

# 碳化矽：損耗低、導熱佳，支撐 kV 等級的高壓應用

■文：任苾萍

市調機構 Market Study Report 新近發佈一份報告指出：2018 年碳化矽 (SiC) 與氮化鎵 (GaN) 功率器件市場規模約 3.2 億美元，預計 2025 年將達到 3.08 億美元，預測期內的年複合成長率 (CAGR) 為 32.5%。然而，當人們將 SiC 與 GaN 相提並論時，

除了高效率、低損耗、小型化等共通優點外，就功率器件而言，現階段在應用取向仍有分野：SiC 多用於消耗大量二極體的功率因素校正 (PFC)、尤其是上千伏特 (V) 的高壓電源產品；而 GaN 多用於高功率密度 DC/DC 電源的高電子遷移率電晶體 (HEMT) 以及 600V 以上

的 HEMT 混合串聯開關。

## 臨界電場強，SBD、MOSFET 最愛

碳化矽發展較早，相較於矽和砷化鎵 (GaAs)，碳化矽更適合用於高溫、高功率器件，亦可作

圖 1：SiC 功率器件專利廠商佈局

	Planar SiC MOSFET	Trench SiC MOSFET	SiC SBD	SiC Power Module
Key IP players with steady or increasing patenting active	General Electric	Denso Corporation Fuji Electric	Mitsubishi Electric	Hitachi
Key IP players with lower patenting activity since 2015	CREE/Wolfspeed Fuji Electric	CREE/Wolfspeed	CREE/Wolfspeed Panasonic	Mitsubishi Electric
IP Challengers		Toyota Motor Toyota CRDL Rohm	Fuji Electric Sumitomo Electric	Rohm CREE/Wolfspeed
IP new entrants	Hestia Power Century Goldray CRRC Times Electric SGCC UESTC	Century Goldray UESTC SGCC	Shenzhen BASiC Semiconductor Beijing Yandong Microelectronic Century Goldray Semiconductor SGCC	Danfoss Silicon Power Tyco Tianrun Semiconductor, Yangzhou Guoyang Electronic Wancheng Electric Vehicle Operation

資料來源：Yole Développement 子公司 Knowmade：<https://www.knowmade.com/sic-adoption-is-accelerating-is-the-industrial-supply-chain-ready/>

為氮化鎵的外延基板。當電子從「價帶」(valence band, 指絕對零度中電子最高能量的區域) 移動到「傳導帶」(conduction band, 電子經由外在電場加速形成電流) 並用於電流時需要能量, 寬能隙(WBG) 的能量遠高於矽——相較於矽的 1.1eV (電子伏特), SiC 需要 3.2 eV; 意味著在相同尺寸下, 這些額外能量可帶來更高的電壓擊穿性能, 在失效前可承受更高的溫度, 蕭特基二極體 (SBD)、高功率金屬氧化物半導體場效電晶體 (MOSFET) 是主要市場。

科銳 (Cree) 及旗下 Wolfspeed、羅姆半導體 (Rohm)、英飛凌 (Infineon)、意法半導體 (ST) 等是 SiC 功率器件的領先製造商, 但以下公司在專利佈局亦擁有堅強實力, 包括: 通用電氣 (GE), 日本的富士電機 (Fujitsu Electronics)、電裝 (Denso)、豐田汽車 (Toyota Motor)、豐田中央研究所 (CRDL)、三菱 (Mitsubishi)、松下 (Panasonic)、住友電氣 (Sumitomo Electric) 和日立 (Hitachi), 以及中國大陸的世紀金光半導體 (Century Goldray)、株洲中車時代電氣 (CRRC Times Electric)、中國國家電網 (SGCC)、電子科技大學 (Uestc), 還有台商瀚薪科技 (Hestia Power)。

