

Keysight Technologies

完整的 CMOS 可靠度測試解決方案

Keysight B1500A 半導體元件分析儀

應用說明



簡介

隨著 CMOS 元件的特徵尺寸不斷縮小，電場強度與電流密度也伴隨增加，這使得元件壽命因而縮短。這些因素使 CMOS 元件的可靠度測試的議題，例如閘極與金屬層間絕緣體劣化、熱載子效應、偏壓溫度不穩定度以及互連開路與短路等因素都對保證積體電路（IC）壽命是至關重要的。

Keysight B1500A 半導體元件分析儀是下世代半導體參數分析儀，具有估算先進 CMOS LSI（大規模積體電路）的可靠度所需之量測功能。此外，B1500A 內建的 EasyEXPERT 控制軟體標準配備具有隨時易用的量測程式庫，涵蓋所有常見的 CMOS 可靠度測試。

本應用手冊概述 B1500A 的核心量測功能，並展示 B1500A 是如何提供驗證 CMOS 製程可靠度的完整解決方案。

綜合先進量測能力

十個模組插槽與多種可選擇的電源 / 監控單元 (SMU) 以及其他先進模組類型使 B1500A 可以配置為滿足 CMOS 製程可靠度測試最嚴苛量測要求。下圖概述 B1500A 可用的模組。

