



GN004 应用手册

氮化镓晶体管的并联设计

GaN Systems公司

2022年03月08日



许多大功率场合都需要用到并联开关管，如牵引逆变器，可回收能源系统等。该应用手册阐述了氮化镓晶体管并联设计的具体细节，这样设计者可以优化设计，使系统性能达到最优。

该手册首先会讨论并联氮化镓器件的好处，之后分析氮化镓器件的特性并解析氮化镓内部特性非常适合并联应用。

为得到更好的系统总体性能，在设计中必须设法降低并联布局带来的寄生参数影响，该手册会对此作详细论述。

最后，以4颗氮化镓晶体管并联为例，其温度测试数据表明氮化镓晶体管达到了热平衡。

1 并联氮化镓的好处

2 氮化镓的关键特性 - 利于并联

氮化镓的关键特性

导通损耗分布: $R_{DS(on)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: $V_{GS(th)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: g_m 与 T_j 的关系

3 并联氮化镓的布局以及设计要点

4 4颗氮化镓晶体管并联的实际例子

5 总结

1 并联氮化镓的好处

2 氮化镓的关键特性 - 利于并联

氮化镓的关键特性

导通损耗分布: $R_{DS(on)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: $V_{GS(th)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: g_m 与 T_j 的关系

3 并联氮化镓的布局以及设计要点

4 4颗氮化镓晶体管并联的实际例子

5 总结

并联氮化镓晶体管的目的

- ▶ 大功率，大电流和高效的应用场合会需要用到并联开关管
- ▶ 例如: 牵引逆变器，可回收能源系统以及不间断电源。

并联氮化镓器件的好处

- ▶ 提高散热能力
- ▶ 冗余
- ▶ 提升输出功率
- ▶ 易于模块化

适合并联的特性

- ▶ GaN Systems 的增强型高电子迁移率晶体管 (E-HEMT) 的内部特性适合于并联
- ▶ 并联氮化镓器件的损耗分布(导通和开关损耗)体现了其卓越的并联性能。

1 并联氮化镓的好处

2 氮化镓的关键特性 - 利于并联

氮化镓的关键特性

导通损耗分布: $R_{DS(on)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: $V_{GS(th)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: g_m 与 T_j 的关系

3 并联氮化镓的布局以及设计要点

4 4颗氮化镓晶体管并联的实际例子

5 总结

氮化镓具有正温度系数的 $R_{DS(on)}$

在不同温度下，氮化镓的阈值电压 $V_{GS(th)}$ 非常稳定

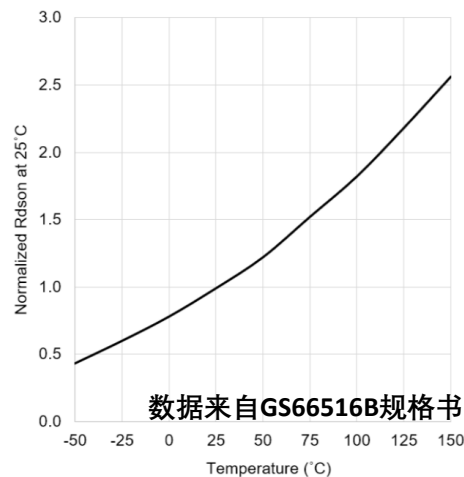
氮化镓增强型高电子迁移率晶体管（E-HEMT）的跨导 g_m 随温度升高而降低

2 导通损耗分布: $R_{DS(on)}$ 对比 T_j

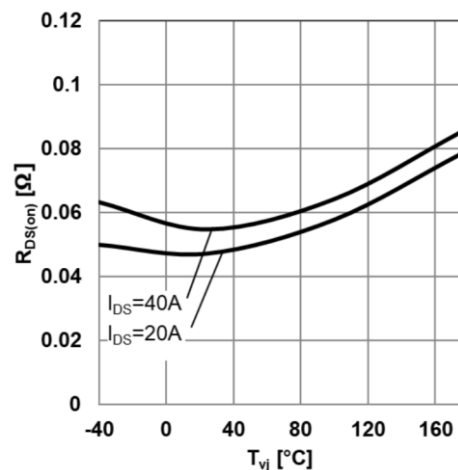
- ❑ 氮化镓具有正温度系数的 $R_{DS(on)}$
- ❑ 在并联应用中, 正温度系数 的 $R_{DS(on)}$ 可以帮助热平衡:



