以整合式 GaN FET 和雙側冷卻功能，在 48V 降壓轉換器中實現高功率密度

Matthew Bowers
Systems engineer, power design services

簡介

隨著汽車、工業及資料中心系統持續採用 48V 配電架構，對於精巧且高效率、能支援高輸出電流並同時縮小方案尺寸的 DC/DC 轉換器之需求日益增加。整合式氮化鎵 (GaN) 電源轉換器可透過減少切換損耗和封裝寄生效應來滿足上述需求，相較於傳統的矽基解決方案，可實現更高的功率密度。

隨著轉換器功率密度增加，熱管理已成為關鍵的設計考量。本文探討採用整合式 GaN 功率積體電路 (IC) 的 48V 至 12V 四相同步降壓轉換器，並示範設計師如何運用雙面冷卻和印刷電路板 (PCB) 熱擴散來管理高負載運作時的功耗。

用於高功率密度轉換的整合式 GaN

矽金屬氧化物半導體場效電晶體 (MOSFET) 技術因其普及性與經過實證的性能，成為電源轉換器設計的基礎。然而，隨著轉換器功率位準和功率密度需求持續增加，傳統矽基方案在切換損耗和封裝寄生效應方面所面臨的挑戰也日益嚴峻。整合式 GaN 功率 IC 將高速 GaN 功率 FET、閘極驅動器以及控制電路結合在單一封裝中，並減少寄生電感同時簡化轉換器實作，藉此克服這些限制。GaN 更優異的切換能力也能在更高的切換頻率下運作，可縮減磁性和電容元件所需的尺寸，同時加快控制迴路的響應速度。

減少 GaN 功率 FET 和整合式閘極驅動器之間的寄生電感，也可改善切換暫態的控制，減少不必要的振鈴和相關切換損耗。這種改善後的切換行為有助於減少電磁干擾 (EMI)；這對於在高迴轉率下運作的高密度電源轉換器來說是一項重要考量 [1]。

本文中的四相轉換器設計採用 TI **LMG708B0** 整合式 GaN 功率多晶片模組 (MCM) IC，可支援 48V 至 12V 降壓轉換的效率和功率密度需求。

散熱挑戰和雙面冷卻

整合式 GaN 功率 IC 可提升轉換器效率並縮小解決方案尺寸，然而將功耗集中在小型封裝中，會增加熱密度和熱通量。因此，若要充分發揮整合式 GaN 的性能潛力，不僅需盡量減少電氣損耗，也需提供有效的路徑，將熱能從元件傳輸到周邊環境。在傳統的 PCB 冷卻實作中，元件產生的熱能必須透過封裝傳導至 PCB，此時銅平面和熱通孔會將熱能擴散到周邊表面及局部環境。根據一般經驗法則，採用自然對流冷卻時，每瓦耗散功率約需 $1in^2$ 的冷卻面積。因此，充分發揮 PCB 的熱擴散能力，是管理高功率密度轉換器元件溫度相當重要的一環。

新增雙面冷卻結構，可提供從 LMG708B0 封裝直接通往外部冷卻介面的並聯熱路徑。這個額外路徑可讓熱能經由 PCB 和雙面冷卻結構傳遞，降低整體接面至周圍熱阻。因此，頂部冷卻方法以 PCB 熱路徑為基礎，而不是完全將其取代，可提供額外的散熱能力，同時維持整合式 GaN 功率 IC 的精巧佔位面積。**圖 1** 是封裝熱流路徑的簡化示意圖。

