

「寬能隙」 半導體的現在與未來

■文：任苙萍

被視為「戰略物資」的第三代半導體——以碳化矽 (SiC) 和氮化鎵 (GaN) 為首的二元 III-V 族「寬能隙」 (Wide Band Gap, WBG) 化合物半導體，原就挾著耐高溫、耐高壓、切換快、效率高 (耗損低) 等優異物理特性而備受關注，近來更因被中國「十四五計畫」點名列入重點扶植對象而再掀熱議；特斯拉 (Tesla) Model 3 採用 SiC 功率器件及小米科技發佈 GaN 手機充電器，更將之推向高潮。研調機構 Research And Markets 預估，化合物半導體市場有望在 2020 ~ 2024 年增長至 117.4 億美元，期間年複合成長率 (CAGR) 為 6%。

他們發現，高功率密度需求、智慧手機採用率及寬能隙功率設備不斷增長是驅動因子，電動車 (EV) / 混合動力車 (HEV)、可再生能源和工業自動化是背後深層動力。AE Research 進一步觀察 SiC 和 GaN 功率半導體：預估 2025 年將超過 30 億美元，汽車電子、EV 和鐵路牽引 (rail traction) 是主要動能，太陽能應用亦將顯著增加。Grand View Research 更是樂觀看待 GaN 市場，表示受到 5G

通訊 E/F/C 類功率放大器帶動，加上 EV 車載充電站和充電樁助攻，2027 年全球 GaN 半導體器件市場規模將達 58.5 億美元，2020 ~ 2027 年 CAGR 為 19.8%。

工研院產科國際所：氮化鎵 vs. 碳化矽各擁利基



照片人物：工研院產科國際所材料與化工研究組—材料研究部研究總監鄭華琦

日前在工研院產業科技國際策略發展所 (產科國際所) 主辦的趨勢研討會上，材料與化工研究組—材料研究部研究總監鄭華琦如此評論化合物半導體：砷化鎵 (GaAs) 是當下應用最廣泛的射頻 (RF) 材料；磷化銦 (InP) 主要用於光通訊傳輸，包括光的發射、探

測、調製和混合等，是電信和數據通訊應用之收發器雷射二極體不可或缺的模式。新一代氮化鎵在「高功率 RF」具明顯優勢，是 5G 基地台的必備材料，功率應用以中低壓表現較佳；碳化矽在耐高壓 (> 600V) 表現較優，大功率是最佳發揮舞台，廣泛應用於車用電子和電力設備等領域。

鄭華琦指出，碳化矽約有四成在車用 (含汽車電子與電動車週邊)，目前業界於電動車較積極導入碳化矽的主要裝置/部件包括主驅逆變器 (inverter) 與車載/車外充電器，儘管 SiC-SBD (蕭特基二極體) 的市場因國際貿易摩擦而放緩，但由於能源、汽車和工業需求維持增長，預計市場將繼續擴大；至於氮化鎵，「製程介面」(基板材料) 是其應用的最大關鍵，分為：碳化矽基氮化鎵 (GaN-on-SiC) 和矽基氮化鎵 (GaN-on-Si) 兩種。該部門經理張致吉預言：GaN-on-SiC 在未來五年內可能繼續主導 GaN RF 產業，與 GaN-on-Diamond (鑽石) 皆強調性能發揮。

張致吉闡述，有別於上述兩者，GaN-on-Si 將以成本為驅動



照片人物：工研院產科國際所產業分析師劉美君

因子，在新基地台之低功耗主動天線系統 (AAS) 的滲透緩慢，但在高端 RF 能源應用仍有機會。她透露，設備製造商對於開發 5G 手機用的 GaN-on-Si 極感興趣；就全球產業供應鏈能量來看，化合物半導體封裝仍有待補白。產業分析師劉美君援引研調機構 Yole Développement 的數據描繪 2019～2025 年 GaN RF 市場規模變化：雖然囿於成本、效能和供應鏈完整性，GaN-on-Si 仍無法與 GaN-on-SiC 比拚，但期間矽基 GaN 之