氮化镓的 $R_{DS(on)}$ 与温度的关系



碳化硅的 $R_{DS(on)}$ 与温度的关系

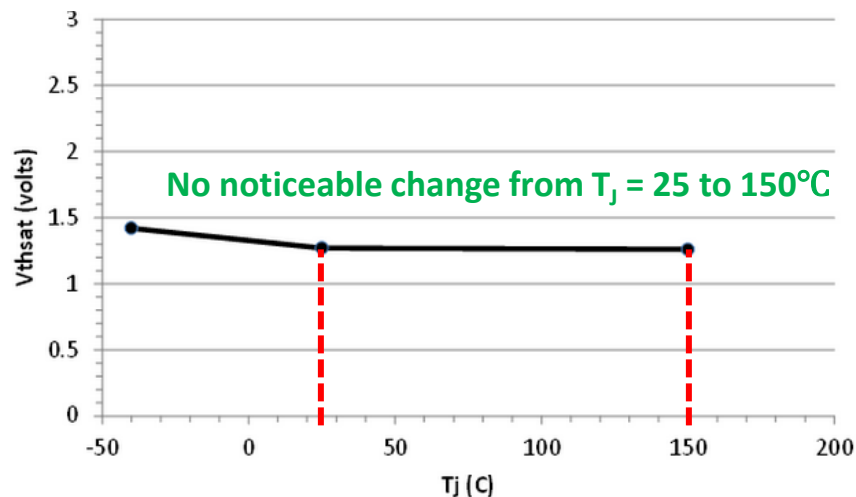


- ❑ 在并联应用中, 与碳化硅比较, 氮化镓的 $R_{DS(on)}$ 与温度之间的线性关系有助均流

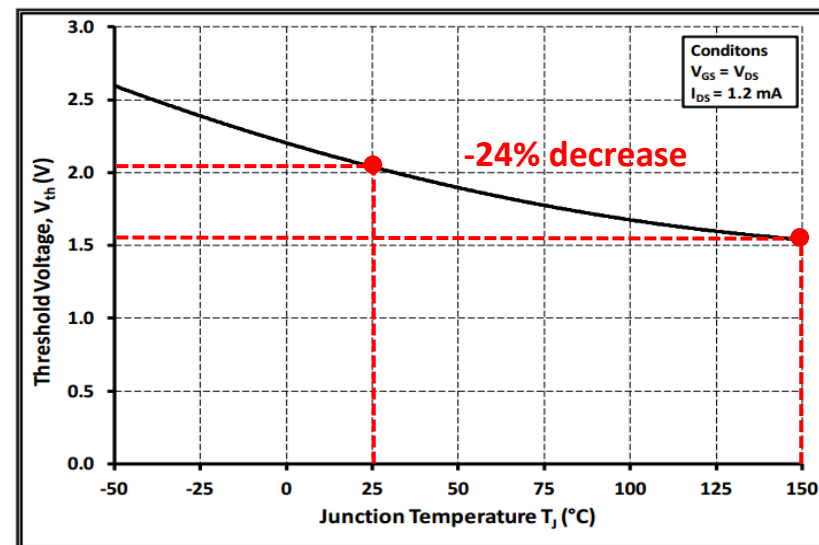
2 开关损耗分布: $V_{GS(th)}$ 对比 T_j

- ❑ 在并联应用中，均流很大取决于 稳定的 门槛电压 $V_{GS(th)}$
- ❑ 与碳化硅比较，氮化镓的门槛电压 $V_{GS(th)}$ 在工作温度范围内保持 稳定
- ❑ 这些特性使氮化镓具有出色的并联能力

氮化镓的门槛电压 $V_{GS(th)}$ 与温度关系

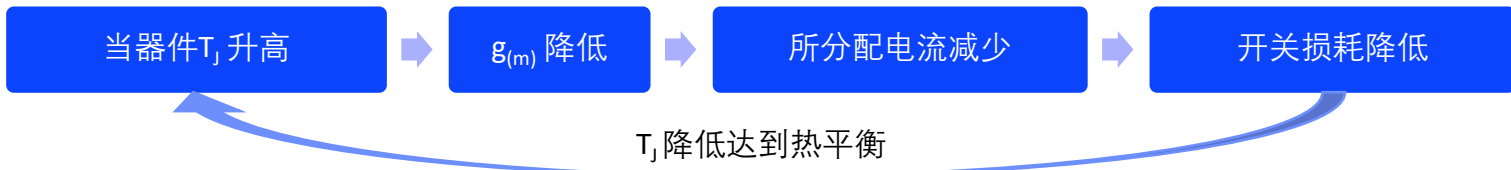


碳化硅的门槛电压 $V_{GS(th)}$ 与温度关系

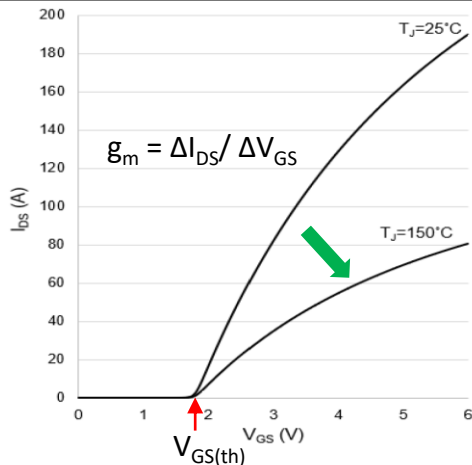


2 开关损耗分布: g_m 对比 T_j

- 氮化镓器件的跨导 g_m 随温度升高而降低, 利于并联
- 在并联场合, 负温度系数的 g_m 可以帮助热平衡:

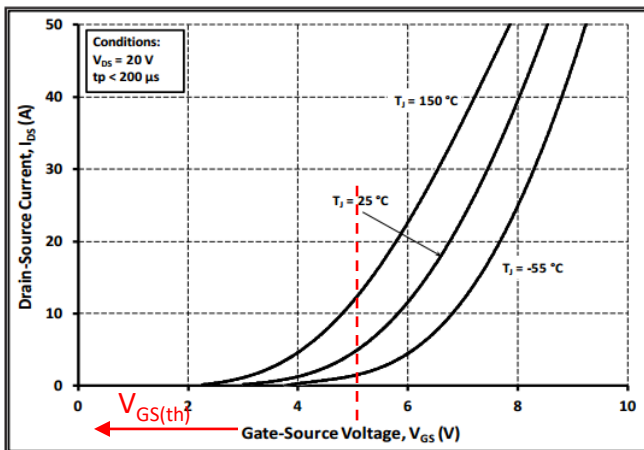


氮化镓的 g_m 与温度关系



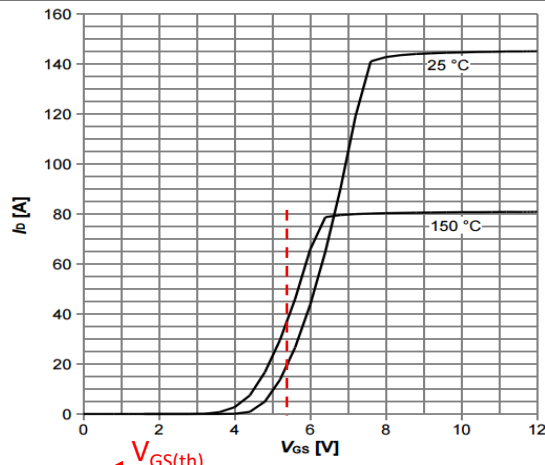
- 相同 V_{GS} 下, 更高的 T_j 会使 I_{DS} 降低
- 且即使 T_j 很高, $V_{GS(th)}$ 保持不变

碳化硅的 g_m 与温度关系



- 在相同 V_{GS} 下, 更高的 T_j 使 I_{DS} 增大
- 且更高的 T_j 下, $V_{GS(th)}$ 降低

硅的 g_m 与温度关系



- 在更高的 T_j 下, g_m 保持不变
- 但更高的 T_j 下, $V_{GS(th)}$ 降低

1 并联氮化镓的好处

2 氮化镓的关键特性 - 利于并联

氮化镓的关键特性

导通损耗分布: $R_{DS(on)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: $V_{GS(th)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: g_m 与 T_j 的关系

