

先進封裝熱界面材料的發展現況與趨勢

Development Status and Trends of Thermal Interface Materials for Advanced Packaging

陳俊豪、鄭淑慧

Chun-Hao Chen, Shu-Hui Tay

隨著 AI 運算平台之功耗、記憶體頻寬與封裝整合密度持續提升，熱管理成為影響先進封裝效能與可靠度的核心議題。本文針對先進封裝熱界面材料之發展現況與趨勢進行綜述，首先說明 TIM1、TIM2 與 TIM1.5 架構在熱傳路徑、界面熱阻與封裝散熱設計上的差異；其次回顧導熱膏、導熱墊片、高分子複合材料與相變材料等傳統型 TIM，說明其在熱導率與長期可靠度上的限制。隨後介紹低熔點鉛錫合金、鎳基液態金屬、預成形鎳金屬片等金屬型 TIM，此類材料具備較高本質熱導率並能與晶片金屬化層形成連續金屬熱傳通道，是 AI 先進封裝中具潛力的候選材料。本文進一步以 In_{32.5}Bi_{16.5}Sn/Cu 與鎳基 TIM 系統作為實際案例，探討介面演化與熱阻變化之關係，說明此類金屬型 TIM 的實際散熱表現不僅取決於材料本體熱導率，亦受到界面反應、介金屬化合物生成、元素擴散與金屬化層穩定性影響，文章結尾並展望高導熱填料、燒結銀銅等新型 TIM 於未來 AI 封裝散熱中的應用潛力。

As the power consumption, memory bandwidth, and packaging integration density of AI computing platforms continue to increase, thermal management has become a critical issue affecting the performance and reliability of advanced packaging. This review summarizes the current status and emerging trends of thermal interface materials (TIMs) for advanced packaging. First, the differences among TIM1, TIM2, and TIM1.5 architectures are discussed in terms of heat-transfer paths, interfacial thermal resistance, and package-level thermal design. Conventional TIMs, including thermal greases, thermal pads, polymer-based composite TIMs, and phase-change materials, are then reviewed, with emphasis on their limitations in thermal conductivity and long-term reliability. Subsequently, metal-based TIMs, such as low-melting-point solder alloys, Ga-based liquid metals, and preformed indium interlayers, are introduced. These materials possess higher intrinsic thermal conductivity and can form continuous metallic heat-transfer pathways with chip metallization layers, making them promising candidates for AI advanced packaging. Representative case studies of the In_{32.5}Bi_{16.5}Sn/Cu system and In-based TIMs are further discussed to clarify the relationship between interfacial evolution and thermal resistance. These examples demonstrate that the practical thermal performance of metal-based TIMs is governed not only by their bulk thermal conductivity, but also by interfacial reactions, intermetallic compound formation, elemental diffusion, and metallization stability. Finally, the potential applications of emerging TIMs, including high-thermal-conductivity fillers and sintered Ag/Cu materials, in future AI packaging thermal management are discussed.

一、前言

隨著摩爾定律所主導之電晶體微縮持續推進，半導體元件已朝向更高整合度、更高運算能力與更高功能密度快速演進。然而效能提升的同時亦伴隨功率密度與發熱量的顯著增加，使熱管理逐漸成為限制先進電子系統發展的關鍵瓶頸之一。尤其自 2022 年以來，生成式人工智慧 (artificial intelligence, AI) 與大型語言模型 (large language model, LLM) 相關應用快速發展，顯著推升對高效能 AI 運算硬體的需求。在此趨勢下，負責大規模智慧運算之 AI 加速器已成為當前最具代表性的高功率密度晶片平台。隨著新世代 AI 運算平台之功耗、記憶體頻寬需求與機櫃層級能源消耗持續提升，其系統效能已愈來愈取決於是否能有效地將高度集成的 AI 運算封裝所產生之熱量快速導出。因此，先進封裝中的熱管理已成為直接影響運算密度、持續操作頻率、元件長期可靠度與整體系統效率的核心議題。

熱管理議題與 AI 運算晶片之先進封裝技術演進密不可分。現今高效能 AI 晶片多透過 2.5D 或 3D 先進封裝技術，將邏輯晶粒、高頻寬記憶體 (high bandwidth memory, HBM) 與矽中介層 (interposer) 整合於同一封裝中，形成高度集成之高功率密度異質整合平台。此類封裝架構一方面使運算晶片得以在有限空間內整合更高的運算能力與記憶體頻寬，另一方面亦使熱源分布呈現高度空間不均勻性，且常集中於運算核心、記憶體介面及其他高活動區域，使熱傳路徑更趨複雜。與此同時，由 GPU、HBM 與中介層共同構成之大面積異質整合封裝平台，其整體尺度亦持續擴大，進一步提高各界面之熱管理難度與熱阻控制要求。

在此背景下，熱界面材料 (thermal interface materials, TIMs) 已成為先進封裝熱管理中最具優化潛力的核心技術。對高功率 AI 封裝而言，若欲維持元件操作效能與封裝可靠度，熱量自晶片傳遞至熱擴散結構、散熱器或均溫板之過程必須具備高熱傳效率。然而，即使這些配對表面經過精密加工，晶片側與晶片上蓋、均溫板或散熱器表面仍不可避免存在微觀粗糙度與波動起伏，使界面間存在空隙；這些微小空隙往往會困住空氣，進而形成顯著的熱傳路徑屏障。TIM 的主要功能即在於填補界面間隙、提升有效接觸面積，並建立更連續之熱傳路徑，使熱能得以更有效率地由半導體封裝傳遞至冷卻結構。對 AI 運算平台而言，由於其封裝熱負載高、局部熱點明顯，且接面溫度容限有限，即使界面熱阻僅有小幅增加，也可能造成顯著溫升、效能下降與壽命縮短；特別是在大面積異質整合封裝平台中，界面熱阻的控制變得更加敏感，使 TIM 的材料選擇、界面設計與結構配置成為先進封裝散熱設計中的關鍵議題。

基於上述背景，本文針對先進封裝中熱界面材料之發展現況與未來方向進行綜述，並以 AI 運算晶片封裝之散熱需求作為主要應用背景。本文首先介紹 TIM1、TIM2 與 TIM1.5 等不同熱界面架構及其在先進封裝中的熱傳意義；其次回顧傳統熱界面材料之主要類型與特性，並進一步探討金屬型 TIM 及其在先進封裝中的應用潛力；其後，針對金屬型 TIM 的界面反應與可靠度議題進行分析；最後展望未來具潛力之熱界面材料與先進熱管理技術發展方向。藉由上述整理，本文期望建立由封裝架構、材料技術、可靠度到未來發展之完整脈絡，以作為高效能運算與人工智慧先進封裝熱管理研究之參考。

二、先進封裝之熱界面架構：TIM1、TIM2 與 TIM1.5

在電子封裝散熱設計中，熱界面材料通常依其所在位置與熱傳功能區分為 TIM1 與 TIM2。如圖 1 所示，傳統封裝架構中，TIM1 係指位於晶粒 (die) 與上方熱擴散結構之間的

熱界面層，通常設置於晶片與上蓋 (lid) 或整合式熱擴散板 (integrated heat spreader, IHS) 之間；而 TIM2 則位於 lid 與外部散熱器、散熱鰭片 (heat sink) 或水冷板 (cold plate) 之間，作為封裝與外部散熱模組之間的熱傳界面。此種雙層熱界面架構已廣泛應用於中央處理器 (central processing unit, CPU)、GPU 與其他高功率元件封裝中，並長期作為封裝熱管理之基本設計方式。TIM1 與 TIM2 雖同屬熱界面材料，但其所面對之操作條件與性能要求並不完全相同。TIM1 最接近主要熱源，直接位於高熱流密度的晶粒與熱擴散結構之間；在此位置上，即使僅有微小的界面缺陷或空孔，也可能造成界面溫度顯著上升，直接影響元件效能與可靠度。因此，TIM1 通常更強調高熱導率、低界面熱阻、良好潤濕性或服貼性，以及在熱循環條件下維持穩定界面品質的能力。相較之下，TIM2 位於 lid 與外部散熱結構之間，其主要功能在於補償較大尺度的散熱器表面不平整與裝配公差，並維持封裝與散熱器之間穩定的熱接觸。因此，TIM2 雖同樣要求足夠的導熱能力，但通常更重視厚度補償能力與組裝便利性。

