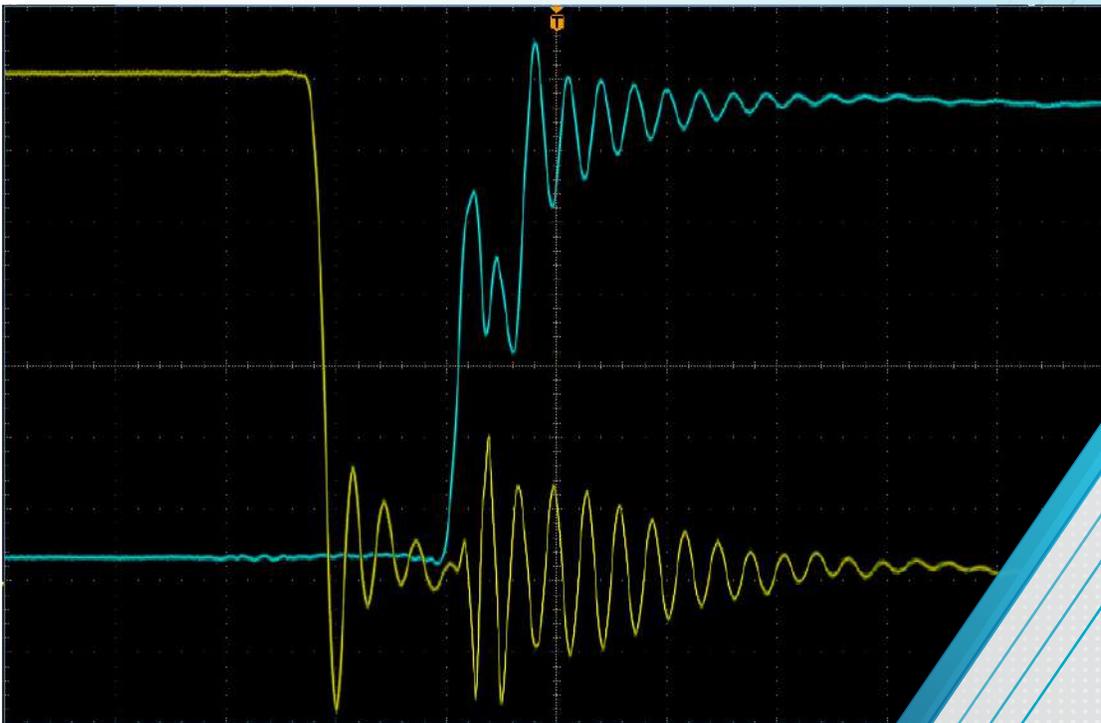


# 碳化矽 (SiC) 電力電子系統中的 有效訊號量測

應用摘要



## 介紹

經過多年的研究和設計，各種電源電子應用的設計中正在廣泛地採用碳化矽 (SiC) 電源裝置。從矽轉變為碳化矽的設定促使產品使用全新的節能設計。

與矽 IGBT 和 MOSFET 相比，SiC 具有更高的效率、更快的切換速度和更高的熱效能，進而提高了功率密度並降低了系統成本。

SiC 適用於更高功率、更高電壓的設計應用，例如電動汽車 (EV) 的馬達驅動器、EV 快速充電站、車載和車載充電器、風能和太陽能逆變器以及工業電源。

SiC 技術在電源轉換設計中的實作內容已記錄在 JEDEC 標準 JC-70.2 (定義了 SiC 電力電子轉換半導體標準和測試方法)，表示其已成為一項成熟的技術。

技術成熟的另一個標誌是 SiC FET 供應商提供的進階評估板，例如 Wolfspeed WolfPACK™ KIT-CRD-CIL12N-FMC。這些評估板使工程師能分析動態效能的特性，並量測時序、速度、切換損耗，以及針對不同應用調整開極驅動器行為。



圖 1. 採用針腳網格設計的 Wolfspeed WolfPACK FM3 電源模組範例，可實現可擴展性和靈活性。照片來源 ©Wolfspeed。經許可轉載。

接下來是電源系統設計人員在轉向 SiC 時需考慮的一些問題。

- 我的測試設備是否能夠準確量測 SiC 系統中的快速切換動態特性？
- 如何準確最佳化開極驅動效能和停滯時間？
- 共模暫態會影響量測準確度嗎？
- 我看到的振鈴是真實的狀況，還是探測響應的結果？

對於工程師而言，解決這些挑戰是一件困難的任務。對所有這些訊號的準確可見性也很重要，以便可及時做出正確的設計決策。增加設計餘裕和過度設計只會增加成本並降低效能。使用正確的量測設備可能會有所不同。

設計人員可使用 Tektronix IsoVu™ 探棒與 4、5 或 6 系列 MSO 示波器搭配使用，以及儀器上隨附的自動量測功能，來驗證 SiC 電路級效能。

