

摩爾定律如何塑造半導體產業？ 兼論台灣半導體生態體系

葉守禮*

一、「摩爾定律」是什麼？

二次大戰期間，英國徵召數學家圖靈率領團隊製作電腦，成功破譯德軍密碼，加速了盟軍勝利的進程。這也是電影《模仿遊戲》故事的雛形。

受到技術條件的限制，當時電腦使用電動機械裝置控制繼電器，由此產生 0 與 1 的訊號，從事人腦難以企及的複雜運算。這套裝置體積龐大，容易故障，功能極其有限，卻是跨越人類科技史的里程碑。

到了冷戰時期，導彈系統與太空競賽持續推動電腦技術發展。過程中，電動機械裝置為真空管所取代，真空管又被半導體取代。直到今天，兼具絕緣體與導體性質的半導體，仍是最可靠、有效和精準的電子開關素材，成為一切電腦運算的基礎。

很長一段時間，軍方主導了電腦的研發與使用，這項科技因此蒙上了集權與暴力的色彩，讓人聯想起一旦觸發就會毀滅世界的核子導彈自動反擊系統。1968 年，諾伊斯和摩爾聯手創立了英特爾，他們的目標是創造商用晶片，嘗試改變電腦的形象與用途。

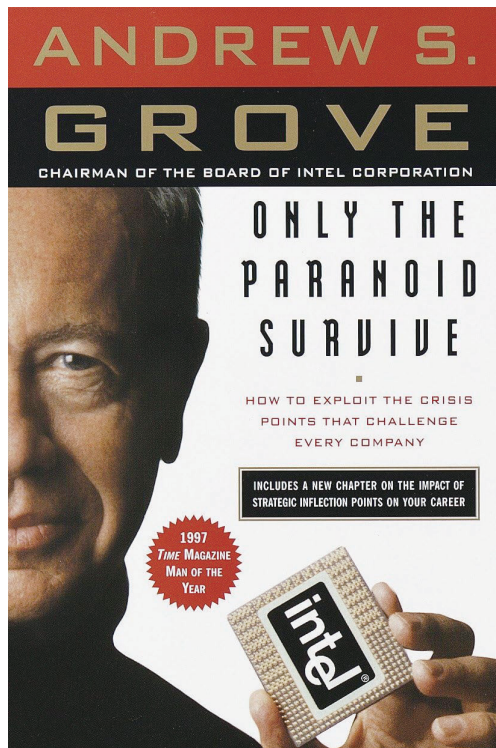
為了推銷晶片，摩爾宣稱，按照製程微縮的進程，積體電路上可容納的電晶體數量每兩年將會增加一倍（後來縮短到 18 個月），到時晶片運算效率將大幅提升。

這就是所謂的「摩爾定律」。嚴格來說，這只是一種商業性預告，表示可以預期的未來，即使小小一枚晶片也能承載巨大運算力，到時電腦體積可望大幅縮小，裝載在許多電子產品之中，開啟商業應用與生活方式的無限想像。

* 逢甲大學創能學院助理教授

「無論你的生計是什麼，這種日益加快的變化速度勢將衝擊到你。新的競爭將會來自你不曾料想到的角落，來自做事情或製造東西的新方法。」

很長一段時間裡，這種永不停歇的緊張、偏執和焦慮，將會成為全球化時代的底色，尤其貫穿了半導體產業。



圖二：唯有偏執狂得以倖存（圖源：亞馬遜購書網站 / https://m.media-amazon.com/images/I/71IkShkBq1L._SL1242_.jpg）

二、張忠謀的賭注

契機來自於消費性電子產業的蓬勃發展，尤其是資通訊設備的革命。1980至90年代，賈伯斯與比爾蓋茲等英傑，推出了個人電腦這項劃時代的產品，席捲了世界。

泰納（Fred Turner）在《尋找新樂園》（*From Counterculture to Cyberculture*）指出，嬉皮精神的融入，使電腦從軍事科技中解放出來，微型化的電腦將適於個人使用，這將會改變社會組織的方式，網際網絡則打破了現實世界的藩籬。



