

「3D IC 異質整合先進封裝製程量測與檢測技術」專題介紹

Special Issue Introduction to “Process Metrology and Inspection Technologies for 3D IC Heterogeneous Integration and Advanced Packaging”

客座主編－陳冠能 博士

國立陽明交通大學國際半導體學院院長

隨著人工智慧 (AI)、高效能運算 (HPC) 與邊緣運算的蓬勃發展，全球半導體產業正處於一個關鍵的轉折點。過去單純依賴電晶體線寬微縮以提升效能的模式，如今已面臨物理極限、功耗攀升與製造成本的嚴峻挑戰。為了突破這些瓶頸，先進封裝與異質整合技術已成為延續摩爾定律、推升系統整體效能的核心路徑。本期《科儀新知》特別規劃「3D IC 異質整合先進封裝製程量測與檢測技術」專題，本人承蒙邀請擔任客座主編，集結產學各界學者專家，從前瞻技術藍圖、設計平台、關鍵材料、加工製程到檢測與失效分析，為讀者帶來全方位的深度解析。以下為本期專題文章的重點精華：

本期特別專訪了國立陽明交通大學孫元成副校長，分享他從早期氫原子鈍化機制研究，到帶領研發團隊跨越技術量產「死亡之谷」的寶貴歷程。孫副校長前瞻性地指出，未來的半導體發展必須仰賴「3D×3D」的系統級微縮 (system scaling) 架構，亦即在元件本體持續微縮的同時，結合異質整合的 3D IC 技術，進一步實現輕薄短小、高速運算與低功耗兼具的最佳效能表現。

打破高門檻的 2.5D/3D 異質整合平台－在學界與新創團隊邁入先進封裝領域時，往往面臨極高的成本與技術門檻。為此，國研院台灣半導體中心 (TSRI)－吳伯昌組長詳細介紹了台灣半導體研究中心所開發的 CoCoB (Chip on Chip on PCB) 異質整合平台。該平台建構於 0.18 μm CMOS 製程之上，並導入 Backside TSV、標準化設計規則與 EDA 驗證流程，為學術界提供了一個可靈活整合數位、類比及感測器等不同功能晶片的實作場域，大幅加速次世代系統原型的開發。

化學材料與供應鏈角色的蛻變－隨著封裝結構立體化，化學材料不再僅是製程耗材，而是決定良率與可靠度的關鍵夥伴。長春人造樹脂廠股份有限公司－陳厚福總經理等人深入剖析了先進封裝製程中的關鍵材料與化學品需求，包含應對高深寬比結構的光阻材料、確保無空洞填銅的電鍍液，以及兼顧高導熱與低應力的封裝樹脂等。文章亦指出，在全球 ESG 永續趨勢下，溶劑的回收純化與低碳材料設計，已成為供應鏈轉型的重要指標。

閉迴路良率管理與先進檢測技術—3D 堆疊製程的層數增加，使得任何單一節點的微小缺陷都可能導致最終產品失效。辛耘企業股份有限公司－洪堂欽協理探討了 3D IC 先進封裝的製程參數與檢測量測方法，詳細說明 TSV 蝕刻、晶圓薄化、暫時性接合與剝離 (TBDB) 等關鍵技術的工程挑戰。更重要的是，文章強調應結合 IR/NIR 隱裂檢測、3D AOI 及 X-ray 等非破壞性檢測技術，建立「製程－量測－資料回饋」的閉迴路機制，以有效攔截缺陷並提升堆疊良率。

跨尺度先進封裝失效分析—先進封裝的高密度互連與多層異質材料堆疊，讓失效機制變得極為複雜隱蔽。閎康科技股份有限公司研發中心－邱珮如專案管理副理系統性地介紹了一套整合型的失效分析流程：首先利用 EMMI 或 OBIRCH 進行電性熱點定位，接著透過 Nano-CT 及超音波掃描 (SAM) 進行非破壞性結構透視，最後搭配精準的離子束剖面 (PFIB) 與微觀物理分析。文章特別強調了透射菊池繞射 (TKD) 奈米晶體驗證技術，其突破了傳統電子背向散射繞射 (EBSD) 的解析度極限，成為驗證次微米混合鍵合 (如奈米晶銅 nc-Cu) 界面品質的決定性工具。

超快雷射驅動的次世代基板革命—面對 kW 級 AI 模組的散熱與頻寬極限，碳化矽 (SiC) 與玻璃基板成為材料革命的焦點。鼎極科技－錢俊逸營運長探討了超快雷射技術在先進封裝中的應用，超快雷射具備「冷燒蝕」特性，能精準在硬脆的 SiC 與玻璃上進行微加工，避免傳統機械加工造成的熱應力與微裂紋。這項技術不僅優化了 GPU/HBM 架構的散熱能力，更推動了玻璃通孔 (TGV) 於光電共封裝 (CPO) 的應用，引領全光電整合的新紀元。

突破 AI 散熱極限的熱界面材料 (TIM)—針對 AI 運算平台極端嚴苛的熱管理需求，國立陽明交通大學國際半導體產業學院－陳俊豪助理教授團隊則回顧了先進封裝熱界面材料的發展現況與趨勢。文章指出，為了降低總熱阻，封裝架構正由傳統的 TIM1/TIM2 雙層設計，逐漸向簡化熱傳路徑的 TIM1.5 架構演進。同時，研究重心也從傳統的高分子導熱膏，轉向具備更高本質熱導率的金屬型 TIM (如低熔點鉍錫合金、鎳基液態金屬與鈹預成型片)，並探討了介金屬化合物 (IMC) 生成對界面熱阻與長期可靠度的深遠影響。

本期專題從宏觀的系統架構到微觀的原子級分析，涵蓋了 3D IC 先進封裝生態系的各個重要環節。期待透過這些專業深入的探討，能為產學研各界的讀者帶來啟發，共同迎接半導體技術的無限可能。