



碳化硅功率MOSFET并联设计规则

Andy WU

1

背景介绍

2

关键影响因素

3

并联设计考虑

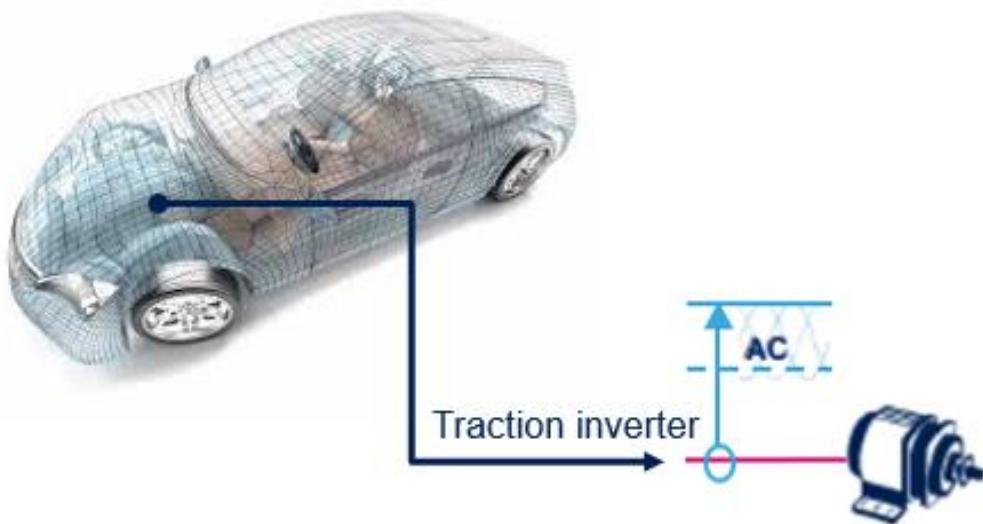
4

逆变器并联设计

第1部分 背景介绍

为什么我们需要并联设计？

并联功率晶体管器件可提高电流和功率能力



SiC MOSFET是第一个面临以下并联应用挑战的器件：

- 高压
- 高开关频率
- 高 dV/dt 和高 di/dt

并联解决方案的类型：

1. 功率分立器件并联 - 更灵活，成本更低
2. 功率模块中的多个晶片并联 - 更小的寄生参数和更好的布局

为什么我们要考虑并联设计规则?

本征SiC MOSFET参数: $V_{gs(th)}$ 、 R_{dson} 、反向恢复、 R_{thjc} 、寄生参数 (R_g 、 C_{iss} 、 C_{rss} 、 C_{oss} 、 L_g 、 L_s 、 L_d ...) 等。

器件参数不匹配

电路布局不匹配

栅极驱动不匹配

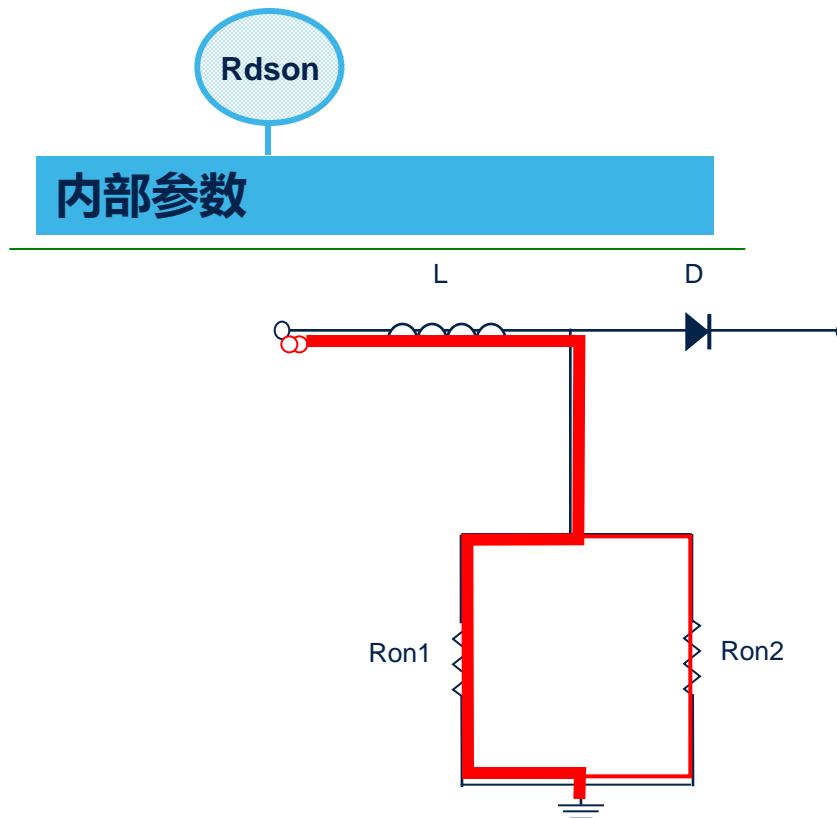
非理想并联的后果:

