

2026年半導體先進製程 (GAA / 2奈米 / A16)

CMP 技術與核心供應鏈深度產業報告

核心摘要： 隨著半導體製程在 3 奈米 / 2 奈米正式跨入環繞式閘極 (GAA) 架構，並預計於 A16 全面導入背電軌 (BSPDN) 技術，電晶體結構已從傳統 2D 橫向限制演變成複雜的 3D 立體疊層。因此，化學機械平坦化 (CMP) 已不再只是過去「把微觀地貌磨平」的輔助製程，而是直接演變成「立體結構定義」與「超薄膜厚控制 (誤差控制在埃米 Å 級別)」的核心物理化學製程。

一、CMP 核心機台結構與基本運作機制

CMP 的基本原理是「化學腐蝕」與「機械研磨」的二合一結合。晶圓被倒扣在研磨頭 (Carrier Head) 上，以一定的下壓力壓在旋轉的研磨墊 (Polishing Pad) 上，同時由供液臂注入高黏度的研磨液 (Slurry)。

一個標準的先進 CMP 機台內部主要由以下四個相對運動的子系統構成：

- **研磨台 (Polishing Platen)：** 下方巨大的旋轉圓盤，表面張貼 Polishing Pad。尖端機台的 Platen 與底座間多採用空氣軸承 (Air Bearing) 使其「懸浮」自轉，以極致消除機械震動。
- **研磨頭 (Carrier Head)：** 上方夾持、自轉並向下施加壓力的機構，內部包含了 Membrane、Bladder 與 Retainer Ring，用以精準調控晶圓各分區的受力。
- **修整器 (Conditioner)：** 負責在旁邊一邊旋轉、一邊梳理研磨墊表面的鑽石碟，維持 Pad 表面多孔結構的粗糙度，釋放微孔以鎖住磨料。
- **供液與清洗系統：** 負責精準滴下 Slurry 研磨液、化學清洗液與超純水 (DIW) 的管路與噴嘴。

二、CMP 研磨頭三大核心元件獨立深度拆解

研磨頭 (Carrier Head) 是直接掌控晶圓研磨表現的控制中樞。儘管下列元件緊密共處於研磨頭底部，但它們在物理結構與功能上完全獨立、各司其職。

1. Carrier Membrane (研磨頭薄膜 / 橡膠隔膜)

Membrane 是一片安裝在研磨頭最底部、**直接與晶圓 (Wafer) 背面接觸**的特製高彈性薄膜。

- **真空吸附 (Wafer Pick-up)**：內部設有極微小的真空孔道，當機台抽真空時，Membrane 產生向內的拉力與負壓，把晶圓牢牢「吸」在研磨頭下方。
- **下壓力傳導介面**：在研磨時負責將氣體的壓力均勻、柔和地傳導到整片晶圓背面上，避免硬碰硬造成晶圓碎裂。
- **微觀難點與材質**：必須採用高純度氟橡膠 (Viton) 或矽膠 (Silicone)，耐強酸強鹼且絕不釋放雜質離子。表面具有微米級霧面微結構 (Texture)，提供適度止滑，防止晶圓滑移。

2. Multi-Zone Bladder (多分區氣囊)

Bladder 隱藏在 Membrane 的正後方 (晶圓的上層內部)，是由金屬或硬質塑料隔板劃分出的多個獨立密閉空氣艙 (通常為 5 到 7 個同心圓分區，稱為 Zones)。

- **動態局部施壓**：晶圓在研磨時各區磨除率天生不均。Bladder 透過調壓閥對不同 Zone 充入微幅不同的氣壓 (如中心 4.2 psi、邊緣 3.8 psi)，強迫彈性的 Membrane 做出微幅變形，精細調整接觸力道，達到奈米級的全局平坦度。
- **技術難點**：考驗高速閉迴路控制演算法 (Closed-loop Control) 與氣壓反饋的靈敏度。若氣囊產生漏氣跨區 (Cross-talk)，整顆昂貴的研磨頭就必須報廢翻修。

