成為第1，電子產品對人類生活型態與文化的衝擊之大不言可喻，這就是摩爾定律的威力！可想見摩爾定律持續愈久，它的影響會愈深遠。

瓶頸與挑戰

積體電路開始生產迄今近50年，摩爾定律準確地預測了技術的發展，一顆晶片內電晶體

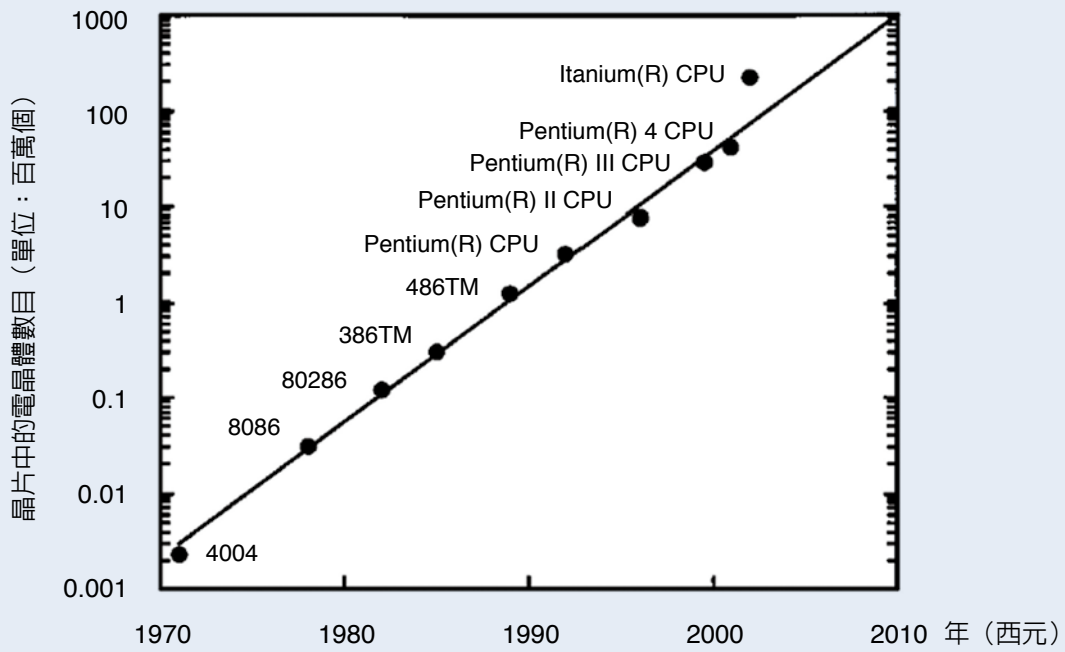
數目由最早的個位數成長至現在的數十億，電晶體的尺寸也由數十微米邁入奈米紀元。然而定律是否有終止的一天？答案是肯定的，我們所能做的僅是延後這一天的來臨。實際上，對於今日的技術而言，已有多項嚴峻的問題與挑戰橫互在前，必須有更積極的作為方能確保晶片技術的進步。

首先要談的是晶片的功率耗損。電路運作時，切換與傳送訊號是耗損的主要來源。依據統計資料，現在全世界一年用掉的電量中，約有6%是由積體電路晶片所消耗。隨著晶片數目的持續上揚，預期未來這比率會再增加。面對能源的短缺與地球暖化的隱憂，如何減少電晶體運作時的耗電量是刻不容緩的課題。