CAGR 仍高達 51%！5G 設備與手機供應商的採用意願是關鍵。

氮化鎵的優勢&待解課題

劉美君剖析，反觀技術領先的 GaN-on-SiC，將在 RF 大展身手，特別是軍事和通訊用途的基礎建設，但 CAGR 僅有 11%。整體來說，GaN-on-SiC 適用在高溫、高頻的操作環境，散熱性較佳，主要應用在汽車、工業與部分消費性電子的功率半導體，以及航太、軍事、雷達通訊 RF，「5G 新基建」是 GaN-on-SiC 下一個潛力市場，主要磊晶 (外延) 技術握在科銳 (Cree) 手中，但台廠仍積極搶進：穩懋已開始提供 6 吋 GaN-on-SiC 晶圓代工服務，以高功率 PA 及天線為主；環宇具備 4 吋 GaN-on-SiC 高功率 PA 產能，且 6 吋晶圓代工產能已通過認證。

相較之下，GaN-on-Si 技術雖不成熟且有矽基散熱問題，卻可利用矽製程的固有規模經濟降低成

本——台灣廠商嘉晶 6 吋 GaN-on-Si 磊晶矽晶圓已進入國際 IDM 廠認證階段並爭取新訂單；漢磊科和台積電也開始 6 吋 GaN-on-Si 晶圓代工服務 (前者尤專注於車用產品)。劉美君小結氮化鎵的優勢在於：1. 具有更高的輸出功率性能，適合長距離通訊的大功率應用；2. 功率密度較高，使晶片體積大幅縮小；3. 高崩潰電壓與飽和電流，可用來製作高速、低雜訊元件。然與此同時，她亦列舉氮化鎵的待解課題。

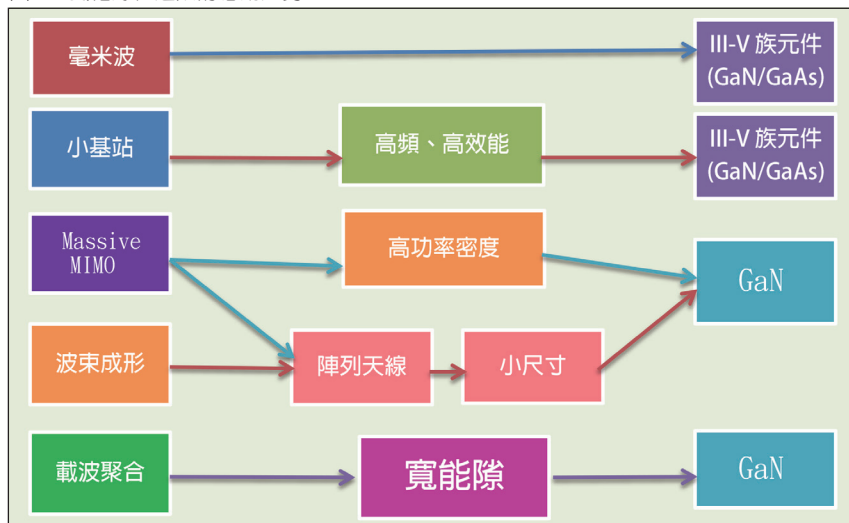
首先，其熔點的分解壓力 > 105 Bar，無法如同矽元件經由液相拉晶製作大尺寸、高厚度的可量產基板，只能借助其他能隙、晶格常數 (Lattice Constant)、熱膨脹係數相近的材料作為「晶種」——以矽或碳化矽為基底，用異質磊晶生成。其次，晶格常數差異會導致成長的氮化鎵晶格錯位 (失配) 及外延生長表面的缺陷，影響元件的操作性；再者，異質磊晶在降溫時會因為不同材料介面的熱膨脹係數

表：GaN-on-Si vs. GaN-on-SiC 比較

	GaN-on-Si	GaN-on-SiC
導熱性	尚可	較佳
基板尺寸	最大 8 吋	4 吋與 6 吋晶圓 (受限於 SiC 基板尺寸)
因應高電阻	可應用功率較低，可用於微型基地台 (小基站) 射頻元件	因應高電阻能力較佳，有利於毫米波傳輸，適用於高頻 MMIC、大型基地台 (大基站) 射頻元件
製作成本	較佳 (因與 CMOS 製程相容)	較昂貴
可靠性	必須外延生長 5μm 厚度才能獲得良好品質	外延層厚度約 2μm 即可獲得良好品質
良率	約 60%	因基板比 Si 容易處理，良率較高
優點	可擴展性、可大量生產、一旦達規模經濟即具成本競爭力	熱導率是 GaN-on-Si 的三倍，可在更高的電壓和功率密度下運行
缺點	供應鏈有限、市場規模較小、技術不成熟	晶圓供應商和尺寸有限、成本高