3. Retainer Ring (保持環 / 維持夾)

Retainer Ring 是一個獨立的、高硬度的精密環狀零件，安裝在研磨頭的最外圈，死死圍繞住晶圓的側邊。

- **物理防飛出**：擋住晶圓側邊，確保晶圓不會在每分鐘上百轉的強大剪切力下被甩飛。
- **消除邊緣效應**：研磨墊 (Pad) 受壓會在邊緣微微「翹起」，Retainer Ring 擁有自己獨立的壓緊氣囊，會先一步把 Pad 壓平，消除晶圓邊緣過度研磨 (Edge Rounding)。
- **底部流道與襯套**：底部刻有流體力學凹槽 (Slurry Grooves)，控制研磨液進出晶圓下方的流場。內側通常嵌入一層 PEEK 塑料襯套，用來溫和吸收衝擊力，防止晶圓邊緣崩角 (Chipping)。

三、 全球巨頭與台灣廠商切入版圖總覽

CMP 系統分類	微觀核心元件 / 材料 / 系統	國際市場霸主	成功切入/受惠的台灣供應鏈
主機台結構	CMP Polishing Mainframe 空氣軸承、機械手臂與 Platen 腔體。	Applied Materials (應材/美) Ebara (荏原製作所/日)	京鼎 (3413) ：應材最核心精密腔體與模組代工廠。 帆宣 (6132) ：負責高階原廠機台組裝代工。
研磨頭組件	Membrane / Bladder / Retainer Ring 橡膠隔膜、保持環精密加工與翻修。	Applied Materials (美) Kinik (日商原廠)	瑞耘 (6532) ：台灣最純研磨頭隔膜與保持環國產化大廠。 中砂 (1560) ：研磨頭耗材翻修與精密零件。
研磨與再生	Diamond Disk (鑽石碟) 負責刮除鈍化 Pad 並重新釋放微孔。	3M (美)	中砂 (1560) ：全球先進製程鑽石碟龍頭，在台積電 2nm 產線市占率極高。
關鍵化學品	Slurry (氧化鈾研磨液) / Clean Solution GAA 前段高選擇性研磨液與後清洗液。	Entegris (美) DuPont (美) Fujimi (日)	勝一 (1773) ：先進製程化學品重要調配與清洗液代工廠。 長興 (1717) ：供應中高階研磨墊與部分研磨液。
精密檢測	TEM 材料分析 (MA / FA) 原子級晶圓切片與結構起伏觀察。	晶圓廠研發與良率爬坡必備	汎銓 (6830) ：2nm 材料分析領先者，具獨家低溫保護膜技術。 閎康 (3587) ：亞太區檢測分析龍頭。
廠務與永續	DIW 超純水與研磨液回收系統 廢水處理、氧化鈾	Kurita (栗田工業/日)	兆聯實業 (6944) ：台積電最核心廠務水處理與廢水回收大廠。

CMP 系統分類	微觀核心元件 / 材料 / 系統	國際市場霸主	成功切入/受惠的台灣供應鏈
	高價磨料純化回收。		

四、2026年供應鏈投資趨勢洞察

1. 結構轉變驅使消耗品（Consumables）需求暴增

隨著台積電 2 奈米（N2）產線大產能建置，以及未來 A16 背電軌（BSPDN）製程導入（晶圓需翻過來磨背面），單片晶圓所需的 CMP 道次呈倍數成長。**中砂（鑽石碟）**與**瑞耘（Membrane/保持環翻修）**這類與晶圓產出量（Wafer Start）高度綁定的廠商直接受惠。

2. 材料分析（MA）成為不敗的隱形軍火商

GAA 立體電晶體極易因研磨應力不均而崩塌，製程良率拉升極度依賴穿透式電子顯微鏡（TEM）切片。**汎銓（6830）**憑藉不破壞微細空腔的技術壁壘，完全不受設備大廠誰輸誰贏的影響，通吃先進製程紅利。

3. 綠色製程（ESG）回收商機

高階氧化鈾（Ceria）研磨液全球資源受限且報價昂貴，晶圓廠對廢液純化重複使用的需求迫切。**兆聯實業（6944）**的陶瓷膜過濾與凝聚技術能有效協助晶圓廠回收 Slurry，在永續半導體指標中扮演重要角色。