

尋找適用的技術 解決資料中心的電源挑戰

■作者：Wolfspeed

數位化和雲端服務的快速部署推動了全球資料中心的成長。資料中心消耗全球將近 1% 的電力，預計此一數字還會成長。元宇宙、擴增實境和虛擬實境等業界趨勢將繼續消耗超出地球可持續生產的能源。雖然增加可再生能源的方向正確，但這還不夠，由於伺服器及其冷卻系統消耗著將近 40% 的資料中心運營成本，能源效率也是需要重點關注的領域。

資料中心電源的全球性標準也繼續朝著更高效的方向發展。OCP 開放計算專案 3.0 進一步最佳化硬體來降低能耗，80 Plus 白金和鈦金認證要求，以及歐盟的節能化設計指令標準 (ErP) Lot 9 項目的法規也在不斷發展 (表 1)。Lot 9 的下一更新已經安排在 2026 年 1 月。

電源架構的演變

隨著處理器和伺服器功率增加，資料中心的每個機架也使用更多電源。隨著發展趨勢朝向更高功率密度，現時資料中心每個模組需要 2-4 kW。[i] 在

第一代 12 V 系統中，這一功率意味著必須處理更高的電流。要向伺服器提供 1 kW 的功率，傳統的 12 V 架構需要提供 83 A 的電流。為了控制 I^2R 損耗並解決安全問題，需要在此類系統的線束中使用更多的銅。

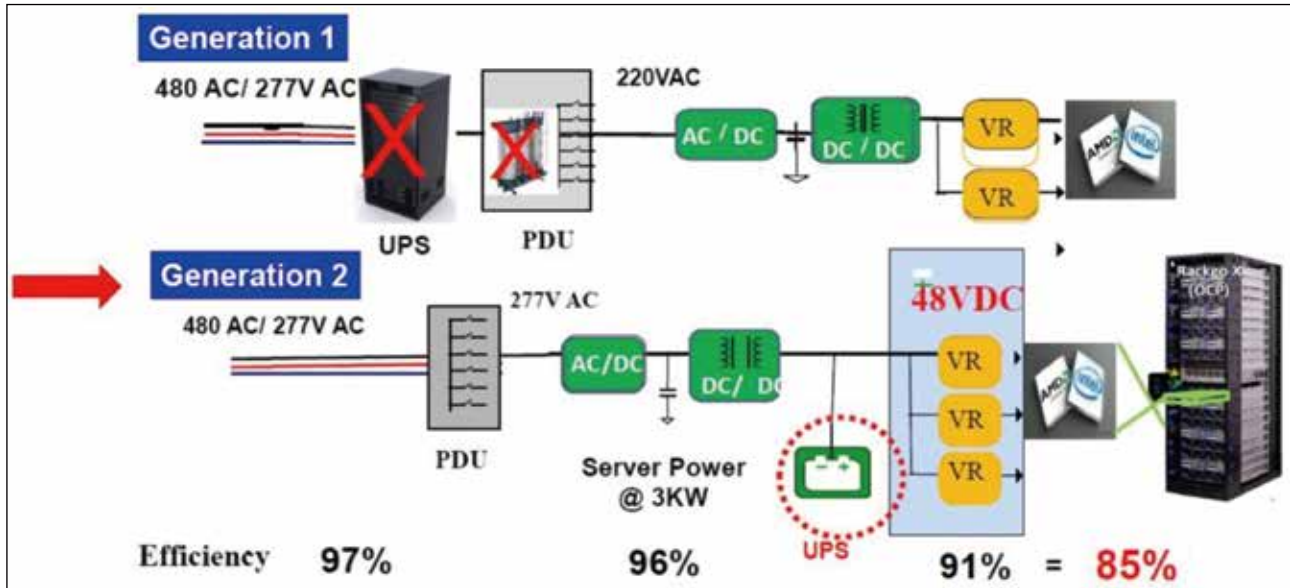
效率提升 1% 就可以使資料中心節省數千瓦的功率，而第二代電源架構採用 48 V (圖 1)， I^2R 損耗降低至十六分之一，同時仍低於 UL-60950-1 標準的 60 V DC 安全超低電壓 (SELV) 限制，超過這個限制就需要採取另外的絕緣、放置空間和測試。為了滿足新的能效要求，企業的資料中心電力方面因此開始採用 48 V 架構。