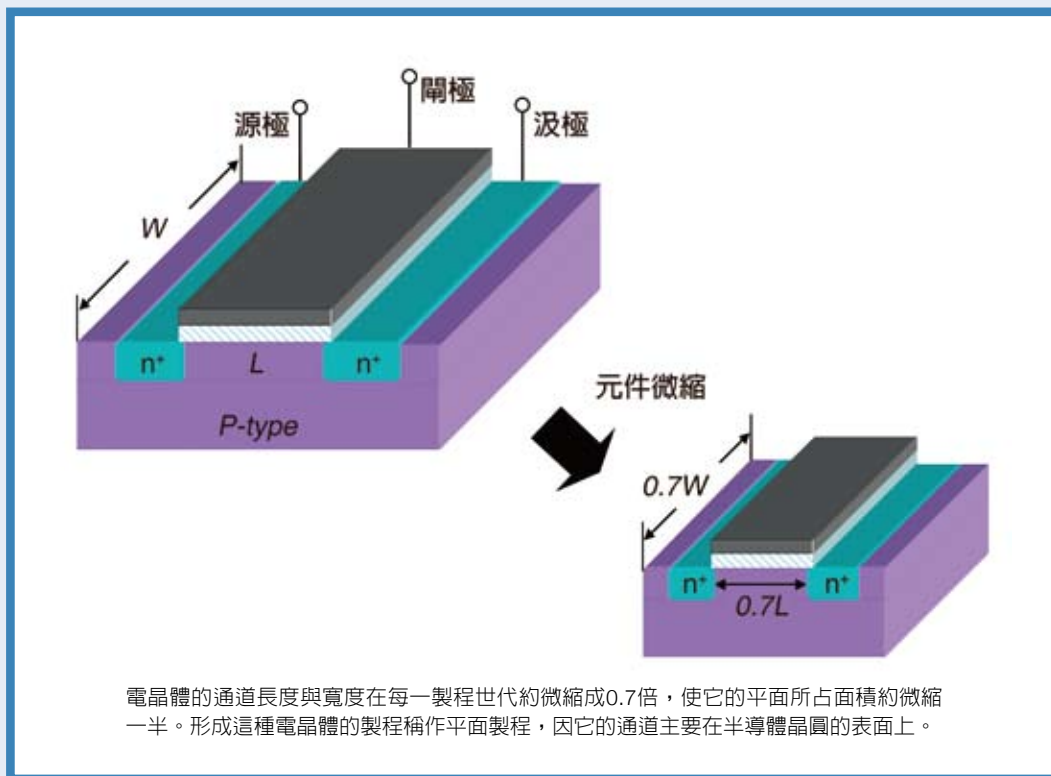
當大量能量耗損在一小片晶片上時，也造成晶片內部溫度的急遽上升。一片處理器全速運作時，局部溫度可達攝氏150度以上，因此須配備風扇或其他冷卻裝置來協助散熱，以避免晶片當機或毀壞。隨著電晶體密度的增加，未來這些困擾會變成阻止技術發展的主因。在策略上，降低操作電壓是已沿用多年的手段，但現在已降至1伏特且開始遇到瓶頸，需要新的方法來突破。

電晶體漏電流（以閘極電壓=0時的輸出電流為代表）的控制，是另外一項要注意的重點。電晶體持續微縮使源極與汲極愈來愈靠近，同時隔離閘極與通道的絕緣介電層厚度也會變薄，以配合操作電壓的降低，製作時稍有不慎，其關閉態的漏電流就會大幅上升，如同一水龍頭關起來後仍會大量滴水，造成無謂的耗電。

這對於使用電池的可攜式電子產品影響尤



英特爾公司生產的處理器晶片內電晶體數目隨年分演進的情形，大約每1.5年增加1倍。



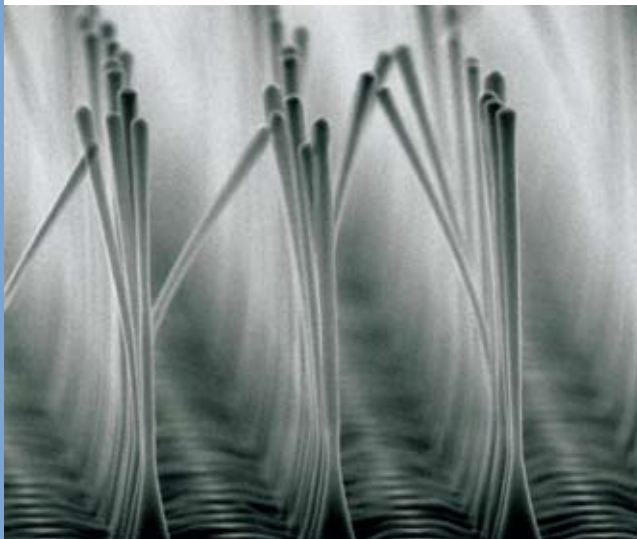
電晶體的通道長度與寬度在每一製程世代約微縮成0.7倍，使它的平面所占面積約微縮一半。形成這種電晶體的製程稱作平面製程，因它的通道主要在半導體晶圓的表面上。

