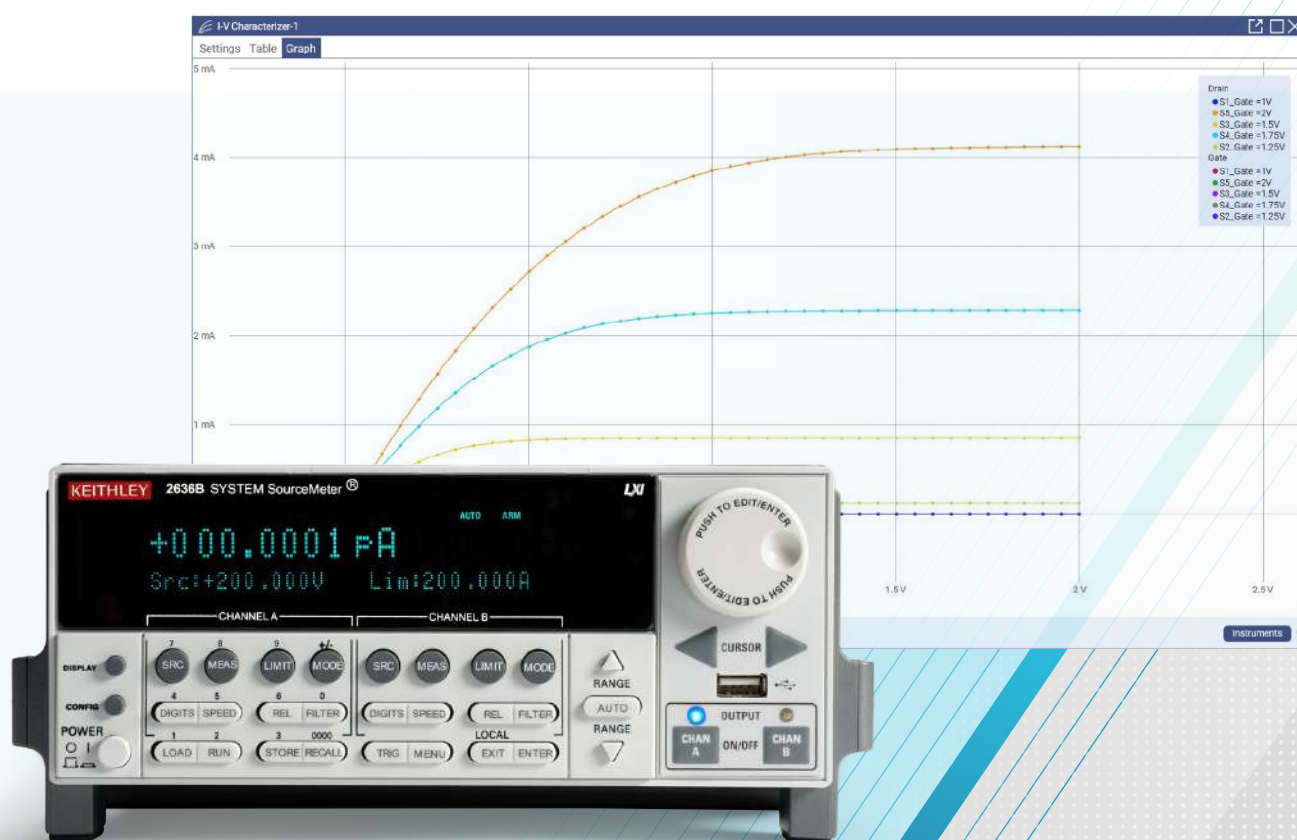


使用 KickStart 軟體 執行 MOSFET 裝置的 直流 I-V 特性分析

應用摘要



KEITHLEY
A Tektronix Company

介紹

MOSFET (金屬氧化物半導體場效應電晶體) 是現代電子電路設計中最常見的電晶體裝置之一。目前有各式各樣的材料和結構引入特定的應用中，但 MOSFET 結構及其運作原理仍能展現出持續、廣泛的適應性，其主要用於切換和功率放大器應用。MOSFET 在電氣切換電路中具有出色的效能，因為這些裝置具有兩種相反的電氣特性：在關斷狀態下可控制極低的電流，而在導通狀態下則可控制一定量的電流。MOSFET 本身可以與其他一些裝置一起作為放大器使用，或者用作模擬電路中常見裝置運算放大器的一部分。電源量測設備 (SMU) 是最適合對 MOSFET 裝置進行直流 I-V 特性分析的儀器，因為 SMU 可以滿足各種輸出與量測需求。Keithley 提供各種 SMU 模型和軟體來分析 MOSFET 裝置的特性。具體而言，2636B/35B/34B 系列系統 SourceMeter® 儀器可涵蓋低至 100 pA 範圍的低電流和 0.1 fA 解析度。KickStart 軟體包含 I-V Characterizer 應用程式，能夠測試不同分立元件的行為。本應用摘要將重點介紹如何使用 2636B System SourceMeter® 儀器和 KickStart 儀器控制軟體完成 MOSFET 的直流 I-V 特性分析。

MOSFET 裝置

MOSFET 裝置是矽基半導體，如圖 1 所示。矽半導體層上生長有氧化層，而金屬層位於氧化層之上作為閘極。從上到下，結構應依序為金屬、氧化物和半導體，因此稱為 MOS (金屬-氧化物-半導體) 結構。MOSFET 中有三個電極——閘極、汲極和源極——用於操作裝置。對於 n 型 MOSFET，半導體層必須是 p 型矽基板，透過在矽上摻雜雜質來確保空穴是多數載流子。當在普通矽上添加雜質材料時，矽原子結構中的空穴旨在失去電子，以便更多的空穴可以產生更多的正電荷。氧化物是通過將氧與矽 (SiO_2) 結合而產生的非常薄的層。其作為絕緣體，防止任何電流從閘極流向半導體區域。根據閘極、