為了提供所需的可見性，測試設備必須先對量測通道進行電氣隔離，然後再進入示波器。以 SiC 為基礎的電源裝置可在幾奈秒內開啟和關閉，進而需要示波器和 200 MHz 或更高的探棒頻寬，以擷取暫態的快速上升邊緣和下降邊緣。例如，使用 30 MHz Rogowski 電流感應器所得到的切換損耗量測值要比 400 MHz 電流觀察電阻器低 30%，這是因為 30 MHz 探棒無法擷取切換波形的完整特性 (參考資料 3)。高頻寬、低雜訊訊號可提供這些重要量測所需的準確度。

本文件將聚焦於 CAB011MI2FM3 高效能半橋模組。此模組具有 Wolfspeed® C3M® 碳化矽 (SiC) MOSFET，而且亦屬於靈活的 Wolfspeed WolfPACK 電源模組系列的一部分，圖 1 所示為其中之一。這些模組消除了傳統的基板，進而提高了熱效能。此外，針腳網格設計允許可擴展性和靈活性，並且在同一標準外殼中具有許多模組選配。這樣就可以開發替代的轉換器組態和拓撲，而對熱管理系統和電氣設計的更動最少。

## 硬體概述

### 確保 SiC 驗證中的量測準確性

時域量測和切換損耗計算的準確性將會受到用於收集量測的探棒的準確性、頻寬和延遲的影響。以下是常見儀器探棒的數種比較結果。儘管此討論強調示波器探棒之間的差異，但特定的實作方式 (例如佈線、寄生和耦合) 在量測準確度中也是十分重要的因素。執行時需要量測三個重要參數，這些參數可以利用 SiC 技術正確驗證電源模組：

- 閘極電壓
- 汲極電壓
- 電流

### 閘極電壓量測

量測 SiC 電源裝置的閘極電壓是極具有挑戰性的任務，因為這是一個低壓訊號 (~20 Vpp)，該訊號參考的節點相對於示波器接地可能具有較高的直流偏移和較高的  $dv/dt$ 。此外，最大的  $dv/dt$  發生在切換事件期間，這是量測閘極訊號時最關注的時間。即使在裝置的源極接地的拓撲結構中，由於快速的暫態，電路接地端和示波器接地端之間的寄生阻抗仍會引入錯誤的讀數。這就需要一個既與接地分離又具有極大共模互斥比的量測設備。此閘極電壓量測的傳統度量方法是標準差動式探棒 (圖 2)，但是更新的光電隔離探棒 (例如 IsoVu 探測系統)(圖 3) 可以使量測更加準確。

圖 4 顯示了標準差動式探棒與光學隔離探棒的高端閘極電壓的比較。在裝置的閘極通過閾值區域後，無論在關斷或開啟時，在閘極上都可以看到高頻振鈴。由於閘極和電源迴路間的耦合，因此會產生一些振鈴。但是，若使用差動式探棒，振鈴的振幅要比光隔離探棒測得的振幅大得多。這可能是由於變化的參考電壓在探棒內引起的共模電流和標準差動式探棒的偽像所致。圖 4 中的差動式探棒量測的波形似乎超過了裝置的最大閘極電壓，而光隔離探棒能提供更精確的量測，可以清楚地表明該裝置在規格範圍內。使用標準差動式探棒



圖 2. 差動電壓探棒範例，Tektronix 差動式探棒 THDP0200 及其附件。



圖 3. Tektronix IsoVu TIVP1 光電隔離探棒 (TIVPMX10X，±50 V 感應器尖端)。

進行閘極電壓量測的應用設計人員應謹慎行事，因為可能無法區分此處顯示的探測和量測系統偽像以及實際違反裝置額定值的情況。此量測偽像可能導致設計人員增加閘極電阻，以減慢切換暫態並減少振鈴。然而，這將不必要地增加 SiC 裝置中的損耗。因此，請務必要有一個能夠準確反映設備實際動態的量測系統，以便適當地設計系統並最佳化效能。