第 2 代機架系統通常採用個別的 2-4 kW 電源模組設計，每個機架使用以 48 V DC 電源充電的小型不斷電供應系統 (UPS)，取代了第 1 代大規模高壓 UPS 和配電單元 (PDU)。AC-DC 和 DC-DC 電源不僅為每塊伺服器主機板供電，還會為 UPS 電池充電。由於將第 1 代中的負載共用和冗餘移除，導致每個電源需在接近滿負載 (100%) 的情況下運行。

表 1：LOT9 和 80 PLUS 的要求類似，80 PLUS 鈦金應用要求 PFC 峰值效率超過 98.5%。

| Requirement | Output/Load | Efficiency | | | | Power Factor | | | | 80 Plus | |
|-----------------------|-------------|------------|-----|-----|------|--------------|-----|------|------|---------------------|-----------------|
| | | 10% | 20% | 50% | 100% | 10% | 20% | 50% | 100% | 230 V non-redundant | 230 V redundant |
| Lot 9 (March 2020) | Multi | — | 88% | 92% | 88% | — | — | 0.90 | — | Gold | Gold |
| | Single | — | 90% | 94% | 91% | — | — | 0.95 | — | Platinum* | Platinum |
| Lot 9 (Jan. 2023) | Multi | — | 90% | 94% | 91% | — | — | 0.95 | — | Platinum* | Platinum |
| | Single | 90% | 94% | 96% | 91% | — | — | 0.95 | — | Titanium | Titanium |

圖 1：第 2 代電力架構下的全球能源節約量，相當於 27 座 1 GW 核電廠發電量。



資料來源：Fred Lee，《新一代資料中心電源架構》。

伺服器 PSU 面臨的挑戰

除了上述變化帶來的挑戰之外，值得注意的是，OCP 3.0、開放式機架 V.2(ORV) 和比特幣 / 挖礦電源供應器 (PSU) 需要超過 2 kW，達到 3-4 kW 範圍。機架製造商持續要求小型和採用高度 40 mm 的低側高、高功率密度、有效和低成本的熱管理以及 EMI 設計，以實現高速開關和減少磁體的尺寸。而且，還要求使用安裝在印刷電路子板上的功率 MOSFET，以實現全數位控制和設計的靈活性。

在考慮使用半導體元件技術解決這些挑戰時，必須注意能隙、臨界電擊穿、電子遷移率和熱導率方面的差異，所有這些因素都會影響系統的峰值工作溫度、電壓、效率和熱管理要求。

半導體解決方案

儘管矽 (Si) 是最常見的技術，但與氮化鎵 (GaN) 和碳化矽 (SiC) 等寬能隙材料相比，矽的能隙較小，從而限制了工作溫度，其較低的擊穿電場限制了矽在較低電壓下的使用，而較低的熱導率也限制了功率密度。

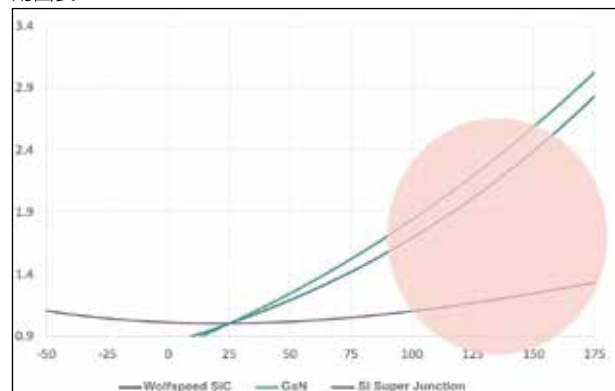
為滿足資料中心電源所需的高效率，功率元件的開關和傳導損耗都非常重要。當漏極和源極之間