汲極和源極偏壓條件，注入雜質的半導體可以充當導體或絕緣體。「MOSFET」一詞中的 MOS (金屬氧化物半導體) 部分表示裝置的結構。

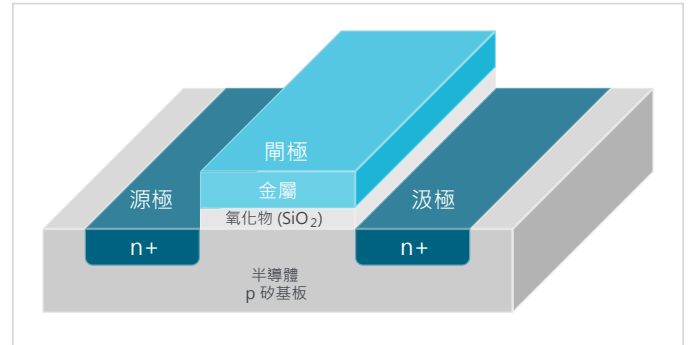


圖 1. N 型 MOSFET 結構。

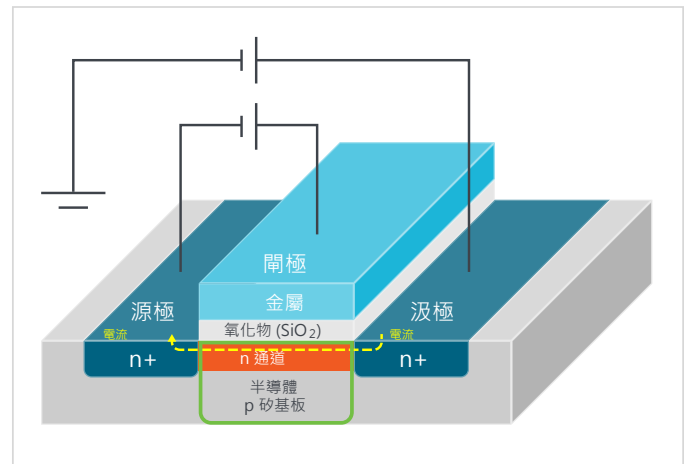


圖 2. N 型 MOSFET 運作。

流向基板和源極的典型閘極電流可能小於 1 pA。當在閘極上施加高於閾值電壓的正電壓時，多數載流子會離開氧化物，而作為自由電子的少數載流子會在圖 2 的氧化物下方移動。此電場稱為通道，電流可以透過通道從汲極流向作為導體的源極。當未施加閘極電壓偏壓或任何負偏壓時，裝置將作為絕緣體運作，並且沒有電流可以流動。FET (場效應電晶體) 暗示了 MOSFET 裝置的運作原理。

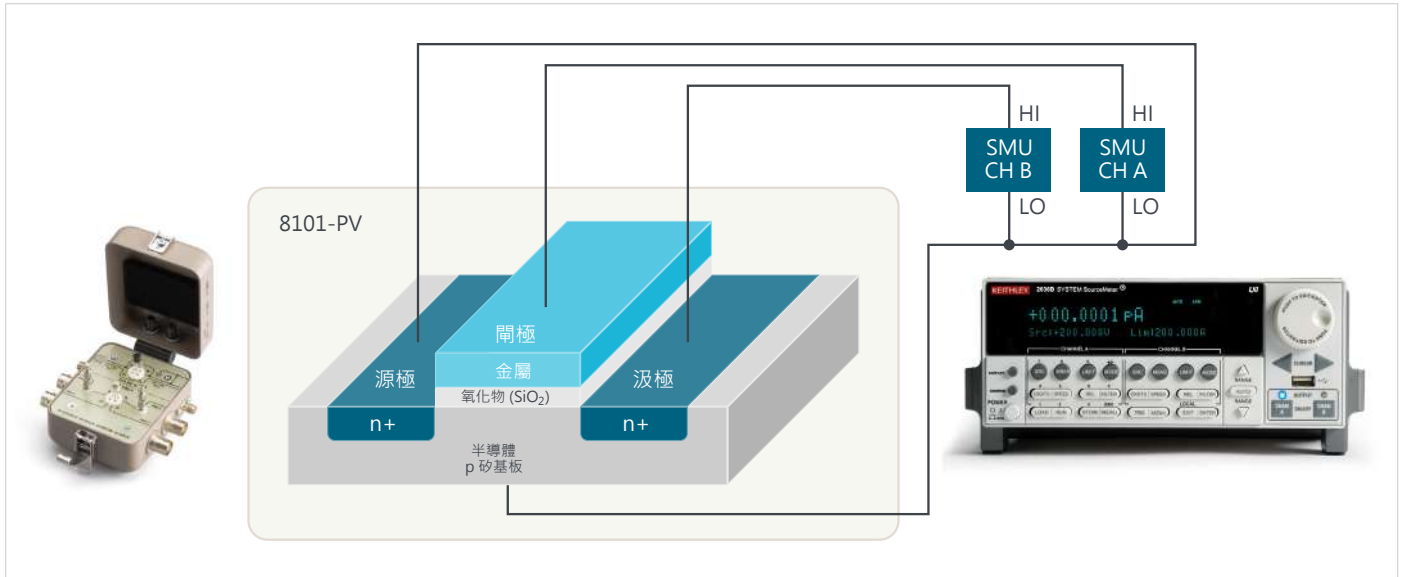


圖 3. MOSFET 的測試設定。

MOSFET 測試的儀器連接

這些測試需要兩個 SMU 通道，建議使用 2600B 系列 SourceMeter 系列的雙通道儀器。當電壓不超過 42 VDC 時，建議使用 8101-PIV 夾具連接待測 FET。如果測試夾具蓋開啟時可能會暴露致命電壓，則必須在使用前連接安全互鎖電路，以避免可能的電擊危險。建議使用三軸電纜從儀器連接到夾具。

