

SiC、GaN 領跑，「寬能隙」全力衝刺功率半導體市場

■文：任苙萍

以碳化矽 (SiC) 與氮化鎵 (GaN) 為主的寬能隙 (WBG) 功率元件，近年熱議不斷，兩者皆以「能源效率」著稱。前者勝在高壓，拜電動車 (EV) 之賜而聲名大噪；後者強在高頻，因為資料中心及消費電子變壓器的採用而躍上舞台。

曾在碳化矽耕耘多年、現轉攻氮化鎵領域的 GaN Systems 副總經理莊淵棋表示，今後數十年人類會遇到的重大生存問題，能源就是其一；寬能隙受到數位經濟、電子設備及不同能源系統轉換三大面向驅動，需求持續看漲。

節能&儲能，推動「寬能隙」半導體前行

首先，社群軟體興盛的今天，數據正以倍數成長，自駕車上路後，預估每天數據量將達 4GB。2025 年在手機、自駕車等驅動下，日常流動數據量將上看 ZB (10 的 21 次方) 等級，資料中心與高速運算在增加算力和記憶體容量的同時，能耗也增多。假設電動車充電每輛耗能 100W，若希望在 15 分鐘之內充滿 80%，以 400V、1000A 計算，亦即每支充電槍的電



照片人物：GaN Systems 副總經理莊淵棋

流數約 800 ~ 1000A；通常一個充電站配有 10 支充電槍，10000A 同時發生，舊有都市建設的電力系統根本無法負荷。於是，為普及電動車，美國兩年前就規定：設立一個充電樁須搭配一個儲能系統。

其次，隨著電動車被推上時程，從能源生成的角度來看，預估 2025 年再生能源最多只佔總能源消耗的四成，仍有六成須仰賴傳統發電；而資料中心是吃電大怪獸，歐盟已規定能源效率須從 94% 提升至 96%，舊有電源架構及材料無法企及。最後，一般用電及再生能源轉換過程也有能耗損失，這些都是推動寬能隙前進的力量。莊淵棋指出，自從特斯拉 Model3 點燃碳化矽商機，板載充電 (OBC) 和

牽引逆變器 (Traction Inverter) 改用碳化矽就成了現在進行式；但汽車產業相當保守，矽基元件改用碳化矽時原則上會遵行等值轉換，即原本 1200V 就用 1200V。

莊淵棋宣示，以往 OBC 操作頻率在 50 ~ 60kHz，就材料特性而言，此時矽基、碳化矽和氮化鎵差異不大，只是寬能隙的切換損失 (Switch Loss) 會少一點。拉到 100kHz 後，矽基明顯跟不上，將盡顯寬能隙的切換及傳導損失 (Conduction Loss) 加總優勢；但若再往上到 120 ~ 150kHz，碳化矽就有點撐不住，效能呈現停滯。日後上看 200kHz、500kHz，氮化鎵反而是最佳主角，依然可維持極小切換損失。再者，駕駛油門採放之間的切換損失很大，若這個損失佔電池達 1/3，氮化鎵效能將優於碳化矽，對於電池容量小的輕量電動車影響甚鉅。

氮化鎵潛力大！有機會打入電動車 OBC 及城市行車逆變器

「今天電動車的牽引逆變器多採用碳化矽，但若加計切換損

失，未來電池容量小的城市行車極有可能改用氮化鎵」，莊淵棋說。他並提到，豐田 (TOYOTA) 與電綜 (DENSO) 曾做過一項實驗：把所有汽車開關元件改用氮化鎵來做，因為冷卻系統和設計相對簡單，在同一架構下，氮化鎵的物料清單成本 (BOM Cost) 會下降 8%；另在同樣大小的逆變器下，矽基元件電力只有 15kW，但氮化鎵可達 25kW，效能優異。換個角度探討，OBC 在 11kW 下，氮化鎵變壓器尺寸可較矽基縮減 50%；或是同在 6kW 下，可將操作頻率拉升至 500kHz。

莊淵棋預言：現行 OBC 和逆變器皆是碳化矽為主，但長遠的未來 OBC 會以氮化鎵為主，逆變器則與使用場域有關，重點在於「切換損失」。要縮減尺寸最佳手段就是拉高頻率，所以拉高頻率將是趨勢，但碳化矽對此並不具優勢。究竟改用碳化矽或氮化鎵？端看頻率或效能需求，應用場域與商業行為將是決策關鍵。但他不諱言，汽車要千錘百煉，雖然現今已有系統商針對牽引逆變器並行發展，但改架構並非易事；加上去年開始才有廠商專為氮化鎵提供控制器和驅動器，採用轉向過程有學習曲線問題，這樣的改變並非短期內會發生。

