

適用於運輸領域的 SiC： 設計入門

在這篇文章中，作者分析了運輸輔助動力裝置 (APU) 的需求，並闡述了 SiC MOSFET、二極體及柵極驅動器的理想靜態和動態特性。

■作者：Tomas Krecek
Nitesh Satheesh / Microchip

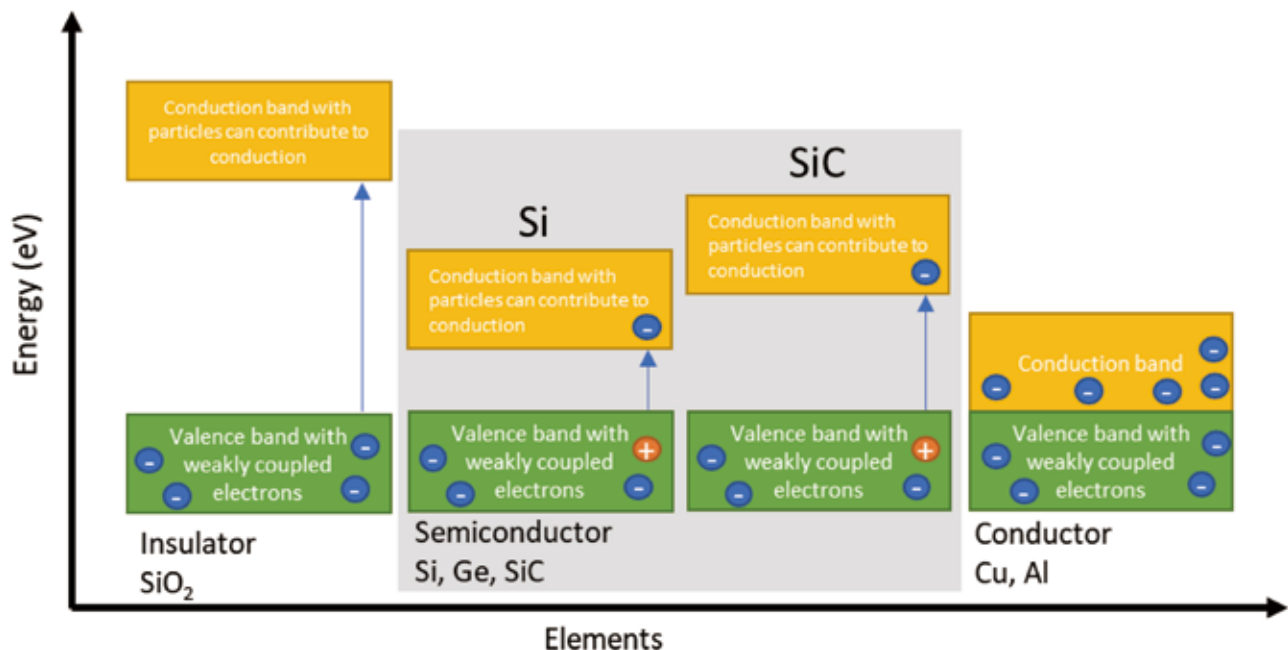
為什麼使用寬頻隙 (WBG) 材料？

對於任何電源電子工程師來說，必須大致瞭解適用於功率半導體開關元件的半導體物理學原理，以便掌握非理想元件的電氣現象及其對目標應用的影響。理想開關在關斷時的電阻無窮大，導通時的電阻為零，並且可在這兩種狀態之間瞬間切換。從定量角度來看，由於基於 MOSFET 的功率元件是單極性元件，因此與這一定義最為接近。功率 MOSFET 結構中的導通狀態電流通過單極傳輸，這意味著 N 溝道元件中只有電子。由於沒有少數載流

子注入，因此在柵極偏壓降低到一定的閾值電壓以下後，電流會立即斷開。

另一方面，雙極性元件可利用雙極性 (電洞 electron-hole) 調製，將電洞注入基極，進而顯著提高導通能力。這些“額外”注入的載流子必須在元件從導通狀態切換到關斷狀態時消除。這可透過以下兩種方法實現：一是透過柵極驅動電流消除電荷，二是透過電洞重組過程。雙極性元件的這種固有特點會造成顯著的功率損失，因而降低開關效能。因此，單極性元件更符合我們前文所述的三個理想條

圖 1：價帶和導帶之間較寬的能量帶隙可使 SiC 在關斷狀態下成為較好的隔離器，並且能減少 MOSFET 的厚度



件之一，即理想的開關可以在導通 / 關斷狀態之間瞬間切換。

如何改善另外兩個理想條件？

半導體元件內的電流必須流經一個稱為漂移區的區域 (見圖 2)。此區域的作用是完全阻斷關斷狀態下的額定電壓。阻斷電壓越高，需要的溝道長度越長，進而導致電阻越大。這表明我們的理想功率開關效能會隨著標稱電壓的升高而變差。