資料來源：工研院產科國際所

圖 1：氮化鎵在通訊的應用趨勢



資料來源：工研院產科國際所

不一，造成介面之間拱起 (bowing) 甚至介面間的應力使材料崩裂，嚴重限制氮化鎵成長的品質與厚度、且會增加長晶困難。

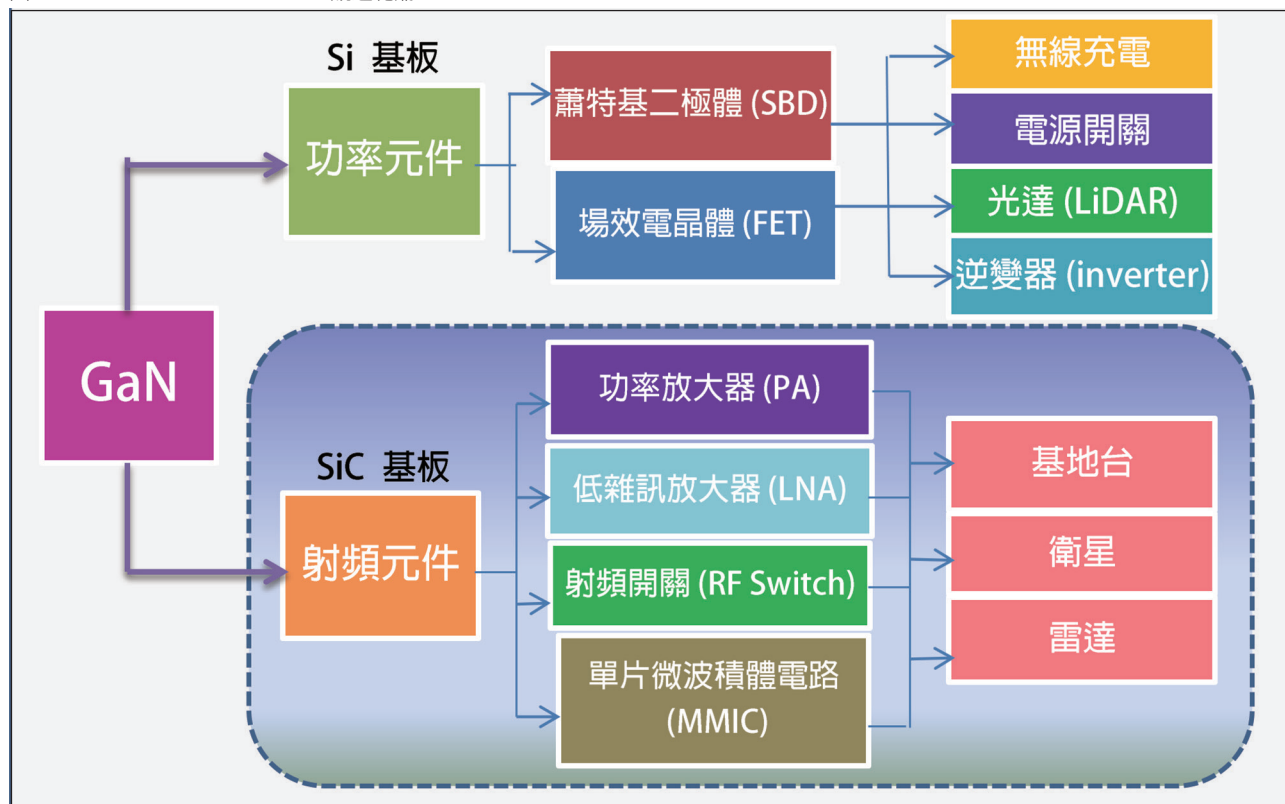
毫米波一出，非氮化鎵相助不可！

劉美君補充，受益於現有類

似 CMOS 的晶圓製程，不久後或可遷移至 8 吋晶圓生產線，但在氮化鎵上做外延層較矽基 MOSFET 更複雜，且外延層對元件的動靜態電性能影響更劇。此外，不同的廠商使用不同的氮化鎵功率元件，而每種方案都有不同的閘極驅動器和封裝；而氮化鎵電晶體（增強型 GaN）的閘極需要驅動才能做到正常開關，偏偏其閘極電壓閾值和最大電壓都很小、非常容易誤動作，設計難度很高。現階段氮化鎵的供電電壓高、不符合手機需求，但若未來氮化鎵 RF 特性有所改進，亦非不可能。