- 电流和功率损耗不平衡导致的热风险
- di/dt 和 dv/dt 不平衡以及布局寄生参数差异引起的电应力风险和栅极振荡

第2部分 主要影响因素

第2.1部分 器件参数不匹配

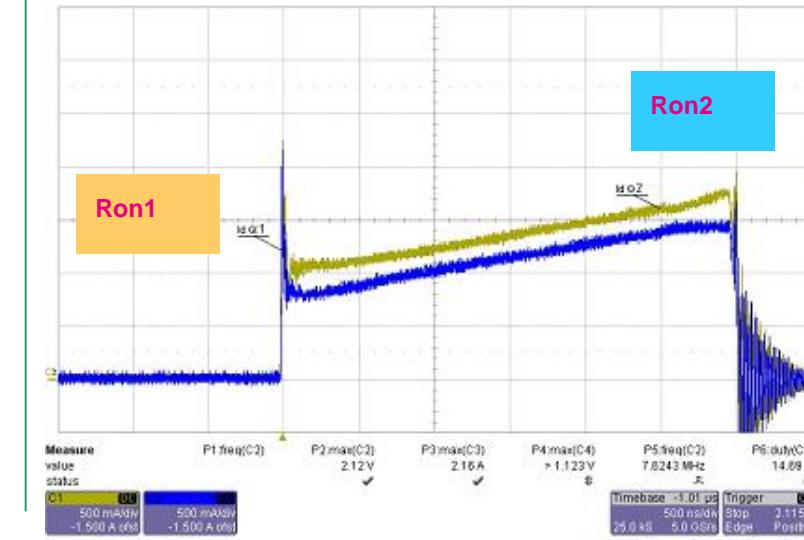
R_{dson}不匹配



假设

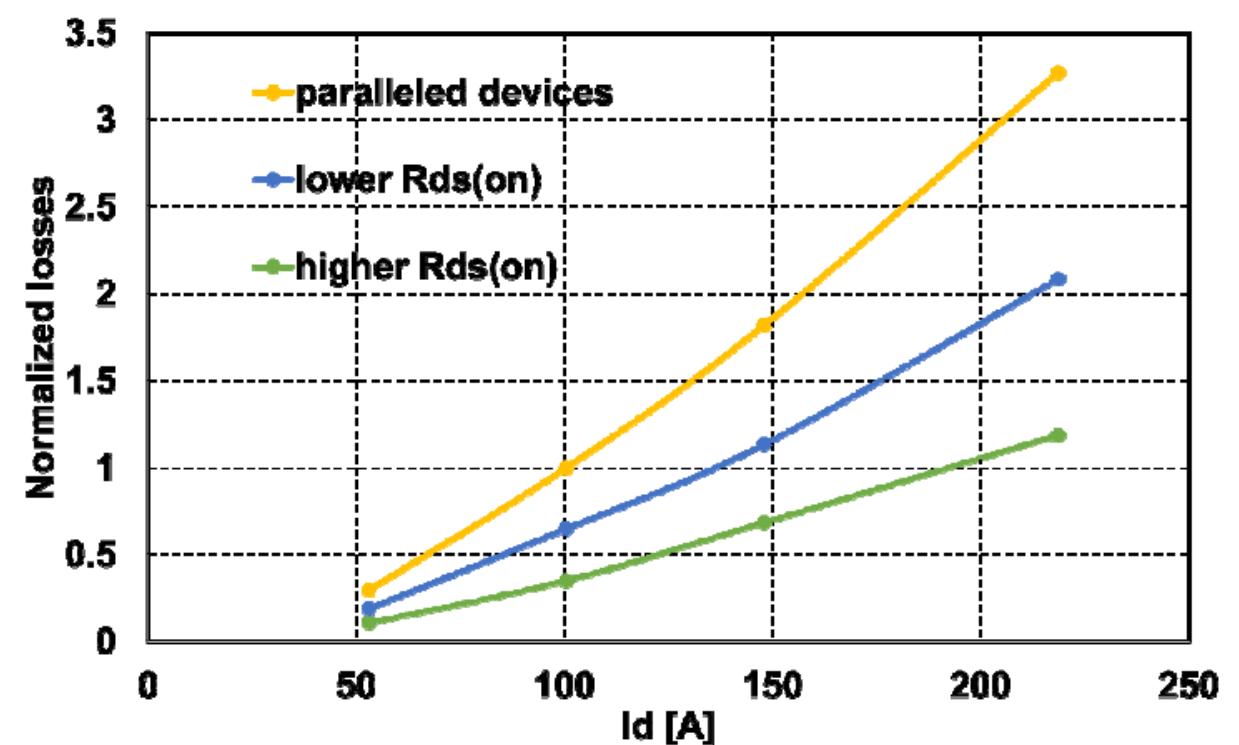
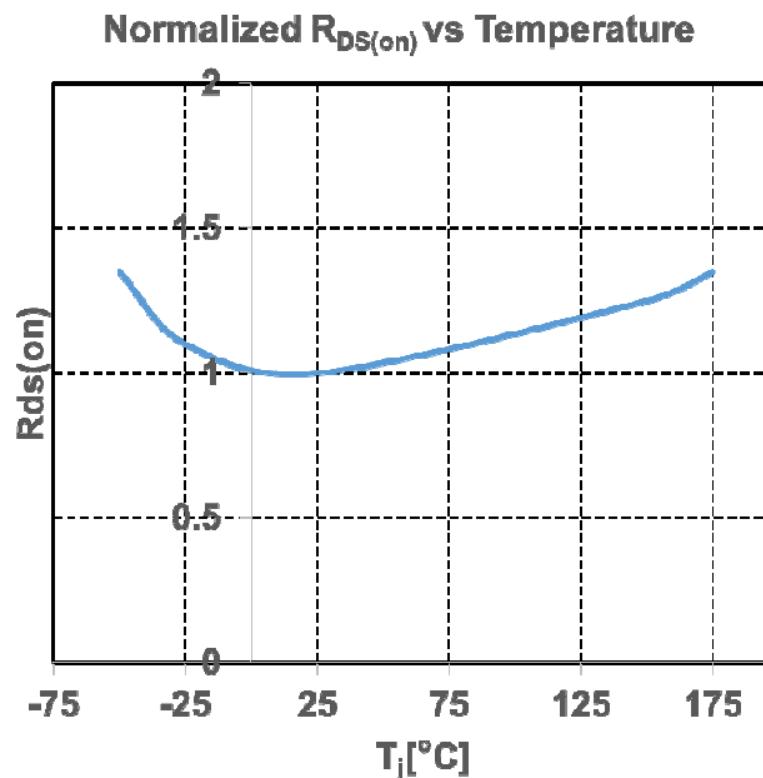
- 假设MOSFET类似于理想开关
- R_{DSON1} < R_{DSON2}

