

半導體元件 電晶體的演進

胡振國、廖建舜

電晶體是積體電路中最重要之元件之一，它的功能決定了整體電路的優劣，可謂現今半導體界的重要技術指標。本文在電晶體發明後 70 年之際，簡介它的演進，期使更多人能一窺這個左右現代人生活甚巨的半導體元件究竟是何物。

背景說明

在現今積體電路（integrated circuit, IC）已廣泛應用的事實下，每個人每天的生活幾乎隨時都受控於晶片的運作，對於晶片中的功能與原理，雖然外人看不到也不需全部了解，但是深知有東西在工作中。有許多半導體元件發明與應用在晶片中，相當有趣，這些元件內有許多需深度探索了解也值得學習的物理現象，也開發了許多難度甚高的技藝，值得尊敬感謝。

在眾多元件中，電晶體可謂積體電路的心臟，它是一個可以靈敏感應輸入信號再予以放大轉換的元件，也就是說當加入一個信號（電壓或電流）於某一端，可以在另外一端得到相關但不同的信號（電壓或電流），相當於電阻的轉換，原意以「轉換電阻體」呈現，簡稱轉阻體，習稱電晶體似乎較文雅感人有趣。因為發現電晶體到現今剛好 70 年，而且積體電路無法缺少它，重要性可想而知。本文以簡明扼要的方式探索電晶體的演進，讓人們了解這元件的特徵與原委。

電晶體分類與功能

電晶體在分類上大致可以分為雙極性接面電晶體與金氧半場效電晶體兩大類，都可視為可控制的開關元件。以金氧半場效電晶體為例，當閘極施予不同的偏壓，便可以打開或關上源極與汲極之間的開關。

電晶體可謂積體電路的心臟，
它是一個可以靈敏感應輸入信號再予以放大轉換的元件。

電晶體的發明可追溯到 70 年前，在 Bell Lab 工作的 John Bardeen、William Shockley 及 Walter Brattain 共同發明第一顆固態電子元件電晶體。

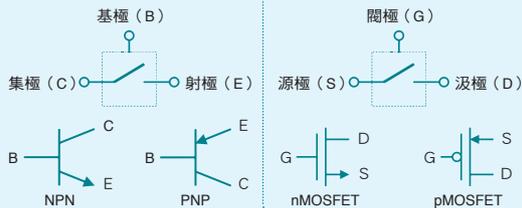
不論是何種電晶體，在電特性上須展現出明顯的轉阻特徵。以 n 通道金氧半場效電晶體為例，當閘極偏壓 (V_{GS}) 小於臨界電壓 (V_T) 時，電晶體是「關」；當閘極偏壓大於臨界電壓時，閘極下方會感應出通道，電晶體是「開」。若加入的閘極偏壓是一變動的信號源，可想見的在源極 (source-S) 與汲極 (drain-D) 端會有隨之感應起舞的電流 I_{DS} 變化，相當靈敏。

第一個電晶體

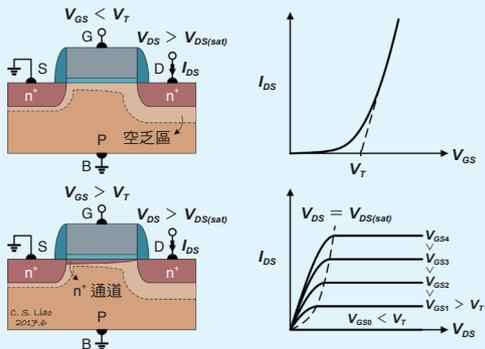
電晶體的發明可追溯到 70 年前，於 1947 年 12 月在 Bell Lab 工作的 John Bardeen、William Shockley 及 Walter Brattain 共同發明第一顆固態電子元件電晶體，這個研究團隊由 William B. Shockley 領導，目的是取代傳統真空管元件，期使功率降低且體積重量更小。當時提出的元件相當簡要但前瞻，含有一半導體鍺材料，兩點很緊密靠近的金箔由一彈簧連接固定，這金箔越過一個三角形狀的塑膠尖角並予以細緻切開定型，達到非常接近但是斷開的雙金屬端，因此這個元件稱為鍺點接觸型電晶體。

