

從製程演進解析先進封裝所需材料與化學品及其供應鏈角色

Analysis of Required Materials, Chemicals, and Supply Chain Roles from the Evolution of Advanced Packaging Processes

陳厚福、杜安邦、吳允中、吳佳鴻

Hou-fu Chen, An-pang Tu, Yun-jung Wu, Chia-hung Wu

隨著半導體先進製程微縮成本快速提升，先進封裝與異質整合已成為延續系統效能提升的重要技術方向。本文從 3D IC 與異質整合封裝技術的發展架構出發，探討 2.5D IC、TSV-based 3D IC、fan-out packaging 與 hybrid bonding 等主流技術之製程特性與工程挑戰，並進一步分析光阻材料、濕式化學品、銅電鍍液、封裝樹脂及散熱材料等關鍵化學材料於先進封裝製程中的角色與需求。亦針對高密度互連、熱管理、材料相容性、界面可靠度及 ESG 永續趨勢等議題進行討論，說明化學材料供應商如何由傳統原料供應角色，逐步轉變為先進封裝製程整合中的重要技術合作夥伴。

As the scaling cost of advanced semiconductor nodes continues to rise, advanced packaging and heterogeneous integration have become key technologies for sustaining system performance improvement. This article reviews the development of major advanced packaging architectures, including 2.5D IC, TSV-based 3D IC, fan-out packaging, and hybrid bonding, together with their associated process characteristics and engineering challenges. The roles and requirements of critical chemical materials used in advanced packaging processes-such as photoresists, wet chemicals, copper electroplating solutions, packaging resins, and thermal management materials-are also discussed. In addition, issues related to high-density interconnection, thermal management, material compatibility, interface reliability, and ESG sustainability trends are examined. The study further highlights how chemical material suppliers are evolving from conventional raw material providers into essential technical partners in advanced packaging process integration.

一、前言

當前半導體產業正處於一個明顯的轉折點。隨著先進邏輯製程節點的微縮成本快速攀升，單純依賴晶體元件尺寸縮小，已難以在效能、功耗與成本之間取得平衡。在此背景下，

先進封裝與異質整合 (heterogeneous integration) 被視為延續系統效能成長的核心技術路徑。

與傳統封裝不同，先進封裝已不再僅是後段製程的延伸，而是直接參與整體系統架構的設計。從晶片之間的互連距離、I/O 密度、電源完整性與散熱路徑，皆需仰賴封裝技術來實現。此技術的轉變，使封裝製程中使用的材料與化學品扮演的角色產生根本性改變。原本僅被視為「製程耗材」的光阻、顯影液、濕製程化學品與封裝樹脂等，逐漸轉變成會影響製程可行性、良率穩定度與量產能力的關鍵要素。

長春集團為國內第二大石化集團，目前已有多項化學材料與濕式化學品供應於先進封裝與異質整合領域，藉由與客戶間的合作與溝通，深知該領域所需的材料需求變化，並持續投入研發以應對不斷提升的特性需求。因此在以下的文章，我們將先彙整眾多文獻中所提及的先進封裝及異質整合相關技術演進，並以本公司位處化學品供應鏈的角度，解析 3D IC 與異質整合先進封裝製程的技術脈絡、材料特性需求及材料供應商可扮演的角色進行介紹。

二、3D IC 與異質整合封裝的技術輪廓

3D IC 的核心精神在於透過垂直堆疊方式，將多顆晶片或多層晶圓整合於單一封裝中，並藉由矽穿孔 (through-silicon via, TSV)、微凸塊 (micro-bump) 或混合鍵合 (hybrid bonding) 等方式完成垂直互連^(1,2)。相較之下，2.5D IC 則是透過矽中介層 (silicon interposer) 或有機中介層 (organic interposer)，將多顆晶片以橫向方式整合，再由中介層提供高密度互連。(參考圖 1)

