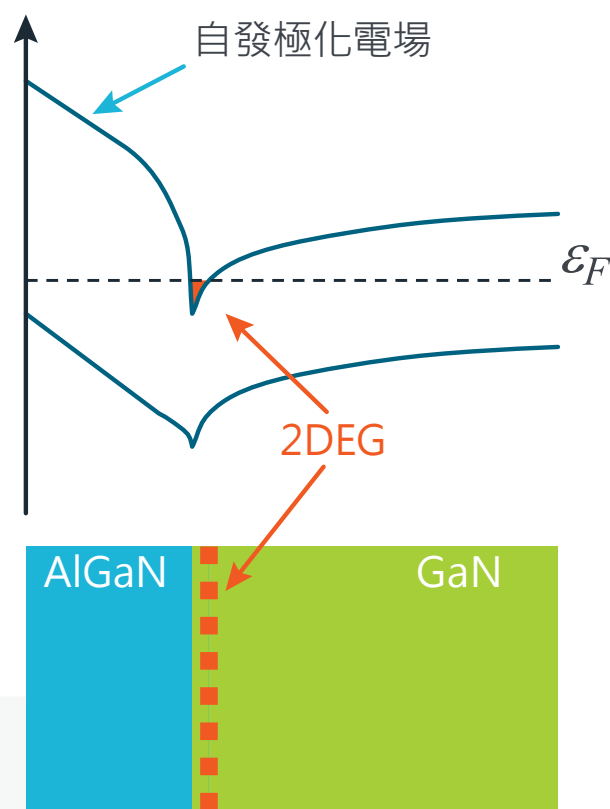




# GaN HEMT 功率裝置 直流特性分析的挑戰

## 應用摘要



## 介紹

為滿足市場上各式各樣的新要求，電力電子技術的變化日新月異。如何減少二氧化碳排放、提高效率、降低功耗以及縮小系統尺寸，這些因素一直是電力電子應用新技術的主要驅動力。寬能隙 (WBG) 半導體廣泛應用於電力電子裝置中的功率轉換。具體而言，氮化鎵 (GaN) 裝置已普遍用於高速應用，包括消費產品和高功率使用案例，因為 GaN 裝置運作速度非常快、效率高，同時還封裝在小型結構中。然而，直流 I-V 特性分析仍存在一些挑戰。本應用摘要中將提供有關直流特性分析期間 GaN HEMT 裝置振盪的詳細資訊，並提出減輕所述振盪的更佳方法。

Keithley 提供各種 High Power SourceMeter® 電源量測設備 (SMU)，用於分析功率 MOSFET 等組件的特性。2657A 高功率系統 SourceMeter 儀器能夠提供 3 kV 電流，而 2651A (另一款高功率系統 SourceMeter 儀器) 在脈衝模式操作中能夠提供 50 A 電流。8010 測試夾具可與任一 SourceMeter SMU 一起使用來固定和遮蔽您的電源裝置。ACS 和 KickStart 軟體套件提供了一種建立自動化設定並執行功率 MOSFET 裝置 I-V 特性分析測試的方法。

## GaN HEMT 結構

GaN HEMT 裝置主要具有如圖 1 所示的橫向結構。此裝置利用了 GaN 和 AlGaN 材料界面處異質結特性的優勢，在該界面處形成了 2DEG (維度電子氣體) 傳導能階的深谷，允許大量電子進入其中。這些特定的電子可以具有比其他常規狀態更高的遷移率，並且這種高遷移率有助於增加從漏極到源極的電流。這種類型的裝置結構稱為高電子遷移率電晶體 (HEMT)。此裝置的一個不便之處在於裝置通常處於導通狀態，這在大多數應用中是不希望的狀態。這種常導通的 GaN HEMT 裝置稱為耗盡型 GaN (或簡稱為 D 型 GaN)。若要關閉 GaN HEMT 裝置，需要一定程度的負閘極偏壓來停用 2DEG。如需進一步瞭解常導通狀態 GaN HEMT 裝置特性分析，請造訪 [tw.tek.com](http://tw.tek.com)，並查看《Power Sequence for GaN HEMT Characterization》(GaN HEMT 特性分析的電源序列) 應用摘要。