考慮到矽材料的特性，高於 200V 的標稱電壓會因溝道過長而頗具挑戰性 (使元件在電氣效能上和經濟效益上都失去優勢)。在這種情況下，IGBT 等雙極性元件的優勢較大 (實現了開關權衡)，寬頻隙半導體也是一種可以儘量減少不利影響的替代性技術解決方案。圖 1 重點介紹了寬價帶的優勢 (粒子不能佔據這個帶區)。“寬頻隙”材料的主要優點在於，在阻斷模式下可成為較好的隔離器 (更接近左側的隔離器)，在導通模式下可成為極其出色的導體 (Si 和 SiC 的載流子流動性都很高)。

圖 2: 漂移區更窄是 SiC 的 WBG 特性的主要影響，這是導致總 $R_{ds(on)}$ 增大的最大因素。

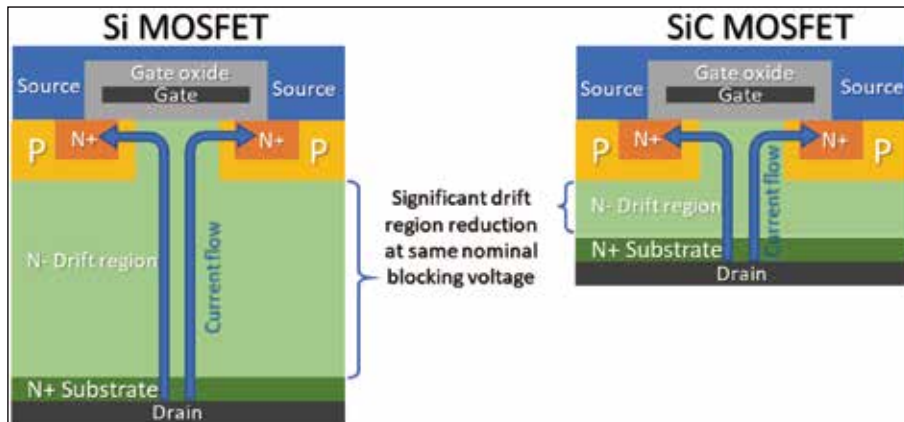
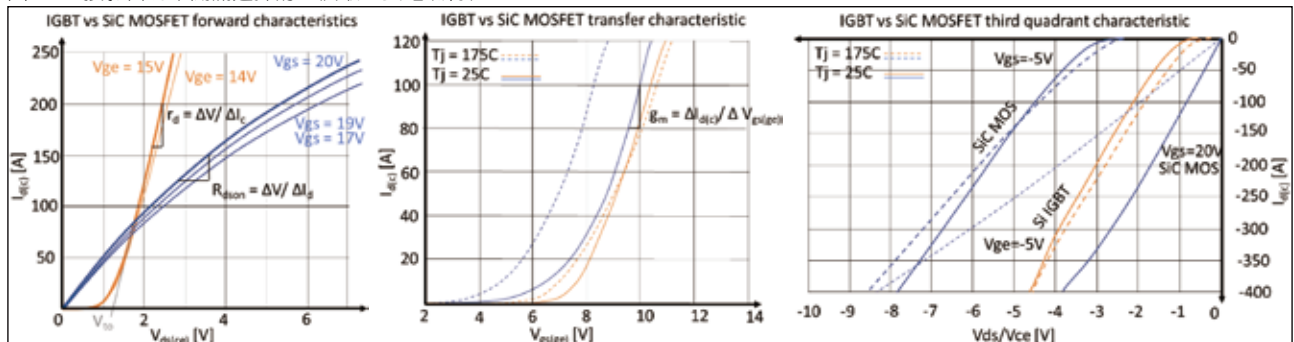