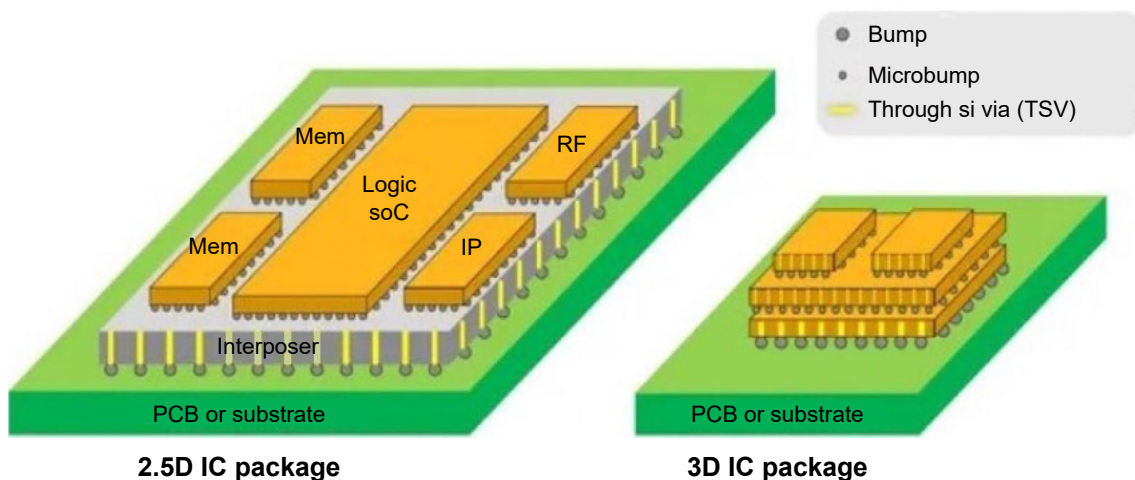


圖 1. 2.5D IC Package：使用矽轉接板 (silicon interposer) 將多個晶片 (如邏輯 SoC 和記憶體 mem) 水平並排放置，透過矽穿孔 (TSV) 連接到下方基板；3D IC Package：將晶片垂直堆疊，晶片之間使用微凸塊 (microbump) 連接，實現最短的互連長度。(圖片來源：A7893)

而異質整合進一步擴展此概念，將不同製程節點、不同功能的晶片 (如邏輯、記憶體、ASIC、射頻與功率元件) 整合於同一封裝中，使系統設計不再受限於單一製程平台。下表 1 提供目前發展中的先進封裝架構及種類整理。

表 1. 先進封裝架構及種類^(6,7)。

架構類型	說明	特點
2.5D IC (interposer-based)	• 使用矽中介層 (silicon interposer) 或有機中介層 • 晶片橫向排列，透過微凸塊 (micro-bump) 連接	• 製程成熟度高，良率佳 • TSV 多存在於 interposer 中
TSV-based 3D IC (through-silicon via)	• 利用穿矽通孔 (TSV) 作為垂直電性連接 • 晶片可為： • die-to-die • die-to-wafer • wafer-to-wafer	• 高頻寬、低延遲 • 製程複雜、成本高
Fan-out 3D / Panel-level packaging	• 以 RDL (redistribution layer) 為核心 • 不需傳統基板	• 成本較低 • 適合高 I/O 與高產量產品
Hybrid bonding 3D IC	• 利用 Cu-Cu + dielectric bonding • 無微凸塊 (bumpless)	極高互連密度 未來先進製程主流

三、封裝架構發展趨勢與工程挑戰

目前在 AI、高效能運算 (HPC) 與高速通訊需求快速成長下，3D IC 與異質整合已逐漸成為提升系統效能與頻寬密度的核心技術方向，而在先進封裝架構的發展趨勢主要依循以下幾項原則：

1. 高密度與小型化：隨著 IC 封裝技術的進步，3D 與 2.5D 封裝逐漸成為主流趨勢，可實現更薄、更短的電子結構設計，提升封裝密度並縮小系統尺寸。而 Pitch 的持續縮小，使得製程中對於高解析度光阻、厚膜圖形穩定性與精密顯影控制的需求同步上升。^(3,4)
2. 異質整合與功能擴展：透過異質整合的技術發展，可允許不同功能晶片在最適製程節點下製造，再透過先進封裝整合為單一系統。而此一趨勢帶來的挑戰在於不同材料間的熱膨脹係數 (CTE) 差異，使封裝材料、底部填充劑 (underfill) 與感光介電材料的設計，成為影響系統可靠性的關鍵。⁽⁵⁾
3. 熱管理挑戰：由於高度集成的封裝使單位面積發熱量顯著提升，對於材料的高導熱性、低熱阻與長期熱穩定性提出更高的要求。因此散熱材料、導熱填料與高導熱封裝樹脂成為先進封裝不可或缺的一環。
4. 可靠性議題：材料間的熱膨脹差異易導致應力集中，進而影響 C4 焊點、TSV 與銅柱的壽命。為提升壽命及可靠性，需從材料的選擇、結構設計與製程條件三方面進行整體優化。
5. 製程創新：透過新型互連技術 (如 TSV、超細互連) 與新製程 (RDL-first、壓縮成型) 持續發展，使得感光材料、濕製程化學品與封裝樹脂的應用範圍快速擴大。

下表 2 整理了整體封裝架構的演進及產業發展，不論是由 2.5D 走向真 3D 堆疊，或是由 TSV 進一步發展至混合鍵合 (hybrid bonding)，封裝互連的 Pitch 持續縮小、結構高度增加，且製程步驟顯著拉長，使得封裝製程中所使用的光阻材料，必須同時面對高解析度、高厚膜結構與長時間化學製程耐受等多重挑戰，材料設計難度已與傳統 PCB 光阻有本質上的差異。在這樣的製程環境下，材料選擇不再只是性能指標的比較，而是牽涉整體製程整合能力的系統工程問題。