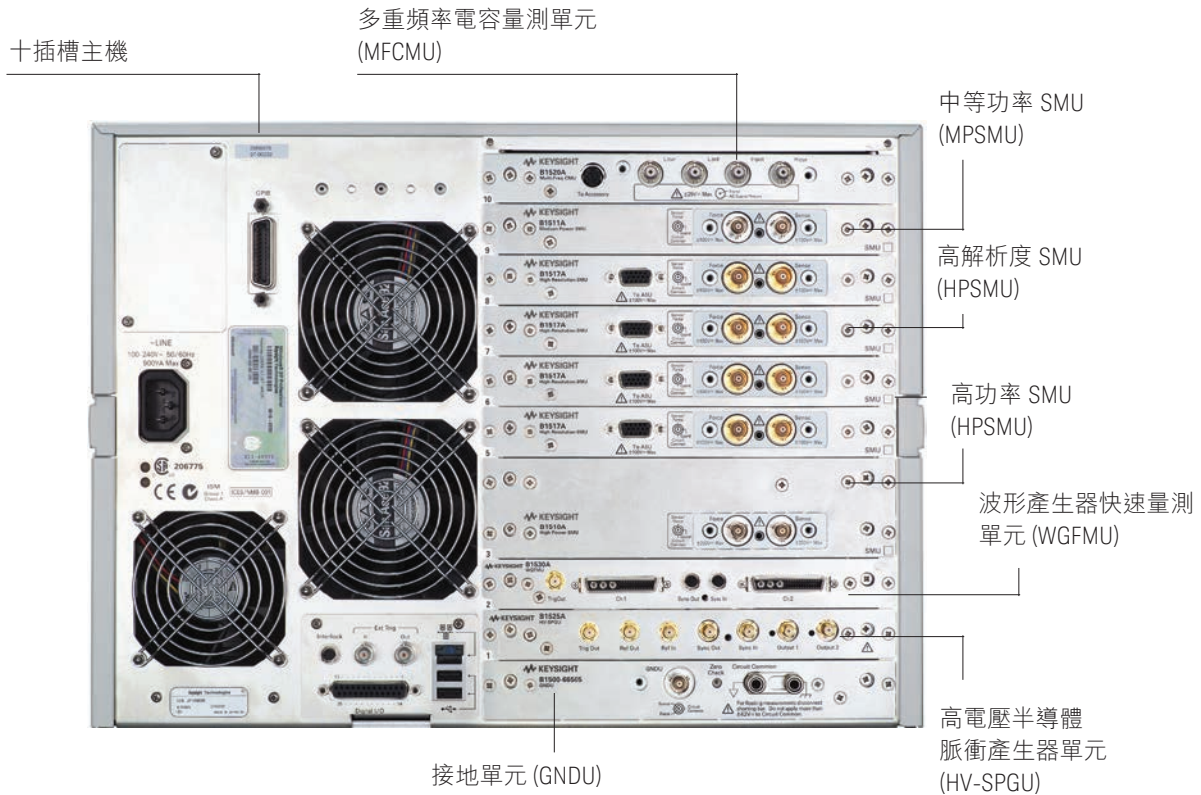


圖 1：量測模組彈性的配置

中等功率 SMU (MPSMU)

MPSMU 為泛用型 SMU 有處理中等電壓與電流源的能力以及量測解決方案。MPSMU 的最大輸出電壓為 $\pm 100\text{ V}$ 且其最大輸出電流為 $\pm 100\text{ mA}$ 。MPSMU 的最小電流量測解析度為 10 fA 且其最小電壓量測解析度為 $0.5\text{ }\mu\text{V}$ 。

高解析度 SMU (HRSMU)

HRSMU 是設計用於需要極精準的量測，例如閘極漏電流、關閉狀態漏電流與次閾值電流量測。HRSMU 的最小電流量測解析度為 1 fA (相較於 MPSMU 為 10 fA)。此外，若與超微量測與切換模組 (ASU) 搭配使用，HRSMU 可以實現解析度為 100 aA (0.1 fA) 的電流量測，並維持與 MPSMU 相同的電壓源和電流源的能力。

高功率 SMU (HPSMU)

正如其名稱所示，相較於其他 SMU，HPSMU 擴大了電壓源與電流源的能力。HPSMU 最大輸出電壓為 $\pm 200\text{ V}$ 且其最大輸出電流為 $\pm 1\text{ A}$ 。200 V 的輸出能力對於崩潰電壓量測很有用，且 1A 的輸出能力可支援重要的可靠度測試，例如元件互連電荷遷移測試。

高功率 SMU (HPSMU) (續前頁)

所有的 B1500A 的 SMU 都是 Kelvin 型且具有獨立驅動與感測輸出，這對於低電阻和高電流的元件進行準確的量測是必要的。此外，所有 SMU 支援準靜態電容對電壓 (QSCV) 量測能力，這對於估算閘極介電質界面缺陷密度很有用。SMU 提供的 QSCV 功能也具備漏電流補償功能，可協助薄閘極介電質的量測。

高電壓半導體脈衝產生器單元 (HV-SPGU)

B1500A 之 HV-SPGU 模組是專為半導體元件電性量測所設計。

脈衝產生器可用於可靠度測試，使用電荷泵法 (charge pumping) 以估算閘極介電質與基體之間的界面缺陷密度。脈衝產生器也可以用來針對 SMS (應力 - 量測 - 應力) 測試施加脈衝式 (交流) 應力偏壓。

HV-SPGU 的頻率範圍為 0.1 Hz 到 33 MHz，且各個 HV-SPGU 模組具有兩個獨立通道。每個通道具有 ± 40 V 電源供應能力 (連接到開路負載) 且最低電壓解析度為 1.6 mV。

選購的 16440A SMU/脈衝產生器選擇器單元與 16445A SMU/PGU 選擇器連接配接器，可用於在 HV-SPGU 和 SMU 之間輕鬆切換。

波形產生器 / 快速量測單元 (WGFMU)

WGFMU 為雙通道模組，結合 ALWG (任意線性波形產生器) 電壓脈衝產生能力以及超快 IV 量測能力。可以使用 10 ns 的最小取樣率指定電壓波形。透過將 ALWG 與 IV 量測功能結合到單一模組中，可同時施加 DC 與 AC 應力偏壓，並且可無間隙進行量測。