圖 3: 直接影響功率開關選擇的三個最重要電氣特性



目標應用中存在哪些寬頻隙優勢？

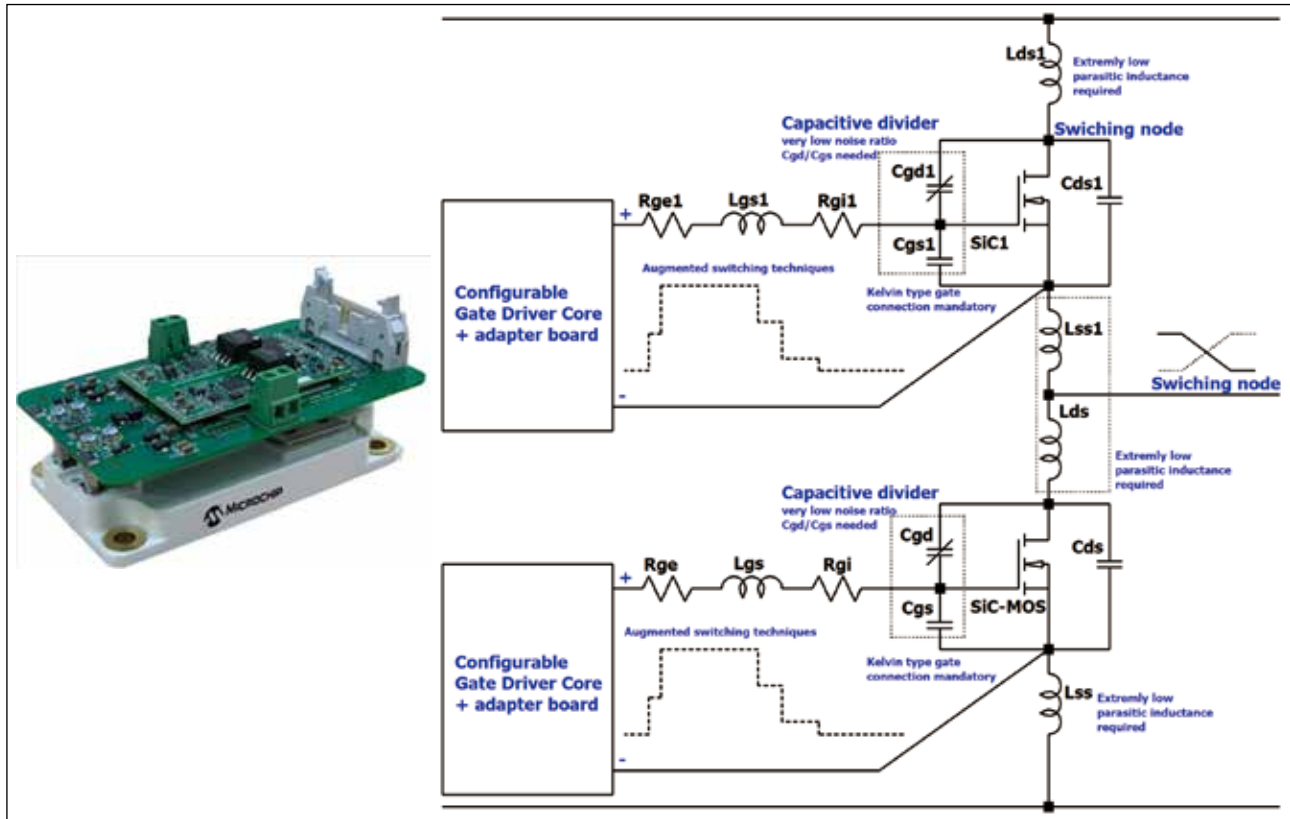
我們已經解釋過，WBG 半導體支援採用固有快速 MOSFET 結構，適合非常高的阻斷電壓。對於諧振模式下的直流 - 直流轉換器，這一點尤為實用。輸出特性圖 (圖 3a) 給出了有關這類元件導通效能的更多資訊。Si-IGBT 用作比較的參照物；我們可以看到，在某些交叉點上，當接近兩種元件的標稱電流時，SiC-MOSFET 的固有效能更好 (壓降更低)。這最終產生了一條平坦的效率曲線，並且有利於任何主要在略高於標稱功率的輕載條件下工作的轉換器。

如圖 3c 中所示，SiC-MOSFET 結構的第三象限 (有時稱為整流象限) 工作模式有一個非常有趣的特點。在這種模式下，SiC-MOSFET 可以用作二極體。或者，如果我們導通溝道，則會開啓元件並產生極小的導通損耗。這樣的開關可用作雙向開關，在兩個方向上的效能幾乎相同。

柵極驅動挑戰

更高的柵極電壓需求：通常，SiC 元件具有較寬的帶隙以及較高的 P 型基極層濃度水準 (見圖 2)，因此其柵極電壓閾值較高，這樣主要是為了避免擊穿。因此，要在 SiC 功率 MOSFET 中達到合理的柵極驅動電壓以完全打開溝道，會成為一種根本性的挑戰。在圖 3b 中，捕捉到了 SiC-MOS 和

圖 4: 實現可靠、高效 SiC-MOS 驅動的柵極驅動器和封裝的主要假設



Si-IGBT 的典型傳輸特性。讀者會發現，SiC-MOS 的溝道打開速度略微“緩慢”，在 20V 左右時， R_{dson} 達到最小值。鑒於此，柵極驅動器應持續提供 20V 的柵極電壓，最好是可以進行配置。

由於存在柵極電荷殘留，SiC-MOS 結構中必須具有負偏壓，同樣，最好可以進行配置以實現優化。近乎理想的功率開關和它們周圍的封裝寄生元件（見圖 4）的組合會引起過壓和振盪。關鍵在於 (a) 儘量減少所有外部直流鏈路 + 連接 + 柵極路徑和內部雜散高級功率模組的封裝元件，包括開爾文型 (Kelvin type) 柵極連接；(b) 利用優化的 SiC-MOS 技術；以及 (c) 在適用的情況下，採用先進的柵極驅動技

術，如圖 4 所示的主動柵極電壓控制 (Augmented Switching)。

總結

憑藉快速開關和高壓操作的出色組合，SiC MOSFET 成為輔助電源的理想選擇，尤其是其出色的第三象限工作模式，進一步凸顯了其優勢。隨著電動列車等新興技術的問世，SiC MOSFET 成為了更具吸引力的選擇，無論對軟開關還是硬開關均適用。借助可最大限度地減少寄生效應的高級封裝技術和數位柵極驅動技術，這些強大的元件能夠充分發揮全部優勢。CTA

下期預告

AI & 嵌入式與設計