

超快雷射加速 3D IC 先進封裝與異質整合技術

Ultrafast Lasers Accelerating the Development of 3D IC Advanced Packaging and Heterogeneous Integration

錢俊逸

Jiunn-Yih Chyan

隨著 AI 與 HPC 算力與功率飆升，傳統封裝面臨熱管理與頻寬瓶頸，必須從材料層面著手改革。碳化矽因其三倍於矽的熱導率、機械強度和相近的熱膨脹係數，使其成為 3D IC 封裝中最具潛力的散熱材料。而玻璃則因大尺寸、低成本，高平坦度、高剛性和低介電常數等特性，適合生產高 I/O 密度的基板，且其能同時傳導光訊號與電訊號，為整合功能各異小晶粒 (chiplets) 的理想材料。超快雷射有著「冷」燒蝕特性，能在碳化矽與玻璃等硬脆材料上實現無熱影響區的精準微加工，解決傳統加工方式無法避免的熱應力與微裂紋問題，凸顯碳化矽在 GPU/HBM 的散熱優勢，驅動玻璃基板於光電共封裝 (co-packaged optics, CPO) 的應用，邁向 kW 級 AI 模組與全光電整合新紀元。

Surging AI and HPC power requirements have pushed traditional packaging to its thermal and bandwidth limits, driving a revolution in advanced materials. Silicon carbide (SiC), with 3x the thermal conductivity of silicon and a compatible CTE, is now the premier choice for 3D IC thermal management. Meanwhile, glass substrates offer high-I/O density, superior rigidity, and low dielectric loss, serving as a dual-pathway for both optical and electrical signals-perfect for chiplet integration. By utilizing ultrafast lasers for 'cold' ablation, we achieve precise micromachining on SiC and glass without the risk of thermal stress or micro-cracks. This synergy optimizes SiC's cooling performance for GPU/HBM architectures and accelerates the deployment of glass in co-packaged optics (CPO), paving the way for the next generation of kW-scale AI modules and integrated optoelectronics.

一、前言

在後摩爾定律時代，提升計算效能的途徑已經從線寬縮放 (scaling) 轉向先進封裝與異質整合。尤其是 AI 運算對 GPU、高頻寬記憶體 (high bandwidth memory, HBM) 的依賴，使得

封裝內部的熱密度呈指數級增長。為了克服矽基材料在熱傳導上的物理極限，碳化矽 (SiC) 的導入已成為當下趨勢。此外，玻璃以其優異的物理特性，成為提高 I/O 密度與訊號頻寬的優質材料首選。可以說，新世代的先進封裝與異質整合技術的演進，必須著手從材料層面的革命開始。

二、碳化矽 (SiC) 於先進封裝中的關鍵角色

碳化矽傳統上被視為功率電子材料，但在 3D IC 領域，其熱傳導係數 (高達 360–490 W/mK) 遠優於矽 (~150 W/mK)，使其在熱管理中扮演關鍵角色。

2.1 SiC 在 GPU 與 HBM 整合中的優勢

隨著高效能運算 (high performance computing, HPC) 與人工智慧 (artificial intelligence, AI) 晶片對於互連密度及散熱需求的劇增，半導體產業已由單一晶片微縮轉向 3D IC 先進封裝與異質整合技術。碳化矽擁有極高的熱導率 (約 490 W/m·K，遠高於矽的 150 W/m·K)、寬能隙 (3.26 eV)、高擊穿電場 (> 3 MV/cm) 與優異機械強度 (楊氏模數約 450 GPa)，使其成為 3D IC 高功率密度環境中最具潛力的散熱材料。在 GPU 與 HBM 垂直堆疊結構中，局部熱通量經常超過 1000 W/cm²，甚至在未來 AI 加速器中可達 3000 W/cm² 以上，矽基材因熱導率不足易形成嚴重熱瓶頸，導致接面溫度 (junction temperature) 急劇上升。

SiC 的晶格熱傳導主要由聲子 (phonon) 散射機制主導，其平均自由路徑長達數十微米，因此在微米級尺度下仍能維持極高熱導率。碳化矽中介層 (SiC interposer) 或嵌入式 SiC 熱擴散層則可提供優異的橫向熱擴散能力，透過高熱導率路徑將熱量快速導向邊緣或液冷微通道，使接面溫度降低 20–30 °C。此外，碳化矽與矽的熱膨脹係數高度匹配，可有效減少多層堆疊時的翹曲應力，進一步提升 3D IC 堆疊技術的可靠性。

2.2 SiC 的先進封裝熱管理

Huawei Wang 等人提出並製造一種基於被動相變 (passive phase change) 的仿生封閉式高導熱晶片封裝，採用物理性質與矽晶片相容的碳化矽為封裝材料，並使用雷射微加工出仿生結構⁽¹⁾。Piotr Mackowiak 等人則探討以雷射加工有機介電層並採用 SiC 作為主體的碳化矽穿孔 (TSiCV) 之製造技術及其高頻特性⁽²⁻⁴⁾。除此之外，台積電 (TSMC) 正積極探索 12 吋 SiC 作為先進封裝的熱管理材料，主要針對 AI/HPC 高功耗晶片的散熱瓶頸，應用於 CoWoS (Chip on Wafer on Substrate) 和 SoIC (System-on-Integrated-Chips) 等 2.5D/3D 封裝平台，從材料到結構設計進行全方位專利布局⁽⁵⁻⁶⁾。

三、玻璃基板之機會與發展

玻璃基板 (glass-core substrate) 被視為繼有機基板之後，推動異質整合邁向下一階段的核心技術。有機基板 (如日本味之素集團開發的增材薄膜載板 (Ajinomoto build-up film, ABF)) 已逐漸面臨物理極限，尤其是在面對大尺寸封裝時，翹曲 (warpage) 與熱穩定性問題，讓良率面臨挑戰。玻璃基板被視為下一階段核心技術，主要有三大關鍵優勢：(1) 極致平整度：玻璃具備更優異的機械強度與平整性，能支撐更大型的晶片組。(2) 熱係數匹配：其熱膨脹