的導通電阻 ($R_{DS(ON)}$) 較低，並且隨溫度變化較小時，傳導損耗 (即元件的 I^2R 損耗) 就會較低。

圖 2 顯示了正規化 $R_{DS(ON)}$ 與溫度的關係曲線，許多設計人員都考慮使用這些技術來滿足第 2 代資料中心 PSU 要求，包括 SiC、GaN 和 Si 超級結 (SJ)。值得注意的是，GaN 和 SJ 元件在 25°C 時都有較低的 $R_{DS(ON)}$ ，對於資料中心電源而言，這個溫度數據不切實際。由於 GaN 和 SJ 元件的數據表通常規定 $R_{DS(ON)}$ 在 25°C 時的值，這可能會誤導工程師，讓他們錯誤地假設這是正常設計時的系統工作溫度。

圖 2 中需要注意的另一個值得注意的特性是 $R_{DS(ON)}$ 隨溫度發生的變化。SiC 的曲線幾乎保持平

圖 2：顯示典型 MOSFET $R_{DS(ON)}$ (正規化) 隨溫度發生變化的通用圖表。



坦，但是其他技術的元件均顯示 $R_{DS(ON)}$ 顯著增加，但這種變化對 GaN 來說尤其明顯。由於設計人員必須在 120°C 至 140°C 的實際結溫下使用 $R_{DS(ON)}$ ，因此 $60\text{ m}\Omega$ SiC 元件的 $R_{DS(ON)}$ 將產生 $80\text{ m}\Omega$ 時的熱量，而 $40\text{ m}\Omega$ Si SJ 或 GaN 元件的 $R_{DS(ON)}$ 將產生遠遠超過 $80\text{ m}\Omega$ 時的熱量。

GaN 的低開關損耗 ≠ 低總損耗

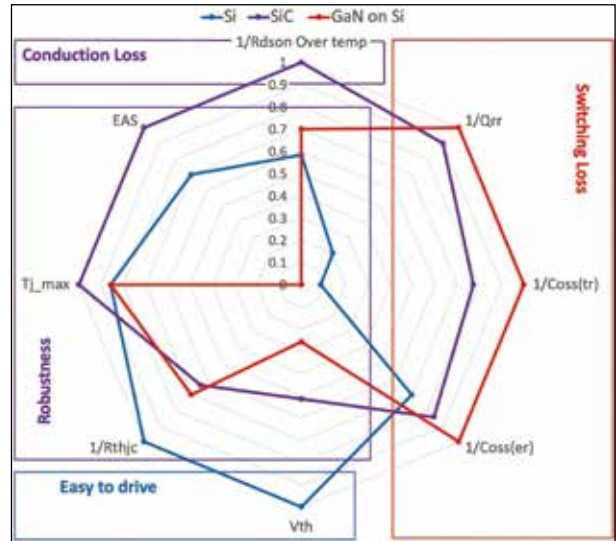
GaN 的高電子遷移率特性使其在非常高的開關頻率下具有出色的效率，這點已經得到公認。在本文討論的技術中，GaN 的開關損耗最低 (圖 3)。

Wolfspeed 在圖騰柱 PFC 模擬中將 $60\text{ m}\Omega$ SiC 元件與 $50\text{ m}\Omega$ GaN 元件進行了比較，發現儘管 GaN 在整個功率範圍內的開關損耗略低，但此一優勢都被隨功率增加及之後結溫升高而增加的導通損耗所抵消。這樣一來就需要將 GaN 元件製成較大尺寸，無論開關頻率如何，都可以補償更多的傳導損耗。