這似乎也解釋了為何近期英飛凌 (Infineon) 將以 8.3 億美元全現金方式收購 GaN Systems、以強化電源系統的原因。英飛凌執行長 Jochen Hanebeck 公開宣示，氮化鎵技術導入行動充電、資料中心電源供應、住宅用太陽能逆變



照片人物：英飛凌執行長 Jochen Hanebeck

器和電動車車載充電器等應用正處於轉折點，將與矽、碳化矽並駕齊驅，並搭配混合返馳式和多級實現等新的拓撲結構應用。研調機構 Yole 預估，到 2027 年，用於功率應用的氮化鎵營收將以 56% 的年複合成長率 (CAGR) 增長至約 20 億美元。

能隙大、散熱佳，碳化矽不僅高效還能簡化冷卻系統



照片人物：陽明交大光電工程研究所教授兼鴻海研究院所長郭浩中

陽明交大光電工程研究所教授兼鴻海研究院所長郭浩中表示，電動車是不可擋的趨勢，亦是實現淨零碳排不可或缺的元素。業界普遍預測 2035 ~ 2040 年，電動車的佔比將過半，亦是甜蜜點，2050 年將有很多地方再也見不到燃油車的蹤跡。他援引市調資料預估：2040 年全球電動車產值將達 2.1 兆美元，達 5,000 萬輛規模，中國與美國是兩大電動車市場。屆時，手機產值不過 0.9 兆美元，約 18 億支產量。相較之下，電動車市場更誘人！也為碳化矽帶來無限商機。

郭浩中指出，電動車的牽引逆變器、板載充電和 DC/DC 轉換器 (Converter) 三大領域，正積極從絕緣柵雙極電晶體 (IGBT) 轉向碳化矽，意法 (ST)、安森美 (OnSemi)、羅姆 (Rohm)、科銳 (Wolfspeed)、英飛凌是五大主要供應商；其中，ST 受惠於特斯拉 (Tesla) 的採用，市佔最大。就製程來說，ST 和 Wolfspeed 是採平面式 (planar) 製程，亦是現階段主流製程，且不只上游晶圓，從模組到系統的關鍵技術亦多掌握在國外大廠手中。

鴻海研究院半導體研究所組長蕭逸楷介紹，碳化矽是本世紀的新產物，在 2010 年始見商用化，其能隙是矽基元件的 3.3 倍，漏電流低很多，這關係到整個系統的能量損耗與碳排量以及冷卻系統的簡化；與此同時，碳化矽本身的散熱能力是矽基的三倍，這意味著只需傳統氣冷系統，不需動用複雜的水



照片人物：鴻海研究院半導體研究所組長蕭逸楷

冷系統就足以應對散熱。另從產品生命週期觀點來看，碳化矽可從中獲利約 550 美元；不論就節能減碳的政策面、技術面和經濟面，碳化矽雖屬於利基型市場，卻相當具有吸引力。

製程缺陷多，檢測／量測設備至關重要

蕭逸楷分析，碳化矽現有三大瓶頸：製造成本高、製程須優化以及耐高壓元件的開發。首先，來自於長晶、製造、封裝過程缺陷 (defect) 的產量損失 (Yield Loss) 高達三成，有意投入者若能設法降至個位數，或有機會一舉吃下龐大市場。其次，碳化矽長晶技術嚴苛且主要技術和關鍵材料多屬歐美大廠所有，台廠缺乏相關專業知識導致製成本偏高；另一方面，從長晶開始缺陷數就很多，且這些缺陷會一路跟隨製程往下轉移、甚至生成更多元的缺陷類型，極需高速檢

測技術奧援。

他補充，碳化矽製程雖與矽基類似，但由於整個製程溫度提高非常多，例如，退火須至 1600°C 以上高溫，需要予以優化。如何提高電子移動率 (electron mobility) 以改善傳導值與高頻特性是另一重要課題。最後是改善耐高壓元件的可靠度和效能，須從減少傳導損失並提高遷移率以降低通道阻抗、增加電流值著手。經由參數校正，鴻海研究所現已建好 1200V、1700V 碳化矽 MOSFET (金屬氧化物半導體場效電晶體) 的技術基線 (baseline)。

蕭逸楷直言，相較於矽基元件，碳化矽模組封裝在高壓、高溫、高濕度環境下的挑戰極大；有時候元件本身是良品，卻在封裝出狀況，個別狀態良好不代表加總後的狀態也完美。此外，基板 (Substrate) 價貴且製程特殊，若能善用電子設計自動化 (EDA) 模擬軟體可較快取得成果；另隨著電壓提高，電流也從毫安 (mA) 提升至數十安培 (A) 等級，還須考慮寄生效應，檢測／量測設備亦至關重要。筑波科技 (ACE

