



國立陽明交通大學

孫元成 副校長

從氫原子到 3D IC 的創新、傳承 與系統微縮之路

The Journey from Hydrogen Atoms to 3D IC: Innovation, Legacy and System Scaling

撰文：林麗娥

隨著 AI 浪潮席捲全球，以及傳統純依賴電晶體微縮的發展模式逐漸面臨功耗、成本與系統整合等挑戰，先進封裝與異質整合技術已成為提升系統效能的重要關鍵，並與先進製程共同構築下一世代半導體發展藍圖。有鑑於此，「3D IC 異質整合先進封裝製程量測與檢測技術」專題，並邀請早在二十多年前便前瞻洞察 3D 封裝與「系統級微縮 (system scaling)」發展趨勢的重要推手—國立陽明交通大學副校長孫元成教授接受專訪。從臺灣大學求學時期的青澀學子，到遠赴美國深造，再到加入 IBM 投入半導體前瞻技術研發，孫副校長累積了

深厚的國際研發經驗。在台積電成立十周年之際返臺加入經營團隊，推動多個關鍵世代製程技術發展，成為帶領臺灣半導體產業邁向世界領先地位的重要推手之一。職涯期間，他帶領研發團隊跨越無數從前瞻技術走向量產的「死亡之谷」，成功將創新構想轉化為產業競爭力。如今，他將豐富的產業歷練帶回高等教育體系，致力於縮短產學落差，建立人才培育與產業發展的良性循環。本篇專訪將帶領讀者深入了解孫副校長的求學歷程、研發管理哲學，以及他對半導體技術發展與半導體人才培育的前瞻觀點與宏觀願景。

站在巨人的肩膀上：恩師的啟發與治學底蘊

回憶起求學歷程，孫副校長表示對他人生與專業影響最深的是兩位半導體界的巨擘：一位「浮閘非揮發性半導體記憶體 (floating-gate non-volatile semiconductor memory, NVSM)」發明人之一的施敏院士；另一位則是「互補式金屬氧化物半導體 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS)」技術發明人之一的薩支唐院士。施敏院士任職於美國貝爾實驗室 27 年期間 (1963－1989)，曾五次留職停薪，回臺灣授課。1974－1977 年間，施敏院士第三度回臺灣，於國立臺灣大學任教三年，孫副校長正是在這段期間很幸運的成為施敏院士的門生。上課的教材則是施敏院士於 1967－1969 年所撰寫的《半導體元件物理學》，該書發行後很快受到全球矚目，翻譯成 6 國語言、發行超過 300 萬冊，成為全世界半導體和積體電路領域師生、研究人員進入 IC 領域的經典書籍，成為全球最暢銷的「半導體界聖經」。

施敏院士不僅傳授孫副校長半導體物理知識，更給予他深遠的跨國職涯建議。施老師提醒學生，出國深造不能只顧著埋首課業，還必須深入了解當地語言與文化，甚至要「能聽懂當地的幽默與笑話，並比別人更早掌握其中的笑點」。因為幽默往往蘊含一個社會的文化背景、思維模式與價值觀，能夠理解並自然回應，不僅代表真正融入當地環境，更有助於建立信任感與共同話題，拉近人際距離。在高度全球化的半導體產業中，這種跨文化理解能力往往是促進團隊合作、跨國溝通與文化融合的重要橋樑。而這項能力也成為孫副校長在日後的國際職場中，能與來自不同國家團隊順利協作的重要基礎。

此外，施老師也建議畢業後的第一份工作「不要挑薪水最高的」，而是要選擇一個能真正學習與成長的地方。因為職涯初期最重要的資產不是薪資，而是所累積的技術能力、工作方法、人脈網絡與產業視野；若能在群賢齊聚的環境中接受挑戰與薰陶，未來所創造的價值與發展空間往往遠超過起薪的差異。這份忠告深深影響了孫副校長，也促使他最終加入 IBM，奠定了深厚的研發基礎與國際視野。

孫元成副校長在美國攻讀博士學位期間，師從半導體元件大師薩支唐院士。薩老師不僅傳授專業知識，更讓他深刻體會到嚴謹求實、凡事親力親為的治學精神。在薩老師的實驗室裡，學生不僅要具備理論基礎，更必須擁有紮實的實作能力。孫副校長回憶，當時實驗室曾因雷擊感應而導致電腦設備損壞。雖然閃電未直接擊中設備，但其產生的強大電磁場在電源線與訊號線上感應出高電壓突波，進而損壞電子元件，使實驗室內先進的數位化迷你電腦 (mini computer) 量測及網路系統全面停擺。

面對突如其來的故障，他帶著實驗室同學並未尋求外部支援，而是在老師的指導精神下親自投入維修工作，將 HP 系統的電路板逐一拆卸檢查，仔細找出遭突波損壞的電阻、二極體等元件，再逐一更換修復。經過反覆測試與排除，最終成功讓系統恢復正常運作。