表 2. 先進封裝技術發展趨勢^(3, 4)。

發展	趨勢
技術演進	• 由 TSV → hybrid bonding：pitch 從 40 μm → < 10 μm → < 2 μm，封裝高度與電阻下降趨勢 • 由 2.5D → 真 3D 堆疊：HBM、logic-on-logic 堆疊，記憶體與邏輯晶片深度整合 • 異質整合成為主流：logic + memory + RF + power，不同製程節點整合於單一封裝
產業發展	• AI / HPC 驅動：HBM + GPU / ASIC • 先進封裝取代部分先進製程微縮 • 材料與製程設備重要性提升：光阻、顯影、濕製程化學品需求倍增

然而，隨著 3D IC 封裝由傳統 TSV-based 架構逐步朝向 Hybrid bonding 發展，兩者對材料與化學品的需求亦開始出現明顯差異。TSV 製程的核心在於高深寬比結構中的深孔填銅、絕緣層完整性與熱應力控制，因此材料設計重點多聚焦於厚膜光阻、高填孔能力電鍍液及低 CTE 封裝材料；相較之下，Hybrid bonding 則更重視超高對準精度、奈米級表面平坦度與低缺陷界面接合，因此對 CMP 後清潔、低殘留清洗液、超平坦介電材料及表面活化化學品的要求顯著提高。

此一差異也意味著，未來先進封裝材料供應商除需具備單一材料性能開發能力外，更需深入理解不同封裝架構下的整體製程整合需求。下表 3 整理 TSV 與 Hybrid bonding 於材料需求上的主要差異。

表 3. TSV 與 Hybrid bonding 對材料需求比較表。

比較項目	TSV (through-silicon via)	Hybrid bonding
主要互連形式	Cu-filled TSV + Micro-bump	Cu-Cu + Dielectric direct bonding
製程核心挑戰	深孔填銅、界面可靠度、熱應力	表面平坦度、對準精度、低缺陷接合
光阻材料需求	厚膜、高 Aspect ratio、高機械強度	超高解析度、低殘渣、低粗糙度
電鍍液需求	Void-free bottom-up filling	極低粗糙度與均勻 Cu 表面
濕式化學品需求	深孔清洗、殘渣去除、金屬污染控制	超潔淨表面活化、低 particle 控制
封裝樹脂需求	低 CTE、高耐熱、低應力 underfill	低翹曲、低應力、高尺寸穩定性
熱管理需求	TSV 熱應力與局部散熱	高密度堆疊下整體熱阻控制
良率關鍵	TSV void、Cu pumping	Bonding void、顆粒汙染
材料設計重點	高機械穩定性	高界面潔淨度與平坦度

四、顯影材料 (光阻) 的製程角色

如同在前一章節的敘述，隨著製程的演進、Pitch 的縮小，光阻材料已不再僅是用於圖形轉移的曝光耗材，而是同時承擔結構形成與製程穩定度控制的重要角色。在傳統 PCB 製程中，光阻主要用於銅線圖形轉移，材料設計重點在於附著力、成本與大面積塗佈穩定性，通常不需過度考慮高深寬比、結構或多次熱循環問題。但到了先進封裝製程，光阻主要應用於「TSV via patterning」、「RDL 製程」、「微凸塊／混合接合前圖案形成」階段，除了必須具備應有的高解析度外，由於在完成顯影後，還必須在後續的電鍍、熱處理與化學製程中

維持結構穩定，因此先進封裝製程用的光阻材料必須同時具備「光阻」與「工程材料」的雙重角色。

相較於傳統 PCB 光阻主要關注附著力與成本，先進封裝光阻更需要在解析度、結構強度、化學耐受性與去除潔淨度之間取得平衡，這也是兩者在材料設計邏輯上的根本差異。而在先進封裝製程中的特殊需求如高膜厚 (10–100 μm)、高 Aspect ratio 及 Cu / Dielectric 混合結構等，材料也會直接影響圖形解析度 (line width / CD uniformity)、側壁垂直度 (sidewall angle)、殘渣污染 (residue) 等，對於後段蝕刻、電鍍與接合的良率會產生重大影響，因此對於光阻材料的品質要求及專屬客製化功能的需求極高，在 3D IC 封裝領域中，光阻材料已從傳統製程的標準化學品轉為需高度客製化的製程材料。

一般在敘述光阻材料，會依其作用機制不同區分為正型光阻 (positive tone) 及負型光阻 (negative tone)，在先進封裝製程中同樣有正型光阻與負型光阻之分。正型光阻在曝光區域溶解性提升，特別適用於高解析度 RDL 製程，可具備較佳的線邊品質，但其在厚膜能力與電鍍耐受性上的不足，則需透過配方設計彌補。負型光阻的優勢會在曝光後交聯形成高機械強度結構，因此較適合 TSV 與銅柱電鍍模板，但在去除性與殘渣控制上需較高工程管理能力⁽⁹⁾。下表 4 整理了在先進封裝製程中兩種類型的光阻其相關機制及材料重點的整理比較。