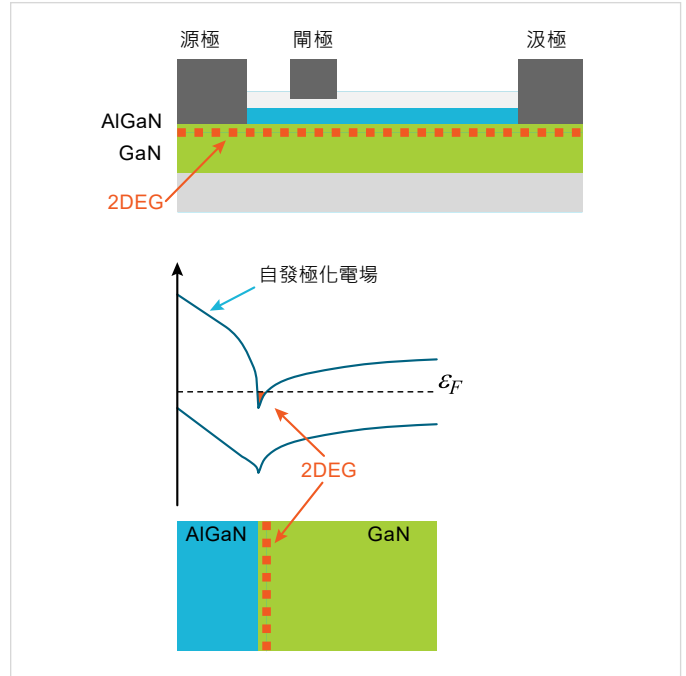


圖 1. 典型的 GaN HEMT 裝置。

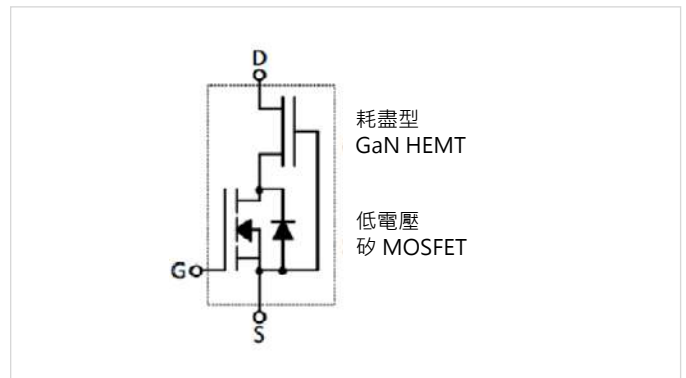


圖 2. GaN HEMT 裝置的共源共閘。

目前已引入增強型 GaN HEMT (簡稱 E 型 GaN)，透過在 AlGaN 和閘極金屬之間新增 p 型摻雜 GaN 層來啟用常關斷裝置狀態。此 p 型摻雜 GaN 層可作為正常正偏壓，以防止形成 2DEG。當存在閘極偏壓時，多數載流子會遠離 AlGaN 界面，因此可能會在閘極偏壓下形成 2DEG。圖 2 中的 Cascode 結構是為確保維持常關斷裝置狀態而引入的另一項技術。在 Cascode 中，HEMT 結構加入了常規的矽 MOSFET，以將裝置的導通狀態反轉為關斷狀態。如果矽 MOSFET 上存在閘極偏壓，可能會使裝置處於導通狀態。

## 高速 GaN HEMT 裝置

GaN HEMT 是眾所周知的支援高頻切換的裝置。作為高功率裝置使用時，由偏壓驅動的電子會引起漂移電流，導致電子在半導體材料中移動時發生一些碰撞和散射。這種散射會破壞並限制漂移電流。然而，這種載流子散射在 HEMT 的 2DEG 中會被最小化，因此電子遷移率比其他技術的遷移率高出數倍。

對於所有 MOSFET 裝置，輸入電容 ( $C_{iss}$ ) — 包括閘極和源極之間的電容 ( $C_{gs}$ ) 以及閘極和漏極之間的電容 ( $C_{gd}$ ) — 將影響閘極的切換速度，進而減慢其速度並降低其效率。為了減少其影響並提高漏極的最大輸出功率，應首先向閘極施加偏壓，進而對輸入電容快速充電。GaN 裝置受閘極電容的影響較小。與其他高功率 MOSFET 裝置相比，GaN HEMT 輸入電容通常低約十倍，進而使裝置能夠進行更快的狀態切換並減少功率損耗。

