

AN010

通用文档

HV InnoGaN 小功率并联 设计指导

目录

- 1. 并联的意义 3
- 2. InnoGaN HV 并联特性..... 4
 - 2.1. VGS(th) 驱动阈值..... 4
 - 2.2. 导通电阻 $R_{DS(on)}$ 5
 - 2.3. 跨导 G_m 6
 - 2.4. 小结 8
- 3. GaN并联 layout设计 9
 - 3.1. PCB layout设计关注点 9
 - 3.1.1. 共源电感 9
 - 3.1.2. 功率回路 10
 - 3.1.3. 驱动回路 11
 - 3.2. 并联GaN设计 12
 - 3.2.1. 单管拓扑GaN并联..... 12
 - 3.2.2. 半桥拓扑GaN并联..... 12
- 4. 并联案例..... 14
 - 4.1. 小功率PFC并联方案 14
 - 4.1.1. 驱动设计 14
 - 4.1.2. 小功率PFC并联方案PCB设计 16
- 历史版本 17

1. 并联的意义

由于更高功率的需求不断增长，对具有更低导通电阻 $R_{DS(on)}$ 的开关管的需求更加强烈。在许多应用中，单个开关管已经不足以承载系统所必要的电流，这就往往需要并联开关管，以降低导通损耗，降低器件温升并提高功率转换器的效率。由于需要在功率转换器中并联开关管，设计工程师面临着并联开关管之间不均流和功率损耗不平衡的问题，因为它们在导通和关断过程中并不完全同步。

2. InnoGaN HV 并联特性

针对InnoGaN并联，本文将从 $V_{GS(th)}$ 、 $R_{DS(on)}$ 和 G_m 三个维度来分析InnoGaN是否适用并联场景。

2.1. $V_{GS(th)}$ 驱动阈值

对于功率器件， $V_{GS(th)}$ 为开通阈值电压；这意味着，当驱动电压低于阈值电压时，器件停止传导电流。对于GaN功率器件，阈值电压是当栅极下方的2DEG被栅极的电压完全耗尽时的电压值。对于多GaN并联时，需要考量 $V_{GS(th)}$ 与 T_J 的关系。