3 并联氮化镓的布局以及设计要点

4 4颗氮化镓晶体管并联的实际例子

5 总结

3 并联应用的关键布局参数

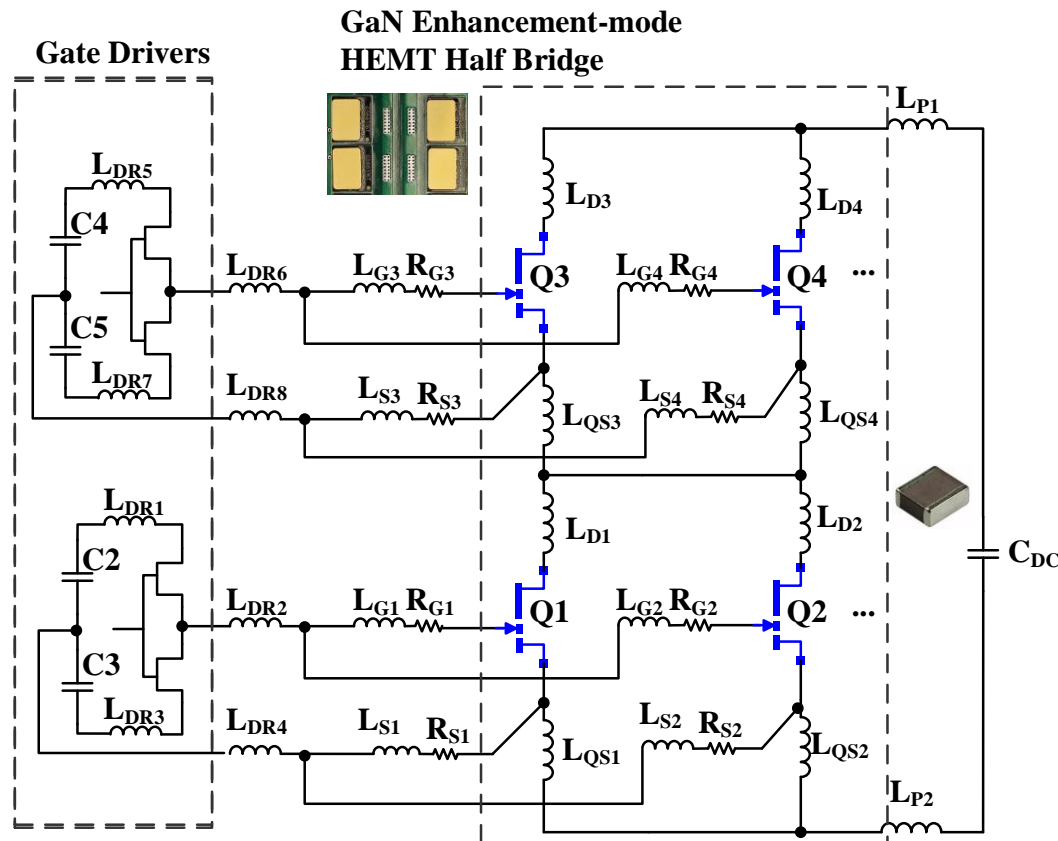
这里列出关键布局参数，应尽量减小这些参数使系统性能达到最优：

L_{G1-4} 和 L_{S1-4} : 门极/源极电感

- 使用星型接法平衡 L_G/L_S ，并尽量最小
- 推荐使用单独的 R_G/R_S 来减少并联器件的门极震荡

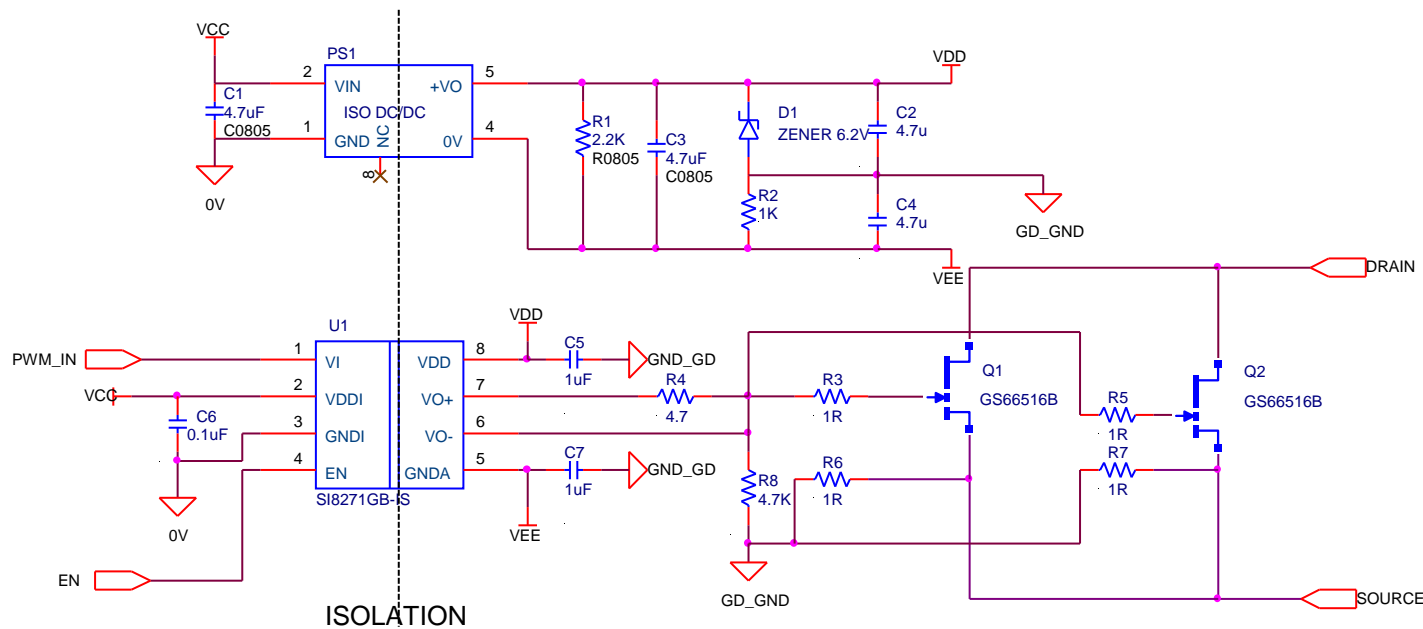
L_{QS1-4} : 共源极电感

- 定义为耦合功率回路的开关噪声 ($L \cdot di/dt$)到门极电路(即反馈 di/dt 到 V_{GS})的所有电感
- 包括共享/共同的源极电感以及功率和驱动回路之间的耦合电感



门极驱动电路的设计要点:

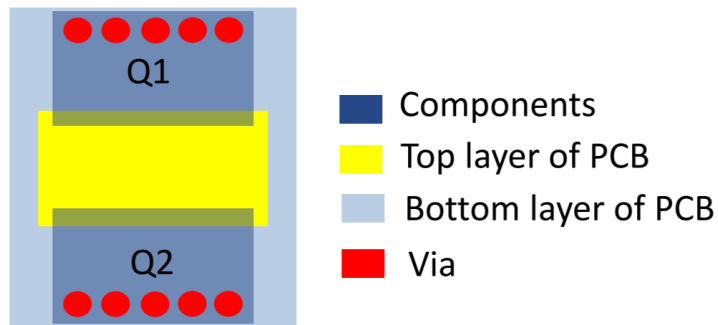
- ❑ 对于大电流并联设计, 推荐使用负的门极关断偏置电压(-3V至-6V), 这样可以降低关断损耗, 且门极驱动电路的抗干扰能力更强
- ❑ 隔离电源用6.2V齐纳管产生两个驱动电压 ($V_{DD} = 6.2V$, 则 $V_{EE} = 6.2V - PS1$ 的输出电压)
- ❑ 增加单独的门极电阻($R3/R5 = 1-2\Omega$) 和源极电阻($R6/R7 = 1-2\Omega$) 来降低并联器件之间的门极震荡
- ❑ 减小门极驱动回路, 降低其对并联器件均流的影响