SBD 和 MOSFET 等「單極器件」最能體現碳化矽的好處, 可提供高達 10kV 的電壓額定值 (先進廠商正致力將額定電壓提高到 3.3kV 以上), 即使在高溫或低電流下也能實現「低導通損耗」, 使

得 SiC 器件能耐受 200°C 工作溫度, 也可避免低負載或空載時的無謂浪費, 因而成為太陽能和汽車的新勢力; 惟 P-I-N 二極體、絕緣閘雙極電晶體 (IGBT) 和晶閘管 (Thyristor) 等高壓 SiC 雙極器件, 會因固有內置電壓而有高開態損耗的限制。SiC SBD 常用於太陽能逆變器 (Inverter), 而 SiC MOSFET 則用於高功率電源、驅動電子開關、智慧工控和車輛電氣化等。

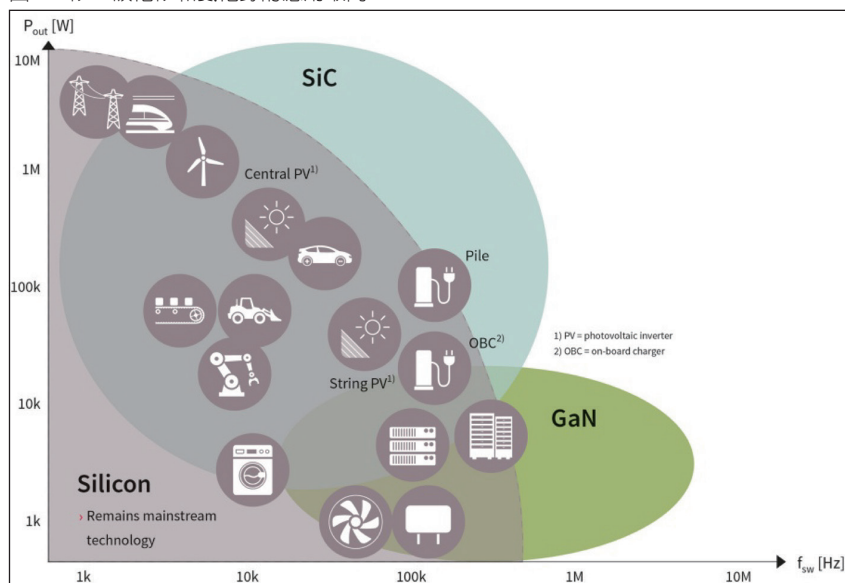
### SiC MOSFET 提升電動車充電效率&續航力

油電混合車/電動車 (HEV/EV) 的主變頻器 (VFD)、板載充電器、升壓器或 DC-DC 轉換器也逐漸傾向用 SiC MOSFET 提升充電效率並增加續航力——經由調整閘極驅動器配置、優化關斷閘極電阻, 使損耗遠低於 IGBT 器件; 另相較於橫向結構的 GaN HEMT 電

池, 垂直溝槽 (Trench) 的 SiC 接面場效電晶體 (JFET) 之導通電阻也更低。預估 2023 年, 全球電動汽車控制器市值約 1,000 萬美元, CAGR 達 42.51%; 特斯拉 (Tesla) 即已將 ST 基於 SiC MOSFET 的智慧功率模組 (IPM) 集成到 Model 3 逆變器, 推估每個逆變器使用 24 個 SiC MOSFET 模組, 商機龐大, 英飛凌亦在 2017 年打入 Model 3 供應鏈。

IPM 涵蓋驅動電路和控制單元, 以定制集成電路執行供電欠壓、過溫和短路等自我保護功能, 包括單相模組三相輸出到高壓直流的所有高壓控制, 可適應基本結構或設計變化, 例如, 增加電流或軌道, 並提升系統可靠性。一般而言, IGBT 常用於電機控制或低頻、高壓處理, 而 MOSFET 多用於低壓放大或高頻切換電子訊號, 施加到器件的電壓量將決定其導電性。