通过对3管并联Boost场景的仿真，分析不同阈值 $V_{GS(th)}$ 的开通和关断时分担系统电流。

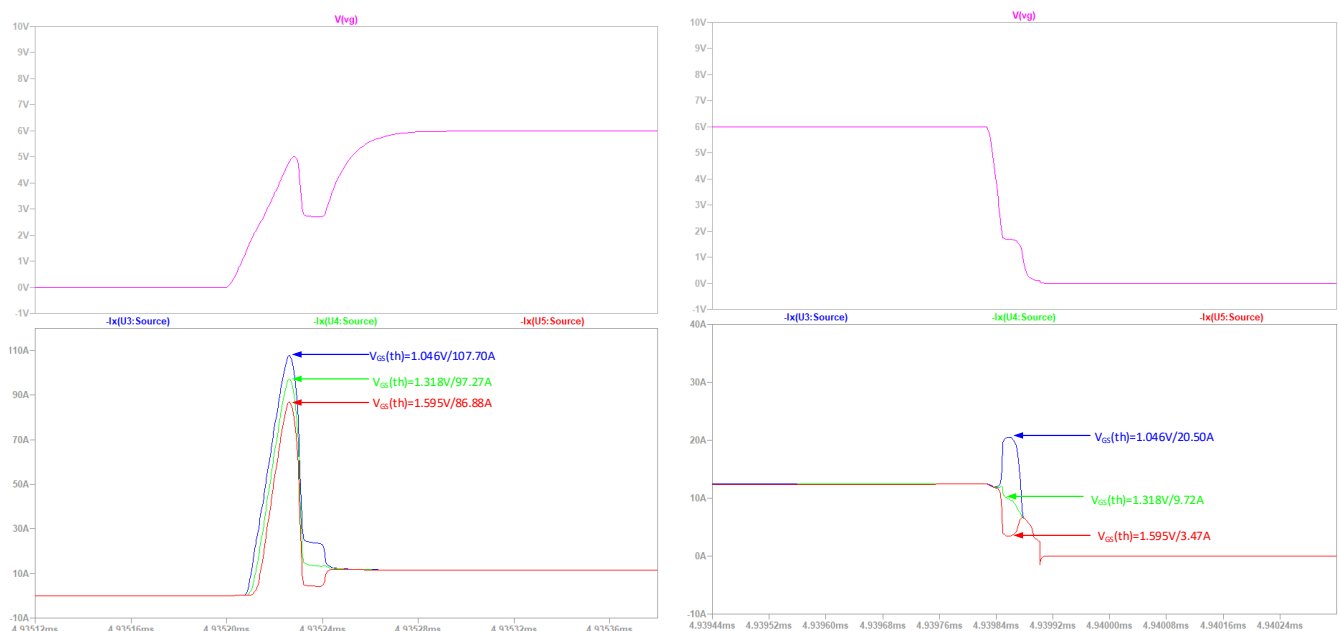


图 1 左图、开通过程电流分布，右图、关断过程电流

通过仿真数据，可以看出当 $V_{GS(th)}$ 越小，在并联场景时，在开通和关断所分担系统的电流越大，导致 $V_{GS(th)}$ 小的器件开关损耗越大。

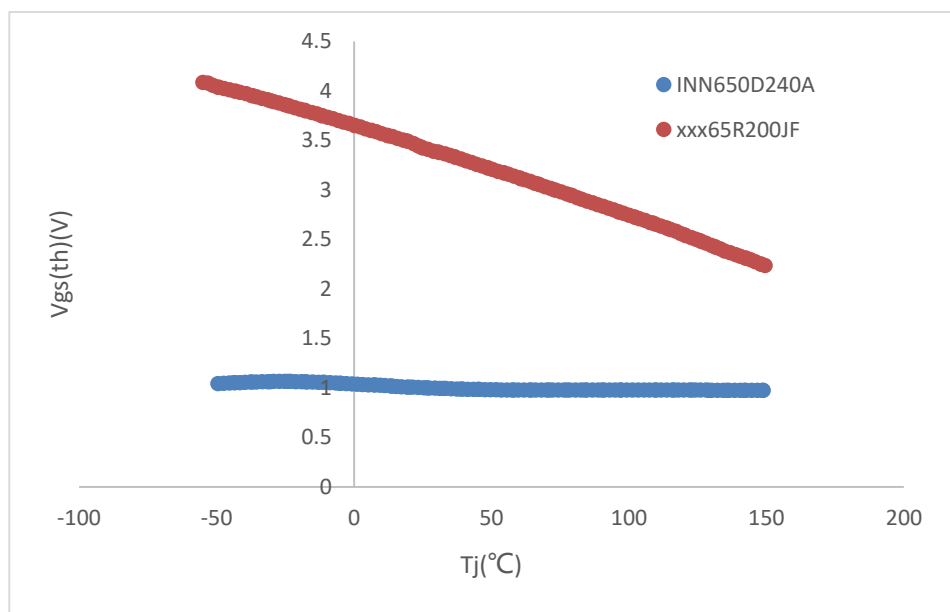


图 2 VGS(th)与TJ 的关系

由上面的VGS(th)与TJ 关系可以分析出Si的VGS(th) 与TJ 影响明显，阈值越小的器件所承受的关断损耗变大，器件整体损耗增加，器件随着TJ增加，VGS(th)会变得更小，损耗更加大，加剧并联的不均流问题，不利于并联。而INN650D240A的VGS(th)与TJ相对平稳，有利于并联场景。

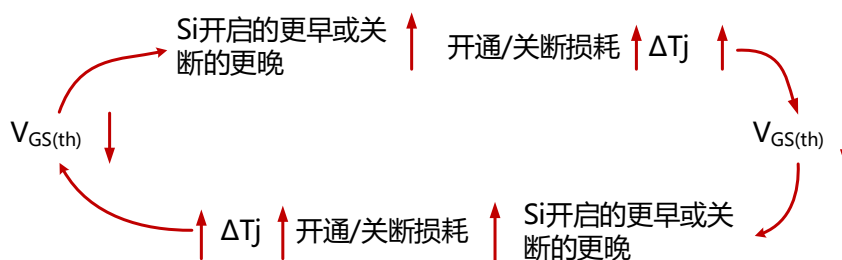


图 3 并联时Si的VGS(th)与TJ的关系

2.2. 导通电阻 $R_{DS(on)}$

导通电阻 $R_{DS(on)}$ 是指组成器件的所有电阻之和。开关管在并联导通状态下， $R_{DS(on)}$ 越小，通过的电流越大， $R_{DS(on)}$ 越大，通过的电流越小。

