



從分子設計到原子級控制， 半導體前段製程材料的挑戰與機會

技術主編：謝添壽 T. S. Shieh

現職：工研院(ITRI) 材料與化工研究所 光電有機材料及應用研究組 副組長

學歷：國立中央大學(NCU) 化學工程學系 博士

專長：感光樹脂材料、面板封裝材料、黏著材料、高分子物性

隨著全球對人工智慧(AI)、高效能運算(HPC)與物聯網(IoT)應用需求的快速成長，半導體晶片在性能與功耗間的平衡面臨前所未有的挑戰。當摩爾定律逐漸逼近物理極限，前段製程材料技術的創新已成為推動製程節點(如2 nm及以下)持續微縮，並決定產業競爭力的關鍵核心。

本專題聚焦於先進光阻材料、高介電常數薄膜、原子層氣相沉積/蝕刻技術(ALD/ALE)，以及新型非揮發性記憶體材料等前段製程關鍵領域。透過系統化的材料設計與製程整合分析，探討其技術演進、研發趨勢，以及次世代奈米材料在微縮製程下所面臨的挑戰與契機。首先，丙烯酸酯光阻材料憑藉高分子設計自由度，已成為化學增幅型光阻的主力體系，並在極紫外光(EUV)微影中展現酸擴散控制與線邊粗糙度改善的潛力。其次，低碳氟光阻添加劑則呼應PFAS禁令與綠色製造趨勢，藉由短鏈碳氟結構設計，兼顧塗佈均勻性與環境永續性。在閘極材料領域，高介電常數前驅物技術以稀土氧化物為核心，結合原子層沉積與氮化處理，突破等效氧化層厚度(Effective Oxide Thickness; EOT)與漏電流限制，支撐邏輯與記憶體元件的長期可靠度。而ALD與ALE技術的整合，進一步構築出可雙向精準控制的「ALD-ALE Supercycle」概念，成為次世代二維材料與閘極全環繞(Gate-All-Around; GAA)/鳍式場效電晶體(Fin Field-Effect Transistor; FinFET)結構的核心製程；ALD提供原子級精準沉積，ALE則實現選擇性原子層移除，兩者結合可突破傳統製程在解析度與蝕刻控制上的極限，預期將成為2 nm以下製程整合的關鍵技術。最後，於新型非揮發性記憶體領域，磷酸鹽半導體玻璃在電阻式記憶體(Resistive Random-Access Memory; RRAM)中展現非晶材料的新興潛力，其極化子傳導機制與導電絲理論相互結合，為全玻璃透明記憶體元件開啓全新發展契機。

全球半導體前段製程材料的研發正朝「原子級控制、分子級設計、綠色製造」三大方向邁進。材料創新不僅追求性能極限，更著重於永續性、環境友善與製程整合性。本專題鏈結材料科學與製程應用之需求，強調材料設計與製程技術的整合創新，這不僅是因應製程挑戰的基石，更是推動未來電子元件性能提升與產業永續發展的核心動能。材料科學的每一步突破，皆將為下世代晶片性能與功能帶來革命性的改變。◎