

汽车 650V GaN 功率级顶部冷却 QFN 12x12 封装的热设计和性能



Wenli Zhang, Fei Yang, Nathan Schemm, and Paul Brohlin

摘要

德州仪器 (TI) 为汽车级 LMG352x 系列 650V 氮化镓 (GaN) 功率级开发了一种新型顶部冷却四方扁平无引线 (ts-QFN) 封装。它具有与其底部冷却 QFN 对应器件 (LMG342x) 相同的 12mm x 12mm x 0.9mm 紧凑尺寸。这种新型 ts-QFN 表面贴装封装在其安装引脚的另一侧有一个裸露的铜质散热焊盘。通过将散热片或冷板直接附贴在封装顶部, 实现了热性能的增强, 同时不会出现印刷电路板引起的热障碍。在实现直接驱动和功能集成的同时, TI 的新型 ts-QFN 12x12 封装与竞争对手为分立式 GaN 器件开发的顶部冷却封装相比, 表现出了更低的器件结到系统冷却平面的热阻。利用顶部冷却配置, 可以为车载充电器和直流/直流转换器等汽车应用改善系统热性能和设计灵活性。

内容

1 引言	3
2 新型顶部冷却 QFN 12x12 (ts-QFN 12x12) 封装	4
3 顶部冷却配置和热设计注意事项	5
3.1 顶部冷却表面贴装型封装	5
3.2 热管理解决方案	6
4 热仿真模型和结果	8
4.1 ts-QFN 12x12 封装的仿真模型和结果	8
4.2 与其他顶部冷却封装的竞争分析	9
5 实验设置和 $R_{\theta JC/P}$ 测试结果	10
6 半桥评估板的热性能 (EVM)	12
6.1 采用冷板和散热器的 EVM 热设计	12
6.2 测试结果	12
7 总结	15
8 参考文献	16

插图清单

图 2-1. (a) ts-QFN 12x12 和 (b) QFN 12x12 封装的外观	4
图 3-1. 顶部冷却配置和热阻 (R_{θ}) 模型	5
图 3-2. 使用 (a) 胶带和 (b) 焊料层在 ts-QFN 12x12 上安装散热器	6
图 3-3. 使用 (a) 导热垫凝胶、(b) 导热垫和 (c) 导热硅脂/DBC 基板的 ts-QFN 12x12 封装的热管理解决方案	7
图 4-1. 热仿真模型: (a) 凝胶 TIM 和 (b) 焊盘 TIM	8
图 4-2. 采用 (a) 凝胶 TIM 和 (b) 焊盘 TIM 的 ts-QFN 12x12 封装的温度分布仿真结果	9
图 4-3. 650V GaN 器件不同顶部冷却表面贴装封装的仿真结果比较 R_{θ}	9
图 5-1. R_{θ} 测量的实验设置: (a) 横截面图示和 (b) 顶视图照片	10
图 6-1. 采用 (a) 冷板和 (b) 散热器的评估板组件 (LMG3522EVM-042) 的爆炸视图	12
图 6-2. (a) 采用散热器的 EVM 热性能测试装置以及 (b) 不同功率级别下实测 PCB 温度 (T_B) 和通过 $R_{DS,ON}$ 相关和 PWM 信号获取的 T_J 的比较	13
图 6-3. 采用冷板的 EVM 组件 (a) 前视图 (b) 后视图	13
图 6-4. 采用冷板时在 6kW 下的降压运行	14

表格清单

表 2-1. 汽车级 650V GaN 器件顶部冷却表面贴装封装的尺寸比较	4
---------------------------------------	---

表 3-1. 热阻 (R_{θ}) 参数列表, 单位 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).....	5
表 3-2. 不同封装类型的特性比较.....	6
表 4-1. 仿真模型组件的特性.....	8
表 5-1. 使用不同 TIM 测试的 $R_{\theta \text{ JC/P}}$ 实验结果.....	10
表 6-1. 不同冷却方法下测得的 R_{θ}	12

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

随着汽车电气化趋势日益盛行，对更小型、更可靠且更高效的电源转换单元（如车载充电器和高压直流/直流转换器）的需求呈指数级增长。与现有的基于硅（Si）的晶体管和另一种基于宽带隙半导体碳化硅（SiC）的电源开关相比，氮化镓（GaN）高电子迁移率晶体管（HEMT）能够更好地满足对高功率密度、高效率汽车系统的需求，这得益于其卓越的高频和高效开关能力，详情请参阅《[GaN 和 SiC 可提高电源能效](#)》和《[专用于在混合动力汽车/电动汽车中实现高频工作和稳健性的汽车类 GaN FET](#)》。GaN HEMT 需要优化的封装解决方案，以便更好地利用其卓越的开关特性并充分去除热能以保持系统性能和延迟器件寿命。德州仪器（TI）为汽车应用开发出了新一代 650V GaN 功率级（LMG352xRxxx-Q1），它将采用快速开关式 2.2MHz Si 栅极驱动器且带保护功能的高压 GaN 晶体管集成到了 12mm x 12mm x 0.9mm 尺寸紧凑型顶部冷却四方扁平无引线（ts-QFN）封装中，请参阅[产品发布资讯](#)。这种无引线 QFN 封装不仅可以减少寄生电感，而且在其顶部有一个外露的散热焊盘，能够直接从器件结向冷却组件散热，而不会受到贴装印刷电路板（PCB）的阻碍。新的顶部冷却 QFN 12x12 封装（ts-QFN 12x12）提供比其他热门表面贴装型封装更低的热阻（ R_{θ} ），使汽车设计师能够凭借更强大的设计灵活性，在简化热解决方案的同时使用更小的冷却系统。此外，集成数字温度报告功能支持就地系统监控，以实现主动热管理。本应用报告介绍了新开发的 ts-QFN 12x12 封装的热管理注意事项和性能。

2 新型顶部冷却 QFN 12x12 (ts-QFN 12x12) 封装

如图 2-1 中所示，新型 ts-QFN 12x12 封装与 TI 之前发布的底部冷却 QFN 12x12 封装具有相同的 12mm x 12mm 占位面积和 0.9mm 典型厚度。二者的主要区别在于外露铜质 (Cu) 散热焊盘的位置：顶部冷却封装的散热焊盘位于封装安装引脚的另一侧，而底部冷却散热封装的散热焊盘则位于 PCB 上其他表面贴装引脚的同一侧。使用顶部冷却封装，可以同时实施更有效的热管理解决方案和优化的电气设计。此外，ts-QFN 12x12 封装在引脚一侧具有可湿性侧面，可实现汽车制造商普遍要求的焊点质量控制自动光学检测。

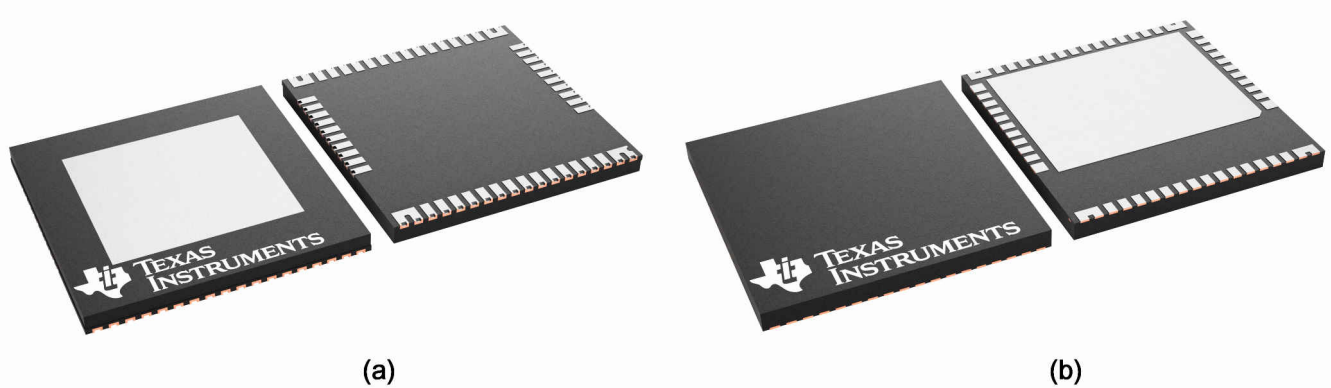
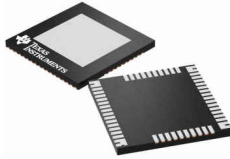
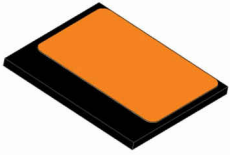