做研究最令人感動的地方之一，莫過於為後人點亮前行的道路

在薩老師的指導下，除了養成極為嚴謹的治學態度，孫副校長也深刻體會到研究不能只停留在現象描述，而必須回到最基本的原子與分子層次探究問題本質。博士研究期間，孫副校長與研究團隊觀察到一個難以解釋的電性異常現象。面對這項發現，薩老師並未急著尋找現成答案，而是鼓勵學生從最根本的物理機制出發，逐步追溯其成因。經過長時間的實驗驗證與理論分析，他們最終發現，造成異常現象的關鍵竟是最輕、也最容易被忽略的元素—氫 (hydrogen)。

研究團隊率先證實，氫原子會與半導體中的受體雜質 (acceptor impurity) 結合，形成所謂的「氫鈍化 (hydrogen passivation)」現象，使原本具有電性活性的受體失去作用，進而改變材料的電性表現。他們進一步透過實驗證明，高能電子所造成的效應與氫原子的移動及鈍化機制密切相關。這項研究不僅解釋了當時觀察到的異常現象，也深化了學界對半導體材料中氫原子行為的理解。

當時，這項研究看似是基礎科學上的突破，不僅有助於當時強化浮閘記憶體的可靠度，更在多年後展現出其他深遠影響。隨著氮化鎵 (GaN) 材料的發展，P 型氮化鎵的製作面臨重大瓶頸。而受到孫副校長與薩老師的團隊早年建立的氫鈍化理論與實驗基礎的啟發，研究人員逐漸發現氫同樣會與 P 型 GaN 摻雜所使用的鎂 (Mg) 形成複合體，導致受體失去活性。這為後續研究人員提供了重要的科學依據與研究方向，啟發了赤崎勇 (Isamu Akasaki)、天野浩 (Hiroshi Amano)、中村修二 (Shuji Nakamura) 三位日本學者成功克服 P 型氮化鎵活化問題，推動藍光 LED 技術走向實用化，進而開啟高效率照明與顯示技術的新時代，並於 2014 年共同獲得諾貝爾物理學獎。對孫副校長而言，自己的基礎研究能夠在多年後成為後人解決關鍵問題的重要拼圖之一，正是科研工作最令人感動的價值所在。

博士畢業後，孫副校長加入 IBM 從事先進 CMOS 製程研發。當時半導體產業正積極朝次微米 (sub-micron) 世代邁進，為了提升元件效能，研究團隊採用重摻雜硼 (boron) 的 P 型多晶矽閘極 (P+ Poly Gate) 技術。然而，在製程微縮過程中卻遭遇了嚴重的「硼穿透 (boron penetration)」問題：硼原子會穿過極薄的閘極氧化層，導致元件特性劣化，使先進製程的開發一度陷入瓶頸。

面對這項挑戰，孫副校長並未只停留在製程參數的調整，而是再次回到薩支唐老師所強調的「基本面思維」，從原子層級重新檢視材料與製程中的物理機制。經過深入分析後，他與團隊發現，氫相關效應在硼穿透問題中扮演了重要角色；透過重新設計製程並有效控制氫對材料系統的影響，率先成功解決了硼穿透現象，協助先進 CMOS 製程技術持續向前推進。

談起這段經歷，孫副校長常笑稱自己與「氫」似乎特別有緣。從博士研究時揭開氫鈍化受體雜質的機制，到 IBM 時期再度面對氫相關效應帶來的技術挑戰，氫原子彷彿一再出現在他的研究生涯之中。然而，這些經歷也讓他更加體會到，真正能夠解決重大技術問題的方法，往往不是停留在表面的現象，而是回到最基本的科學原理，理解問題發生的根源。這正是薩支唐老師留給他最珍貴的研究訓練，也是他受用至今的重要信念。

跨越研發的「死亡之谷」，形塑對事不對人的企業文化

在台積電成立第十年時，孫副校長歸國加入經營團隊，將尖端研發 (R&D) 與工廠製

造端緊密結合。他分享，許多前瞻技術之所以會失敗，是因為走不出從好點子到實際量產的「死亡之谷 (valley of death)」。以 0.25 微米製程的開發為例，當時團隊面臨了巨大的挑戰，主要原因在於缺乏正確的測試載具 (test vehicle) 與系統性的除錯方法，大家只能憑直覺像「撒網」一樣盲目嘗試。為了解決這個困境，孫副校長導入了科學化的專案管理與問題解決 (problem solving) 機制，例如利用「魚骨圖 (fishbone diagram)」帶領團隊釐清問題本質，強調大膽假設與小心求證。在組織管理方面，他也積極塑造「對事不對人」的團隊文化。面對研發、製程整合與生產製造等跨部門合作需求，他強調所有成員必須朝向共同目標努力，並建立明確的權責分工與成果共享機制，讓團隊成員無須擔心功勞歸屬問題，進而降低部門本位主義所造成的摩擦與內耗。透過這些機制，台積電得以在每一代「革自己命」的技術迭代中，不斷挑戰既有技術、完成自我革新，最終將創新技術成功落實於量產製程之中，逐步建立全球半導體製造領導地位。

