

量測 WBG 動態參數，非 Double Pulse 不可！

■文：任苾萍

從本期前一篇系列文章《SiC、GaN 領跑，「寬能隙」全力衝刺功率半導體市場》可知，量測是能否完美激發碳化矽 (SiC)、氮化鎵 (GaN) 等寬能隙 (WBG) 半導體潛力的關鍵推手。雖然用的都是示波器 (Oscilloscope) 等基礎儀器，但「雙脈衝」(Double Pulse) 測試卻是不可或缺的環節。

測試模型 & 示波器功能，決定「寬能隙」量測分析的深度

羅德史瓦茲 (Rohde & Schwarz, R&S) 示波器產品經理黃俊雄解釋，不論是內部或對外供客戶參考的數據表、模組生產測試、模組選擇或轉換器 (Converter) 設計常會用到示波器做「雙脈衝」測試，用於量測開關損耗和反向恢復損耗——包括：Turn-on/off delay time (T_{Delay-On/Off})、Rise and fall times (T_{Rise}, T_{Fall})、Speed (di/dt, dv/dt)、Switching Energy (E_{ON}, E_{OFF}, E_{ERR}) 等。關注點包括：雜散電感導致的電壓突波 (Voltage spike)、開關損耗功率是否會導致待測物 (DUT) 過熱等，



照片人物：羅德史瓦茲 (Rohde & Schwarz, R&S) 示波器產品經理黃俊雄

而「如何正確建立測試模型」具有決定性影響。

黃俊雄說明，所謂魔鬼藏在細節中，測試須格外留意：將雜散電感做到最小、電線長度、線圈轉折及探棒連接位置，一旦出錯都會造成每次量測結果的不一致。例如，電流探棒線圈過長，輸入時間點可能會跑掉，須做相位校正；雙脈衝其實是個簡單概念，但難在：精準度及重複性。示波器的目的是採集波形數據供分析之用，產線作業只需讓軟體判定是否合規，但若是研發工程須針對電流、電壓進一步做分析調試，示波器的功能豐富與否

就極其關鍵，關係到能分析到什麼地步。例如，開關時間的設定。

開關時間有兩部分：T₁ 要足以設定電壓和電流幅度，T₂ 則通常很短，以不超過安全工作區 (SOA) 的逆向偏壓 (Reverse Bias) 為準，兩者時間的加總不應太大、造成待測物的自我加熱。此時，好用的「軟體」配套將能事半功倍——根據輸入和負載設計軟體以演算需要的時間，後續若需多打幾個雙脈衝也可據以演算出來。黃俊雄強調，R&S 示波器可透過 EXCEL 編程想要的波形，是深受用戶肯定的特色之一。其次，內建任意波形產生器 (AWG) 功能，可便於編寫想要的脈衝波形，有些甚至可將抓到的波形重新回放。

R&S：內嵌 ADC 專用處理器運算，「數位觸發」補獲快

連接待測物的探棒也是重點，若探棒選擇或連接方式不當，結果恐將誤差十萬八千里！他詳細介紹，一般探棒支援 400V、500 ~ 700MHz 頻寬已是極限，而主動 (有源) 的「高壓差分探頭」可

表：電流量測的三種方式

	Coaxial shunt	Rogowski probe	Current transformer
Pro's	<ul style="list-style-type: none"> Very high bandwidth (2 GHz) DC-measurement capability Very low insertion inductance 	<ul style="list-style-type: none"> Physically small, no "design-in" of sensor necessary 	<ul style="list-style-type: none"> High bandwidth (~200 MHz) High current possible
Con's	<ul style="list-style-type: none"> Limited maximum current Design-in of sensor necessary 	<ul style="list-style-type: none"> Limited bandwidth (typically 30-50 MHz but recently also higher bandwidth up to 100 MHz available) Limited accuracy 	<ul style="list-style-type: none"> Design-in of sensor necessary Large sensor with core, limits the possibility to have low-insertion inductance designs

資料來源：羅德史瓦茲 (Rohde & Schwarz, R&S)

支援 GHz 等級高頻寬，對於氮化鎵的高操作頻率很重要。「電流量測」亦是一門學問，頻率越高，電流量測越麻煩。由於線圈感應對頻率有一定限制，一般電流量測有三種方式：同軸分流器 (Coaxial shunt)、線圈電流探棒 (Rogowski probe)、電流感應器 (Current transformer)。其中，「同軸分流器」可支援高達 2GHz 的頻寬，日漸受到歡迎。