不平衡的导通电流



R_{dson}不匹配

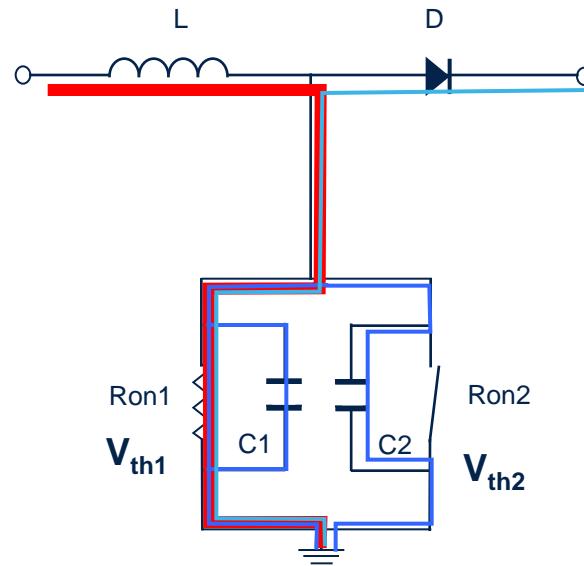
由于R_{d(on)}较低，导通损耗较大



VGS(th) 不匹配

V_{th}

内部参数



假设

- 假设MOSFET类似于理想开关
- $V_{th1} < V_{th2}$

开通/关断案例研究

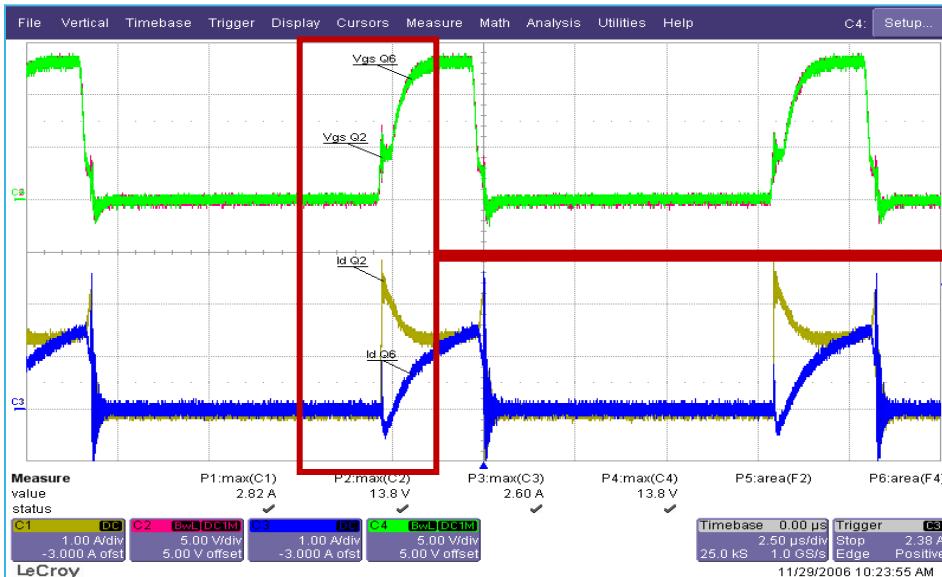
- 电感电流
- MOSFET电容电流
- 反向升压二极管电流

VGS(th) 不匹配

VGS(th)对动态电流平衡有影响

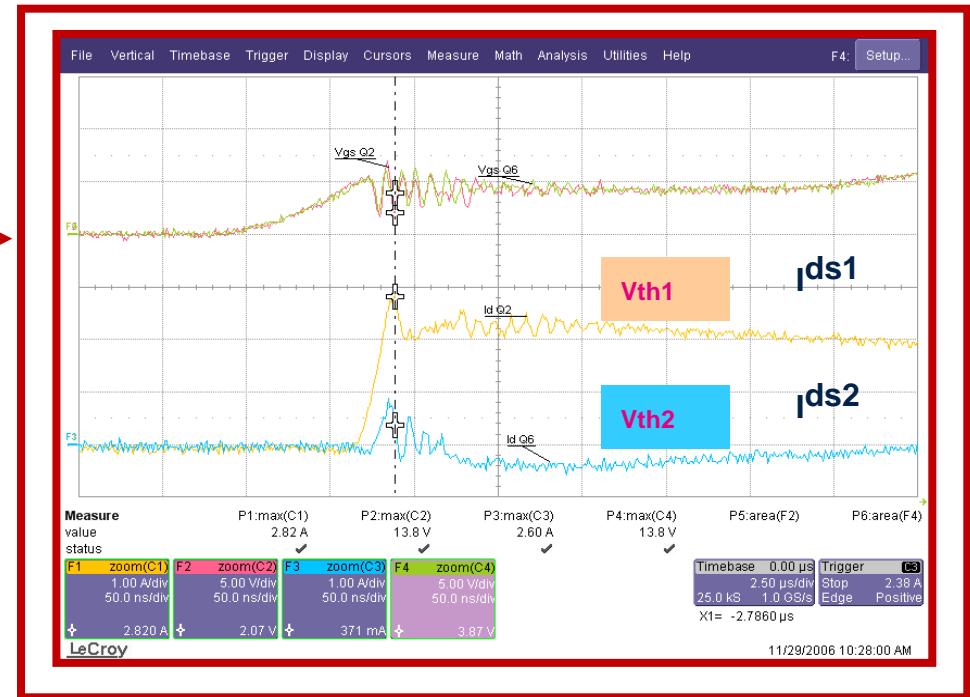
V_{th}

内部参数



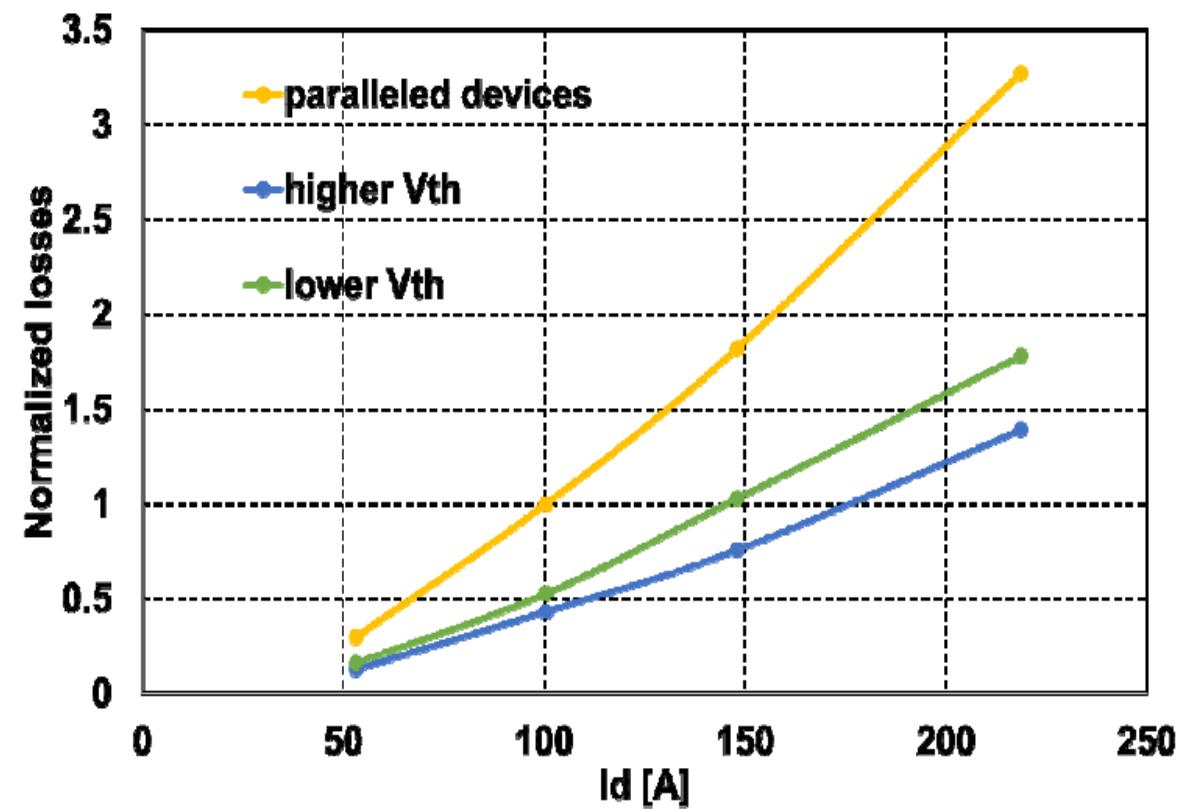
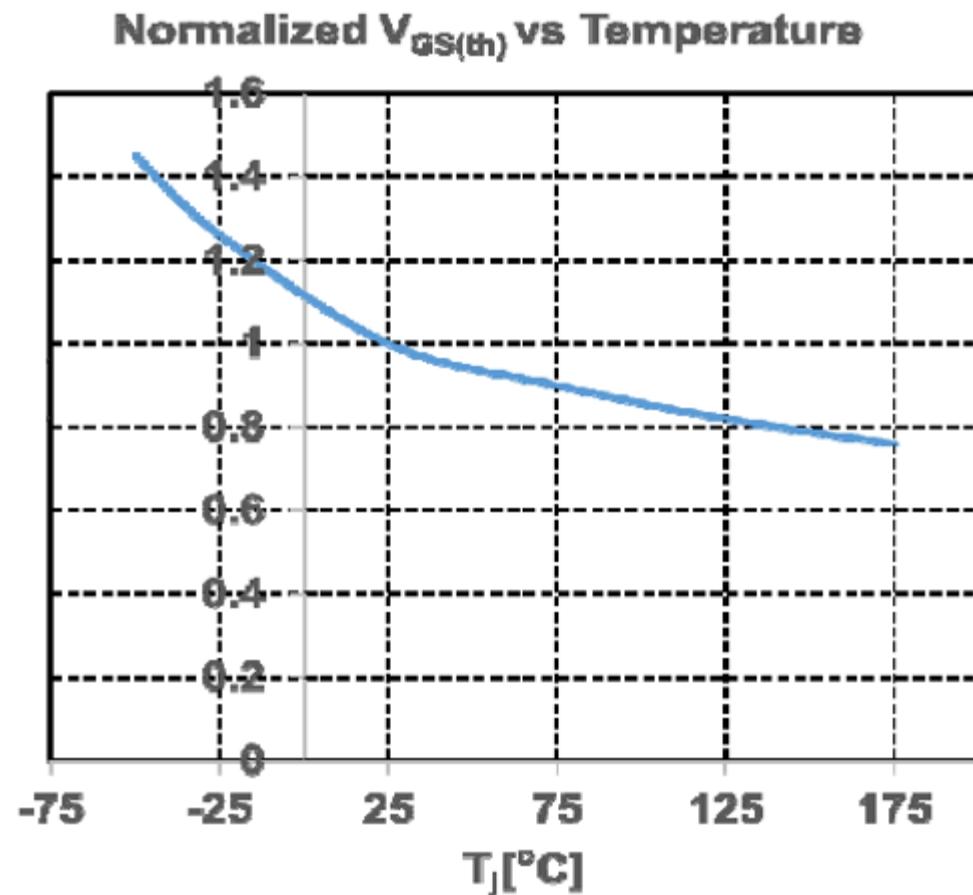
假设