由於元件存在功率限制，GaN 測試不得不在 3 kW 停止。該研究清楚地顯示，在更高功率下 SiC 的總損耗顯著降低，特別是使用寬能隙半導體的高功率應用最令人矚目，例如資料中心。圖 4 對三種半導體技術的各種元件級性能規格進行了比較。

乍看之下，我們注意到 GaN 的優勢是：在連續導通模式 (CCM) 同步整流器中，反向恢復電荷 Q_{rr} 最低，開關損耗最低；在低死區時間、高頻率和高效率下，時間相關的輸出電容 $C_{oss}(tr)$ 最低；在硬開關拓撲中，能量相關的輸出電容 $C_{oss}(er)$ 最

圖 4：碳化矽在高電壓、高功率和高溫應用中表現出色，例如資料中心電源。



低，開關損耗最小。請注意，SiC 在這些屬性上緊隨 GaN 之後，而 Si 則明顯落後。

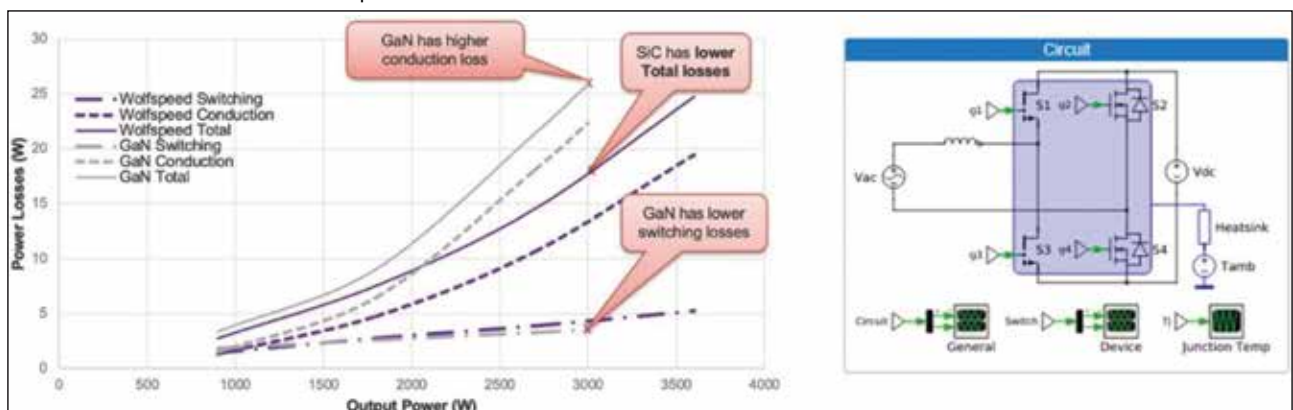
矽的優勢包括結殼熱阻 $R_{th(jc)}$ 最低，因此具有更好的熱性能，以及最高的閾值電壓 V_{th} ，可提供更好的抗雜訊能力，使 Si 元件更易於驅動。請注意，GaN 的 V_{th} 極低。

最大結溫 T_{j_max} 和雪崩能量、單脈衝 E_{as} 顯示元件的穩定性。如圖所示，SiC 最穩定，而 GaN 不具備 E_{as} 能力。

SiC 在整個溫度範圍內的 $R_{DS(ON)}$ 變化最小，因此高溫時的傳導損耗較低。在這種情況下，GaN 會顯著滯後，從而抵消低開關損耗帶來的所有優勢。

綜上所述，SiC 的優勢有助於在更高的功率水

圖 3：在圖騰柱 PFC 模擬中比較 Wolfspeed $60\text{ m}\Omega$ SiC 與 $50\text{ m}\Omega$ GaN 元件的研究。左邊是功率損耗與輸出功率的關係圖，右邊是電路圖。



準下，為企業資料中心和類似要求嚴苛的應用提供最高的效率和功率密度。

從封裝來看的觀點

由於 Wolfspeed 開發的 SiC 技術成功從 Si 轉換過來，因此許多常見的表面貼裝和通孔封裝也可用於 SiC 產品。然而，GaN 面臨封裝標準化帶來的獨特挑戰。