圖三：台積電創辦人張忠謀（圖源：維基百科 / <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%BC%B5%E5%BF%A0%E8%AC%80#/media/File:%E5%BC%B5%E5%BF%A0%E8%AC%80.jpg> (Official Photo by Wang Yu Ching/Office of the President))

1984年賈伯斯推出麥金塔電腦，並在電視廣告中致敬了歐威爾的《一九八四》，賦予個人電腦反抗權威的形象，揭開了新時代的序幕。

個人電腦的時代來臨了，為半導體產業帶來夢寐以求的高增速市場。為了與 Apple 分庭抗禮，IBM、微軟與英特爾形成深度綑綁的同盟，定義了現代個人電腦系統與規格。在葛洛夫的領導下，英特爾幾乎成為 CPU（中央處理器）的代名詞，“Intel Inside”的口號為消費者創造了深刻的印象。他們採取垂直整合的經營模式（IDM），親自進行晶片設計、製造與封裝測試。

這種模式非常合理，因為英特爾主導了每一代 CPU 的更新和設計，也只有他們才能掌握創新、技術與製造的細節。尤其晶片行業的產品生命週期非常短促，垂直整合有利於進行長遠規劃。堅守「摩爾定律」的升級進程，成為英特爾甩開競爭者的重要商業策略。

1987年，張忠謀創立台積電，他建議採取專業晶圓代工（foundry）的商業模式，最初遭到政府官僚與投資人的普遍質疑。政府最初希望打造自主的半導

體產業，張忠謀卻主張為歐美品牌代工，實在不符合期待。歷經一番波折，台積電才獲得政府有限度的支持。日後，雖然學術界公認政府對於產業發展的貢獻，張忠謀本人卻始終懷有情緒。

無論如何，歷史證明張忠謀的眼光完全正確。在全球競爭的態勢下，台灣根本不可能挑戰英特爾的地位。張忠謀敏銳察覺，市場還有許多需求沒有被滿足，但是大多數企業不想親自投入半導體製程，巨大的固定資本開銷與研發成本使他們裹足不前。

這是因為半導體製程的難度很高，需要大量研發支出，升級與淘汰的速度又很快，設備折舊速度驚人。除非像英特爾獨占 CPU 那樣的成功產品，否則根本無利可圖。

張忠謀看準了這點，於是提出專業晶圓代工的商業模式，將台積電定義為製造服務業，專門為國際客戶製造晶片，提供客製化的研發與製程。如此一來，大門暢開，台積電可以承接全世界的訂單，規模效應攤平了設備成本，於是客戶可以專注於晶片設計、性能開發與商業應用，製程方面的成本與挑戰則由台積電來克服。

實際上，台積電的商業模式相當於把別人不想幹的苦活，接過來做。這就好比出版社和印刷廠分離開來。因此，最初英特爾並不感到威脅。代工一直給人辛苦卑微的形象，這個模式的顛覆性直到十幾年後才變得明顯。

關鍵在於，專業晶圓代工廠商的出現，使得無廠半導體公司（fabless）成為可能，從此這些企業不必擔心晶片製造的成本與門檻，可以大膽研發不同用途的晶片，就此開創了半導體產業的嶄新生態。

這是一種共生的夥伴關係。若是沒有台積電，NVIDIA 的 GPU、高通的智慧型手機晶片或 Apple 的 iPhone 晶片，都不會出現，因為上述企業都沒有自己的晶片製造工廠。隨著台積電逐漸展露出規模、良率、成本等方面的優勢，英特爾為了節約成本，甚至也將一部分 CPU 交由台積電代工。

三、拉開差距

全球化經濟的推波助瀾下，2000 年代個人電腦、筆電與智慧型手機成為新的經濟增長引擎，改變人類生活方式的同時，也重塑了供應鏈生態。顯而易見，所有資通訊產品都要裝載晶片，運算能力也取決於晶片效能，半導體產業因此具有舉足輕重的地位。

晶片發生了市場分化，「先進製程」代表性能最為優異的尖端晶片，「成熟製程」則是相對落後的普通晶片。不過，兩者只有相對的意義，因為隨著「摩爾定律」不斷推進，當初的先進製程也將淪為成熟製程。實際上，成熟製程並非沒有商業價值，反而更加實惠與穩定。只有 Apple 這樣的頂尖全球化企業，為了區隔其他平價品牌，堅持最新產品必須採用先進製程晶片，這才是「摩爾定律」背後的商業邏輯。

