

圖片來源：micro.com

半導體業持續在製程中追求可實現高效率、低能耗的新材料。而寬能隙半導體因符合上述條件，已逐漸成為市場看好的新興材料，並逐步導入消費市場。本文從開發生產階段的角度切入，詳細檢視寬能隙所需進行的驗證分析。

# 寬能隙半導體應用起飛 GaN/SiC驗證分析全面啟動

張齊如

在半導體材料領域中，第一代半導體是矽(Si)，第二代是砷化鎵(GaAs)，而目前市場所談的第三代寬能隙半導體就是指碳化矽(SiC)和氮化鎵(GaN)。

2021年，可以說是第三代寬能隙半導體嶄露頭角的一年，已成為半導體先進材料的代表。到底什麼是「寬能隙」(Wide Band Gap, WBG)？它又具有什麼特點？為何5G、電動車、再生能源、工業4.0的產業趨

勢來臨時會這麼需要它？本文將帶讀者深入淺出了解第三代寬能隙半導體。

## 為什麼需要用到第三代寬能隙半導體？

由於近年地球暖化與碳排放衍生的環保問題日益嚴重，人類以節能、減碳、愛護地球為共同的首要發展方向，石化能源必須逐步減少並快速導入綠能節電的應用，因

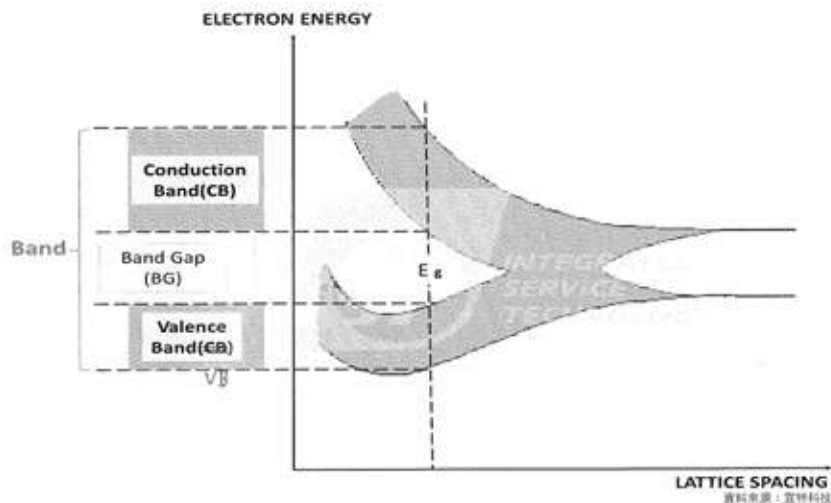


圖1 半導體能帶與能隙示意圖

此在日常生活用品中也逐步以高效率、低能耗為目標。

舉例而言，聯合國在氣候變化大會巴黎協議中的目標—全球暖化幅度需保持在 $2^{\circ}\text{C}$ 以內。以目前的經濟發展趨勢預估，即便2050年的升溫保持在 $2^{\circ}\text{C}$ 內， $\text{CO}_2$ 排放量仍將提高21%，且必須另外取得高達50%的電力因應各種人類活動。因此，大幅提升與改善現有的能源，已是大勢所趨。

半導體原料最大宗，主要以第一代的「矽」晶體的生產製造為主，然而在現有以「矽」基礎的產品，因材料的物理特性已達極限，無法再提升電量、降低熱損、提升速度，因此需朝向其他更能發揮電子傳輸效率與低能耗的材料演進，而具備高效率、低能耗的第三代寬能隙半導體就在此背景之下應運而生。

## 什麼是能隙？

以下先來了解一下何謂「能隙(Band Gap)」？

基本上要用量子物理的理論來簡單說明，在「能帶(Band)」的劃分主要為低能帶區的「價電能帶」(Valence Band, VB)，與高能帶區「導電能帶的(Conduction Band, CB)的兩種，在VB與CB之間即是一個所謂的能帶間隙(Band Gap, BG)，簡稱「能隙(BG)」(圖1)。

金屬材料能夠導電，主要是因為電子都位於高能的CB區域內，電子可自由流動；而半導體材料在常溫下主要電子是位於低能的VB區域內無法流動，當受熱或是獲得足夠大於「能隙」的能量時，其VB內電子即可克服此能障，躍遷至CB而形成了導電特性。