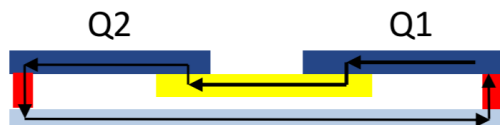
*更多优化门极驱动回路的信息, 请参考 应用手册 GN009 (氮化镓晶体管的 PCB 布局设计)

功率回路的设计要点:

- ❑ 减少功率回路长度 (包含氮化镓晶体管和去耦电容)
- ❑ 为减少功率换流回路的电感，使用**磁通抵消原则**非常关键：当两个相邻导体被靠近放置且其电流方向相反，则两个方向的电流产生的磁通相互抵消

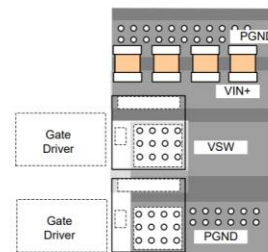


Top View

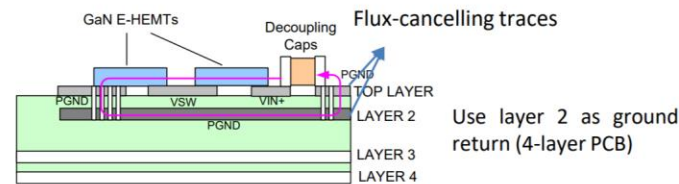


Side View

Example: Bottom-side cooled devices
(gate driver/GaN HEMT/caps on the same side of PCB)



Top view

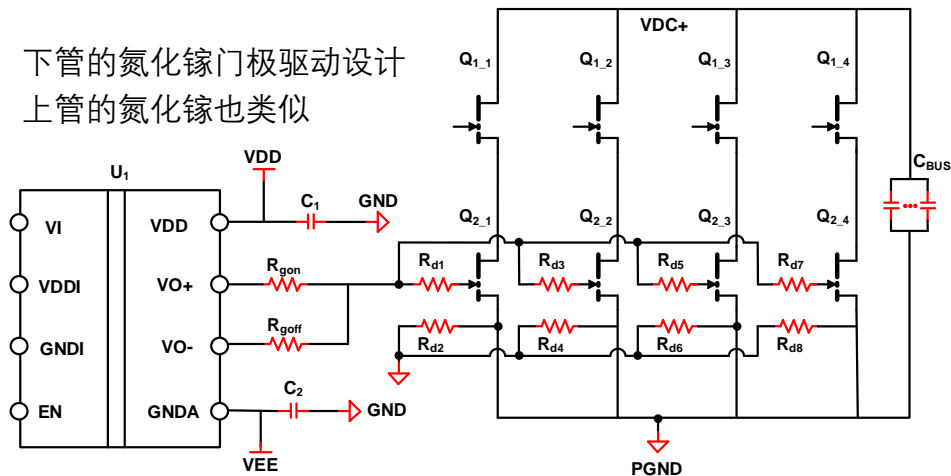


Side view

3 设计要点: 4颗氮化镓晶体管并联布局

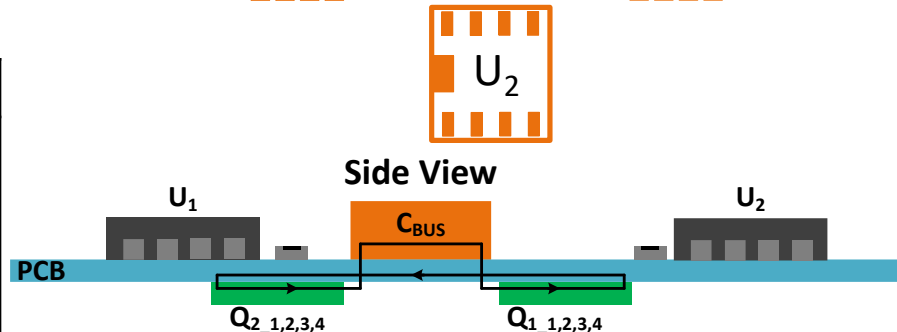
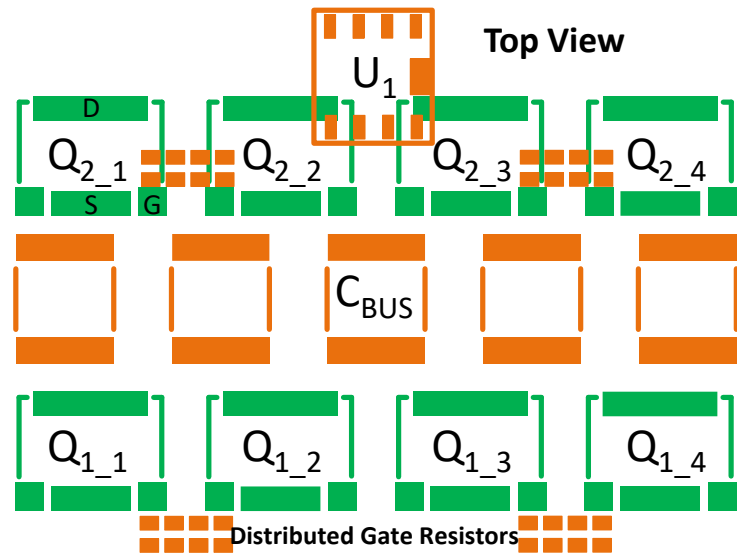
4颗顶部散热的氮化镓晶体管并联的设计案例: 这里展示布局中如何放置关键器件

- 下管的氮化镓门极驱动设计
- 上管的氮化镓也类似



关键回路的设计规则

关键回路	器件	设计规则
功率换流回路	$Q_{1_1,2,3,4}, Q_{2_1,2,3,4}, C_{BUS}$	
门极驱动回路(开通)	$R_{gon}, R_{d1,3,5,7}, Q_{2_1,2,3,4}, R_{d2,4,6,8}, C_1, U_1$	1. 越小越好 2. 每个并联器件的回路长度要接近
门极驱动回路(关断)	$R_{goff}, R_{d1,3,5,7}, Q_{2_1,2,3,4}, R_{d2,4,6,8}, C_2, U_1$	



1 并联氮化镓的好处

2 氮化镓的关键特性 - 利于并联

氮化镓的关键特性

导通损耗分布: $R_{DS(on)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: $V_{GS(th)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: g_m 与 T_j 的关系