然而，隨著 AI 運算晶片功耗持續提高，以及異質整合封裝面積持續擴大，傳統 TIM1/TIM2 架構的限制也愈發明顯。從熱傳觀點來看，每增加一層界面，便可能引入額外的界面熱阻；每增加一層中介材料，亦會增加熱傳路徑長度並放大局部接觸不良所帶來的熱阻損失。此外，TIM 層本身的接合層厚度 (bond-line thickness, BLT) 亦是影響總熱阻的關鍵因素，因為 TIM 的厚度方向熱阻與 BLT 成正比；當 BLT 增加或厚度分布不均時，即使材料本體熱導率相同，整體熱阻仍可能明顯上升⁽¹⁾。當封裝的總熱負載持續上升、局部熱點更加集中時，這些原本可接受的界面熱阻與整體 BLT 帶來的熱阻上升，便可能成為限制整體散熱效能的重要瓶頸。特別是在大面積封裝中，TIM1 與 TIM2 各自的 BLT 控制、界面均勻性及材料老化行為，皆可能進一步影響總熱阻與長期可靠度。

因此，近年來 TIM1.5 架構逐漸受到高度關注，如圖 1(b)。相較於傳統 TIM1/TIM2 雙層熱界面架構，TIM1.5 的核心概念在於簡化熱傳路徑並減少晶片熱源到散熱器中間的界面數目，使熱量得以更直接地由晶粒傳遞至冷卻模組⁽²⁾。傳統 TIM1/TIM2 架構的優點在於設計成熟、製程穩定，且可針對不同界面位置選擇不同類型的材料。然而其缺點亦相對明顯，即熱量需依序穿越 TIM1、晶片上蓋、TIM2、散熱器等多層結構，任何一層界面之熱阻增加皆可能導致整體熱傳效率下降。相較之下，TIM1.5 透過減少中間熱傳層級，可有效降低總熱阻並改善高熱流密度條件下的散熱表現，因此特別適合應用於高功率密度的 AI 封裝。然而，TIM1.5 的挑戰在於其對材料本身與界面品質要求更高，必須同時具備低界面熱阻、良好服貼性、大面積接觸穩定性與長期可靠度，否則局部空洞、接觸不良或熱循環劣化將更容易直接影響整體封裝散熱效能。

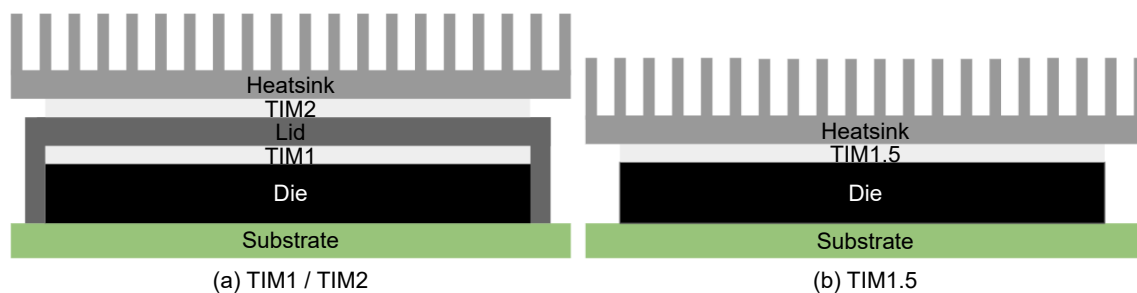


圖 1. (a) TIM1/TIM2 架構 (b) TIM1.5 架構。

三、傳統熱界面材料的類型與特性

熱界面材料長期扮演降低界面熱阻與改善熱接觸品質的重要角色。由於晶粒、lid、熱擴散板與散熱器等接觸表面即使經過精密加工，仍不可避免存在微觀粗糙度、局部不平整與組裝公差，因此若僅依靠固體表面直接接觸，往往會在界面間殘留空氣而形成顯著熱障。基於材料形態、組成與熱傳機制的不同，傳統 TIM 主要可分為導熱膏 (thermal grease)、導熱墊片 (thermal pad) 與相變材料 (phase-change materials, PCMs) 等幾類。傳統 TIM 的材料本體熱導率多約落在 $1-10 \text{ W/mK}$ 的範圍內，少數經高填料設計之高性能配方可略高於此區間；然而，其實際散熱表現仍高度取決於界面熱阻、材料厚度與接觸品質。此類材料普遍具有製程成熟、成本相對較低與應用彈性高等優點，因此至今仍廣泛應用於各類電子產品與封裝系統中。然而，隨著高功率密度 AI 封裝、異質整合平台與液冷架構的快速發展，傳統 TIM 在熱導率、界面熱阻與長期可靠度等方面的限制也逐漸浮現，因而有必要對其主要類型與材料特性進行系統性整理與討論。

3.1 導熱膏

導熱膏是最具代表性的傳統熱界面材料之一，其通常由高分子或矽油類基材中分散導熱填料所構成。常見的導熱填料包括氧化鋁、氧化鋅、氮化硼、石墨或其他陶瓷與碳系材料。導熱膏最大的優勢在於其具有良好的流動性與填隙能力，能有效填補晶片與散熱器之間因表面粗糙度、翹曲或局部不平整所造成的微小空隙，進而提升實際接觸面積並降低界面熱阻。此外，導熱膏通常塗佈方便、材料取得容易，且可在相對較低成本下提供穩定的熱接觸效果，因此長期被廣泛應用於 CPU、GPU、功率元件及各類電子散熱模組中。

就熱導率而言，導熱膏的材料本體熱導率通常約落在 $1-10 \text{ W/mK}^{(3-5)}$ 。然而導熱膏的熱傳表現本質上仍受限於其基材與導熱填料所構成之複合結構。雖然藉由提高填料比例可在一定程度上提升熱導率，但填料含量過高往往會造成材料黏度顯著上升，進而增加塗佈難度，並可能導致填料分散不均或局部團聚，反而影響界面品質。除此之外，導熱膏最主要的限制之一在於長期可靠度問題。在熱循環與長時間高溫操作條件下，導熱膏可能出現泵出效應 (pumping effect)、基材揮發乾裂、填料偏析與老化等現象，進而降低有效接觸面積並導致界面熱阻升高^(1, 2, 6)。對高熱流密度與長時間運作之 AI 封裝而言，這些問題尤為敏感，因此雖然導熱膏仍具備製程簡便與良好填隙性的優勢，但其在高功率先進封裝中的應用也逐漸受到材料穩定性與熱傳性能上限之限制。

3.2 導熱墊片

導熱墊片通常為預成形之固態或半固態片材，其多以矽膠、彈性體或其他聚合物基材為主，並摻入陶瓷或其他導熱填料以提升熱傳性能。相較於導熱膏，導熱墊片具有厚度可控、操作簡便、組裝一致性佳及不易流動等優點，因此特別適合應用於存在較大組裝公差、需跨越較大高度差，或需兼顧可重工性與自動化組裝的散熱場景。在實務應用中，導熱墊片常見於功率模組、記憶體模組、電源元件、車用電子與各類散熱器與元件之間的界面填補。

就熱導率而言，導熱墊片的材料本體熱導率通常約落在 $1-3 \text{ W/mK}^{(4)}$ ，部分特殊高規格產品則可略高於此範圍。導熱墊片的實際熱傳表現不僅受材料本體熱導率影響，也與其厚度、壓縮性及界面接觸狀態密切相關。由於導熱墊片常用於填補較大縫隙，其厚度通常高