图 2-1. (a) ts-QFN 12x12 和 (b) QFN 12x12 封装的外观

顶部冷却为表面贴装封装提供了一种替代散热途径，这成为了许多制造商采用的日益流行的选择。表 2-1 比较了三种顶部冷却式封装的汽车级 650V GaN 产品的外形尺寸和散热焊盘尺寸。TI 的 ts-QFN 12x12 封装具有比竞争对手 A 的封装更大的外露散热焊盘，总体尺寸小于与 TI 具有相同散热焊盘面积的对方面积。虽然竞争对手的 GaN 产品是分立器件，但 TI 的 650-V GaN 功率级的驱动和保护功能集成到了同一封装中。后续部分将详细讨论封装和热分析。

表 2-1. 汽车级 650V GaN 器件顶部冷却表面贴装封装的尺寸比较

制造商	TI	竞争对手 A	竞争对手 B
封装	 ts-QFN 12x12	 嵌入式封装	 引线式封装
占位面积 (mm ²)	144	69	144
厚度 (mm)	0.9	0.7	2.5
裸露散热焊盘面积 (mm ²)	64	46	64

3 顶部冷却配置和热设计注意事项

3.1 顶部冷却表面贴装型封装

表面贴装型封装的冷却很有挑战性。传统的 QFN 及其他表面贴装型封装在其底部具有较低的热阻抗 (R_{θ})，而底部具有外露的铜质散热焊盘。从封装顶部进行冷却的效率不高，而底部的主要热流路径会干扰 PCB 上的电气布局。因此，为了优化底部冷却封装功率器件的性能，需要认真权衡热耗散通路和电气布线之间的设计。PCB 的高 R_{θ} 会成为此类热设计的主要限制因素。例如，目前已经使用了不同的板材料和/或结构，例如，铜镶嵌板和陶瓷镶嵌板、绝缘金属基板（参阅《GaN 逆变器使用 FR-4 和绝缘金属基板 PCB Inverter 之热比较》）来降低板及总 R_{θ} ，其成本高于标准 PCB。

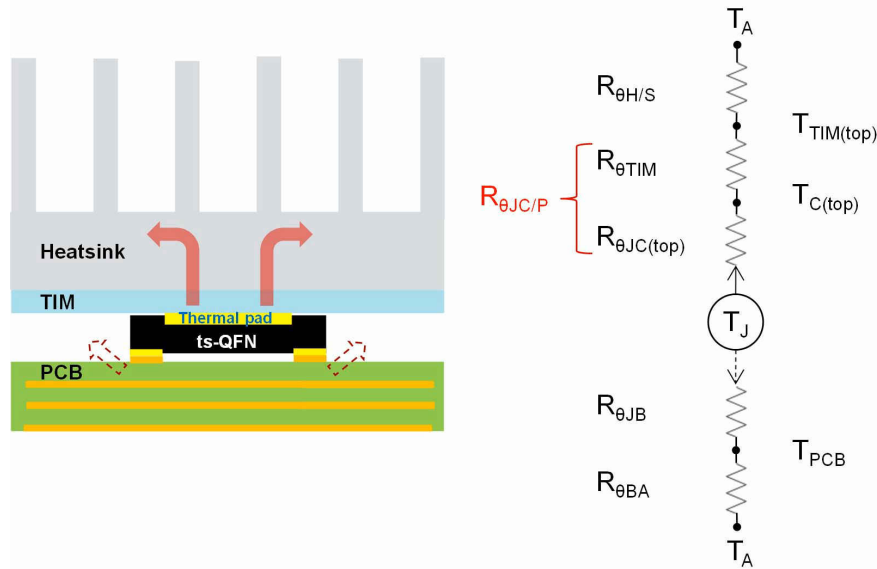


图 3-1. 顶部冷却配置和热阻 (R_{θ}) 模型

表 3-1. 热阻 (R_{θ}) 参数列表，单位 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

符号	说明
$R_{\theta JA}$	结至环境热阻
$R_{\theta JC(top)}$	结至外壳（顶部）热阻
$R_{\theta JC(bot)}$	结至外壳（底部）热阻
$R_{\theta BA}$	板对环境热阻
$R_{\theta JC/P}$	结至冷却平面热阻
$R_{\theta TIM}$	热界面材料 (TIM) 的热阻
$R_{\theta H/S}$	散热器的热阻

对于顶部冷却表面贴装型封装，通过将散热器或冷板直接安装到其外露的顶部铜质散热焊盘，并在中间放置一层热界面材料 (TIM)，可以轻松地去掉器件中的热量。图 3-1 使用一个模拟一维 R_{θ} 电路模型解释了这种冷却设计。大多数热量会通过 TIM 和散热器从封装耗散到环境中。各种 R_{θ} 参数（图 3-1 中列出的）的说明在表 3-1 中进行了总结。所定义的结至冷却平面热阻 $R_{\theta JC/P}$ 可以根据方程式 1 方便地计算出：

$$R_{\theta JC/P} = R_{\theta JC(\text{顶})} + R_{\theta TIM} \quad (1)$$

有关使用 $R_{\theta JC/P}$ 而非 $R_{\theta JC}$ （底部或顶部）或 $R_{\theta JA}$ 来评估系统层面封装热性能的详细说明，请参阅《600V GaN 功率级 QFN 12x12 封装的热性能》。

新开发的 ts-QFN 12x12 封装的热通路与 TO-247/220 等穿孔型封装相同，其热通路与 PCB 分离，但采用的是无引线封装，因此实现了明显更小的主体尺寸和更低的封装寄生电感。QFN 式封装所有四个侧面的引脚数都更高，

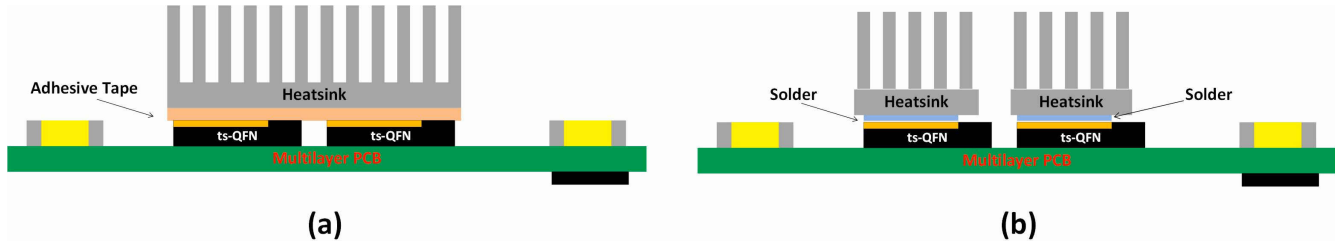
使系统能够将所需的功能集成到同一封装中。此外，表面贴装型封装能够在系统板上自动装配，从而节省制造成本。下面的表 3-2 对不同封装的特性进行了比较。