- 假设MOSFET类似于理想开关
- $V_{th1} < V_{th2}$
- 开通



VGS(th) 不匹配

由于Vgs(th)较低，开关损耗较高



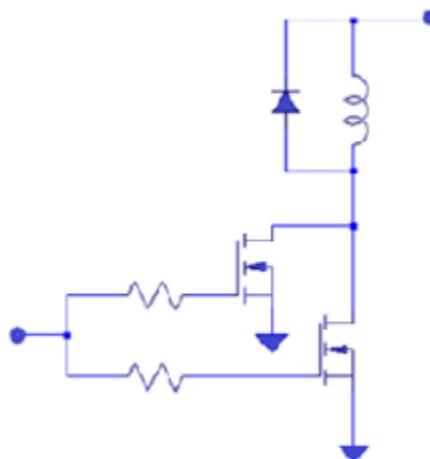
第2部分 主要影响因素

第2.2部分 栅极驱动不匹配

栅极驱动不匹配

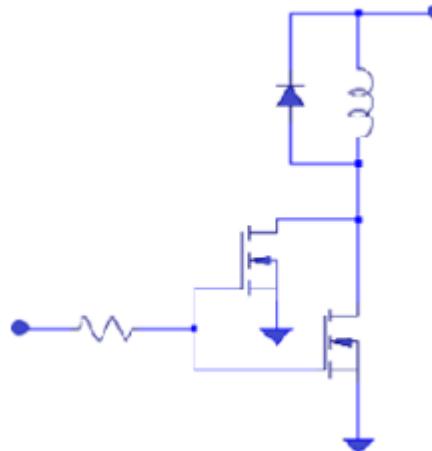
驱动电路设计旨在实现快速开关下以减少功率损耗与避免振荡之间取平衡

(a) 独立驱动



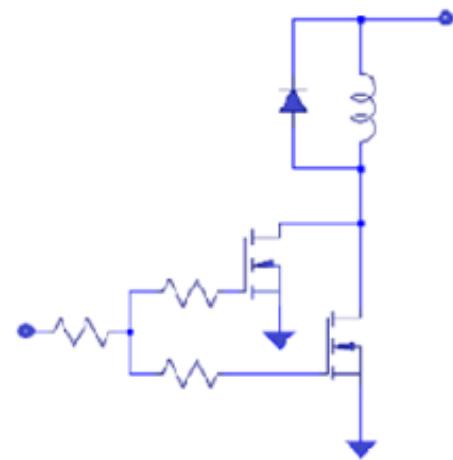
- 强解耦，对高频振荡不太敏感
- 易导致动态不平衡

(b) 共栅极驱动电阻



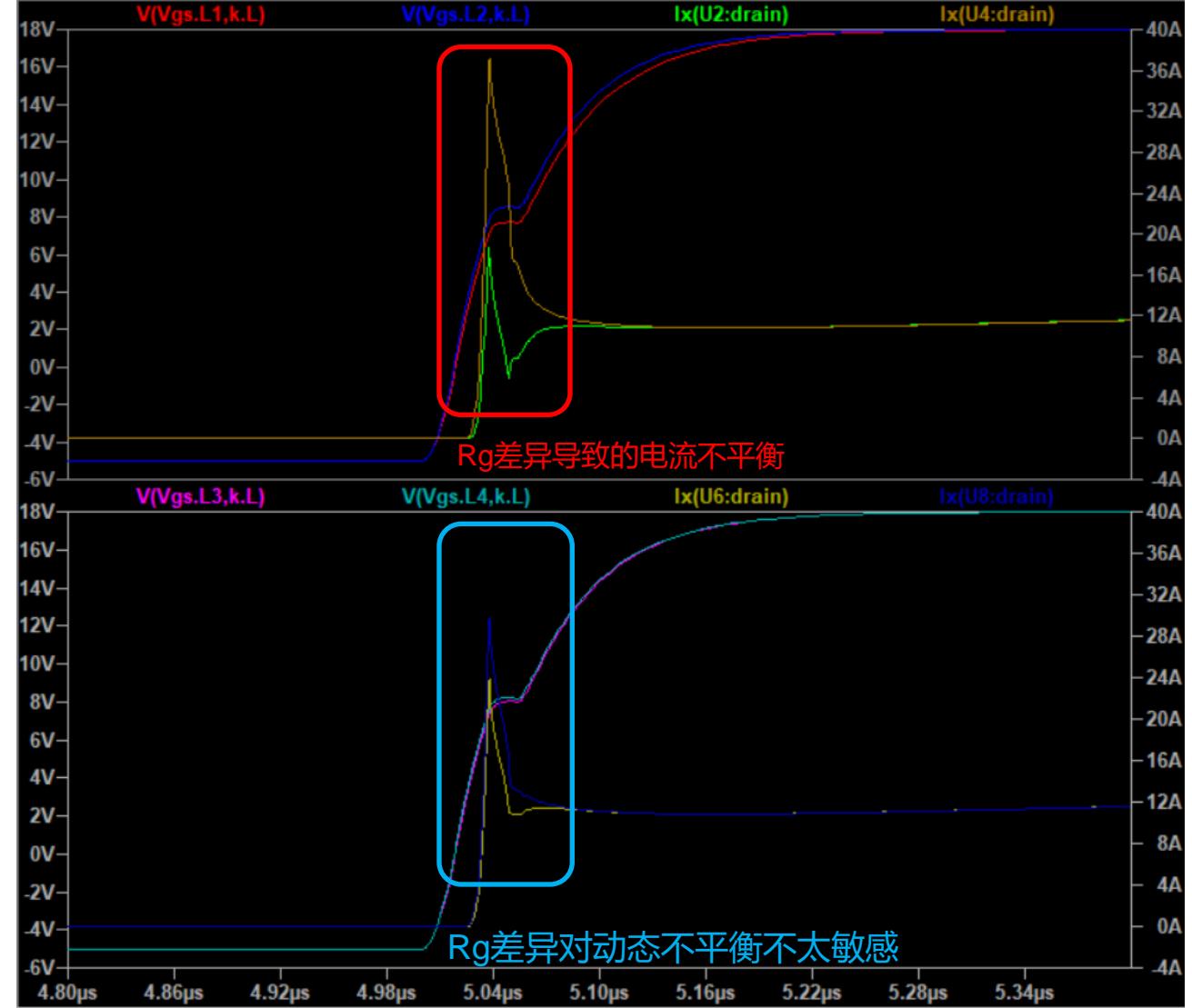
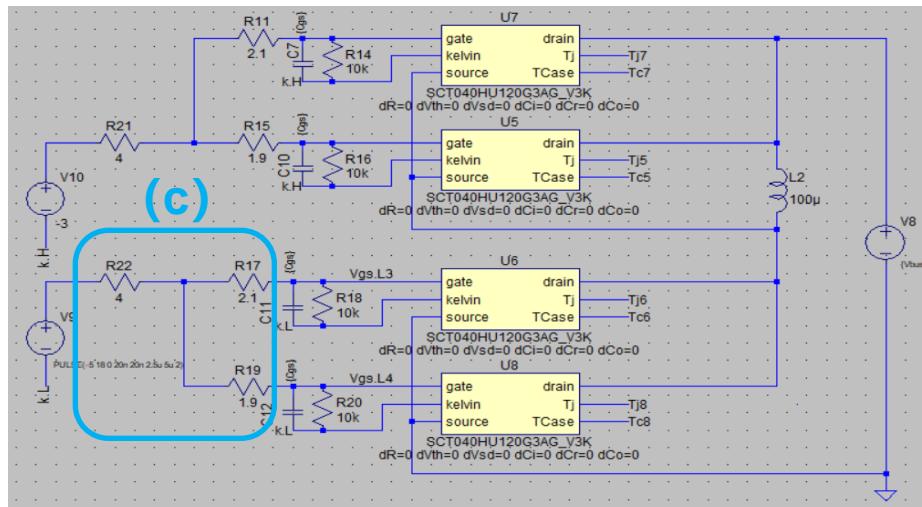
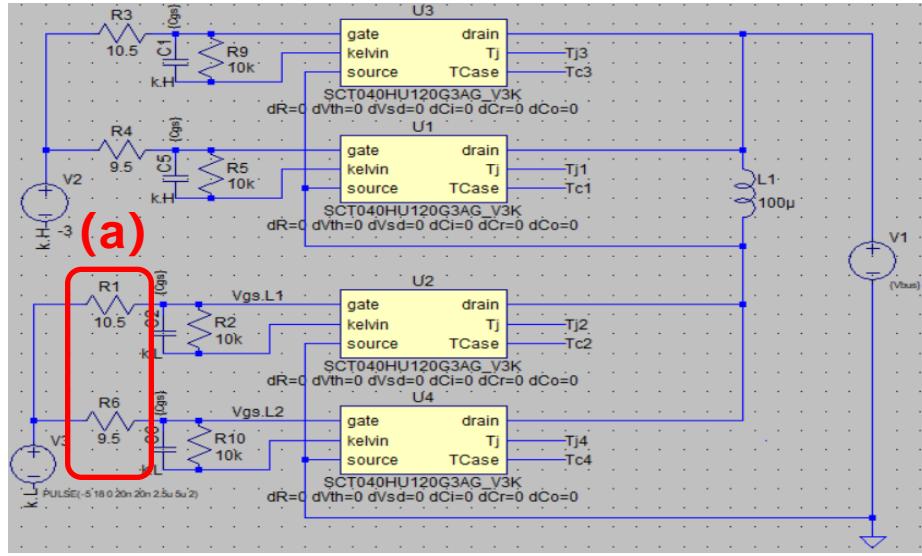
- 对动态不平衡不太敏感
- 易导致高频振荡