例如，GaN 通孔封裝並不常見，因為產品需要具有較低的寄生效應，並允許使用超高頻開關以最大程度利用材料的優勢。GaN 通常採用大型 QFN 或客製化封裝。大型 QFN 存在電路板等級的可靠性問題，客製化封裝缺乏多源可用性，分包商的加工能力也不足。

GaN 帶來的功率元件封裝挑戰不止於此。其他常見問題還包括：

■凱爾文源極引腳 (Kelvin source pin) 在 SiC 中受到廣泛採用，可減小驅動回路雜散電感，實現更好的開關控制，但在串接式 GaN 中並不可行，因為其內部電容以及串接的低壓 MOS 等寄生參數無法應對。共源極無法消除，共源共閘 GaN 僅限於 TO-247-3(三引腳)封裝，其中閘極振盪的脆弱性限制了開關速度。

■市場上的一些客製化封裝非常薄，限制了散熱器的可用空間。

■市場上的另一種客製化封裝具有頂部冷卻，這需要使用具有高導熱性的熱介面材料 (Tim) 實現元件

圖 5：Wolfspeed 的 TOLL 封裝明顯小於標準的 TO-263，並且支援低成本表面貼裝。



散熱。

■另一種用於 GaN 的無引線 (TOLL) 封裝將閘極和凱爾文源極引腳放置在不同於標準 Si 的方向上，這使得從後一種技術進行轉換變得很麻煩。

隨著市場轉向高功率密度設計和更嚴格的空間限制，無引線 (TOLL) 封裝具有高度低、尺寸小的優勢，其無引線封裝會降低引線電感，否則會成為高頻操作中的一個問題。這種封裝的漏極焊盤面積更大，解決了小封裝散熱性能問題。

對於資料中心和伺服器電源市場而言，TOLL 是一種相對較新的封裝方式。然而，Wolfspeed 正開發這一方向的产品來支持該市場，例如用於資料中心和伺服器電源的新型 TOLL 封裝。

系統級比較

與基於 Si 的 H 橋相比，基於 SiC 的 CCM 圖騰柱 PFC 不僅具有更高的效率，而且在相同或更低的成本下具有更高的功率密度。不同技術之間的效率比較清楚地表明，雖然基於 SiC 和 GaN 的 CCM 圖騰柱 PFC 可以實現 99% 以上的效率，但 GaN 僅在非常輕的負載下具有效率優勢。如前所述，GaN 的 $R_{DS(ON)}$ 隨溫度的變化要大得多 (圖 2)，這導致其效率曲線在較高功率或負載下急劇下降。因此，在資料中心等需要全天候或接近全天候滿負載運行的應用中，GaN 無法滿足效率要求。

