

# 減碳的中堅力量： 功率半導體元件

■文：徐俊毅

在綠能和智慧化的大趨勢下，人類的能源中心從化石能轉向更為清潔的電能。伴隨著數位化轉型的浪潮，全球各個行業電氣化的腳步也在加緊，電子系統得到更廣泛使用。

大大小小的電子系統都少不了功率元件（包括功率管理 IC 和功率分離元件：如功率二極體、晶閘管、MOSFET、IGBT 等元件）的身影，與被動元件一起它們為系統各個部件提供穩定可靠和乾淨的能源。有別於摩爾定律下的數位晶片，每 18 個月就有一次質變的模式，功率元件在材料、結構、製程方面的進步卻是相對緩慢，這固然有市場相對穩定的原因，但主要原因還是功率元件往往需要面對多個性能參數，這些參數的相互影響，在研發中涉及到多個學科和技術，最後還要經過市場驗證，這都拉長了功率元件的成長週期。

## 成熟可靠的 MOSFET 和 IGBT

MOSFET 和 IGBT 是目前最為熟知的功率元件，二者先後誕生於 20 世紀 70 年代和 80 年代，是

人們在使用中逐步成熟起來、使用範圍最廣的功率元件。二者用途可以根據，不同的耐壓和耐流性能進行劃分，簡單說就是 MOSFET 適合大電流相對低壓應用，而 IGBT 則是具有很強的耐壓能力，適合高壓和超高壓高功率應用場景。

**MOSFET：**金屬氧化物半導體場效應電晶體 (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)，誕生於 20 世紀 70 年代，用於將輸入電壓的變化轉化為輸出電流的變化，起到開關或放大等作用。可以承受相當大的電流，如 KA 級別，廣泛應用於開關電源 (PC、移動設備)，鎮流器，高頻感應加熱；高頻逆變焊機；通信電源等等高頻電源領域。從 MOSFET 誕生開始，設計人員就在不斷在材料、結構和製造製程方面進行優化調整，從 1970 年代的平面型到 1980 年代的溝槽型，以及到 1990 年代的超結構型，每 10 年會有一次較大進步。

**IGBT：**絕緣柵雙極型電晶體 (Insulated Gate Bipolar Transistor) 是由雙極型三極管 (BJT) 和 MOSFET 組成的複合全控型電壓驅動式半導體功率元件，誕生於

20 世紀 80 年代，具有輸入阻抗高，電壓控制功耗低，控制電路簡單，耐高壓，承受電流大等特性，兼有 MOSFET 的高輸入阻抗和雙極型三極管 (BJT) 的低導通壓降兩方面的優點，IGBT 驅動功率小而飽和壓降低，非常適合應用於直流電壓為 600V 及以上的變流系統，如交流電機、變頻器、開關電源、照明電路、牽引傳動等。

雖然 IGBT 兼具了 MOSFET 和 BJT 的很多優點，但是相較於 MOSFET，IGBT 的開關頻率卻受限於結構而遠低於 MOSFET，MOSFET 可以輕鬆實現 MHz 級別的開關頻率，而傳統 IGBT 元件具有 10KHz 的開關頻率就已經是非常頂級的產品，二者相差了 1 到 2 個數量級。而高開關頻率的功率元件可以減小電感、電容和變壓器體積，開關頻率提高 10 倍，電感量和電容量就可以選小 10 倍的元件，變壓器體積也可以縮減一半以上，大大縮減電源系統成本，同時提升電源轉換效率。

因此，對設計人員來說，沒有萬全的方案來解決選擇傳統 IGBT 還是傳統 MOSFET 的問題，而是需要全面考慮使用情況，對一

些參數進行取舍，找到合適的功率元件。

## 超越 IGBT 和 MOSFET 的元件 – 寬能隙半導體

既然 IGBT 和 MOSFET 各有優劣，那麼對功率元件的設計人員來說，在 MOSFET 和 IGBT 之外尋找更好的方案就是必然的使命，新的寬頻帶隙 (WBG) 材料碳化矽 (SiC) 和氮化鎵 (GaN) 開始進入設計人員的視野，使用這些材料的元件被業界通稱為第三代半導體元件。