例如，加入新的絕緣介質與溝槽材料，使其適應低電壓的工作環境。劉美君表示，隨著連網

圖 2：GaN-on-Si vs. GaN-on-SiC 競逐範疇



資料來源：工研院產科國際所

裝置數量增加，終將祭出毫米波 (mmWave) 頻段因應，而基頻處理器和 RF Power 等支援高頻的零組件亦將趨於低成本化。她解釋，現今 RF 元件以砷化鎵為主，功率 < 50W，且此類砷基 LDMOS (橫向擴散金屬氧化物半導體) 的最高有效頻率 < 3GHz，頻寬會隨著頻率增加而減少，應用在毫米波將受限；而以 0.25 μ m 製備的氮化鎵元件頻率可達 LDMOS 的四倍、頻寬增加 20%、功率密度達 6 ~ 8 W/mm (LDMOS 僅 1 ~ 2 W/mm)，且無故障工作時間達百萬小時！

另為避免損耗，5G 毫米波基地台的設計天線單元通常多達 64 ~ 1,024 個，若換成功率密度有限的矽鍺 (SiGe) 勢必要以更多單元數量的大型天線陣列才能支應，將不利基地台的功耗和散熱。她指出，5G 基地台的封包追蹤 (envelope-tracking, ET) 需要頻率非常高的開關轉換器，傳統的矽基元件和砷化鎵難以滿足；換作高功率密度的氮化鎵，或僅需 64 個單元的天線陣列且可大幅縮減晶片體積、成本與功耗。劉美君不諱言，在中國傾國家力量發展下，化合物半導體或將成為科技戰新標的；透過收購歐洲公司化合物半導體部門，中國已取得一定的製造技術。

先見之明，中國借道併購成就自主研製

早在 2010 年收購法商 OMMIC 的四川益豐電子，近日再投資 1,500 萬歐元於法國興建生產

5G 中繼天線之氮化鎵晶片廠房，主要供貨華為、愛立信 (Ericsson) 與富士通 (Fujitsu)。另意識到 RF 功率元件是行動通訊的關鍵技術，也是雷達、電子戰系統、航天航空和衛星中的核心器件，母集團隸屬於中國政府基金的北京建廣資產於 2015 年斥資 18 億美元收購恩智浦 (NXP) 的 RF Power 部門，同時與恩智浦合資控股雙極性功率器件公司瑞能半導體。中國本土亦大動作佈局，試圖串聯上至材料、下至應用的生態系。

華為旗下的哈勃科技投資持有 10% 中國第三代半導體材料龍頭公司股權——山東天岳先進材料科技；三安光電近年亦不斷佈局氮化鎵和碳化矽，今年 7 月更挹注 160 億人民幣在長沙高新區啟動建設佔地千畝的第三代半導體產業園，擬自長晶、基板、磊晶、晶片製備到封裝建構完整產業鏈，未來

還將在鄭州航空港實驗區建設碳化矽生產線。搶先於 2017 年投入大功率氮化鎵雷射器的三安光電，其子公司三安集成在 2019 年 3 月攜手美的集團成立第三代半導體聯合實驗室，聚焦於氮化鎵、碳化矽半導體功率器件晶圓與智慧功率模組 (IPM)。

中國首條 6 吋商用碳化矽晶圓產線亦正式量產 (屬華潤微電子所有)。另一方面，海陸重工旗下江蘇能華微電子亦致力提供氮化鎵 MOVCD 生長、磊晶材料與基於氮化鎵的電子設備性能先進加工等特定研究。為搶得 5G 市場先機，中國對於氮化鎵志在必得；除了三安集成，海威華芯亦宣稱具有量產 GaN 功率器件能力 (提供 6 吋 GaAs/GaN 微波積體電路的純晶圓代工服務)。另英諾賽科 (Innoscience) 公告位於蘇州第三代半導體基地的全球最大 8 吋氮化

圖 3：英諾賽科透過自有專利技術解決 8 吋砷基氮化鎵外延生長中的晶格失配、厚度均勻性，以及應用於 650V 產品的厚膜生長等問題



資料來源：<http://www.innoscience.com.cn/Cn/Index/pageView/catid/8.html>

鎵廠量產在即，將建立集結研發、設計、磊晶生產、晶片製造、測試於一體的全產業鏈平台。

碳化矽、氮化鎵前腳先行，氧化鎵後腳起步

Yole Développement 預測至 2023 年，碳化矽和氮化鎵電力電子器件 (不包括高頻 RF 器件) 在整體功率器件的滲透率分別為 3.75% 和 1%，驅動因素是新能源汽車的動力及快充。顯然未來三年內，碳化矽的成長力道較為強勁；為此，韓國 SK 集團旗下半導體材料生產商 SK Siltron 公司於去年 9 月宣佈以 4.5 億美元收購杜邦的碳化矽晶片部門，並於今年三月完成收購程序。業界認為，這是因為氮化鎵須以「異質結構」形式存在所

