



AI高功率晶片之先進散熱材料與熱管理技術發展

技術主編：曹翔雁 H.Y. Tsao

現職：工研院材化所(ITRI) 先進電子構裝材料研究組 有機熱管理材料研究室 經理

學歷：台灣科技大學(NTUST) 材料科學與工程學系 碩士

專長：高分子材料合成、熱介面材料、冷卻液材料

人工智慧與高效能運算的快速發展，持續推升資料中心算力需求，也使高階GPU與AI加速器朝高功率、高整合與高熱通量方向演進。當單晶片功耗持續攀升，傳統氣冷逐漸逼近散熱極限，熱管理也由過去的系統輔助設計，轉變為影響晶片效能、封裝可靠度與資料中心能源效率的關鍵技術。技術亦由傳統冷板式直接液冷，逐步朝微通道冷板、微通道蓋板及微流體冷卻演進，核心皆在於讓冷卻介質更接近熱源、縮短熱傳路徑並降低介面熱阻。

本專題由系統級散熱挑戰出發，進一步探討晶片熱傳路徑中的關鍵材料與介面。位於晶片與散熱結構之間的熱介面材料(TIM)，主要用於填補固體表面的微觀凹凸與空氣間隙，以降低接觸熱阻。除需具備高導熱性外，亦須兼顧低黏合層厚度、低模數、熱應力緩衝及抗Pump-out等特性。工研院透過矽樹脂分子結構、交聯密度、粉體表面處理與粒徑級配等方式，已建立不同模數與導熱特性的導熱凝膠技術，其中高導熱配方之導熱係數可達35.5 W/m·K。

當晶片熱通量持續提高，高分子基TIM逐漸面臨導熱能力極限，液態金屬與低熔點合金則成為另一重要研發方向。此類材料可利用金屬較高的熱傳能力，以及液態或相變後的填縫特性降低界面熱阻，但同時面臨氧化、滲漏、Pump-out及金屬界面反應等問題。工研院所開發的Ga-In-Sn-Bi-Graphene與In-Bi-Sn-Graphene-BN複合材料，在導熱係數達36 W/m·K以上的同時，也進一步兼顧施工性與長期界面可靠度。

然而，良好的晶片熱介面僅是液冷系統的一環，熱量最終仍須藉由冷卻液輸送至系統外部。無論直接液冷或浸沒式冷卻液，在長期運作下，皆可能產生材料膨潤或老化現象。因此，工研院建立冷卻液特性評估平台，包含材料相容性、加速老化與系統級散熱驗證，以確保實際設備長期運轉的穩定性。

此外，本專題亦介紹SiNx/Parylene-C有機/無機複合阻隔膜，藉由多層結構延長水氣滲透路徑並提升防護效果，提供未來電子元件的可能技術方向。

綜觀而言，AI晶片散熱正由單一散熱元件效能提升，逐步走向晶片、熱介面材料、冷卻流道與冷卻介質的整體最佳化。未來如何同步降低熱阻、縮短熱傳距離、提升能源效率並確保長期可靠度，將成為下一世代AI高功率運算持續發展的重要關鍵。🔗