圖：Si、SiC 和 GaN



圖片來源：Infineon.com

SiC 和 GaN 之功率元件所以被稱為第三代半導體元件是因為前面還有一個第二代半導體 – GaAs，但是出於製造成本、性能表現、製造製程以及環保因素 (As：砷有劇毒)，但 GaAs 材料並未被放棄，在雷射器通信，航太以及國防軍用用途中有較好表現。

寬能隙功率半導體的發展路徑大致也是沿著 Si 功率元件的發展路徑，在材料、製造製程、器件結構上不斷改進，向更高功率和開關頻率的應用場景發起挑戰。以商品化的 SiC 元件為例，四大 SiC

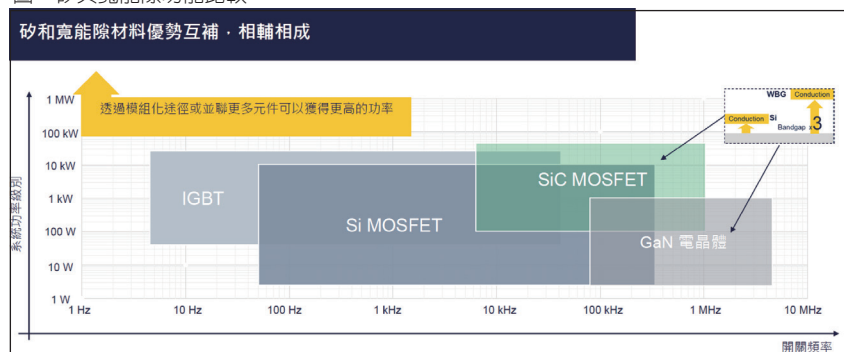
元件供應商，Cree、Infineon、ROHM、ST 從最早的平面柵結構進入溝槽、深溝槽、雙溝槽結構，進入第四代 SiC 元件階段，這幾乎複製了 Si MOSFET 的發展路徑。其中 ROHM 在 2020 年率先發佈了收個雙溝槽結構 SiC MOSFET 產品，其他幾家的產品也已經陸續出現在 Roadmap 中。

GaN 和 SiC 材料與傳統的矽基功率半導體材料相比有明顯的優勢。首先，氮化鎵半導體目前的目標電壓範圍為 80V 至 650V，在最高開關頻率下提供中等功率。氮化

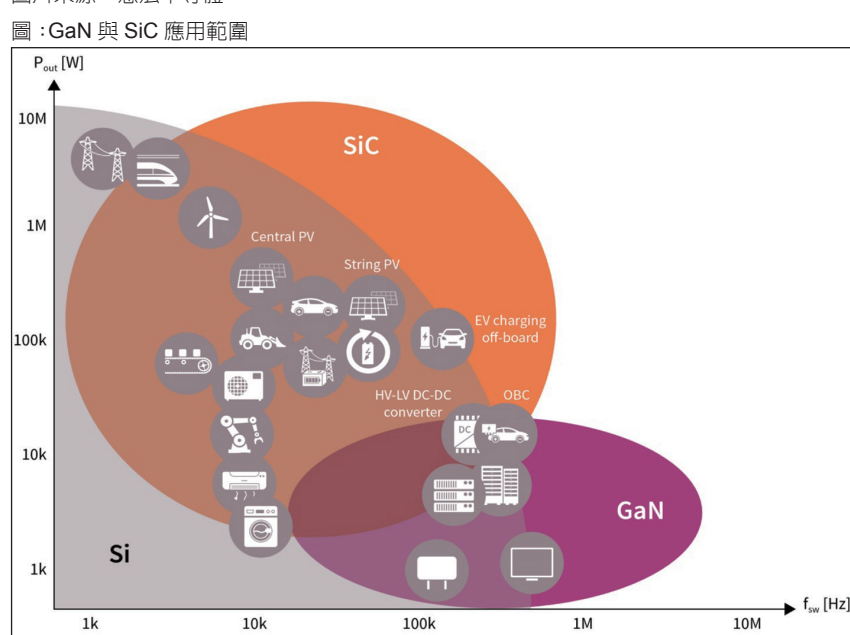
鎵和碳化矽半導體在最大功率密度下具有非常高的效率，同時開關損耗都比矽基半導體低。