雙極性界面電晶體

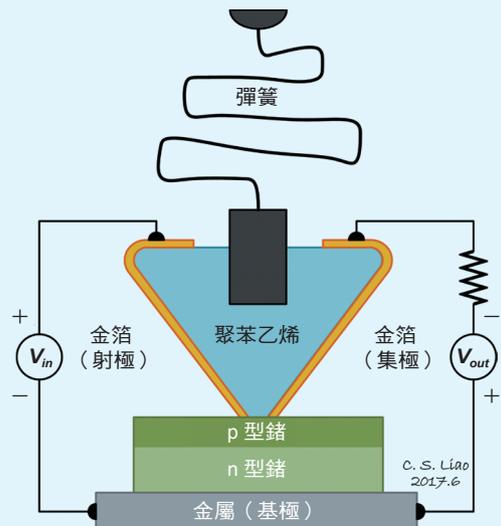
金氧半場效電晶體



電晶體是可控制的開關元件，以金氧半場效電晶體為例，當閘極施予不同的偏壓可以控制源極與汲極之間的開關打開或關上。



電晶體電的特性：以 n 通道金氧半場效電晶體為例，當閘極偏壓小於臨界電壓時，電晶體是「關」；當閘極偏壓大於臨界電壓時，閘極下方會感應出通道，電晶體是「開」。



1947 年由 Bell Lab 的 William B. Shockley、Walter H. Brattain 和 John Bardeen 發明的第一顆電晶體，是鍺點接觸型電晶體。

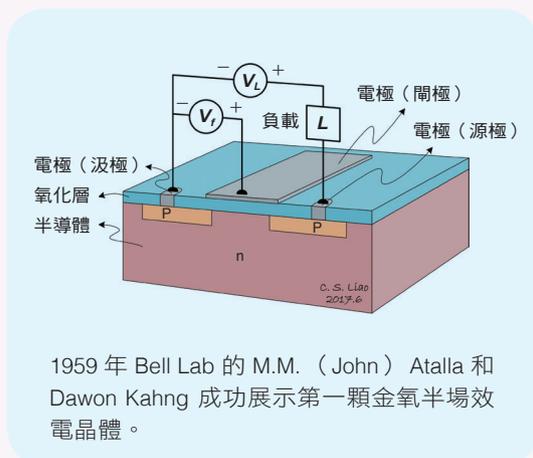
製作單顆半導體元件與整合多個元件在一晶片上，
這觀念吸引了全世界的注意與研發。

那元件與之後的電晶體不盡相同，但扮演著關鍵性的前瞻領航角色。在原理上，團隊提出實驗觀察如下：在集極（某點接觸端）與基極間的電流可受射極（另一點接觸端）的信號控制，射極端的電流變化可以很小，但集極端（DC 偏壓不同）的電流變化則相當大，也就是可把小信號放大。這現象的解釋與半導體內的電子與電洞數量相關，P 型半導體的電洞是多數載子，而電子是少數載子，n 型則相反。不同的 DC 偏壓可造成電子與電洞的數量改變，當某端點間電流缺乏某載子時，另一端點適當提供所缺的載子，可使前者電流有大變動，實為半導體主動元件的先驅。

矽金氧半場效電晶體

提出半導體電晶體元件後，由於材料與技術的演進，加上元件體積很小，因此發展相當迅速。1949 ~ 1950 年在材料的提煉上發明拉晶法及浮區純化技術，可製作單晶半導體及 PN 接合面。在 1950 年提出了第一個雙極性接面電晶體。1955 年由 Shockley 在矽谷成立 Shockley 半導體實驗室，次年（1956 年）Shockley、Bardeen、Brattain 榮獲諾貝爾物理獎。