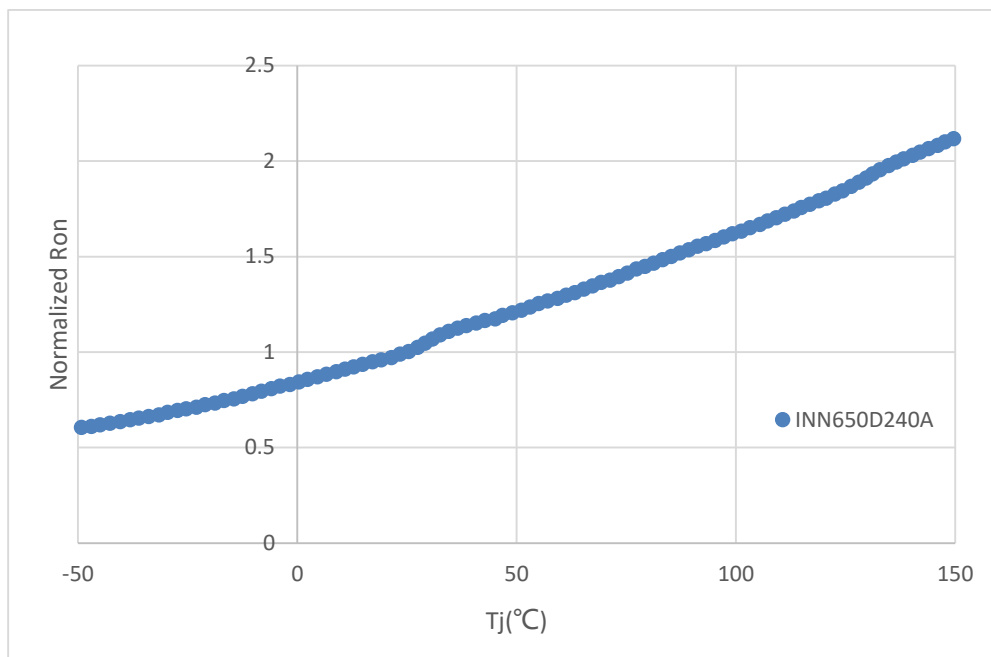


图 4 RDS (on) 与Tj 的关系

由上图可以看出， $R_{DS(on)}$ 与 T_j 的关系是正温度系数，即 T_j 温度越高，其 $R_{DS(on)}$ 越大。并联器件 T_j 较低时，器件 $R_{DS(on)}$ 较小。可以根据 $P = \frac{U^2}{R_{DS(on)}}$ ，推算出 T_j 较低，其导通损耗变大。器件损耗变大后， T_j 上升， $R_{DS(on)}$ 变大，器件损耗降低，循环交替工作，最终导致系统稳定。

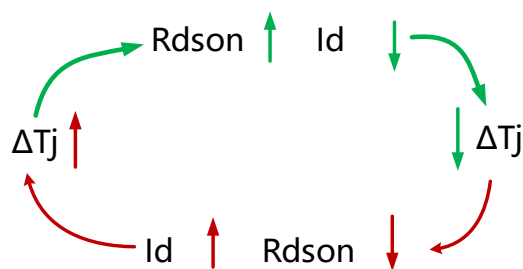


图 5 并联时，GaN RDS (on) 与Tj 的关系

2.3. 跨导 Gm

跨导 G_m ，描述电压控制电流的能力，其表达式如下

$$G_m = \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{gs}}, \text{ 在同样的 } \Delta V_{gs} \text{ 下, } G_m \text{ 越大, 其沟道通过的电流越大。}$$