係數 (coefficient of thermal expansion, CTE) 更接近矽晶圓，能大幅減少封裝過程中的應力。

(3) 高密度互連：透過雷射在玻璃基板上加工出玻璃通孔 (through glass via, TGV)，精密度遠優於傳統有機基板，能提供更高的互連密度與更低的訊號損耗。

3.1 物理優勢與應用背景

玻璃核心基板擁有極低表面粗糙度 ($< 10\text{ nm}$)、可調熱膨脹係數 (CTE $3-9\text{ ppm/K}$ ，可精準匹配矽)、極低介電損耗 ($Dk/Df < 3.5/0.001$)、超大面板尺寸 ($> 515 \times 510\text{ mm}$) 以及優異尺寸穩定性，能徹底解決有機基板翹曲嚴重、線寬限制 ($> 80\text{ }\mu\text{m}$) 以及矽中介層成本高昂與尺寸受限的問題。玻璃的非晶態結構使其具有極低的雙折射與光散射，適合直接寫入低損耗光波導。透過超快雷射形成高深寬比 ($AR > 20$) TGV (through-glass via)，並直接寫入低損耗光波導 (傳播損耗 $< 0.1\text{ dB/cm}$)，可實現細線寬 / 間距 ($L/S = 2/2\text{ }\mu\text{m}$) 的 RDL 與垂直光電互連，特別適合 chiplet 與 HBM 高密度異質整合。

在 CPO 應用中，玻璃核心基板可將 PIC (photonic integrated circuit) 與 EIC (electronic integrated circuit) 共封裝於同一基板，將電氣互連長度從傳統數十公分縮短至數毫米，大幅降低訊號功耗 $30-50\%$ ，同時提升頻寬密度至 Tb/s 等級。玻璃基板的低損耗特性更可使光訊號傳輸距離延長至數十公分而損耗仍低於 1 dB ，遠優於傳統銅互連。

3.2 玻璃基板應用於異質整合

Georgia Tech 3D Systems Packaging Research Center (PRC) 自 2010 年起即領導玻璃基板開發，2020–2025 年間與 Corning 密切合作驗證玻璃基板的可行性⁽⁷⁻⁸⁾。A. O. Watanabe 等人展示低 CTE 玻璃 AiP 模組， 28 GHz Yagi-Uda 天線頻寬達 28.2% ，插入損耗僅 0.021 dB/via ，整鏈損耗 $< 1\text{ dB}$ ，充分證實玻璃在 mmWave 5G AiP 的低損耗優勢⁽⁹⁾。Brusberg 等人提出單面腔玻璃基板，整合離子交換波導 (IOX)、TGV 與 RDL，實現 PIC 與 EIC pick-and-place 精準組裝，最小耦合損耗僅 0.65 dB ⁽¹⁰⁾。同時，透過在玻璃波導基板邊緣實現多光纖推入式 MPO (multi-fiber push-on) 介面，進而得以利用現有的光纖連接器生態系統。研究中使用超快雷射將玻璃晶圓切割成獨立的光子晶片，在 6.5 mm 寬的連接器區域產生平整度小於 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的光學級端面，實現低損耗的光纖到晶片邊緣耦合。超快雷射也被用於在玻璃基板上精確切削出定位特徵，使 MPO 連接器的導引針 (guide-pins) 能夠實現自我對準。實驗顯示，MPO 連接器與玻璃波導介面在多次插拔後，耦合損耗較主動對準僅平均增加 0.19 dB ⁽¹¹⁾。Absolics (SKC 子公司，Georgia Tech 技術轉移) 自 2024 年起於美國 Georgia Covington 建廠，預計 2026 年量產玻璃基板與玻璃通孔中介層，全面支援 HPC chiplet 與 Tb/s 級 CPO 光電共封裝。這些成果顯示玻璃核心基板不僅可嵌入被動元件與光波導，更能實現被動光纖對準與面板級低成本製程 (相較矽 interposer 成本降低 50% 以上)，成為次世代 CPO 主流平台。

四、超快雷射的加工原理、特性及差異

針對 SiC 與玻璃這類寬能隙且硬脆的材料，機械加工或長脈衝雷射會產生嚴重的熱應力與裂紋，而超快雷射 (皮秒雷射與飛秒雷射) 則提供非熱燒蝕的解決方案。

4.1 超快雷射與物質交互的物理機制

超快雷射與硬脆材料 (如 SiC 與玻璃) 的交互作用本質上為強場非線性光學過程，與傳統長脈衝雷射的熱熔融機制截然不同。對於飛秒雷射 (脈寬 < 1 ps)，核心機制為多光子吸收 (multiphoton absorption) 與碰撞電離 (avalanche ionization) 共同驅動的電子激發過程。SiC 的能隙約 3.26 eV、玻璃 (熔融石英) 約 9 eV，對於常見 800 nm 雷射 (光子能量 1.55 eV)，單光子無法直接激發價帶電子至導帶，需透過 2–6 個光子同時吸收才能跨越能隙，此過程被稱為 Keldysh 多光子電離。Keldysh 參數 $\gamma = \omega \sqrt{2m^* E_g} / eE$ 用以區分多光子電離 ($\gamma \gg 1$) 與隧電離 ($\gamma \ll 1$)，其中 ω 為角頻率、 m^* 有效質量、 E_g 能隙、 e 電荷、 E 電場強度。當脈衝峰值強度達 $10^{13} - 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 時，電子密度 N_e 迅速上升至臨界密度 ($\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)，形成高密度電漿。

此時電子系統溫度 T_e 可達數萬 K，而晶格溫度 T_l 仍接近室溫，形成雙溫度模型 (two-temperature model, TTM)：

$$C_e(\partial T_e / \partial t) = -G(T_e - T_l) + S(r, t) \quad (1)$$

$$C_l(\partial T_l / \partial t) = G(T_e - T_l) \quad (2)$$

其中 C_e 、 C_l 為電子與晶格熱容， G 為電子–聲子耦合係數 (SiC 約 $10^{17} \text{ W/m}^3\text{K}$)， $S(r, t)$ 為雷射吸收源項。電子–聲子鬆弛時間接近 1 ps 遠長於飛秒脈衝，因此能量尚未轉移至晶格即完成電子激發。當 N_e 超過臨界值後，靜電場力超過晶格束縛力，發生庫侖爆炸 (Coulomb explosion)，離子以靜電斥力飛離表面，形成非熱燒蝕 (athermal ablation)，熱影響區 < 200 nm。