在 1957 年，Robert Noyce、Gordon Moore 等人成立 Fairchild 半導體公司。在 1958 年由德州儀器的 Jack Kilby 發明積體電路（Kilby 於 2000 年獲諾貝爾獎）。在 1959 年 Bell Lab 的 M.M. (John) Atalla 和 Dawon Kahng 成功展示第一顆金氧半場效電晶體。這電晶體採用矽基板，經由一氧

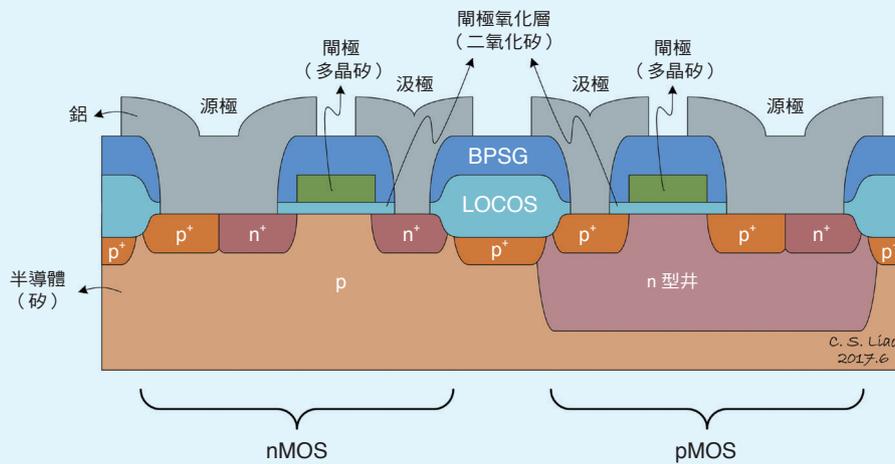


1959 年 Bell Lab 的 M.M. (John) Atalla 和 Dawon Kahng 成功展示第一顆金氧半場效電晶體。

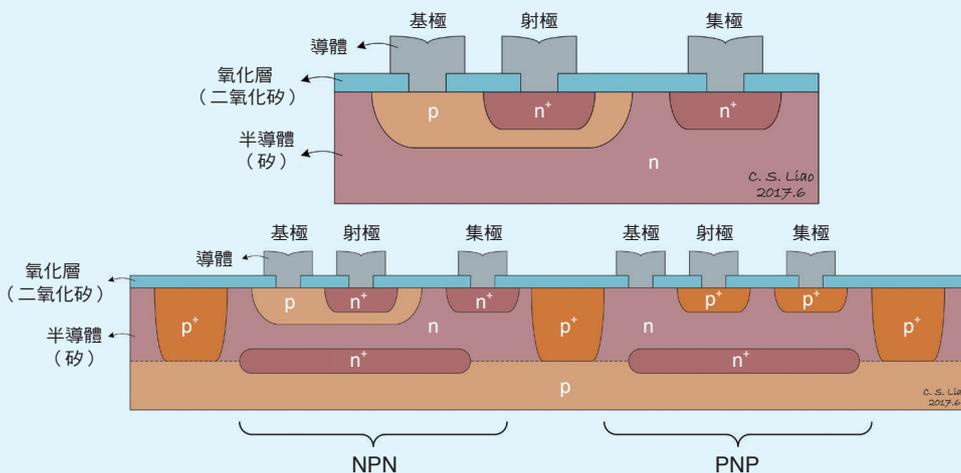
化層做為閘極與通道間的絕緣層，可使另兩端源極與汲極間電流受閘極電壓控制。因為氧化層是 SiO₂ 容易在矽基板上生長，提供未來積體電路相當大的整合契機。

積體電路

製作單顆半導體元件與整合多個元件在一晶片上，雖然看似相當合理，但是須有關鍵人事物於適合的時間提出。1963 年由 Fairchild 的 Frank Wanlass 和 C. T. Sah 發明第一個互補型金氧半導體（complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS）電路，這電路由兩個金屬半場效電晶體組成，由於其工作功耗較少，因此影響力很大。他們提出的專利是 Frank M. Wanlass, “Low stand-by power complementary field effect circuitry,” U.S. Patent 3356858, Dec. 5, 1967，可視為重要的元件開發與電路整合高度成功的前驅。