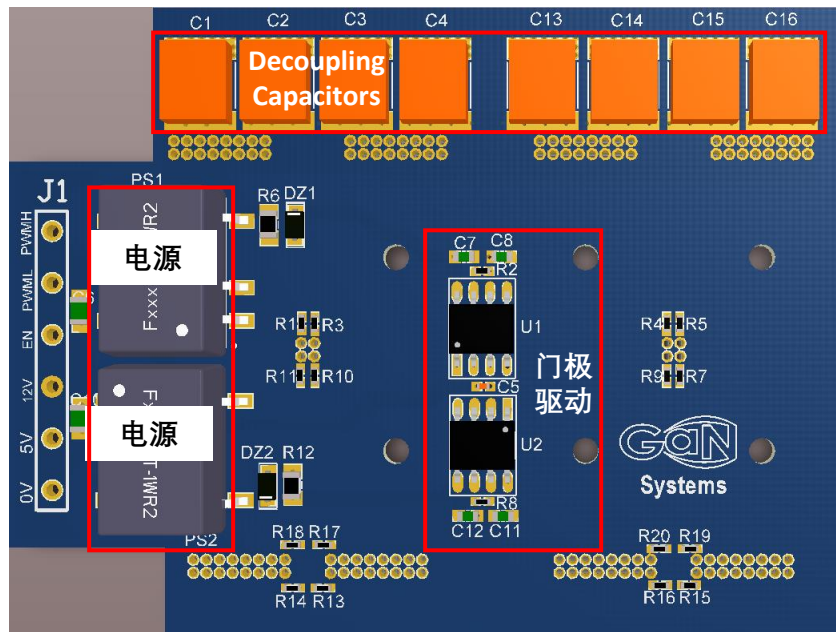
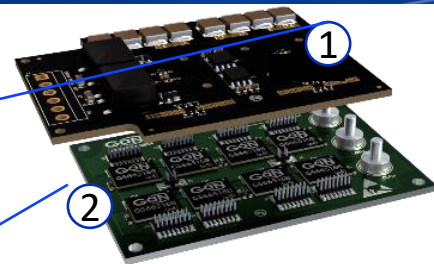
3 并联氮化镓的布局以及设计要点

4 4颗氮化镓晶体管并联的实际例子

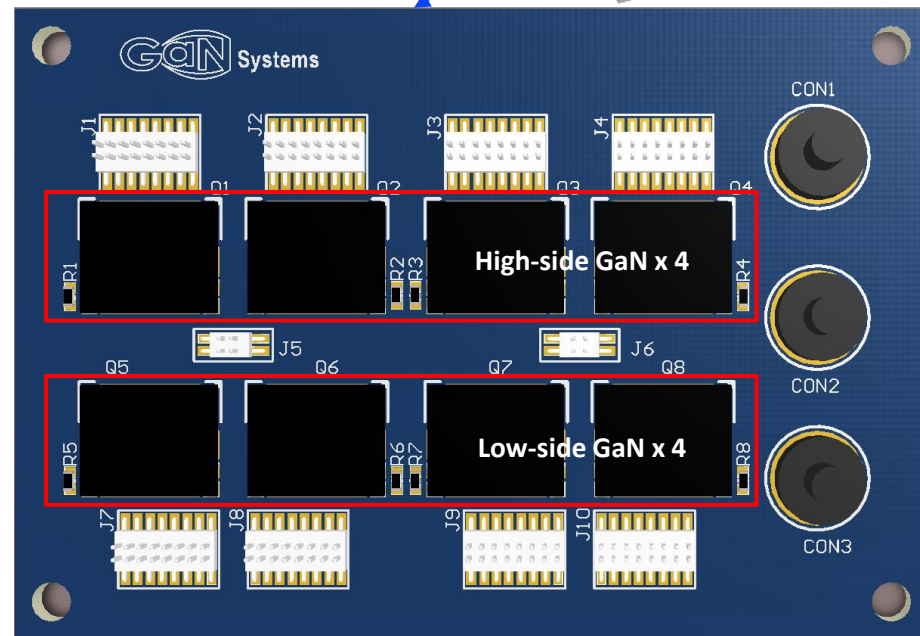
5 总结

4 4颗GS66516B并联的实际例子

这里以4颗GS66516B并联(650V 240A) 的铝基模块计案例，展示如何设计其驱动和功率部分的布局



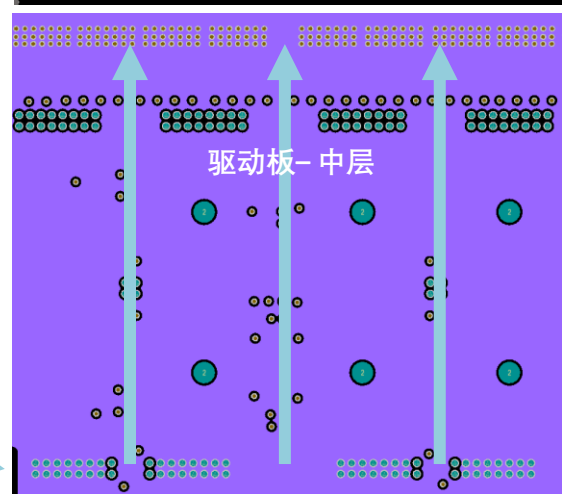
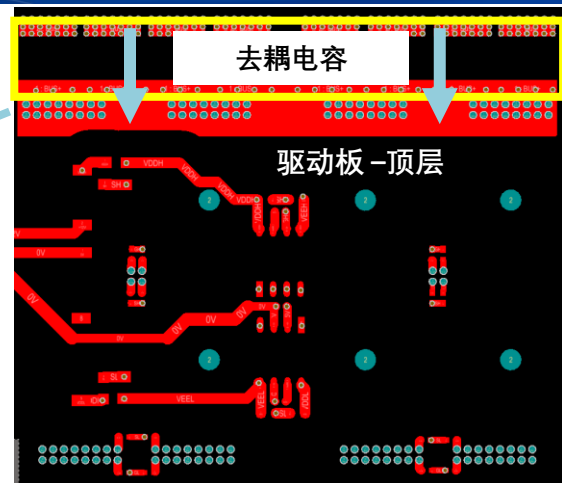
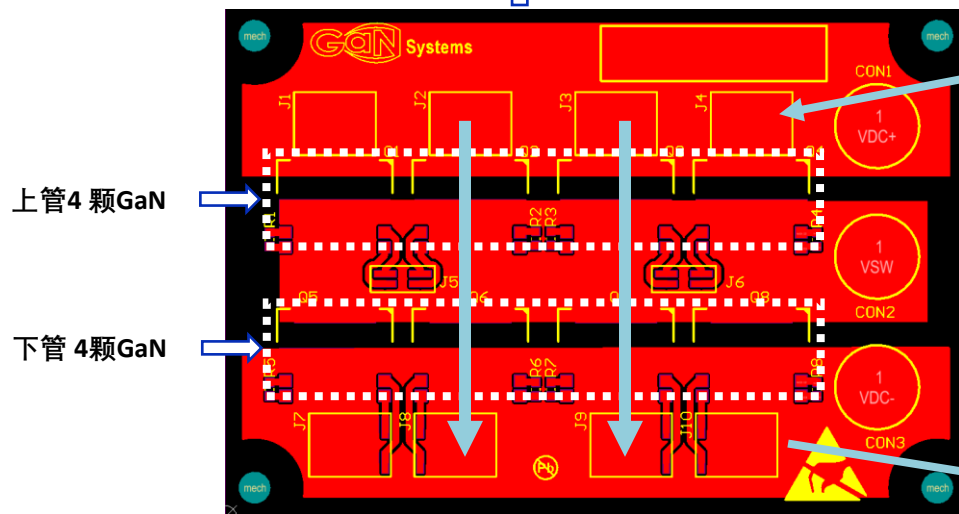
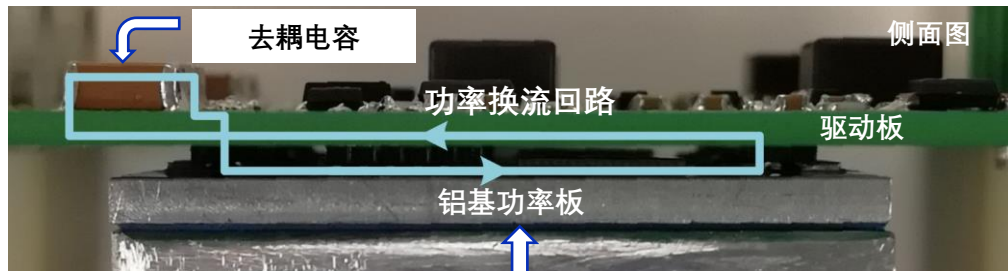
① 门极驱动板