表 3-2. 不同封装类型的特性比较

封装	ts-QFN 12x12 (顶部冷却封装)	TOLL/D2PAK (底部冷却封装)	TO-247
机械制图			
封装主体尺寸	小 (130mm ³)	中 (265mm ³)	大 (1560mm ³)
热通路与 PCB 分离	是	否	是
典型寄生电感 (PKG + PCB 布线)	< 3 nH	> 5 nH	> 15 nH
驱动/功能集成的可用引脚数	> 50	< 8	3 或 4
自动装配	是	是	否

3.2 热管理解决方案

为了降低顶部冷却器件的结温 (T_J)，可以利用很多采用不同类型 TIM 和冷却组件的热管理解决方案。图 3-2 描绘了两个热设计示例，它们在贴装于多层 PCB 的 ts-QFN 12x12 封装中的两个 GaN 功率级上，具有散热器附加装置。其中一种设计使用绝缘胶带作为 TIM，将大型散热器连接到了两个器件的顶部。为了改善热性能，可以根据可用空间和所需压力选择合适的夹紧方法（例如，紧固螺钉、推针或夹子），配合使用高导热 TIM，如导热垫。另一种冷却方案是，将两个较小的散热器，通过直接焊接的方式分别粘合在每个器件的外露顶部铜质散热焊盘上。此焊点层的 R_{θ} 很低；因此， $R_{\theta JA}$ 主要取决于此设计中的散热器特性。在应用手册 SNOA946 和 SNOAA14 中，可以找到有关选择散热器/TIM 和夹紧方法的建议。


图 3-2. 使用 (a) 胶带和 (b) 焊料层在 ts-QFN 12x12 上安装散热器

对于电动汽车 (EV) 中使用的电源转换单元，冷板（而不是散热器）更常用于冷却，通过在系统中循环液体冷却剂来冷却有源电源开关和其他无源器件。根据不同的 TIM，图 3-3 中展示了采用冷板的 ts-QFN 12x12 封装的多种热设计方案：(a) 在冷板和顶部冷却封装之间使用就地固化的液体点胶导热垫凝胶 TIM。冷板基座表面与封装散热焊盘之间的固化凝胶层厚度由冷板支柱和基座的高度以及器件封装和焊料层的厚度控制。得益于 ts-QFN 12x12 封装 (0.9mm) 的薄型，导热垫凝胶可以在固化之前蔓延到侧面周围，以在使用时提供额外的冷却效果。紧固力只能施加在冷板支柱上，因此，会尽可能减少施加在封装和焊点上的法向应力。此外，可点胶凝胶材料能够很好地适应整个电路板的组件高度变化和表面平整情况，具有较高的容差。另一种可用于类似冷却配置的典型 TIM 是预固化的导热垫 (b)。一大片实心垫可以自动切割成所需的尺寸和形状，然后会被拾取并放置在冷板上进行组装。为了使相邻表面紧密接触，需要不断地施加压缩负荷来按压导热垫。压力越高，TIM 层就越薄，因而 R_{θ} 越低。但是，用力过度可能损坏封装并/或影响焊点完整性。在 (c) 中，ts-QFN 12x12 封装顶部焊接了一个直接粘合的铜质 (DBC) 基板。陶瓷层可同时提供高热导率和稳定的高压隔离性能。因此，可以在冷板和 DBC 基板顶部铜质层之间压缩一层薄的（小于 150 μm ）非绝缘导热油脂或相变材料，从而排出空气并贴合接触表面。这种设计在三个列举示例中表现出最优热性能，但缺点是陶瓷基板的成本较高，需要加以权衡。导热垫凝胶与焊盘 TIM 相比，凝胶更易于贴合粗糙表面且能够应对大型系统中间隙的变化，而后者在相同的 TIM 粘合线厚度下，通常具有较低的 R_{θ} 。就系统热设计而言，至关重要的是确保金属器件（例如，外露的 PCB 铜质焊盘/布线、冷板和螺钉）与高压器件之间的距离符合爬电距离和间隙的安全监管要求。