1963年由Fairchild的Frank Wanlass和C. T. Sah發明的第一個CMOS，其專利是：Frank M. Wanlass, “Low stand-by power complementary field effect circuitry,” U.S. Patent 3356858, Dec. 5, 1967。



1960 ~ 1970年代主要使用的電晶體是雙極性接面電晶體。

當多個元件可經由整合而整體發生於同一晶片上時，可想見這觀念吸引了全世界的注意與研發。在1960 ~ 1970年代，許多電路主要使用的電晶體是雙極性接面電晶體，這結構可使電路發揮原先單顆電晶體在電路板上組合時的功效。經由積體電路整合，可在單一晶片上實施原有電路板上的功能，而體積與重量大幅縮小，整個電路晶片功效大幅提升。

在整合多個元件在單一晶片上時，可想見的是大家努力把元件縮小，期使在有限晶片面積上可放置更多的元件，進而使得晶片的整合功能更加強大。這時逐漸發生在縮小技術下的各種製程開發與製程極限，這領域吸引了眾多的研發與投資。

對於高密度積體電路技術的研發，矽晶片一直扮演著關鍵角色，理由和這種材

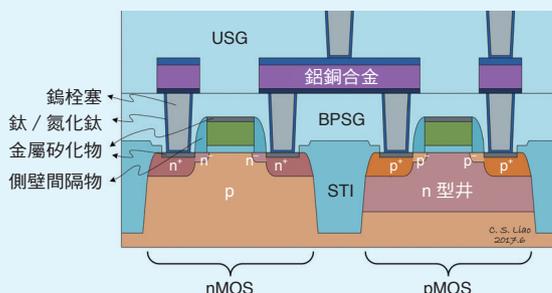
料可容易製備絕緣層與實施較先驅的縮小技術有關。1980 年代大量使用金氧半場效電晶體整合在積體電路上，使用的技術包括局部矽基氧化、二氧化矽平坦化流通、多層連線等。

在 1990 年代開發的技術，包括金屬矽化物、鎢栓塞、化學機械研磨、淺溝渠隔絕、側壁、輕摻雜汲極等。這些技術屬於高級半導體工程，多人開發的結果使得矽元件一直保持以固定的速率縮小，更使得積體電路可提供的功能持續放大，影響深遠。在國際間可提供積體電路實施的場所競爭相當激烈，甚至已達到可左右國家等級的經濟命脈。

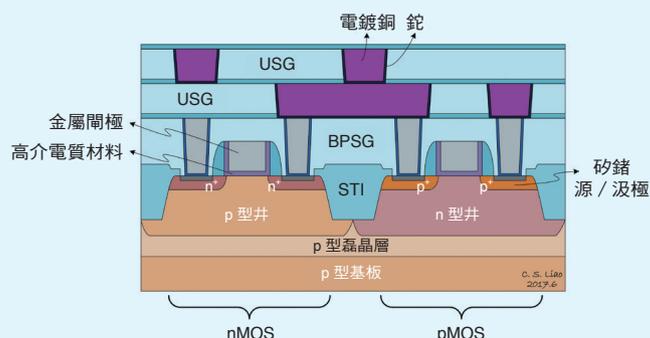
當元件縮小使得積體電路密度漸增之際，人類開始動腦把後段工藝予以多層堆疊，期使連線更智慧且更有效，這個需求動員了相當多的材料與製程整合，技術演進神速。在 2000 年代，使用技術包括銅導線、低介電質旋塗沉積、鑲嵌、高介電質金屬閘極等。每個新技術的背後都有多人探討相關的元件特性、可靠度、整合度及成本，提出許多專利，專利分布探勘與技術迴避也趨重要。