MOSFET 傳輸特性分析

MOSFET 裝置的傳輸特性是作為輸出的汲極電流與作為輸入的閘極電壓的對比。這稱為 V_{gs} - I_{ds} 測試，因為其顯示了汲極電流相對於閘極電壓變化的特性。通常，在此傳輸測試中會對汲極施加固定電壓，而電壓在閘極處從輕微負向掃描 n 型 MOSFET 的一定量的正偏壓。圖 4 顯示了此測試案例的設定，閘極電壓從 -0.5 V 掃描到 3 V，有 101 個點，汲極處於 0.05 V 的固定偏壓。請注意，汲極的量測設定使用自動範圍，以便 SMU 通道可以覆蓋裝置從最低位準到最高位準的電流量測。若裝置可能具有高功率和高電流能力，則建議對汲極使用 4 線感應模式。

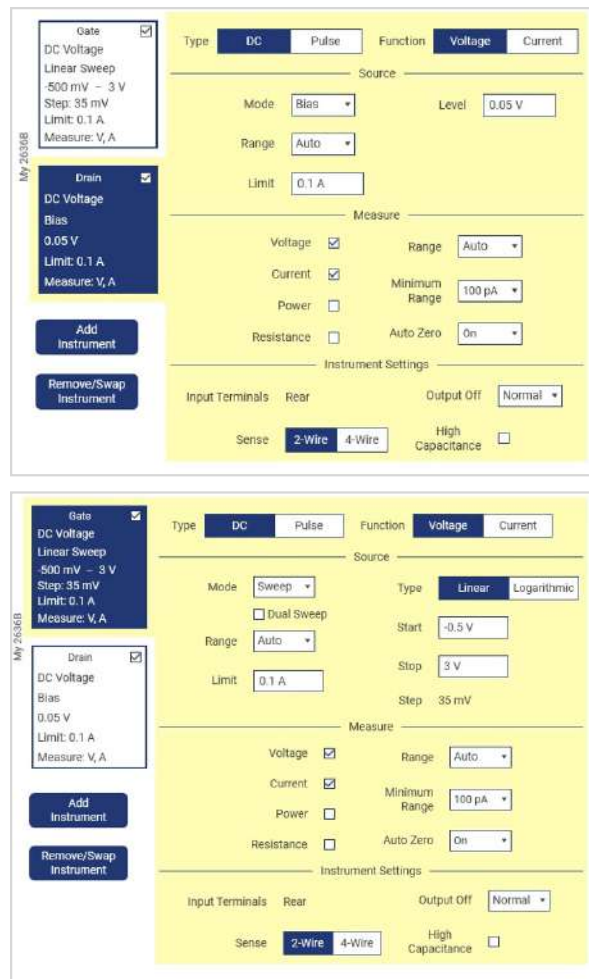


圖 4. KickStart 中傳輸量測的汲極 (上) 和閘極 (下) 設定。

圖 5 以線性刻度顯示了示範裝置的傳輸特性分析結果。x 軸是作為裝置輸入源從 -0.5 V 掃描至 3 V 的閘極電壓，y 軸是汲極處的電流量測值。當閘極電壓接近 1 V 時，汲極電流顯示為大約 0 A ，此後穩定增加。超出 1 V 點的区域 (其中有一定量的電流流動) 被識別為裝置的導通狀態。