(c) 混合型驱动

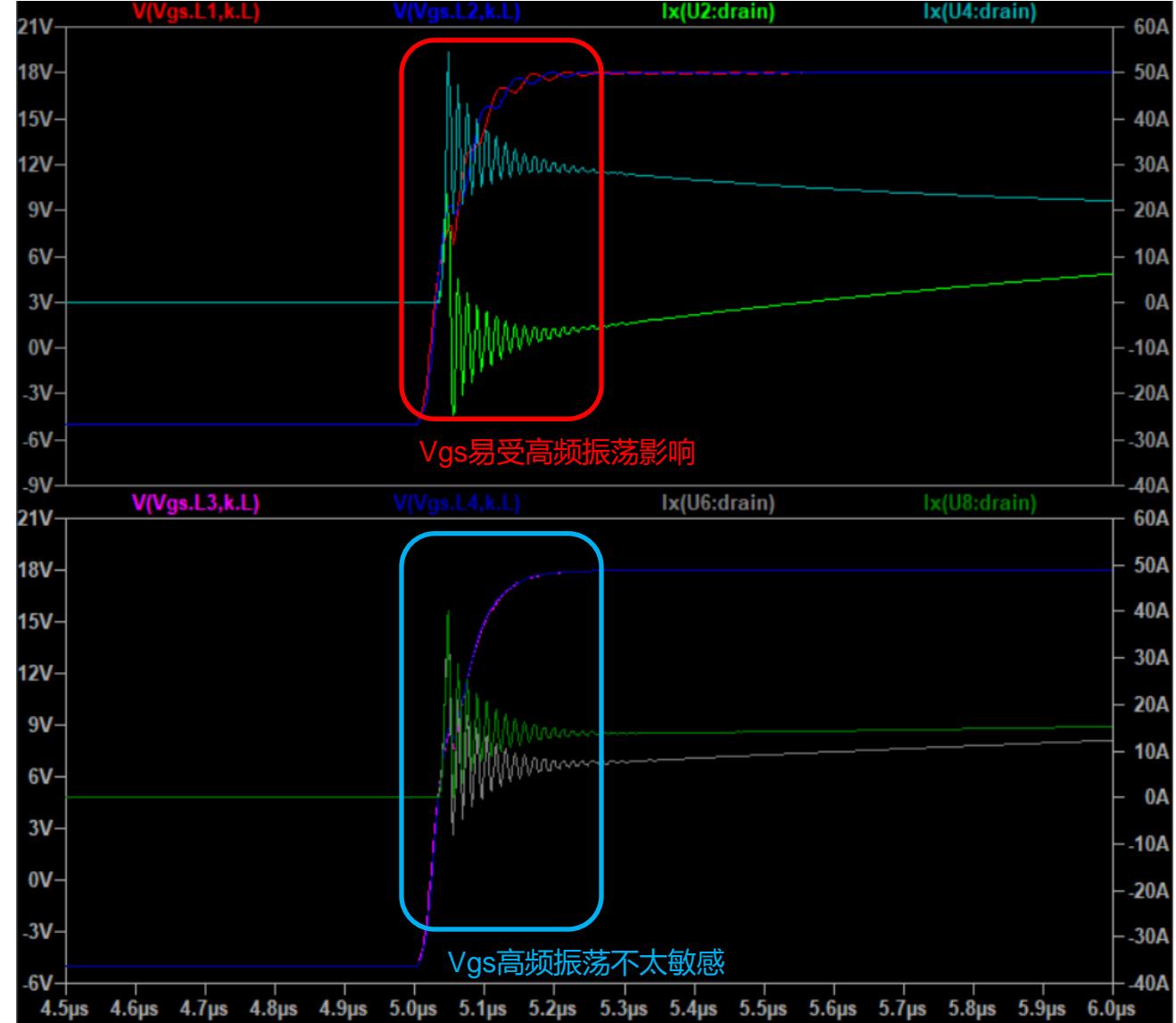
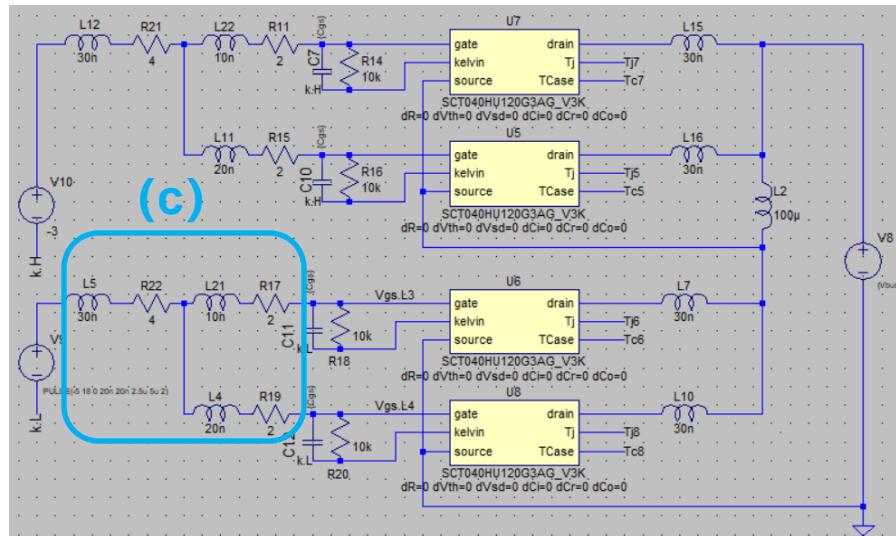
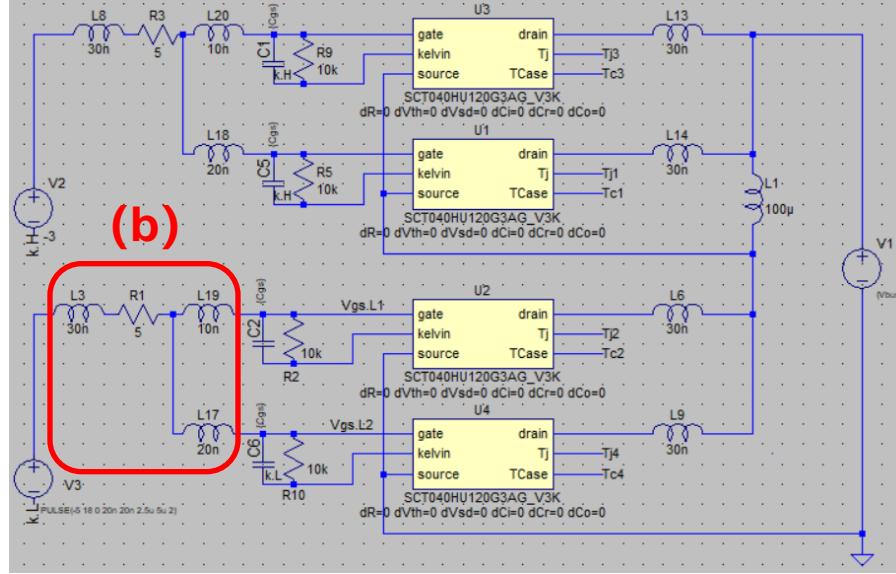