在較高能量密度下，進一步產生光機械碎裂 (photomechanical fragmentation) 與相爆炸 (phase explosion)。對於玻璃，額外存在克爾效應 (Kerr effect) 誘導自聚焦與絲狀傳播 (filamentation)，可在玻璃體內精準寫入折射率變化 $\Delta n \sim 0.01$ 的 3D 波導結構。皮秒雷射 (1–100 ps) 則處於過渡區：電子已部分轉移能量至晶格，產生微熔池，但熱擴散長度 $L_{th} = \sqrt{4\alpha\tau}$ (α 為熱擴散率，玻璃 $\sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) 仍僅數百奈米，遠小於奈秒雷射的數十微米。

與非超快雷射比較，奈秒雷射 ($\tau > 1 \text{ ns}$) 完全為熱過程：能量先轉移至晶格，產生熔融、再凝固與熱衝擊波，熱影響區 $> 10 \mu\text{m}$ ，易誘發微裂紋與再鑄層 ($R_a > 1 \mu\text{m}$)。超快雷射的「冷」加工特性使其在硬脆材料上實現次微米精度、無應力殘留，適合 3D IC 高精度微通道與 TGV 加工。

4.2 皮秒 (ps) 與飛秒 (fs) 之技術差異

1. 熱影響區 (heat-affected zone, HAZ)：皮秒雷射雖然脈衝極短，但在某些高能量應用中仍存在微量的熔融區域；飛秒雷射則幾乎完全消除了熱擴散，能達到最高的邊緣精度⁽¹²⁾。
2. 吸收機制：飛秒雷射具備極高的峰值功率，能引發多光子吸收 (multi-photon absorption)，這使其能輕易穿透玻璃並在內部產生改質，這是製造 TGV 的核心技術基礎⁽¹³⁾。
3. 生產效率：皮秒雷射技術相對成熟，單脈衝能量較高，在厚材料與大面積加工具有成本效率優勢；飛秒則多用於精細表面處理或材料內精密雕刻。

五、超快雷射加工 SiC 與玻璃之實例

5.1 碳化矽 (SiC) 的超快雷射切割和無應力晶圓減薄

使用超快雷射 (如飛秒或皮秒雷射) 對碳化矽 (SiC) 進行切割和無應力晶圓減薄，具有多項顯著優勢。SiC 具有高硬度 (莫氏硬度 9.5) 和脆性，使傳統機械鋸切或研磨易造成裂紋、翹曲和材料浪費。超快雷射則透過非接觸式冷加工，藉由極短脈衝 (10^{-12} 至 10^{-15} 秒) 實現精確能量沉積，避開熱擴散效應，從而克服這些問題。

在切割 (dicing) 方面，超快雷射可採用隱形切割 (stealth dicing) 技術，即在晶圓內部形成改質層，再透過外力分離晶片。隱形切割大大降低材料損失 (kerf loss)，且通常 $8\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的改質區即可實現高深寬比 (10:1) 的切割。相較傳統鋸切，超快雷射減少熱影響區 (HAZ)，避免熱誘導應力和裂紋產生，切割邊緣平滑。由於隱形切割的加工原理是將雷射能量聚焦在 SiC 內部形成結構破壞或改質，故會受到 SiC 加工物表面狀態的影響，例如表面粗糙或具有金屬等反射層，都無法讓雷射的能量有效的聚焦在 SiC 內部，此時，超快雷射可採用 full cutting 的方式，即直接燒蝕切割 (ablation cutting)，透過高能量脈衝在 SiC 表面或邊緣進行材料移除，而非內部改質。這項技術利用極短脈衝精確沉積能量，限制熱擴散，產生極小熱影響區 (HAZ，通常 $< 200\text{ nm}$)，從而避免熱誘導裂紋和材料變質。相較傳統機械鋸切，full cutting 在達到高深寬比的同時，還能支援複雜幾何形狀加工，快速切割 (達 10 mm/s)，最小化崩邊 (chipping) 及材料損耗。

圖 1 為使用綠光 (515 nm) 飛秒雷射從 4 吋半絕緣碳化矽晶圓上，以 full cutting 的方式裁切出具有多方向連續直線和曲線 (圓孔) 的碳化矽基板。切割後基板邊緣無崩邊，切割剖面表面平滑 ($R_z \sim 1\text{ }\mu\text{m}$)，切割的深寬比可達 15:1 (圖 2)。皮秒雷射理論上有較高的移除速率和加工速度，而作為對照，圖 3 為使用皮秒雷射進行相同結構之加工，可從圖 3 觀察在相同波長 (515 nm)、相同脈衝能量 ($30\text{ }\mu\text{J}$) 下，將脈衝時間從 200 fs (飛秒) 改為 200 ps (皮秒) 的結果，在切削品質上有著明顯的差距。