大多數高功率垂直裝置 MOSFET 都具有用於第三象限操作的內接二極體，如圖 3 所示。許多功率轉換應用都採用第三象限操作。當裝置處於關斷狀態時，內接二極體仍然可以在第三象限中產生相反的電流。當裝置透過內接二極體完全關閉時，漏極電壓會上升，漏極電壓會下降至零。問題是內接二極體需要一些時間來回復 (逆向回復時間或  $T_{rr}$ )，這會對切換速度產生負面影響，因為在第三象限操作期間積累的一些電荷會產生反向電流。圖 4 對此進行了說明。裝置需要  $T_{rr}$  從充電影響中回復 (或  $Q_{rr}$ ，逆向回復充電)。相比之下，GaN HEMT 裝置在其結構中沒有固有的內接二極體，並且  $T_{rr}$  和  $Q_{rr}$  被最小化或完全消除，進而加快了其切換速度。但請注意，由於採用常規矽 MOSFET，共源共閘型 GaN 裝置中仍然存在內接二極體。

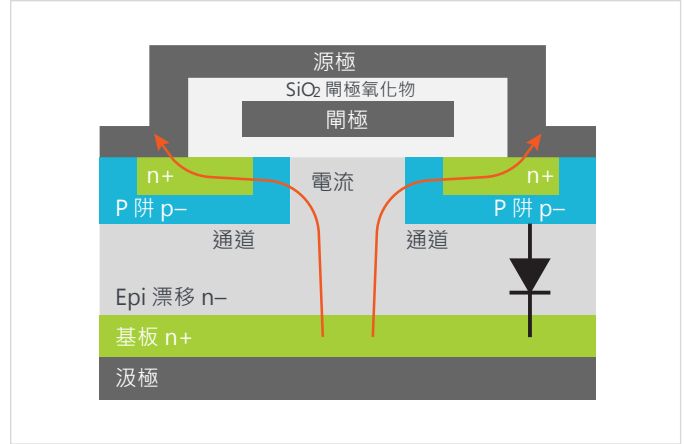


圖 3. 具有內接二極體的典型高功率 MOSFET。

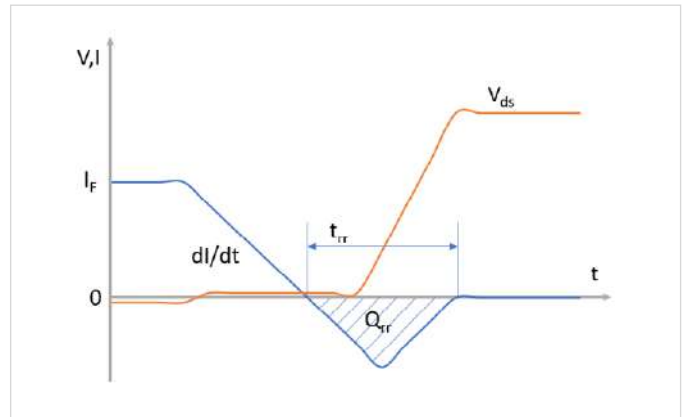


圖 4. 逆向回復時序範例。

## GaN HEMT 直流特性分析中的振盪

橫向結構限制了電流傳輸，但提高了速度優勢。此外，測試工程師和電路設計人員還須正視高速 GaN 裝置可能會為直流特性分析所帶來的另一項挑戰：振盪。本應用摘要的其餘部分僅關注直流特性分析中的振盪。當裝置處於關斷狀態且只有漏電流流過時，振盪幾乎為零。在導通狀態下可能會出現一些複雜的振盪問題。當測試儀器使用回饋控制迴路技術來產生具有一定頻寬的輸出電壓和電流時，就會出現這種情況。如果儀器頻帶無法超過高電容負載或電感負載的負載範圍，則可能會發生振盪。