- 折中解决方案

SiC MOSFET并联和Rg影响



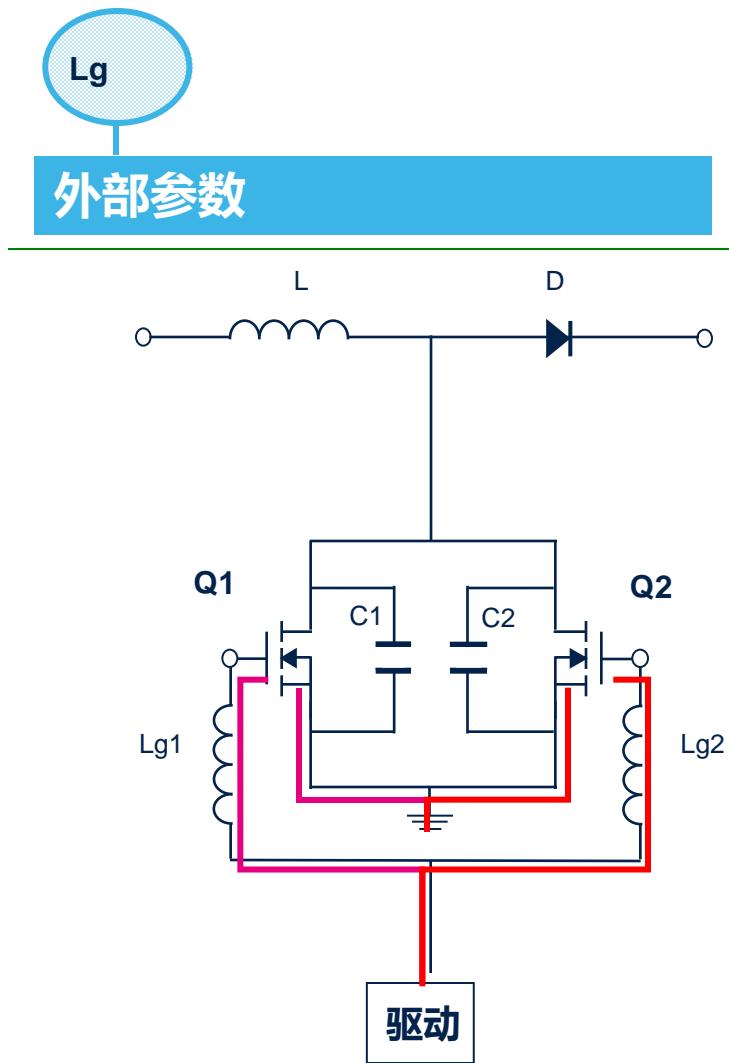
SiC MOSFET并联和Rg影响



第2部分 主要影响因素

第2.3部分 电路布局不匹配

电路布局不匹配



注意事项

$Lg1 \neq Lg2$

-电感Lg与栅极电流相反，因此栅极电压也不同

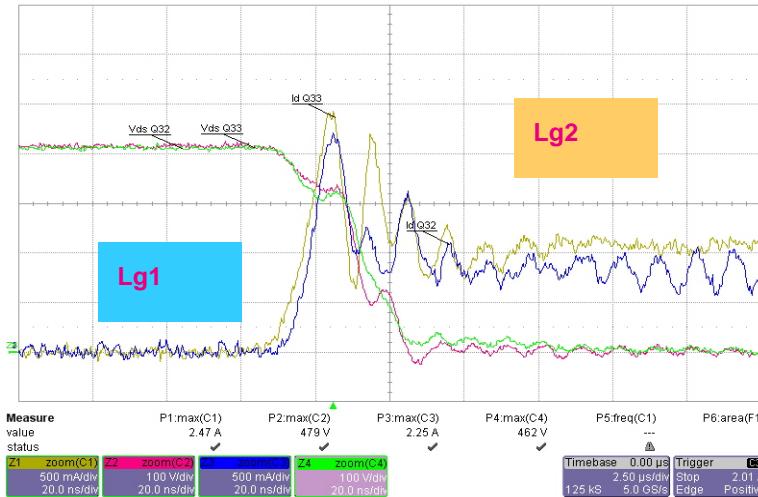
电路布局不匹配



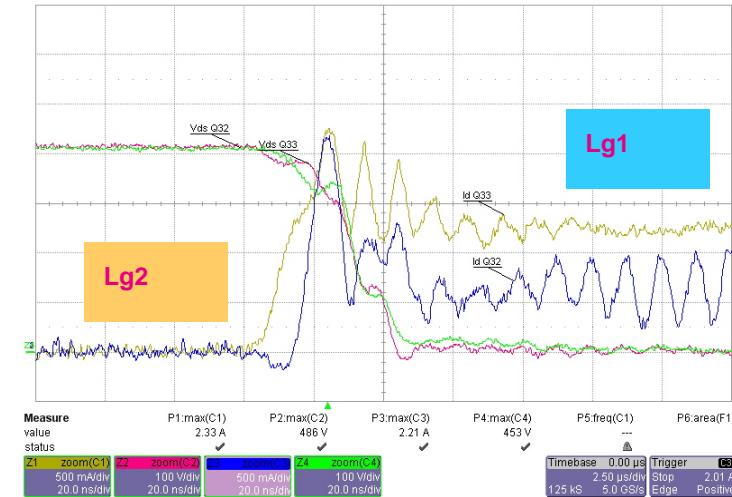
假设

导通

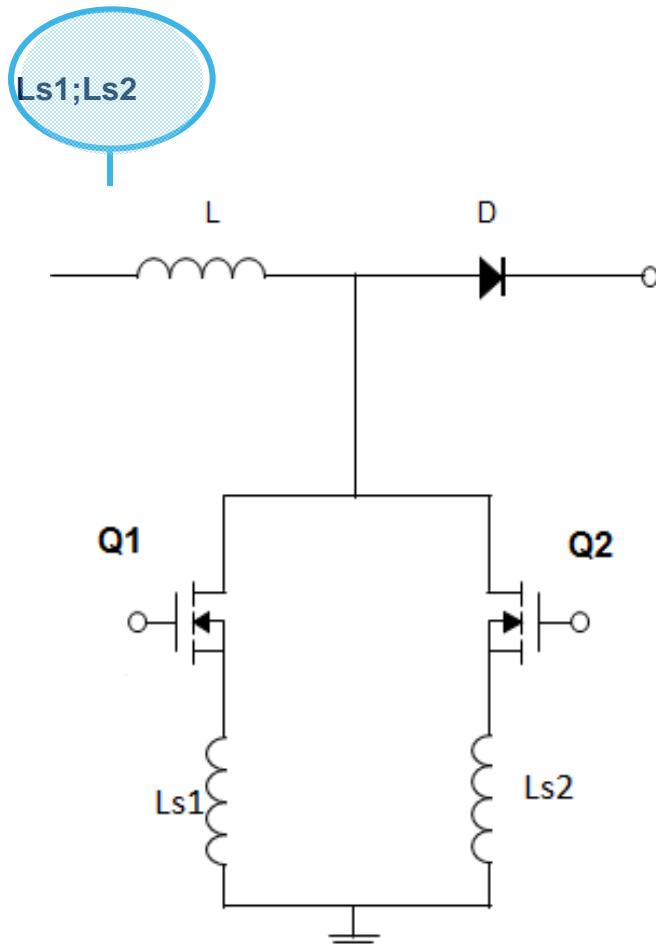
$Lg1 = Lg2$



$Lg1 > Lg2$



电路布局不匹配



注意事项

$Ls1 > Ls2$

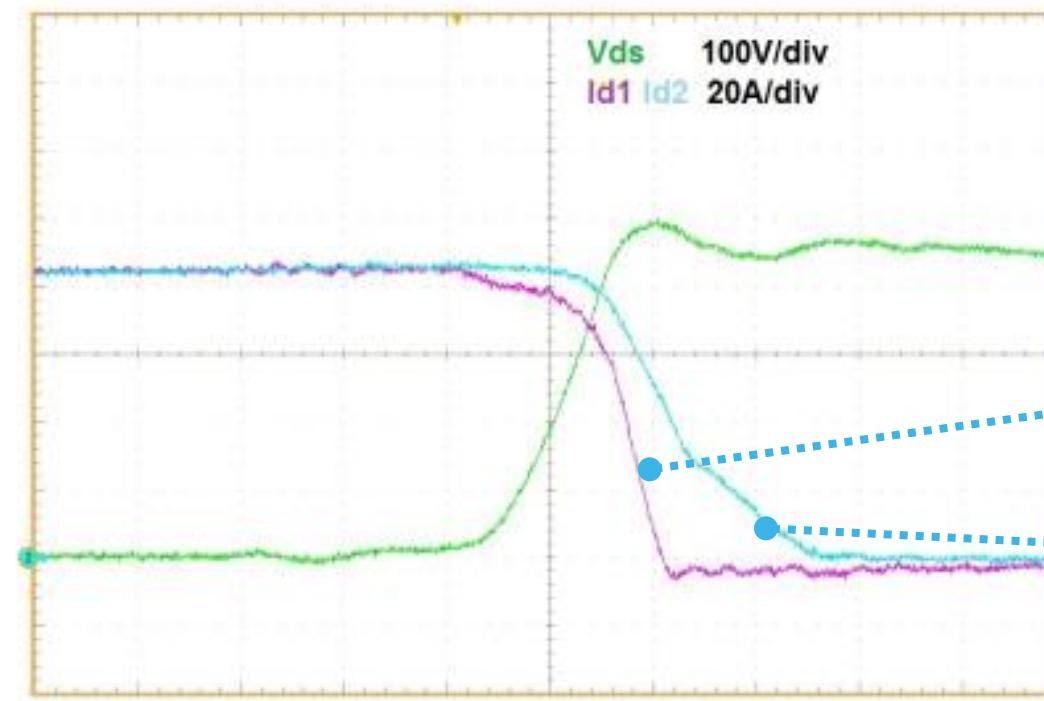
源极路径不匹配：匹配Ls源极电感能有效平衡动态电流损耗

漏极杂散电感Ld对电流不平衡无直接影响，但是会影响功率损耗

电路布局不匹配

匹配L_s源极电感有助于平衡动态电流产生的损耗，而使用开尔文源极有助于减少动态电流产生的损耗

在这种情况下，源极路径上20 nH的差异显示出较慢的关断，从而导致较高的开关损耗。



第3部分 并联设计考虑

如何优化并联设计

- V_{th}



- 基于芯片级并联的RDSon和 V_{th} 参数分组
- 基于分立器件并联最差工况的风险评估（电应力、栅极振荡和热问题）

- 布局 (L_g, L_s)



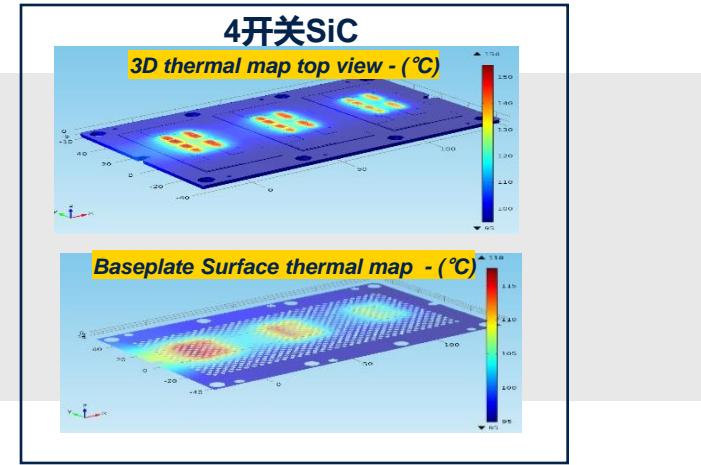
- 温度

- 避免电路板布局中的寄生参数不匹配和电流不平衡
- 选择理想的散热系统，以确保热平衡和充分的热裕量

并联设计考虑

温度不平衡可能与两个根本原因有关：

- 热阻 (R_{th}) 不平衡
- 损耗不平衡 ← → 电流不平衡法



如何平衡热阻：

- R_{thjc} (从结到壳)：由于器件热阻差异较小，可以忽略不计
- R_{thcf} (从壳到流体)：良好的布局和系统散热方式

并联设计考虑

损耗不平衡



电流不平衡

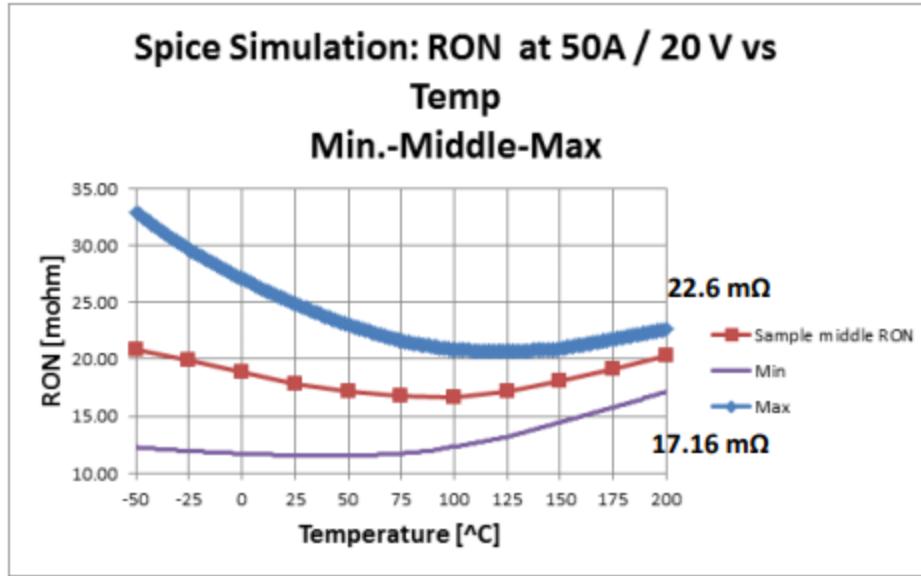
静态: 与RDS(on)参数范围有关。温度升高可以降低电流及损耗不平衡。 (RDS(on)随温度升高而增加)