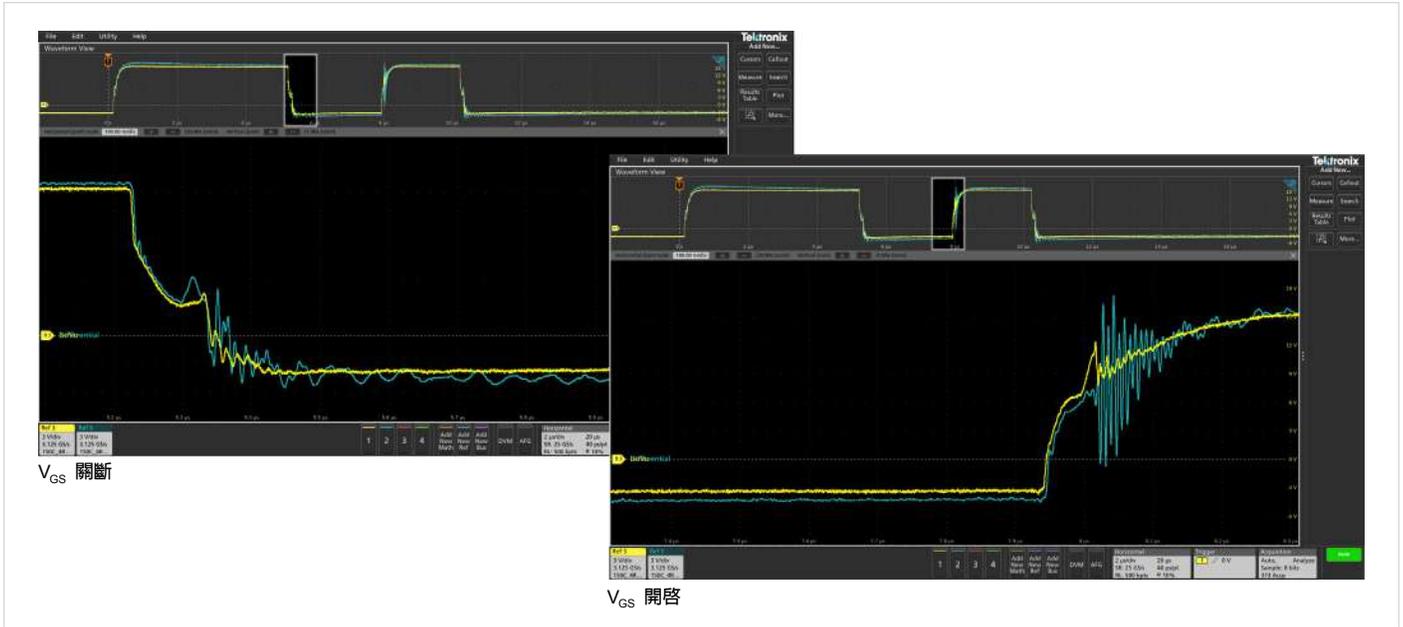


圖 4. 差動式探棒 (藍色軌跡線) 與 IsoVu 光電隔離探棒 (黃色軌跡線) 對比。

### 汲極電壓量測

電力電子系統中兩種常見的電壓量測方法是差動式探棒和接地參考探棒。差動式探棒 (如圖 2 所示) 是一種常見的選擇，因為此類探棒可以跨電路的任意節點加入而不會出現問題。相反地，如圖 5 中的接地探棒在實作中需要謹慎，因為其遮蔽針腳連接到示波器的接地。若不正確實作接地參考量測，通常會導致探棒參考上的接地電流較小，這會顯著地降低量測準確度。由於  $dv/dt$  較高，這種效應在 SiC 設計中更為明顯，因為其可能會引入寄生電流在示波器探棒接地參考中流動，進而導致量測誤差。在更嚴重的情況下 (將接地參考遮蔽連接到電源訊號)，大的電流會流過接地，進而損壞探棒或示波器。而在最壞的情況下，若儀器與接地之間的連接失敗，會導致示波器的金屬外殼浮動至匯流排電壓上，並嚴重威脅操作人員的安全。



圖 5. Tektronix TPP0850 電壓探棒。具有 50 倍衰減 (最高 100V<sub>RMS</sub>) 和 800 MHz 頻寬的單端接地參考探棒。

若同時也使用以接地為基準的電流觀察電阻器 (CVR)，接地問題將變得更加關鍵。如圖 6 所示，當結合使用接地參考探棒和 CVR 時，可以透過示波器遮蔽路徑繞過 CVR。這可能會導致整個裝置電流流經示波器，進而造成電壓探棒或示波器損壞。這亦存在嚴重的安全隱患。因此，一般會建議使用差動式探棒來量測汲極至源極的電壓。