② 铝基功率板

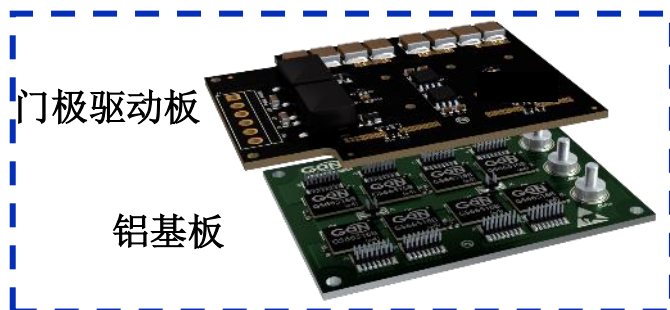
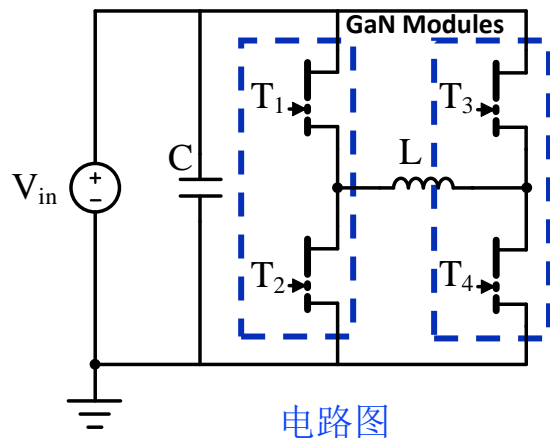
4 4颗GS66516B并联: 功率部分布局设计