另一方面，SiC 在半負載時的效率與 GaN 相似，在滿負載時效率更高 (圖 5)。

從更廣泛的角度來看，包括 SiC 和 GaN 基於 CCM 圖騰柱 PFC 的功率密度、元件數量和相對成

圖 6：碳化矽是圖騰柱 PFC 的最佳選擇，尤其是對於高可靠性應用而言更是如此。

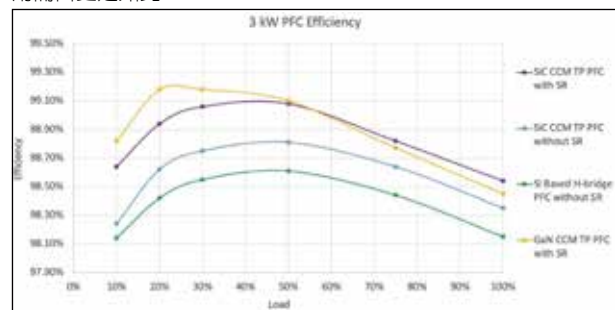


表 2：基於 SiC 和 GaN 的無橋 PFC 的拓撲結構和元件分析。

| | # PFC Choke | # Power Semiconductor | Power Density | Peak Efficiency | Cost | # Control | # Gate Drive |
|-----------------------------------|-------------|-----------------------|---------------|-----------------|---------|-----------|--------------|
| SiC CCM Totem Pole Semi-BL PFC | 1 | 4 | Highest | 98.8% | Medium | 2 | 2 |
| SiC CCM Totem Pole bridgeless PFC | 1 | 4 | Highest | 99.1% | High | 3 | 3 |
| GaN CCM Totem Pole Semi-BL PFC | 1 | 4 | Highest | 98.8% | High | 2 | 3 |
| GaN CCM Totem Pole bridgeless PFC | 1 | 4 | Highest | 99.2% | Highest | 3 | 4 |
| GaN CRM Totem Pole bridgeless PFC | 2 | 6 | Medium | 99.1% | Highest | 4 | 5 |

本 (表 2)，我們注意到在高功率密度應用中，SiC 不僅在效率方面優於 GaN，而且在閘極驅動複雜性、控制和成本方面也優於 GaN。

在對不同公司的寬能隙元件設計的另一項比較中，Wolfspeed SiC 顯示出明顯優勢 (表 3)。需要注意的一些要點是：

- 許多現有的參考設計要求實現不切實際的散熱管理，並限制了設計的靈活性。
- 由於 $R_{DS(ON)}$ 的溫度係數較高，基於 GaN FET 的圖騰柱設計在滿負載時效率較低。
- 正如預期的那樣，SiC 的低 $R_{DS(ON)}$ 溫度係數使 Wolfspeed 的設計從半負載到滿負載呈現出近乎平坦的效率曲線。
- 雖然 SiC 和 GaN 可滿足 2-4 kW 範圍內的無橋

表 3：市場上寬能隙參考設計的競爭分析。

| | Peak Efficiency | Full-Load Efficiency | HF Switch | LF Switch | Height (mm) | Power Density (W/in ²) | Efficiency Standard | Physical Standard | Comments |
|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|-------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------|--|
| Company A 2.6kW | 99.14% | 98.7% | G566516B 32mΩ GaN | DXFH60N65X2 | 40 | 78 | 80+ Titanium/ ErP Lot9 | None | SMD GaN |
| Company B 2.5kW | 99.2% | 98.5% | IGO60R070D1 70mΩ GaN | IP765R033G7 | 45 | / | 80+ Titanium/ ErP Lot9 | None | eGaN, limited to 2.5kW by 70 mΩ |
| Company B 3kW | 98.9% (50% load) | 98.5% | IMZA65R048M1H 65mΩ GaN | IPW60R017C7 (SJ MOS) | 40 | 32 | 80+ Titanium/ ErP Lot9 | OCPv3 | PFC SiC primary & Si secondary, LLC Si. No daughter card. |
| Company C 4kW | 99% | 98.55% | GAN041-650WSA 41mΩ GaN | STY139N65M5 | 50 | / | 80+ Titanium/ ErP Lot9 | None | Cascode GaN |
| Company D 3.6kW | 97.7% | 97.1% | SCTW35N65GZV 55mΩ GaN | TN3050H-12GY | 57 | / | 80+ Titanium/ ErP Lot9 | None | SiC, SCR, low efficiency |
| Company E 4kW | 98.73% | 98.57% | LMG3410R050 50mΩ GaN | STY139N65M5 | 35 | 123 | 80+ Titanium/ ErP Lot9 | None | GaN, interleaved, switching at 115 kHz (in CE bnad=nd=) |
| Company F 3.3kW | 99% | 98.55% | TP65H050WS 50mΩ GaN | STY139N65M5 | 50 | / | / | None | Cascode GaN |

PFC 要求，但高傳導損耗使 GaN 散熱設計在 4 kW 以上面臨挑戰。

- 為滿足 CE 的 EMI 要求，參考設計的系統頻率限制在 45-47 kHz 和 60-67 kHz 範圍內，將諧波保持在 150 kHz 以下，這就抵銷了 GaN 的低開關損耗優勢。