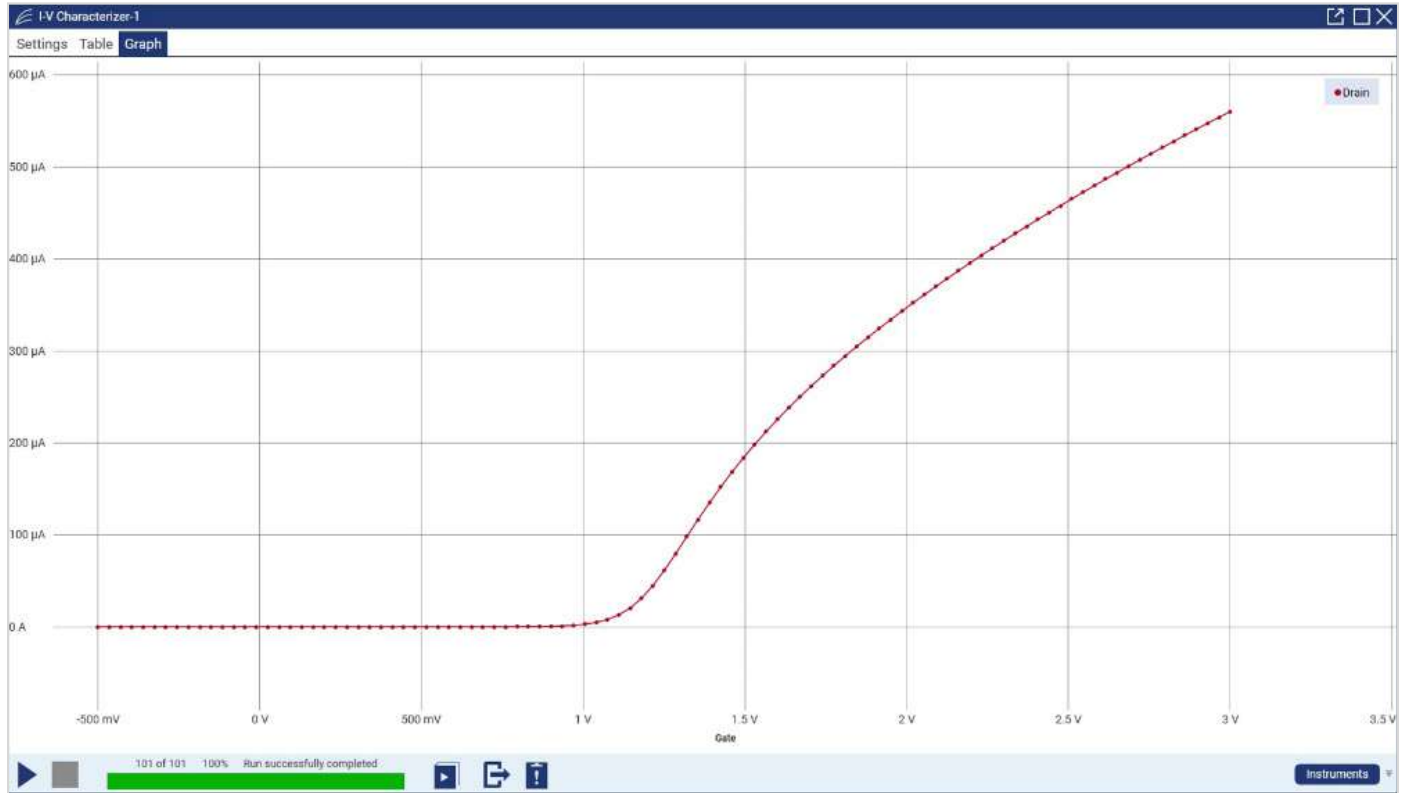


圖 5. KickStart I-V Characterizer App 中顯示的線性刻度傳輸曲線。

為了進行詳細分析，傳輸曲線通常使用對數刻度顯示，如圖 6 所示，這有助於使用者清楚識別汲極電流在其開始在每個單獨的閘極偏壓掃描點上基本傳導的點之前和通過該點的低位準活動。從閘極電壓 0 V 到 1 V，仍有一些電流流過。當閘極電壓保持在 0 V 以下時，沒有汲極電流流動，裝置完全關斷。這稱為裝置關斷狀態。關斷狀態裝置的漏電流是一個值得認真關注的項目，因為較高的漏電流會導致應用電路中出現前所未有的功率損耗。在這種情況下，當閘極偏壓低於 0 V 時，漏電流小於 60 fA。Keithley 系列 2636B/35B/34B SMU 將支援低於 1 pA 的漏電流量測。