洞見未來：提倡「系統級微縮」的半導體發展概念

早在約二十年前，孫元成副校長便敏銳地觀察到，隨著電晶體尺寸持續微縮，先進製程中的導線延遲、功耗與訊號傳輸等問題日益嚴峻，單純依循摩爾定律進行單一晶片微縮，終將面臨技術與成本上的瓶頸。基於這樣的前瞻判斷，他在台積電擔任研發主管期間，便積極推動相關布局，於 2006 年率先成立專責後段整合 (backend) 與先進封裝技術的研發團隊，並投入矽中介層 (silicon interposer) 等關鍵技術的開發，為日後異質整合與 3D IC 技術奠定重要基礎。

談及近年來備受矚目的 3D 封裝技術，孫副校長指出，產業界對其發展潛力抱持高度期待，但也出現部分過度簡化甚至誇大的論述。有些產業為了凸顯自身技術的重要性，宣稱「摩爾定律已死，未來完全要靠 3D 封裝」。對此，孫副校長持保留態度。他強調，3D 封裝與異質整合固然是延續系統效能提升的重要途徑，但並不代表晶片本體的微縮已失去價值。相反地，先進封裝與元件微縮應是相輔相成、同步發展的兩條技術路線。

為了解決未來的運算挑戰，孫副校長明確提出了「3D×3D」的架構，這包含兩個必須同時推進的維度。

第一個 3D (元件本體的微縮創新)：指的是元件本體如：電晶體、記憶體等核心元件仍必須持續朝向三維結構發展與微縮，不能因為封裝技術的進步而停止創新。例如近年廣泛應用的 3D NAND 快閃記憶體，以及新世代 DRAM 三維化架構的研發，都是此一方向的重要代表。孫副校長形容，這條技術路線就像挑起整個半導體產業發展重擔的「扁擔」，是支撐運算能力持續提升的根本。

第二個 3D (異質整合封裝)：指的是積極推動異質整合的 3D IC (heterogeneous 3D)，透過先進的封裝技術，將不同功能的晶片 (例如 GPU 與 HBM 高頻寬記憶體) 進行緊密的垂直或高頻寬連結。

孫副校長指出，上述這兩條 3D 路徑必須相輔相成；元件本體的突破能帶動封裝的進步，而封裝的創新又能回頭賦予元件新的應用空間。他將這兩者結合的總體成效命名為「系統級微縮 (system scaling)」，有時也稱之為「超摩爾 (Super More)」。他認為，現在的技術價值取決於整體系統是否能發揮更高的綜合效能與經濟價值。追求系統級微縮的最根本目的，就是要達到「輕薄短小、快、又省電」的完美境界。面對現今 AI 大語言模型、超

級電腦以及動輒耗費龐大電力 (以 GW 計) 的資料中心，單一晶片 (SOC) 已無法應付龐大的算力和數據吞吐量。唯有透過 3D×3D 的系統級微縮，落實「近記憶體運算 (near-memory computing)」，引進矽光子和其他節能、高頻寬、高速信號傳輸技術來搭配傳統銅線傳輸，再加上類人腦的「記憶體內運算(in Memory Computing)」，才能真正解決 AI 時代面臨的算力與高頻寬與高能耗挑戰。

搭建 CCIC 共創平台：培育未來半導體人才正循環

目前身處高教體系的孫副校長，正將其豐沛的產業經驗轉化為教育的養分。面對半導體產業的人才荒，自台積電退休後，於新冠疫情期間受邀擔任國立陽明交通大學創新研究學院創始院長，並將其運作核心定位為「CCIC」：Connect (連結)、Collaborate (合作)、Innovate (創新)、Create (共創)。該平台不僅整合校內資源，更作為與產業界共創的橋樑，甚至提早佈局了關鍵設備與材料自主化的前瞻研究。對於未來的產學發展，他大力提倡建立人才的「正向循環」，鼓勵業界專家來到學校擔任雙聘或兼任教師，將實務的最前線經驗傳承給下一代，這也是企業為了自身長期技術發展必須做出的投資。最後，他勉勵年輕學子與讀者，面對 AI 時代的衝擊，在精進技術底蘊之餘，更要培養跨文化的軟實力、精準界定問題的洞察力以及快速執行的行動力。唯有抱持著「互利共生」的心態，幫助夥伴成功，才能在未來的全球半導體賽局中贏得信任，發揮真正且持久的正向影響力。