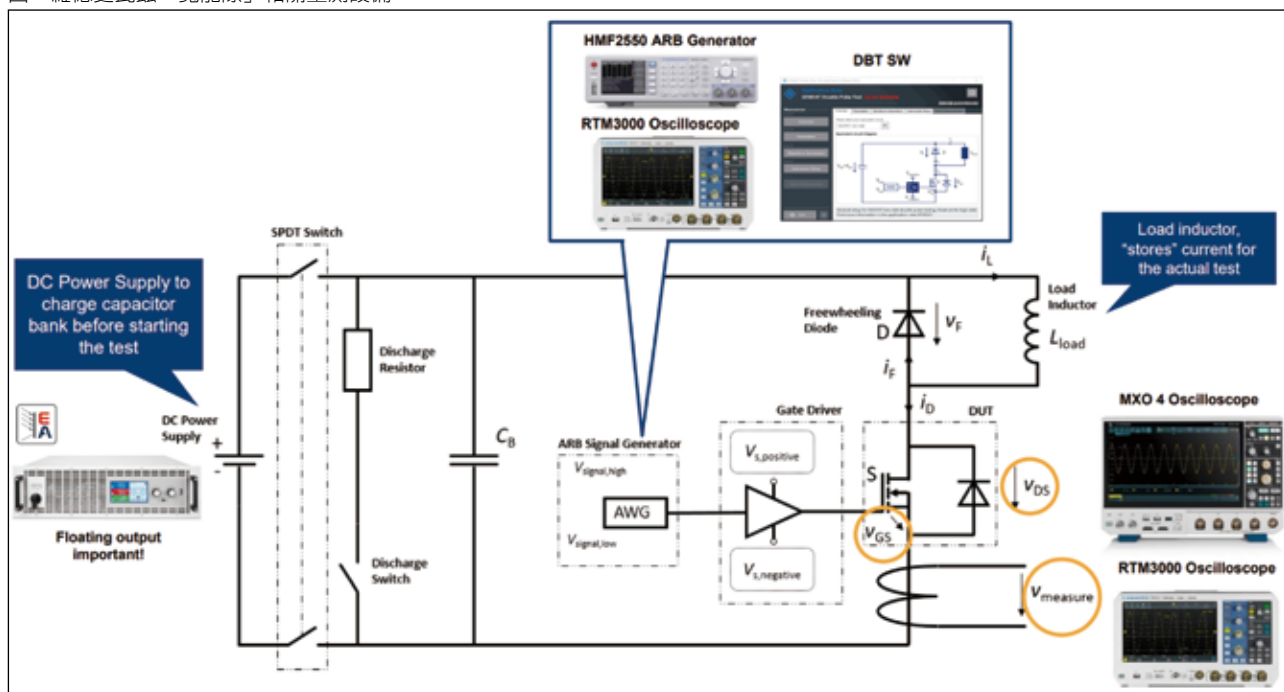
黃俊雄指出，一般示波器工

作原理類似照相，抓取一個波形後須重新觸發會存在盲區時間；但 R&S MXO 4 系列示波器捕獲快，每秒可擷取 450 萬個波形，就像在錄影一樣，盲區時間非常短、幾無遺漏，更有利於雙脈衝量測。此外，它另具備兩大優勢：1. 內建 12 位元類比數位轉換器 (ADC)，且能透過數學演算提升至 18 位元的高解析度，以獲得更精準的量測結果；2. 儲存深度號稱業界最高，單一通道的記憶體達 400 Mpts，

方便觀看細節。最後，特別一提的是 R&S 多款示波器的「數位觸發」功能。

黃俊雄表示，相較於坊間多是類比觸發的示波器，需要半個或一個波形才能觸發，數位觸發可針對任何細小波形觸發，這也是捕獲率為何能如此高之故。其秘訣是直接將 ADC 放到自行開發的專用晶片 (ASIC) 處理器運算，然後找出由每個採樣點連接的曲線是否符合觸發事件並逐一比對採樣點，更為

