



Wenli Zhang, Yichi Zhang, Yong Xie, and Paul Brohlin

摘要

德州仪器 (TI) 推出的全新驱动器集成式氮化镓 (GaN) 功率级产品系列, 采用低成本、紧凑型四方扁平无引线 (QFN) 封装, 具有 12mm x 12mm 的较大封装面积。这种扩大的 QFN 封装不仅具有 GaN 产品一贯有的快速转换率和高开关频率能力等显著优势, 还可通过较大的裸露散热焊盘提高其热性能, 从而使功率耗散能力优于其他常用的表面贴装封装 (如广泛用于分立式功率器件的 TO 无引线 and D²PAK)。利用适当的热设计, TI 采用 QFN 12x12 封装的全新 LMG342x GaN 功率级产品可以完全满足高功率 (> 3kW) 转换应用的需要。

内容

1 引言	2
2 新型 QFN 12x12 封装	2
3 底面冷却配置和 $R_{\theta JC/P}$ 的定义	3
3.1 封装热性能参数 $R_{\theta JC/P}$ 的定义	3
3.2 底面冷却系统的设计建议	5
4 仿真模型和结果	6
4.1 用于热分析的有限元模型	6
4.2 热仿真结果	8
5 实验设置和 $R_{\theta JC/P}$ 测试结果	10
6 半桥评估板的 QFN 12x12 封装热性能	13
7 总结	14
8 参考文献	15
9 修订历史记录	15

插图清单

图 2-1. QFN 12x12 封装外观 (12mm x 12mm x 0.9mm)	2
图 2-2. 封装底面上引脚配置的比较	2
图 3-1. 带底部散热焊盘的表面贴装器件的典型冷却设计	4
图 4-1. 为不同封装建立的仿真模型: (a) QFN 8x8, (b) QFN 12x12, (c) TOLL 和 (d) D ² PAK	6
图 4-2. 仿真模型的横截面视图 (QFN 8x8)	7
图 4-3. PCB 上的散热过孔样式	7
图 4-4. 不同封装的温度分布仿真结果: (a) QFN 8x8, (b) QFN 12x12 (50m Ω), (c) QFN 12x12 (30m Ω), (d) TOLL 和 (e) D ² PAK	8
图 4-5. 不同表面贴装封装的 R_{θ} 仿真结果比较	9
图 5-1. R_{θ} 测量设置: (a) 横截面图示和 (b) 顶视图照片	10
图 5-2. $R_{DS,ON}$ 和 T_J 相关性的校准曲线	11
图 5-3. QFN 12x12 器件在不同功率级别下测试时的红外热感图像	11
图 5-4. 在不同功率级别下测试的 $R_{\theta JC/P}$ 的实验结果	11
图 6-1. LMG3422EVM-043 的功率级测试波形	13
图 6-2. 开关节点处的放大波形	13
图 6-3. 受测 EVM 的红外热感图像	14

表格清单

表 2-1. 不同封装的封装面积和散热焊盘面积比较	3
表 3-1. 热阻 (R_{θ}) 参数列表, 单位 ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)	5
表 4-1. 仿真模型组件的特性	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

在快速充电适配器、数据中心、电信、电动汽车以及其他迫切需要普遍采用高密度、高效率电源系统的应用中，高电压 (> 600V) 氮化镓 (GaN) 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 正在逐步取代硅基晶体管，请参阅 [GaN 让能源利用率再上新台阶](#)。由于减少或消除了引线引起的寄生效应，在电源开关应用中，表面贴装型封装比穿孔型 (如 TO-247) 更适合 GaN-HEMT 器件，更利于发挥此类器件的作用。德州仪器 (TI) 实施了一种直接驱动 GaN 解决方案，其实施方法是将高电压 GaN 晶体管及其驱动器与集成保护功能一起封装到一个四方扁平无引线 (QFN) 封装中，请参阅 [GaN 器件的直接驱动配置](#)。已完全发布的 LMG341x 产品系列针对导通电阻为 150、70 和 50mΩ 的器件采用相同的 QFN 8x8 (即 8mm x 8mm 封装尺寸) 封装，请参阅 [氮化镓 \(GaN\) IC - 产品](#)。通过这种表面贴装封装解决方案，TI 的 GaN 晶体管及其集成驱动器不仅消除了共源电感，显著降低了栅极回路电感，还内置了热保护和电流保护功能，请参阅 [使用集成式驱动器优化 GaN 性能](#)。然而，裸露散热焊盘的面积和封装尺寸较小，因此这些产品的功率耗散能力受到限制。为了满足高功率应用日益增长的需求 (如服务器和电信领域的 4kW 电源装置)，已经为 TI 的下一代集成式 GaN 功率级 (LMG342x) 开发了新型 QFN 12x12 封装。此应用报告介绍了这种新封装的热性能。

2 新型 QFN 12x12 封装

图 2-1 新开发的 QFN 12x12 是一种小型、无引线的表面贴装封装，其底面有一个裸露的铜 (Cu) 散热焊盘和功能引脚，如中所示。它保持了与先前的 QFN 8x8 封装解决方案 (用于 TI 的 600V GaN 功率级产品) 相同的电气特性和功能集成。改进的封装热设计改善了功率耗散水平，并通过这一更新的 QFN 12x12 配置实现。

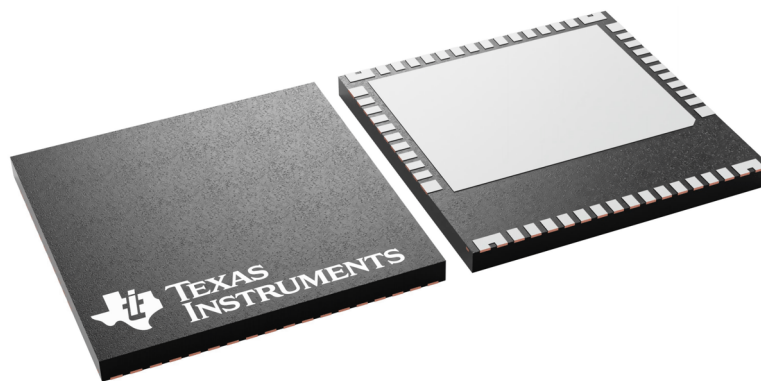


图 2-1. QFN 12x12 封装外观 (12mm x 12mm x 0.9mm)