表 4. 正型光阻與負型光阻於先進封裝製程之比較。

項目	正型光阻 (Positive tone PR) 顯影系統	負型光阻 (Negative tone PR) 顯影系統
曝光後	• 曝光區被顯影蝕刻掉	• 未曝光區被顯影蝕刻掉
化學機制	• 曝光後產生光酸 (PAG) • 酸催化斷鏈 (deprotection) • 增加光阻在鹼性水溶液中的溶解度	• 曝光區發生交聯反應 (cross-linking) • 未曝光區被顯影液溶解
主流顯影液	• TMAH	• 有機溶劑型 (PGMEA, butyl acetate) • 水系弱鹼顯影液 (amine-based)
材料重點	• 金屬離子控制 (Na^+ 、 K^+ < 10 ppt) • 有機胺雜質抑制 • 表面活性劑 (surfactant) 調控顯影均勻性	• 厚膜 TSV (50–100 μm) • 高結構強度需求 • 較低解析度但高機械穩定性
主要供應商	• TOK • JSR • Shin-Etsu Chemical • Merck (AZ Electronic Materials) • FUJIFILM Electronic Materials	• Kayaku Advanced Materials (原 MicroChem) • TOK (TMMR/TMMF系列) • DuPont (Dry Film / Thick PR)

在實際先進封裝製程中，正型與負型光阻往往並非互相取代，而是依不同製程段落搭配使用。例如，在高解析度 RDL 層中，常優先選用正型光阻以確保線邊品質；而在 TSV 或銅柱電鍍等高結構強度需求的製程段落，則多採用負型光阻作為電鍍模板。此種「分工式應用」也反映出先進封裝光阻材料已高度製程化，而非單一規格即可通用。

五、濕式化學品的製程角色

相較於光阻及後續會談到的電鍍液、封裝材料，濕式化學品 (wet chemicals) 在先進封裝製程中往往較少被單獨討論，卻實際貫穿整個封裝流程，並對製程良率、界面品質與長期可

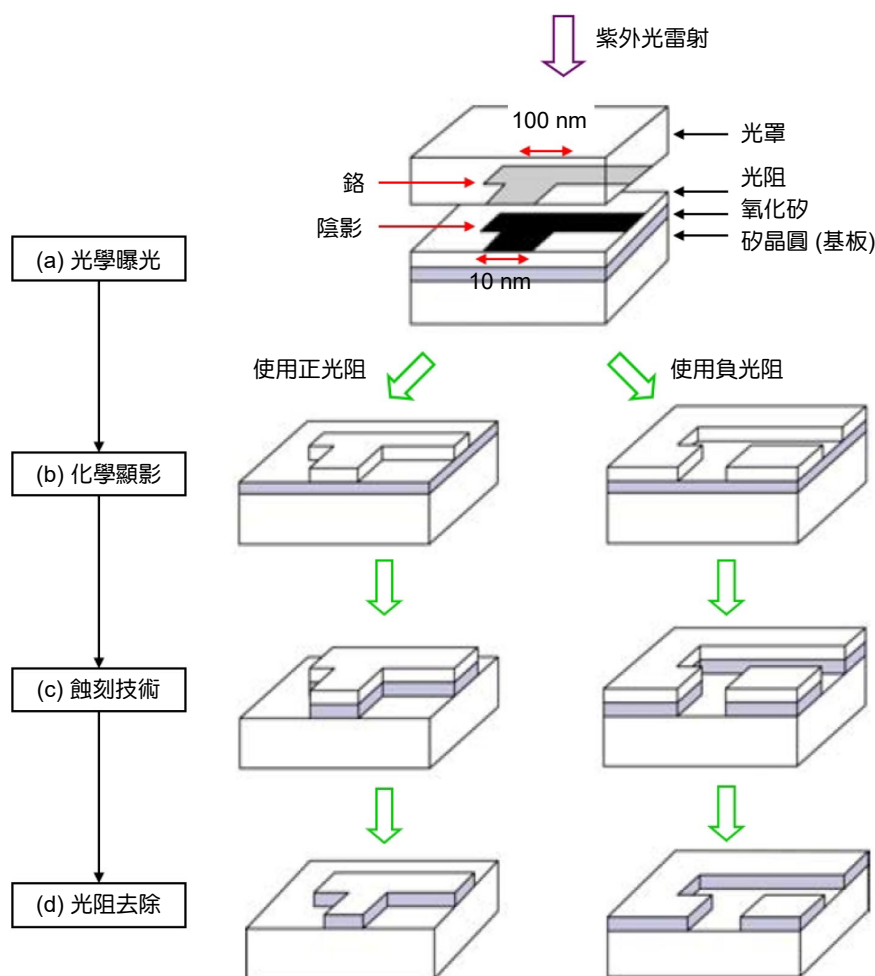


圖 2. 正型光阻與負型光阻成像差異示意圖。圖片來源：張俊彥，半導體元件物理與製作技術，高立圖書。

靠度產生關鍵影響。隨著 3D IC 與異質整合封裝結構的複雜度快速提升，濕製程已不再只是輔助性步驟，而是成為支撐製程可行性與量產穩定度的重要基礎。

與傳統封裝或 PCB 製程相比，先進封裝所使用的濕式化學品，面臨更嚴苛的純度要求及更複雜的材料相容性挑戰。這是由於先進封裝製程會同時涉及金屬、介電層、感光材料與封裝樹脂等多種材料體系，任何微量雜質、界面殘留或化學不相容，都可能在後續製程中放大為電性或可靠度缺陷⁽¹⁰⁾，使濕式化學品由原本的製程配角，逐步轉變為影響先進封裝供應鏈競爭力的重要材料體系。