在相同規格的典型功率元件比較中：傳統 Si MOSFET 元件的導通損耗是 SiC MOSFET 的 8.6 倍，是 GaN FET 的 86 倍！開關頻率方面，SiC MOSFET 可以達到 Si MOSFET 的 3~5 倍，而 GaN FET 可以提升 10 倍之多。臨界電場強度方面，SiC，GaN 同樣 10 倍於 Si 基功率元件，在高電場情況下，SiC 和 GaN 可以很好的保持電子遷移。

圖：矽與寬能隙功能比較



圖：GaN 與 SiC 應用範圍



圖片來源：Infineon

而 GaN 與 SiC 功率電子元件差異在於，與氮化鎵相比，碳化矽功率半導體具有卓越的柵極氧化物可靠性、出色的易用性，而且非常堅固，採用是垂直電晶體概念，而氮化鎵採用的則是橫向電晶體概念。

氮化鎵和碳化矽為應用解決方案領域帶來了不同的優勢。例如，碳化矽在高溫高壓應用中表現優異，如大功率串式逆變器。就高溫能力而言，較低的溫度係數和高阻斷電壓能力最能滿足應用需求。

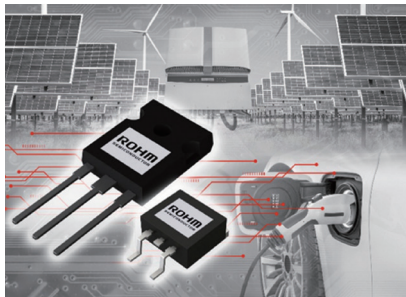
在終極功率密度方面，氮化鎵更勝一籌。這在結構體積非常有限的應用中尤其如此，例如資料中心的開關電源，因為在特定的空間內，功率水準會增加。這種情況下，效率和高開關頻率的結合將應用推向了其他技術難以企及的新水準。

從功率元件應用範圍示意圖中，可以非常清晰的看到，SiC 和 GaN 在高功率和開關頻率更高的應用場景超越了傳統的 SiC 產品。其中在輸電、工業、軌道交通、白色家電、新能源汽車領域，SiC 元件具有廣泛的應用前景，而 GaN 元件則是在計算中心、物聯網、消費電子和通信基站的射頻系統中可以發揮更多優勢。

## SiC 與傳統 IGBT 混合？

除 SiC MOSFET 和 GaN FET 元件，還有研究人員在想辦法將 SiC 和傳統 IGBT 結合起來，從而讓傳統 IGBT 揚長避短。ROHM

圖：ROHM Hybrid IGBT RGWxx65C 系列



圖片來源：ROHM

就進行了嘗試，在 2021 年 7 月推出的內建 SiC 蕭特基二極體的 IGBT(Hybrid IGBT)「RGWxx65C 系列」，ROHM 宣佈新產品成功降低了傳統 IGBT 產品導通時導通損耗。這一系列產品使用在車電充電器時，與傳統 IGBT 產品相比，損耗可降低 67%，與 SJ-MOSFET 相比，損耗可降低 24%，有助於更高的 CP 值進一步降低車電和工控裝置應用的功耗。

也有不同的聲音，意法半導



照片人物：意法半導體汽車和離散元件產品部 (ADG) 暨功率電晶體事業部策略行銷、創新及重點專案經理 Filippo Di Giovanni

體汽車和離散元件產品部 (ADG) 暨功率電晶體事業部策略行銷、創新及重點專案經理 Filippo Di Giovanni 認為：基本上有兩個技術導致 IGBT 與新材料碳化矽結合沒有引起業界的興趣。