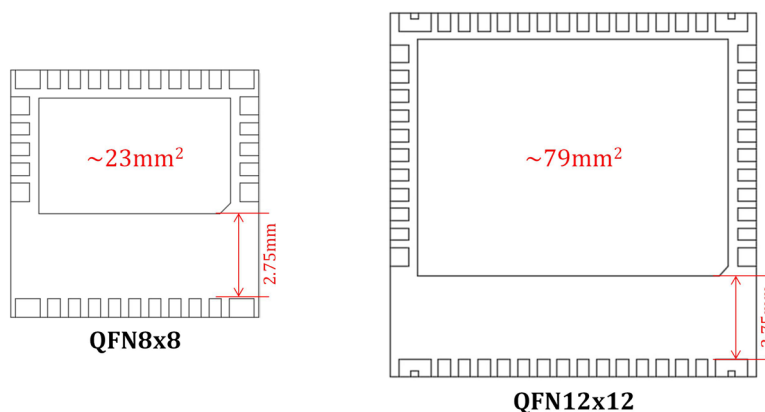


图 2-2. 封装底面上引脚配置的比较

图 2-2 显示了 QFN 12x12 封装，与先前的 QFN 8x8 版本相比，该封装的散热焊盘面积大 3 倍，但中心散热焊盘 (在内部连接到电源) 与底部漏极端子引脚之间的爬电距离仍为 2.75mm。[表 2-1](#) 比较了 TI 的 QFN 和其他常用

表面贴装封装 (用于高电压 GaN 或碳化硅 (SiC) 分立式器件的 TO 无引线 (TOLL) 和 D²PAK) 的封装面积和散热焊盘面积。与竞争对手的封装相比, TI 的 QFN 12x12 封装的裸露散热焊盘面积最大, 为 79mm²。虽然该封装在印刷电路板 (PCB) 上占据的空间比 TOLL 封装大, 但其散热焊盘面积与 PCB 封装面积之比比 TOLL 封装高 7%, 因此它所包含的通过底面冷却系统散热的有效面积更大。

表 2-1. 不同封装的封装面积和散热焊盘面积比较

制造商	TI	TI	竞争对手 A	竞争对手 B
封装	QFN 8x8	QFN 12x12	TOLL ¹	D ² PAK ²
PCB 上的最小封装面积 (mm ²)	64	144	116	165
裸露散热焊盘面积 (mm ²)	23	79	56	45
散热焊盘面积/PCB 封装面积 (%)	36	55	48	27

1. 600V GaN HEMT
2. 650V SiC MOSFET

3 底面冷却配置和 $R_{\theta JC/P}$ 的定义

3.1 封装热性能参数 $R_{\theta JC/P}$ 的定义

图 3-1 描绘了从器件结到环境的两条平行热流路径, 并给出了相应的一维热阻 (R_{θ}) 电路模型。表 3-1 图 3-1 对中所示和本报告讨论的各种 R_{θ} 参数进行了说明。底面冷却的 QFN 12x12 封装设计为主要通过热界面材料 (TIM) 以及与环境相连的散热器从基体 PCB 中散热。在这种典型的底面冷却配置中, 从封装顶部散发到环境中的热量极少。底部路径的效率越高, 从顶部散发的能量就越少。

方程式 1 因此, 可使用对一种高效率底面冷却系统的 $R_{\theta JA}$ 进行估算:

$$R_{\theta JA} \cong R_{\theta JC(bot)} + R_{\theta PCB} + R_{\theta TIM} + R_{\theta H/S} \quad (1)$$

$R_{\theta JC(bot)}$ 或 $R_{\theta JC(top)}$, 定义为在器件结与封装表面之间用于散热的热阻, 通常在制造商的数据表中给出。然而, 在某些情况下, 使用这个参数直接比较封装的热性能会带来误导, 特别是对于不同类型的封装。例如, 当采用 D²PAK 封装时, 同一个 600V Si MOSFET 的 $R_{\theta JC(bot)}$ 值可能为 0.8°C/W, 但采用 QFN 8x8 封装时此参数的值为 0.6°C/W, 原因在于 D²PAK 具有更厚的铜片。这并不意味着 QFN 8x8 封装在热性能方面比 D²PAK 更好。通过增加封装热阻 $R_{\theta JC(bot)}$, 在 D²PAK 封装中使用较厚的铜片进行裸片连接, 可以在热流到达 PCB 顶部铜层之前在封装内部实现更均匀的热量分布。此外, 热片较大也使系统设计人员能够在 PCB 上增加更多的铜焊盘面积和散热过孔, 以降低其热阻。PCB 上的散热更有效, 因此 $R_{\theta TIM}$ 会随之降低。因此, 通过提高现有冷却元件的效率和/或采用更有效的散热解决方案, 在散热方面设计良好的封装有助于提供系统级别的功率耗散能力, 这一点非常重要。对于底面冷却的表面贴装封装, 其热性能不可避免地安装板 (以及附着的 TIM, 如果使用) 相耦合。方程式 2 为了更好地定义和比较不同封装的热性能, 在以下章节中使用了一个实用指标 $R_{\theta JC/P}$ (即从器件结到主冷却平面的热阻), 其定义请参阅:

$$R_{\theta JC/P} = R_{\theta JC(bot)} + R_{\theta PCB} + R_{\theta TIM} \quad (2)$$

方程式 2 对于此定义, 中不包括 $R_{\theta H/S}$ 或 $R_{\theta Coldplate}$, 因为它们独立于器件封装设计, 更多地取决于其自身特性 (如材料和结构) 和其他使用条件 (如空气/冷却剂流速)。