只不過，從事先進製程意味著年復一年挑戰科學的極限，製程也從微米進展到奈米。其困難程度，就好比在一根頭髮的寬度內，雕琢一幅清明上河圖……

到了 2000 年代，業界發出「摩爾定律已死」的恐慌，單純提高電晶體密度的辦法不再可行，微縮製程遭遇物理極限，很難克服電子漏電的問題。

此時全球有能力推進先進製程的廠商，基本上只剩下英特爾、台積電和三星電子，龐大研發費用與設備支出推開了二三線的製造商。英特爾仍穩坐龍頭寶座，垂直整合模式具有明顯優勢，能將資源集中在明確的產品線。三星電子同樣採取垂直整合的模式，後來也跨足晶圓代工，競爭力更為全面，還多次搶走 Apple 的大訂單。

2010 年代中期，台積電才真正拉開差距，甩開了英特爾和三星電子。當時晶片從平面構造轉向立體構造，並且實施微影蝕刻，製造難度大幅提高，充滿了不確定因素。技術升級不再是直線的接力賽，而是沒有明確道路的越野賽跑。

垂直整合模式顯得過於僵硬，需要布局研發的細節領域太多，資源集中反而成為風險。英特爾的製造良率突然失控，延誤了後續的進程。此外，英特爾還錯失了智慧型手機的發展，過去的成功造成盲點，太過依賴內部的資源，不夠重視其他客戶的差異化需求。

三星電子也遇到類似問題。作為韓國首屈一指的大財團，三星電子原本指望促成內部業務與外部客戶的良性循環發育，然而 iPhone 和三星手機本身是競爭關係，反而造成角色衝突與信任危機。

相對地，台積電專注於客製化的量產製造，和不同客戶一起研發新產品，預知了不同領域的技術路徑和期待，保證絕不洩漏機密，並且集結全世界最優秀的協力廠商共同設計解決方案，慢慢走出了一條不同的路。

新冠疫情期間，供應鏈斷鏈導致晶片短缺，國際媒體才驚覺台積電控制了全世界大多數先進製程晶片。

「世界上幾乎所有最先進的處理晶片，都是由台灣的台積電生產。」米勒 (Chris Miller) 在《晶片戰爭》中，無法掩飾他的訝異：「相較之下，石油輸出國組織 (OPEC) 的產油量占全球產量的 40%，那看起來就沒什麼大不了了。」

從那時到現在，半導體成為地緣政治的敏感話題。美國人陷入了迷惑：憑什麼沒人可以替代台積電？過去如日中天的英特爾，怎會陷入今天的頹勢？

這幾年，人工智慧取代資通訊產品，成為新的增長引擎，NVIDIA 的股價超過了 Apple。承蒙上天眷顧，台灣半導體產業碰巧是最大受益者。按照業內的評估，未來十年之內，台積電仍將穩坐高端 AI 晶片的製造龍頭。



圖四：台積電位於新竹的全球研發中心（圖源：維基百科/<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8F%B0%E7%81%A3%E7%A9%8D%E9%AB%94%E9%9B%BB%E8%B7%AF%E8%A3%BD%E9%80%A0>。原始圖檔提取自：曾成訓 / <https://www.flickr.com/photos/tsengphotos/53114942112/> (CC BY 2.0))

四、台灣的半導體生態體系

西方媒體至今難以相信，小小一家台積電，為何能夠掌控全世界絕大多數的先進製程晶片？部分政治人物甚至發出「台灣偷走了晶片」的質疑。

從社會學的角度來看，台積電的運作模式相當獨特，不應理解為一間孤立

的廠商，而是由眾多協力廠商組成的複雜生產網絡，業界稱作「台積供應鏈」，或可稱之為「半導體生態體系」。

有別於歐美的全球化企業，也不同日本與韓國的大財團，台灣製造業向來以中小企業為主，競爭力來自產業群聚的規模效應、範疇經濟與創新能力，能夠適應多樣多變的客戶訂單，特別具有彈性與韌性。