Filippo Di Giovanni 認為：“第一個原因是根據定義 IGBT 沒有體漏二極體，這是一個限制性因素。另一個技術原因與 IGBT 的結構是雙極電晶體有關。雙極開關行為取決於電子空穴的複合過程，這會降低開關速度，碳化矽被採用的主要原因是開關頻率較高。而 IGBT 潛力有限。因此，我們看到的主要是學術界對這個領域感興趣，而產業界興趣索然。”

## 功率半導體需求持續擴大

在全球各國承諾降低碳排放，提升光伏、風電等清潔能源比例，最終實現碳中和這一目標的大趨勢下。電力系統、交通運輸、5G 通信基站、物聯網、資料中心、家電、照明、消費電子產品中等大量應用場景中，功率元件的推陳出新正在驅動能源轉換向更節約和高效的方向前進，展現更多商業價值。

“僅就工業領域來說，如果將電力利用效率提升 1%，就能節省 95.6 億千瓦時 (TWh) 的能源。這意味著我們節省了 15 個核電站的發電量、減排 3200 萬噸二氧化碳，或者是數千桶的石油。”意法半導體汽車和離散元件產品部 (ADG) 執行副總裁暨功率電晶體事





照片人物：意法半導體汽車和離散元件產品部 (ADG) 執行副總裁暨功率電晶體事業部總經理 Edoardo MERLI

業部總經理 Edoardo MERLI 說。

統計資料顯示，2020 年，全球功率半導體的市場規模在 430 億美元上下，其中汽車占比 35%、工業占比 27%，消費電子約占 13%。2021 年，中國功率半導體市場將達到 218.8 億美金。預計到 2024 年中國功率半導體市場將達到 248.6 億美元。新能源汽車、綠色能源以及工業應用正在推動包括中國在內的全球各地功率半導體市場快速成長。預計 2024 年全球功率半導體市場將達到 623 億美元規模。

OMIDA 的資料顯示，全球新能源車用市場的 IGBT 市場的年複合增長率接近 30%，預計到 2024 年將達 62 億美元的規模，其中中國 26 億美元，是 IGBT 市場增長的最大動力。IGBT 及模組主要應用在新能源車的逆變器中，占電控系統 50% 的成本，約占整車成本的 13%。Infineon、三菱、富士電

機、安森美、東芝、ST 等是其中主要供應商。

同時，MOSFET 在汽車應用中的年符合增長率也超過 5% 以上。

### 第三代寬能隙半導體功率元件 CAGR 達到 48%

隨著製程改進，產能擴充，良率提升第三代寬能隙半導體功率元件開始逐漸為市場接受。根據 Trendforce 的資料，SiC、GaN 功率元件的市場規模將從 2021 年的 10 億美元，成長到 2024 年 47 億美元左右，其中 SiC 元件年複合增長率接近 38%，真正進入了進入高速成長階段。

2018 年，Tesla 率先在量產車中使用了 SiC 逆變器，2020 年 BYD 也首次將 SiC 元件使用在“漢”系列車型中，Infineon 宣佈已有超過 20 家的整車廠和 Tier 1 客戶正在驗證其 SiC 產品。在工業和軌道交通中，SiC MOSFET 更輕、更省電、發熱更低的特性得到認可，日本新幹線 N700S 已經率先在牽引變流器中使用碳化矽功率元件，大幅降低整車的重量，實現更高的運載效率和降低運營成本。

由於 GaN 可提升行動裝置等消費性設備等的充電頭以及電信設備的電源供應器的功率密度，同時提升能源轉換效率並降低二氧化碳排放，亦將成為驅動 GaN 市場起飛的主要應用。根據 Yole 的市場調查報告，至 2026 年，GaN 的應用市場產值將達 10 億美元。

圖：華為超級快充 GaN 多口充電器



圖片來源：huawei.com

5G 市場、LiDAR 以及快速充電產品的普及為 GaN 打開了市場大門。

在 5G 基站的 Massive MIMO 應用中，基站收發信機上使用大數量（如 32/64/128 個）的陣列天線來實現更大的無線資料流量和連接可靠性，這種架構需要相應的射頻收發單元陣列配套，因此射頻元件的數量將大為增加，使得元件的尺寸大小很關鍵。利用 GaN 的尺寸小、效率高和功率密度大的特點