WGFMU 模組的電壓輸出具有 16 位元解析度，且涵蓋下列電壓範圍： -5 V 到 5 V、 -10 V 到 0 V、或 0 V 到 $+10$ V。此模組針對 IV 量測的最小取樣時間間隔為 5 ns，且支援的量測範圍為 $1 \mu\text{A}$ 、 $10 \mu\text{A}$ 、 $100 \mu\text{A}$ 、 1 mA 與 10 mA (14 位元解析度)。

此模組可以進行超快的負偏壓溫度不穩定度 (NBTI) 與正偏壓溫度不穩定度 (PBTI) 量測 (包括 DC 與 AC 應力) 而不產生任何動態恢復效應。它也可以進行超快熱載子注入 (HCI) 量測。

多重頻率電容量測單元 (MFCMU)

使用電容計量測高頻電容對電壓 (HFCV) 曲線通常被用來估算 CMOS 元件的電性，例如閾值電壓、平帶電壓與基體摻雜濃度分佈。此外，透過比較 HFCV 曲線與使用 SMU 量測的 QSCV 曲線，可萃取出界面缺陷密度的能量分佈。

B1500A 的 MFCMU 模組可免除額外使用外部電容計。MFCMU 的頻率範圍從 1 kHz 至 5 MHz，且它可提供 ± 25 V 的直流偏壓。可選購的 SMUCMU 整合單元 (SCUU) 支援在定位平台為基礎的晶圓探針座環境中進行電容對電壓 (CV) 及電流對電壓 (IV) 的自動化切換，可免除使用開關矩陣來執行此功能。SCUU 也可使用 MPSMU 或 HRSMU 作為偏壓源，將允許的電容量測 DC 偏壓擴展到 ± 100 V。

隨即可用的可靠度測試程式庫

Keysight EasyEXPERT 軟體，安裝於 PC 為基礎的 B1500A，是一個功能強大的 Microsoft Windows 參數測試之應用程式。EasyEXPERT 提供簡易且有效的量測與分析環境，並結合直覺式圖形使用者介面 (GUI)。可藉由 B1500A 的觸控螢幕液晶面板或透過選購的 USB 鍵盤與滑鼠進行 EasyEXPERT 的互動式操作。熟悉的 Windows 環境減少學習曲線並支援簡單的網路連線與資料匯出到 MS Office 為基礎的工具程式。EasyEXPERT 針對元件特性量測使用「由上而下」的方法，可允許使用者立即專注於進行量測而無須學習所有的儀器硬體錯綜複雜的細節。EasyEXPERT 配備 240 多種量測演算法，依照元件類型、應用和技術可方便地管理，包括典型的 CMOS 可靠度測試，解釋如下。

閘極介電質之完整性

高強度電場對閘極介電質的影響對 LSI 積體電路的可靠度是重要的考量。有兩種主要的方法可用來衡量閘極介電質的完整性：零時介電值崩潰和時間相依介電質崩潰。

TZDB (零時介電質崩潰) 乃施加閘極電壓，並量測閘極漏電流，直到介電質崩潰。所謂「零時」特別用來強調其崩潰主要由於閘極氧化層中快速增加的電場造成，而不是因為應力施加的時間造成。當然，在實際的情況下，實際的電壓斜線上升速率確實會對崩潰電壓造成影響。

TDDB (時間相依崩潰) 量測長期暴露於相對低電場所造成的介電值崩潰。在 TDDB 測試過程中所施加的應力可以是恆定電壓或是恆定電流，關鍵的量測參數為其發生崩潰所花費的時間。一般而言，會量測到注入閘極介電質的總電荷所造成的崩潰 (Qbd)。