甚，以手機為例，在不通話時，電路的耗電主要取決於電晶體的漏電流，性能不佳的晶片會快速耗費電池的儲電量，影響使用的便利性。針對這個問題，引進新的材料與元件結構是必要的手段。

還有許多其他問題會影響摩爾定率的持續，主要包括：開發出形成高密度奈米圖案且符合量產需求的照像技術，困難度愈來愈高；在奈米尺度下，電晶體特性的變異可能會影響電路運作的穩定性；發展新一代技術的研發經費逐步高升，已攀升至令人咋舌的地步，考量投資的風險，令人卻步。

奈米技術的加持與展望

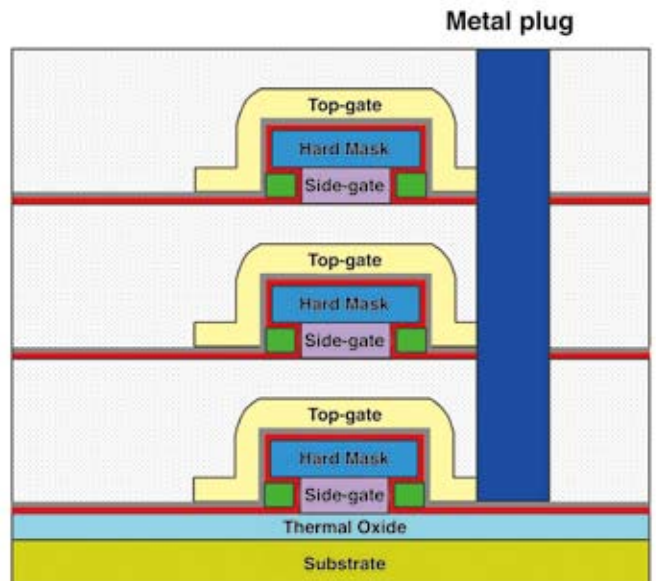
目前最先進的量產技術已邁入奈米生產紀元，晶片上的電晶體尺寸比一般的病毒還要小上一倍。但如前所述，發展新一代更微小的



在矽晶圓表面上，以微影與蝕刻製程所形成整齊排列的矽奈米線，高度是2微米，直徑約30奈米。由於細長的結構與矽材料堅韌的特性，奈米線搖曳生姿卻不會折斷。

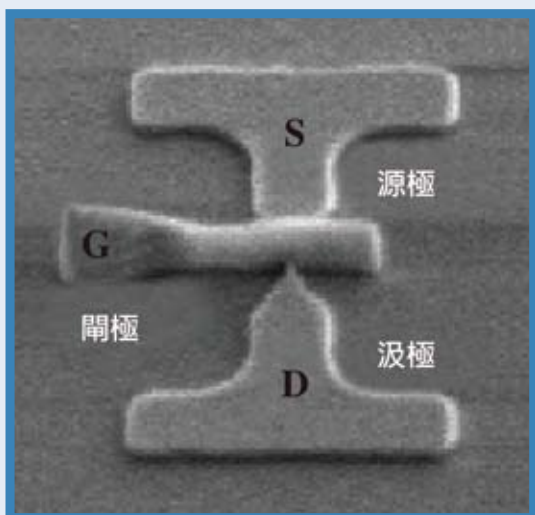
新技術挑戰愈來愈艱鉅。考量生產的便利與成本優勢，目前的積體電路製程都是所謂的「平面」技術，也就是在晶圓基板的表面上直接形成電晶體的通道區。這樣的做法最簡單，但也使元件的特性受到限制，因為閘極只能掌控表面通道的電場變化，無法有效消除晶圓內部的漏電流。