再者，相較於前段製程，用於先進封裝的濕式化學品挑戰更為複雜，主因在於不同晶片、介電層與封裝材料可能來自不同供應商與製程平台，使濕式化學品在實際應用時，必須同時相容多種材料系統，並在清洗效率與材料保護之間取得平衡。這樣的製程條件需求，意味化學品供應商不僅需提供高純度產品，亦需深入理解客戶的封裝架構與實際製程條件，才能避免因材料不相容而引發潛在風險。因此濕式化學品已逐步由原本的標準化耗材，轉變為高度製程導向、需與封裝技術共同優化的材料解決方案。

表 5. 傳統封裝與先進封裝濕式化學品需求差異比較。

比較項目	傳統封裝 / PCB	先進封裝
純度要求	中等	極高 (金屬離子、微粒嚴控)
材料相容性	單一或少數材料	多材料系統 (Cu / dielectric / PSPI / 樹脂)
製程位置	局部輔助步驟	幾乎貫穿所有關鍵節點
用量趨勢	相對穩定	隨晶圓尺寸與層數快速成長
供應關鍵	成本與交期	穩定性、批次一致性、可追溯性
回收需求	次要	成本 + ESG + 供應鏈韌性

此外，隨著晶圓數量及封裝層數增加，濕式化學品的總使用量亦呈現顯著成長，除了考驗供應商長期供應的穩定性、批次一致性與在地化供應能力外，也對於這些製程廢料是否能再回收利用形成新的課題。在此背景下，溶劑回收與再利用逐步由單純的成本控管手段，轉變為提升製程韌性與支撐永續發展的重要機制。顯影液、剝離液與各類有機溶劑，若能在維持製程品質的前提下回收再利用，不僅可降低原料消耗與廢棄物處理壓力，也有助於降低供應鏈對外部原料波動的敏感度。

從材料供應商的角度，溶劑回收並非僅是後端處理問題，而需在化學品設計階段即納入考量，包括熱穩定性、雜質累積與再純化後品質可靠度。具備回收再利用的濕式化學品，亦使供應商能在客戶端提供更完整的製程支援，而非僅止於單一產品供應。

總體而言，濕式化學品在先進封裝製程中的價值，已不再僅體現在單一製程步驟的功能性，而是延伸至製程整合、良率管理、供應鏈穩定與永續發展等層面。對化學材料供應商而言，這代表角色的根本轉變——由傳統化學品提供者，轉變為需深入理解先進封裝製程脈絡與材料相容性的技術夥伴。未來，能同時兼顧高純度、製程相容性與回收能力的濕式化學品解決方案，將成為 3D IC 與異質整合先進封裝持續發展的重要基礎。

六、銅電鍍液與互連金屬化學品的製程角色

在先進封裝中，互連金屬品質直接決定了系統效能、功耗與長期可靠度，而銅電鍍製程是實現高密度互連結構的核心步驟之一。無論是 TSV 的深孔填銅，或是 RDL 中的細線寬金屬走線，最終形成的銅結構品質，都高度依賴於電鍍液配方設計與製程控制。與傳統 PCB 電鍍不同，先進封裝用的銅電鍍並非僅追求沉積速率或成本效率，而是必須在極為嚴苛的幾何條件下，實現無空洞 (void-free)、低內應力、高均勻性的金屬填充。使得銅電鍍液從單純的「化學溶液」，轉變為高度工程化的材料系統。

典型的銅電鍍液除基礎銅鹽與導電介質外，尚需搭配多種功能型添加劑，以精確控制銅的沉積行為。添加劑通常可分為：抑制劑 (suppressor)、促進劑 (accelerator) 與整平劑 (leveler)。其中，抑制劑主要作用於銅表面，降低整體沉積速率，避免表面過度成長；促進劑可加速孔底或特定區域的沉積，確保深孔能由下而上填滿；整平劑則用於修正局部沉積不均，提升表面平坦度。三者間的平衡，是實現高深寬比結構成功填孔的關鍵。⁽¹¹⁾

雖然 TSV 與 RDL 均使用銅作為主要互連金屬，但兩者對電鍍化學品需求存在顯著差異。TSV 更重視深孔填充能力與內部缺陷控制，任何微小的空洞或接縫，都可能在後續熱循環中演變為風險⁽¹²⁾，因此銅電鍍液的雜質控制更顯得重要。而相較之下，RDL 製程中的