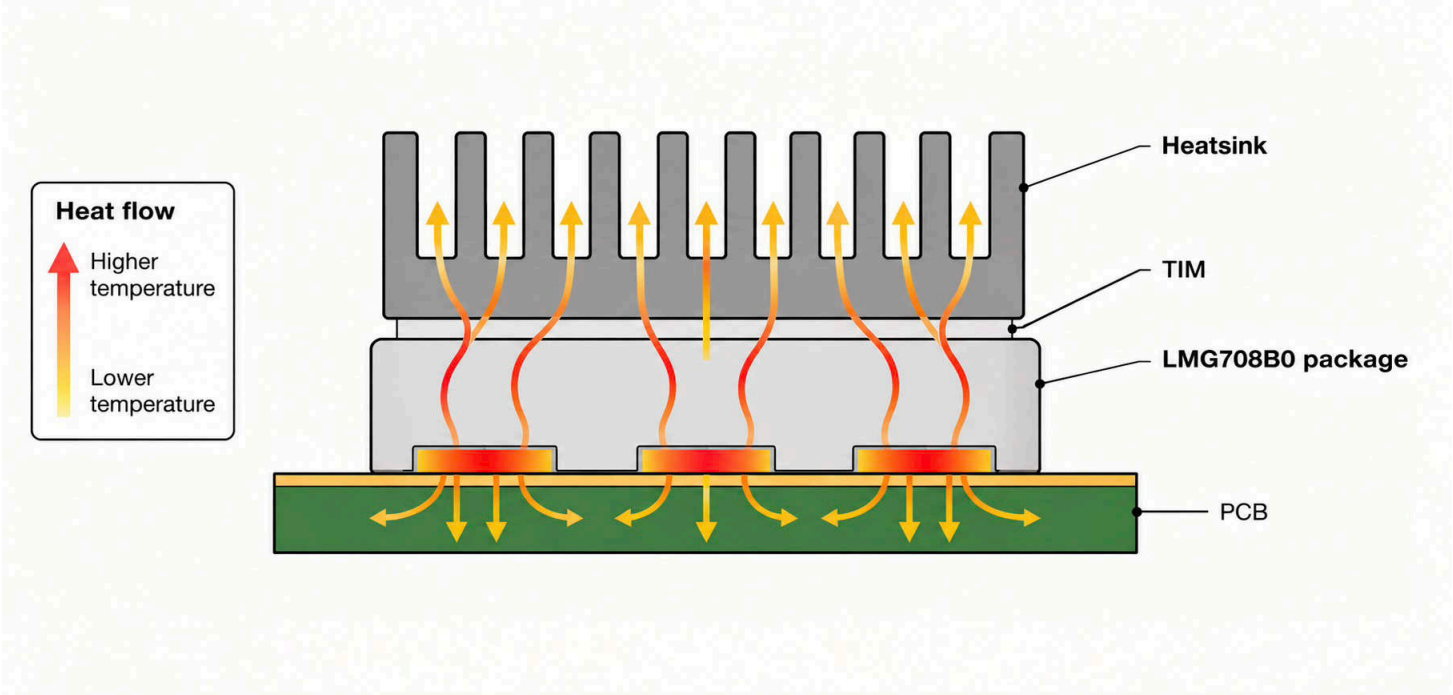


圖 1. *經由 LMG708B0 整合式 GaN 功率多晶片模組封裝的簡化熱流路徑*

GaN 轉換器 IC 設計與實作

採用具備整合式 GaN 的 **48V$_{IN}$、960W 四相降壓轉換器參考設計**，來評估以散熱為重點的設計考量。將負載分配至四個交錯的整合式 GaN 相位，可降低各相位的電流和功耗，同時滿足 48V 功率轉換所需的高輸出電流能力和精巧的解決方案尺寸。**表 1** 列出整體設計規格。

設計參數	值
輸入電壓	48V（36V 至 60V）
輸出電壓	12V
輸出電流	80A（電氣設計和散熱設計電流）
拓撲	四相同步降壓
切換頻率	400kHz（每一相）
功率級	四顆 LMG708B0 元件

設計參數	值
參考設計編號	PMP23595

表 1. *降壓轉換器設計規格*

為了評估流經封裝、冷卻結構及 PCB 的溫度分布和熱流，我們進行了熱模擬。熱模擬係使用 Ansys Icepak® 熱建模軟體工具建立。**圖 2** 展示在無氣流的 25°C 環境溫度下，四相降壓轉換器於滿 960W 輸出，且四顆 LMG708B0 元件各分配 6.29W 功耗時的穩態熱模擬。功耗的計算方式是在 25°C 的環境溫度條件、滿 960W 輸出條件下取得參考設計的總損耗，並減去周邊被動元件產生的損耗，只保留 LMG708B0 元件產生的損耗。元件功耗相當於四相總功耗的 25.16W。四相的模擬封裝溫度約為 108°C，仍遠低於 LMG708B0 元件 135°C 的建議外殼溫度。