鰭式電晶體與奈米線電晶體

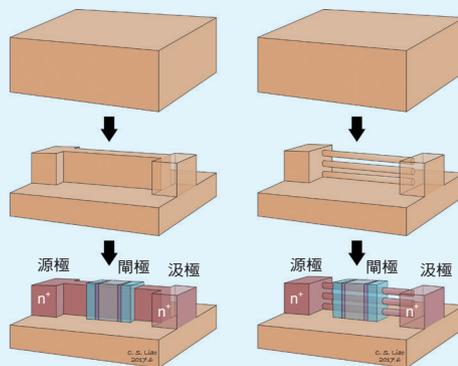
在關鍵電晶體元件的演進上，因為載子在半導體內移動會受到阻礙，如何使其速度提升會影響元件特性及其積體電路功效，因此相當敏感重要。在 2004 年至 2006 年期間，技術節點由 90 nm 演進至 65 nm，出現矽鍺源 / 汲極應力矽基技術，經由材料力學把晶體施加伸張或壓縮力，可使載子在不同方向的速度改變，達到較理想的元件特性。



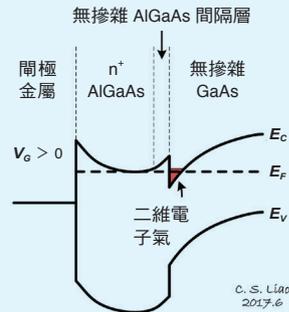
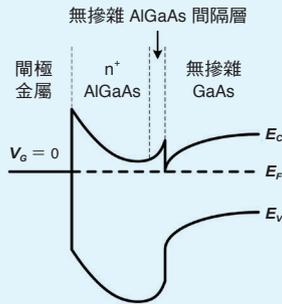
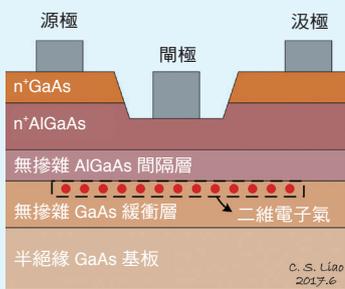
1980 年代開始主要使用金氧半場效電晶體，1980 年代使用的技術包括局部矽基氧化、二氧化矽平坦化流通、多層連線等，1990 年代使用的技術包括金屬矽化物、鎢栓塞、化學機械研磨、淺溝渠隔絕、側壁、輕摻雜汲極等。



2000 年代使用的技術包括銅導線、低介電質旋塗沉積、鑲嵌、高介電質金屬閘極等。

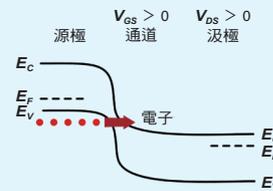
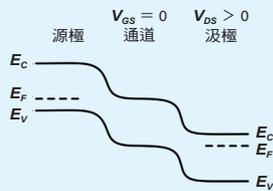
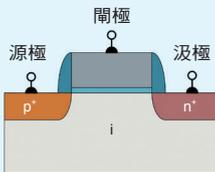


2004 年 (90 nm) -2006 年 (65 nm) 出現矽鍺源 / 汲極應力矽基，2008 年 (45 nm) -2010 年 (32 nm) 出現閘極後製高介電質金屬閘極，2012 年 (22 nm) -2014 年 (16 / 14 nm) -2017 年 (10 nm) 出現三閘、鰭式場效電晶體，2018 年 (7 nm) -2020 年 (5 nm) 出現閘極全包覆奈米線金氧半場效電晶體。

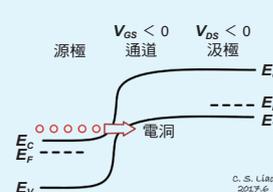
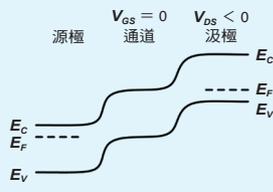
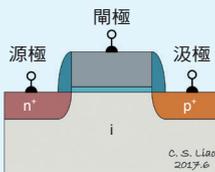


