

為什麼很難描述碳化矽功率 MOSFET 的特性

開關瞬變與寄生效應結合在一起會阻礙對重要 MOSFET 工作參數的精確測量

■作者：Littelfuse / Levi Gant，張旭甯博士



碳化矽 (SiC) 功率 MOSFET 受到很多關注，因為它們即可以快速切換，又能同時保持高阻斷電壓。但是它們出色的開關特性也存在潛在的缺點。由不理想的電路板佈局引起的寄生電感，以及碳化矽 MOSFET 的快速 dv/dt 和 di/dt 品質，可能產生電壓和電流過沖，開關損耗和系統不穩定性問題。為了避免這些困難，設計人員必須深入瞭解碳化矽 MOSFET 的開關特性。

此外，碳化矽 MOSFET 的極快開關速度在標定器件時也存在挑戰。例如，設備選擇會影響測試精度和測量精度。驅動和功率級的高靈敏度設計和集成方案也在實現最小化電壓尖峰，EMI 和開關損耗等方面發揮作用。

確保測試和測量的準確性

電路和封裝寄生效應以及碳化矽 MOSFET 的高速開關都使標定任務複雜化。快速 dv/dt 和 di/dt 放大測量誤差，電壓 / 電流諧波等。高 dv/dt 會產生大的瞬態電壓尖峰，以及可能表現為阻尼振盪的共模雜訊。高 di/dt 產生的雜訊可以與附近的磁場耦合。這些影響可能難以測量和診斷。它需要特殊的工具和測試方法才能在產品認證階段或器件失效之前發現隱藏的問題。它需要具有出色頻寬和動態範圍的工具來測定高功率切換高功率的碳化矽功率器件。

差分探頭通常用於這種類型的高壓測量。雖然它們提供內置的電流隔離，但它們的頻寬相對有限。相比之下，無源電壓探頭具有足夠的頻寬但缺乏電流隔離。此外，許多無源電壓探頭不適用於高壓。如果是這種情況，則必須在電路中設計傳統的分壓器，引入另一個電阻負載。綜合考慮，這些電壓測量的最佳選擇是無源電壓探頭，其額定電壓足以捕獲高 dv/dt 瞬態。

測量電流常用四種方法：羅氏線圈，有源電流探頭，電流互感器或同軸電流分流器。每種方法都有利有弊。例如，就將它們結合到測試電路中而言，有源電流探頭和羅氏線圈是一點都不突兀的。但是，它們通常缺少測量當前諧波效應的頻寬。

電流互感器可能具有足夠的頻寬來捕獲諧波頻率。但它需要電流通過其過孔 – 有時是一個嚴格的瓶頸 – 並且不能進行直流測量，這是與羅氏線圈都擁有的缺點。

電流分流器也需要電路中的瓶頸，並且不像其他三個選項那樣電流隔離。但這通常是表徵過程中測量電流的最佳方法，因為它捕獲了從直流到兆赫的所有頻率。然而，應該注意的是，電流分流器的功耗很低。因此，它只適用於脈衝測試中的測量，而不適用於連續作業系統。

優化電源回路佈局

大多數電源電路實際上包含兩個主電路：柵極驅動環路和電源環路。在電源回路中，高電平電壓

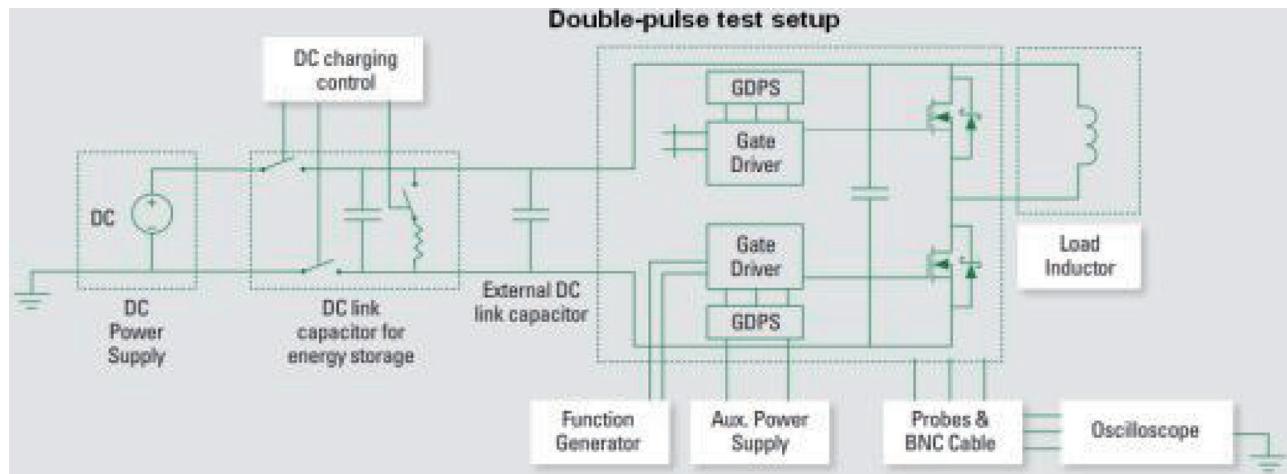
和電流以極快的邊沿速率切換。這種現象導致電壓和電流過衝和諧波。過衝和振鈴的程度與功率回路中的寄生電感和電容量有關。