兩種常見的時間相依介電質崩潰測試電壓斜線升壓 (V-Ramp) 和電流斜線升流 (J-Ramp)。V-Ramp 測試是以恆定線性速率增加電介質兩端的跨壓，直到發生失效。而 J-Ramp 測試在對數間隔時間增加流過介電質的電流。這兩種測試記錄造成崩潰的總電荷 (Qbd) 與崩潰電壓 (Vbd)。這兩種方法對於估算在很短的時間內閘極介電質的品質都是很有效，並可提供製程工程師快速的回饋。關於 V-Ramp 與 J-Ramp 更詳細的資訊，請參見 JEDEC 標準「薄介電質之晶圓級測試程序」。表 1 顯示 EasyEXPERT 中針對閘極介電質完整性之應用測試的清單。

表 1：閘極介電質完整性應用測試清單

量測	應用測試
TZDB	TZDB
TDDB	TDDB Istress、TDDB Istress 3 元件、TDDB Istress2、TDDB Istress2 3 元件、TDDB Vstress、TDDB Vstress 3 元件、TDDB Vstress2、TDDB Vstress2 3 元件
V- 斜線升壓 / J- 斜線升壓	V- 斜線升壓 / J- 斜線升壓

閘極介電質之完整性 (續前頁)

圖 2 顯示 V-Ramp 應用測試範例。用此測試的流程如下。使用者先選擇「可靠度」技術類別。接下來，使用者從所顯示的測試清單中選擇「V-Ramp」應用測試。應用測試會以視覺方式顯示待測元件與 SMU 之間的連線，同時內建的說明文件欄位會說明此應用測試是如何運作來執行 V-Ramp 測試。最後一個步驟，使用者填寫量測參數並按一下開始按鈕。

量測便開始進行，待完成時，崩潰電壓 (Qbd) 與到達崩潰的時間 (Tbd) 會自動萃取出來並與 I-V 曲線圖一起顯示在螢幕上。完成之後，量測結果會自動存儲到 EasyEXPERT 的內建的資料庫。

熱載子效應與偏壓溫度不穩定度

HCI 與 NBTI/PBTI 是目前在先進 CMOS 元件開發與可靠度領域最重要的現象。

HCI 劣化是因注入高能量 (熱) 電子進入閘極介電質造成的。熱電子因汲極電極附近區域的高電場對電子加速而造成碰撞游離所產生的，如圖 3(a) 所示。注入閘極介電質的電子會增加界面缺陷的密度。