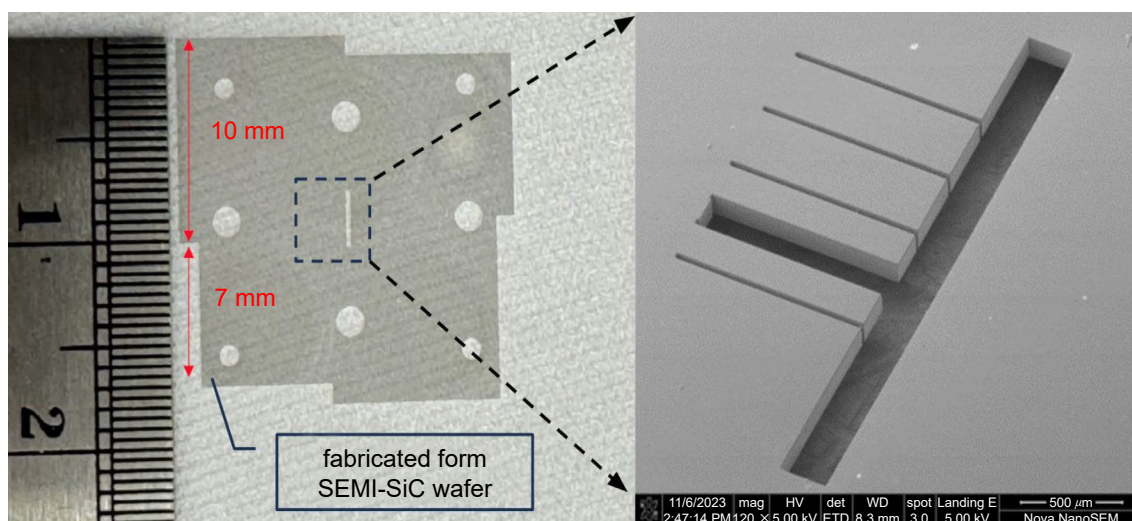


圖 1. 使用綠光 (515 nm) 飛秒雷射以 full cutting 的方式從 4 吋半絕緣碳化矽晶圓上，切割出具有不同方向、不同長度，毫米級 (mm) 的連續直線，並在板材任意位置切割出任意直徑的圓孔，並在板材中心製作出高深寬比，高水平縱寬比的結構。(來源：鼎極科技)

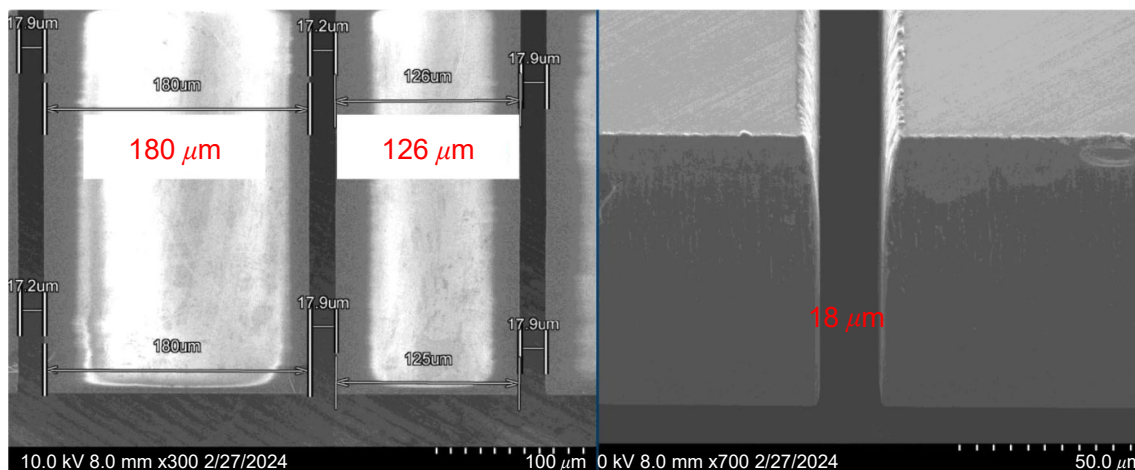


圖 2. 此為圖 1. 中心具有高深寬比 (15 : 1)，高水平縱寬比 (55 : 1) 結構的局部放大 SEM 照片。(來源：鼎極科技)

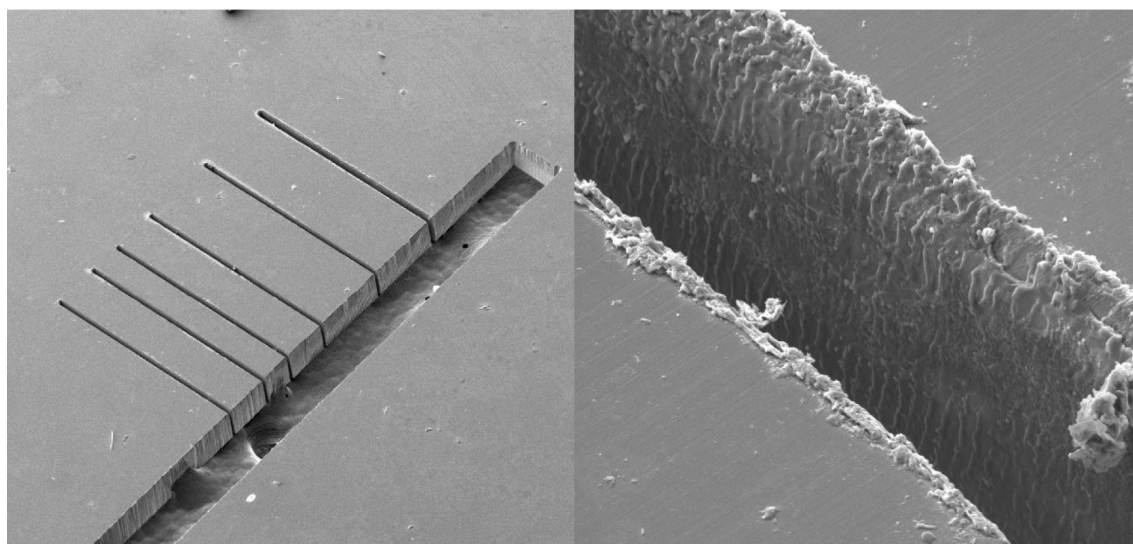


圖 3. 此為與圖 1 相同設計結構，將雷射脈衝時間從 200 fs (飛秒) 改為 200 ps (皮秒) 的結果 (來源：鼎極科技)