一個主要問題是關斷期間的電壓過衝。這種過衝的特徵在於 di/dt 和功率回路電感的乘積。高 di/dt 有時是不可避免的，因此設計人員必須盡可能降低功率回路電感。峰值電壓過衝接近器件的最大額定電壓，使器件面臨災難性故障的最大風險。如果無法避免功率回路中過多的寄生電感，設計人員可能會被迫限制器件切換的速度或實現多級拓撲，但代價是設計複雜性和元件更多。

另一個問題是電磁干擾。在切換過程中，電流波形中劇烈的諧波可以將電源回路變成天線，廣播兆赫波段的頻率。電源回路傳播的雜訊可能會耦合到其它子電路中，可能會導致意外的設備開啓和擊穿、引起附近的週邊電路故障或未能遵守強制性的電磁相容性法規。

優化電源回路佈局的第一個原則應該是保持電路板緊湊和簡單，最大限度地減少整個電源回路面積。理想情況是只包含一個空間點的一個迴圈，即根本沒有跡線 / 連線。更現實的情況是外向路徑與返回路徑重疊的一個迴圈（在另一個 PCB 層上鏡像），這種做法稱為層壓。在無法進行層壓的環路部分（例如通孔元件的引腳）中，功率路徑應足夠寬以容納電流，但應盡可能短以保持緊湊的整體環路。

圖 1：雙脈衝測試設置。在該測試中，感應負載與上部開關位置中的續流裝置並聯。在 DUT 關斷狀態期間，這些元件構成電流的續流路徑。DUT 佔據較低的開關位置。該測試配置對於研究 DUT 的開關能量和柵極電荷特性是有用的。



使用去耦電容是優化功率環佈局的另一個好方法。高速開關產生的開關頻率 (f_s) 和瞬態相關頻率 (f_{trans}) 的高次諧波可以很好地延伸到兆赫範圍內。通常，直流回路電容充當陷波濾波器，消除對應於 f_s 的振盪及其可觀振幅的諧波；但是，它不會抑制 f_{trans} 頻率，它可以耦合到相鄰的走線和電路中。要抑制與 f_{trans} 相關的峰值，請在直流鏈路上連接相對較高法拉的薄膜電容，並盡可能靠近功率電晶體，以儘量減少相關的環路電感。

柵極驅動器設計

柵極驅動有兩個主要目的：以穩定，良好控制的方式打開和關閉電源開關，並在必要時保護功率級。然而，如果沒有適當的設計佈局以及柵極驅動器與功率級的集成，這些任務可能是困難的。常見問題包括不必要的開關損耗，柵極電壓過衝和諧波，以及來自電源回路的 EMI，這會使控制電路出現故障。

即使是一般水準的共源電感 (LCSI) 也能抵抗電流的快速變化和提升開關損耗。在有高柵極和源極環路電感 (LG 和 LS) 的情況下，高 di/dt 值會導致器件柵極出現的電壓過衝。柵極電壓波形中的振盪可能導致意外導通，並因此導致潛在的災難性擊穿事件。在過高的電壓下反復錘擊器件柵極也會降低器件的可靠性和壽命。

優化柵極驅動器電路的設計和集成的最佳實踐

包括降低柵極和功率回路之間的電感耦合的影響。盡可能將這兩個回路置於正交平面中。接下來，就像優化功率回路一樣，通過層疊和縮短路徑長度來最小化總柵極回路面積。最後，為了減少共源電感，使用具有專用開爾文源的封裝（例如四引腳 TO-247 或七引腳 TO-263）來退耦柵極和功率環路。