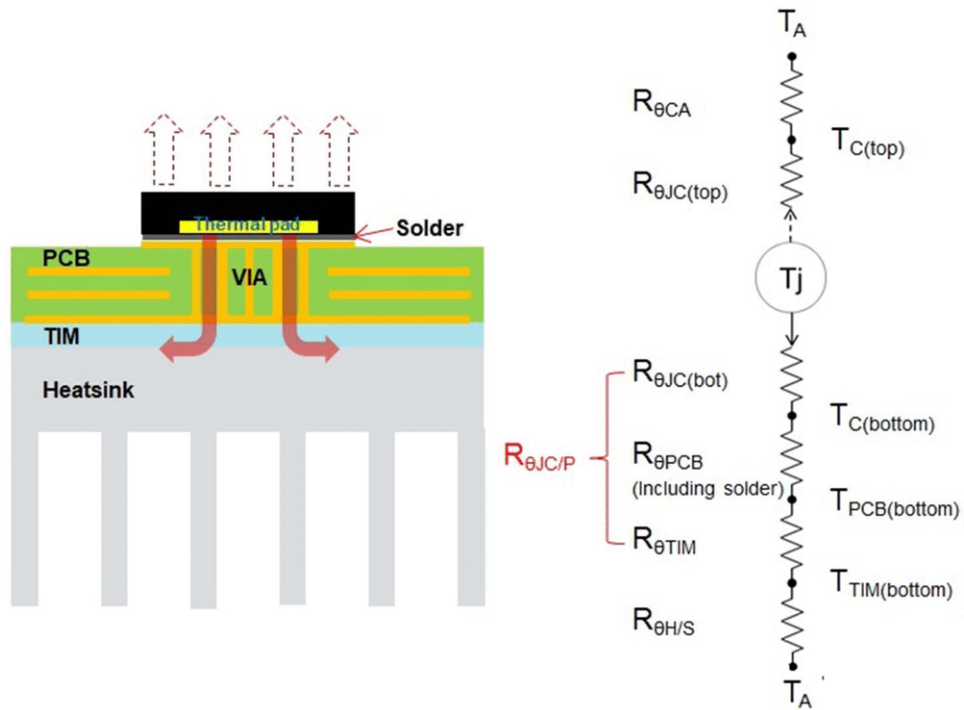


图 3-1. 带底部散热焊盘的表面贴装器件的典型冷却设计

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
$R_{\theta CA}$	外壳至环境热阻
$R_{\theta JC/P}$	结至冷却平面热阻
$R_{\theta PCB}$	PCB (包括焊料层) 的热阻
$R_{\theta TIM}$	热界面材料 (TIM) 的热阻
$R_{\theta H/S}$	散热器的热阻

3.2 底面冷却系统的设计建议

有关如何在系统级热设计中优化每个冷却元件的更多详细信息, 请参阅已发布的应用报告 [SNOAA14](#) 和 [SNOA946](#)。一些要点汇总如下:

- 对多层 PCB 使用厚铜层 (推荐 2oz) 进行散热, 并去除底部铜散热平面的阻焊层
- 设计足够数量的散热过孔以降低 $R_{\theta PCB}$, 并尽可能用导热环氧树脂或铜填充过孔
- 使用 1.6mm 或更薄的 PCB (如适用), 并施加适当的压力以防止在将电路板固定到散热器或冷板时发生翘曲
- 控制散热焊盘焊点空洞率 (总计低于 25%, 最大为 10%)
- 对于在 PCB 上增加更多的铜焊盘/散热过孔覆盖率与由此产生的额外寄生电容和电感, 谨慎地在这两者之间进行权衡
- 由于底面的功率耗散不足, 在封装顶部表面上添加冷却元件 (仅作为补充手段)
- 选择合适的 TIM 和散热器以满足总体 $R_{\theta JA}$ 热要求

4 仿真模型和结果

4.1 用于热分析的有限元模型

为了比较不同表面贴装封装的热性能（即 $R_{\theta JC/P}$ ），已经利用 ANSYS 有限元分析 (FEA) 软件建立了仿真模型。图 4-1 所示为 QFN 8x8、QFN 12x12、TOLL 和 D²PAK 这四种封装的模型图示。前两种 QFN 封装用于 TI 的 600V GaN 功率级产品，而后两种封装由竞争对手分别用于其商业发布的 600V GaN 和 650V SiC 分立式器件。每个表面贴装器件均放在一块 4 层 PCB 的中央，PCB 的表面积为 40mm x 40mm，厚度为 1.58mm。

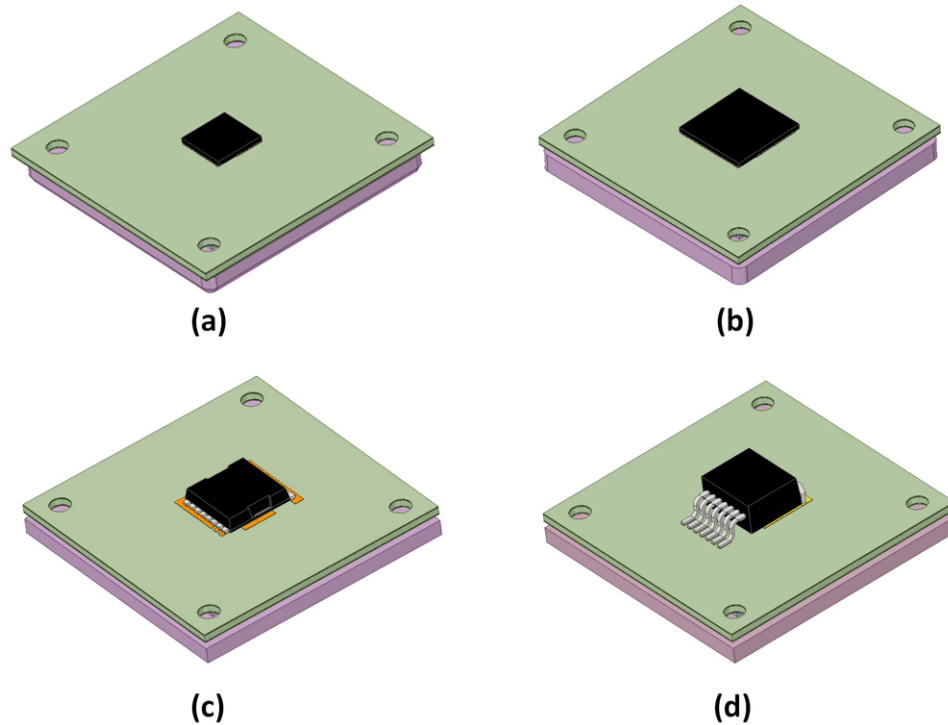


图 4-1. 为不同封装建立的仿真模型：(a) QFN 8x8，(b) QFN 12x12，(c) TOLL 和 (d) D²PAK

图 4-2 所示为所生成模型的示例横截面图并详细说明了多层 PCB 结构。对于所有已建立的模型，包括散热过孔样式设计 (图 4-3) 在内的大多数构建元素是相同的，但有两项除外：PCB 顶部铜层设计和散热过孔总数，它们已调整为适合每种封装的散热焊盘面积，以便公平比较不同封装之间的热性能。请注意，用于散热的顶部铜焊盘和相应的散热过孔样式/数量可针对特定应用进行进一步的优化。表 4-1 总结了主要建模组件的关键尺寸和热信息。