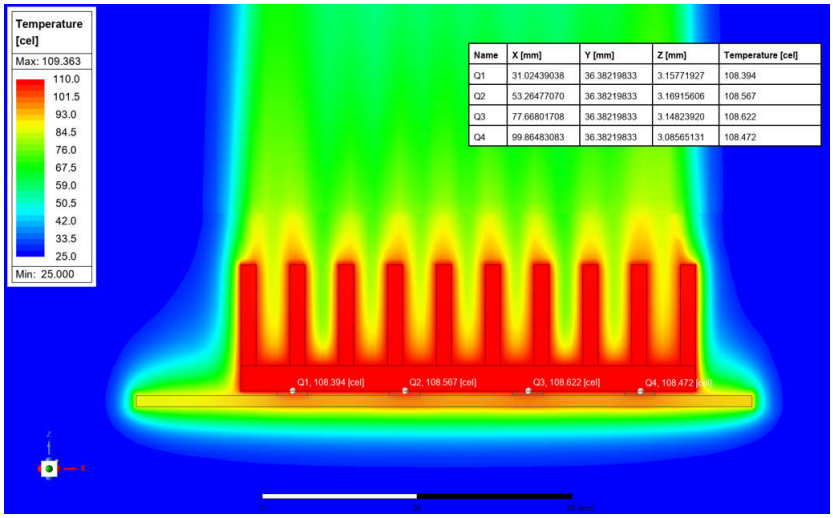


圖 2. *具備雙面冷卻結構的四個整合式 GaN 功率級熱模擬*

此模擬也展示從整合式 GaN 元件經由雙面冷卻架構和 PCB 的熱路徑。然而，此模擬僅為最終硬體實作的近似結果。模型中的散熱器幾何形狀和最終散熱器略有不同，而且未納入 LMG708B0 封裝和散熱器之間所用的熱介面材料 (TIM)。TIM 會引入額外的外殼至散熱器熱阻抗，可能會影響雙面冷卻路徑的整體散熱性能。因此，模擬溫度可作為熱參考，用以與本文後續討論的實測轉換器性能進行比較。

實驗評估

用來評估轉換器性能的操作負載範圍為 48V 輸入和 12V 輸出。**圖 3** 顯示實測效率與對應功率損耗隨輸出電流變化的關係。同時呈現這兩項數值，可更完整地檢視轉換器性能。效率反映功率轉換的有效性，而功率損耗曲線則代表轉換器必須耗散的熱負載。為了充分發揮雙面冷卻封裝的效果，在資料擷取期間安裝了散熱器，而不使用額外的氣流。本文後續將討論散熱器和測試配置的相關詳細資訊。

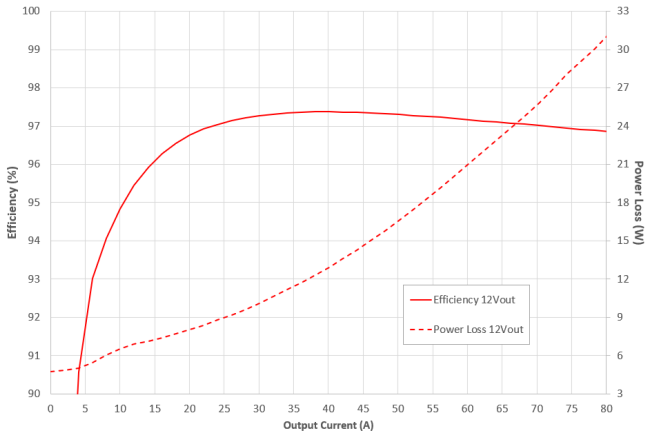


圖 3. *實測效率與功率損耗對輸出電流的關係*

在較輕負載下，和電感磁芯損耗、閘極驅動器及其他控制相關損耗相關的相對固定損耗，佔處理功率的比例較高。隨著輸出電流增加，這些固定損耗相對於輸出功率佔比變小，效率隨之提升，並且在接近 40A 時達到峰值。超過此點後，電流相依損耗逐漸成為主要來源，因為電阻傳導損耗大致上會隨著電流的平方 (I^2R) 增加。因此，功率 IC、電感器及高電流 PCB 銅路徑中的傳導損耗會隨著負載電流快速增加，導致轉換器接近滿載時效率逐漸降低。

雖然從峰值效率到滿載，效率僅下降 0.5%，但對應的功率損耗會增加 18.2W。絕對功率損耗的增加代表精巧轉換器佔位面積內的熱負載顯著增加，也凸顯了為功率級與周邊元件提供有效散熱路徑的重要性。

實測功率損耗資料也為 **图 2** 中的散熱模擬提供對照背景。此模擬設定每個 LMG708B0 IC 耗散 6.29W，在 80A 滿載操作點時，對應四相的 25.16W。在實測 80A 操作點，轉換器總功率損耗為 31.2W。這些數值之間的差異代表分散在其他轉換器元件中的損耗，主要是電感器、電流感測分流電阻器，以及 PCB 電流路徑，同時也反映熱模型中所採用的假設。儘管如此，比較結果顯示總熱負載的相當大部分與四個整合式 GaN 功率 IC 相關，可使用專屬的雙面冷卻來補充經由 PCB 的熱擴散。

