利用集成 GaN FET 和双侧冷却实现 48V 降压转换器的高功率密度

Matthew Bowers
Systems engineer, power design services

简介

48V 配电架构在汽车、工业和数据中心系统中的持续采用推高了对紧凑、高效率 DC/DC 转换器的需求，这些转换器需要能够支持高输出电流，同时更大程度地减小解决方案尺寸。集成氮化镓 (GaN) 功率转换器通过降低开关损耗和封装寄生参数来满足这些要求，从而相比传统硅基解决方案实现更高的功率密度。

随着转换器功率密度的提高，热管理成为关键的设计考量。本文探讨了一款采用集成 GaN 功率集成电路 (IC) 的 48V 转 12V 四相同步降压转换器，并展示了设计人员如何利用双侧冷却结合印刷电路板 (PCB) 散热，在高负载运行下管理功率耗散。

用于高功率密度转换的集成 GaN

硅金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 技术因其可用性和经过验证的性能，一直是功率转换器设计的基础。然而，随着转换器功率水平和功率密度要求不断提高，传统的硅基实现在开关损耗和封装寄生参数方面面临着日益严峻的挑战。集成 GaN 功率 IC 通过将高速 GaN 功率 FET、栅极驱动器和控制电路组合在单个封装内，解决了这些限制，在降低寄生电感的同时简化了转换器实现。GaN 更高的开关能力还支持在更高的开关频率下工作，从而可以减小所需的磁性元件和电容元件尺寸，同时实现更快的控制环路响应。

降低 GaN 功率 FET 与集成栅极驱动器之间的寄生电感还能改善对开关转换的控制，减少不必要的振铃及相关开关损耗。这种改善的开关行为有助于降低电磁干扰 (EMI)，这是在高压摆率下工作的高密度功率转换器的一个重要考量 [1]。

本文介绍的四相转换器设计使用 TI **LMG708B0** 集成 GaN 功率多芯片模块 (MCM) IC，以满足 48V 转 12V 降压转换的效率和功率密度要求。

散热挑战与双侧冷却

集成 GaN 功率 IC 可以提高转换器效率并缩小解决方案尺寸，但将功率耗散集中在小型封装内会增加热密度和热通量。因此，要充分发挥集成 GaN 的性能潜力，不仅需要最大限度地降低电气损耗，还需要提供将热量从器件传递到周围环境的有效途径。在传统的 PCB 冷却实现中，器件产生的热量必须通过封装传导到 PCB，再由铜平面和散热过孔将热量扩散到周围表面和局部环境。作为一般经验法则，自然对流冷却可能每瓦耗散功率需要约 $1in^2$ 的冷却面积。因此，在高功率密度转换器中，最大限度地提高 PCB 的散热能力是管理器件温度的关键部分。

增加双侧冷却结构可提供一条从 LMG708B0 封装直接到外部冷却界面的并行热路径。这条额外路径允许热量同时通过 PCB 和双侧冷却结构传递，从而降低整体的结温至环境温度热阻。因此，顶侧冷却方法是在 PCB 热路径的基础上构建的，而不是完全取代它，在保持集成 GaN 功率 IC 紧凑尺寸的同时提供额外的散热能力。**图 1** 是封装热流路径的简化表示。