於導熱膏或薄型金屬 TIM，因此即使材料本體熱導率不低，其總熱阻仍可能因厚度效應而顯著增加。

此外，導熱墊片雖具備一定程度的機械順應性，可用以吸收表面不平整與組裝公差，但在高熱流密度與大面積先進封裝應用中，當封裝表面存在局部翹曲、壓力分布不均或界面接觸不足時，導熱墊片因無法如流動型材料般充分填補微尺度空隙，較易造成局部熱接觸不良並導致界面熱阻升高。因此，此類材料雖適用於一般電子散熱模組間隙填補，但對於高功率 AI 封裝中追求極低熱阻之先進熱管理需求而言，其適用性相對有限。

3.3 高分子複合材料

高分子複合熱界面材料 (polymer-based composite TIMs) 為傳統 TIM 中相當重要的一類，其通常以聚合物基材作為連續相，並摻入導熱填料以提升整體熱傳性能。常見基材包括矽膠、環氧樹脂、聚醯亞胺與其他高分子材料，而導熱填料則可為氧化鋁、氧化鋅、氮化硼、氮化鋁、石墨、碳纖維或其他陶瓷與碳系材料。與單純導熱膏相比，高分子複合材料通常具有較高的材料可設計性，可透過調整填料種類、粒徑、形狀、填充比例及其在基材中的分布狀態，來兼顧導熱性能、機械強度、電絕緣性與界面順應性。因此，此類材料長期以來在電子封裝、功率模組、LED、車用電子及各類散熱模組中皆具有廣泛應用。

就熱導率而言，高分子複合材料的材料本體熱導率通常約落在 $1-10 \text{ W/mK}^{(6)}$ ，部分商用或研究型配方透過高填料含量、填料取向控制或三維導熱網路設計之材料，則可進一步達到約 $15-20 \text{ W/mK}$ 以上。然而，此類材料的熱傳性能提升通常並非線性，因為導熱能力除取決於填料本身之熱導率外，亦受限於填料之間是否能形成連續導熱網路，以及填料與高分子基材之間的界面熱阻。換言之，即使導入高熱導率填料，若其在基材中分散不均、產生團聚，或未能形成有效連通之熱傳通道，則整體熱導率提升仍可能有限。

高分子複合材料的優勢在於兼具一定程度的界面服貼性與機械順應性，並可依應用需求調整材料配方，因此在需要同時兼顧導熱、絕緣與可製造性的應用中具有相當高的彈性。然而，其限制亦相當明顯。首先，若欲顯著提升熱導率，通常需提高填料含量，但高填料比例往往會導致材料黏度上升、加工性下降，甚至影響塗佈與界面均勻性。其次，填料與基材之間的界面熱阻，以及材料在長期熱循環或高溫操作下可能產生的界面退化、龜裂與性能衰退，也都可能限制其在高功率密度封裝中的應用。儘管高分子複合材料仍具備良好工程調整空間，但在追求極低熱阻與大面積界面穩定性的條件下，其熱傳性能與長期可靠度仍存在一定上限，這也驅使後續研究逐漸朝向更高效能的金屬型 TIM 發展。

3.4 相變材料

相變材料為另一類重要的傳統熱界面材料，其主要特徵在於材料可於特定溫度範圍內由固態轉為軟化狀態，或發生固－液相轉變，藉此在元件操作溫度下提升界面潤濕性與服貼性。相較於導熱膏在室溫下即呈膏狀，PCMs 通常在室溫下具有較佳的形狀穩定性與操作便利性，而當溫度升高至其相變區間時，材料會軟化並填補界面間之微小空隙，進而降低接觸熱阻。因此，此類材料可視為兼具固態材料組裝穩定性與流動型材料界面填充能力之折衷方案，長期應用於處理器封裝、功率模組及散熱模組等場合。

PCM 多以石蠟類、有機蠟、聚合物基材或其他可控制相轉變溫度之配方為主，並常搭配陶瓷或碳系填料以提升導熱性能。其材料本體熱導率通常約落在 $0.1-10.5 \text{ W/mK}^{(4)}$ ，整體

數值雖仍屬傳統 TIM 範疇，但由於其可在操作溫度下改善界面接觸，因此實際應用中往往能有效降低由表面粗糙度與接觸不完全所造成的熱阻，因此相變材料在某些應用中相較於一般導熱墊片更具優勢。然而相變材料的熱導率通常仍低於金屬型 TIM，其材料本身的熱傳表現亦常受填料分布、相變溫度區間與基材穩定性所影響。某些相變材料在高熱流密度與極低熱阻需求之先進封裝應用中，若操作條件超出其最適相變區間，則其優勢可能無法充分發揮。因此，相變材料雖在傳統電子封裝中仍具相當實用性，但在高功率 AI 封裝與更嚴苛熱管理需求下，其應用仍可能受到材料本體熱導率與長期穩定性之限制。

傳統熱界面材料之共同優勢在於製程成熟、材料取得容易、成本相對可控，且多數具備良好的填隙能力與一定程度的界面順應性；然而隨著高效能 AI 封裝要求系統需具備更高散熱能力，傳統材料本體熱導率、界面熱阻控制與長期可靠度方面的限制開始浮現。也正因如此，近年來高效能熱管理技術的研究重心，已逐步由傳統高分子型 TIM 轉向具更高熱導率與更低界面熱阻潛力之金屬型 TIM，以因應下一世代 AI 先進封裝對散熱性能與界面穩定性的需求。

四、金屬型熱界面材料的發展與特性

相較於傳統熱界面材料，金屬型熱界面材料 (metal-based TIMs) 因具備較高本質熱導率、較低界面熱阻潛力，以及形成金屬熱傳通道之能力，而逐漸成為 AI 運算封裝中重要的發展方向⁽⁷⁻⁸⁾，具備高導熱能力與更緊密界面接觸之金屬型 TIM，已成為當前先進散熱設計中備受關注的材料系統之一。

金屬型 TIM 的優勢並非僅建立於較高的本體熱導率之上，其真正價值在於金屬型 TIM 能與晶片背金屬層和散熱片表面金屬建立接近連續金屬接觸之熱通道，因此特別適用於高熱流密度、薄型 BLT 與低熱阻需求明確之 AI 運算平台封裝的應用場景。不過，金屬型 TIM 亦伴隨導電性、介金屬化合物 (intermetallic compounds, IMCs) 生成、界面擴散、氧化與長期可靠度等議題。

4.1 低熔點鉍錫合金 TIM

低熔點鉍錫合金 TIM 為金屬型熱界面材料中最具代表性的一類，其基本概念在於利用熔點相對較低之金屬合金作為熱介面層，使材料可於較低接合溫度下熔融或軟化，進而在界面間形成較連續之金屬熱傳通道並降低界面熱阻。此處所討論之低熔點鉍錫合金，係以其作為 TIM 之應用為主，而非廣義上作為永久接合層之固晶材料。常見之低熔點鉍錫合金 TIM 系統包括 Bi-Sn、In-Sn、In-Bi-Sn 及其他含銻、錫、鉍之多元低熔點合金，其中 Bi-Sn 共晶系統之熔點約為 138–139 °C，Sn-In 共晶系統之熔點約為 118 °C，而 In-Bi-Sn 類的三元合金則可依成分不同進一步降低至約 60–100 °C 範圍。

就材料本體熱導率而言，Bi-Sn 型低熔點合金通常約落在 20–30 W/mK⁽⁹⁾，In-Sn 共晶合金 In-48Sn 之熱導率則約為 34 W/m·K⁽¹⁰⁻¹¹⁾，而含銻比例較高之合金系統，例如 In-5Ag 與 In-45Ag 之熱導率分別約為 78 與 57 W/m·K⁽¹²⁾，而純銻之熱導率可達約 86 W/m·K。低熔點鉍錫合金 TIM 顯然具備更高之材料本體導熱優勢。更重要的是，此類材料在封裝組裝過程中可於其熔點附近或高於其熔點的條件下發生熔融，藉由潤濕上下接觸表面並流入微尺度界面空隙，有助於填補孔隙、提升實際接觸面積，進而形成較低熱阻之金屬導熱界面。低熔點鉍