如果裝置閘極的電容足夠高，則這也可能促進振盪。抑制這種情況的補救措施可能是在閘極處加入一定量的串聯電阻；此串聯電阻可能有效，但效果並不完美。GaN HEMT 裝置的電容通常會比其他類型的功率 MOSFET 裝置低十倍。振盪還可在非常高的頻率下源自 GaN HEMT 裝置的漏極終端，透過閘極終端之間的電容傳輸或耦合到閘極終端。

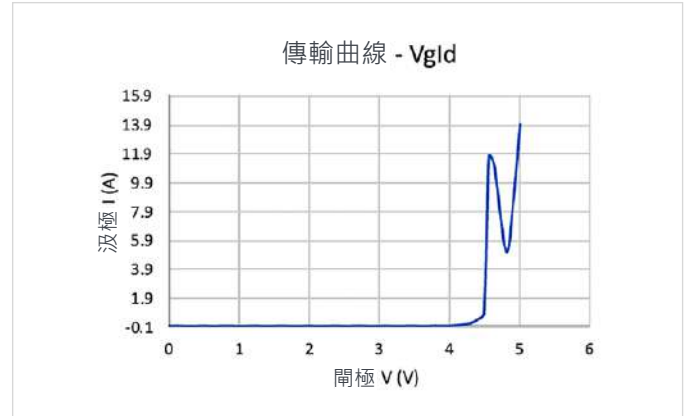


圖 5. 具有振盪的傳輸曲線 (VgId)。



圖 6. Vg-Id 測試的示波器波形 (黃色 - 漏極 I、洋紅色 - 漏極 V、藍色 - 閘極 V)。

GaN HEMT 功率裝置直流特性分析的挑戰

圖 5 顯示  $V_g-I_d$  特性分析中的振盪。在此情況下，閾值電壓區域中存在振盪，但這可能在裝置處於導通狀態時的任何時間發生。範例為共源共閘型，由於整合了矽 MOSFET (如前所述)，其閾值電壓比純 HEMT 型更高，而純 HEMT 裝置比其他裝置結構具有更低的閾值電壓。圖 6 顯示 I-V

特性分析的示波器波形，其中在漏極電流、漏極電壓和閘極電壓的訊號中觀察到振盪。圖 7 顯示了掃描量測的單個波形，而圖 8 放大了該 GaN HEMT 裝置頻率高於 3 MHz 的振盪，遠遠超出了直流儀器頻段。