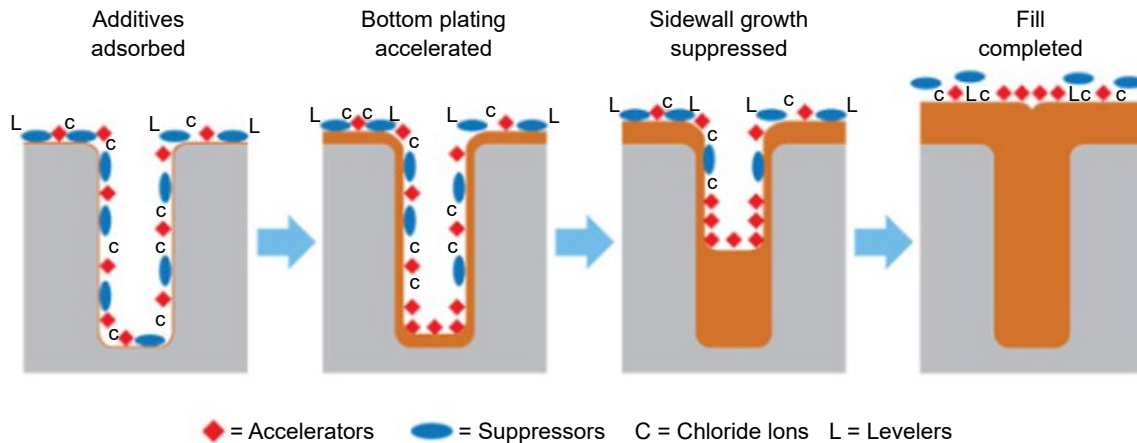


圖 3. TSV 結構中銅電鍍填孔示意圖 (Bottom-up filling)。圖片來源：Lamresearch (<https://newsroom.lamresearch.com/Tech-Brief-Elements-of-Electroplating>)。

銅電鍍，則更關注線寬均勻性、表面粗糙度與線邊品質，因其直接影響訊號完整性與後續介電層堆疊品質。因此電鍍液配方往往需針對不同應用進行客製化設計，而非一套配方通用所有製程。⁽¹³⁾

七、封裝材料與散熱材的製程角色

隨著先進封裝朝向更高堆疊密度與更高功率密度發展，局部熱累積 (hot spot) 問題日益嚴重。封裝材料的角色已不再僅限於「保護晶片」或「填補空隙」，而是逐步成為影響系統熱管理、機械可靠度與長期壽命的關鍵工程材料。在此需求下，Binder 與樹脂技術成為先進封裝材料性能的發展核心。在多數封裝材料中，不論是環氧型封裝膠 (epoxy molding compound, EMC)、Underfill、感光介電材料 (如感光型聚醯亞胺 (photosensitive polyimide, PSPI))，或是導熱界面材料 (thermal interface material, TIM)，其最終性能往往並非單純由單一樹脂或填料所決定，而是高度取決於樹脂骨架設計與其與填料間的相互作用，從化學材料供應商的角度來看，樹脂合成與 Binder 系統的設計能力，已成為能否支撐先進封裝製程演進的關鍵競爭力。

先進封裝常用的樹脂系統主要包含環氧樹脂、酚醛樹脂、聚醯亞胺與矽氧烷系材料，各自具備不同的熱、機械與加工特性，必須依封裝應用需求進行選擇與改質。以環氧樹脂為例，其優勢在於良好的機械強度、可調式交聯密度與成熟的量產體系，廣泛應用於 EMC 與 Underfill。然而，在先進封裝製程中，由於晶片堆疊與 TSV 結構設計導致的熱膨脹係數不匹配問題日益嚴重，傳統高模數、高交聯密度的環氧系統，反而可能加劇應力集中，因此，透過分子結構設計來降低彈性模數、導入柔性鏈段或透過反應型矽氧烷矽材料進行修飾，已成為近年的樹脂設計方向。

另一方面，感光型聚醯亞胺由於具備高耐熱性與良好的介電特性，在 RDL 與先進封裝介電層中亦占有關鍵地位。然而，PI 系統通常伴隨較高的加工溫度與內應力，對晶圓翹曲與製程設計形成挑戰，使材料供應商在選擇單體、分子量控制與交聯反應設計上需優化製程相容性。^(14, 15)

材料的散熱對策：

相較於傳統封裝，3D IC 中的熱傳路徑更加複雜。由於熱源可能位於堆疊晶片中央區域，熱量需穿越多層介電層、金屬互連與封裝材料後才能有效散出，因此材料的熱膨脹係數 (coefficient of thermal expansion, CTE)、熱導率 (thermal conductivity) 與界面熱阻 (thermal interface resistance) 匹配能力，成為封裝材料設計的重要考量。

目前先進封裝常見的材料散熱對策主要包含以下幾個方向：

1. 高導熱填料導入：透過氮化硼 (BN)、氮化鋁 (AlN)、氧化鋁 (Al_2O_3) 等高導熱填料提升 Underfill 與 EMC 之熱傳能力。
2. 低 CTE 材料設計：降低材料與矽晶片間之熱膨脹差異，以減少熱循環造成的界面應力與翹曲問題。
3. 高導熱 TIM 材料：改善晶片與散熱模組間之界面熱阻，提高熱傳效率。
4. 低溫固化樹脂：降低封裝製程中的熱負載，減少殘留應力與晶圓翹曲。
5. 材料界面工程：透過表面改質與反應型官能基設計，提高填料分散性與界面接著穩定性。