通过仿真建立不同 G_m 时在三管并联 Boost 开关模态时的电流分布，仿真结果如下

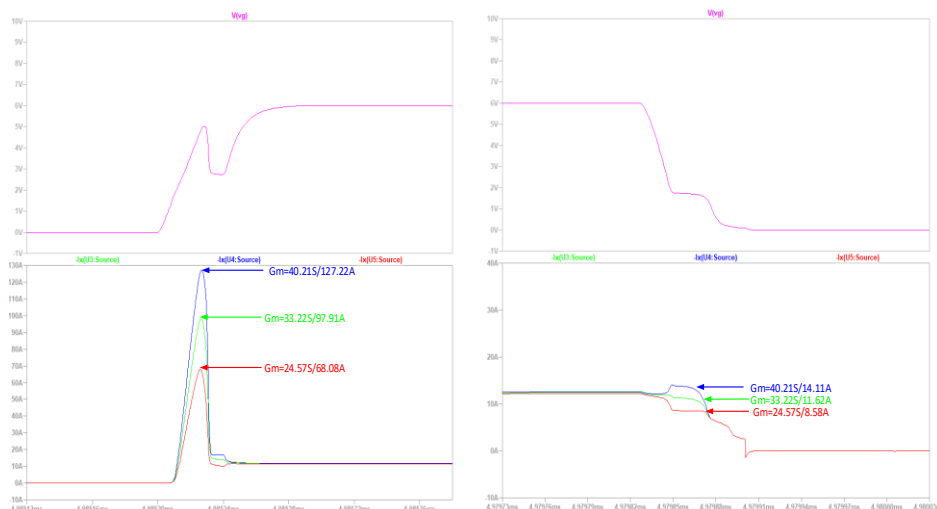


图 6 不同Gm 在开关时刻的电流分布

通过图6仿真数据可以看出，在开通和关断时刻，Gm 越大，通过的器件的电流越大。在并联的场景条件下，因为Gm 越大，其开通和关断分担的电流越大，其开关损耗越大。

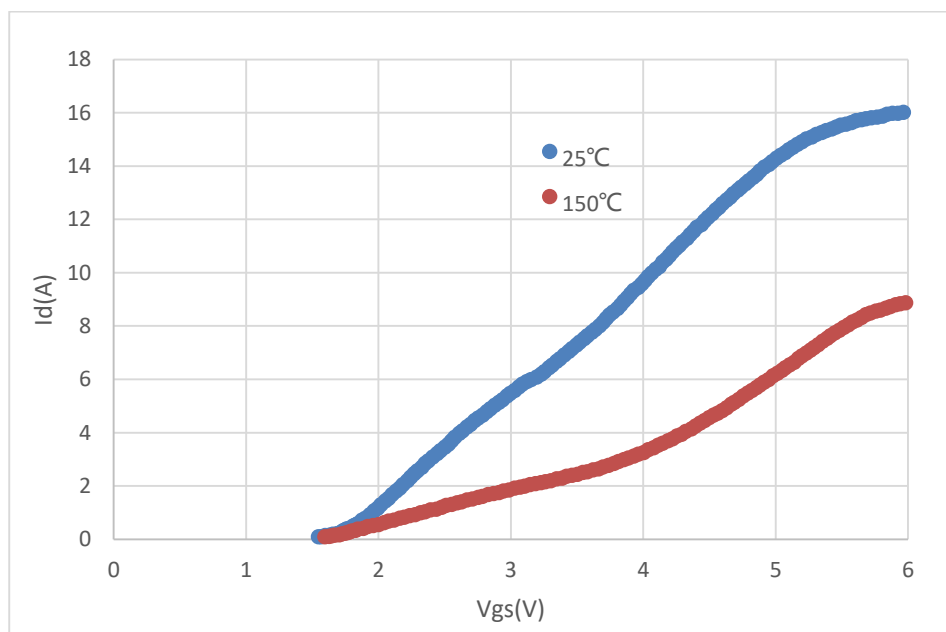


图 7 INN650D240A不同温度下的传输特性

INN650D240A的数据可以看出随着TJ慢慢升高，Gm 慢慢降低。在并联场景，Gm 大器件所分担的开通和关断电流变大，其开关损耗增加，器件整体损耗变大，器件的TJ升高，Gm 降低，器件分担的开通和关断电流减少，损耗下降，循环交替工作，最终导致系统稳定。

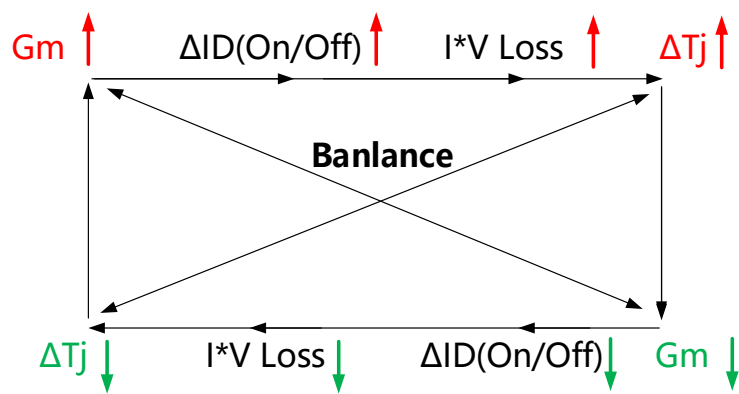


图 8 GaN并联 Gm 与Tj 的关系

2.4. 小结

通过对InnoGaN的VGS(th) 、RDS (on) 和Gm 三个维度分析并联的可行性，经过理论分析，InnoGaN适合并联。针对并联，下表1总结了这三个关键因素差异对并联影响的严重程度。

表 1 并联参数影响程度

参数	符号	并联不平衡表现： 参数减小对器件损耗影响	影响程度
栅极阈值电压	$V_{GS(th)}$	开通损耗增加 关断损耗增加	$V_{GS(th)}$ 差异越大，开通，关断电流差异越大，对并联影响越严重
跨导	Gm	开通损耗减小 关断损耗减小	Gm差异越大，开通，关断时电流差异越大，对并联影响越严重
导通电阻	$R_{DS(on)}$	导通损耗减小	GaN HEMT 并联中Ron与Tj存在动态平衡，影响程度较小

3. GaN 并联 layout 设计

3.1. PCB layout 设计关注点

为了实现更高的功率应用，部分场景需要使用多个GaN并联。如何使多个GaN性能的表现的如一个GaN一样，本节将从共源电感、功率回路和驱动回路去实现多管并联的方案设计。