錫合金 TIM 的主要優勢在於其可兼顧相對較高之熱導能力、較低製程溫度與金屬界面接觸特性。對 AI 運算平台的先進封裝而言，較低的接合溫度有助於降低整體熱預算，避免高溫製程對晶片、封裝材料或其他界面造成不利影響；而金屬型熱傳路徑的形成，則使其在高熱流密度條件下較傳統高分子型 TIM 更具潛力。

4.2 鎵基液態金屬TIM

鎵基液態金屬 TIM 為金屬型熱界面材料中另一類重要且具代表性的系統，其主要特色在於材料可於室溫附近維持液態，因而同時兼具金屬材料較高熱導率與液態材料優異的界面服貼能力。相較於低熔點鉍錫合金需在組裝過程中加熱熔融後填補界面空隙，鎵基液態金屬可直接於操作或組裝條件下潤濕接觸表面，並在極薄 BLT 條件下形成連續之金屬熱傳通道，因此特別適用於追求極低界面熱阻與高熱流密度散熱需求之 AI 運算封裝場景。

常見之鎵基液態金屬系統包括共晶 Ga-In 與 Ga-In-Sn (如 Galinstan) 等組成，其中 Ga-In 類材料之熱導率文獻常見約為 $25-30 \text{ W/m}\cdot\text{K}^{(13)}$ ，而 Ga-In-Sn 類系統則依成分與量測條件不同，多約落在 $23.9-38 \text{ W/m}\cdot\text{K}^{(14)}$ ，部分商用液態金屬 TIM 產品則可呈現更高之熱導率數值。相較於傳統高分子型 TIM，鎵基液態金屬具有更高之材料本體導熱能力，其液態金屬的特性能有效降低微尺度接觸空隙所造成的界面熱阻，因此在實際應用中常展現出優於傳統 TIM 的熱傳表現。

鎵基液態金屬 TIM 的主要優勢在於其同時具備金屬材料的導熱能力與液態材料的界面服貼性。由於其具有良好的流動性與潤濕能力，可在較低接觸壓力下填補表面粗糙度、微小孔隙與局部不平整區域，進而提升有效接觸面積並降低界面熱阻。此外，鎵基液態金屬具有極低蒸氣壓，不易揮發，且可在薄型 bond line 設計下維持連續接觸，因此在高熱流密度、局部熱點明顯且接面溫度容限有限之 AI 運算封裝中，具有相當高的應用潛力。

然而，鎵基液態金屬的導入亦伴隨明顯挑戰。由於鎵基液態金屬表面容易形成氧化層，該氧化層可能改變其流動性與界面潤濕行為，進而影響界面均勻性與長期穩定性。其次，鎵對多種金屬材料具有高度反應性，可能導致腐蝕、脆化或界面失效，因此在實際封裝中通常需要透過適當的表面金屬化層或擴散阻障層 (diffusion barrier layer) 設計，避免其與不相容金屬 (例如：鋁) 直接接觸。再者，由於液態金屬本身具高流動性，長時間操作下的滲漏控制、形貌穩定性，以及封裝阻絕壩結構設計，皆為實際導入時必須考量的重要問題。由此可見，鎵基液態金屬 TIM 雖在低界面熱阻與高熱傳效率方面具備高度潛力，但其實際應用成效仍取決於表面工程、封裝相容性與長期可靠度控制。

4.3 金屬箔材與預成形金屬中間層

金屬箔材 (metal foils) 與預成形金屬片 (metal preform) 亦為金屬型熱界面材料中相當重要的一類。此類材料通常以純銦 (In) 或銦基合金 (In-Ag、In-Cu) 為代表，可製成薄片或預成形片材等形式，於封裝組裝過程中夾置於兩接觸表面之間，再藉由施壓、加熱或其共同作用，使材料與上下界面充分貼合，進而形成連續且低熱阻之金屬熱傳通道。相較於需在界面中流動的液態材料，軟金屬箔材與預成形金屬中間層具備較佳的形狀穩定性與厚度可控性；相較於傳統高分子型 TIM，可提供更高的本體熱導率與更低的界面熱阻，因此在高熱流密度與大面積封裝應用中具有相當高的吸引力。

此類材料中最具代表性者為純銦預成型片 (In preform)。純銦之熱導率約為 86 W/mK，且其熔點約為 157 °C，材料本身具備低降伏強度與良好延展性，因此可在封裝組裝過程中透過施壓塑性變形，或於接近其熔點之製程條件下進一步提升界面服貼能力，藉以填補晶片與散熱器表面局部不平整與裝配公差所造成之微尺度空隙，形成低熱阻之熱傳路徑。相較於液態金屬，銦箔材因具片狀形態，在與晶片及散熱器的組裝過程中較易控制材料厚度、位置與接觸面積，且較無滲漏風險，因此銦預成型片已被許多高效能 AI 運算平台所採用。然而，由於銦與封裝中常見的金屬如銅、銀、金等元素擴散速率較高，其與晶片背面金屬化層及散熱器表面鍍層金屬之界面反應仍須審慎設計，以避免過度擴散與介金屬化合物生成對長期可靠度造成不利影響。

整體而言，金屬型 TIM 相較於傳統高分子型 TIM 雖展現出更高熱導率與更低界面熱阻潛力，但金屬型 TIM 必須進一步延伸至其界面微結構演化與長期可靠度之分析。

五、金屬型 TIM 的界面反應與熱阻

如前段所述，金屬型 TIM 雖具備較高之材料本體熱導率與形成低界面熱阻金屬熱傳通道之潛力，但實際散熱表現並不僅取決於材料本身之熱導能力，更受界面金屬反應與後續微結構演化所影響。因此對金屬型 TIM 的評估不應僅停留於材料本體熱導率或初始接合品質之比較，而必須進一步探討其在接合與後續使用過程中之界面金屬演化，及其對熱阻與長期穩定性之影響。基於此，本章將以本團隊過去兩個代表性應用研究案例作為例子，分別說明低熔點 In-Bi-Sn 合金 TIM 與銦基 TIM 系統中界面金屬演化對熱阻與界面反應表現的重要性。

5.1 低熔點 In_{32.5}Bi_{16.5}Sn/Cu 系統之界面演化與熱阻變化

低熔點合金 TIM 可視為金屬型熱界面材料中相當具代表性的應用案例，本研究中所採用之 In_{32.5}Bi_{16.5}Sn 合金，其成分選擇是對應於商用低熔點合金 Indalloy[®]19/Field's metal，即 51 wt.% In、32.5 wt.% Bi 與 16.5 wt.% Sn 之 In-Bi-Sn 共晶系統合金；此合金熔點約為 60 °C，屬於典型之低熔點合金，原先多應用於低溫固定、光學鏡片加工與相關精密製程中，藉由其低熔點特性於低溫下提供可逆或可移除之金屬固定功能。由於此類合金在室溫下可維持固態形態，並可於相對較低溫度下熔融，因而亦具備作為 TIM 之應用潛力。對熱界面材料而言，In_{32.5}Bi_{16.5}Sn 可在低溫接合條件下熔融並潤濕晶片背金屬層與散熱器之金屬表面，有助於填補界面微小空隙、提升實際接觸面積，並形成連續金屬熱傳通道。因此，本研究選用此一商用低熔點 In-Bi-Sn 合金與 Cu 構成 Cu/In-32.5Bi-16.5Sn/Cu 三明治結構，作為探討低熔點金屬 TIM 與 Cu 散熱結構間界面反應、介金屬化合物生成及熱阻演化行為之代表性模型系統⁽¹⁵⁾。如圖 2 所示，將 3×3 cm² 的 In_{32.5}Bi_{16.5}Sn 與 Cu 片材組成三明治結構，於 150 °C 下接合 3 min，並於室溫冷卻後觀察其微觀組織與界面形貌。顯微結構分析顯示，In_{32.5}Bi_{16.5}Sn 低熔點合金於冷卻後形成由 BiIn₂、SnIn 及 InSn 等組成之金相；同時，由於此類低熔點合金具有較低之接合溫度與良好潤濕能力，其與 Cu 片材之接合界面可形成連續之 Cu-In-Sn IMC 層。在後續的 80 °C 等溫老化條件下，該系統的主要界面變化無明顯裂縫生成，In_{32.5}Bi_{16.5}Sn 與銅片間交互擴散生成之 IMC 反應層持續增厚，且隨著老化時間增加，整體熱阻的上升趨勢與 IMC 增厚趨勢具有一致性，如圖 3 所示。此結果說明即使界面