在無應力晶圓減薄 (thinning) 方面，超快雷射減薄的對應目標是傳統機械研磨，後者透過機械力的方式移除材料，但易引入殘餘應力 ($> 200\text{MPa}$) 和次表面損傷 (深度達 $5 - 40\ \mu\text{m}$)，導致晶圓翹曲、裂紋和缺陷集中，影響裝置性能和良率。相反，超快雷射減薄採用非接觸式加工，藉由高速脈衝 ($> 100\ \text{kHz}$) 冷加工 SiC 表面，能在高速減薄的狀態下精確控制減薄的深度 ($< 1\ \mu\text{m}$)，實現低損傷 ($< 200\ \text{nm}$)，避免微裂紋或空洞，將殘留應力降至最低。相較傳統機械研磨，雷射方法縮短處理時間 (從小時減至分鐘)，降低材料損失 $70 - 80\%$ ，並提升產量。還避免磨輪磨損和化學廢料，支持綠色製造。此外，由於無應力加工的特點，超快雷射減薄特別適合用於薄晶圓 ($< 100\ \mu\text{m}$) 的生產，如電動車功率模組。透過脈衝優化，可進一步抑制缺陷，形成平坦表面，確保電學特性穩定。

圖 4 為在已使用機械細研磨 (fine grinding) 的碳化矽晶圓上，使用超快雷射在不同位置上進行深度不一的減薄與表面紋理。同時，透過二次諧波的量測以 3D 立體的方式探測殘留應力的變化，可以發現即便是使用 6000 號細致顆粒的鑽石砂輪，機械研磨仍對碳化矽晶圓表面造成明顯的殘留應力 (晶格形變)，影響範圍深達 $30\ \mu\text{m}$ 以上。而使用超快雷射在原本已經經過機械研磨的晶圓表面進行二次減薄，在減薄超過一定深度 ($> 3\ \mu\text{m}$) 之後，殘留應力明顯降低。這樣的結果首先代表超快雷射減薄是一種無應力加工，其次，對已經明顯有殘留應力的材料表面能起到去除應力的效果。

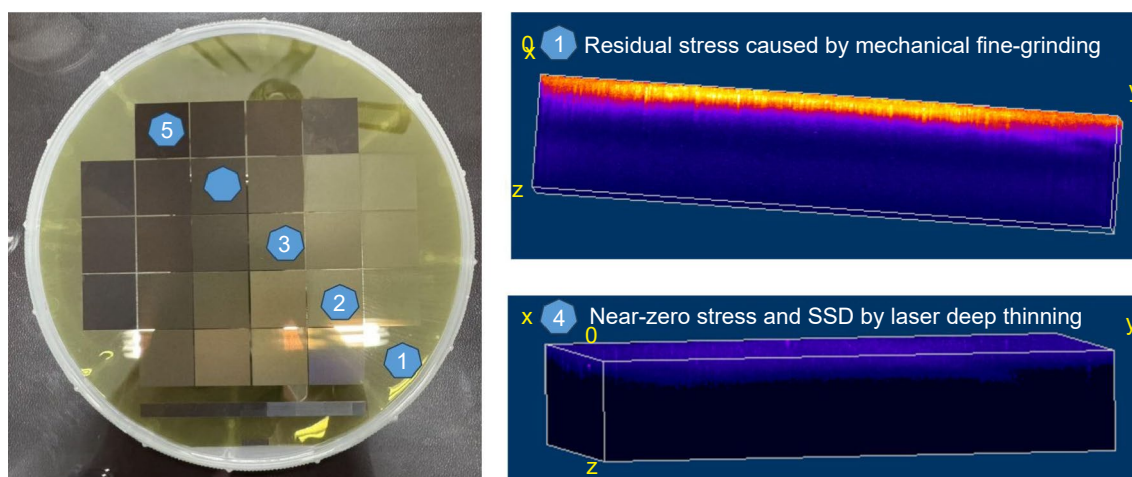


圖 4. (左) 機械細研磨 (fine grinding) 後的碳化矽晶圓。超快雷射在不同位置上進行深度不一的減薄與表面紋理 (方塊區) (右) 二次諧波的 3D 量測。機械細研磨後的碳化矽晶圓表面有明顯的殘留應力 (晶格形變)，而使用超快雷射對晶圓表面進行二次減薄後，殘留應力明顯降低。(來源：鼎極科技)

備註：二次諧波 (second harmonic generation, SHG) 是一種非線性光學現象，當高強度雷射光 (基頻 ω) 入射非中心對稱介質時，介質的非線性極化產生頻率 2ω 的諧波光，常用於探測材料的對稱性、介面電場或缺陷，敏感度高達單分子層級。

相比傳統平面散熱，具有 3D 立體微結構能顯著增加換熱面積，超快雷射加工技術的出現，為 SiC 3D 微結構提供了「冷加工」的高效方案，能輕易且快速地加工出實現微米級的深層 3D 通道拓撲結構，這是機械鑽孔或電漿蝕刻難以企及的。圖 4 為飛秒雷射在碳化矽晶圓表面直接加工高密度針狀散熱陣列 (pin fin array)，除了針狀散熱陣列也能加工出複雜設計的 3D 形狀 (如流線型或具有粗糙表面以增加紊流的結構)。這些結構能顯著提升熱交換表面積，並與冷卻液直接接觸，達成極高的散熱效率。

總結而言，超快雷射在 SiC 切割和減薄的應用，透過精密能量控制，超越傳統方法，提供高品質、低應力加工，推動先進封裝技術迭代。

5.2 玻璃基板的飛秒雷射TGV

飛秒雷射對玻璃基板的 TGV 加工，是一種精密微加工技術，是玻璃基板作為異質整合基板的核心技術。玻璃基板如 Borofloat 33、BK7 或 Eagle XG，具有高透明度和脆性，傳統