圖 2: 矽、碳化矽和氮化鎵的應用取向



資料來源: 英飛凌官網: <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/wide-band-gap-semiconductors-sic-gan/>

雖然 SiC MOSFET 導通電阻會隨工作溫度增加，且調高閘極值會增加關斷狀態的能量消耗，但拜低反向恢復峰值電流、切換期間快速降壓及單極性無動態崩潰極限所賜，器件仍可正常運作。

在大電流導通 vs. 高電壓截止的動靜間，假設傳導損耗類似，SiC MOSFET 可較矽二極體降低逾 75% 的開關損耗，且二極體恢復損耗幾可忽略不計，特別適合多級拓樸的設計。全球首家成功生產 SiC MOSFET 的羅姆半導體說明，高耐壓矽元件之單位面積導通電阻會以 2 ~ 2.5 倍增加，以往 600V 以上多使用 IGBT，須藉由調變傳導度、在漂移層內注入少數載子之正孔以降低導通電阻。但與此同時，少數載子累積會導致斷開時產生尾電流又大幅增加開關損耗，而碳化矽正好可解決這個痛點。

### 羅姆「雙溝槽」避免電場單一集中，強化長期可靠性

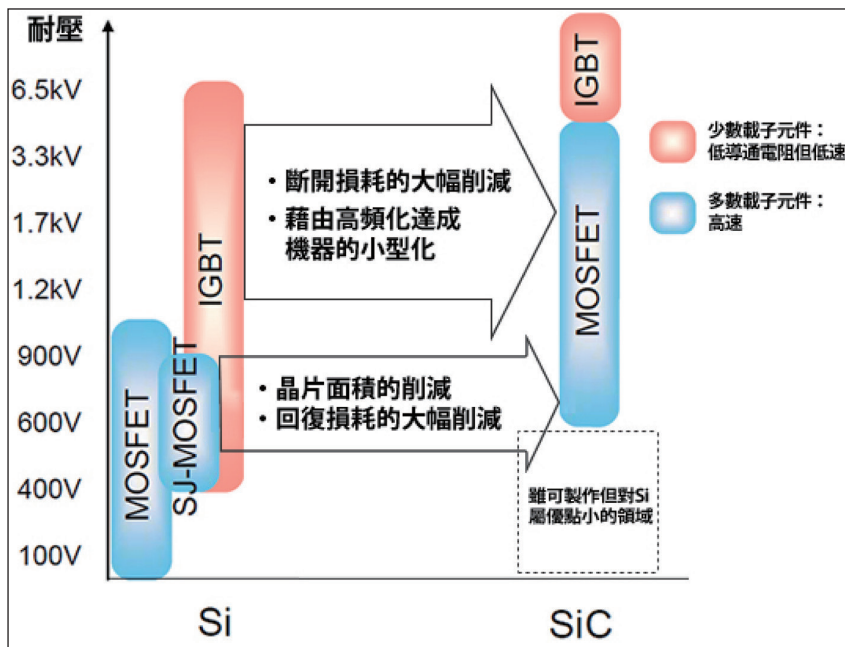
SiC 漂移層電阻比矽低、不須傳導調變，故可用高速元件構成 MOSFET 來取代 IGBT，可兼顧高耐壓與低電阻且不會產生尾電流，能有效降低開關損耗並縮小冷卻器，適用於工業機器電源與高效率電源調節器的變頻器、轉換器等。在碳化矽商用化之前，就算借助高摻雜濃度的超接面 (SJ-MOSFET)，也只能做到 900V 左右；而碳化矽絕緣破壞電場界強度為矽的十倍，可以低電阻、薄膜厚

的漂移層實現 1700V 以上的高壓、低導通電阻產品。為拉長電動車行駛距離、增大電池容量並縮短充電

時間，高功率、高效率的板載充電器實不可或缺。

另一方面，800V 以上的高電

圖 3：Si vs. SiC 之耐壓比較



資料來源：羅姆半導體官網：[https://www.rohm.com.tw/electronics-basics/sic/sic\\_what3](https://www.rohm.com.tw/electronics-basics/sic/sic_what3)