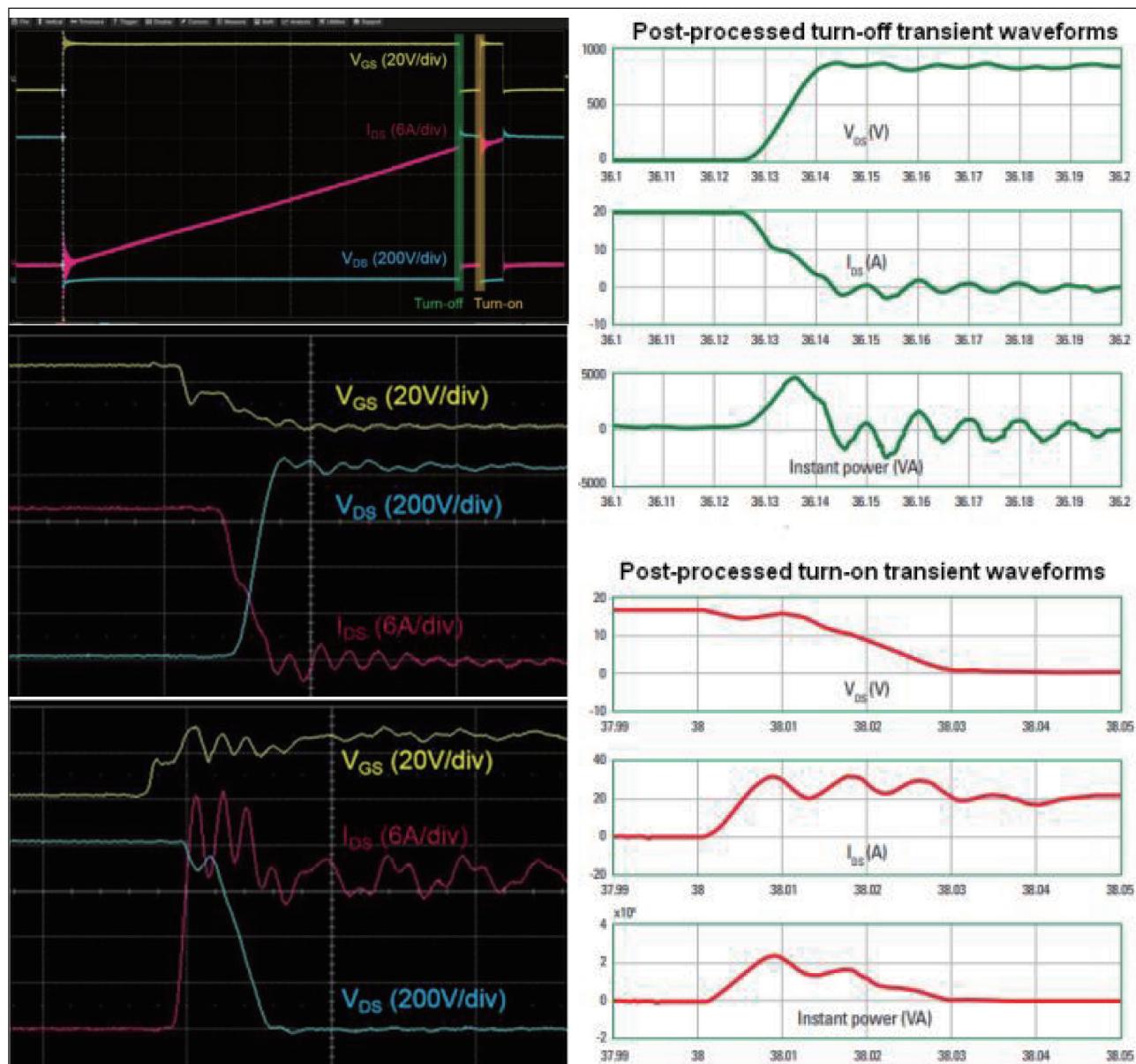
雙脈衝測試提供了一種在每個週期的基礎上準確評估碳化矽器件的開關性能的方法。此測試涉及

將設備打開兩次。

第一個導通脈衝的寬度和電感值以及匯流排電壓一起決定了關斷期間器件的電流幅度。在第一和第二導通脈衝之間的時間段內，存儲在電感器中的能量通過續流裝置迴圈。此操作允許器件在第二個脈衝的上升沿（即導通事件）期間看到相同的一組指令引數。