圖 6. KickStart I-V Characterizer App 中以對數刻度顯示的傳輸曲線。

傳輸特性分析的另一個好處是能夠計算出裝置的跨導曲線和閾值電壓。KickStart 軟體提供所有原始資料，包括測試設定和量測。使用者可以將此資料匯出至電子試算表程式，例如 Microsoft Excel，也可以繪製跨導 (Gm) 並計算 V_{th} ，如圖 7 所示。

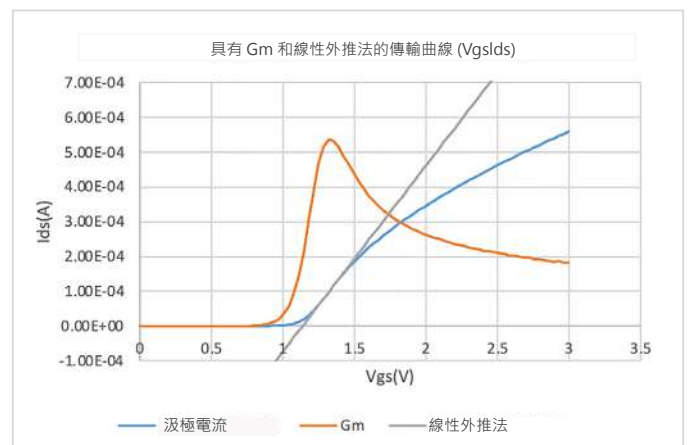


圖 7. 具有跨導和正切的傳輸曲線。

跨導是傳輸曲線的導數，傳輸曲線是每個量測點的斜率，其公式為：

$$G_m = \frac{\Delta I_{ds}}{\Delta V_{gs}}$$

目前已有許多方法可計算閾值電壓。線性外推法是最廣泛用於提取閾值電壓的方法。使用時必須先確定閘極電壓軸在線性外推的 0 A 汲極電流處截取，其中傳輸曲線位於最大跨導點。然後加上一半的汲極電壓來計算閾值電壓。使用線性外推法計算出的 V_{th} 為 1.16 V。

MOSFET 輸出特性分析

輸出特性是透過以特定增量在所需值範圍內掃描閘極電壓所獲得。在裝置閘極施加電壓，然後汲極電壓再次以所需的增量掃過所需範圍，並在每個相應的汲極電壓點量測汲極電流。然後可根據這些資料繪製圖表，以顯示 V_{ds} - I_{ds} 以及對應於每個指定閘極電壓位準的曲線。圖 8 顯示了示範 DUT 的輸出特性分析測試設定的具體範例。汲極以 50 mV 的增量從 0 V 掃描至 2 V。閘極使用 0.25 V 步進從 1 V 增加到 2 V，並且應該在通用設定中作為步進器啟用。這將產生五條汲極系列曲線。