表 1：ROHM 新型「SCT3xxxxHR 系列」SiC MOSFET 一覽

產品世代 (開極構造)	品名	V <sub>DS</sub> (V)	導通阻抗 (typ.) (mΩ)	I <sub>D</sub> (A)	P <sub>D</sub> (W)	工作溫度範圍 (°C)	封裝	標準規格
第3世代 (溝槽開極構造)	New SCT3017ALHR	650	17	118	427	-55 ~ +175	TO-247N	AEC-Q101
	New SCT3022ALHR		22	93	339			
	SCT3030ALHR		30	70	262			
	New SCT3060ALHR		60	39	165			
	New SCT3080ALHR		80	30	134			
	New SCT3120ALHR		120	21	103			
	New SCT3022KLHR	1200	22	95	427			
	New SCT3030KLHR		30	72	339			
	SCT3040KLHR		40	55	262			
	New SCT3080KLHR		80	31	165			
第2世代 (平面開極構造)	New SCT3105KLHR	1200	105	24	134			
	New SCT3160KLHR		160	17	103			
	SCT2080KEHR	1200	80	40	262			

資料來源：羅姆官網：[https://www.rohm.com.tw/news-detail?news-title=2019-03-27\\_news\\_automotive\\_sicmos&defaultGroupId](https://www.rohm.com.tw/news-detail?news-title=2019-03-27_news_automotive_sicmos&defaultGroupId)

壓電池亦需低損耗、高耐壓的功率器件支持。面向車載充電器和 DC/DC 轉換器市場，羅姆日前一口氣再推十個符合汽車 AEC-Q101 標準的 650V/1200V 溝槽式閘極 SiC MOSFET——SCT3xxxxxHR 系列。SCT3xxxxxHR 採用羅姆第三代「雙溝槽」結構，在源極部分增加溝槽可減少單溝槽閘極的溝槽底部電場集中所引發的長期可靠性疑慮，且較第二代平面型降低 50% 導通電阻和 35% 輸入電容。羅姆早在 2012 年即為車載充電器提供 SiC SBD，並從 2017 年為 DC/DC 轉換器和板載充電器提供 SiC MOSFET。

堅持「垂直整合型」生產體系、從研發到製造全部在集團內進行，嚴控所有流程並建立可追溯系統。羅姆強調，SiC 功率器件也在集團內部建立「從晶圓到封裝」生產的一條龍生產體制，以消除生產過程的瓶頸，實現高品質和高可靠性。安森美半導體亦在 2019 年應用電力電子會議暨展覽會 (APEC) 推出兩款工作電壓為 1200V、80

毫歐 (mΩ) 的 SiC MOSFET 器件——NTHL080N120SC1 用於工業市場、NVHL080N120SC1 用於 AEC-Q101 汽車，為太陽能、電動車、不間斷電源 (UPS) 和伺服器電源創建板載充電器應用。