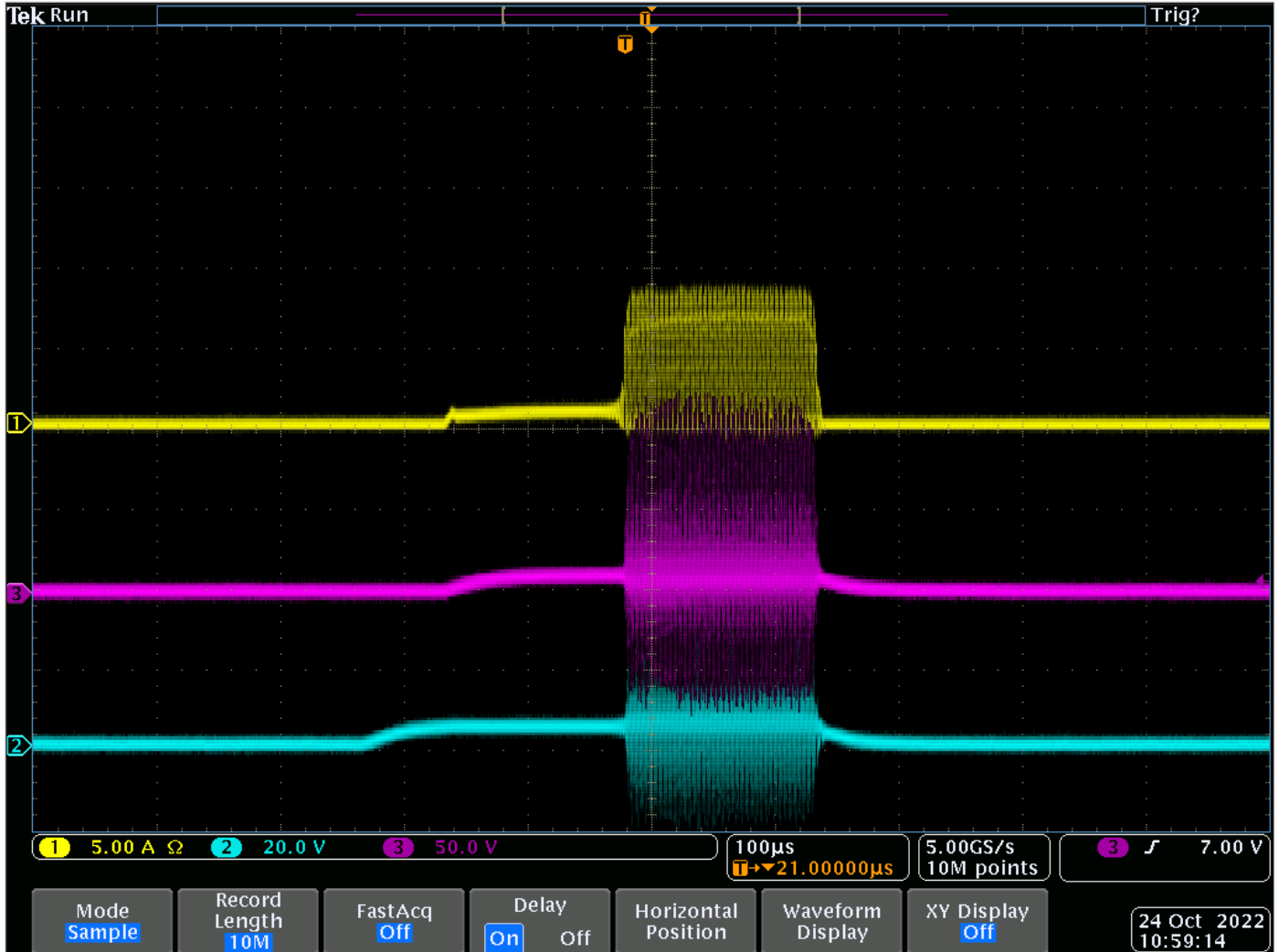


圖 7. 掃描量測的單個波形擷取 (黃色 - 漏極 I、洋紅色 - 漏極 V、藍色 - 閘極 V)。

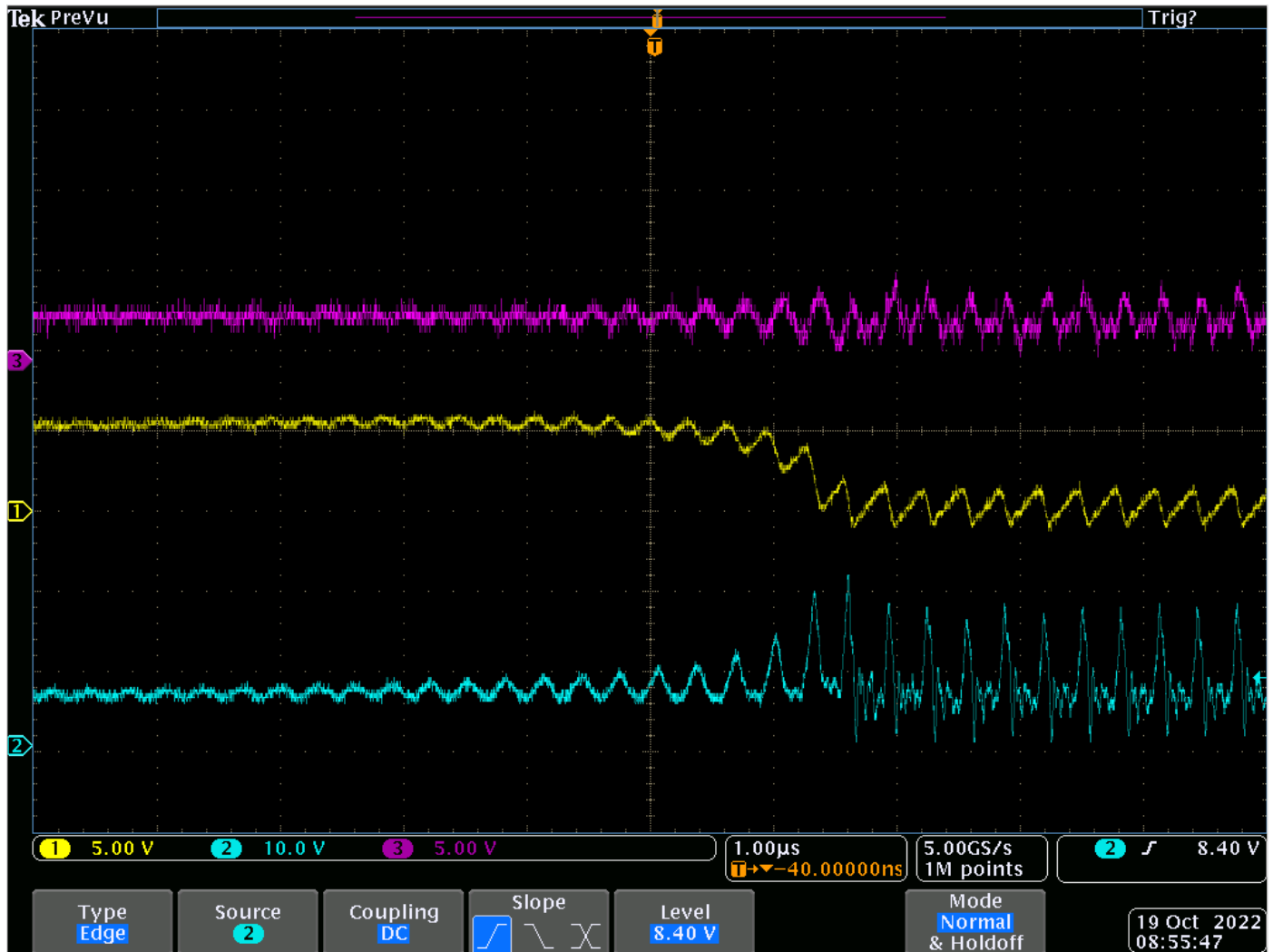


圖 8. 放大高頻振盪 (黃色 - 漏極 I、洋紅色 - 閘極 V、藍色 - 漏極 V)。

## 連接設定中的電感

在對高速 GaN HEMT 裝置進行直流特性分析時，解決電纜電感對於避免振盪而言極為重要。Keithley 提供低電感電纜 (圖 9 中的 2651A-KIT)，設計用於與 2651A 高電流 SourceMeter SMU 配合使用。一公尺長的電纜在 100 kHz 時的電感僅為 195 nH，遠低於普通的 BNC 電纜。三軸電纜的電感通常是標準同軸電纜的兩倍左右，不建議用於高頻裝置測試。



圖 9. 與 2651A 配合使用的 2651A-KIT 電纜。

此外，Keithley 還提供了圖 10 中的 8010 高功率裝置測試夾具，該夾具非常適合 GaN 裝置測試，並包含內建的安全聯鎖裝置。另請注意，即使使用三軸電纜將 2636B

SourceMeter SMU 連接至閘極 (透過三軸終端界面)，夾具也會在低側使用三軸電纜的內部遮蔽，這有助於降低電纜電感。



圖 10：8010 高功率裝置測試夾具後視圖。

圖 11 提供了使用 8010 高功率測試夾具 (閘極連接中使用三軸電纜) 的傳輸曲線測試比較，並顯示振盪 (來自圖 5) 不再明顯。如果將三軸電纜與 8010 夾具一起使用時振盪仍然存在，則可使用同軸電纜來達到較低的電感。同軸電纜可透過 8010 夾具的後方存取連接埠直接連接至裝置。Keithley 提供了藍色的低電感同軸電纜 (SC-182)，其電感效能比標準同軸電纜更好。2601B-PULSE-CA3 是藍色的低電感同軸電纜，採用 BNC 端接。這些較低電感的電纜非常適合與探棒台連接以進行低功耗 GaN HEMT 裝置測試。