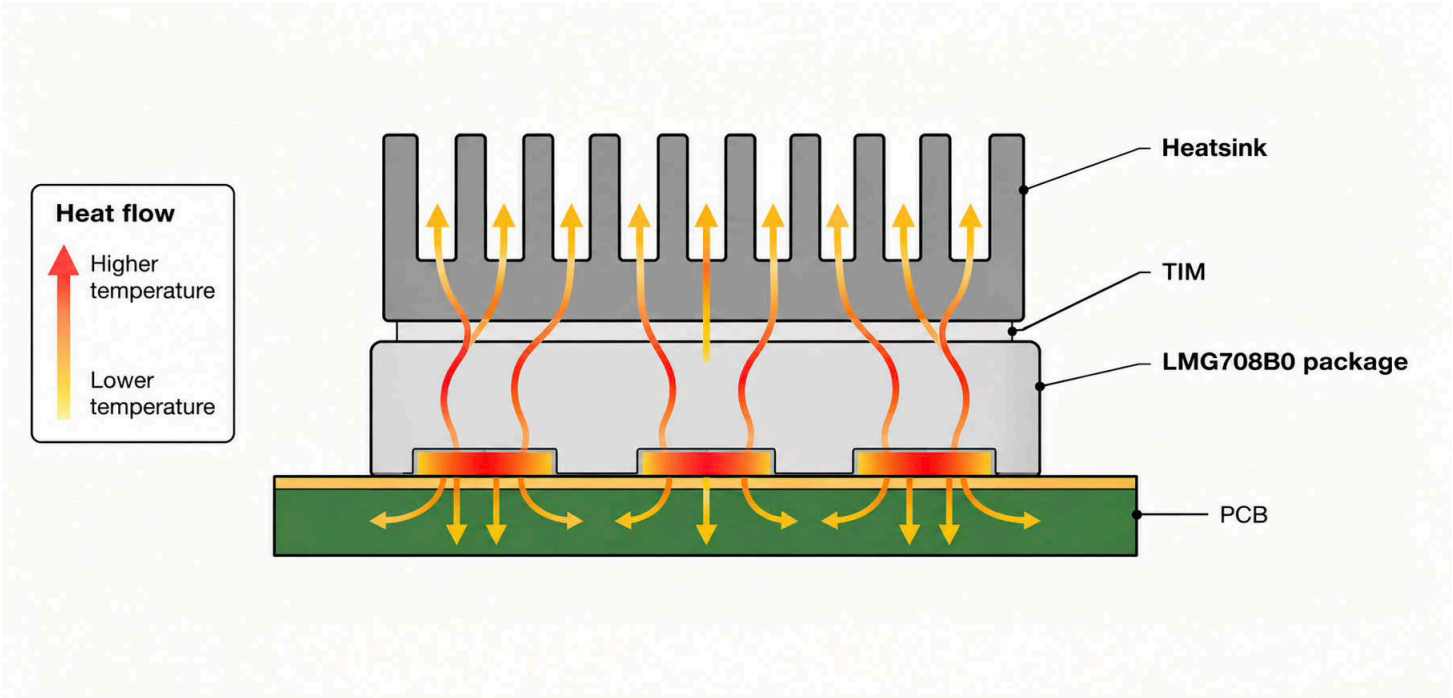


图 1. *通过 LMG708B0 集成 GaN 功率多芯片模块封装的热流路径简化图*

GaN 转换器 IC 设计与实现

通过**采用集成 GaN 的 48V$_{IN}$、960W 四相降压转换器参考设计**来评估以热为重点的设计考量。将负载分配到四个交错集成的 GaN 相位可降低每相的电流和功率耗散，同时支持 48V 功率转换所需的高输出电流能力和紧凑的解决方案尺寸。**表 1** 列出了整体设计规格。

设计参数	值
输入电压	48V（36 V 至 60V）
输出电压	12V
输出电流	80A（电气设计和热设计电流）
拓扑	四相同步降压
开关频率	400kHz（每相）
功率级	四个 LMG708B0 器件

设计参数	值
参考设计编号	PMP23595

表 1. *降压转换器设计规格*

为评估由此产生的温度分布以及通过封装、冷却结构和 PCB 的热流，进行了热仿真。该热仿真使用 Ansys Icepak® 热建模软件工具创建。**图 2** 显示了四相降压转换器在满载 960W 输出、环境温度 25°C、无气流条件下的稳态热仿真，四个 LMG708B0 器件各分配 6.29W 的功率耗散。功率耗散的计算方法是：获取参考设计在 25°C 环境温度条件下满载 960W 输出时的总功率损耗，减去周围无源器件产生的损耗，仅保留 LMG708B0 器件产生的损耗。器件功率耗散对应四个相位共 25.16W 的总功率耗散。仿真得到的封装温度在四个相位上约为 108°C，仍远低于 LMG708B0 器件建议的管壳温度 135°C。