### SiC MOSFET 傳導、開關損耗，須整體考量

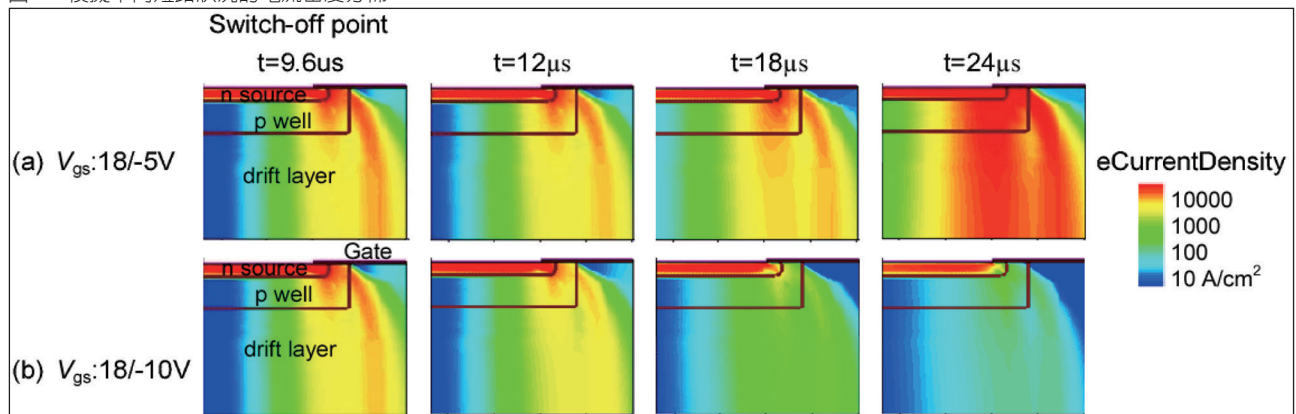
NVHL080N120SC1 設計用於承受高浪湧電流，具有高崩潰能力和抗短路能力。汽車級 MOSFET 的最高工作溫度為 175°C，用於動力系統的電氣化以及高密度和空間限制需要環境溫度的目標應用。同場較勁的還有全球最大功率器件供應商英飛凌，基於自有 OptiMOS 6 技術的首批器件，專為伺服器、個人電腦和充電器開關模式的同步整流而設計，無需權衡高負載、低負載條件，可在各種功率輸出進行維護。看好碳化矽前景，英飛凌一度想收購 Cree 旗下 Wolfspeed Power&RF 部門——精於 SiC 晶圓基板及射頻功率應用的 SiC 單晶氮化鎵層製

造。

可惜最後終因獨佔性太強、遭到監管機關駁回而告吹；不過，兩家公司已在去年簽署長期協議：英飛凌可從 Cree 獲得 6 吋 SiC 晶圓，確認供應無虞。在應對高功率應用常見的「過電壓」和「瞬態短路」方面，如前所述，SiC MOSFET 的高溫額定值能提供較寬廣的安全餘裕，在開關期間防止寄生 N-P-N 電晶體失效。雖然低壓 SiC MOSFET 已具耐受短路條件的能力，但對於高壓應用的「故障處理」仍有待加強；為應對短路，往往需採用新的閘極驅動條件來限制脈衝持續時間，卻又會導致更高的熱應力、增加傳導損耗，不可不慎。

此外，封裝材料和接合技術也會影響可靠度，這也是接面技術興起之故；另開發低電感封裝和電路非常重要，專家建議利用鈍化設計及更好的封裝來保護器件。簡言之，SiC MOSFET 具有低漏電流、快速本質半導體 (Intrinsic semiconductor)、低反向恢復電荷、快速導通/關斷及低正向電壓

圖 4：模擬不同短路狀況的電流密度分佈



資料來源：<https://www.semanticscholar.org/paper/Methodology-for-enhanced-short-circuit-capability-An-Namai/bcdd0e21e8501d47d037539043873c1dcd60a041>

等優點，可降低總功耗和低壓器件電容，但業界也不是所有人都認同 SiC 的快速開關能力；有廠商主張，高頻工作能力僅限於低壓／低功率系統的低雜散電感環境才適用，高功率系統多半會要求半導體緩慢執行開關動作；對於 SiC 器件而言，又會重新引入損耗。

## SiC 功率器件帶動「隔離」& PCB 設計工具需求

在 SiC 功率開關中，MOSFET、JFET 和雙極性電晶體 (BJT) 是相互競爭的技術——前兩者由電壓控制，BJT 由電流控制；其中，SiC JFET 因雜訊更低，常用於前端訊號處理。因 JFET 電流路徑可用作控制器 IC 的啟動電源，當轉換器開始運行時，來自轉換器變壓器的輔助電源可受控，不會有更多