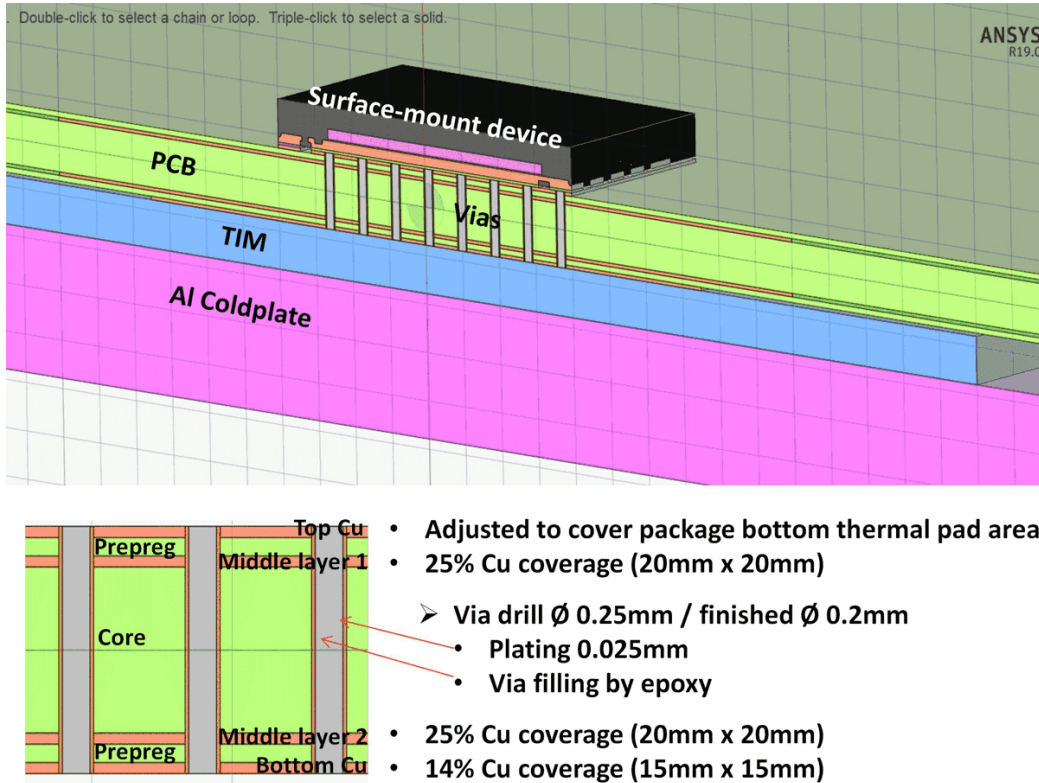


图 4-2. 仿真模型的横截面视图 (QFN 8x8)

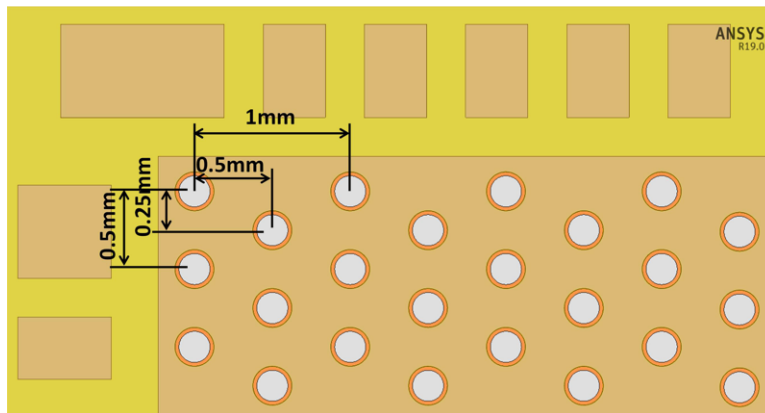


图 4-3. PCB 上的散热过孔样式

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	0.12 (半固化片) / 1.06 (内核)	FR4	0.3
	0.07 (4层)	铜	385
散热过孔	0.025	镀铜	385
	0.2 (直径)	环氧过孔填料	1
TIM	1	导热垫	8
冷板	2.5	铝合金	160

4.2 热仿真结果

在对功率器件设置 10W 损耗并对冷板设置 30°C 恒定温度的条件下，执行稳态 FEA 热仿真。在该热模型中，假设器件产生的热量仅通过传导方式向下传递到冷板，而不通过对流或辐射机制进行散热。图 4-4 中显示了所研究的所有封装模型的系统温度分布。

R_{θ} 电路模型 (图 3-1) 中不同节点处的温度可从这些仿真结果中得出，用于计算不同节点间的热阻。方程式 3 例如， $R_{\theta JC/P}$ 是使用如下所示的计算得出的：