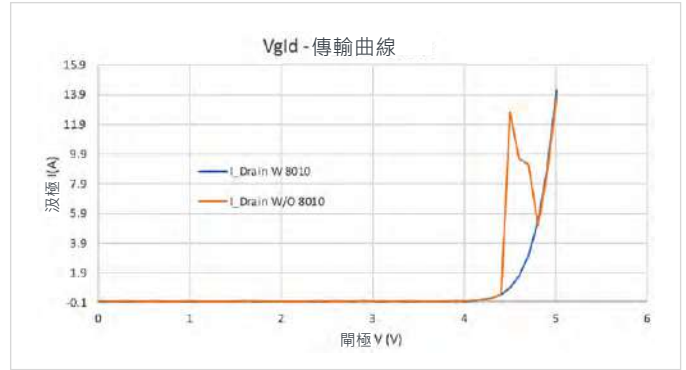


圖 11. 8010 夾具的 VgId 曲線 (傳遞曲線)。

## 漏極上的鐵氧體磁珠

在大多數情況下，正確連接測試夾具可解決振盪問題。然而，由於其他原因，在使用長電纜連接至探棒台的情況下，振盪可能會持續存在。鐵氧體磁珠的基本特性與電感器相似，但其高頻阻抗特性與電感器不同。與電感器相比，鐵氧體磁珠具有高電阻 (R) 分量和低品質因數 (Q)，這使得其在高頻下更像電阻器，並消除了能量儲存——通常用於抑制高頻振盪和雜訊的特性。圖 12 顯示了工作中的鐵氧體磁珠 (新增在漏極終端上並儘可能靠近裝置)，可有效消除圖 7 所分享的先前範例中出現的振盪。將磁珠放置在漏極上比放置在閘極終端上更有效。

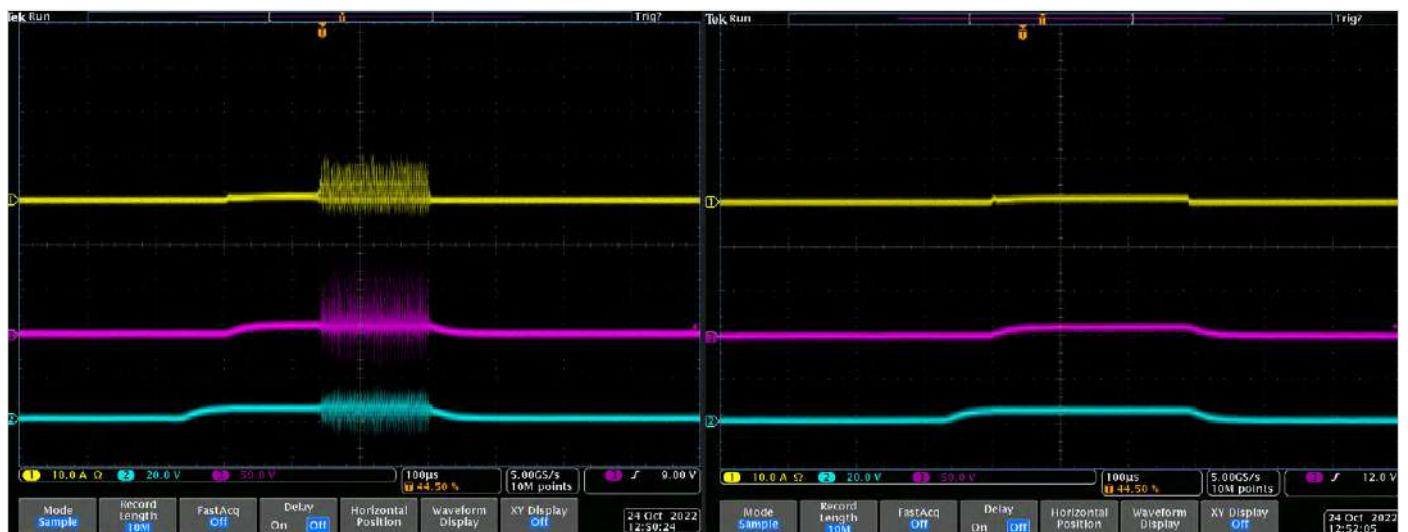


圖 12. 漏極上的鐵氧體磁珠有效性 (左 - 無鐵氧體磁珠 · 右 - 有鐵氧體磁珠) (黃色 - 漏極 I · 洋紅色 - 閘極 V · 藍色 - 漏極 V)。