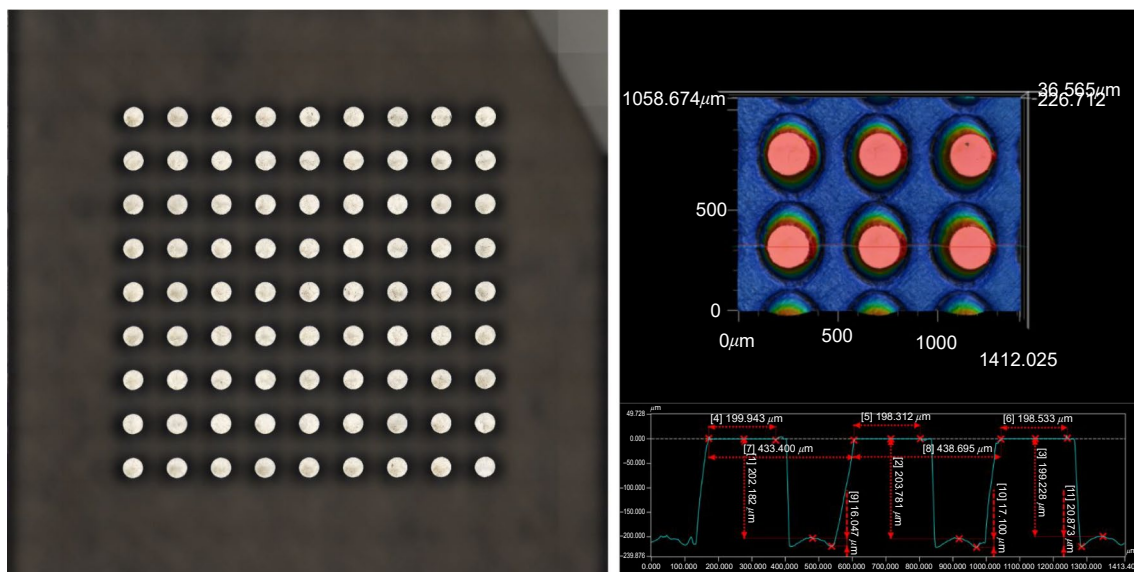


圖 5. (左) 針狀散熱陣列俯視照 (右) 針狀散熱陣列的 3D 結構量測，圓柱直徑和高度 200 μm 。(來源：鼎極科技)

加工方法易造成裂紋，而飛秒雷射以超短脈衝 (10–15 秒) 實現非熱加工，透過多光子吸收精確修改材料結構，避免熱影響區，確保孔洞品質優異。

選擇性雷射誘導蝕刻 (selective laser-induced etching, SLE) 是目前的主流技術，先以飛秒雷射以穿透方式掃描玻璃基板，透過非線性光學效應誘導玻璃局部結構變化 (例如改變 Si-O-Si 鍵角，形成更「鬆散」的非晶相或引入奈米級缺陷)，增強蝕刻選擇性，形成預定圖案的改質區 (modified zones)。可透過雷射參數精確定義孔徑 (e.g., 50–200 μm) 和深度 (達 1 mm)。改質區的蝕刻選擇性高 (達 1000:1)，其對化學劑 (如 HF 或 KOH 溶液) 敏感度遠高於未改質區域。

隨後，浸入蝕刻浴中，選擇性移除改質材料，形成平滑、無錐度或沙漏形孔洞。選擇性雷射蝕刻支援複雜 3D 結構，如傾斜孔或陣列，並可整合多層加工。優化脈衝序列 (如爆發模式) 可提升效率，減少二次沉積和裂紋風險。選擇性雷射誘導蝕刻無需使用光罩且相容多種玻璃。圖 5 為透過選擇性雷射誘導蝕刻製作出無錐度和沙漏形直通孔洞。孔洞的上孔與下孔蝕刻完直徑 $70 \pm 2 \mu\text{m}$ ，無錐度直通孔洞的中央孔洞直徑亦為 $70 \pm 2 \mu\text{m}$ ，而沙漏形孔洞的中央孔洞直徑 $40 \pm 2 \mu\text{m}$ 。圖 6 則展示選擇性雷射誘導蝕刻可製作出深寬比高達 26.5:1 的直通孔。

六、當前瓶頸與未來發展

超快雷射在 3D IC 先進封裝與異質整合中的應用日益重要，包括本文提及之 TGV 鑽孔，碳化矽基板加工之外，還有雷射去鍵合 (laser lift-off/debonding)、光子互連 (photonic wire bonding 或 3D 波導寫入) 等等，超快雷射的「冷加工」優勢有助於應對 3D IC 堆疊中的高密度互連、玻璃/矽異質材料處理、埋藏式波導等需求。

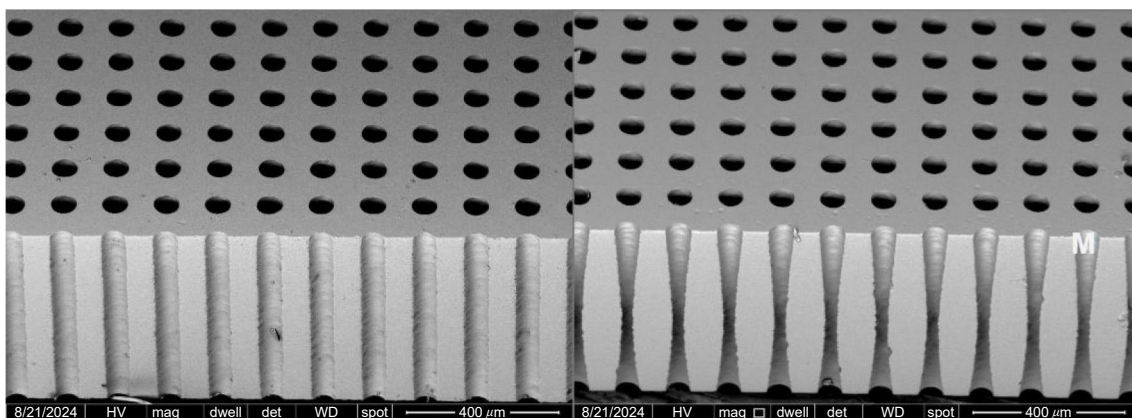


圖 6. 選擇性雷射誘導蝕刻在 Borofloat 33 玻璃上製作 TGV (左) 無錐度直通孔洞，直徑 $70 \pm 2 \mu\text{m}$ (右) 沙漏形孔洞，上孔與下孔直徑 $70 \pm 2 \mu\text{m}$ ，中央孔洞直徑 $40 \pm 2 \mu\text{m}$ 。(來源：鼎極科技)