3.1.1. 共源电感

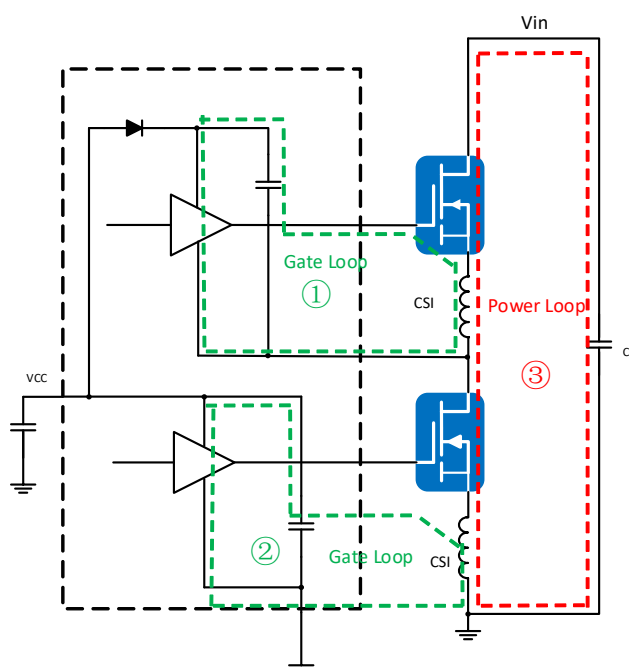


图 9 半桥功率电路示意图

共源电感（CSI）是栅极驱动回路和功率回路共用的回路电感（如图9中的CSI）

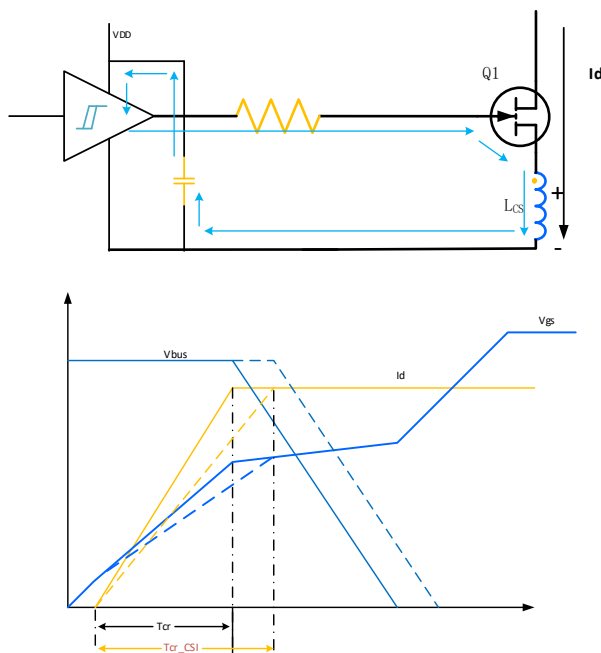


图 10 共源电感影响

在器件导通的过程中， di/dt 的大小取决于驱动电路的驱动能力。由于有共源电感的存在，在开通过程中，漏极电流 di/dt 将在共源电感产生一个与栅极驱动电压相反的电感，从而减少用于栅极电容充电的电流，延长转换时间 T_{cr} ，增大开通损耗，降低效率。故在并联场景中需格外注意共源电感。

3.1.2. 功率回路

对于高频功率器件的布局，减少寄生电感非常重要。推荐PCB布局如下

1、瓷片电容靠近上管GaN，第一层采用功率回路，通过第二层构建最小的物理回路尺寸，并具备磁场自消除功能，将功率回路中的寄生电感降低，有助于降低尖峰电压和提高效率。

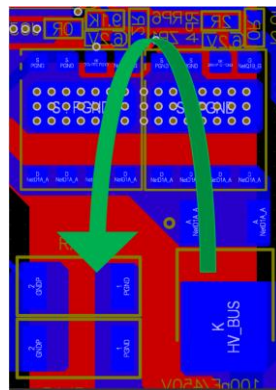
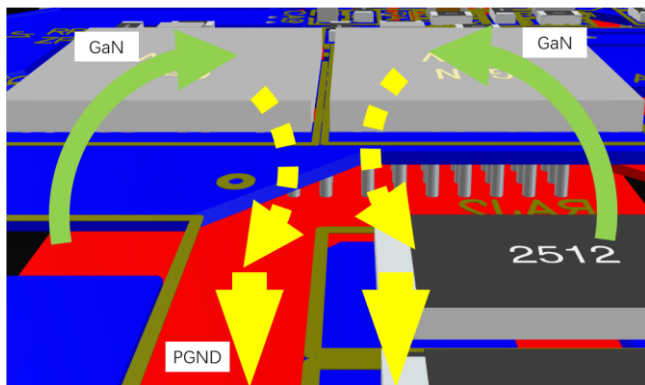


图 11 推荐PCB布局 (1)

2、并联器件间Layout保持对称，打孔数量保持一致以保持均流一致性。

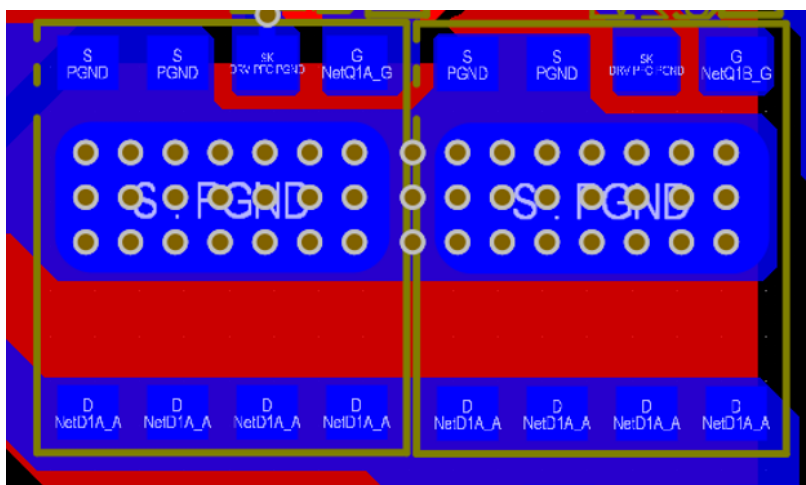


图 12 推荐PCB布局 (2)