## 漏極上的電容器

大多數 GaN HEMT 裝置具有非常低的輸出電容 ( $C_{oss}$ )，通常低於 1 nF。在漏極和源極之間新增電容可以吸收高頻振盪和雜訊。在採用 GaN HEMT 裝置的 DUT 電路板設計層面，通常使用 RC 緩衝電路來抑制振盪。單獨使用電容器或具有電阻器的電容器是最小化振盪的有效方法。圖 13 是當 10 nF 電容器盡可能靠近裝置的漏極終端放置時的波形擷取。將其盡可能靠近裝置放置是有效的作法。

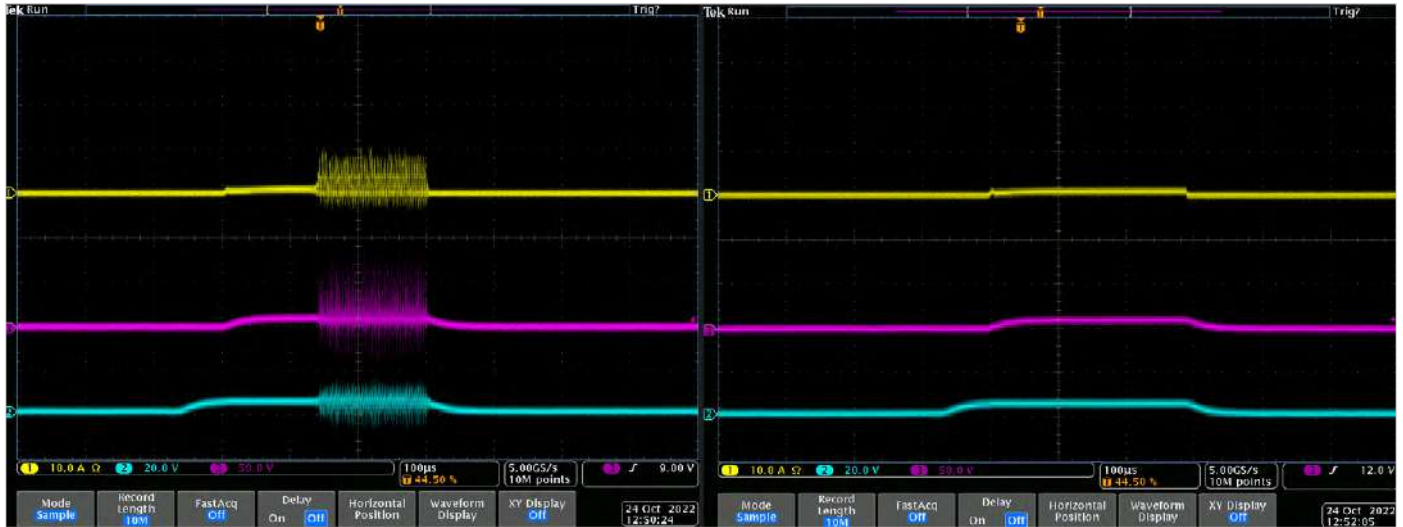


圖 13. 漏極上的電容器有效性 (左 - 無電容器，右 - 有電容器)。

## 結論

GaN HEMT 裝置非常快速、高效，並且具有獨特的結構和效能，但振盪是高頻裝置在直流特性分析過程中面臨的主要挑戰之一。本應用摘要中討論了振盪挑戰，並提供最佳實作（最佳化佈線和連接、添加鐵氧體或電容等）資訊，以最充分地滿足最小化或消除不同振盪因素的需求。Keithley 高功率 SourceMeter SMU 選配 ( 2651A 和

2657A) 和 8010 高功率裝置測試夾具是 GaN HEMT 裝置測試的絕佳組合。此外，ACS Basic 和 KickStart 等 Keithley 軟體選配均支援 GaN HEMT DC 特性分析。

如需更多有關高功率裝置測試或上述儀器和軟體的資訊，請造訪 [tw.tek.com](http://tw.tek.com)。



**Tektronix**<sup>®</sup>



[台北] 新北市中和區中正路764號6樓 (02)3234-6000  
[新竹] 新竹市北區光華二街72巷79號 (03)532-4199  
[www.lockinc.com.tw](http://www.lockinc.com.tw) [www.pcstore.com.tw/lock](http://www.pcstore.com.tw/lock)