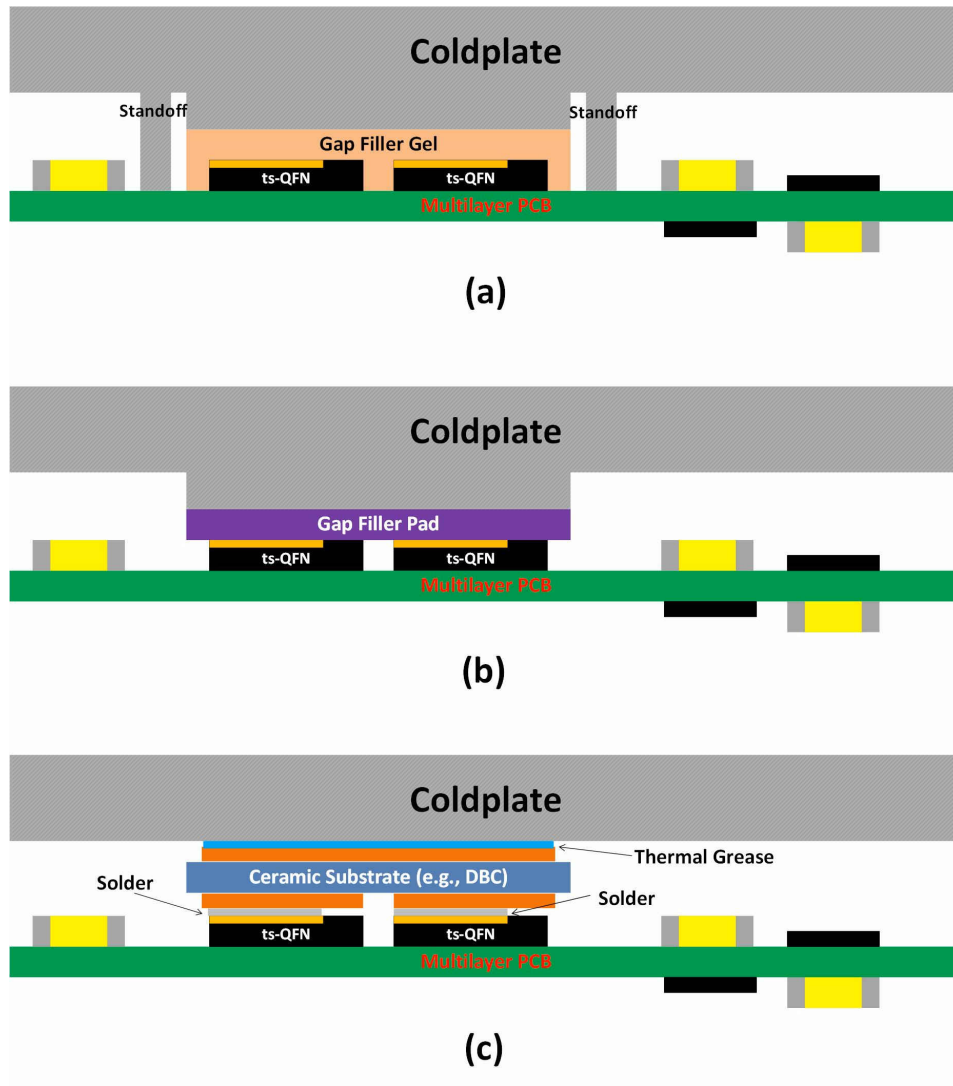


图 3-3. 使用 (a) 导热垫凝胶、(b) 导热垫和 (c) 导热硅脂/DBC 基板的 ts-QFN 12x12 封装的热管理解决方案

4 热仿真模型和结果

4.1 ts-QFN 12x12 封装的仿真模型和结果

使用 ANSYS 工具构建了两个有限元分析 (FEA) 仿真模型，以便评估采用导热垫凝胶和焊盘 TIM 的 ts-QFN 12x12 封装的热性能。图 4-1 显示了所生成模型的横截面图，并显示了与实验装置一致的热测试介质的结构。顶部冷却 QFN 12x12 封装被夹在 PCB 和冷板中间，其中封装和冷板之间插入了一层 TIM。聚合物薄膜和带有切口的铝 (Al) 框用作支柱，以界定 TIM 的厚度。对于使用凝胶 TIM 的设计，聚合物薄膜位于铝框下方，其中心开口与封装占位面积相同，即 12mm x 12mm。此模型与使用焊盘 TIM 的模型相比，凝胶不仅覆盖封装顶面，而且还覆盖周围四个侧面，这是对实际使用案例的模拟。表 4-1 总结了热建模中使用的主要器件的厚度和热导率。

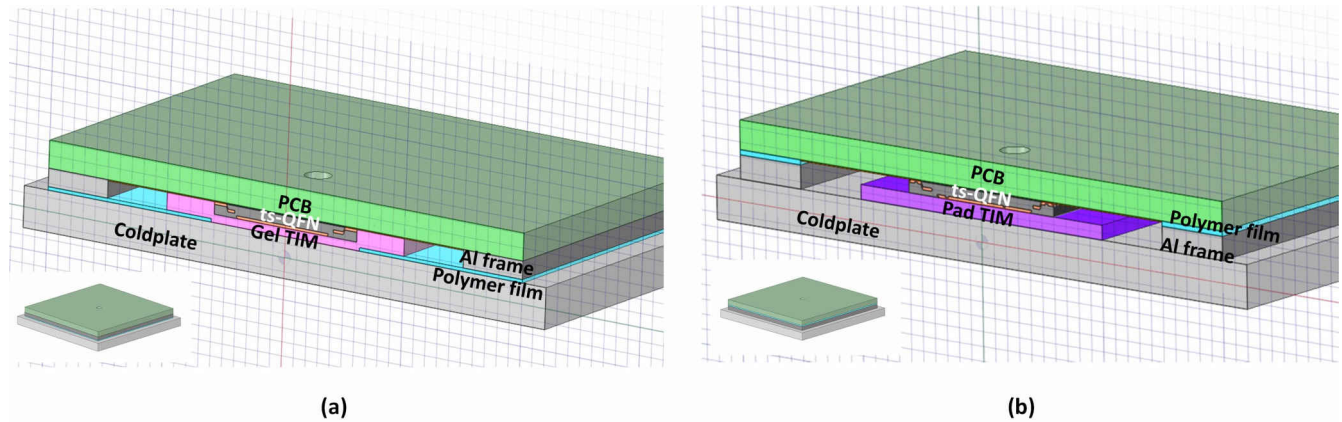


图 4-1. 热仿真模型：(a) 凝胶 TIM 和 (b) 焊盘 TIM

表 4-1. 仿真模型组件的特性

组件	厚度 (mm)	材料	热导率 (W/mK)
焊料	0.05	无铅焊料	50
PCB	2.4	FR4	0.3
TIM	0.9	导热垫	8
		导热垫凝胶	3.8
聚合物薄膜	0.25	聚酯薄膜	0.15
铝框	1.6	铝合金	160
冷板	2.5		

在对器件施加 10W 功率损耗并对冷板设置 30°C 恒定温度的条件下，执行了稳态 FEA 热仿真。在环境温度设置为 25°C 时，假设 PCB 表面有自然对流条件。采用 (a) 凝胶 TIM 和 (b) 焊盘 TIM 的 ts-QFN 12x12 封装的温度分布仿真结果 (a) 和 (b) 中分别显示了采用凝胶和焊盘 TIM 的封装（已除去塑封）的内部元件的温度分布仿真结果。 T_J 可以直接从仿真结果中获取，然后用于 $R_{\theta JC/P}$ 计算（按照下面所示的方程式 2）：

$$R_{\theta JC/P} = (T_J - T_{冷板}) / \text{功率} \quad (2)$$

计算出的 $R_{\theta JC/P}$ 为凝胶 TIM 3.62°C/W、焊盘 TIM 2.18°C/W。凝胶 TIM 的 $R_{\theta JC/P}$ 较高的原因是，仿真中所用凝胶的热导率为 3.8W/mK 的典型值，小于焊盘 TIM 8W/mK 的典型值。第 5 部分将讨论 ts-QFN 12x12 封装使用不同 TIM 时的实验测试结果。

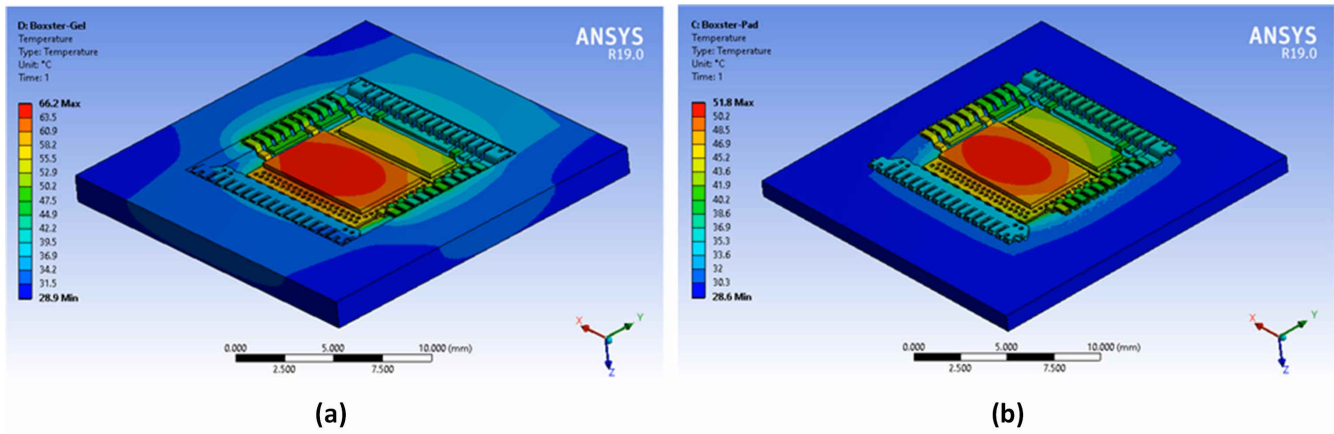


图 4-2. 采用 (a) 凝胶 TIM 和 (b) 焊盘 TIM 的 ts-QFN 12x12 封装的温度分布仿真结果

4.2 与其他顶部冷却封装的竞争分析

构建了类似的 FEA 热模型，并分析了竞争对手 650V GaN HEMT 的热性能，后者在顶部冷却封装中制造且具有类似导通电阻 ($R_{DS,ON}$)。如表 2-1 中所述，其他两种封装与 TI 的 ts-QFN 12x12 封装具有不同的外形和外露散热焊盘尺寸。根据热仿真结果，图 4-3 比较了这三种使用相同凝胶或焊盘 TIM 的不同 GaN 产品的 $R_{\theta JC/P}$ 计算值。结果明确表明，对于具有类似 $R_{DS,ON}$ (大约 30m Ω) 的器件，TI 的 ts-QFN 12x12 封装的 $R_{\theta JC/P}$ 值比使用凝胶或焊盘 TIM 的竞争对手封装低 20%-30%。因此，TI 顶部冷却 QFN 12x12 封装的 GaN 功率级能够比其他功率级耗散更多功率。竞争对手 A 的准芯片级嵌入式封装具有极小、极薄的顶部铜质焊盘，因此封装内的热扩散受到限制。因此，它的散热有效 TIM 面积较小，从而导致较高的 $R_{\theta TIM}$ 。竞争对手 B 的产品采用引线式封装，它的封装尺寸和散热焊盘尺寸与 ts-QFN 12x12 相同，之所以它的 $R_{\theta JC/P}$ 较高，是因为其芯片位置不在裸片附接焊盘的中心。此外，还对采用 TI ts-QFN 12x12 格式封装和竞争对手 A 的薄型外壳的 50m Ω 器件进行了另一项比较分析。这种新开发的 ts-QFN 12x12 封装在热性能方面仍然展现出了竞争优势。