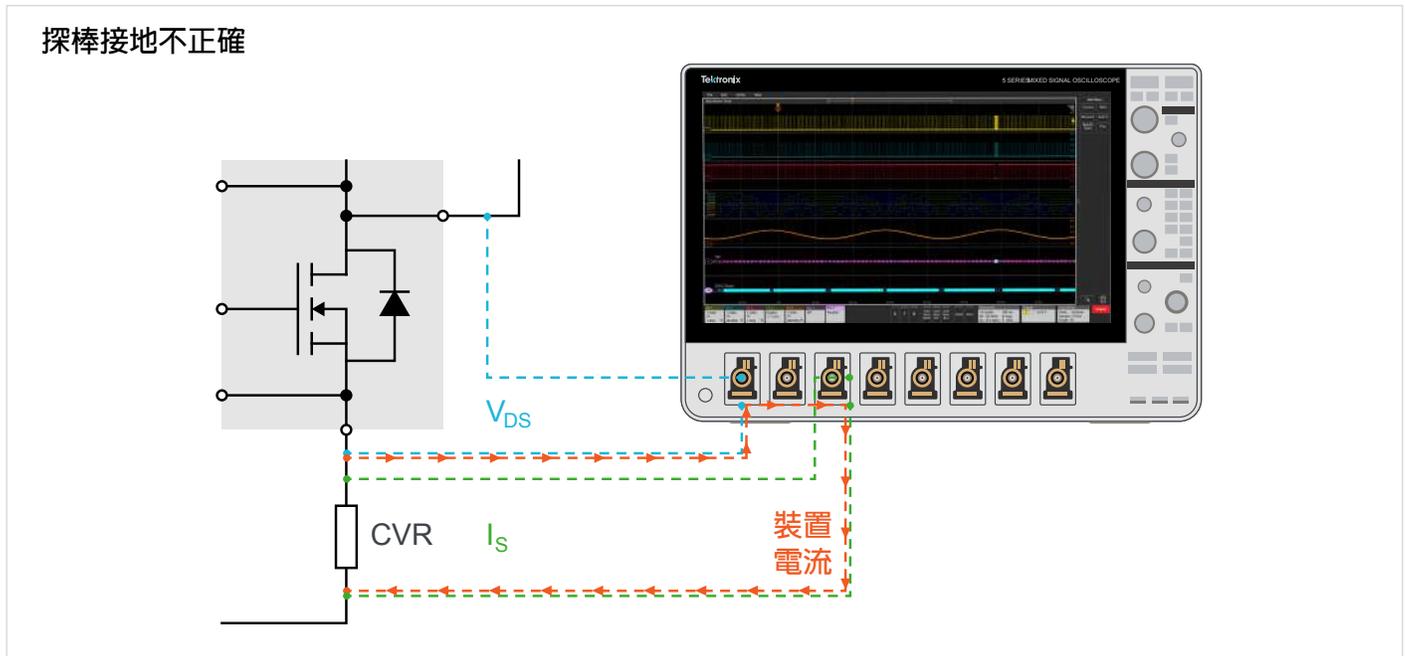


圖 6. 當兩個接地參考探棒以不同的電壓位準連接到參考時，裝置電流將繞過 CVR，並流過接地線和示波器。這將導致錯誤的量測結果，並可能損壞設備。

### 電流量測



圖 7. 探棒範例，(a) 電流觀察電阻 (T & M Research SSDN005，400 MHz)。照片來源 ©Wolfspeed。經許可轉載。(b) Rogowski 電流探棒 (TRCP0600 電流波形感應器，30 MHz)。

電力電子系統中兩種常見的電流量測方法是電流觀察電阻器 (CVR) 和 Rogowski 線圈 (圖 7a 和 b)。Rogowski 線圈是一種常見的選擇，因為可以輕鬆地加入電路，並且是一種非侵入式量測。但是，此類探棒通常具有明顯的頻寬限制，因此不適合與 SiC 搭配使用。另一方面，CVR 具有極高的頻寬，可用於進行準確的電流量測。不幸的是，若需在電晶體佈線中增加與電晶體串聯的附加元件，則需要在 PCB 佈線期間進行仔細規劃，而加入 CVR 通常會增加電路中的寄生電感。

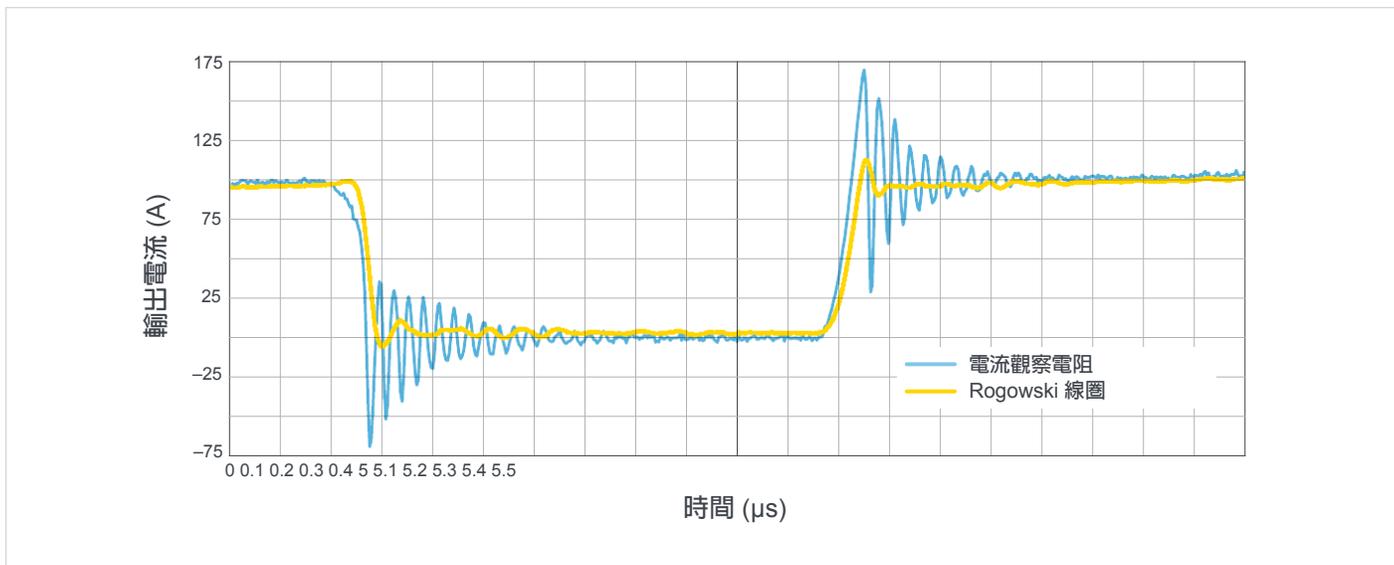


圖 8. CVR 與 Rogowski 電流探棒，CAB016M12FM3 (T<sub>J</sub> = 25°C，R<sub>G</sub> = 6.8，V<sub>os</sub> = 600 V，I<sub>s</sub> = 100 A)。