动态: 与VGS(th)参数范围有关。温度升高会加剧电流及损耗不平衡。 (VGS(th)随温度降低而降低)

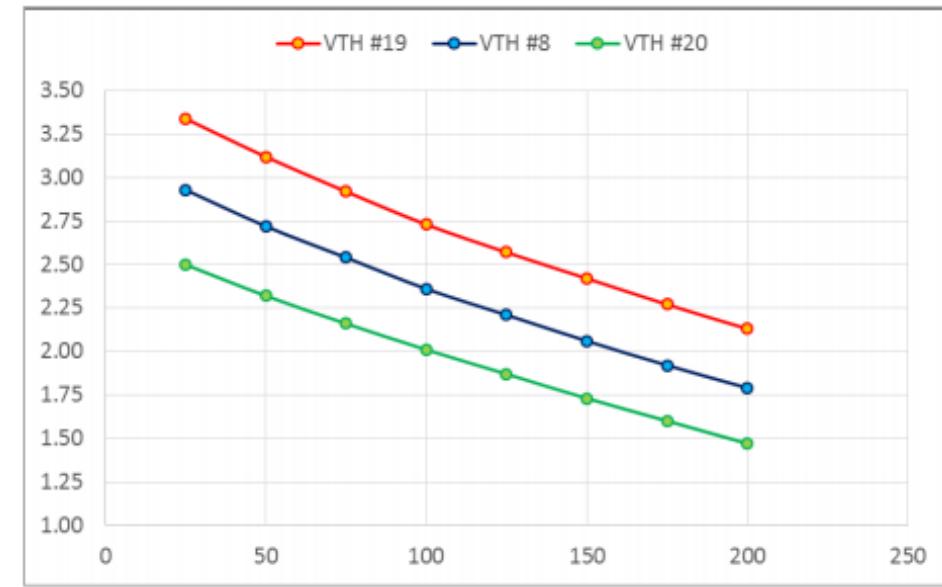
第4部分 逆变器并联设计

RDSon和Vth范围对器件并联的影响

RDSon



Vth

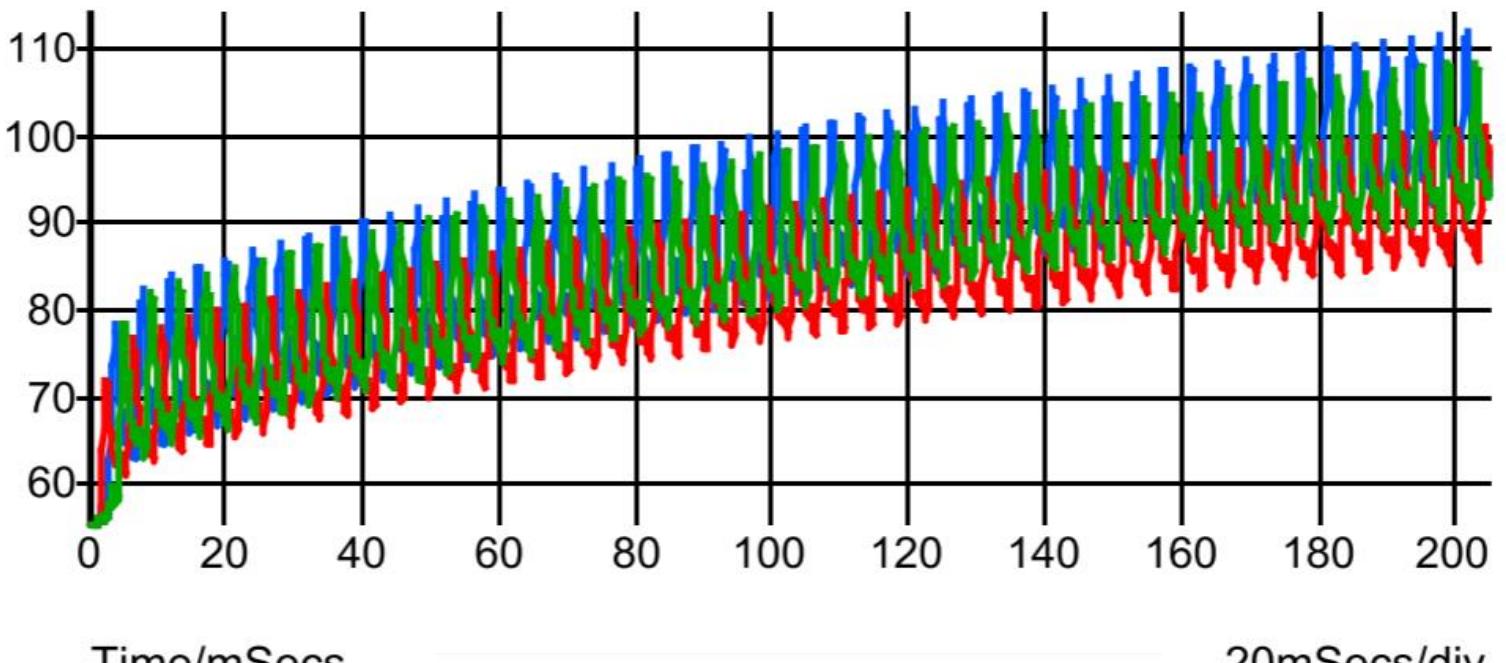
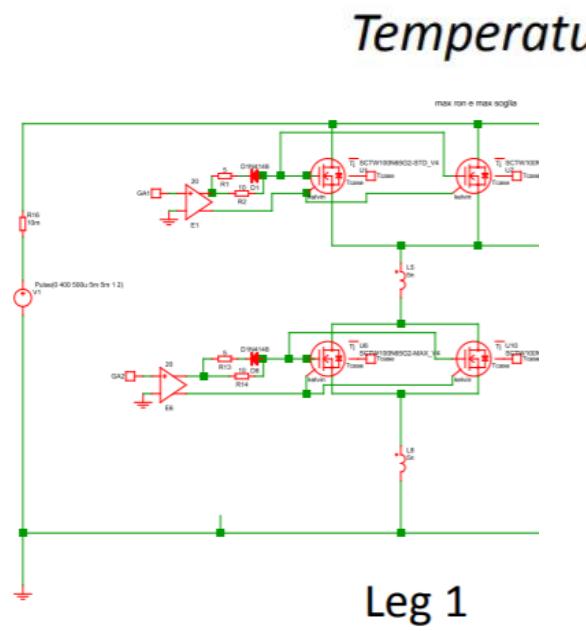


由于生产制程差异，器件参数具有适当的容差，这意味着任何器件都是由 (RDSon, Vth) 组合定义的，开关性能并不完全相等，特别是这些差异会导致损耗不平衡。

二个器件并联的逆变器仿真案例研究

- Bus Voltage = 400V
- Current = 200A RMS
- Switching frequency = 10kHz
- T_{case} : 50°C

- Leg 1: Ron/Vth max – Ron/Vth min → current unbalance
- Leg 2: Ron/Vth typical (both)
- Leg 3: Ron/Vth max (both)