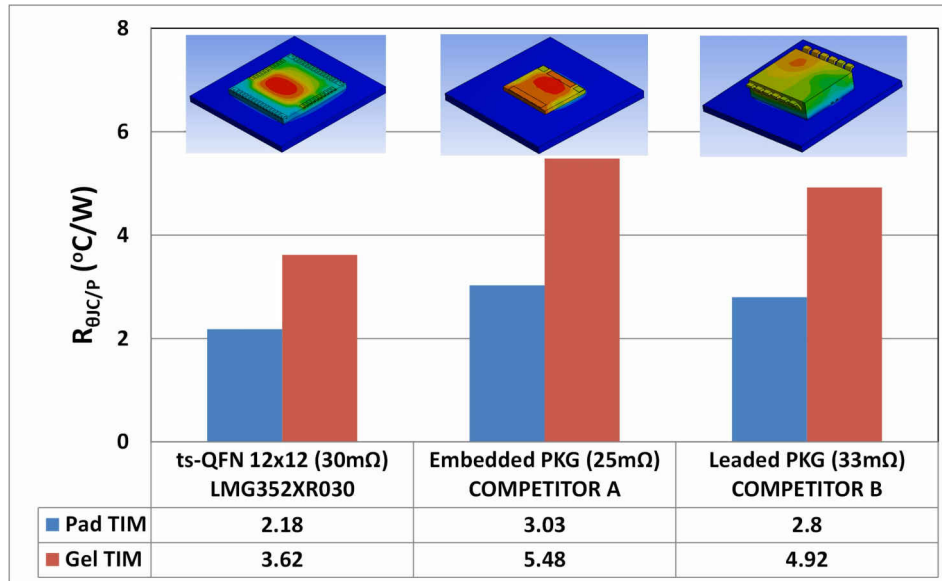


图 4-3. 650V GaN 器件不同顶部冷却表面贴装封装的仿真结果比较 R_{θ}

5 实验设置和 $R_{\theta JC/P}$ 测试结果

设计并实施了用于 R_{θ} 测量的热测试台装置，以便验证热仿真结果并比较在相同测试条件下使用不同 TIM 时的热性能。采用 ts-QFN 12x12 封装的 30mΩ LMG3522R030-Q1 被选作被测器件 (DUT)。正如概念图纸图 5-1 (a) 中所示，实验装置的装配方式与第 4 部分中所述的仿真模型相同。通过更换具有不同切口窗口尺寸的聚合物薄膜，能够使用相同的测试介质对凝胶和焊盘 TIM 进行测试。安装在 PCB 上的顶部冷却封装被反向固定在冷板上，所以这种配置使得通过红外摄像头直接检测封装表面温度非常困难。因此，在 PCB 中心位置钻了一个直径为 2mm 的穿孔，以便使用插入的热电偶监控封装外壳温度 ($T_{C(bot)}$)，散热焊盘的另一侧)。另一个热电偶尖端放置在冷板顶面下方 2mm 处，用于测量冷却平面温度 ($T_{C/P}$)。图 5-1 (b) 所示为实际台架测试装置的照片。关于冷却系统，采用了机加工冷板 (Hi-Contact 6-Pass, Aavid) 和连接的冷却装置 (6560M, PolyScience)，同时运行温度为 30°C 的冷却液。 $T_{C(bot)}$ 和 $T_{C/P}$ 由数据记录器 (OM-2041, Omega) 读取和记录。为了在封装内部产生可控损耗，使用直流电来加热器件结，并通过测量整个 DUT 的电压和电流来计算耗散功率。正如应用手册 SNOAA61 中所述， $R_{DS,ON} - T_J$ 相关拟合方程公式旨在使用相同的直接电流/电压结果来计算 T_J 。评估了采用 1mm 厚 (压缩后为 0.9mm 厚) 不同焊盘 TIM 和 0.9mm 及 0.6mm 厚凝胶 TIM 的 ts-QFN 12x12 封装的 $R_{\theta JC/P}$ 。