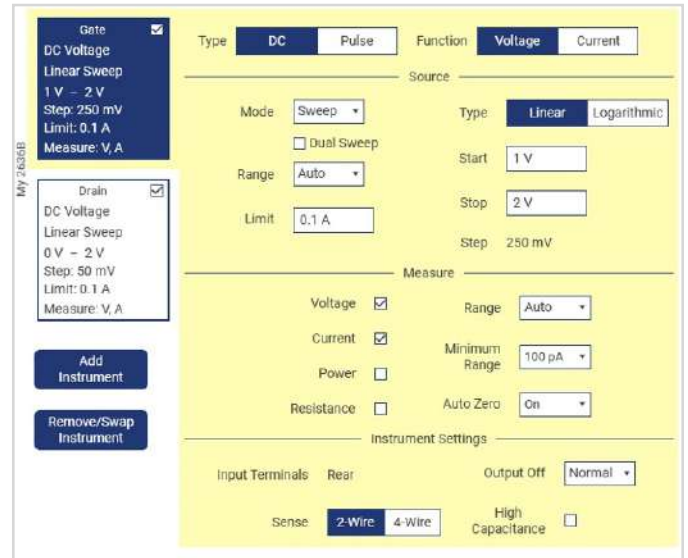
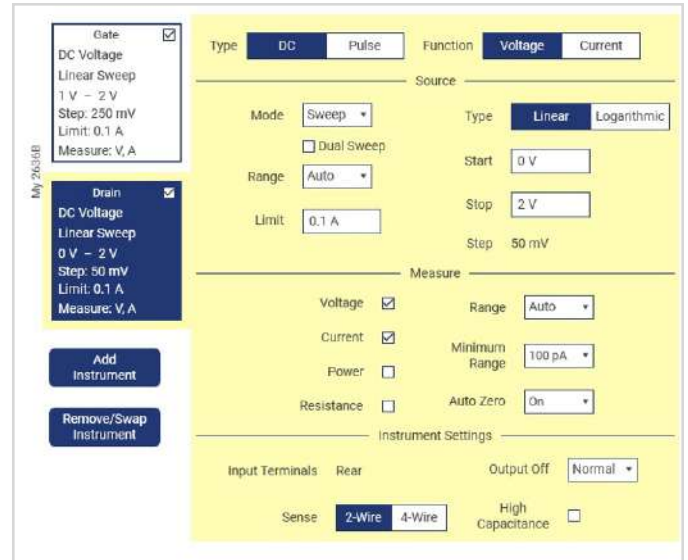


圖 8. KickStart 中輸出量測的汲極 (上) 和閘極 (下) 設定。

圖 9 顯示了使用線性刻度的輸出特性分析測試的結果。隨著汲極電壓的增加，汲極電流會增加並達到一定程度的電流飽和。請注意電流如何停止增加超過某個汲極電壓位準。這個電流平穩的區域稱為飽和區。電流增加的區間稱為線性區或歐姆區。標識這兩個區域之間過渡的汲極電壓點是夾止電壓。達到夾止電壓後，飽和的汲極電流位準在功率放大器電路應用的裝置特性分析中是重要的考慮因素。閘極電壓設定小於閾值電壓對於確定輸出特性而言並非必要的條件，因為汲極輸出電流會過低且無法清楚顯示。請注意，在這種情況下，輸出汲極電流 (當施加的閘極電壓為 1 V 時) 幾乎為 0 A，一直到最大汲極電壓。