Wolfspeed 的 3.6 kW 解決方案

Wolfspeed 的全新 3.6 kW 圖騰柱 PFC 參考設計 (表 3，最後一行) 旨在解決資料中心和伺服器電源挑戰，在半負載時效率超過 99%，滿負載時效率超過 98.5%，達到 80 Plus 鈦金和 ErP Lot 9 要求。

該設計還提供了一定的靈活性，可以犧牲部分高效率以降低成本，但同時仍能滿足上述效率標準

(表 4)。低成本選項用二極體取代設計中低頻 (LF) 管腳的兩個 MOSFET，同時保留高頻 (HF) 管腳的

表 4：WOLFSPEED 的 3.6 KW 設計中四 MOSFET 和雙 MOSFET 選項的效率和成本比較。兩個 MOSFET。

| | 4 x MOSFETs | 2 x MOSFETs in HF leg + 2 x Diodes in LF leg |
|-------------------|-------------|--|
| MOSFET cost % | 55.6% | 27.8% |
| Diode cost % | 0.0% | 8.7% |
| Gate drive cost % | 37.0% | 18.5% |
| PCB, Heatsink | 3.7% | 3.7% |
| Assembly cost | 3.7% | 3.7% |
| Efficiency @ 50% | 99.1% | 98.6% |
| Efficiency @ 100% | 98.9% | 98.5% |
| Total cost 100% | 100.0% | 62.4% |

雙子板設計概念使客戶能夠根據其系統設計優先順序靈活選擇合適的選項。

在開發此類解決方案時，Wolfspeed 利用其豐富經驗，開發出市場上經過最廣泛現場測試的 SiC 和基於 SiC 的 GaN 各類解決方案產品組合。Wolfspeed 的半導體團隊最為瞭解這兩種技術的優勢和未來潛力，只有 Wolfspeed 才能開發出最適合任何特定應用的技術。CTA

固緯電子推出新一代掌上型數位電表一掌

專業電子量測儀器製造商固緯電子 (GW Instek) 宣佈，推出新一代掌上型數位電表 GDM-500 系列。除了是電機電子工程師日常工作的隨身儀器外，亦能成為一般居家生活中的簡易基本測量工具。只要一機在手，量測功力無窮。

GDM-500 系列除了延續 GDM300/400 系列省電的自動關機功能、旋轉檔位的切換開關、簡單且便於操作的按鍵設計之外，更全面加入 NCV (Non-Contact Voltage) 功能，方便工程師於戶外進行量測時，僅需使用 NCV 的非接觸式測量功能，即可快速讀取電壓數據。

此外，工程師在面臨待測物的電壓 / 電流皆未知的測量情況時，最擔心電壓 / 電流會超過電表量測數值，造成電表直接損毀。因此，GDM-500 系列也全面加入聲音 / 視覺警報，只要電壓 / 電流超過電表量測數值，電表就會立即示警，避免工程師因誤用而產生儀表損壞的問題。

GDM-500 系列共有四種型號，分別為 GDM-541、GDM-533、GDM-532、GDM-531，GDM-541/533/532 具備真均方根值 (true RMS) 功能，可不受訊號影響，使測量值更為精準；GDM-541/533 另設有 Analog Bar 與 USB 功能，Analog Bar 可模擬指針擺動幅度，讓數值更為清晰且易於辨識，而 USB 介面設計可讓工程師更易於與電腦連結，減少作業時間。另外，GDM-541 還特別增加 AC + DC 的電壓測量功能，可更真實還原訊號的真實樣貌。

GDM-500 系列的基本功能可與桌上型數位電表相比，包含：以保險絲保護電流輸入、自動換檔、工作週期等功能，讓工程師不再受限於桌上型數位電表的定點量測，一台輕便的掌上型數位電表，即可在移動中完成高精確度的測量需求。