磁通抵消可以有效减少功率换流回路的电感

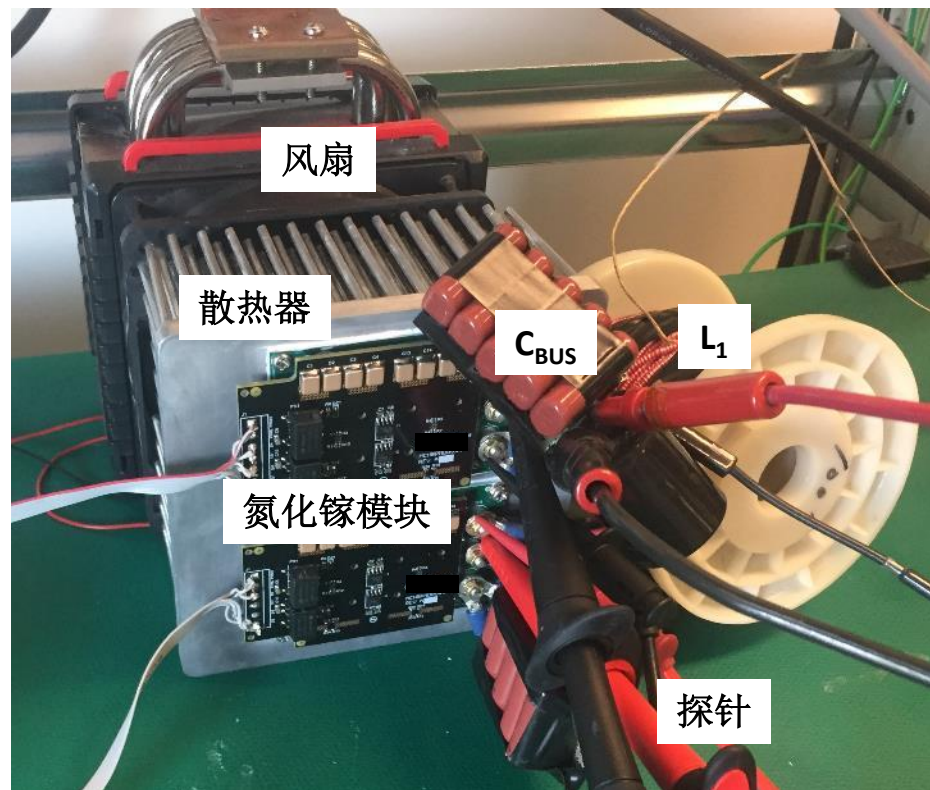


4 4颗GS66516B并联: 满载仿真测试设置

□ 在大功率条件下搭建满载仿真测试工作台来测试650V 240A 氮化镓铝基板模块



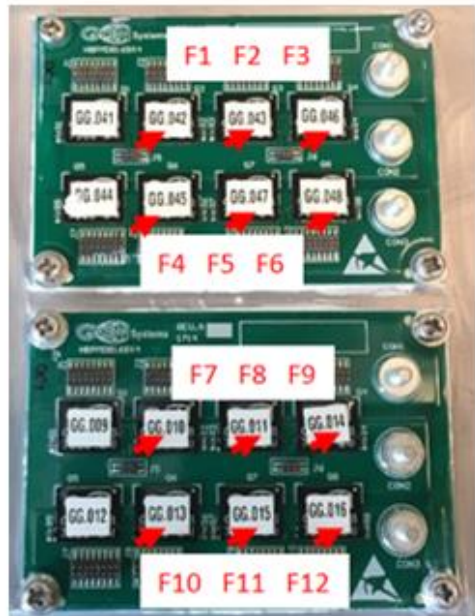
240A/650V 半桥氮化镓模块



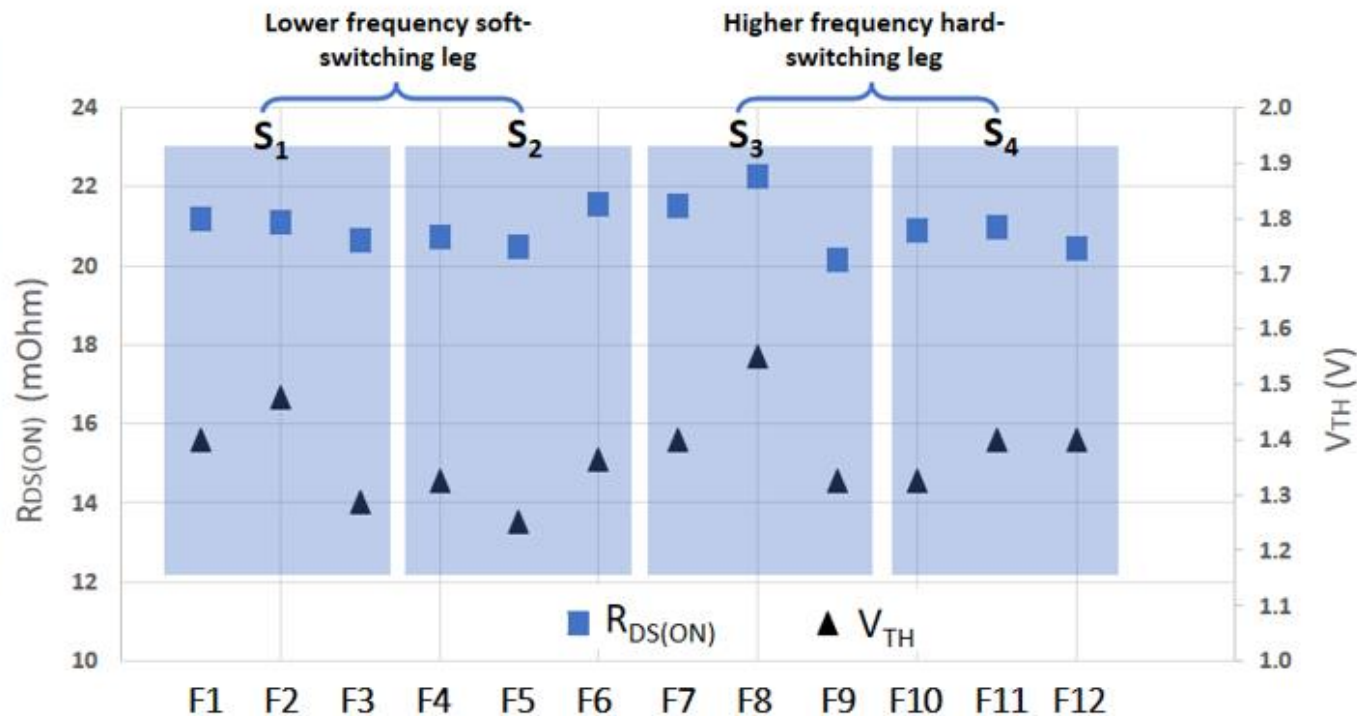
实验工作台

4 颗GS66516B并联: 测试对象 (DUT) 的特性

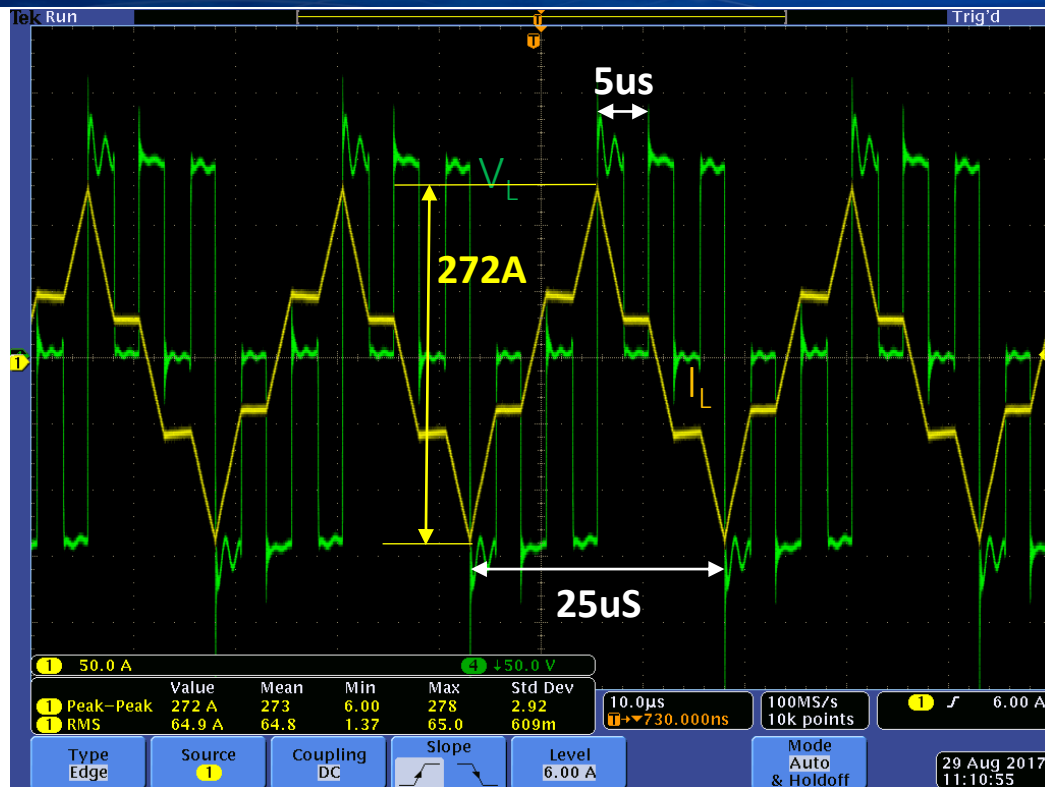
□ 随机挑选氮化镓晶体管用作并联



GaN power modules under test

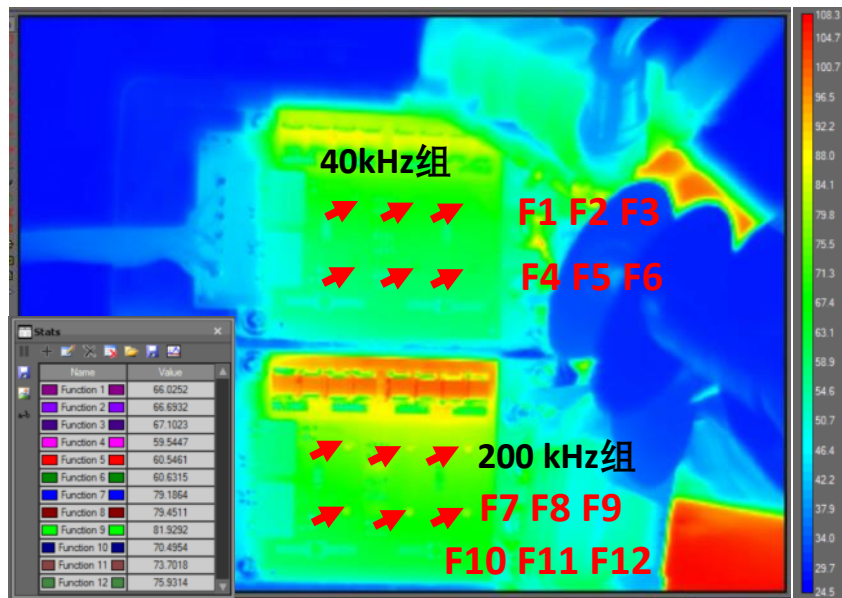


4 4颗GS66516B并联: 实验波形



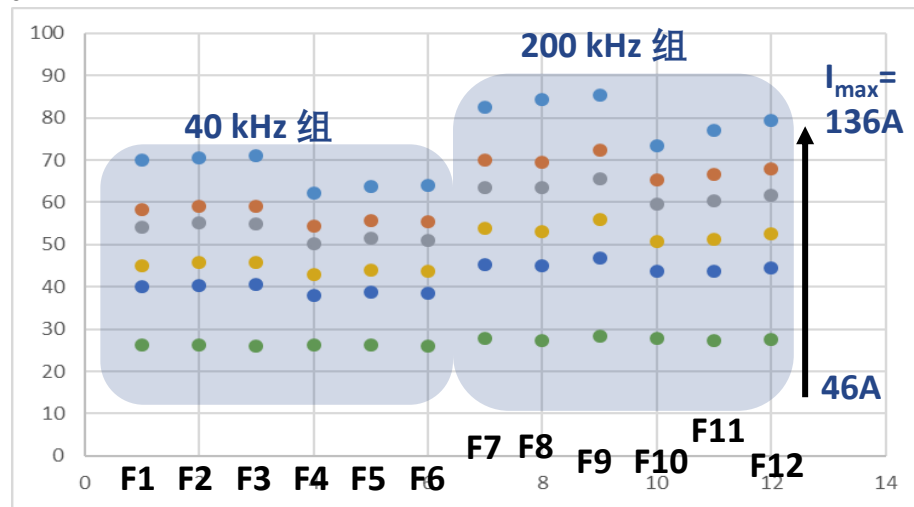
- ❑ 满载仿真测试，工作条件为 $I_{\max} = 136\text{A}$, $I_{\text{RMS}} = 65\text{A}$, $F_{\text{SW}} = 200\text{kHz}$
- ❑ 电流和电压开关波形都良好

4 4颗GS66516B并联: 热分布



$I_{max}=136A$ 条件下的热分布

$T_j/^\circ C$



所有工作范围内的热分布

- ❑ 所有随机挑选的晶体管都达到了热平衡 – 无热失衡现象
- ❑ 良好的热平衡性能: 结温差在最恶劣条件下 $< 6^\circ C$, 在最好条件下 $< 3^\circ C$

1 并联氮化镓的好处

2 氮化镓的关键特性 - 利于并联

氮化镓的关键特性

导通损耗分布: $R_{DS(on)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: $V_{GS(th)}$ 与 T_j 的关系

开关损耗分布: g_m 与 T_j 的关系

3 并联氮化镓的布局以及设计要点

4 4颗氮化镓晶体管并联的实际例子

5 总结

- GaN Systems 的增强型高电子迁移率晶体管(E-HEMT) 内部特性非常适合并联:
 - 正温度系数的 $R_{DS(on)}$
 - 工作温度范围内**稳定的**门极阈值电压
 - 负温度系数的**跨导** g_m

- 对于并联高速氮化镓晶体管，布局非常重要：
 - 功率以及门极回路的寄生电感要小且平衡
 - 相近长度的门极驱动布局以及优化的门极驱动电路