以新竹科學園區為代表的高科技產業，雖然更加技術與資本密集，難以稱之為中小企業，但是這些廠商同樣延續了「彈性專業化」的網絡化生產型態。簡言之，仍以契約製造（代工）為主，以客戶訂單為單位進行生產活動，並將複雜技術環節外包給協力廠商。

台積電也不例外。打從一開始，台積電就自我定位為製造服務商，深度依賴全球供應鏈的協作。從上游的 IC 設計，中游的晶圓代工（包含設備、材料廠商），到下游的封裝測試，每一枚晶片都經由上千間廠商協作打造。

從汐止到南科，台灣集結了全球最完整、最密集的半導體生態體系，在開車一兩個小時能抵達的範圍，幾乎能夠找到一切問題的解決方案。這是全球供應鏈發育的產物，而非政策直接規劃的結果，許多廠商也不屬於科學園區。

台積電等大廠，是供應鏈最重要的樞紐，然而大型客戶的訂單，才是塑造生態體系發展的驅動力。換句話說，還得看到冷戰後的三十年裡，以美國為中心的資通訊革命如何創造龐大市場需求，重塑全球經濟。台灣半導體產業則扮演世界的兵工廠，為自己爭取了一席之地。

這是一段獨特的歷史時期。也是在這三十幾年，台積電苦心服務西方企業，逐漸練就了一身功夫，並且培養出一批世界級的供應鏈夥伴。

史欽泰、陳添枝與吳淑敏的《從邊緣到核心：台灣半導體如何成為世界的心臟》，即表達了這樣的弔詭：「產業早期的時候，晶圓代工模式並沒有太高價值，技術領先的半導體企業如英特爾，看不上這種低利又爆肝的生意。只有台灣因為技術落後，且無國內市場可支撐大規模生產，不得已選擇了這個模式。」

豈知風水輪流轉。直到 2010 年代，製程變得更加複雜與困難，英特爾陷入困境，反而是台積電獲得成功，網絡化生產模式發揮出難以匹敵的多樣、靈活、創新與強韌，使台灣扛起延續「摩爾定律」的重責大任。歷史就是這樣有趣。

從這個角度來看，「護國神山」是稍嫌片面的描述，半導體生態體系才是台灣最重要的資產，成功將「摩爾定律」指數級成長的壓力，分散、轉化、轉嫁給數以千計國內與國際廠商構成的協力生產網絡。

2023 年張忠謀接受《天下雜誌》採訪時，如此解釋台積電的獨特優勢：「台積電已經學會與 400 位夥伴 (partners) 共舞。英特爾總是自己獨舞。」

這些誇張的數字，彰顯了網絡化生產的強大韌性與整合能力。2024 年《台積電年報》表示，該年他們為 522 家不同的客戶，利用 288 項不同的製程技術，生產了 11,878 種不同的產品。同一年台積電的《責任供應鏈報告》盤點出 609 家關鍵供應商，其中包括 387 家第一階供應商以及 222 家非第一階供應商。

供應商背後還有更多供應商。根據海因克的《造光者》統計，荷蘭設備廠商 ASML 為了打造最先進的曝光機，需要協同超過 200 家核心零件供應商，合作廠商總計高達 5,000 餘家。更重要的是，ASML 必須一絲不苟呼應台積電的技術升級路徑，台積電則專注於滿足客戶最瘋狂的要求。

「摩爾定律」是近代最有趣、最影響深遠的商業預測，也是一段艱辛的「自我實現的預言」。當年，英特爾在第一代 10 微米晶片中集成 2 千多顆電晶體，已經代表科技製造的最高水平。今天台積電為 NVIDIA 打造的 H100 GPU 晶片，集成了 800 億顆電晶體，其複雜程度完全超過普通人能夠認知的範圍。

晶片是人類科技史上最顛峰造極的工藝產品。供應鏈說來簡單，卻是無數工程師日以繼夜工作的結果。為了打造電晶體的微觀世界，動員了全球網絡的資金、技術、勞動與廠商。世界經濟就這樣運轉起來。但是，沒有人知道「摩爾定律」還可以延續多久。