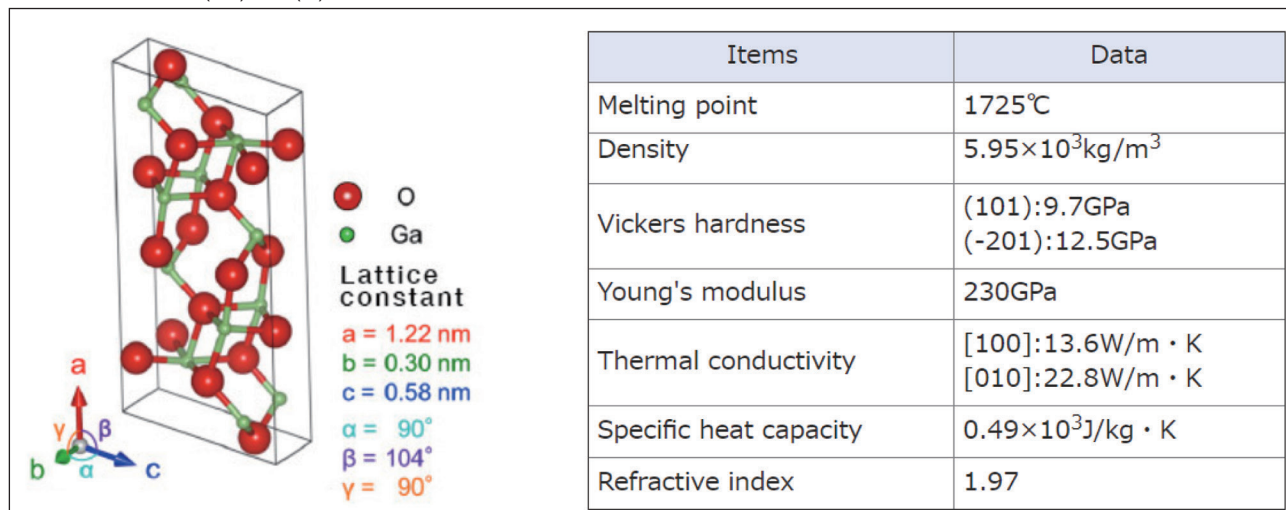
致——在常規矽材、碳化矽、鑽石或藍寶石 (Sapphire) 的基板生成 GaN，進而對純氮化鎵在功率半導體的滲透率形成阻力。

美國 Transphorm 即是 GaN-on-Si 功率器件的新創公司；中國四川海特高新亦循矽基氮化鎵發展，擁有 6 吋 5G 氮化鎵基地台晶圓代工能力，可小規模量產氮化鎵功率元器件且已獲六家客戶肯定；北京耐威科技佈局氮化鎵磊晶材料及器件，自主研發的 GaN-on-Si 和 GaN-on-SiC 已展開非產業化銷售；不過，氮化鎵的長期爆發力仍值得期待：日本名古屋大學於去年 10 月發佈一款「完全使用氮化鎵半導體裝置」的電動汽車，號稱較當下 SiC 電動車提升 20% 效率；中國手機 ODM 大廠聞泰科技亦正

拓展車用 GaN 器件。

日本信越化學 (Shin-Etsu) 亦肯定氮化鎵前景，今年一月不僅與美國 Qromis 公司簽訂 GaN-on-Si 授權合約，還將利用 Qromis 的專利基板技術擴展產品組合，提供多種材料和基板方案。順帶一提，繼 SiC 和 GaN 後，日本經濟產業省 (METI) 明年將砸下 2,030 萬美元重金發展電子遷移率達 4.8eV 的氧化鎵 (Ga₂O₃)，以實現更高功率的應用 (參閱：《氮化鎵：輕巧、耐熱、高速開關，節能一把罩》<http://www.compotechasia.com/a/feature/2019/0409/41524.html> 一文)，未來五年將注資逾 8,560 萬美元。然而工研院評估，氧化鎵具體進展約莫要到十年後了。CTA

圖 4：氧化鎵是依鎵 (Ga)：氧 (O) = 2:3 的化學計量比例合成的化合物，為單斜晶體結構



資料來源：株式會社田村制作所：<https://www.tamura-ss.co.jp/cn/products/gao/index.html>