圖說：太赫茲 (THz) 針對半導體晶圓能比矽、碳化矽和氮化鎵有更高的穿透力，筑波科技 TZ6000 設備可滿足非破壞性檢測需求



資料來源：筑波科技 (ACE Solution)

Solution) 副總經理陳治誠對於製程檢測有一進步闡述。

太赫茲穿透力佳，「非破壞式檢測」受囑

陳治誠說明，碳化矽製程從長晶、切片、研磨皆可能產生缺陷，表面缺陷可藉由光學顯微鏡看出，但不透光的晶圓次表面 (Subsurface) 下的結晶性 (晶格) 問題就很難查覺。目前晶圓厚度超過 10μm 就須腐蝕掉或切片等用破壞性檢測，借助兼具微波特性、更遠的紅外光——太赫茲 (Terahertz, THz)，就可穿透 20 ~ 50μm 甚至整個晶體，以量測縱切面與橫切面的 3D 數據；且因為它不會有輻射，十分適合生產現場使用，不必侷限於實驗室中。

太赫茲檢測可就製造的時間序列觀察穿透力、折射率分佈等光學係數、介面常數、導電度、電阻力等電學特性，以及是否有不均勻現象等晶圓特性，這是一般可見光很難做到的。陳治誠強調，製程不易的碳化矽檢測設備須擁有系統整

合、資料處理能力，以及非接觸、非破壞、具穿透力的特性 (參閱：《寬能隙製程難度高、層層都珍貴！「非破壞式檢測」受青睞》一文 <http://www.compotechasia.com/a/tactic/2023/0214/53457.html>)。台北科技大學電機系教授黃明熙則提到「雙脈衝」(Double Pulse) 之於寬能隙量測的不凡貢獻。

黃明熙解析「雙脈衝」的傳統量測用途：1. 電源轉換之切換損失、傳導損失、反向恢復 Q_{rr} 損失等關鍵參數；2. 與電流控制息息相關的電壓應力 (Voltage Stress)；3. 審視寄生二極體或二極體的反向特性；4. 驗證電源開關的閘極驅動器。不僅如此，雙脈衝更是功率級設計的好幫手，用來測量主要電流路徑的雜散電感 (stray inductance)、功率轉換之雜散電感對關斷電壓突波 (spike) 影響、檢查並聯電源切換之間均流現象、驗證電源開關的 Spice 模型，以及研究變壓器／扼流圈的磁通飽和度。

「功率級」虛擬設計更需要 Double Pulse 量測

台北科技大學早在六年前便與松下 (Panasonic) 專案合作初次



照片人物：台北科技大學電機系教授黃明熙

使用雙脈衝量測。事實上，「雙脈衝」不只用於功率半導體的元件測試。黃明熙透露，它還能用於轉換器／逆變器「功率級」虛擬設計，在符合行駛週期和輸出功率的要求下，借助 Spice 模型和協同仿真評估效率和散熱，印刷電路板 (PCB) 亦是雙脈衝量測的另項要務，而「治具」也可能干擾量測結果：

1. 電流感測器：若顧及頻寬限制，隔離探棒並非適當選擇，支援高頻寬的同軸分流器電阻和高電流的探棒才是首選，可讓去偏移 (de-skew) 的升降時間皆一致，避免去偏移後仍存在失真幅度而降低量測的瞬間準確性；

2. 高電壓探棒：高解析度啟動環境很重要，尤其是操作頻率高的氮化鎵，最好能有 GHz 等級，即使時間再長也能調校精準；
3. 電感元件：要選用空氣 (無磁芯) 的電感、排除可能干擾，以便提供線性特徵。

黃明熙統整雜散電容對電源級設計的影響包括：

1. 雜散電感可能存在電路板的電源走線 (Power Trace)，進而影響模組的電源切換和電容；
2. 雜散電感可能會在關斷瞬態、電磁干擾 (EMI) 時引起電壓應力，以及並聯電源開關之間的不平衡均流；
3. 在 PCB 設計階段，可透過 Ansys Q3D 提取和減少主功率流路徑的雜散電感、減少關斷電壓突波，再使用 DPT 驗證設計。

他特別提醒，電流大意謂裡面有很大的磁場，故地線不要繞太長且廣探針若接觸不良就要更換，否則量測將嚴重失真。碳化矽切換損失並不大，傳導損失才是量測重點。令人頭痛的是，在實際量測時常會遭遇缺乏導線雜散電阻資料的困擾，必須借用模擬進行，但切記模擬後一定要加以驗證。CTA

COMPOTECHAsia 臉書

每週一、三、五與您分享精彩内容

<https://www.facebook.com/lookcompotech>