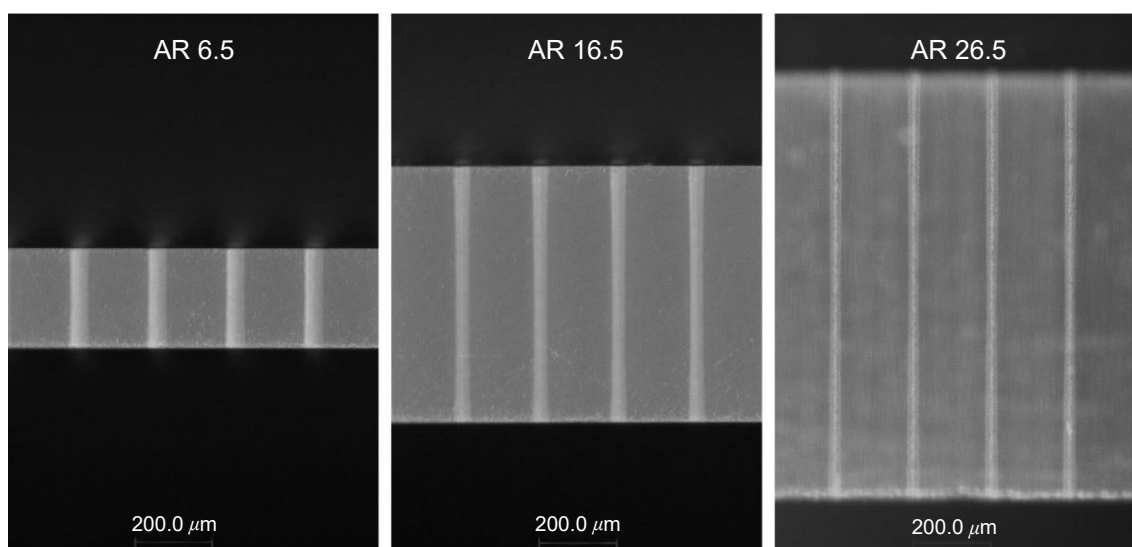


圖 7. 選擇性雷射誘導蝕刻在 Borofloat 33 玻璃上製作 TGV，TGV 深寬比由左至右為 6.5、16.5、26.5。(來源：鼎極科技)

然而，儘管超快雷射具備高精度、低熱損傷等優點，在 3D IC 先進封裝的量產與高密度整合中仍存在多項物理、技術與經濟層面的局限與瓶頸。以下針對物理限制以及其他關鍵挑戰進行說明。

6.1 雷射光斑尺寸的繞射極限 (diffraction limit) 與次微米加工難度

超快雷射的聚焦光斑尺寸 (spot size)，主要受波長 (λ) 與數值孔徑 (NA) 的物理限制，近似公式為：
$$d \approx \frac{1.22\lambda}{NA}$$

- 常見超快雷射波長 (如 1030 nm 基頻或倍頻後的 515 nm 綠光) 下，即使使用高 NA 物鏡，光斑通常難以穩定低於 $0.5 - 1 \mu\text{m}$ 。且倍頻技術雖使光斑理論上縮小一半，但也會導致功率損失提高並使系統複雜度增加。

- 在 3D IC 所需的高密度互連 (如 $< 10\ \mu\text{m}$ pitch 的 hybrid bonding 或 TGV、微凸塊) 中，若需接近 $1\ \mu\text{m}$ 或次微米精確加工 (如細線路圖案化、精密對準孔、sub- μm 波導)，單純聚焦會遇到瓶頸。繞射極限使得能量集中區域無法無限縮小，容易導致過曝或相互干涉。

6.2 加工速度與量產瓶頸

- 超快雷射單脈衝能量精準但平均功率相對較低，高重複率 (MHz-GHz) 雖可提升速度，但要避免因熱累積在高密度 3D 堆疊的多層材料中，產生意外 HAZ 或損傷。
- 3D IC 封裝涉及大面積晶圓 / 玻璃基板 (300 mm 等)，單點掃描式的加工方式是產能提升的主要障礙之一。
- 在 TGV 或微孔陣列加工中，雖然可實現高深寬比 (high aspect ratio) 無錐度孔，但整體產能仍低於量產需求。

6.3 材料相容性、多材料異質整合與熱／機械效應

- 3D IC 常涉及矽、玻璃、有機材料、銅柱、介電層等多種材料。雷射要在不同材料間進行選擇性加工仍具挑戰，可能產生微裂紋、側壁粗糙、殘留應力或分層。
- 在封裝使用的某些聚合物中，需搭配不同脈衝寬度的雷射或混合製程。
- Laser Lift-Off (LLO) 在超薄半導體層轉移或解合 (debonding) 應用中，涉及到光熱、衝擊波、氣穴等複雜機制，材料設計與光場調控是關鍵挑戰。
- 3D IC 本身有熱管理、翹曲、對位準精度、缺陷檢測等問題，雷射加工需與這些系統級限制配合。

以下針對上述的局限 (如光斑繞射極限、加工速度、材料相容性等) 提出未來發展方針：

6.4 突破光斑尺寸與次微米／奈米加工極限

雷射光斑受波長與 NA 的繞射極限約束，傳統聚焦難以穩定達到次微米等級，解決方案包括：

- 先進動態光束整形 (dynamic spatial beam shaping)：利用空間光調變器 (spatial light modulator, SLM)、液晶調變器或全息光學，實現平頂光或自適應光束輪廓，優化能量沉積、減少旁瓣，並提升有效解析度。
- 多光束平行加工 (multi-beam parallelization)：透過光柵、SLM 或數位微振鏡 (digital micromirror device, DMD) 產生多焦點陣列，同時加工多個結構，大幅提升吞吐量並緩解單點掃描的瓶頸。
- 更短波長與非線性效應結合：開發高功率 UV 飛秒系統 (例如 343 nm)，搭配多光子吸收或時空聚焦 (spatiotemporal focusing)，朝向 nanoscale 3D 結構 (如 sub-10 nm 特徵) 推進。結合選擇性雷射誘導蝕刻 (SLE / LIDE) 可進一步細化 TGV 側壁粗糙度與高深寬比結構。