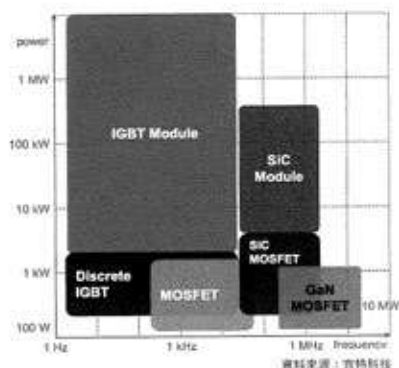


圖2 功率元件與相關材料的應用範圍

因此在積體電路中的電晶體(Transistor)元件，當施加一個小電壓即能快速關閉電源，長久以來，這個能隙較小的「矽」材料才會被大量地採用至今。

然而，當操作的溫度高於100°C之後，產品就容易開始產生退化甚至故障，無法應用在更嚴苛的環境，如交通、軍事或是太空等工具的使用，尋求可耐高壓高溫的第三代寬能隙半導體材料才會如此必要。

人們都知道，功率(Power)是電流(Current)與電壓(Voltage)加乘的正比關係；在高功率元件(Power Device)的使用上，人們所熟知的第一代半導體材料—矽能隙為

1.12eV，第二代半導體通訊用的材料砷化鎵為1.43eV，都已在生活中廣泛使用長達二、三十年之久，但這類低能隙材料使用的溫度、頻率，以及功率都已無法突破，必須找尋更合適的材料來替換。

而第三代寬能隙半導體材料可以提升更高的操作電壓，產生更大的功率，並且將能損降低，另外相較矽元件的體積又可大幅縮小。

## 有哪些更佳的寬能隙材料？

那麼有哪些更佳的寬能隙材料呢？如Si與C的化合物碳化矽，相關的材料能隙均可大於3.0eV；另外，Ga與N或O的化合物氮化鎵或氧化鎵(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)也分別高達3.4eV與4.9eV，而鑽石(Diamond)更高達5.4eV(表1)。

其中氮化鎵或氧化鎵，雖然分別在LED照明或是紫外光的濾光光源應用已經一段時間，但受限於這類半導體材料的特性在生產製作上挑戰性仍然是高的。

例如，要製作SiC的單晶晶棒，相較Si晶棒的生產困難且時間緩慢很多，以及GaN與Si晶圓的晶格不匹配易生成差排缺陷(Dislocation Defect)等問題必須克服，

表1 半導體材料的物性比較

特性	Si	SiC(4H)	GaN	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (β)	Diamond
能隙(eV)	1.1	3.3	3.4	4.9	5.4
遷移率(cm <sup>2</sup> /Vs)	1400	1000	1200	300	2000
擊穿電場強度(MV/cm)	0.3	2.5	3.3	8	10
導熱率(W/cmK)	1.5	4.9	1.3	0.14	20

資料來源：意特科技

導致長久以來相關的製程開發困難且花費高昂。

## 寬能隙材料運用在哪些產品上？

不過，近年來的國際知名大廠意法半導體 (ST)、英飛凌 (Infineon)、羅姆 (Rohm) 等均有相當大的突破。如 GaN 在以 Si 或 SiC 為基板的產品已陸續發表，目前市售的快速充電器採用的即是 GaN on Si 材料製作的高功率 (如 60 瓦以上) 產品，其除了功率提升外，也因為溫度與熱效應可大幅降低，使得元件可大幅縮小，充電器體積也更加玲瓏小巧，未來道在行動裝置、筆電等快充電源的应用更是潛力無窮。

現行以矽基材料為主的高功率產品多以絕緣閘雙極電晶體 (IGBT) 或金氧半場效電晶體 (MOSFET) 為主，如圖 2，可以看到各種功率元件和模組與相關材料應用的範圍，雖然在傳統 IGBT 高功率模組大約能應用至

一百千瓦 (100kW) 以上，但速度卻無法提升至一百萬赫茲 (1MHz)。

而 GaN 材料雖然速度跟得上，但功率卻無法達到更高的一千瓦 (1kW) 以上，必須改用 SiC 的材料。

SiC 因具有比 Si 更好的三倍導熱率，使得元件體積又可以更小，這些特性使得它更能適合應用在電動車內。在特斯拉的 Model 3 也從原先的 IGBT 改成使用意法半導體生產的 SiC 功率元件，作為其牽引逆變器 (Traction Inverter)、直流電交互轉換器與充電器 (DC-to-DC Converter & On-board Charger) 等的應用，提高電能的使用效率與能損的降低。