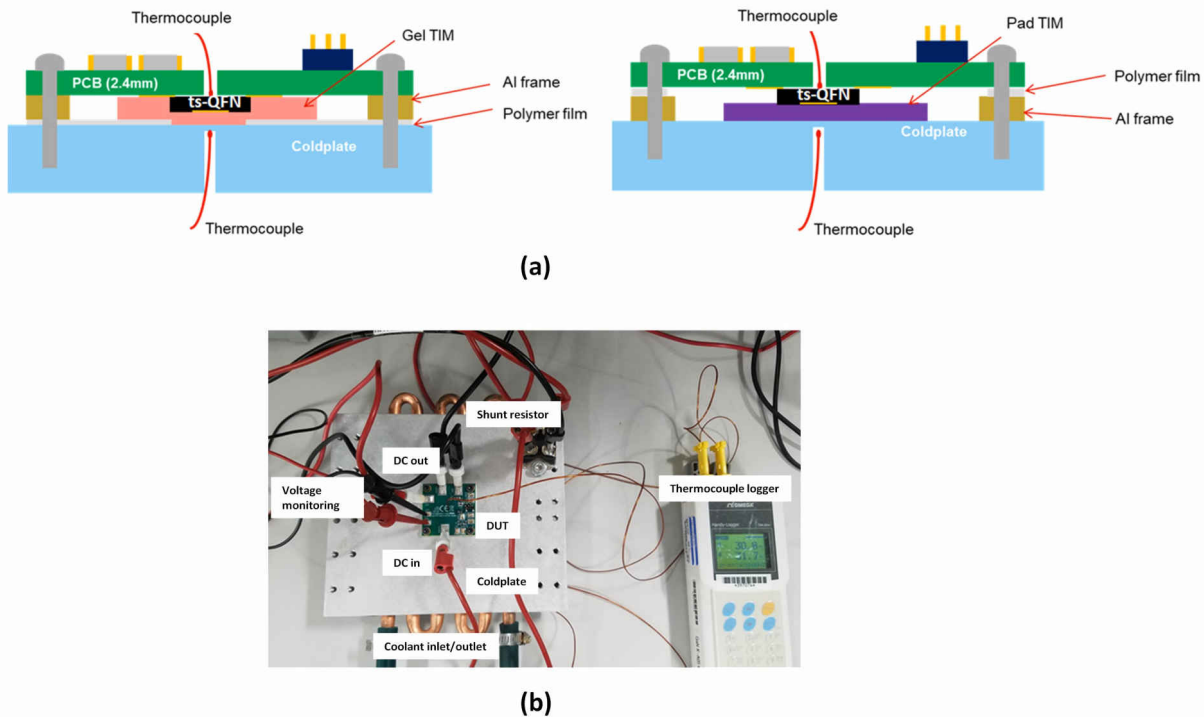


图 5-1. R_{θ} 测量的实验设置：(a) 横截面图示和 (b) 顶视图照片

$R_{\theta JC/P}$ 的所有测试结果 (使用 $R_{DS,ON} - T_J$ 拟合方程和测量的 $T_{C/P}$ 计算得出) 都在表 5-1 中进行了汇总。在热建模工作和实验测试中，均使用了 Fujipoly 的导热垫 TIM GR80A 和 LORD 的凝胶 TIM SC1500 作为基准材料。具体而言，采用 SC1500 凝胶和 GR80A 焊盘 TIM 的仿真 $R_{\theta JC/P}$ 值分别为 3.62°C/W 和 2.18°C/W；与对应的实验结果 3.72°C/W 和 2.27°C/W 相比，两种类型的 TIM 都存在不足 4% 的差异。仿真模型的准确性得到了验证，图 4-3 中展示的竞争分析也是如此。测试得出的 $R_{\theta JC/P}$ 略高可以通过元件变化 (例如，TIM 厚度变化) 和测量装置来解释，而仿真模型中没有考虑到这些变化。

表 5-1. 使用不同 TIM 测试的 $R_{\theta JC/P}$ 实验结果

TIM 类型	产品	数据表中的热导率 (W/mk)	厚度 (mm)	$R_{\theta JC/P}$ (°C/W)
导热垫	GR80A	8	0.9	2.27
	XLIM-HL	10		2.65
	T-Work9000	20		1.83

表 5-1. 使用不同 TIM 测试的 $R_{\theta JC/P}$ 实验结果 (continued)

TIM 类型	产品	数据表中的热导率 (W/mk)	厚度 (mm)	$R_{\theta JC/P}$ ($^{\circ}C/W$)
导热垫凝胶	SC1500	3.8	0.9	3.72
			0.6	2.95
	CGW4.5	4.5	0.9	3.38
			0.6	2.65
	TIA282GF	8.2	0.9	2.41
			0.6	2

如图 3-1 和方程式 1 中所示，顶部冷却封装的 $R_{\theta JC/P}$ 仅包括两个器件： $R_{\theta JC(top)}$ 和 $R_{\theta TIM}$ 。 $R_{\theta JC(top)}$ 通常低于 $0.5^{\circ}C/W$ ，这使得 TIM ($R_{\theta TIM}$) 的选择比底部冷却封装更为关键。其他市面有售的 TIM 的 $R_{\theta JC/P}$ 测试结果列在表 5-1 中。从 Sekisui 获得的 XLIM-HL 焊盘 TIM 显示的 $R_{\theta JC/P}$ ($2.65^{\circ}C/W$) 高于基准 GR80A 焊盘 ($2.27^{\circ}C/W$)，但它具有较低的介电常数，这会导致冷板和封装之间产生的寄生电容更小，对高频应用有利。此外，这种焊盘材料不含硅，适合非常重视吹气和渗油的使用案例。LiPoly T-Work9000 在其数据表上报告了达 $20W/mK$ 的极高热导率，这有赖于其 $1.83^{\circ}C/W$ 的 $R_{\theta JC/P}$ 最低测试结果。此外，当所有被测焊盘 TIM 处于相同压缩比下时，它的超软特性对封装产生了较低的压缩力。但根据经验，特定类型 TIM 的导热率越高，价格就越贵。为实现更高的性价比，做出选择时必须明智地进行折衷。测试了另外两种凝胶 TIM，包括 Sekisui 的 CGW4.5 ($4.5W/mK$) 和 Momentive 的 TIA282GF ($8.2W/mK$)，以与基准 SC1500 材料进行比较。所有三种产品都是双组分系统、含硅的导热垫凝胶。热性能比较显示数据表上报告的热导率值与实测 $R_{\theta JC/P}$ 数据之间具有一致性，TIM 热导率越高， $R_{\theta JC/P}$ 越低。TIA282GF 凝胶具备与焊盘 TIM 相当的热性能，可用作液体点胶凝胶的替代品，以便预固化导热垫。

6 半桥评估板的热性能 (EVM)

6.1 采用冷板和散热器的 EVM 热设计

评估板 EVM (LMG3522EVM-042) 包含两个采用半拓扑配置的 LMG3522R030-Q1 器件，构建了两种冷却解决方案：冷板和散热器。使用了一个小型定制冷板，用于封装热性能评估的相同冷却装置也可用于测试此热管理解决方案。再次选择了之前用于另一个采用底部冷却 QFN 12x12 封装的评估板 (LMG3422EVM-043) 的 35mm x 50mm x 20mm 椭圆翅片散热器 (UB3550-20B, Alpha Novatech) 和 12V 1.68W 直流风扇 (F-3010H12BIII-16, Cofan)，旨在冷却这一新的 EVM 板，并与其他使用冷板的解决方案进行比较。图 6-1 阐释了两个组件的爆炸图。两种设计都在冷却组件和 ts-QFN 12x12 封装之间使用相同的 0.5mm 厚 GR80A 焊盘 TIM。对于冷板版本，在铝冷板和 PCB 之间插入了一个塑料框以控制 TIM 的厚度，同时避免对封装施加过大的应力并提供更多的隔离保护。四个安装螺钉从 PCB 顶部拧紧，确保 PCB、塑料框和冷板之间无缝接触。在采用散热器的冷却设计中，使用四组推针和弹簧通过焊盘 TIM 向两个封装施加恒定的 20 psi 压力，它的变形厚度与冷板设计中使用的 TIM 相同。