圖 8 顯示了 Rogowski 線圈和 CVR 在典型 SiC 硬切換事件下的比較。Rogowski 線圈的頻寬顯著較低，導致需人為抑制實驗波形中出現的振鈴。更重要的是，此線圈會人為抑制初始過衝並更改量測的 di/dt。

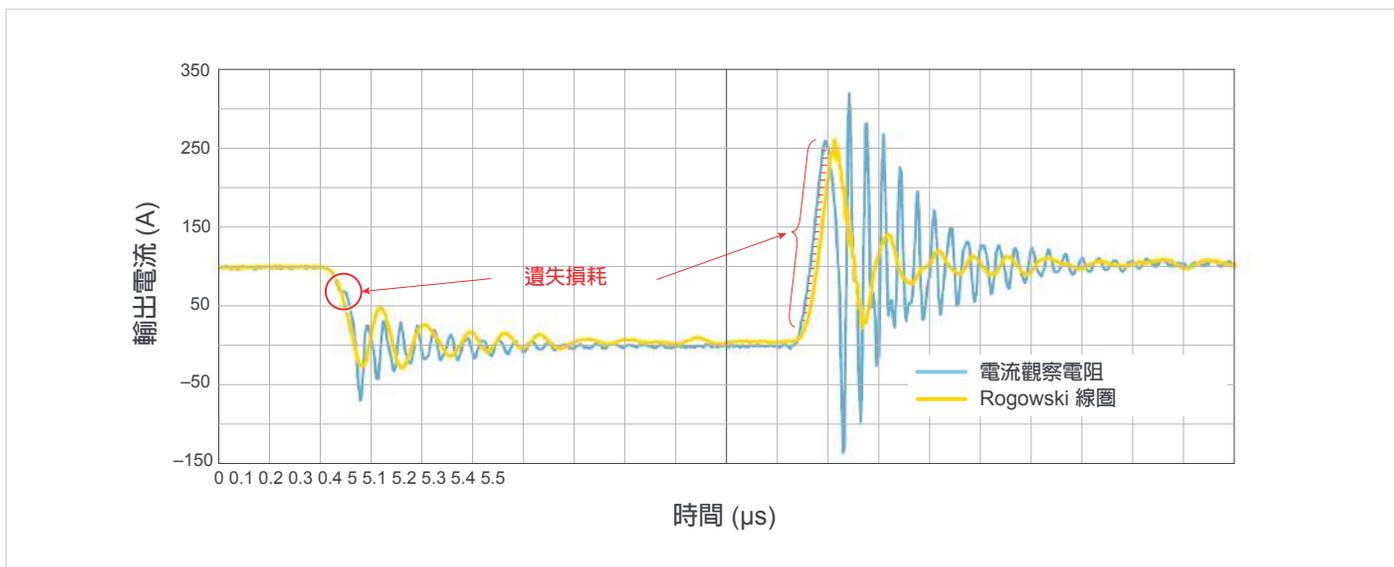


圖 9. CVR 與 Rogowski 電流探棒，CAB011M12FM3 (T<sub>J</sub> = 150°C，R<sub>G</sub> = 1Ω)，V<sub>DS</sub> = 600 V，I<sub>S</sub> = 100 A)。

圖 9 顯示了在更積極的切換條件下探棒的比較結果。在比較結果中，強調了兩個興趣點。首先，在關斷時，Rogowski 線圈無法充分擷取電流波形的形狀，缺少輕微的拐點，這會減少明顯的切換損耗。另外，導通時顯示的降低 di/dt 也將有助於降低預測的切換損耗。Rogowski 線圈縮減頻寬的累積效應是切換損耗的估計值降低。