3.1.3. 驱动回路

参考《AN001-高压InnoGaN驱动设计指导》驱动设计方案，对于并联驱动设计，驱动回路元件尽量共用，驱动电阻共用开通电阻R1，关断电阻R2，以保证驱动一致性。R3,R4靠近Gate端，可以有效抑制因为驱动回路长而带来的振铃问题。同时器件采用开尔文设计，将驱动回路与功率回路分离，有效减小CSI影响。

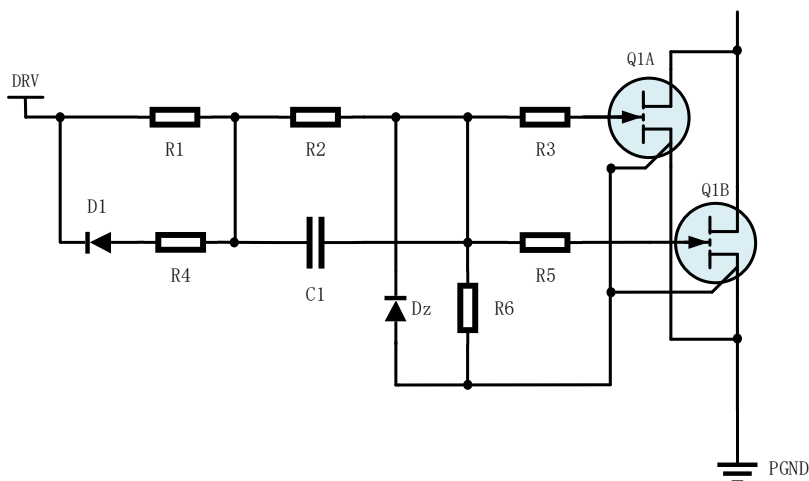


图 13 驱动设计

3.2. 并联 GaN 设计

3.2.1. 单管拓扑 GaN 并联

在单个开关器件中应用多个器件并联，它导致系统的结构复杂，需要考虑不同开关管各种电流路径。多个GaN并联应用对于PCB的对称性要求更加苛刻；

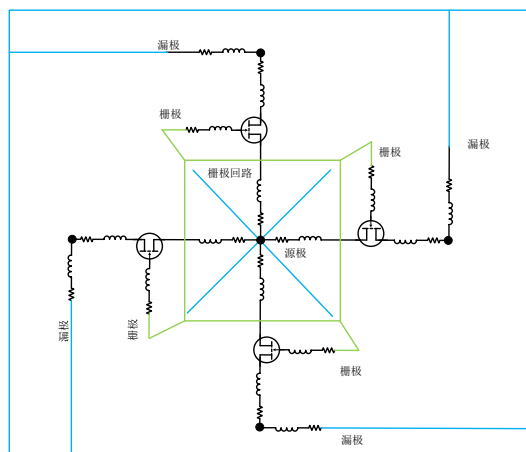


图 14 对称性布局示意图（适用高速开关应用）

为了符合对称的需求，并且使得GaN器件有效并联，如图12所示，功率回路对称、CSI和栅极回路都是有效的并联GaN的关键因数。随着并联的GaN数量增加，使得整个电路的布局无法实现完全对称。所以需要考虑寄生参数优先级。

- 1、共源电感的对称；
- 2、功率回路；
- 3、栅极回路；

3.2.2. 半桥拓扑 GaN 并联

对于半桥应用中的并联方式，可以应用上面布局方法，但是由于一些限制的原因，这种方案在该并联的场景中有局限，对于系统来说，不是最优的方案。最佳方案推荐对称镜像方案，如下图。

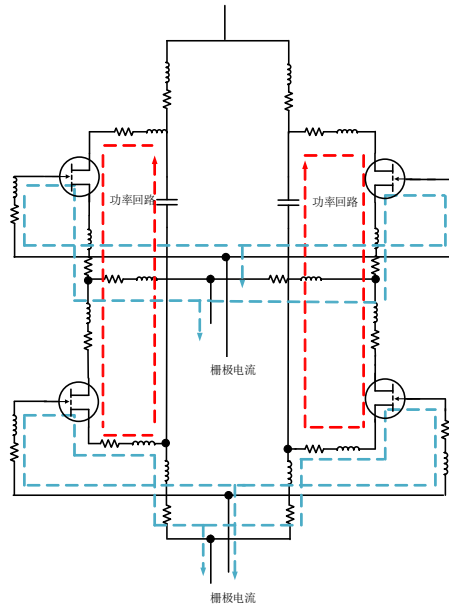


图 15 半桥对称性布局示意图

该对称性方案实现多GaN可靠并联方案。它具备独立的功率回路，不但可以将系统的总寄生参数降低，同时保证系统寄生参数的一致性，提供寄生参数最佳平衡。

4. 并联案例

4.1. 小功率 PFC 并联方案

基于上文应用设计要点，验证小功率PFC并联实际效果。该系统采用INN650D240A 2管并联，系统频率为65-100KHz。测试条件：输入电压90V PFC 输出375V &0.65A 工作1小时，CCM模式。并联器件参数如下：