1979 年日本 Fujitsu 的 Takashi Mimura 發明的高電子位移率電晶體

n 通道 TFET



p 通道 TFET



2004 年 IBM 做出奈米碳管穿隧場效電晶體，其 SS 約僅 40 mV / decade，2010 年開始提出許多不同材料的穿隧場效電晶體。

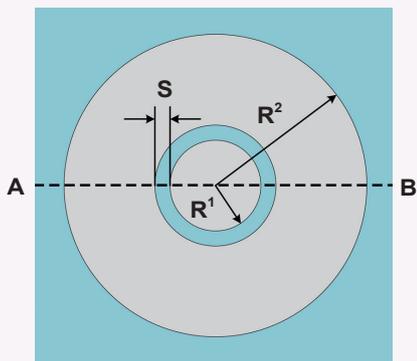
在 2008 年至 2010 年期間，技術節點由 45 nm 演進至 32 nm，出現閘極後製高介電質金屬閘極技術，這材料可因高介電使得在較厚的材料體上仍有足夠的電容，在很小的電壓工作範圍內仍可有效地驅動電晶體動作，而較厚材料的漏電流較小，符合現今縮小元件所需。在 2012 年經 2014 年至 2017 年期間，技術節點由 22 nm 經 16 / 14 nm 至 10 nm，出現三閘、鰭式場效電晶體技術，這技術可使電晶體的通道被閘極電壓控制的效率提高，在小電壓工作下就可使電晶體靈敏運作，也就是說開發高靈敏度感測的電晶體元件是現今極為重要的課題。

在不久的將來，預期於 2018 年至 2020 年期間，技術節點可由 7 nm 再演進至 3 nm，結構可能出現閘極全包覆奈米線金氧半場效電晶體。但是否如預期出現這結構，仍待密切觀察與注意。

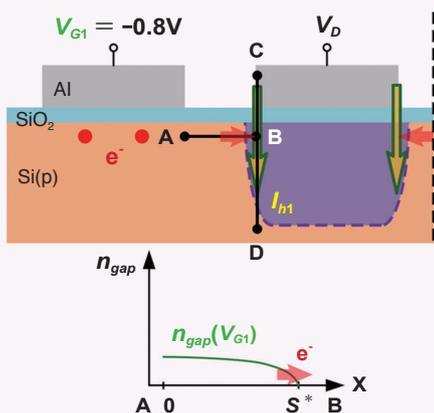
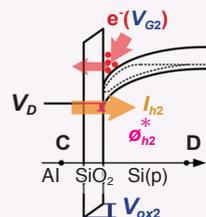
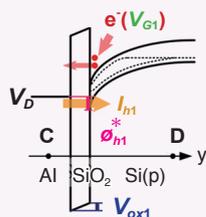
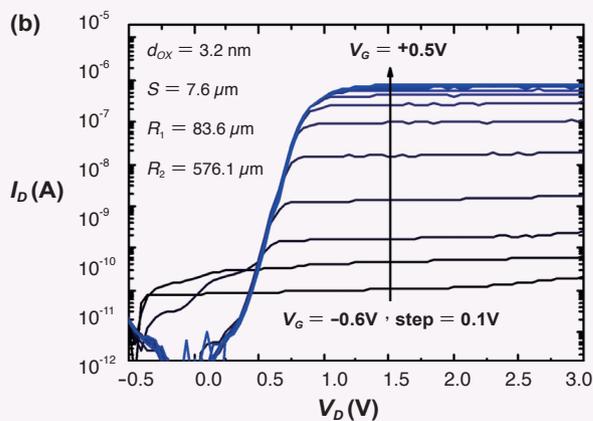
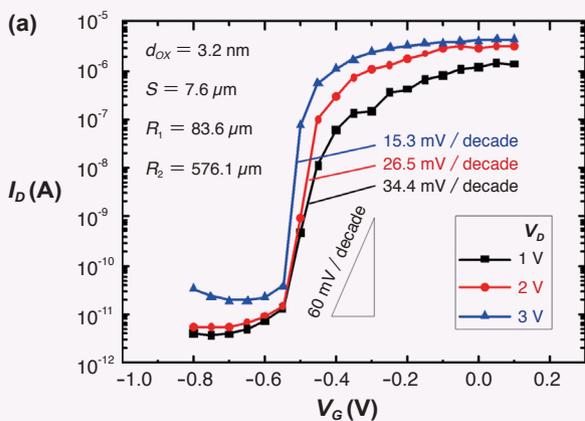
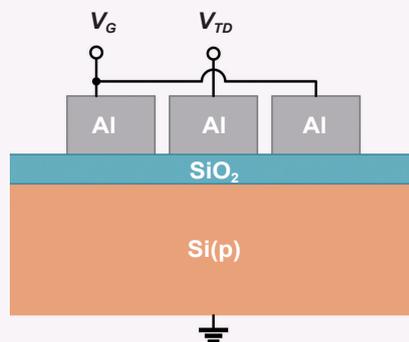
高電子位移率電晶體與穿隧場效電晶體