散熱性能

為了呈現封裝級溫度分布和雙面冷卻方法的有效性，我們在兩個穩態操作條件下評估散熱性能。如 **图 4** 所示，第一個量測是在移除散熱器後、輸出電流 50A 的條件下進行，使熱像儀能夠直接觀察四個 LMG708B0 封裝及其周圍的 PCB。在此操作點，四相架構可提供 600W 的輸出功率，同時耗散約 16.6W 的實測總功率損耗。觀測到的最高溫度約為 97°C，高溫集中在功率級區域周邊。

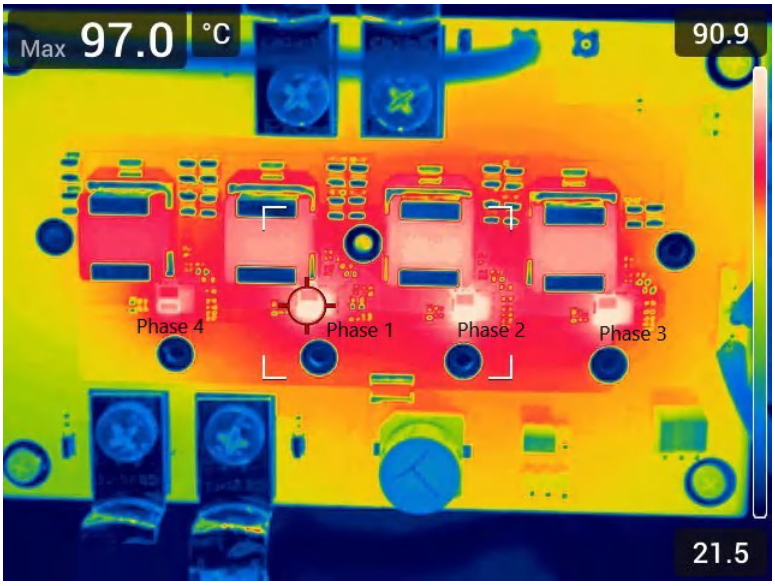


圖 4. *50A 負載下的紅外線熱影像（不含散熱器）*

隨後，在安裝散熱器的情況下，於滿 80A 負載條件下評估轉換器，以充分發揮雙面冷卻結構的效果。散熱器由鋁製成，底座尺寸為 10.72 公分（4.22 英寸）x 2.70 公分（1.06 英寸），高度為 1.61 公分（0.63 英寸）。此外，散熱器有 7 片 2.54 公分（1.00 英寸）高的散熱鰭片，可從底座延伸。散熱器的設計旨在提供簡單有效的方式，經由雙面冷卻封裝將熱能從 IC 帶離。大多數的應用，尤其是汽車領域，會採用較大的散熱器（例如電子控制單元 (ECU) 的外殼），或是設計更完善的冷卻結構，以進一步提升性能。散熱器和 LMG708B0 元件之間所用的 TIM 是 T-WORK9000，厚度為 1mm、導熱率為 20W/m-K。在此操作點，轉換器提供 960W，相當於大約 31.2W 的轉換器總功率損耗。由於散熱器覆蓋整合式 GaN 封裝，因此 **圖 5** 所示的熱影像主要是說明外部冷卻結構與周邊轉換器的溫度分布。讓轉換器在 960W 下維持穩態運作約 20 分鐘，達到熱平衡後，拍攝其熱影像。