在顯微結構上仍維持表面完整，熱性能仍可能因界面反應層之演化而逐步劣化。因此對金屬型 TIM 而言，低熱阻界面的初始建立並不代表其在長期服役條件下能維持相同散熱效能；若界面反應持續進行並導致 IMC 過度增厚，則整體熱阻仍可能顯著上升。因此，對金屬 TIM 的材料設計與製程評估，不應僅考慮其熔點、初始導熱能力與接合性，更應同步關注其在後續老化條件下的界面反應動力學與熱阻穩定性。

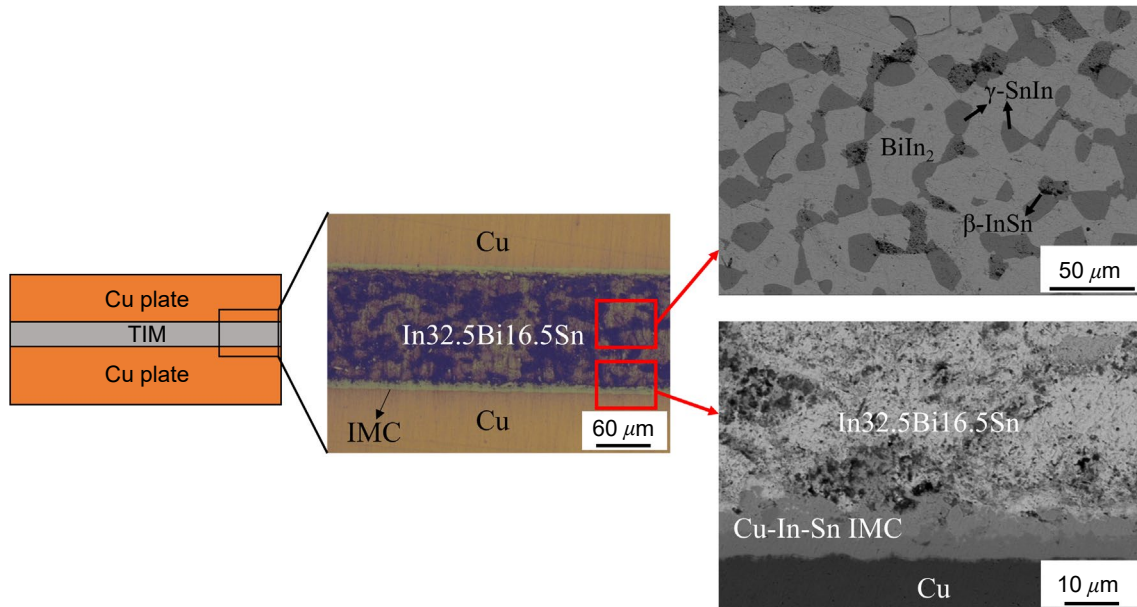


圖 2. Cu/In32.5Bi16.5Sn/Cu 三明治結構於 150 °C 接合 3 min 後之示意圖與微觀組織分析結果。截面影像顯示 In32.5Bi16.5Sn 低熔點合金於兩側 Cu 片材界面形成連續之 IMC 層；放大影像進一步顯示凝固後合金層內部由 BiIn₂、InSn 與 SnIn 等相所組成，並可於 Cu/TIM 界面觀察到 Cu-In-Sn 介金屬化合物⁽¹⁵⁾。

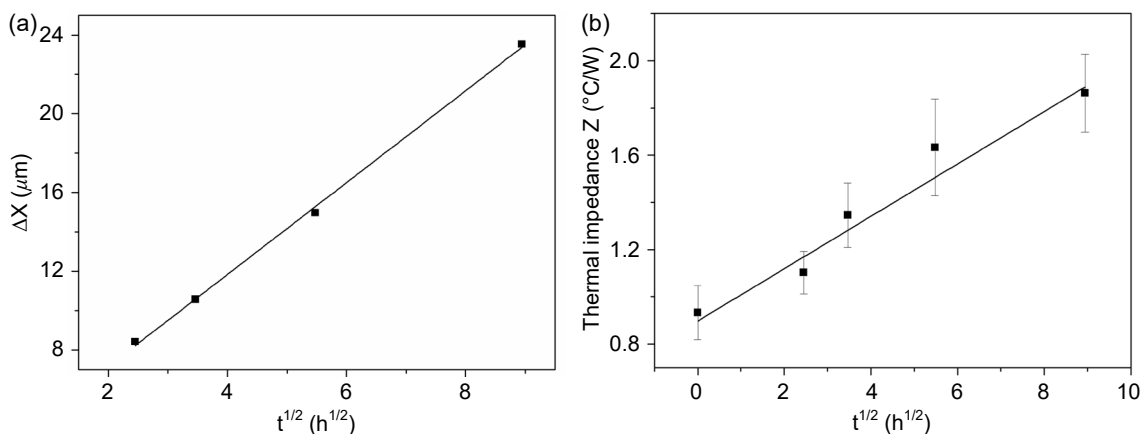


圖 3. In32.5Bi16.5Sn/Cu 界面於 80 °C 等溫老化後之 IMC 成長與熱阻變化：(a) Cu/TIM 界面 IMC 成長厚度(ΔX) 與老化時間平方根 ($t^{1/2}$) 之關係 (b) 穩態熱傳量測所得之三明治結構熱阻隨老化時間平方根 ($t^{1/2}$)之變化，顯示隨著介面反應層持續增厚與整體熱阻增加具有相關性。⁽¹⁵⁾

5.2 鋼基 TIM 系統中合金成分設計對界面演化與熱特性之影響

在討論鋼基 TIM 在 TIM1.5 層級的應用時，首先必須說明其所對應的晶片背面金屬化背景。對於現今高效能 AI 晶片的封裝而言，晶片背面金屬化層 (backside metallization, BM) 常見採用 Ti/Ni/Au 的金屬層堆疊，其中 Au 主要作為表面防氧化與提升潤濕性之鍍層，以提升鋼基 TIM 於封裝組裝過程之潤濕性並抑制下層 Ni 於組裝前氧化；而 Ni 則作為擴散阻障層，防止鋼進一步與下層的 Ti 進行反應。然而，當純鋼與 Au/Ni 類的金屬化層接觸並經歷接合後，表面 Au 會快速溶入 In 基體中，隨後 In 直接與 Ni 層反應形成 Ni-In 類介金屬化合物；而若 Au-In 反應的 IMC 生成過多 (AuIn_2)，則其高脆性可能導致界面微裂紋形成，進而降低接合可靠度⁽¹⁶⁾。有鑑於此，近年來學界與業界亦開始關注 Ti/Ni/Ag 作為另一種具代表性的晶片背面金屬化選項，因其不僅具有相較 Au 更顯著的成本優勢，Ag 與 In 之間亦具良好潤濕性^(17, 18)，且可形成連續之界面 IMC 反應層。