1979 年日本 Fujitsu 的 Takashi Mimura 發明高電子位移率電晶體，這結構採用了異質三五族半導體材料接面，經由設計與控制使得電子在半導體特殊通道層內呈現

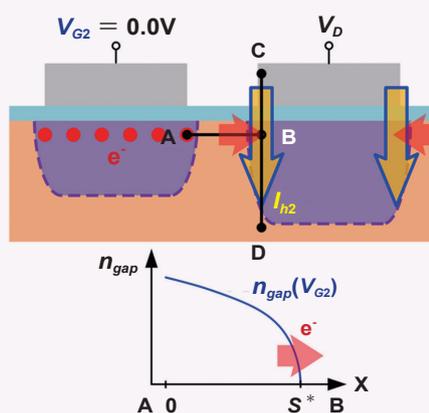
(a) Top view



(b) Cross section along \overline{AB}



$$I_{h1} < I_{h2}$$



2015 年由臺灣大學電機系與電子所胡振國和廖建舜提出的穿隧氧化層場效電晶體

出二維電子氣空間，再利用不同的摻雜分布，使得電子的位移率有效提升，對於強化電晶體功能具特殊效果。

當傳統元件結構面臨挑戰時，陸續開發提出許多高度利用半導體本質特徵做為新穎電晶體的結構。在 2004 年 IBM 做出奈米碳管穿隧場效電晶體，其 SS 約僅 40 mV / decade。之後在 2010 年間提出了許多不同材料的穿隧場效電晶體。這元件主要利用 PN 接面間的穿隧機制進行通與不通的開關，是高度量子力學穿隧效應的展現。

超薄氧化層金氧半雙穿隧二極體耦合電晶體

在 2015 年由臺灣大學電機系與電子所胡振國和廖建舜提出的雙耦合穿隧氧化層場效電晶體，利用一超薄氧化層結構，並製作內圓形外環圍繞的雙電極，也就是雙耦合的金氧半 MIS (p) 穿隧二極體，以中央圓形電極 MIS (p) 為感應元件，外圍 MIS (p) 是少數載子控制區，可得到相當靈敏的電晶體特徵，其 SS 可小至 15.3 mV / decade，是新穎的結構。

在未來的半導體元件世界，可想見元件尺寸還有縮小的空間，元件材料也還有許多候選者等待選用。但會有更多的問題有待克服，尤其是兩元件間彼此的干擾耦合會漸行嚴重，如何把其特徵加以有效應用或遏止，會是一種嚴峻的挑戰。此外，對於高靈敏度感應電晶體的需求，會隨著物聯網的大量應用而更形重要。這些問題都仰賴更多優秀學子不斷投入研發與創新，才可持續保持國家半導體工業居於國際領先的地位。這個半導體的世界應還會繼續左右人類生活，其重要性只會擴大不會消失。

胡振國
臺灣大學電機系暨電子所

廖建舜
臺灣大學電子所