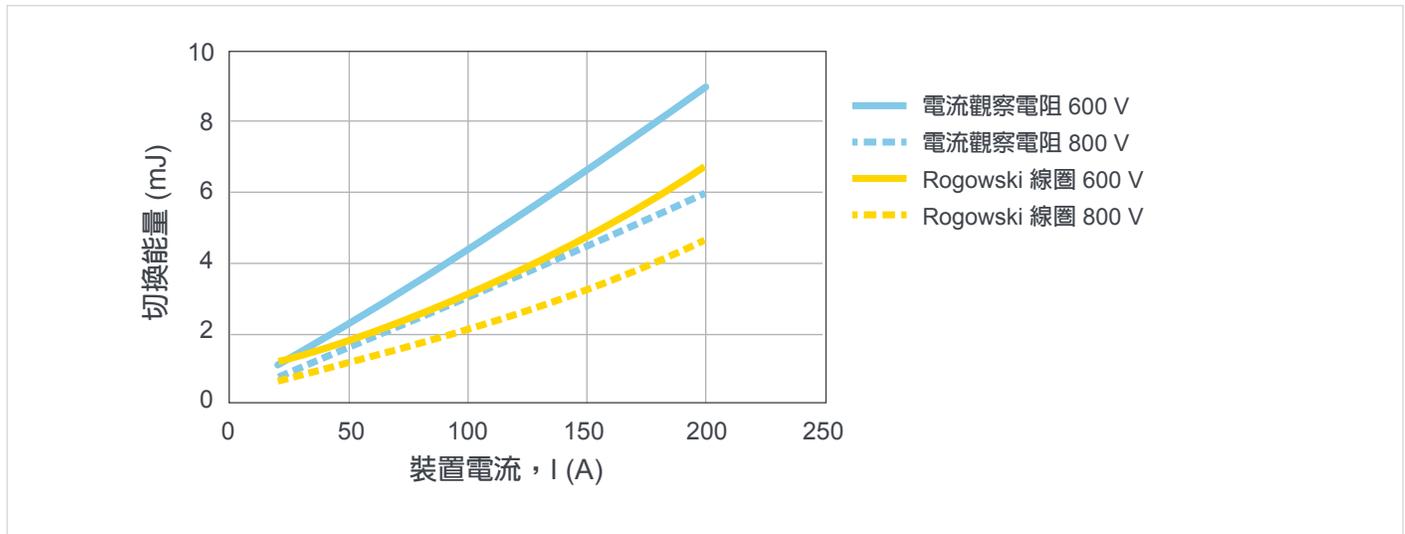


圖 10. 使用不同的探棒 (CAB011M12FM3,  $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ ,  $R_G = 1\Omega$ ) 進行切換損耗 ( $E_{off} + E_{on}$ ) 估算。

圖 10 顯示了 Wolfspeed WolfPACK™ CAB011M12FM3 在汲極電流兩端的估計切換損耗的直接比較。如上所述，Rogowski線圈始終會低估電路的切換損耗，進而對電路損耗產生過分樂觀的印象。因為差異與探棒頻寬限制有關，所以差異取決於電晶體的邊緣速率，並會隨著閘極電阻的增加而增加。對於慢速切換技術 (例如 IGBT)，度量上的差異可以忽略不計。

### 探棒偏移校正

除了使用具有足夠頻寬和雜訊抑制能力的探棒外，還必須及時對探棒進行偏斜校正，確保電壓和電流訊號具有相符的延遲。若電壓探棒和電流探棒之間的延遲不相符 (僅 1-2 ns)，會導致  $E_{on}$  和  $E_{off}$  量測誤差達到 30% 或更多。正確的偏移校正對於 SiC 系統固有的快速切換暫態至關重要。

進行偏移校正之前，請確認已根據需要對探棒進行自動歸零和校準，以消除任何偏移或縮放錯誤。

將兩個探棒連接至具有對稱連接的函數產生器，可以校正  $V_{DS}$  和  $V_{GS}$  的電壓探棒。使用函數產生器的方波輸出，並檢查訊號的上升邊緣和下降邊緣是否對齊。

有幾種方法可以使  $V_{DS}$  和  $I_D$  探棒偏移校正，以確保正確地量測切換損耗。所有方法背後的原理都是要有一個測試電路，例如圖 11 所示的夾具，該電路應盡可能接近純電阻，以使電壓和電流波形對齊。然後可以使用該測試電路對電流探棒進行偏移校正，以使其與電壓探棒的響應相符。



圖 11. 電源量測偏移校正和校準夾具 (067-1686-00)。這些連接為您提供了一種方便的方式來補償電壓和電流探棒之間的時序差異。

## 用於 SiC 電路級驗證的探棒連接技術

執行閘極量測需要仔細考慮連線能力選項，以確保從電源轉換模組擷取乾淨的訊號。鑑於這是在較高電壓下進行的不接地量測，因此連通性便非常重要。

目前有兩種主要連接方法：MMCX和方形針腳。其中MMCX提供了一種模組化、預製的裝置，而方形針腳則具有適用於不同PC板實作的連接器。以下是對這兩種方法的深入評論。

### MMCX 式感應器探棒頭纜線 (高效能高達 250 V 應用)

將MMCX 連接器插入到測試點附近時，可達到第二代IsoVu量測系統的最佳效果。圖 12 和 13 顯示了兩個不同的應用。MMCX連接器是業界標準配備，您可從許多電子元件分銷商處取得。這些連接器可提供高訊號完整性。固體金屬體和黃金觸點提供了一個遮蔽性良好的訊號路徑。配合的MMCX介面提供一個具有正向保持力的卡扣式連接，具有穩定的免持式連接。脫離力則為高電壓應用提供了安全、穩定的連接。MMCX連接器具有許多可用的配置，如下所示，可以適應許多設計，即使連接器並未設計在電路板上。如需有關將這些連接器焊接到設計中的資訊，請造訪 [tw.tek.com/isolated-measurement-systems](http://tw.tek.com/isolated-measurement-systems)。