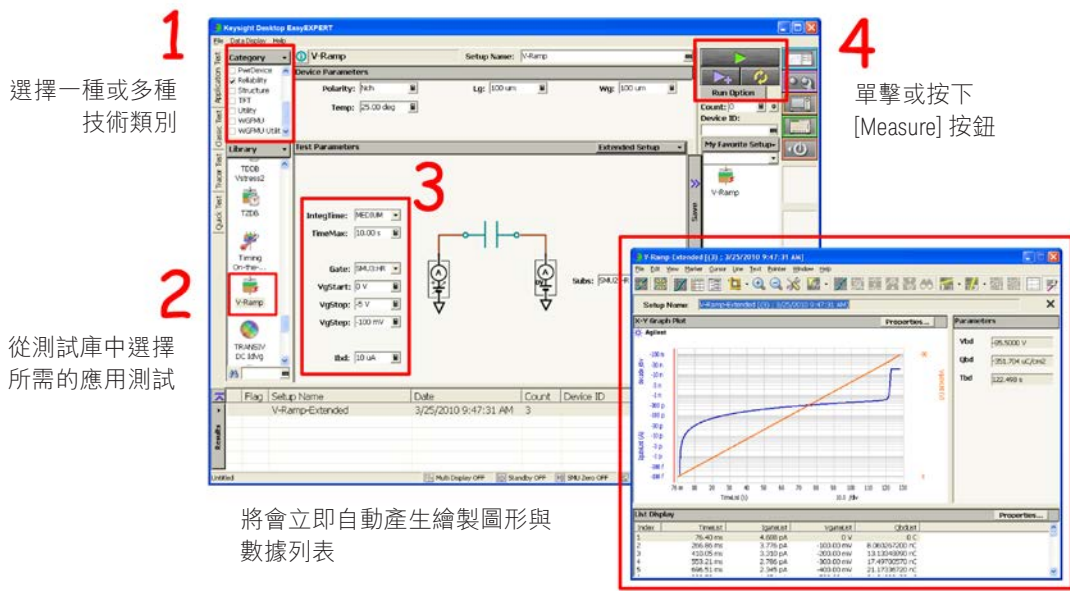


圖 2 : V- 斜線升壓測試應用實例

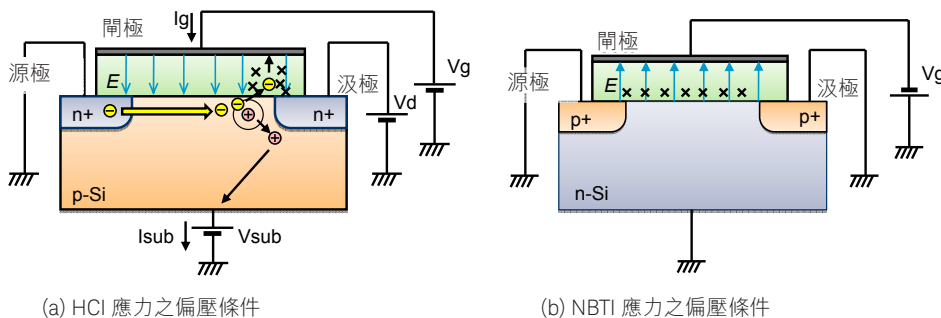


圖 3 : HCI 與 BTI 應力之偏壓條件

熱載子效應與偏壓溫度不穩定度 (續前頁)

BTI 是一個全然不同的劣化機制，它發生在 MOSFET 關閉狀態時（請參見圖 3(b)）。當 PMOS FET 閘極上施加負偏壓（NBTI）時，BTI 對 PMOS FET 會有很大的影響。NBTI 在 90 年代初期首度被發現，但此現象背後的物理機制到今天仍存在爭論。實驗數據也顯示 NBTI 劣化會在更高的溫度與更薄的閘極氧化層下更嚴重，這意味著此一現象對先進的半導體製程將具有很嚴重的影響。

HCI 和 NBTI 既會使 MOSFET 閾值電壓產生漂移，如圖 4 所示。因此，如何得到 HCI 與 NBTI 對元件壽命的影響的準確估算值對於確保 IC 中的 MOSFET 可滿足其可靠度標準是至關重要的。

用於估算 HCI 與 NBTI 劣化一般的技術是應力 - 量測 - 應力 (S-M-S) 方法。通常，S-M-S 的量測中，會在施加應力前會先量測 IV 特性作為對照組。然後開始施加應力，且 V_{th} （或在 V_{th} 值附近的 I_d 值）會在應力施加的過程中進行週期性的量測。這樣就可以畫出 V_{th} 的變化 (ΔV_{th}) 或 I_d 的變化 (ΔI_d) 對累積應力時間的關係圖。最後就可以從這些數據中估算出 MOSFET 的壽命。

EasyEXPERT 包含可進行 HCI 與 BTI 的應用測試，如表 2 所示。EasyEXPERT 也包含電荷泵應用測試，這對於估算在測試過程中邊界缺陷的增加量是很有用的。電荷泵應用測試可以搭配 B1500A 的 HVSPGU 模組或外部 Keysight 81110A 脈衝產生器一起使用。

對於所有這些隨著時間的推移施加恆定應力的測試，很重要的就是要儘量減少未施加應力過程的量測時間。特別是在 NBTI 測試時，待測元件可能會在移除應力之後迅速恢復，且如果發生這種情況，量測數據會低估實際電晶體的在電場中的劣化程度。類似的問題也在 HCI 劣化測試中發現。