6.5 提升加工速度與產能 (throughput)

- 混合脈衝：結合飛秒和皮秒/奈秒脈衝，利用飛秒的冷加工精準性搭配較皮秒或奈秒的高移除率。這可在維持低 HAZ 的同時，將切割或銑削速度提升 35—57% 以上。
- 多光束 + 高重複率系統：GHz 重複率結合平行光束與 pulse-on-demand 控制，適合大面積

玻璃晶圓或面板級加工 (fan-out panel level packaging, FOPLP)。

- 混合製程：雷射修改後接化學蝕刻、雷射輔助機械加工或電漿輔助雷射燒蝕都能顯著提高透明硬質材料的效率。

6.6 多材料整合加工

- 與半導體產線深度整合：系統級 codesign，協同原有半導體產線製程設備，AI 參數優化與數位孿生，針對 2D 材料、異質堆疊的選擇性加工進行整合與優化，減少微裂紋、殘留應力與分層現象。
- 更高功率的光源和模組化系統以及快速成長的專利與供應鏈，將加速從研發到量產轉移。

超快雷射在 3D IC 先進封裝與異質整合中的未來方向，正朝向突破現有物理與工程瓶頸、提升量產經濟性，並深度融入 AI 驅動的光電共封裝與玻璃基板平台發展。市場預測顯示，超快雷射市場 2026–2034 年 CAGR 高達 10–16%，主要動能來自半導體先進封裝的需求，產業報告將飛秒雷射搭配玻璃材質，視為 CPO、chiplet 與 heterogeneous integration 的核心路徑之一。飛秒雷射直接在玻璃內寫入低損耗 3D 光波導 (propagation loss < 0.1 dB/cm)，同時形成高精度 TGV，支持電—光共平台 (E/O co-integration)。這對 AI 時代的 CPO 至關重要，能將 optical I/O 移近 xPU，縮短互連距離、提升頻寬密度與訊號完整性。超快雷射還能應用在無膠光纖耦合的光子封裝，以及量子晶片相關微結構等等。

七、結論

3D IC 的發展已進入異質整合的深水區。SiC 的導入解決了高效能運算中的熱障礙，而玻璃基板則為未來大面積、高頻率的通訊與 AI 運算提供了物理基礎。超快雷射技術，特別是飛秒雷射，作為這兩種材料最理想的加工工具，已從實驗室研究轉向封裝產線。未來，如何結合人工智慧即時監控雷射加工品質，並進一步提升加工產能，將是決定 3D IC 能否持續進展的關鍵。

參考文獻

1. Huawei Wang, Pengfei Bai, He Cui, Xiaotong Zhang, Yifan Tang, Shaoyu Liang, Shixiao Li & Guofu Zhou, *Communications Engineering*, 4, 1 (2025).
2. Piotr Mackowiak, Kolja Erbacher; Michael Schiffer, Charles-Alix Manier, Michael Topper, Ha-Duong Ngo, Martin Schneider-Ramelow, Klaus-Dieter Lang, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 12 (3), 437 (2022).
3. Piotr Mackowiak, Julia-Marie Köszegi, Martin Schneider-Ramelow, Michael Schiffer, “TSiCV Based Silicon Carbide Interposer Technology,” *Systems Integration Conference and Exhibition*, March 28-30, (2023).
4. Piotr Mackowiak, Julia-Marie Köszegi, Martin Schneider-Ramelow,, “RF Modelling of for Through SiC Vias and Fabrication of SiC based Interposer,” *IEEE 25th Electronics Packaging Technology Conference*, December 05-08, (2023).
5. Shih-Chang KuHung-Chi LiTsung-Shu LinTsung-Yu ChenWensen Hung, “Semiconductor device methods of manufacture,” US10978373B2 (2021).
6. Kuo-Chiang TingSung-Feng YehTa Hao SungJian-Wei Hong, “3D IC with heat dissipation structure and warpage control,” US20250266318A1, (2025).
7. Rao Tummala, Bartlet DeProspo, Shreya Dwarakanath, Siddharth Ravichandran, “Glass Panel Packaging, as the Most Leading-Edge Packaging: Technologies and Applications,” *Pan Pacific Microelectronics Symposium*, January 31-February 3, (2020).
8. Siddharth Ravichandran, Vanessa Smet, Madhavan Swaminathan, Rao Tummala, “Demonstration of Glass-based 3D

- Package Architectures with Embedded Dies for High Performance Computing,” *Electronic Components and Technology Conference*, May 31-June 4, (2022).
9. Atom O. Watanabe, Tong-Hong Lin, Muhammad Ali, Yiteng Wang, Vanessa Smet, Pulugurtha Markondeya Raj, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **68** (12), 5082 (2020).
10. Lars Brusberg, Aramais R. Zakharian, Jason R. Grenier, Barry J. Paddock, Daniel W. Levesque, Cliff G. Sutton, Robin M. Force, Lucas W. Yearly, Robert A. Bellman, Chad C. Terwilliger, Betsy J. Johnson, “Glass Substrate for Co-Packaged Optics,” *IMAPS Symposium*, October 3-6 (2022).
11. Jason R Grenier, Lars Brusberg, Kristopher A Wieland, Juergen Matthies, Chad C Terwilliger, *Advanced Optical Technologies*, **12**, 1244009 (2024).
12. Agnė Butkutė, Linas Jonušauskas, *Micromachines*, **12** (5), 499 (2021).
13. Jian Zhang, Zhichao Liu, Yuanhang Zhang, Feng Geng, Shengfei Wang, Fei Fan, Qinghua Zhang and Qiao Xu, *Micromachines*, **14** (10), 1960 (2023).

作者簡介

錢俊逸先生為國立清華大學奈米工程與微系統所博士，現為鼎極科技營運長。

Jiunn-Yih Chyan received his Ph.D. from the Institute of NanoEngineering and MicroSystems at National Tsing Hua University. He currently serves as the COO of DEUVtek Co., Ltd.