為了改良特性，近來有人提出奈米線通道的做法。所謂奈米線，是指一長條狀的材料，它的剖面可能是長方形、三角形或圓形等，邊長或直徑小於100奈米，而一般的奈米線結構多形成於一絕緣體之上。具有奈米線通道的電晶體，它的閘極可有效控制通道內各處的電場變化，因此元件的開關特性可獲得大幅度的改善。台積電就是用這種觀念於2004年發表了5奈米的奈米線電晶體，這是目前世界上最小的電晶體。除了奈米線外，也有所謂的奈米點，可

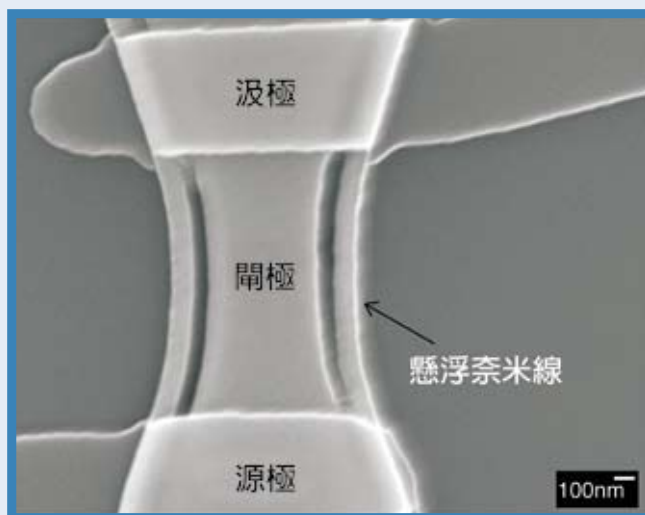


採用立體堆疊的記憶體積體電路結構，有別於傳統僅製作一層元件的方式，使用多層記憶體可大幅增進儲存容量與生產成本，預計採用類似3D技術的半導體晶片未來會取代現有的硬碟。

■ 面對能源的短缺與地球暖化的隱憂，
如何減少電晶體運作時的耗電量是刻不容緩的課題。



國內台積電公司於2004年所發表的5奈米（通道長度）奈米線電晶體，是目前世界上最小的電晶體，其中源極與汲極間是以一呈圓形截面的矽奈米線做為開關通道。



這是一種新式的奈米線電晶體元件，其中的奈米線通道呈懸浮狀。操作時，利用閘極施加電壓的變化可使奈米線吸貼或排離閘極，藉此展現開關兩種邏輯態。

用來儲存電荷，當作記憶體元件使用。

善用奈米技術除了可以增進元件的性能外，也能增加應用的廣度與多樣化，並協助延續摩爾定律。另外，製程技術的進步也引進了許多新的觀念與應用，例如在1990年後開始引起矚目的微機電製程，可以在電路上加入微小機械元件，如小馬達、感測器、微流道等，讓晶片的功能更加多樣化，進入所謂後摩爾時代（Beyond Moore）。現在的汽車內協助性能操控與安全防護的晶片（如安全氣囊控制晶片）、麥克風、投影機等，乃至於生醫感測與照護的晶片，都能在一微小世界中實現。

預測未來的發展，摩爾定律非常可能在10年之內終止，也就是元件的微縮將難以再持續下去。屆時預估電晶體的通道長度約在10奈米左右，大概

是一般病毒尺寸的十分之一，一顆晶片中可能有千億個以上的電晶體。但三維積體電路技術仍會使積體電路中的電晶體數持續增加，並納入不同材料的各式電路，使得異質材料與系統整合更容易，可造成另一波產業與技術的躍升。

因此，晶片的功能與性能仍會持續發展，相信至少在50年內積體電路仍會獨領風騷，並結合無線通訊、微機電、光電與生化科技，讓人類的生活更加多采多姿。

林鴻志

交通大學奈米中心 / 電子工程學系