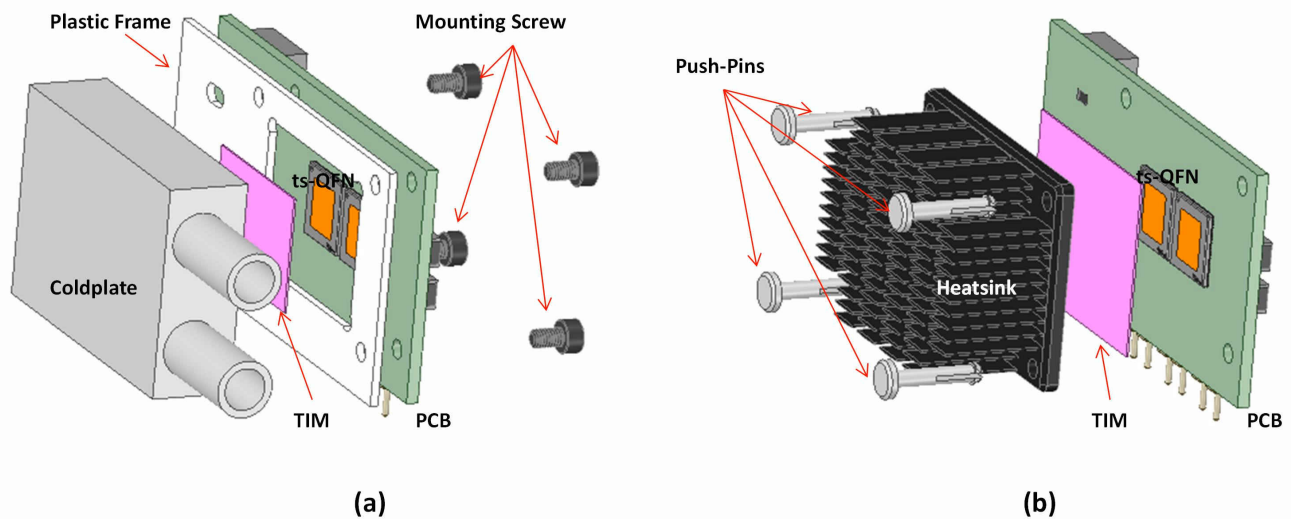


图 6-1. 采用 (a) 冷板和 (b) 散热器的评估板组件 (LMG3522EVM-042) 的爆炸视图

6.2 测试结果

对此评估板在两种运行条件下的热性能进行了评估：一种是仅加热单个器件（例如，降压转换器），另一种是两个器件同时消散等量的热能（例如，PFC）。冷板和散热器冷却系统都接受了测试。计算出的 $R_{\theta J \text{ 冷却剂}}$ 和 $R_{\theta JA}$ 结果显示在表 6-1 中。结果表明，对于这种 EVM 设计，采用流动冷却剂的冷板的冷却效果比采用强制通气的散热器更高效。在条件 1 和条件 2 下，冷板的结到冷却剂 R_{θ} 分别比散热器的结至环境 R_{θ} 低 $1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 和 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 左右。由于两个紧密排列的 ts-QFN 12x12 封装的热耦合效应，当同时加热高侧和低侧器件时，各个 GaN 器件的 R_{θ} 比从单一热源场景中获得的 R_{θ} 要高。但是，当半桥在条件 2 下运行时，由于系统的有效 R_{θ} （两个并联电阻）较低，总功率耗散实际会更高。

表 6-1. 不同冷却方法下测得的 R_{θ}

冷却元件	冷板		散热器	
	$R_{\theta J \text{ 冷却剂}}$ ($T_{\text{冷却剂}} = 20^{\circ}\text{C}$)		$R_{\theta JA}$ ($T_{\text{环境}} = 25^{\circ}\text{C}$)	
R_{θ}	高侧	低侧	高侧	低侧
开关	1.67	-	2.8	-
条件 1 (加热 1 个开关)	1.67	-	2.8	-
条件 2 (加热 2 个开关)	2.32	2.39	3.83	3.79

图 6-2 (a) 显示了装有散热器和直流风扇的 LMG3522EVM-042 的实验装置。使用了两根热电偶导线来监测板温度 (T_B)。它们的线头穿过散热器和 PCB 之间的间隙安装在每个 GaN 器件旁边的 PCB 上。利用集成的温度报告功能，可以直接从生成的脉宽调制 (PWM) 信号记录 GaN 器件 T_J ，这些信号可以转换为数字读数。在不同耗散功率下捕获的 T_J 和 T_B 结果绘制在图 6-2 (b) 中。从 $R_{DS,ON}$ 相关和 PWM 信号读数中获取的 T_J 数据彼此之间非常吻合，而在所有检查功率水平下检测到的 T_B 总是低于实测 T_J 。通过使用顶部冷却封装从 PCB 中分离热量，可以使器件在更高的 T_J 下运行，而无需担心 PCB 长期使用时的可靠性问题；而对于使用底部冷却封装的情况，封装散热焊盘与对应的 PCB 着陆垫之间采用直接焊锡接合，因此器件的 T_B 和 T_J 大致相等。因此，在接近或高于电路板玻璃化转化温度 (典型 FR4 板为 $110^{\circ}\text{C} - 130^{\circ}\text{C}$) 的高温下，加热过的电路板将成为底部冷却表面贴装式器件高功率耗散的限制因素 (即使它们具有更高的 T_J)。

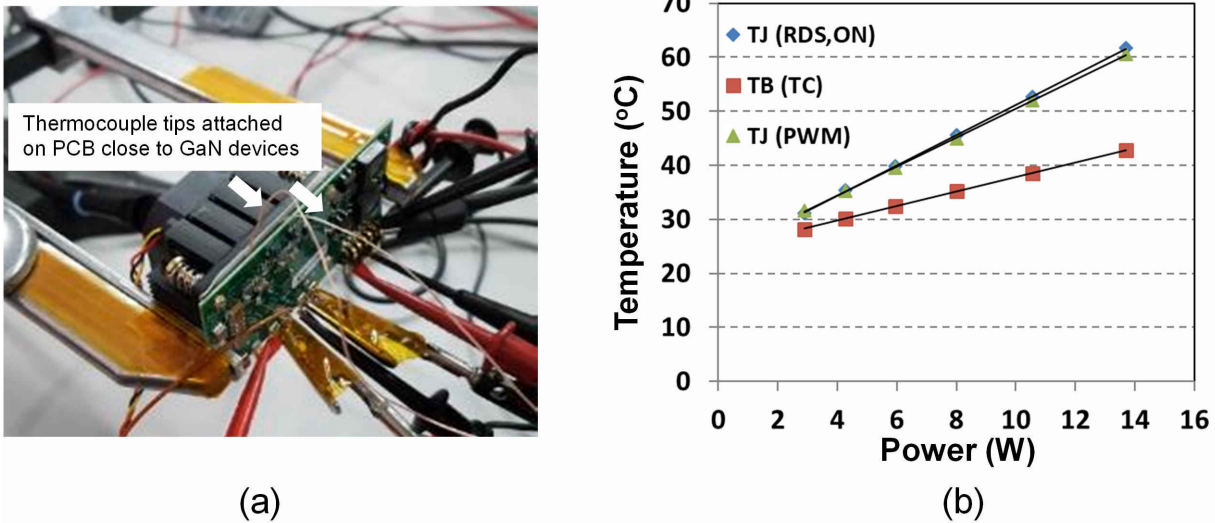


图 6-2. (a) 采用散热器的 EVM 热性能测试装置以及 (b) 不同功率级别下实测 PCB 温度 (T_B) 和通过 $R_{DS,ON}$ 相关和 PWM 信号获取的 T_J 的比较。

对安装在定制冷板上的 LMG3522EVM-042 评估板的热性能进行了表征处理。图 6-3 所示为装配子卡的照片。它安装在 LMG342X-BB-EVM 母板上，确保同步降压转换器持续运行 (请参阅 EVM 用户指南 SNOU178)。若要实现 6kW 运行功率，开关频率在占空比为 50% 时是 100kHz，开启压摆率设置为 100V/ns，直流链路电压为 400V，输出电流为 30A。图 6-4 显示了转换器波形，其中蓝色为 PWM 信号，绿色为电感器电流，而紫色为开关节点波形。硬开关器件的 T_J 可以从 LMG352xR030 器件的信号 (PWM 信号) 结温输出中获得。在输出功率为 6kW 时，硬开关器件在冷却剂温度为 35°C 的情况下其 T_J 稳定在 91°C 。