$$R_{\theta JC/P} = (T_J - T_{C/P}) / \text{功率} \quad (3)$$

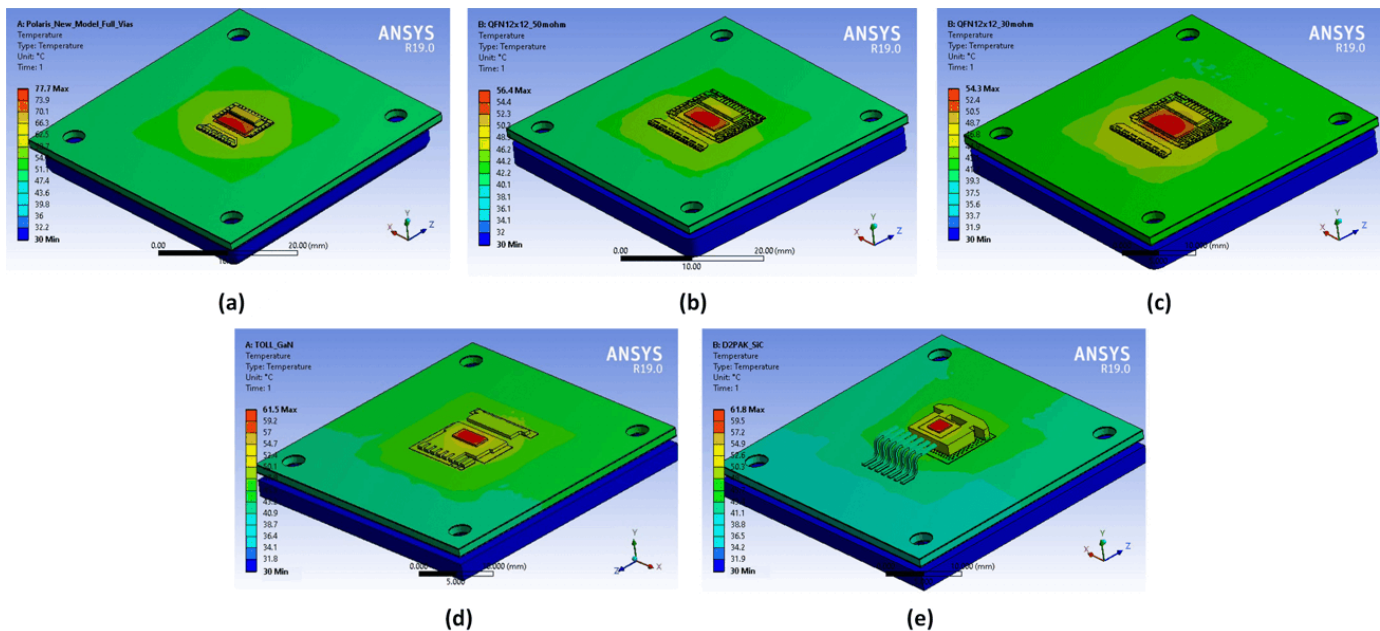


图 4-4. 不同封装的温度分布仿真结果：(a) QFN 8x8，(b) QFN 12x12 (50mΩ)，(c) QFN 12x12 (30mΩ)，(d) TOLL 和 (e) D²PAK

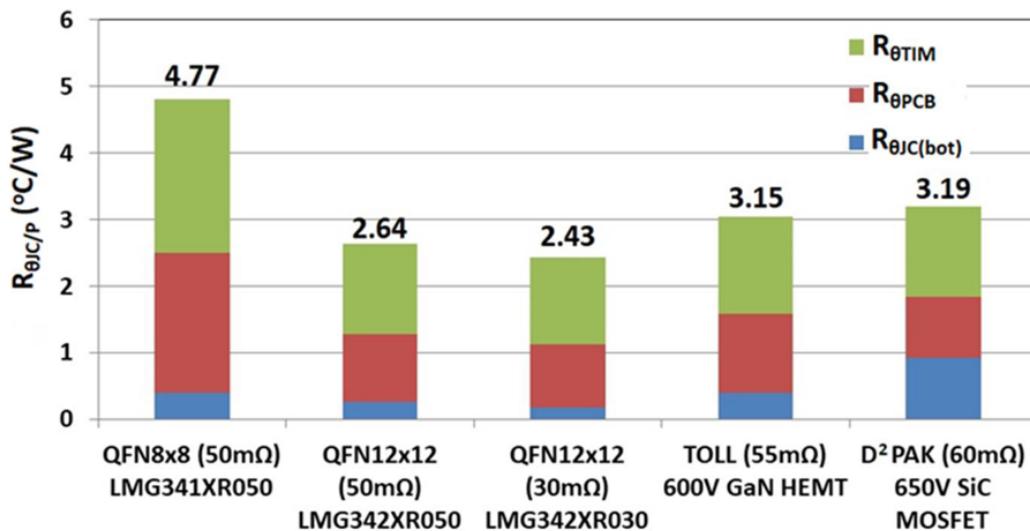


图 4-5. 不同表面贴装封装的 R_{θ} 仿真结果比较

图 4-5 根据热仿真结果，给出了采用不同形式封装的不同产品的 $R_{\theta_{JC/P}}$ 计算值。显然，对于同一个 50mΩ 导通电阻器件，QFN 12x12 封装的 $R_{\theta_{JC/P}}$ (2.64°C/W) 比 QFN 8x8 封装的对应值 (4.77°C/W) 降低 40% 以上。采用相同 QFN 12x12 封装的 30mΩ 器件的性能略优于 50mΩ 器件，这主要是因为导通电阻较低器件的裸片尺寸较大。图 4-5 从中所示的 R_{θ} 分解分析中可以看出，QFN 12x12 封装的 $R_{\theta_{JC/P}}$ 与前代 QFN 8x8 封装相比已降低，主要是由于 $R_{\theta_{PCB}}$ 和 $R_{\theta_{TIM}}$ 的降低。此类热性能改进是利用其更大的散热焊盘和封装尺寸来实现的，这样就可以在 PCB 设计中使用散热效果更好的铜垫和更多的散热过孔。QFN 12x12 封装与其他用于分立式功率器件的底面冷却式表面贴装封装（即 TOLL 和 D²PAK）相比， $R_{\theta_{JC/P}}$ 降低了大约 16%，具有散热优势。

5 实验设置和 $R_{\theta JC/P}$ 测试结果

为了验证热仿真结果，设计并采用一个测试台装置来测量热阻。此外，选择采用 QFN 12x12 封装的 $30\text{m}\Omega$ 器件 (LMG342xR030) 来研究仿真结果与实验结果的一致性。根据仿真模型结构设计，已经填充了一块用于热测试的 4 层 PCB，并在其中心部位安装了一个 LMG342xR030 器件。图 5-1 如中所示，测试介质被压在一块加工过的冷板 (Hi-Contact 六流道, Aavid) 上，压力约为 20psi (由板四角上的安装螺钉提供)。在裸露的 PCB 底部铜焊盘和冷板之间插入 1mm 厚的导热垫 TIM (GR80A, Fujipoly)，冷板与冷却装置 (6560M, PolyScience) 相连，流动的冷却液温度为 30°C 。为了测量冷却平面温度 ($T_{C/P}$)，热电偶尖端通过一个直径为 2.5mm 的盲孔置于距冷板顶面下方 2mm 处。 $T_{C/P}$ 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，并通过测量整个测试单元的电压和电流计算耗散功率。