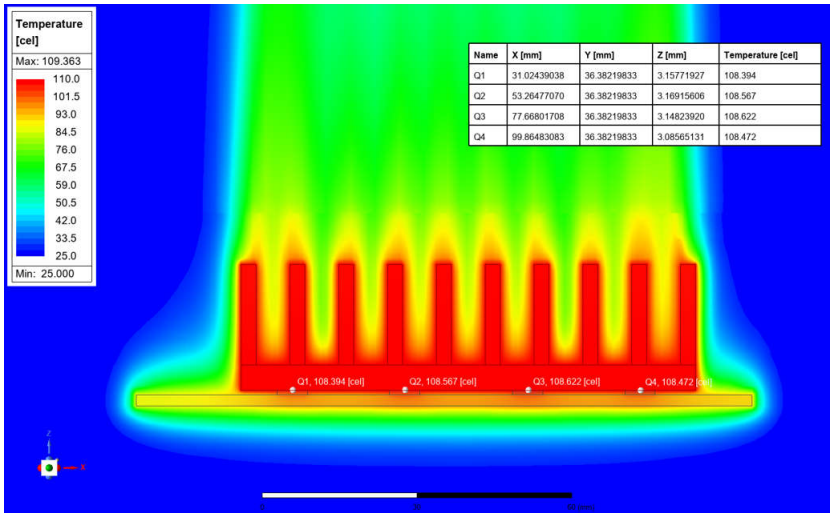


图 2. *具有双侧冷却结构的四个集成 GaN 功率级的热仿真*

该仿真还展示了从集成 GaN 器件通过双侧冷却结构和 PCB 的热路径。然而，该仿真代表的是对最终硬件实现的近似。建模的散热器几何形状与最终散热器略有不同，且未考虑 LMG708B0 封装与散热器之间使用的热界面材料 (TIM)。TIM 引入了额外的外壳至散热器热阻抗，可能影响双侧冷却路径的整体热性能。因此，仿真温度提供了一个热参考，用于与本文后续讨论的实测转换器性能进行比较。

实验评估

评估转换器性能的工作负载范围为 48V 输入、12V 输出。**图 3** 显示了测得的效率及相应功率损耗随输出电流变化的曲线。同时呈现这两个量可以更全面地反映转换器性能。效率表示功率转换的有效性，而功率损耗曲线则代表转换器必须耗散的热负载。为尽可能提高双侧冷却封装的效果，数据采集期间安装了散热器，且未使用额外气流。有关散热器和测试设置的详细信息将在本文后续部分讨论。

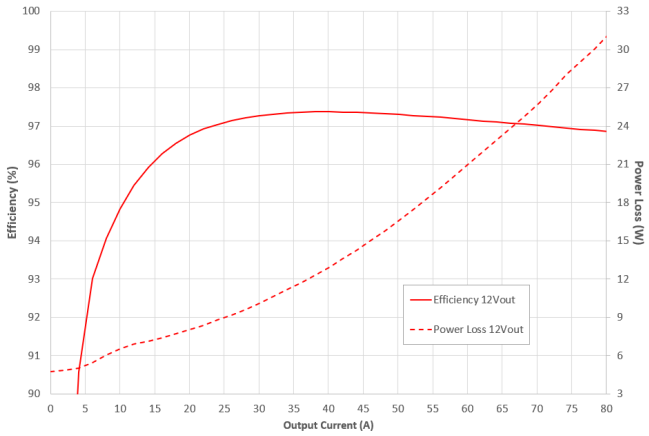


图 3. *测得的效率与功率损耗随输出电流变化曲线*

在较轻负载下，与电感磁芯损耗、栅极驱动器及其他控制相关损耗有关的相对固定损耗占处理功率的比例较大。随着输出电流增加，这些固定损耗相对于输出功率变得不那么显著，效率提高，在接近 40A 时达到最大值。超过该点后，电流相关损耗逐渐占主导，因为电阻性传导损耗大致随电流的平方增加 (I^2R)。因此，功率 IC、电感器和高电流 PCB 铜路径内的传导损耗随负载电流迅速增加，导致转换器在接近满载时效率逐渐下降。

尽管峰值效率与最大负载之间的效率仅下降 0.5%，但相应的功率损耗增加了 18.2W。绝对功率损耗的这一增加代表紧凑转换器尺寸内显著的热负载，并强调了为功率级和周围元件提供有效散热路径的重要性。