針對此一背景，本研究團隊以具代表性的 Si/Ti/Ni/Ag | TIM | Ag/NiV/Cu 三明治結構模擬實際 chip/TIM/Cu-lid 之 TIM1.5 接合系統 (圖 4)，其中鋼基 TIM 厚度約 $250\text{ }\mu\text{m}$ ，晶片 Ti/Ni/Ag 金屬化層為 100/300/1000 nm，銅片 Ag/NiV 金屬為 1000/300 nm，以 $260\text{ }^\circ\text{C}$ 、5 min、3.5 MPa 的熱壓接合條件下，比較純 In、In-2Ag 與 In-10Ag 的界面反應與熱阻表現。如圖 5 所示，在此條件下鋼片已完全熔融，界面演化主要由快速之固-液擴散所主導；對純鋼而言，晶片側 Ag 表層會完全溶入 In 基體中，隨後 In 直接與 Ni 阻障層反應形成 In-Ni 界金屬，並伴隨明顯之 Ni 消耗。相較之下，當 TIM 中加入 Ag 後，界面反應後的主要 IMC 為 AgIn_2 。以 In-2Ag 系統為例，如圖 5(b) 中「+」號標示位置所示，晶片側形成具扇貝狀形貌之界面反應層；其 EDX 圖譜與定量分析結果顯示，該區域主要由 Ag 與 In 元素所組成，且 Ag/In 原子比例接近 1:2，符合 AgIn_2 之化學組成，因此可判定其主要反應相為 AgIn_2 ；同時，In 基體內亦可觀察到離散分布之 AgIn_2 析出物，而 Ni 阻障層仍可見部分消耗。至 In-10Ag 時，界面則形成更厚且更連續之 AgIn_2 層，Ni 阻障層消耗顯著降低，顯示較高 Ag 含量有助於透過 AgIn_2 反應層抑制 In-Ni 直接互擴散。

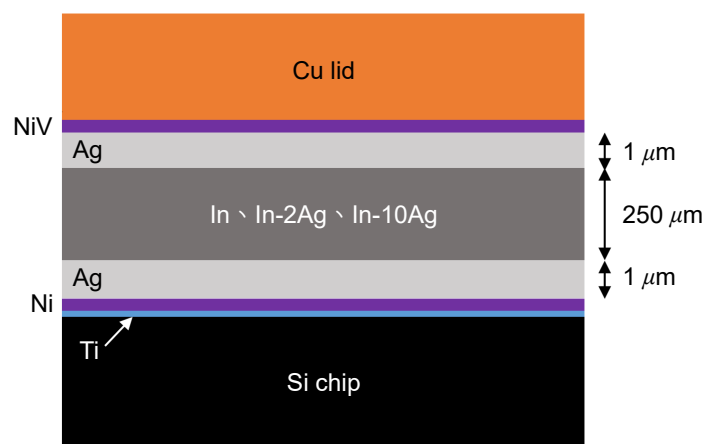


圖 4. Ti/Ni/Ag | TIMs | Ag/NiV/Cu 三明治結構示意圖。

綜合以上結果，鋼基 TIM 的設計關鍵，在於如何透過 TIM 成分與晶片金屬化層的協同設計，掌握其界面反應機制，並在熱傳性能與長期界面穩定性之間取得適當平衡。以純鋼為例，雖然其具有較高的本質熱導率與良好的延展性，有利於形成低熱阻界面，但其高擴散性

亦意味著在長時間熱暴露條件下，特別是在 AI 資料中心長時間高功率運轉所對應的服役環境中，若 Ni 阻障層持續被消耗，In 便可能進一步與下層 Ti 反應，進而削弱原有金屬化層的完整性並引發界面脫層 (delamination)。而界面脫層本質上即代表局部空孔、非均勻接觸區域，引發局部熱傳中斷，不僅會直接惡化熱傳導路徑，也可能進一步導致局部熱點生成，對封裝長期可靠度造成不利影響。因此對鋼基 TIM 而言，評估重點必須進一步考量其在使用過程中的界面金屬演化、阻障層穩定性與脫層風險。此部分之反應機制與最佳化設計，仍有待後續研究持續釐清。

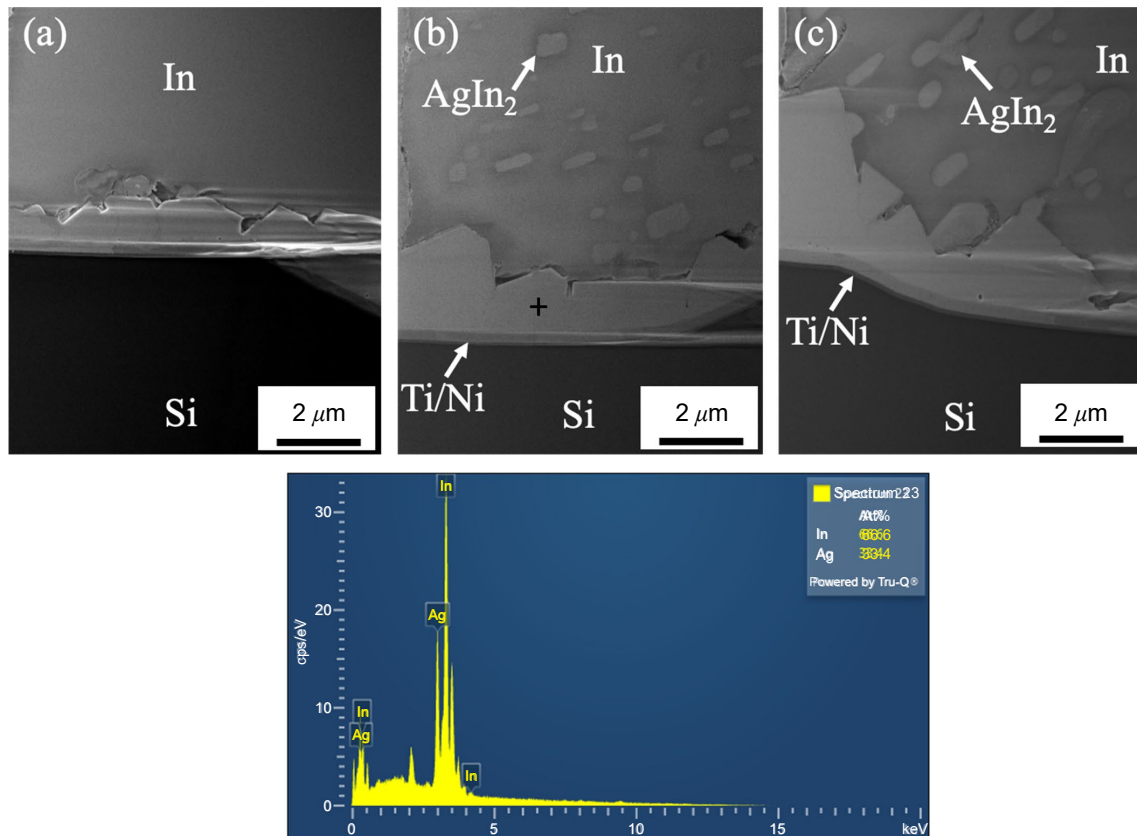


圖 5. (a) In；(b) In-2Ag；(c) In-10Ag 熱界面材料於 260 °C、5 min、3.5 MPa 熱壓接合條件下與 Ti/Ni/Ag 晶片背面金屬化層所形成之截面 SEM 影像與能量分散光譜儀 (Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDX) 圖譜。

六、新型熱界面材料與未來發展方向

除傳統高分子型 TIM 與金屬型 TIM 外，近年來新型熱界面材料的發展亦逐漸受到關注。此類材料之研究重點除了提升材料本體熱導率之外，更進一步透過導熱填料設計、三維熱傳骨架建構與界面結構最佳化，以期在高熱流密度、大面積異質整合封裝及更嚴苛的熱阻控制需求下，建立兼具高效散熱能力與長期穩定性之新型熱傳路徑。

6.1 高導熱填料強化 TIM：石墨烯、鑽石、h-BN 等

將高導熱填料導入 TIM 是提升導熱性能最直接且最廣泛採用的方法之一。此類填料通

常不作為獨立 TIM 類型存在，而是被加入既有 TIM 基體中，例如高分子複合材料、低熔點金屬複合系統，甚至液態金屬複合 TIM，以建立更有效率的熱傳通道。常見高導熱填料包括石墨烯、鑽石、六方氮化硼 (h-BN)、碳奈米管與其他高導熱碳系或陶瓷材料。其共同特徵在於具備遠高於一般高分子基材的本質熱導率，因此被視為提升 TIM 熱傳能力的重要候選材料。