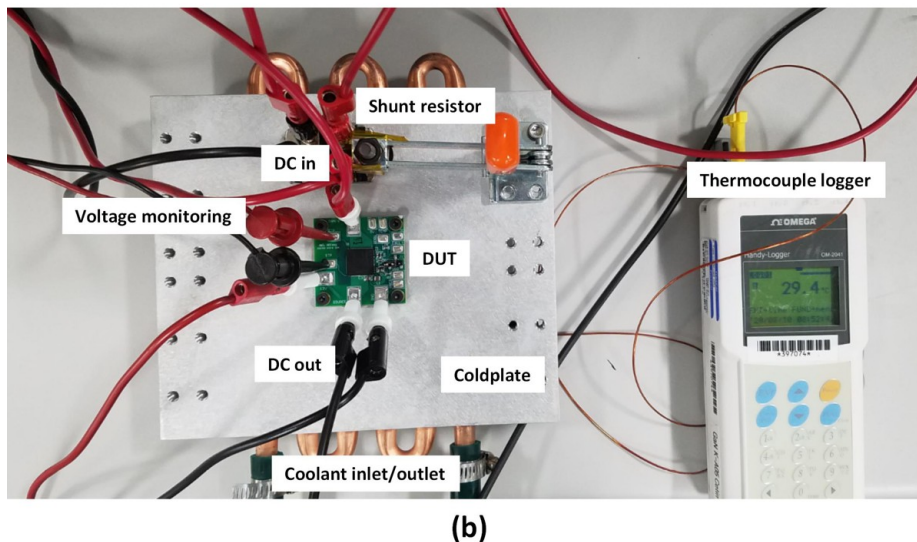
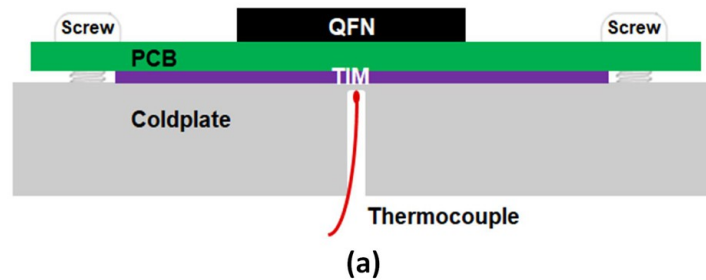


图 5-1. R_{θ} 测量设置：(a) 横截面图示和 (b) 顶视图照片

在热阻测量过程中，以被监测器件的导通电阻 ($R_{DS,ON}$) 作为温度敏感参数来计算结温 (T_J)。在测试之前，测试单元的 $R_{DS,ON} - T_J$ 相关性在一个热室 (107, TestEquity) 内进行校准，器件结在该热室中通过温控环境被动加热。由于测量电流小到只有 80-100mA，器件结的主动加热效应显著降低。图 5-2 所示为使用一个拟合公式在测量温度范围 $25\text{-}125^\circ\text{C}$ 内得出的示例校准曲线。估计 T_J 的另一种方法是在测试期间使用红外 (IR) 热像仪直接测量封装顶部的热点。封装热性能参数 $R_{\theta JC/P}$ 的定义正如中提到的，在高效率的底面冷却系统中，从封装顶部散发的热量极少。因此，测得的外壳顶部温度非常接近于器件的 T_J 。

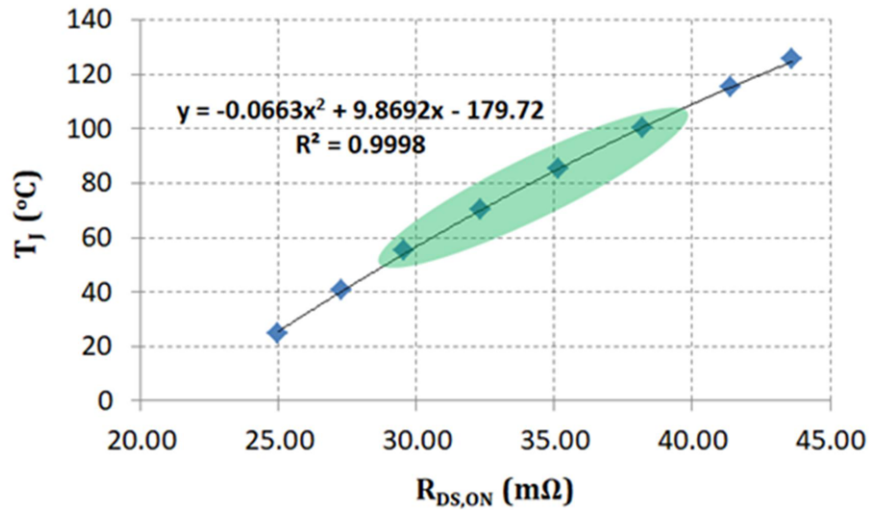


图 5-2. $R_{DS,ON}$ 和 T_J 相关性的校准曲线

图 5-3 所示为在不同耗散功率下测试的 LMG342XR030 器件的最高外壳顶部温度。图 5-4 中总结了分别根据 $R_{DS,ON} - T_J$ 相关性和红外测量计算得出的 $R_{\theta JC/P}$ 的测试结果。在三种不同的测试功率级别下，两种方法得到的结果没有显著差异。图 4-5 此外，还可观察到仿真结果与实验结果吻合程度良好（偏差 < 8%），这验证了封装竞争分析中的热仿真结果，如中所示。从测量结果来看， $R_{\theta JC/P}$ 稍高的原因是仿真模型未考虑测试介质和设置的缺陷，例如，PCB 散热过孔套管开裂、器件散热焊盘与 PCB 安装区域之间接合层中的焊点空洞，以及施加在 TIM 上的压力不均匀。