圖：通信基站廣泛使用了 GaN 射頻前端



圖片來源：Infineon

可實現高集化的解決方案，如模組化射頻前端元件。

除了基站射頻收發單元陳列中所需的射頻元件數量大為增加，基站密度和基站數量也會大為增加，因此相比 3G、4G 時代，5G 時代的射頻元件數量可能要多上百倍。在 5G 毫米波應用上，GaN 的高功率密度特性在實現相同覆蓋條件及用戶追蹤功能下，可有效減少收發通道數及整體方案的尺寸。因此 5G 基站的普及為 GaN 功率元件打開了新的市場空間。大量新建的基站設備開始使用集成了 GaN



英飛凌電源與感測系統事業部大中華區資深協理陳清源

元件的射頻前端模組。

“英飛凌的 CoolGaN 600 V e-mode HEMT，已助力台達電 DPR 3000E EnerGe 通訊電源供應系統的整流器實現領先業界的 98% 能源效率和出色的功率密度，為全球頂尖電信業者新一代 5G 電信網路提供強力後援。此外，數位化的腳步加速，使得伺服器的數量激增，連帶對於電源需求也不斷上揚。英飛凌 CoolSiC MOSFET 650V 也打入光寶科技的伺服器

電源供應器，打造符合北美 80 PLUS 計劃最高效率鈦金認證要求的產品 (80 PLUS 鈦金認證：在 50% 負載下，115V 輸入電壓需達到 94% 效率，另外在 230V 電壓下則需達到 96% 效率。) ”英飛凌電源與感測系統事業部大中華區資深協理陳清源表示

### 產能仍然面臨考驗

與其他半導體晶片一樣，功率半導體的產能短缺問題也很突出。綜合上下游的情況來看，功率器件產能短缺的情況將持續到 2023 年底。

“碳化矽的確是一種新材料，相較矽材料，確實需要比較新的製程，需要更高的溫度，以及其他加工條件。在產出率和製程方面，碳化矽仍然落後於矽。因此，為了提升品質和產量並降低成本，有很多技術都在開發中。未來，成本和品質可能會大幅改善。我們確實認為，如果企業現在能夠負擔得起，有廠模式確實是一筆巨大的資產，一個很大的優勢，因為這種模式能讓企業控制主要生產參數，即成本、品質和非常重要的產量。”意法半導體 Edoardo MERLI 說。

### 新的挑戰者 ----- 氧化鎵

在寬能隙半導體的名單中，並非只有 SiC 和 GaN 兩種材料，比它們具有更寬禁帶的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 早已進入實驗室，為研究人員製造更高性能的功率半導體元件進行準

備。

雖然氧化鎵的導熱性能較差，但其帶隙 (約 4.8 eV) 超過 SiC (約 3.4 eV)，GaN (約 3.3 eV) 和 Si (1.1 eV) 的帶隙，這意味著這種材料在作為功率元件時，在散熱、耐溫性能上將有突出表現。

2012 年日本資訊通信研究機構 (NICT) 等研究小組使用 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 試製了 “MESFET” (metal-semiconductor field effect transistor，金屬半導體場效應電晶體)，試製品顯示出了耐壓高、漏電流小的特性。布法羅大學 (UB) 工程與應用科學學院電氣工程副教授 Uttam Singiseti 博士和他的學生製造了一個厚度為 5 微米、由氧化鎵製成的 MOSFET。按照這位教授的說法，氧化鎵材料可以在改善電動汽車、太陽能和其他形式的可再生能源方面發揮關鍵作用，能開闢現有半導體無法實現的新可能性。

目前確認的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的結晶形態確認有  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\epsilon$  五種，其中， $\beta$  結構最穩定，也是目前研究階段重點關注的領域。距離最終的商品化功率元件，氧化鎵仍然有很多問題需要克服，但是快速成長的第三代寬隙半導體市場可能為其注入更多動力，我們也期待功率元件市場能夠迎來更強大的新生力量，為綠色地球盡一分力量。CTA