除了前述考量之外，會對元件壽命估算值有重大的影響的還有另一個重要的因素。以純 DC 應力方式進行 NBTI 測試所得到的元件壽命估計值往往遠低於以 AC 應力方式所測得的值。然而，AC 應力可以更準確地反映元件在真實世界條件下所可能經歷的應力。

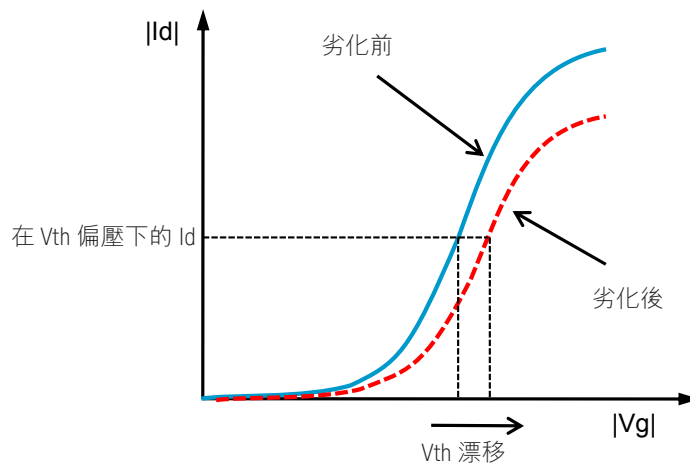


圖 4：由於 HCI 或 NBTI 應力所產生的 V_{th} 漂移

表 2：針對 FET 可靠度測試之應用測試清單

量測	應用測試
HCI	HCI, HCI2, HCI 3 元件
電荷泵	Charge Pumping, Charge Pumping2
以 SMU 進行 BTI 量測	BTI, BTI[3], BTI2, BTI2[3], BTI 3 元件, BTI 3 元件 [3], Timing On-the-fly NBTI
以 WGFU 進行超快 BTI	Fast BTI(AC stress I_d -Sampling), Fast BTI(DC stress I_d -Sampling), Fast BTI(AC stress I_d -Vg), Fast BTI (DC stress I_d -Vg)

熱載子效應與偏壓溫度不穩定度 (續前頁)

B1500A 的 WGFMU 模組可以執行 S-M-S 測試並可施加 DC 或 AC 應力。它可以進行單點、掃描量測，並對應力有最少中斷，如圖 5 所示。它讓研究人員透過比較不同的應力與量測類型的結果來判定元件的壽命，並區分不同類型的劣化。

導電層互連可靠度

另一個因製程線寬縮小使可靠度惡化的問題是電荷遷移 (EM)。EM 是金屬互連中的原子在電流的影響下產生遷移，最終導致金屬孔洞或互連短路，然後造成電路故障的現象。

以發生開路故障為例，在佈線中的金屬原子受到電子流的影響而移動，直到在金屬導線中產生孔洞。孔洞會增加周圍金屬的電流密度，進而導致孔洞增長變得更大。這個過程會一直持續直到孔洞變得足夠大，最終斷開了導線的連接。

另一個典型 EM 失效機制是擠壓 (丘狀或鬚狀)，會導致層間短路。在此情況下，電子流會擠壓金屬原子 (類似牙膏被用力擠出)，直到他們迸發出來，並產生連到相鄰導線的短路。