在未來更高的電力能源需求下，車載裝置除了須具備基本的高功率外，還需要極高速的充電能力以因應電力的補充，車用充電樁、5G 通訊基地台、交通運輸工具，甚至衛星太空站等更大的電力能源需求，相關的電流傳輸轉換，電傳速度的要求以及能損的

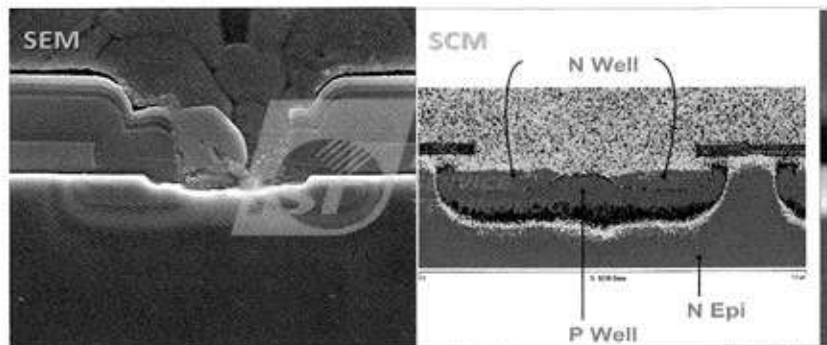
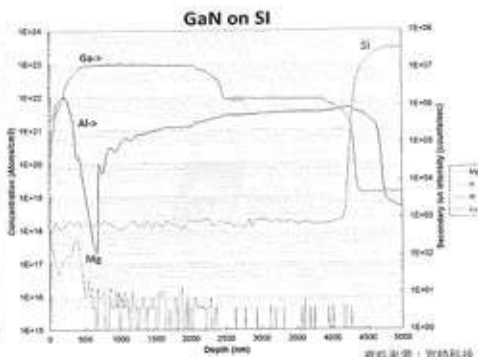
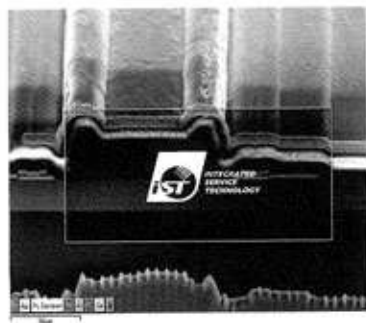


圖 3 使用 SEM 剖面觀察 SiC 元件的結構，搭配 SCM 分析 N/P 型與擴散區的量測

資料來源：意法科技



資料來源：宜特科技

圖4 半導體材料的物性比較

降低，不得不邁向更有效率的WBG材料進行大規模的開發，超高功率的SiC元件模組需求亦會大量地被採用。

### 寬能隙材料開發生產階段需進行哪些驗證分析？

本文觀察，晶圓代工廠與功率IDM廠商也都持續不斷地努力研究與開發。不過，新半導體材料，在初期開發中，總是會有許多需進行研發驗證的狀況，近年，有測試實驗室如宜特科技就協助多家WBG產業的開發與生產驗證。

比如磊晶製程相關的結構或缺陷分析，就可以藉由宜特科技的雙束聚焦離子束 (Dual Beam FIB) 製備剖面樣品並進行尺寸量測或成分分析 (EDS)，亦可搭配穿透式電子顯微鏡 (TEM) 進行奈米級的缺陷觀察；而相關擴散區域的分析可經由樣品研磨製備剖面後，進行掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察以及掛載在原子力顯微鏡

(AFM) 上的偵測模組-掃描式電容顯微鏡 (SCM) 判別摻雜區域的型態與尺寸量測，如圖3為SiC的元件分析擴散區摻雜的型態，先用SEM觀察井區 (Well) 的分布位置，再經由SCM判斷上層分別有N與P型 Well 以及磊晶層 (EPI) 為N型。

另外在摻雜元素及濃度的分析，則可透過測試與驗證單位的二次離子質譜分析儀 (SIMS) 的技術，圖4為GaN on Si的元件，先用雙束聚焦離子束進行剖面成分分析判斷磊晶區域的主要成分之後，提供SIMS參考再進行摻雜元素Mg定量分析濃度的結果，作為電性調整的依據。

諸如上述介紹WBG元件結構的解析之外，其它任何產品都可透過實驗室的材料分析及電性、物性故障分析來尋求解答。當然，包括因應安全要求更高的產品可靠度測試與評估，均可藉由相關測試實驗室提供更完整、較全面的驗證與服務。

(本文作者為宜特科技材料分析工程處資深技術經理)