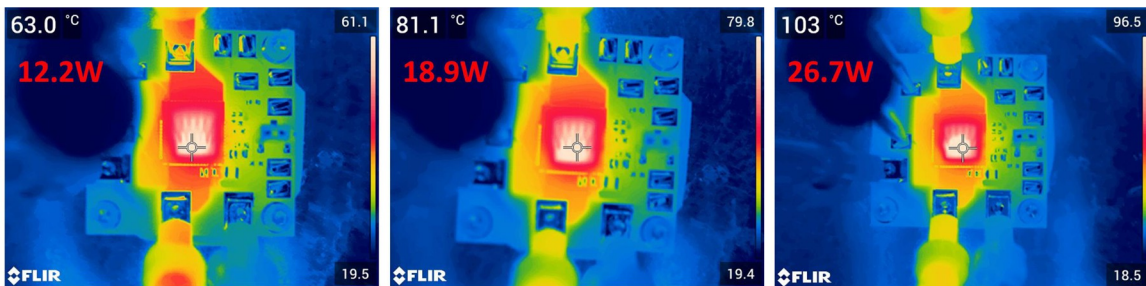


图 5-3. QFN 12x12 器件在不同功率级别下测试时的红外热感图像

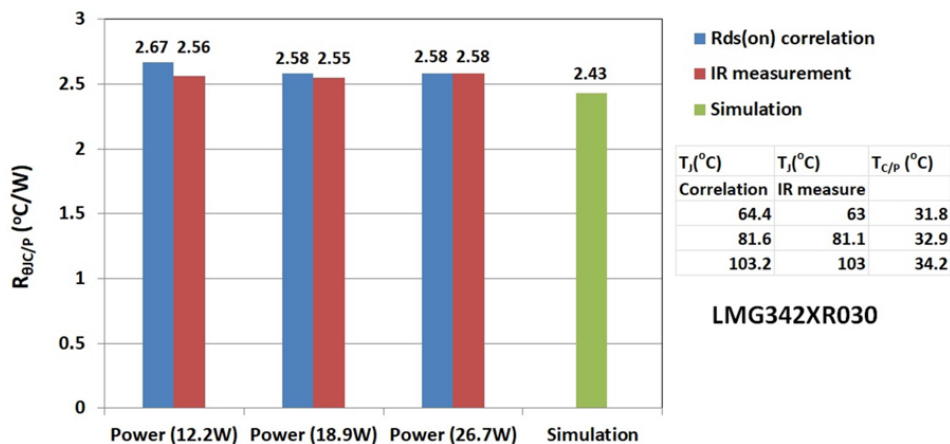


图 5-4. 在不同功率级别下测试的 $R_{\theta JC/P}$ 的实验结果

图 4-5 如中所示，对于所研究的冷却系统， $R_{\theta TIM}$ 占 $R_{\theta JC/P}$ 的 40% 以上，这对于实际应用中的整体系统热性能 ($R_{\theta JA}$) 至关重要。然而，不同制造商在数据表中公布的 TIM 的导热系数难以作为后续选材的依据，因为它们并非始终使用相同的方法测量。因此，最好进行基准测试，以选择要在系统中使用的合适 TIM。本文采用相同的实验

设置对不同的 TIM 进行了测试，以比较它们的散热特性。表 5-1 中总结了测试结果及其他相关信息。结果表明，使用由同一家制造商生产的厚度更薄 (0.5mm) 的相同 TIM (GR80A) 或导热性能更好的 TIM (GR130A) 可以有效地降低 $R_{\theta JC/P}$ 。从另一个供应商处获得的 TIM A 材料显示出与基准 GR80A TIM 相似的热性能，但其数据表中报告的热导率较低；而 TIM B 材料列出了 20W/mK 的高热导率，但其性能相当于 GR130A TIM (宣称的热导率为 13W/mK)。胶带是另一种常用的 TIM，在初次安装后不需要额外的夹紧力来将冷却元件固定在 PCB 或其他受热面上。这种材料更便宜，但它的热阻比导热垫高。表 5-1 中所列 TIM C 的测试结果以一个示例的形式给出。使用胶带 TIM 时测得的 $R_{\theta JC/P}$ 远高于使用厚得多的导热垫 TIM 时测得的结果。

表 5-1. 使用不同 TIM 的 $R_{\theta JC/P}$ 结果总结

产品	类型	厚度 (mm)	数据表中的热导率 (W/mk)	成本	$R_{\theta JC/P}$ (°C/W)
GR80A	导热垫	1	8	x1	2.58
GR80A	导热垫	0.5	8	X0.7	2.33
GR130A	导热垫	1	13	x3	2.21
TIM A	导热垫	1	7.5	X1.1	2.60
TIM B	导热垫	1	20	X2	2.26
TIM C	胶带	0.25	1.2	x0.07	5.72

6 半桥评估板的 QFN 12x12 封装热性能

评估板 (LMG3422EVM-043) 在设计制作时进行了各种权衡, 它由两个采用半桥拓扑配置的 LMG3422R030 器件组成。它选择使用一个 35mm x 50mm x 20mm 的椭圆翅片散热器 (UB3550-20B, Alpha Novatech) 和一个 12V、1.68W 的直流风扇 (F-3010H12BIII-16, Cofan) 来冷却系统。使用四组推针和弹簧施加 20psi 的恒定压力, 将散热器压到 PCB 背面, 并在中间放置 0.5mm 厚的导热垫 TIM (GR80A, Fujipoly)。

此测试采用同步降压转换器配置, 总线电压为 400V, 输出电流为 20A, 功率级别为 4kW。图 6-1 测试波形如中所示, 绿色波形为电感器电流, 而粉红色波形为开关节点电压。

如图 6-2 中所示的放大波形, 有源 GaN 器件的开启速度超过 120V/ns, 最大速度为 150V/ns, 这得益于此集成封装的超小共源电感。此外, 在这一测试中, 经优化的电源环路使过冲电压在超高的开关速度下低于 50V。在这种工作条件下, 通过将直流风扇直接连接到散热器上向其吹风, 测量了系统的热性能。红外热感图像 (图 6-3) 显示 QFN 12x12 封装外壳温度为 99.3°C, 远低于此 LMG3422R030 GaN 功率级产品适用的最高工作温度 (125°C)。对于这一底面冷却系统, 测得的 $R_{\theta JA}$ 为 3.8°C/W。