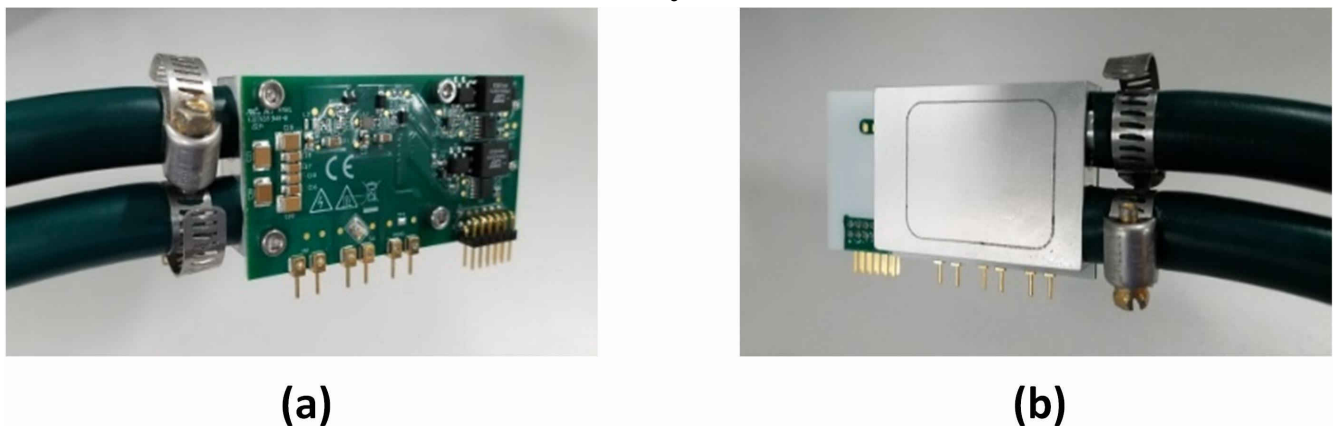


图 6-3. 采用冷板的 EVM 组件 (a) 前视图 (b) 后视图

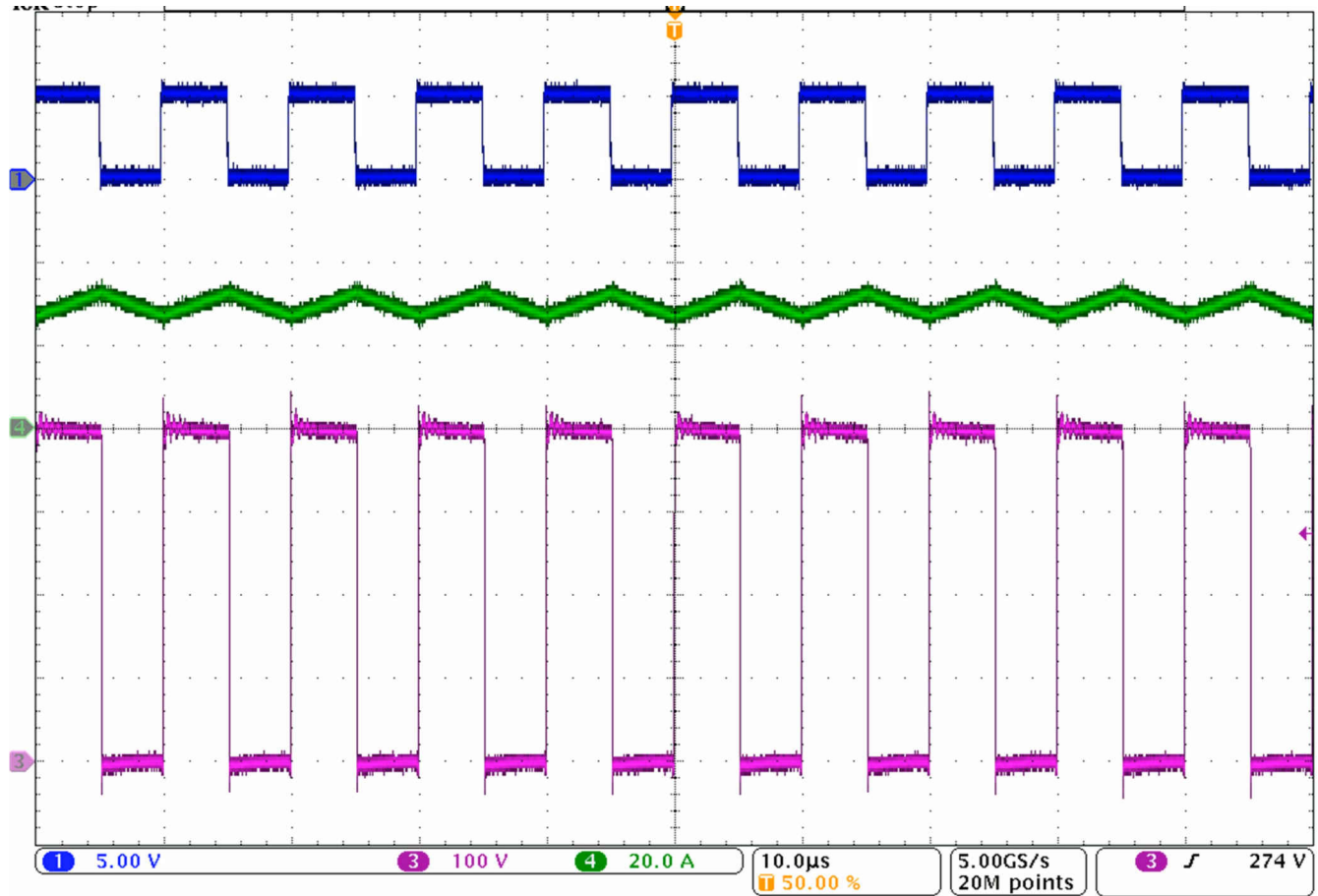


图 6-4. 采用冷板时在 6kW 下的降压运行

7 总结

为了加快电动汽车的普及，需要使用具有热增强型封装的更高效的功率器件，以提高电源转换单元的功率密度。为了满足汽车应用这一严格的热要求，为 TI 的 LMG352x 650-V GaN 功率级推出了新开发的顶部冷却表面贴装型封装 ts-QFN 12x12。如仿真结果所示，这种新型封装的 $R_{\theta JC/P}$ 值比竞争对手采用的顶部冷却封装低约 20%-30%。热台试结果已验证了仿真分析，表现出不足 4% 的差异。此外，还使用两个 LMG3522R030-Q1 单元设计和制造了一个实用的半桥评估板，这两个单元具有可互换的散热器和冷板作为冷却器件。在各种使用案例下，测试了它的热特性。使用冷板装置和 0.5mm 厚导热垫焊盘 TIM，测得的结到冷却剂 R_{θ} 可低至约 1.7°C/W。此外，顶部冷却设计不仅为功率器件提供了高效的热通路，还减轻了 PCB 侧的热应力。在保持 TI 其他 GaN 产品的所有开关优点和集成功能的同时，这款采用新型 ts-QFN 12x12 封装的汽车级 650V GaN 功率级系列可提供增强的热管理解决方案，能够提高系统功率密度、改善可靠性，并帮助电动汽车实现高效的电源转换。

8 参考文献

- Pendharkar S. , 《GaN 和 SiC 可提高电源能效》 , 2018 年 , [SSZY033](#)
- Natarajan R. , 《专用于在混合动力汽车/电动汽车中实现高频工作和稳健性的汽车类 GaN FET》 , 2020 年 , https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/archive/2020/11/30/charge-faster-and-drive-farther-with-gan-based-onboard-charger-in-electric-vehicles
- TI 资讯 : <https://news.ti.com/ti-introduces-industrys-first-automotive-gan-fet-with-integrated-driver-protection-and-active-power-management>
- Mohan S. , 《GaN 逆变器使用 FR-4 和绝缘金属基板 PCB 之热比较》 , 2019 年 , [TIDA030](#)
- Zhang W.、Zhang Y.、Xie Y. 和 Brohlin P. , 《600V GaN 功率级 QFN 12x12 封装的热性能》 , 2020 年 , [SNOAA61](#)
- Faraci E. 和 Mao J. , 《LMG3410x 系列集成式 GaN FET 高电压半桥设计指南》 , 2016 年 , [SNOA946](#)
- Dusmez S.、Xie Y.、Beheshti M. 和 Brohlin P. , 《GaN 功率级设计的散热注意事项》 , 2018 年 , [SNOAA14](#)
- 《LMG352XEVM-04X 用户指南》 , 2021 年 , [SNOU178](#)

重要声明和免责声明

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任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司