在高導熱封裝與散熱材料中，填料 (如氮化硼、氮化鋁、氧化鋁等) 雖是提升導熱性的關鍵，但其實際效果高度依賴 Binder 系統對填料的分散能力與界面黏著性，若填料與樹脂界面相容性不足，將導致導熱路徑中斷、機械強度下降，甚至在熱循環中引發界面剝離。因此，封裝材料 Binder 設計已從單純「黏著劑」的角色，轉變為界面工程 (interface engineering) 的一部分。透過表面改質填料、導入反應型官能基或多段式樹脂結構，使樹脂與填料之間形成穩定的化學或物理鍵結，成為提升封裝材料可靠度的核心策略。⁽¹⁷⁻⁹⁾

隨著封裝結構持續朝向更薄、更高層數發展，封裝與散熱材料對 Binder 與樹脂技術的需求，將同時朝向「多性能整合」與「製程友善性」演進。低熱膨脹、高導熱、低翹曲與可回收性等需求，往往存在相互衝突，這也意味著樹脂合成與 Binder 設計將不再只是配方調整，而是需要從分子設計階段即納入封裝製程與系統應用的整體考量^(16, 20)。因此，在未來 3D IC 與異質整合封裝中，散熱材料的角色將不再僅是輔助性材料，而是直接影響封裝可靠度與系統效能的核心關鍵。材料供應商除了需提升材料本身導熱能力外，也需同時兼顧加工性、低翹曲、低應力與長期可靠度等多重需求。

八、ESG 與永續議題

在半導體產業鏈，ESG (Environmental, Social, and Corporate Governance) 議題正快速由「企業社會責任」轉變為影響供應鏈選擇與製程決策的重要因素，特別是對於先進封裝而言，因其製程往往需涉及使用大量高純度化學品、溶劑等，而為提高純度往往需要耗費大量的能源進行純化，使用後的溶劑回收也成為一大問題，使材料與化學品供應商在永續轉型中可扮演重要且關鍵的角色。⁽²¹⁾

在先進封裝製程中，顯影液、剝離液與各類有機溶劑的使用量隨製程層數與晶圓尺寸提升而快速增加，若僅依賴一次性使用，不僅成本壓力顯著，也將使碳排與廢棄物管理成為重大挑戰。因此，溶劑回收與純化技術逐漸由原本的附加選項，轉為產線中不可或缺且不可不作的一環。透過精密蒸餾、分離與純化技術，回收溶劑可在維持製程純度要求的前提下重新導回產線，達到降低原料消耗與廢棄物排放的雙重效果。對材料供應商而言，是否具備回收與再純化的整合能力，正逐步成為客戶評估供應穩定性與長期合作的重要指標。

除了回收技術外，材料本身的碳足跡也開始受到關注，包括原料來源、合成路徑、反應溫度與能源使用效率等，透過反應條件優化、低溫合成或採用替代原料，材料供應商可在不影響性能的前提下降低單位產品的碳排放。而這類低碳設計往往還能與製程需求形成正向循環，例如低溫固化封裝樹脂不僅降低能源消耗，也有機會減少晶圓翹曲與熱應力，提升良率。

而在 ESG 議題中還有一項重要環節即是「散熱」，呼應到第七節中的材料的散熱對策，透過高效率散熱材料可降低晶片工作溫度，延長元件壽命，並有機會減少整個系統的能耗需求。因此，從材料角度提升散熱效率，不僅是性能需求，也與節能減碳直接相關。

表 6. ESG 面向與相關封裝材料對策。

ESG 面向	材料對策
回收	溶劑純化再利用
低碳	低溫固化
節能	高導熱材料
低耗	製程簡化

九、結論

展望未來，3D IC 與異質整合封裝仍將面臨多項關鍵挑戰。首先，隨著 Hybrid Bonding Pitch 持續縮小至微米甚至次微米等級，對材料潔淨度、表面平坦度與缺陷控制的要求將更加嚴苛，材料微量雜質與奈米級顆粒污染皆可能直接影響接合良率。其次，高功耗 AI 晶片與 HBM 堆疊所造成的熱管理問題，也將進一步提高高導熱、低 CTE 與低熱阻材料的重要性。

此外，由於異質整合需同時整合不同製程節點、不同材料系統與不同供應鏈來源，材料相容性與供應穩定性將成為先進封裝量產的重要風險來源。因此，材料供應商除需具備高階材料開發能力外，也需同步建立完整的品質追溯、在地化供應與快速客製化能力，以提升供應鏈韌性。

在地緣政治與 ESG 趨勢持續影響全球半導體供應鏈的背景下，未來先進封裝材料供應策略亦將朝向「在地化」、「低碳化」與「高可靠度」發展。能同時兼顧製程整合能力、材料創新與永續需求的化學材料供應商，將在下一代先進封裝產業中扮演更關鍵的角色。