- 该手册展示了4颗氮化镓晶体管并联的设计案例，并且测试结果表明**所有氮化镓晶体管都达到了热平衡**



Power Semiconductors

650 V



5.0 x 6.0 mm

GS-065-004-1-L 4 A, 450 mΩ

GS-065-008-1-L 8 A, 225 mΩ

GS-065-011-1-L 11 A, 150 mΩ



8.0 x 8.0 mm

GS-065-011-2-L 11 A, 150 mΩ

GS-065-018-2-L 18 A, 78 mΩ

GS-065-030-2-L 30 A, 50 mΩ



6.6 x 5.0 mm

GS66502B 7.5 A, 200 mΩ

GS66504B 15 A, 100 mΩ



GS66506T

22.5 A, 67 mΩ

5.6 x 4.5 mm



GS66508T

30 A, 50 mΩ

7.0 x 4.5 mm



GS66508B

30 A, 50 mΩ

8.4 x 7.0 mm



GS-065-060-3-T 60 A, 25 mΩ

GS66516T 9.0 x 7.6 mm



GS-065-060-3-B 60 A, 25 mΩ

GS66516B 11.0 x 9.0 mm

650 V

AutoQual+



GS-065-060-5-T-A

60 A, 25 mΩ

9.0 x 7.6 mm



GS-065-060-5-B-A

60 A, 25 mΩ

11.0 x 9.0 mm



GS-065-150-1-D2

150 A, 10 mΩ

12.7 x 5.6 mm

100 V



GS61004B

38 A, 16 mΩ

4.6 x 4.4 mm



GS61008P

90 A, 7 mΩ

7.6 x 4.6 mm



GS61008T

90 A, 7 mΩ

7.0 x 4.0 mm



View All Products



Power Semiconductors

RESOURCES



Products & Datasheets



Evaluation Kits & Reference Designs



Application Notes



Featured Developments



We're Hiring



Newsroom



Video Content



Where to Buy



Product and application support at
gansystems.com