测得的功率损耗数据也为 **图 2** 中的热仿真提供了背景。仿真为每个 LMG708B0 IC 分配了 6.29W 的耗散，对应 80A 满载工作点下四个相位共 25.16W。在实测的 80A 工作点，转换器总功率损耗为 31.2W。这些值之间的差异代表分布在其他转换器元件（主要是电感器和电流检测分流电阻）以及 PCB 电流路径上的损耗，同时也反映了热模型中使用的假设。尽管如此，比较结果表明总热负载的很大一部分与四个集成 GaN 功率 IC 相关，支持使用专用双侧冷却来补充通过 PCB 的散热。

热性能

为了表征封装级温度分布和双侧冷却方法的有效性，在两种稳态工作条件下对热性能进行了评估。**图 4** 所示的第一次测量是在移除散热器、输出电流为 50A 的条件下进行的，使热像仪能够直接观察四个 LMG708B0 封装及周围 PCB。在该工作点，四相实现可提供 600W 输出功率，同时耗散约 16.6W 的总实测功率损耗。观测到的最高温度约为 97°C，最高温度集中在功率级区域附近。

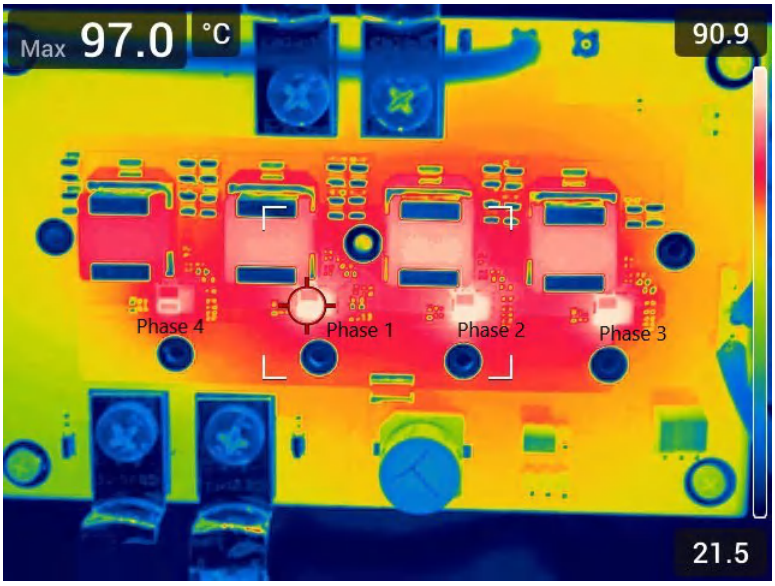


图 4. *50A 负载、无散热器时的红外热像图*

随后，在安装散热器的满载 80A 条件下对转换器进行了评估，以尽可能提高双侧冷却结构的效果。散热器由铝制成，底座尺寸为 10.72 厘米（4.22 英寸）x 2.70 厘米（1.06 英寸），高度为 1.61 厘米（0.63 英寸）。此外，散热器有七个高 2.54 厘米（1.00 英寸）的散热片从底座延伸出来。该散热器旨在以一种简单而有效的方式，通过双侧冷却封装将热量从 IC 导出。大多数应用，尤其是汽车领域，将采用更大的散热器（例如电子控制单元 (ECU) 的外壳）或更优化的冷却结构，从而实现更好的性能。散热器与 LMG708B0 器件之间使用的 TIM 为 T-WORK9000，厚度 1mm，导热率为 20W/m-K。在该工作点，转换器提供 960W，对应约 31.2W 的总转换器功率损耗。由于散热器覆盖了集成 GaN 封装，**图 5** 所示的热像图主要展示了外部冷却结构和周围转换器的温度分布。该热像图是在让转换器在 960W 下保持稳态运行约 20 分钟达到热平衡后拍摄的。