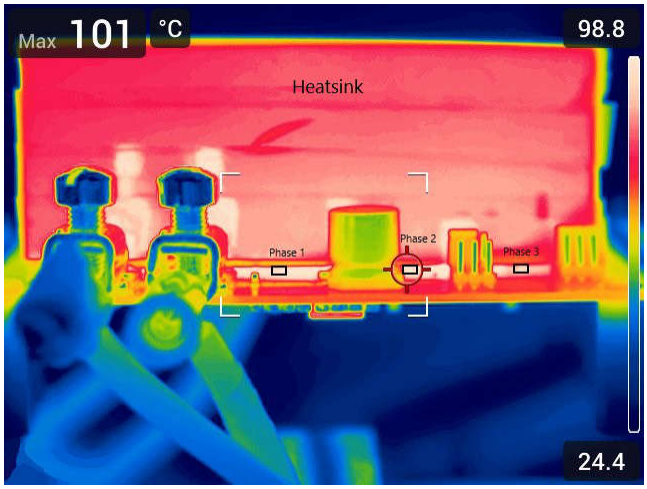


圖 5. *80A 負載下的紅外線熱影像（裝有散熱器）*

兩項量測合併來看，可呈現轉換器設計中所納入的互補熱路徑。**圖 4** 中的 50A 量測可直接觀測功率級和 PCB 溫度分布，而 **圖 5** 中的 80A 測量值則可評估在最大操作條件下的完整冷卻方案，並說明雙面冷卻結構的有效性。這些結果和 **圖 2** 中提供的熱模擬相輔相成；此熱模擬針對 80A 滿載條件進行建模。**圖 5** 展示功率級區域的局部畫面，可看出每個 IC 的溫度大

約為 101°C。量測更準確的外殼溫度時，採用熱耦合方式，將導線置於主要 LMG708B0 元件上方、但位於 TIM 與散熱器下方。主要的 LMG708B0 裝置外殼溫度為 105.4°C。**圖 6** 顯示量測主要 IC 外殼溫度所用的配置。

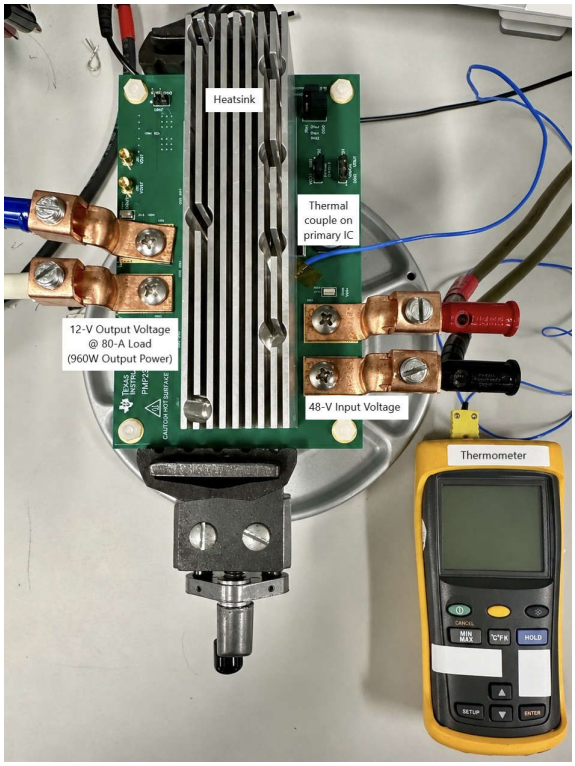


***圖 6.** 散熱評估的測試配置*

這些結果和熱模擬結果一致，顯示雙面冷卻結構的重要性。此外，使用更大或更可靠的冷卻系統，或是加裝風扇來提供氣流，都可降低溫度，進而實現更優異的系統性能。

結論

高功率密度轉換器必須在整個開發流程中考量電氣和散熱性能。整合式 GaN 功率 IC 雖可提升效率和功率密度，但要發揮這些優勢，仍須審慎設計轉換器架構、PCB 佈局以及散熱管理。

本文介紹的 48V_{IN} 至 12V_{OUT} 四相同步降壓轉換器設計，展示在整體轉換器設計中整合雙面冷卻可如何支援高效率，同時提供有效路徑來管理高負載時的功耗。若同時考量電氣性能、功率損耗及散熱行為，可為高電流 48V 電源轉換應用實現精巧又可靠的整合式 GaN 功率轉換器。

作者簡介

Matthew Bowers 是 TI 電源設計服務團隊的系統工程師，致力為汽車應用開發電源解決方案。Matthew Bowers 在 2023 年取得美國德州理工大學電機工程學士學位。

參考資料

1. 德州儀器。2016 年 3 月。「**透過整合式驅動器最佳化 GaN 性能**。」德州儀器白皮書，編號 SLYY085。存取日期：2026 年 9 月 22 日。

其他資源

- 如需深入了解 48V 多相應用的最佳化，請閱讀「**電源秘訣 #151：使用 GaN 提高 48V 輸入多相降壓轉換器的效率**」一文。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

Icepak® is a registered trademark of ANSYS, Inc.
所有商标均为其各自所有者的财产。

© 2026 Texas Instruments Incorporated

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES “AS IS” AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI’s products are provided subject to TI’s Terms of Sale, TI’s General Quality Guidelines, or other applicable terms available either on ti.com or provided in conjunction with such TI products. TI’s provision of these resources does not expand or otherwise alter TI’s applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025