表 2 实测并联参数

MPN	位号	Vth(V)	Ron(mΩ)
INN650D240A	Q1A	2.217	156.49
	Q1B	1.508	158.05

4.1.1. 驱动设计

基于上面GaN特性的分析，在该并联方案中，驱动电阻共用开通电阻RP1，关断电阻RP3，以保证驱动一致性。在靠近Gate端，增加RP4,RP5电阻，它可以有效抑制因为驱动回路长带来的振铃问题。

1.驱动开通电阻选型：开通电阻阻值取决于控制器的驱动电压及器件漏电流，EMI等因素，当前RP1选用130Ω。

2.加速电容CP1选型：加速电容用于对Ciss/ Crss快速放电，其大小计算方式如下

$$CP1 > Q_{gpl} / V_{pl} (Q_g = Q_{gs} + Q_{gd})$$

根据INN650D240A规格书，可计算并联加速电容需720pF,通常取2-3倍值，选用2.2nF。

3. 钳位二极管ZP1,ZP2考虑: 稳压二极管有精度, 温漂, 等参数, 建议选用精度2%的稳压管钳位。

4.下拉电阻RP6按经验值通常选用10-20K阻值

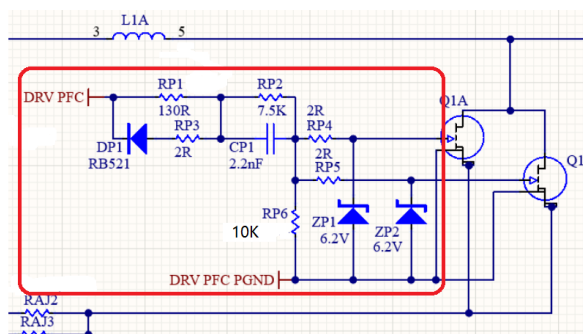


图 16 驱动配置

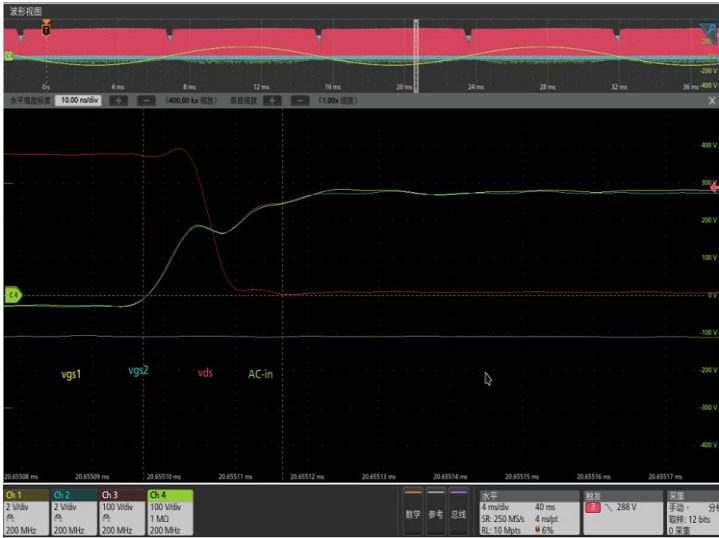


图 17 并联驱动波形

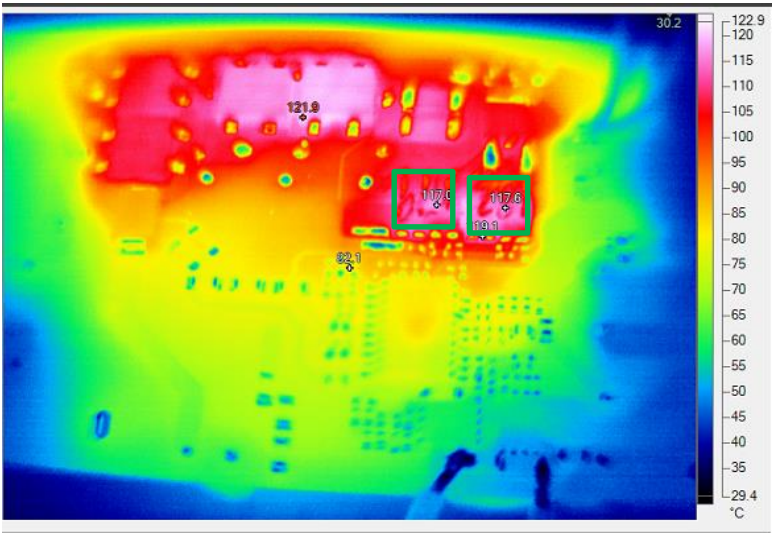


图 18 实测壳温

4.1.2. 小功率 PFC 并联方案 PCB 设计

采用如下PCB布局，减小了功率回路寄生电感，同时共源电感保持对称，驱动电路最小化，实现了最优并联布局。

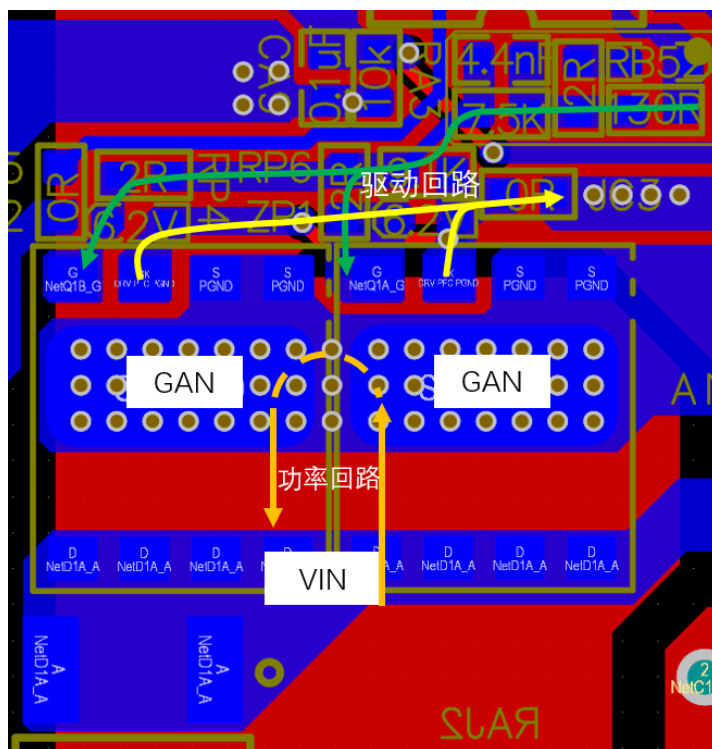


图 19 DFN8*8 封装PCB设计

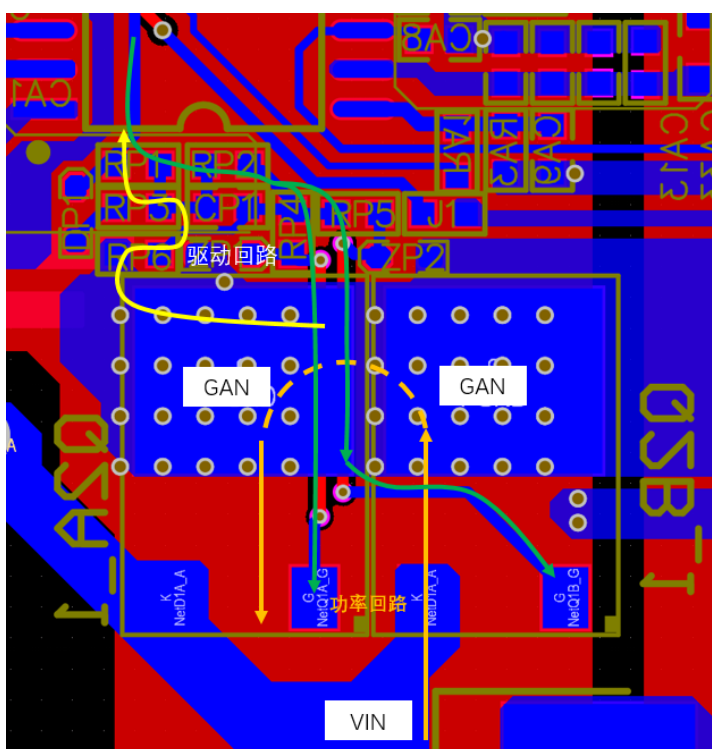


图 20 TO-252封装PCB设计

历史版本

日期	版本	备注	作者
2024/03/29	1.0	第一版	AE 团队



Note:

There is a dangerous voltage on the demo board, and exposure to high voltage may lead to safety problems such as injury or death.

Proper operating and safety procedures must be adhered to and used only for laboratory evaluation demonstrations and not directly to end-user equipment.



Reminder:

This product contains parts that are susceptible to electrostatic discharge (ESD). When using this product, be sure to follow antistatic procedures.



Disclaimer:

Innoscience reserves the right to make changes to the products or specifications described in this document at any time. All information in this document, including descriptions of product features and performance, is subject to change without notice. INNOIC ACCEPTSURBIT ACCEPTS NO LIABILITY ARISING OUT OF THE USE OF ANY EQUIPMENT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN. The performance specifications and operating parameters of the products described in this article are determined in a stand-alone state and are not guaranteed to be performed in the same manner when installed in the customer's product. Samples are not suitable for extreme environmental conditions. We make no representations or warranties, express or implied, as to the accuracy or completeness of the statements, technical information and advice contained herein and expressly disclaim any liability for any direct or indirect loss or damage suffered by any person as a result thereof. This document serves as a guide only and does not convey any license under the intellectual property rights of Innoscience or any third party.