在雙脈衝測試中，感應負載與上部開關位置中

圖 2：使用 800-Vdc 汇流排電壓和 20 A 的器件電流執行雙脈衝測試的結果。上圖，從雙脈衝測試 (10 μ sec/div) 捕獲的波形。中圖，上面波形中對應於關斷瞬態波形的放大部分 (50 納秒 / 格)。下圖，頂部波形中對應於導通瞬態波形的放大部分 (50 nsec / div)。這些事件用於表徵 MOSFET 在開關能量，開關速度，上升和下降時間，電壓過沖等方面的開關特性。



的續流裝置並聯放置。這些元件構成了 DUT 關斷期間電流的自由旋轉路徑。DUT 佔據較低的開關位置。該測試配置對於研究 DUT 的開關能量和柵極電荷品質很有用。感興趣的波形是柵極 - 源極電壓 (VGS)，漏極 - 源極電壓 (VDS) 和漏極電流 (ID)。

在此測試中，電壓控制繼電器斷開直流電源(正極和負極導軌)與測試裝置的連接。直流鏈路電容的大小使其能夠在與直流電源斷開後可在整個測試過程中保持所需的匯流排電壓。這可通過最小化由接地回路引起的瞬態事件期間諧波的風險來改善測量條件。如果系統無法容納足夠大的直流鏈路電容器以便從直流電源處斷開，那麼直流鏈路電容必須足夠大以便在器件切換期間保持直流電壓。

碳化矽 MOSFET 的高開關速度意味著在一定的測試條件下， dv/dt 和 di/dt 分別可以超過 80V/ 納秒和 5A/ 納秒。由於這些器件在幾十納秒內開關，因此測量探頭必須具有足夠的頻寬，良好的動態性能和較小的負載電容。

Matlab 是用於確定器件切換品質的數值的有用工具。導入原始資料後，必須正確地去除 VDS 和 ID 的扭曲。附近的圖形給出了為導通和關斷瞬態電壓 (VDS)，電流 (ID) 和暫態功率生成的曲線示例。可以從這些波形匯出開關能量計算和 DUT 的開關行為。波形表明，在關斷事件期間，發生 ~70V 的過沖， $dv/dt = 68.72V/\text{納秒}$ ， $di/dt = 1A/\text{納秒}$ ，關斷損耗約為 60μJ。在導通事件期間，發生 ~10-A 過沖， $dv/dt = 39.47 V/\text{納秒}$ ， $di/dt = 5.2 A/\text{納秒}$ ，導通損耗約為 270μJ。注意，通過暫態功率的積分獲得開關損耗值。

事實證明，雙脈衝技術可用於表徵碳化矽 MOSFET 開關損耗，以及其它典型動態參數，如開關時間，柵極電荷和反向恢復等。

達梭系統與 Eviation Aircraft 攜手完成首架零排放電動通勤飛機原型設計

達梭系統 (Dassault Systèmes) 宣佈業界領先的以色列電動飛機製造商 Eviation Aircraft 採用達梭系統雲端 3DEXPERIENCE 平台，在兩年內開發出首架零排放全電動區域航線通勤飛機「愛麗絲 (Alice)」。

在打造並商業化全新種類的永續空中交通系統競賽中，Eviation Aircraft 透過部署基於達梭系統 3DEXPERIENCE 平台的「Reinvent the Sky」產業解決方案，加速原型機的開發工作。這個具擴展性的雲端解決方案不僅在 3D、複合設計以及流體模擬等方面，為企業提供全方位的支援，改善協作，同時亦在統一的標準環境中提供完整的資料安全性。

Eviation Aircraft 執行長 Omer Bar Yohay 表示：「飛機電氣化不是『是否』的問題，而是『時間』的問題。我們的目標是讓所有人都能享受乾淨的航空旅行，因此需要製造出讓人們信任的飛機，不僅能讓大家享受航空旅行，還能快速地將旅客送往目的地。正確的方法是使用能長久使用的工具，並透過在雲端運行來確保快速、安全、便捷的全球協作。我們開發商用級原型機的速度超出我們的想像，並且已在美國簽下我們的第一家客戶。」

Eviation Aircraft 發現若要將原型機轉化為每年能製造數百架的產品，需要授權其工程師，幫助他們長期在工作中持續累積知識與專業技術，以讓新一代產品更加成熟。

一旦實現商業化，愛麗絲將成為全球首架全電動區域通勤飛機，能夠在單次充電後，搭載 9 名乘客和 2 位機組人員，在 10,000 英尺高空飛行 650 英里。

達梭系統航空航天與國防產業副總裁 David Ziegler 表示：「達梭系統與不同規模的企業合作，其中包括像 Eviation Aircraft 這類真正參與航空航天復興 (Aerospace Renaissance)，希冀改變全球旅行與通勤方式的新公司。」