綜觀 3D IC 與異質整合先進封裝的發展，可清楚看見封裝製程已不再是單一技術的堆疊，而是一個同時整合材料、製程、設備與系統設計的工程體系。在這個體系中，化學材料與化學品供應商的角色，已由過去單純的原料提供者，逐步轉變為影響製程穩定性、良率與永續表現的關鍵。

從光阻與顯影材料，到濕製程化學品、電鍍液，再到封裝與散熱材料中的樹脂與 Binder 技術，材料設計已深度影響先進封裝技術能否順利量產的核心。未來，隨著封裝互連尺度持續縮小、功率密度持續提升，材料所需承擔的角色將更加多元，對於材料及化學品供應商而言，單一性能的優化已不足以因應產業需求。

更重要的是，在現今 ESG 與永續發展已逐漸成為產業共通語言下，材料的回收性、碳足跡與能源效率，將與其所具備的電性與機械性能等同樣重要。因此若能同時針對封裝製程

的需求在材料科學本質與永續策略中提出化學解決方案，將成為支撐下一代 3D IC 與異質整合封裝發展的關鍵基礎。

長春集團憑藉著在有機高分子材料領域豐富的材料設計及合成量產經驗，以及在生產過程中的品質控管能力，相信未來在先進製程封裝所需的材料領域，針對客戶的材料客製化及穩定供應能力的要求，皆盡可能滿足客戶的需求，與業界一同為台灣的相關領域打造本土化的供應鏈。

參考資料

1. Ye Jin Jang, Ashutosh Sharma, and Jae Pil Jung, *Materials*, **16** (24), 7652 (2023).
2. Qianfu Xia, *et al.*, *Advanced Engineering Materials*, **27** (1), (2025).
3. Yuan-Chiu Huang *et al.*, *Nanomaterials*, **13** (17), 2490 (2023).
4. John H Lau, *IEEE Transactions on CPMT*, **14** (3), 376 (2024).
5. Yipeng Xu, *ASME Journal of Electronic Packaging*, **147** (1), 010801 (2025).
6. Tanja Braun *et al.*, *Micromachines*, **10** (5), 342 (2019).
7. Jung Won Lee *et al.*, *Microelectronics*, **2** (1), 3 (2026).
8. Daniel C. Smallwood *et al.*, *Microsystems & Nanoengineering*, **7**, 39 (2021).
9. Peng Zhang *et al.*, *Polymers*, **16** (13), 1805 (2024).
10. Zhiwen Chen, Jiaju Zhang, Shizhao Wang, Ching-Ping Wong, *Fundamental Research*, **4** (6), 1455 (2023).
11. Houya Wu, Yan Wang, Zhiyi Li & Wenhui Zhu, *Scientific Reports*, **10**, 9400 (2020).
12. Fuliang Wang and Yuping Le, *Scientific Reports*, **11** (1), 12108, (2021).
13. Zifeng Zhao *et al.*, *Microelectronic Engineering*, **275**, (2023).
14. Ruhan E Ustad *et al.*, *Nanomaterials*, **13** (19), 2642 (2023).
15. Shan Huang *et al.*, *Chemical Engineering Journal*, **477**, (2023).
16. Laraib Sajjad *et al.*, *European Polymer Journal*, **239**, 114302 (2025).
17. William Anderson Lee Sanchez *et al.*, *Polymers*, **14** (14), 2950 (2022).
18. Yingfeng Wen *et al.*, *Advanced Materials*, **34** (52), 2201023 (2022)..
19. Yinghuan Zhao *et al.*, *Composites Communications*, **56** (18), 102353 (2025).
20. Zbyněk Plachý, Anna Pražanová, Karel Dušek, Attila Géczy, *Polymers*, **17** (16), 2206 (2025).
21. Tianwei Zhang *et al.*, *Nature npj Materials Sustainability*, **4** (10), (2026).

作者簡介

陳厚福先生為國立臺灣工業技術學院化工所碩士，現為長春人造樹脂廠股份有限公司總經理。

Hou-fu Chen received his M.S. in Chemical Engineering from National Taiwan Institute of Technology.

He is currently the President of Chang Chun Plastics Co., Ltd.

杜安邦先生為國立成功大學化工所碩士，現為長春人造樹脂廠股份有限公司協理。

An-pang Tu received his M.S. in Chemical Engineering from National Cheng Kung University. He is

currently the Vice President of Chang Chun Plastics Co., Ltd.

吳允中先生為國立臺灣科技大學高分子工程所碩士，現為長春人造樹脂廠股份有限公司部長。

Yun-jung Wu received his M.S. in Polymer Engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently the Department Manager of Chang Chun Plastics Co., Ltd.

吳佳鴻先生為國立臺灣大學化工所碩士，現為長春人造樹脂廠股份有限公司課長。

Chia-hung Wu received his M.S. in Chemical Engineering from National Taiwan University. He is currently the Manager of Chang Chun Plastics Co., Ltd.