表 3 顯示針對 EM 的應用測試清單。提供針對孔洞與擠壓失效的測試，使用電壓或電流應力的方式都有。

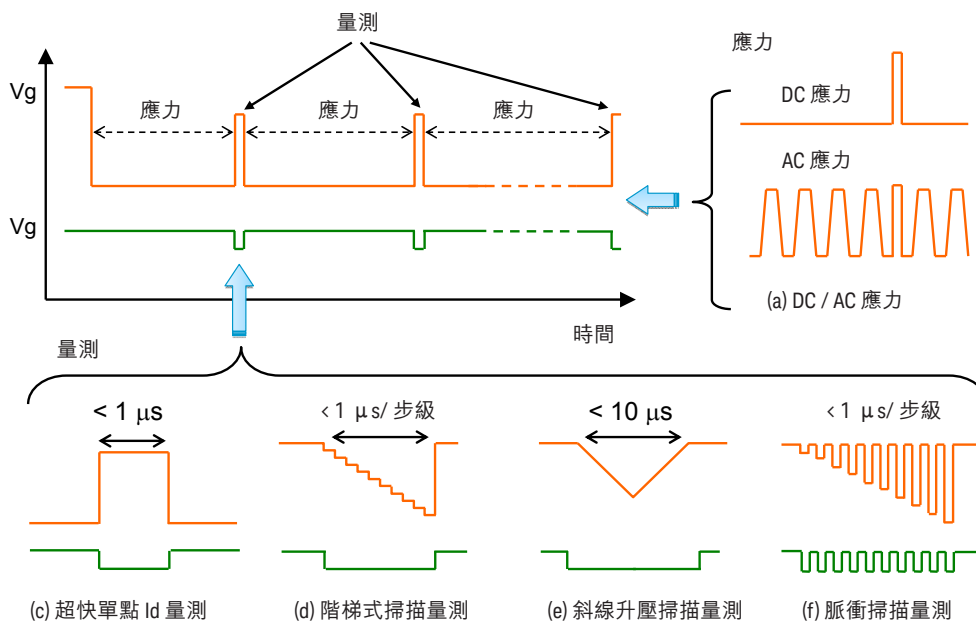


圖 5：B1500A 之快速與可變應力以及量測配置

表 3：針對電荷遷移測試之應用測試清單

量測	應用測試
電荷遷移	EM Istress, EM Istress2, EM Istress[2], EM Istress2[2], EM Istress[6], EM Istress2[6], EM Vstress, EM Vstress2, EM Vstress[2], EM Vstress2[2], EM Vstress[6], EM Vstress2[6]

結論

隨著 CMOS 元件的特徵尺寸不斷縮小，電場強度與電流密度也伴隨增加，這使得元件壽命因而縮短。為了瞭解並達到目標元件的壽命，估算元件的可靠度，包括閘極介電質完整性、熱載流子效應、偏壓溫度不穩定性和導電層互連可靠度等各方面的因素是很重要的。對於例如具有快速恢復時間的 NBTI 的測試，可進行快速量測、減少應力中斷並提供 AC 應力偏壓對於正確估算在真實世界條件下的元件壽命是必要的。

Keysight B1500A 是一個模組化且獨立運行的儀器，它允許您配置能夠執行極富挑戰性的可靠度測試的解決方案。Keysight EasyEXPERT 軟體提供簡便且直觀的 B1500A 儀器控制，同時隨附的應用測試程式庫可減少學習曲線，讓你可立即開始進行有生產力的可靠度測試。

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

透過個人化頁面查看與您息息相關的資訊



五年保固延長計劃

www.keysight.com/find/AssurancePlans

是德科技提供經濟實惠的五年保固保證，確保儀器的運作達到規格要求，您可持續信賴儀器的量測準確度。

是德科技銷售夥伴

www.keysight.com/find/channelpartners

兩全其美：是德科技專業的量測技術與齊備的產品，搭配是德科技銷售夥伴的服務與彈性價格。

www.keysight.com/find/B1500A

有關是德科技電子量測產品、應用及服務的詳細資訊，可查詢我們的網站或來電洽詢

聯絡窗口查詢：

www.keysight.com.tw/find/contactus

台灣是德科技網站：

www.keysight.com.tw

台灣是德科技股份有限公司

免費客服專線：0800-047-866

104 台北市復興南路一段 2 號 7 樓

電話：(02) 8772-5888

324 桃園縣平鎮市高雙路 20 號

電話：(03) 492-9666

802 高雄市四維三路 6 號 25 樓之 1

電話：(07) 535-5035