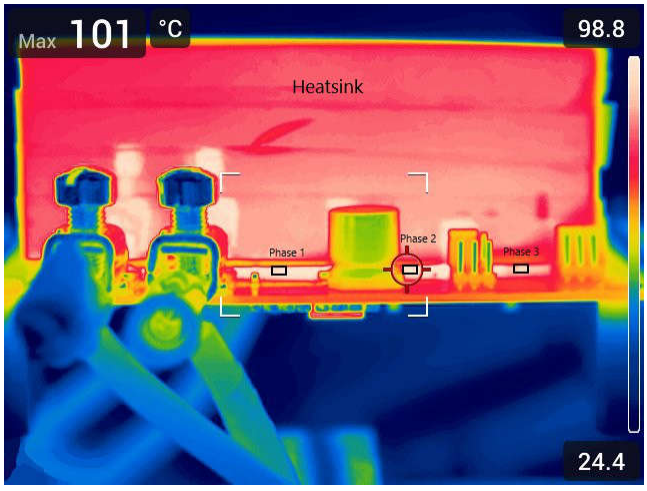


图 5. *80A 负载、安装散热器时的红外热像图*

两次测量共同展示了转换器设计中纳入的互补热路径。**图 4** 中的 50A 测量直接观察了功率级和 PCB 的温度分布，而**图 5** 中的 80A 测量则在最大工作条件下评估了完整的冷却实现，并展示了双侧冷却结构的有效性。这些结果补充了**图 2** 中展示的热仿真，该仿真对 80A 满载条件进行了建模。**图 5** 展示了功率级区域的概括，显示每个 IC 的温度约为 101°C。更准确的

管壳温度是通过热耦合方式测量的，将导线引线放置在主要 LMG708B0 器件顶部、但位于 TIM 和散热器下方。主要 LMG708B0 器件的管壳温度为 105.4°C。**图 6** 展示了用于测量主要 IC 管壳温度的设置。

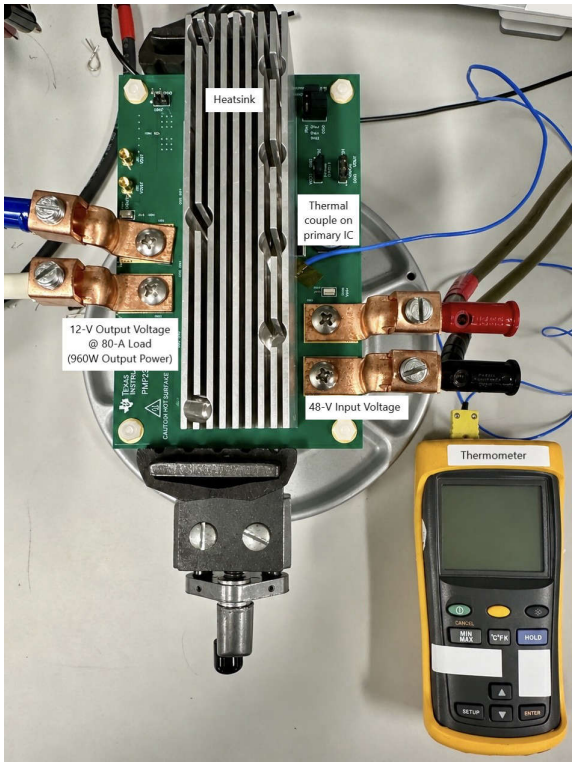


图 6. *热评估的测试设置*

这些结果与热仿真结果一致，表明双侧冷却结构的重要性。此外，使用更大或更可靠的冷却系统，或增加风扇提供气流，将实现更低的温度，从而实现更好的系统性能。

结语

高功率密度转换器在整个开发过程中需要同时考虑电气性能和热性能。虽然集成 GaN 功率 IC 能够提升效率和功率密度，但要实现这些优势，需要精心的转换器架构、PCB 布局和热管理。

本文介绍的 48V_{IN} 转 12V_{OUT} 四相同步降压转换器设计表明，在整个转换器设计中集成双侧冷却，可在支持高效率的同时，为高负载下的功率耗散管理提供有效路径。将电气性能、功率损耗和热行为一并考虑，可为高电流 48V 功率转换应用实现紧凑且可靠的集成 GaN 功率转换器。

关于作者

Matthew Bowers 是 TI 电源设计服务团队的系统工程师，专注于开发面向汽车应用的电源解决方案。他于 2023 年获得得克萨斯理工大学电气工程学士学位。

参考资料

1. 德州仪器 (TI)。2016 年 3 月。“**使用集成式驱动器优化 GaN 性能**”。德州仪器 (TI) 白皮书编号 SLYY085。2026 年 9 月 22 日访问。

其他资源

- 如需进一步了解 48V 多相应用的优化，请阅读文章“**电源设计小贴士 #151：利用 GaN 提高 48V 输入多相降压转换器的效率**”。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

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

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月