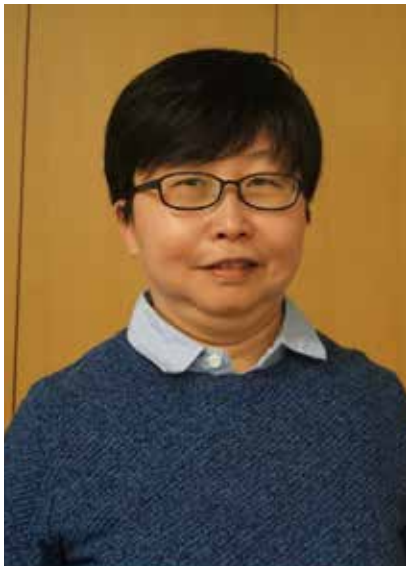
圖：羅德史瓦茲「寬能隙」相關量測設備



資料來源：羅德史瓦茲 (Rohde & Schwarz, R&S)

精準。R&S 自十年前 RTO 系列開始引進此技術，目前高階示波器皆有此功能。數位觸發另一個好處是可減少雜散電容、電感衝擊，進而降低振鈴 (ringing) 和電磁干擾 (EMI)，可設定超過某個區域再去觸發以縮小影響區域，更易於區分雜訊及真實波形。

Diodes：功率元件感性負載大，單一脈衝無法精準辨別



照片人物：達爾國際 (Diodes) 專案經理 詹雅惠

專精功率元件的達爾國際 (Diodes) 亦贊同雙脈衝測試對於寬能隙的重要。專案經理詹雅惠表示，元件製造商在意的是耐壓、導通、驅動電壓等靜態參數，但站在模組、馬達、車廠等中、下游廠商立場，更關心的是切換損耗 (Switch Loss)、閘極充放 (Gate Charge) 電容的電荷量 (Qg)、dv/

dt、di/dt 等動態參數。碳化矽切換快、損耗低，雙脈衝須很精準且須排除電感等外部雜訊以免誤導；更理想的作法是：只要簡單設定電壓區間就會自動掃描，方便快速建模且知道產品極限。她並釐清為何不能只用單一脈衝量測的原因。

這是因為大部分功率元件的感性負載 (inductive load) 很大，關閉待測物時，電感電流仍會持續流動而自動開啓二極體 (diode)；當待測器開啓時，二極體會有反向恢復過程進而產生電流，單一脈衝無法精準辨別。試將快速反向恢復的 MOSFET (金屬氧化物半導體場效電晶體) vs. 傳統 super-junction (超接面) MOSFET 做比較，前者反向恢復電流 (IRR) 相對下降很多。整體而言，MOSFET 是電場效應，若閘極氧化層 (Gate Oxide) 做厚一些，不容易被擊穿，但效率相對差、啟動慢。如何尋找擊穿電壓與效率的平衡點以及產品可靠度定位，是首要任務。

Diodes 公司看好車用可靠度要求高，已積極轉向車用元件發展；截至 2022 年車用已佔公司整體營收的四成。如今，看好 ESG 永續發展商機，著眼更高的電壓與功率密度、更少的導通 (Conduction) 和切換損耗、高轉換效率，惟考慮到氮化鎵配套尚未完善及電子游離問題，認為碳化矽在車用領域更有發揮空間而全力投入開發。詹雅惠表示，碳化矽可承受電壓較高、電子游離速度快，有利於高頻應用；且熱導亦是傳統

矽基元件的三倍，散熱佳。若 DC/AC、AC/DC 逆變器或 DC/DC 轉換器全都換成碳化矽，可大幅降低能耗。

碳化矽產品主要有三大類：
1. 二極體，650V 鎖定 400V 電池系統，1200V 面向 800V 電池系統；
2. MOSFET，支援雙向反充；
3. 模組，集成被動元件，最高支援 1700V。詹雅惠比較 IGBT (絕緣閘雙極電晶體) 和 SiC MOSFET：就 2kW 的板載充電 (OBC) 的功率因數校正 (PFC) 系統來看，改用碳化矽可提升 2.5 ~ 3% 效能；另傳統 IGBT MOSFET 是熱源最易聚集的地方，散熱佳的碳化矽溫度表現優異。她援引 Yole 報告：2021 年全球功率碳化矽器件市值約 10.9 億美元，2027 年將達 62.97 億美元，期間年複合成長率 (CAGR) 達 34%，而車用是最大分眾市場。

電動車最在意里程數，驅動逆變器和充電樁若改用碳化矽，可大幅拉升 AC/DC 轉換效率；另高鐵牽引逆變器、資料中心和工業用電腦亦是碳化矽應用大宗。CTA