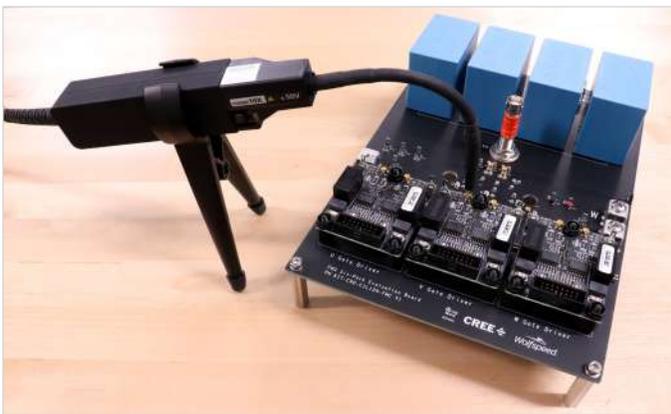


圖 12. MMCX 連接器 - 範例 1。照片來源 ©Wolfspeed。經許可轉載。



圖 13. MMCX 連接器 - 範例 2。照片來源 ©Wolfspeed。經許可轉載。

### 方形針腳轉 MMCX 轉接器

若無法使用 MMCX 連接器時，探棒頭纜線則可裝入工業標準方形針腳。Tektronix 提供探棒頭轉接器，可將感應器探棒頭纜線連接到電路板上的方形針腳。具有兩種不同間距的轉接器，MMCX 至 0.1 in (2.54 mm) 和 MMCX 至 0.062 in (1.57 mm)。

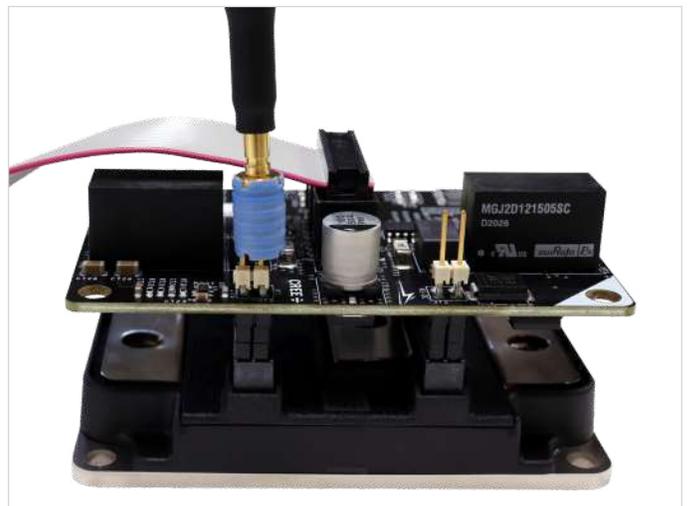


圖 14. MMCX 到方形針腳轉接器。照片來源 ©Wolfspeed。經許可轉載。

轉接器(圖 14)具有用於連接至 IsoVu 探棒頭纜線的 MMCX 插座。轉接器的另一端具有中心銷插座和圍繞轉接器外部的四個共用(遮蔽)插座。轉接器上的凹口可用於定位遮蔽插座。當探棒頭轉接器靠近電路板時，可達到最佳的電氣效能。

### 方形針腳感應器探棒頭纜線

TIVP 系列 (第二代 IsoVu) 探棒還包括方形針腳感應器探棒頭纜線，以達到更高的輸入差動式電壓能力，如圖 15 所示。這些探棒頭介面提供了連接的便利性和安全性，可在高電壓環境中進行安全的免手動操作。方形針腳感應器探棒頭纜線同時適用於 0.100" (2.54 mm) 間距 (可用於高達 600 V 的應用) 和 0.200" (5.08 mm) 間距 (可用於高達 2500 V 的應用)。



圖 15. 方形針腳感應器探棒頭纜線。照片來源 ©Wolfspeed。經許可轉載。

### 計劃外的測試點

理想情況下，使用者應提前計劃測試點並將其整合到閘極驅動器或評估板的佈線中，如 Wolfspeed KIT-CRD-CIL12N-FMC Wolfpack 評估套件中。在此情況下，MMCX 連接器將可提供最佳效能，如果感興趣的訊號在其 300 Vpk 額定電壓範圍內，即建議使用 MMCX 連接器。

當然，無法預期到所有可能的測試點。當情況需要增加計劃外的測試點時 (如圖 16 中的測試點)，請遵循以下準則以確保得到最準確的量測結果：

1. 允許電壓額定值時，請使用 MMCX 連接器。
2. 將連接器盡可能安全地靠近 IC 或元件放置。
3. 同樣，請保持所有必要的浮動引線越短越好，甚至不存在。
4. 使用非導電熱膠、聚酰亞胺膠帶或類似物對連接器以機械方式進行加固。

在以下範例中，在組裝板之後，將方形針腳接頭連接器加至  $V_{GS}$  測試點。使用非導電熱膠加固測試點以增加強度。

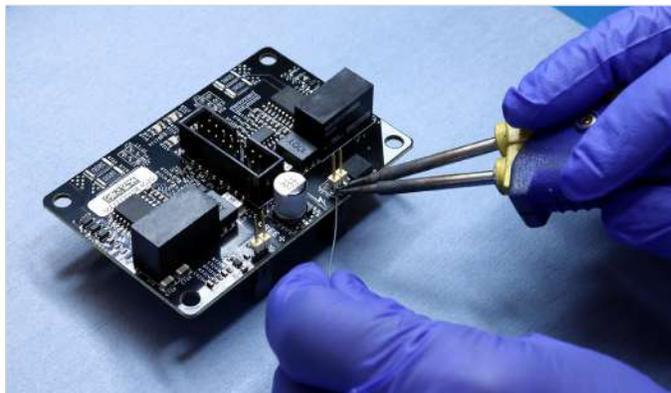


圖 16. 在  $V_{GS}$  節點之間焊接方形針腳接頭，以量測高壓閘極驅動訊號。照片來源 ©Wolfspeed。經許可轉載。

## 摘要

總而言之，寬能隙半導體技術將在未來的功率轉換和能源效率中扮演著重要的角色。SiC 開關比其矽等效產品體積更小、速度更快，而且效率更高，已廣泛用於從電動汽車到光伏電池的各種應用中。因此，使用合適的工具進行測試變得很重要，這樣設計人員才能正確地設計、開發，並整合至最終應用中。Tektronix 產品組合解決方案將能助您一臂之力。