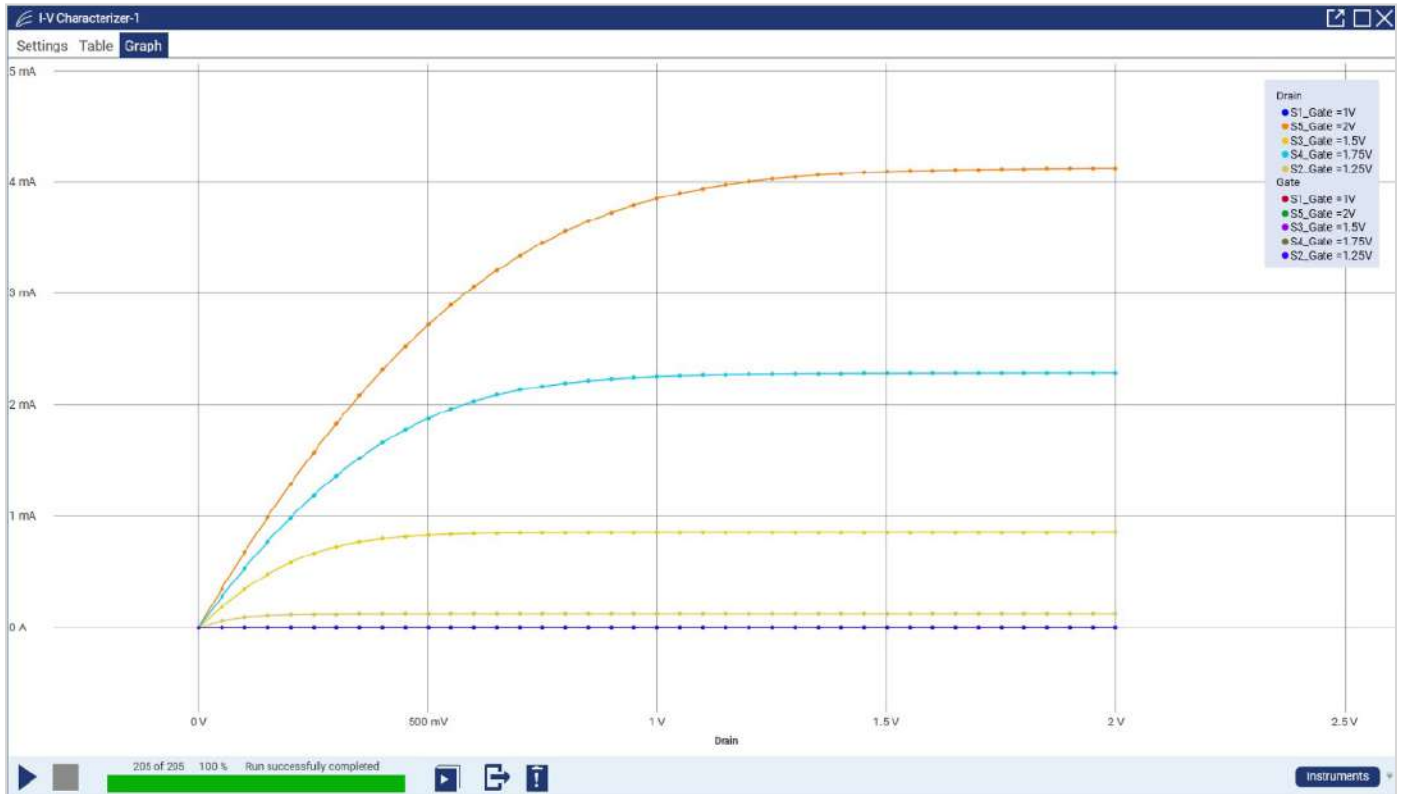


圖 9. KickStart I-V Characterizer App 中顯示的輸出曲線。

使用 KickStart 軟體的 SMU 儀器還可以對 MOSFET 裝置進行其他可能的直流 I-V 特性分析。崩潰電壓測試是重要的關斷狀態特性分析之一。使用相同的裝置連接，閘極和源極電壓偏壓為 0 V，同時掃描汲極電壓。在汲極掃描的最末端，裝置將不再能夠阻止電流的流動並開始導通，此過渡點的電流位準定義為崩潰電流。在同一點讀取的電壓被視為是裝置的崩潰電壓。使用 KickStart 軟體可以輕鬆測試關斷狀態下汲極的漏電流和特定條件下的汲極電流。

結論

MOSFET 裝置會繼續用於切換電路和功率放大器電路應用，且直流 I-V 仍是常見的量測，並對於 MOSFET 裝置的基本特性分析是必要的條件。Keithley 的 KickStart 軟體和 2636B/35B/34B 系列 SMU 構成了一個很好的解決方案，可讓使用者進行傳輸、輸出和其他裝置特性分析。

請造訪 [KickStart 軟體產品頁面](#) 以瞭解更多資訊。

Tektronix®

 洛克儀器
WWW.LOCKINC.COM.TW

[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 www.pcstore.com.tw/lock