高導熱填料中的石墨烯因其極高的本質熱導率而受到廣泛關注。有研究指出，懸浮單層石墨烯的熱導率常見約為 $1500-4600 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，部分文獻亦引用約 $4600 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 作為代表值⁽⁶⁾。此一特性使石墨烯成為極具潛力的高導熱填料，特別適合用於構築高連通性的導熱網路。然而，石墨烯在實際複合系統中容易出現石墨烯片層堆疊、團聚等製程問題，其在 TIM 中的最終熱導率增益往往與分散品質、取向排列及界面修飾程度密切相關，而非單純取決於其本身極高的理論熱導率；如何有效將石墨烯的高本質熱導率應用到 TIM 的熱導率提升，仍是未來研究與製程優化的重要課題。

相較之下，鑽石則兼具極高熱導率與電絕緣性，其在室溫下的熱導率可達約 2300 W/mK ⁽³⁾，因此被視為極具潛力的熱功能材料。由於鑽石本身熱傳能力極佳，其作為 TIM 填料或複合熱擴散材料時，可望有效提升複合系統之熱傳表現。然而，鑽石的應用同樣面臨界面問題，包括填料與基體之間的接觸熱阻、與金屬或高分子基體之界面相容性，以及成本較高等因素。因此，鑽石在 TIM 中的導入通常需配合粉體表面金屬化等界面修飾，才能更有效發揮其高熱導優勢。

h-BN 則是另一類極具代表性的二維材料，h-BN 的特點在於其熱導率具有明顯各向異性，且 h-BN 可在保持電絕緣的前提下，作為高分子 TIM 或複合 TIM 的散熱填料，尤其適合應用於兼具導熱與電絕緣要求的封裝系統。然而，正因其熱傳具有方向性，若填料排列無法有效導向厚度方向熱傳，則其對垂直方向的熱導率增益可能受限。這也使 h-BN 的應用特別依賴後續的取向設計與導熱網路建構。

6.2 燒結金屬型 TIM：燒結銀與燒結銅

燒結金屬型 TIM 可視為另一類具發展潛力的新型熱界面材料，其中以燒結銀 (sintered Ag) 最具代表性。燒結銀最早主要應用於新型功率晶片之固晶接合 (die attachment)，其目的在於取代無鉛錫鉾或部分低熔點接合材料，以滿足高溫操作、高熱流密度與長期可靠度需求。銀燒結的基本原理在於利用銀微粒或奈米銀顆粒於加熱與施壓條件下發生顆粒間擴散與頸縮 (necking)，並逐步形成連續的金屬層，隨著有機載體去除與孔隙率降低，最終可形成接近純銀之燒結層。以燒結銀為例，若燒結後孔洞率足夠低，則其有效熱導率理論上可達 270 W/mK 以上⁽¹⁹⁾，顯著高於傳統高分子型 TIM，亦高於多數低熔點金屬 TIM，因此在高熱流密度散熱應用中具有相當大的吸引力。

相較於傳統錫料型 TIM，燒結銀的一項重要優勢在於其接合機制並不依賴大量液相潤濕與 IMC 生成，其主要是透過銀顆粒間之固相燒結形成連續金屬熱傳通道。在燒結前，燒結銀通常以銀膏或預塗膏狀材料形式存在，因此於封裝組裝過程中可具備一定程度的流動性與服貼性，有助於適應晶片金屬化層、上蓋或冷板表面之微觀起伏與局部不平整，進而提升初始接觸品質。經燒結後，銀顆粒逐漸形成連續金屬網絡，若孔隙率可有效降低，則可提供高導熱且低熱阻之金屬熱傳路徑。此外，銀本身具有良好延展性，而燒結銀層中的多孔金屬結構亦可在一定程度上提供機械順應性，有助於吸收熱膨脹係數不匹配所造成的熱應力，降低熱循環過程中界面剝離或裂縫生成的風險。若其與晶片金屬化層及上蓋表面可形成穩定

之金屬鍵結，且界面不依賴脆性 IMC 作為主要接合層，則在長期服役條件下有望兼顧高導熱、低熱阻與較佳界面穩定性。如圖 6 所示，本團隊以鍍有 100/300/1000 nm 的 Ti/Ni/Ag 金屬化層 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 晶片與燒結銀膏於 250°C 、15 min、10 MPa 熱壓接合條件下對接，從截面 SEM 影像上即顯示燒結銀與晶片金屬化層具有穩定之金屬鍵結而不具有 IMC。從 TIM 的角度來看，燒結銀不僅具有高導熱率潛力，更可能在長期熱循環與高溫操作條件下展現優於傳統鋁料型金屬 TIM 的界面可靠度。

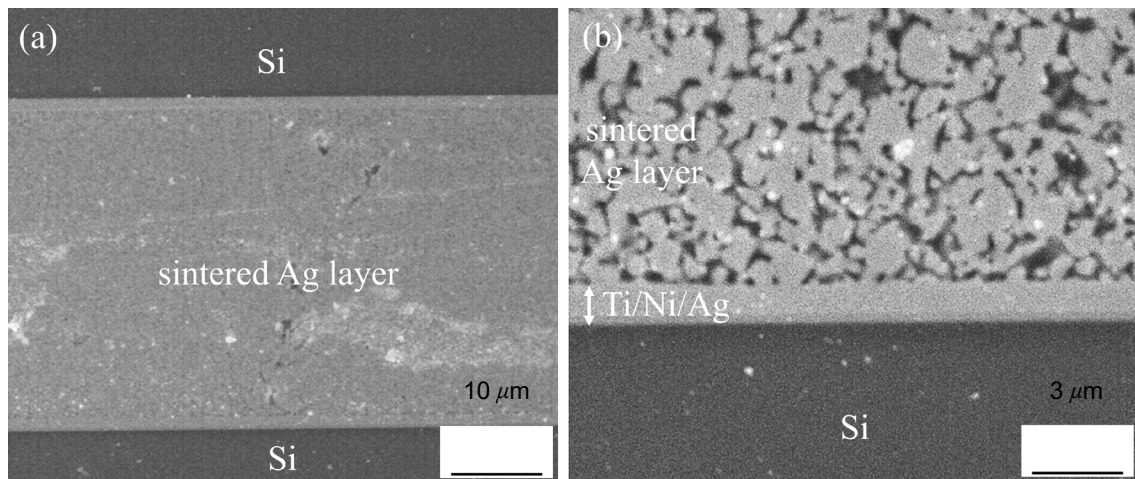


圖 6. 燒結銀與 Ti/Ni/Ag 晶片金屬化層於 250°C 、15 min、10 MPa 熱壓接合後之界面截面 (a) 整體燒結銀 Ti/Ni/Ag 接合結構；(b) 接合界面高倍率截面 SEM 影像。

除燒結銀外，燒結銅 (sintered Cu) 亦逐漸受到關注。相較於銀，銅具有更顯著的材料成本優勢，且同樣具備良好的本體導熱能力，因此被視為具潛力的下一代燒結型金屬 TIM 候選材料。然而燒結銅的挑戰在於銅表面較易氧化，使其燒結條件、潔淨度與接合穩定性控制更為困難。因此，就現階段發展而言，燒結銀仍是最具代表性的燒結型金屬 TIM，而燒結銅則可視為兼具高導熱潛力與成本優勢、但仍待進一步突破製程與界面穩定性問題的重要發展方向。燒結銀與燒結銅型的 TIM 顯示未來熱界面材料的發展已逐漸由傳統填隙與低熔點接合材料，延伸至以高導熱微孔金屬結構與固相金屬鍵結為核心的新型散熱材料開發方向。