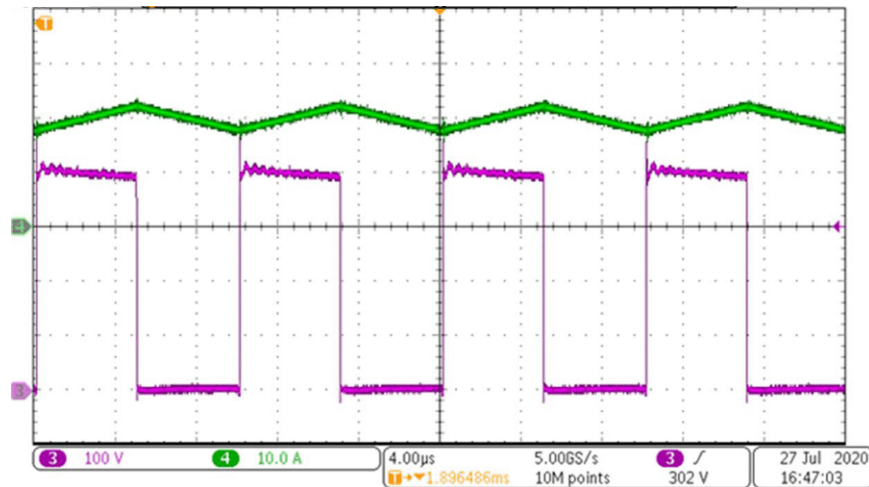


图 6-1. LMG3422EVM-043 的功率级测试波形

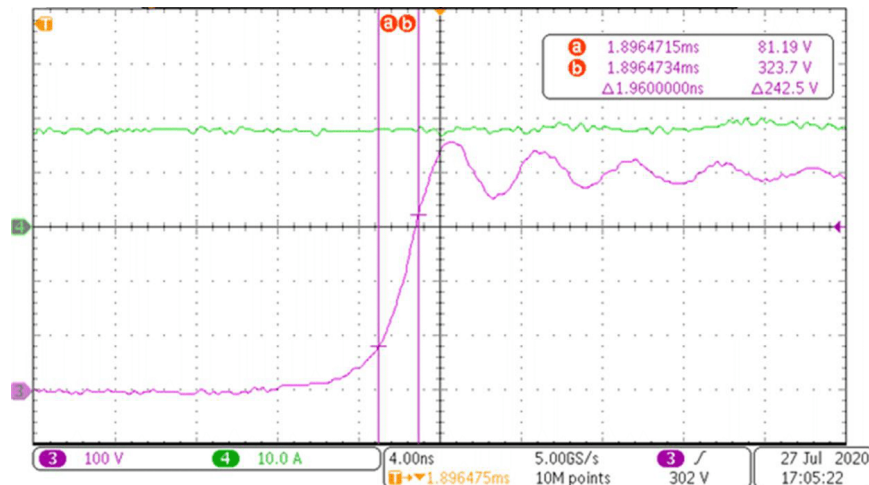


图 6-2. 开关节点处的放大波形

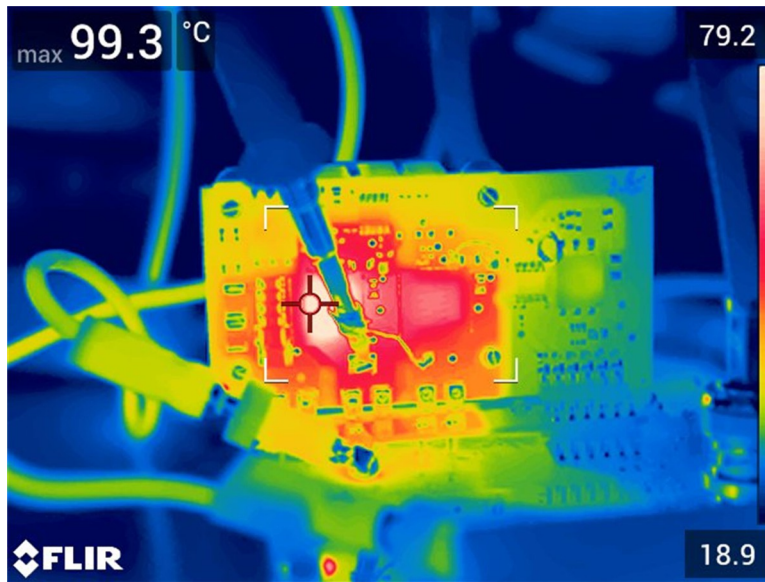


图 6-3. 受测 EVM 的红外热感图像

7 总结

功率器件的封装热性能与其机械和电气特性一样重要，都会对系统效率、可靠性和功率密度产生影响。在散热要求非常严苛的电源应用中，大规模采用热性能良好的封装越来越重要。仿真结果表明，对于相同的 50mΩ 产品，采用 TI 新型 QFN 12x12 封装后的 $R_{\theta JC/P}$ 值比采用旧款 QFN 8x8 封装低 45%。此外，TI 的 50mΩ GaN 功率级（采用 QFN 12x12 封装）与竞争对手推出的具有相似导通电阻的 600V 和 650V 分立式器件（采用 TOLL 或 D²PAK 封装）相比，前者的 $R_{\theta JC/P}$ 大约低 16%。实验测试结果与仿真结果相差不超过 8%。根据使用 LMG3422R030 器件的半桥设计，提供了一个特定用例。运行功率为 4kW 的同步降压转换器在高侧器件封装顶部的实测外壳温度为 99.3°C。在集成保护功能的条件下执行高速和高频开关操作时，TI 采用新型 QFN 12x12 封装的高电压 GaN 功率级可以从这种宽带隙半导体中释放出更多的功率，适合需要减少系统尺寸以及提高功率密度和功效的应用。

8 参考文献

1. Tom S.、Beheshti M. 和 Strydom J. , 《[GaN 让能源利用率再上新台阶](#)》, 2018 年, SSZY034
2. Brohlin P.、Ramadass Y. 和 Kaya C. , 《[GaN 器件的直接驱动配置](#)》, 2018 年, SLPY008A
3. <https://www.ti.com.cn/zh-cn/power-management/gallium-nitride/products.html> 中提供的数据表
4. Xie Y. 和 Brohlin P. , 《[使用集成式驱动器优化 GaN 性能](#)》, 2016 年, SLYY085
5. Faraci E. 和 Mao J. , 《[LMG3410x 系列集成式 GaN FET 高电压半桥设计指南](#)》, 2018 年, SNOA946
6. 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

9 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (October 2020) to Revision A (February 2021)	Page
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	2

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