耗散；UnitedSiC 公司甫推出用於低功率、常開工作電壓 650 ~ 1700V 的 AC-DC 返馳式轉換器 (Flyback Converter) SiC JFET，即主打可簡化消費電子的適配器和輔助電源啟動，實現零待機功耗。看中上述優勢，亞德諾 (ADI) 與 UnitedSiC 已在 SiC 器件合作逾兩年。

近日，雙方更傳出進一步就 SiC 產品達成長期供應協議，以加強 ADI 類比電源組合。SiC 功率器件的較高  $dV/dt$  額定值也帶動「隔離」需求；市調機構 GIR 預估，全球隔離閘極驅動器未來五年將以 4.3% 的 CAGR 增長，從 2019 年的 1 億美元上升到 2024 年的 1.3 億美元。隔離可用於電源軌、訊號線 (數據)，也可兩者兼採，意在更好地控制電磁干擾 (EMI) 標準。德州儀器 (TI) 近日針

對 IGBTs 和 SiC MOSFET 推出首款具備「整合感測功能」的隔離式閘極驅動器——UCC21710-Q1、UCC21732-Q1 和 UCC21750。

利用電容隔離技術大幅延長絕緣層 (insulation barrier) 的使用壽命，能於高達 1.5 kVRMS 的工作電壓應用簡化設計並實現更高的系統可靠度，大幅節省能耗、監控高壓系統，並對過電流事件提供有效保護，以確保系統安全關機，提升汽車和工業應用的總體系統效率。最後值得注意的是，SiC 在 PFC、UPS、消費電子和電動汽車等 900V 以下低電壓產品正面對 GaN 的強悍搶市，轉攻 1200V 以上市場；而為彌補成本並最大化利潤，供應商正努力提供系統級解決方案、而非單純組件。

高性能材料亦會導致印刷電路板 (PCB) 佈局變得更加困難，「虛擬原型」的佈局後分析是管理這一挑戰的理想選擇，但前提是須具備複雜的通用電磁場解算專業。有鑑於此，是德科技 (Keysight) 新近為其 PathWave 先進設計系統 (ADS) 推出 Power Electronics Professional (PEPro) 附屬軟體，讓設計人員能可視化開關模式電源 (SMPS) 設計的效果，無需花費時間建構和測試原型。PEPro 初期先提供 ADS 部分客戶試用，量產版將於今年 7 月 1 日上市。功率器件的演進，牽動的不只是材料源頭，還有後續整個工程走向。CTA

表 2：Si MOSFET、IGBT 與 SiC 閘門驅動器比較

Power Switch	Si MOSFET	Si IGBT	SiC
Switching Frequencies	High (>20 kHz)	Low to Medium (5-20kHz)	High (>50 kHz)
Basic Protection	No	Yes – Desaturation, Miller Clamping	Yes – Current sense, Miller Clamping
Max. $V_{DD}$ (power supply)	20V	30V	30V
$V_{DD}$ Range	0-20V	10 to 20V	-5 to 25V
Operating $V_{DD}$	10-12V	12-15V	15-18V
$V_{ULO}$	8V	12V	12-15V
CMTI	50-100V/ns	<50V/ns	>100V/ns
Propagation Delay	Smaller the better (<50ns)	High(not critical)	Smaller the better (<50ns)
Rail Voltage	Up to 650V	>650V	>650V
Typical Applications	Power supplies – Server, datacom, telecom, factory automation, onboard and offboard chargers, solar u-inverters and string inverters (<3kW), 400-12V DC/DC – Auto	Motor drives (AC machines), UPS, solar central and string power inverters (>3kW), traction inverters for auto	PFC – Power supplies, solar inverters, DC/DC for EV/HEV and traction inverters for EV, motor drives, railways

資料來源：TI 官網：<http://www.ti.com/lit/wp/slyy139a/slyy139a.pdf>