七、結論

展望未來，隨著 GPU、HBM 與中介層所構成之封裝平台持續朝向更大面積與多晶粒異質整合模組演進，TIM1.5 所需面對的界面尺度、接觸均勻性與熱阻控制要求勢必進一步提升。例如，若未來 TIM1.5 面積尺度進一步超越 100 cm^2 ，且模組熱負載進入數 kW 等級，則材料本體熱導率、界面均勻性與長期熱阻穩定性都將面臨更嚴峻的挑戰。在此條件下，未來熱界面材料的選用標準將更為嚴苛；理想的 TIM 不僅須具備高本質熱導率與低界面熱阻，亦須在大面積接觸條件下維持穩定服貼性、受控界面反應、低空洞生成風險，以及與晶片金屬化層、上蓋、冷板及整體散熱架構之良好相容性。尤其對金屬型 TIM 而言，材料本體熱導率雖然重要，但真正決定其能否應用於下一代 AI 運算封裝的關鍵，仍在於其於長期服役條件下之界面老化、熱阻穩定性與整體製程整合能力。為便於比較不同 TIM 在熱傳

應用中的特性、優點與限制，本文進一步整理各類熱界面材料之代表性熱導率範圍及其熱傳應用表現，如表 1 所示。

表 1. 各類熱界面材料於熱傳應用中的代表性熱導率範圍及其優缺點比較。

TIM 類型	代表熱導率範圍	TIM 應用主要優點	TIM 應用主要限制
導熱膏 (Thermal grease)	約 1–10 W/m·K ⁽³⁻⁵⁾	流動性佳，可有效填補表面粗糙度與微小空隙；界面服貼性好；塗佈容易、成本低	易發生泵出、乾裂、材料老化與填料偏析；長期界面熱阻穩定性較差
導熱墊片 (Thermal pad)	約 1–3 W/m·K ⁽⁴⁾	厚度可控、組裝方便、一致性佳；適合補償較大公差與間隙	厚度通常較大，厚度方向熱阻偏高；微尺度空隙填補能力不如流動型材料
高分子複合材料 (Polymer composite TIM)	約 1–10 W/m·K ⁽⁶⁾	配方設計彈性高；可兼顧導熱、絕緣與機械順應性	高填料含量易造成黏度上升、加工困難、分散不均；界面熱阻與長期穩定性仍受限
相變材料 (PCM)	約 0.1–10.5 W/m·K ⁽⁴⁾	室溫下具形狀穩定性，升溫後可改善服貼性與接觸熱阻；兼具組裝便利與界面自適應能力	本體熱導率有限；可能出現材料遷移、相分離或熱老化
低熔點鉍錫合金 TIM (Bi-Sn、In-Sn、In-Bi-Sn 等)	Bi-Sn 約 20–30 W/m·K；高錒系約 57–86 W/m·K	可在較低接合溫度下熔融並填補界面孔隙；可形成連續金屬熱傳通道；整體熱阻較低	會形成 IMC，可能伴隨脆化、擴散、阻障層消耗與熱循環可靠度問題
鎳基液態金屬 TIM (Ga-In、Ga-In-Sn)	約可達 23.9–38 W/m·K ^(13, 14)	服貼性極佳；可在極薄界面下形成低接觸熱阻；適合高熱流密度熱點散熱	易氧化；有滲漏、腐蝕與材料相容性問題；封裝防漏設計難度高
軟金屬箔材與預成形金屬片 (如錒預成片)	純錒約 86 W/m·K	高導熱、低硬度、高延展性；可藉施壓或接近熔點條件填補微尺度空隙；厚度較易控制，不易滲漏	對表面平整度與施壓條件敏感；錒擴散快，需注意金屬化層與阻障層設計
燒結銀 TIM (Sintered Ag TIM)	若孔隙率低，可達約 270 W/m·K ⁽¹⁹⁾	燒結後可形成接近純銀之金屬連續通道；高導熱、低熱阻潛力高；若界面設計得宜，可避免大量脆性 IMC 主導接合	製程條件較嚴苛；孔隙率、燒結完整性與界面接觸品質高度影響熱傳；可製造性與長期可靠度仍需驗證
燒結銅 TIM (Sintered Cu TIM)	具高導熱潛力，理論上接近高導熱金屬等級，但實際值高度受氧化與燒結品質影響	材料成本較銀低；具高導熱潛力；適合作為未來金屬型 TIM 路線	易氧化，製程控制比燒結銀更困難；界面整合與可靠度問題尚待突破

因此，後續研究應進一步聚焦於大面積 TIM1.5 界面之熱阻量測與模型建立、金屬型 TIM 與晶片金屬化層之界面反應控制、極薄 BLT 條件下之熱機械穩定性，以及新型高導熱填料 TIM 在實際封裝中的可製造性與可靠度驗證。唯有在上述面向取得系統性突破，熱界面材料方能真正支撐下一代高整合、高熱流密度 AI 運算平台之散熱需求。

參考文獻

1. R. Prasher, *Proceedings of the IEEE*, **94** (8), 1571 (2006).
2. “The Role of Thermal Interface Material in Modern Electronic Devices.” Honeywell, please refer to the website:
<https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell-edam/pmt/oneam/en-us/electronic-materials/thermal-interface-materials/documents/hon-ess-adm-the-role-of-tims-in-modern-electronics.pdf>
3. Yongjun Huo *et al.*, *Advanced Science*, **13** (17), e24348 (2026)
4. Ihsan Ur Rahman *et al.*, *Thermal Science and Engineering Progress*, **62**, (2025).
5. Zihao Lin *et al.*, *Materials Today*, **86**, 393 (2025).
6. Arden L. Moore, Li Shi, **17** (4), 163 (2014).
7. Zeng Deng *et al.*, *Applied Thermal Engineering*, **280**, Part 1, 128008 (2025).
8. Piyush Kulkarni, Ali Davoodabadi, Zechen Zhang and Scott Schiffres, “Indium Solder TIM Stability under Temperature Cycling,” 2025 24th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Dallas, TX, USA, May 27-30 (2025).
9. Morgana Ribas, Anil Kumar, R. Pandher and Rahul Raut. “Comprehensive Report on Low Temperature Solder Alloys for Portable Electronics.” SMTA International Conference, **1** (1), Rosemont, Illinois, USA, Sept.-Oct. (2015).
10. Glazer, J., *International Materials Reviews*, **40** (2), 65 (1995).
11. Mulugeta Abtey, Guna Selvaduray, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **27** (5-6), 95 (2000).
12. Dragan Miroslav Manasijevic *et al.*, *Metallurgical and Materials Engineering*, **26** (3), 239 (2020).
13. Baihong Li *et al.*, *International Journal of Thermal Sciences*, **218**, 1290 (2025).
14. Yuriy Plevachuk *et al.*, *Journal of Chemical & Engineering Data*, **59** (3), 757 (2014).
15. Chun-Hao Chen, Chung-Lin Yang, Tung-Han Chuang, *Journal of Alloys and Compounds*, **936**, (2023).
16. Li-Chi Huang, Yan-Ping Zhang, Chih-Ming Chen, Liang-Yih Hung, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **33**, 13143 (2022).
17. Yiou Qiu *et al.*, *Materials Today Communications*, **42**, 2352 (2025).
18. Liu, Y.M., Chen, Y.L. & Chuang, T.H., *Journal of Electronic Materials*, **29** (8), 1047 (2000).
19. A. Sghuri *et al.*, *Acta Materialia*, **257**, 119109 (2023).

作者簡介

鄭淑慧現為國立陽明交通大學國際半導體產業學院碩士生。

Shu-Hui Tay is currently a M.S. student in the International College of Semiconductor Technology at National Yang Ming Chiao Tung University.

陳俊豪為國立臺灣大學材料科學與工程研究所博士，德國弗勞恩霍夫可靠度與微系統整合研究所博士後研究員，現為國立陽明交通大學國際半導體產業學院助理教授。

Chun-Hao Chen received his Ph.D. in the Department of Materials Science and Engineering from National Taiwan University. He was a Postdoctoral Researcher at the Fraunhofer Institute for Reliability and Microintegration (Fraunhofer IZM) in Germany and is currently an Assistant Professor at the International College of Semiconductor Technology at National Yang Ming Chiao Tung University.