[IsoVu™ 隔離式探測系統](#) 提供了非常適合閘極量測需求的浮動、不接地的差動探測體驗。頻寬機型的範圍從 200 MHz 到 1 GHz，如有需要，各種探棒頭可針對更高電壓訊號進行衰減。

[5 系列 MSO 示波器](#) 是高解析度 (12 位元) 示波器，非常適合在存在更高電壓的情況下測試小電壓。例如，在存在  $V_{DS}$  電壓的情況下測試  $V_{GS}$ 、 $R_{DS\_ON}$  和傳導損耗需要很高的垂直解析度。此外，示波器具有 8 個可用通道，可供您同時查看更多時序訊號以最佳化效能，並研究大量訊號之間的相關性。

[5-PWR 軟體](#) 可在實際操作條件下，在 5 系列 MSO 示波器上執行自動化、準確且可重複的電源量測，包括切換損耗、傳導損耗、 $R_{DS\_ON}$ 、磁損耗、SOA 等。

## 參考資料

1. Are You Making the Big 'Power' Switch to SiC and GaN?  
<https://www.tek.com/blog/are-you-making-big-power-switch-sic-and-gan>
2. Wolfspeed Power Applications <https://www.wolfspeed.com/power/applications>
3. CPWR-AN45: Wolfspeed WolfPACK Dynamic Performance Application Note [https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/1971/product/741/cpwr\\_an45\\_wolfspeed\\_wolfpack\\_trade\\_application\\_note.pdf](https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/1971/product/741/cpwr_an45_wolfspeed_wolfpack_trade_application_note.pdf)
4. SiC Power and GaN RF Solutions | Wolfspeed <https://www.wolfspeed.com/>
5. SiC MOSFET and GaN FET Switching Power Converter Analysis Kit <https://eepower.com/new-industry-products/sic-mosfet-and-gan-fet-switching-power-converter-analysis-kit/>

## Tektronix 聯絡方式：

東南亞國協/大洋洲 (65) 6356 3900  
奧地利\* 00800 2255 4835  
巴爾幹半島、以色列、南非及其他 ISE 國家 +41 52 675 3777  
比利時\* 00800 2255 4835  
巴西 +55 (11) 3759 7627  
加拿大 1 (800) 833 9200  
中東歐、烏克蘭及波羅的海諸國 +41 52 675 3777  
中歐與希臘 +41 52 675 3777  
丹麥 +45 80 88 1401  
芬蘭 +41 52 675 3777  
法國\* 00800 2255 4835  
德國\* 00800 2255 4835  
香港 400 820 5835  
印度 000 800 650 1835  
義大利\* 00800 2255 4835  
日本 81 (3) 67143010  
盧森堡 +41 52 675 3777  
墨西哥、中/南美洲與加樂比海諸國 52 (55) 56 04 50 90  
中東、亞洲及北非 + 41 52 675 3777  
荷蘭\* 00800 2255 4835  
挪威 800 16098  
中國 400 820 5835  
波蘭 +41 52 675 3777  
葡萄牙 80 08 12370  
南韓 001 800 8255 2835  
俄羅斯及獨立國協 +7 (495) 7484900  
南非 +27 11 206 8360  
西班牙\* 00800 2255 4835  
瑞典\* 00800 2255 4835  
瑞士\* 00800 2255 4835  
台灣 886 (2) 2656-6688  
英國與愛爾蘭\*00800 2255 4835  
美國 1 800 833 9200

\* 歐洲免付費電話，若沒接通，請撥：+41 52 675 3777

最後更新日 2013 年 6 月

若需進一步資訊，Tektronix 維護完善的一套應用指南、技術簡介和其他資源，  
並不斷擴大，幫助工程師處理尖端技術。請造訪 [www.tektronix.com.tw](http://www.tektronix.com.tw)



Copyright © Tektronix, Inc. 版權所有。Tektronix 產品受到已經簽發及正在申請的美國和國外專利的保護。本文中的資訊代替以前出版的所有資料。技術規格和價格如有變更，恕不另行通知。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc 的註冊商標。本文提到的所有其他商標均為各自公司的服務標誌、商標或註冊商標。

2020 年 5 月

48T-73812-0

Tektronix 台灣分公司

**太克科技股份有限公司**

114 台北市內湖堤頂大道二段 89 號 3 樓

電話：(02) 2656-6688 傳真：(02) 2799-8558

太克網站：[tw.tek.com](http://tw.tek.com)

**Tektronix**<sup>®</sup>