



次世代功率半導體：從材料、封裝到熱管理的技術發展

技術主編：陳凱琪 K. C. Chen

現職：工研院(ITRI) 材料與化工研究所 先進電子構裝材料研究組 正研究員/副組長

學歷：國立交通大學(NCTU) 應用化學所 博士

專長：高分子材料、光電封裝材料、半導體封裝材料

隨著人工智慧(AI)、高效能運算(HPC)、電動車、再生能源及智慧電網等新興應用快速發展，全球對高效率電力轉換與能源管理的需求持續攀升。在AI時代，產業已逐漸由單純的運算能力提升，轉向能源效率與功率密度的優化，使「每瓦效能(Performance per Watt)」成為衡量系統競爭力的重要指標。作為電能轉換與控制的核心元件，功率半導體已成為支撐AI伺服器、資料中心、電動車、儲能系統及智慧能源設備運作的關鍵技術基礎。

為突破傳統矽(Si)功率元件在耐壓、高溫操作及切換效率上的限制，具備高崩潰電場、高頻高速切換及低功率損耗特性的寬能隙半導體(Wide Bandgap Semiconductor)，包括碳化矽(SiC)與氮化鎵(GaN)，正快速成為次世代功率電子技術發展主軸。其中，SiC適用於高電壓與高功率應用，如電動車驅動系統、車載充電器及再生能源變流器；GaN則憑藉高頻化與小型化優勢，廣泛應用於AI伺服器電源、高頻DC/DC轉換器及消費性電子產品。

隨著元件性能與功率密度持續提升，產業亦面臨多項關鍵技術挑戰。在磊晶材料技術上，GaN須克服晶格失配、熱膨脹係數差異及缺陷密度控制等問題來提升元件效能與可靠度；在封裝效能部分，高速切換所產生的寄生電感、寄生電容、電壓過衝及電磁干擾(EMI)，使低寄生互連與先進封裝架構成為重要發展方向；在系統層面，高功率密度所帶來的熱累積與熱應力也會是影響元件壽命與可靠度的重要瓶頸，所以散熱與熱管理亦為功率半導體發展的核心關鍵。當元件在高頻、高壓環境下運作時，熱量若無法有效排除的話，局部累積的熱點容易導致材料老化而造成整體系統失效。為提升散熱效率，大家都積極建立相關導熱材料技術、高導熱的熱介面材料(TIM)、銀燒結接合技術、雙面散熱封裝及高導熱陶瓷基板等。其中，氮化鋁(AlN)與氮化矽(Si₃N₄)等高導熱陶瓷材料兼具優異導熱性、電氣絕緣性及機械可靠度，成為高功率模組封裝的重要基礎材料；而AMB金屬化接合、高可靠度陶瓷基板及新型複合散熱材料也逐漸成為產業關注焦點。

展望未來，功率半導體產業將由單一元件性能提升，進一步擴展至材料、磊晶、封裝、散熱及系統整合的全方位競爭。隨著AI資料中心、高壓電動車、機器人及智慧能源系統持續成長，市場對高效率、高可靠度與高功率密度解決方案的需求將更加迫切。唯有透過功率半導體、先進封裝材料、高導熱陶瓷基板與熱管理技術的共同合作創新，並結合跨領域供應鏈整合能力，方能解決效能、散熱與可靠度的瓶頸，支撐AI與能源轉型所帶來的廣大需求，推動功率半導體產業邁向智慧化、電動化與永續發展的新世代。🔗