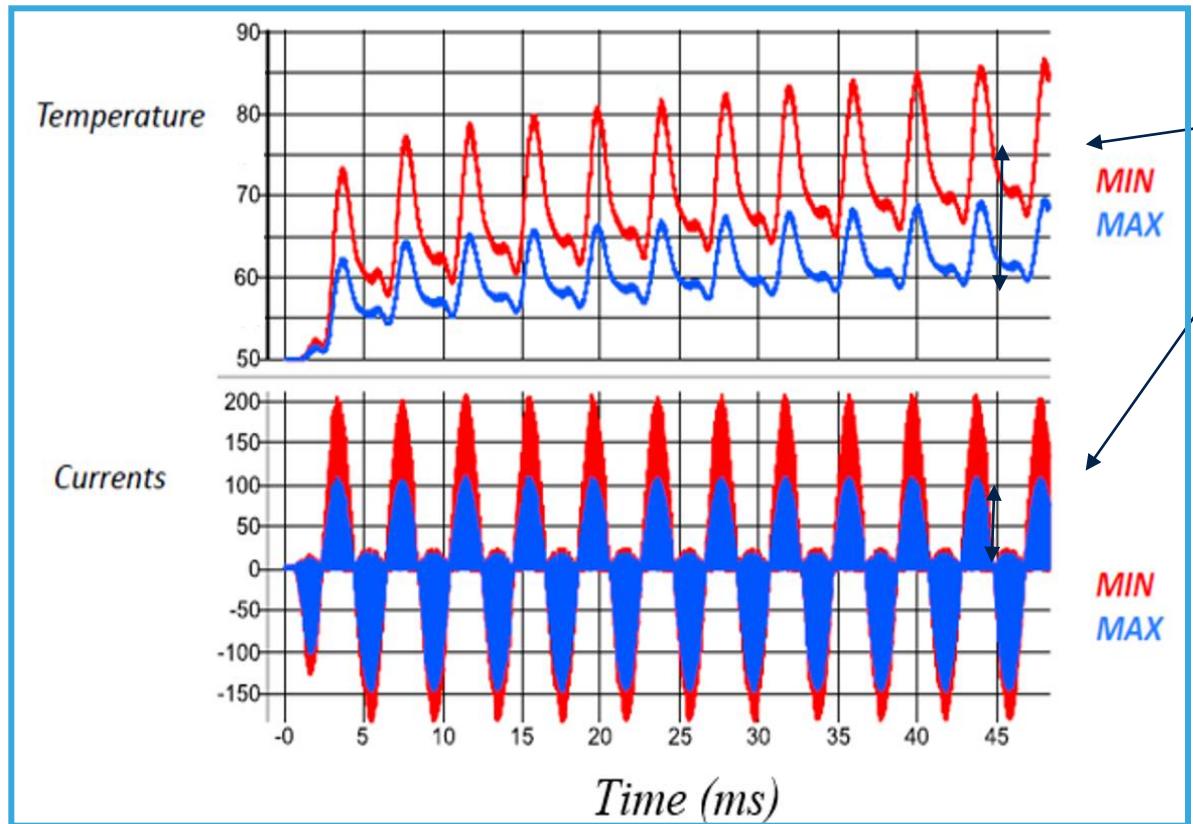


Case 1: Ron/Vth MAX - Ron/Vth MIN

Case 2: Ron/Vth STD - Ron/Vth STD

Case 3: Ron/Vth MAX - Ron/Vth MAX

二个器件并联的逆变器仿真案例研究



Case 1: Ron/Vth MAX - Ron/Vth MIN

主要参数的差异导致电流不平衡，从而导致热不平衡。

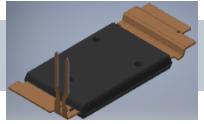
在仿真中，定义了一个期望的参数范围，以满足热差异 $< 10^{\circ}\text{C}$

如何缓解温度和电流不平衡？

选择具有相似参数的器件以减小热差异

在瞬态和稳态典型和平衡情况下： $T_{\text{J-peak}} \leq 165^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{vj_peak}} < 165^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C} = 175^{\circ}\text{C}$ (AMR)

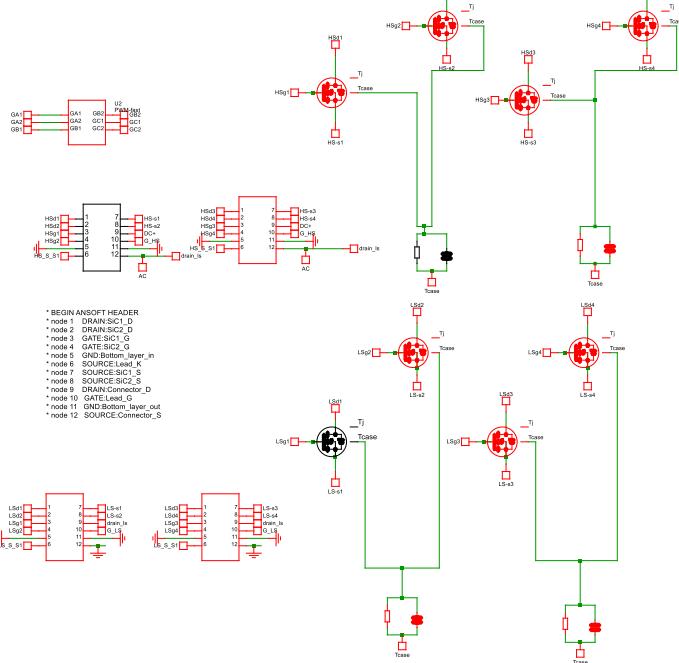
RDSon和Vth分组



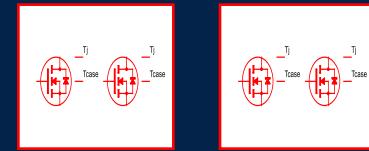
2个STPAK并联开关的逆变器案例

STPAK 3相逆变器仿真:

- $V_{BUS} = 400 \text{ V}$
- $I_{Load} = 345 \text{ Arms}$
- $f_{sw} = 8 \text{ kHz}$
- $f_{sine} = 250 \text{ Hz}$
- $R_{g_{on}} = 3.3 \Omega$, $R_{g_{off}} = 5.6 \Omega$
- 调制系数= 0.95
- 功率因数= 0.85
- 壳温 (T_{case}) : 65°C

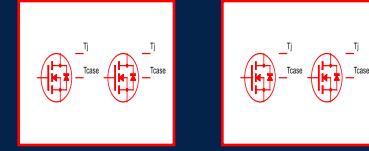


高边



一个桥臂

低边



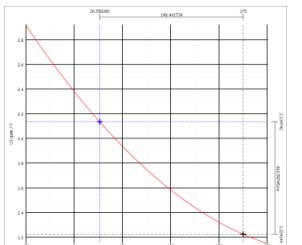
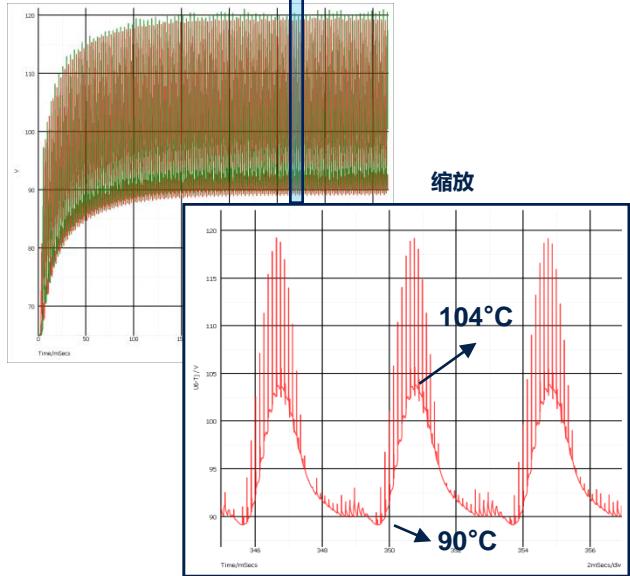
3种情况

- STPAK内部所有开关平衡的理想情况
- R_{on} 不平衡
- V_{th} 不平衡

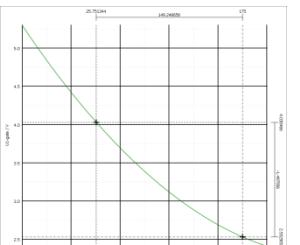
RDSon和Vth分组

典型器件与Vth差异不平衡情况的比较

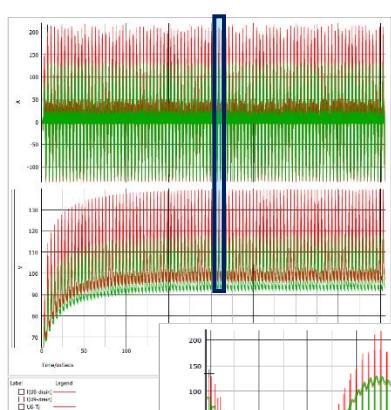
Vth_typ/Ron_typ



Vth_min@25°C ~ 2 V



Vth_max@25°C ~ 4 V

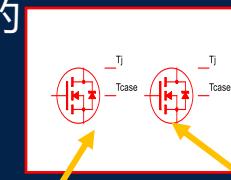


T_{j_die}_Vth_min
T_{j_die}_Vth_max

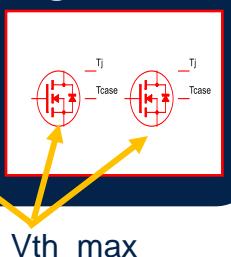
缩放

单支路的
低边

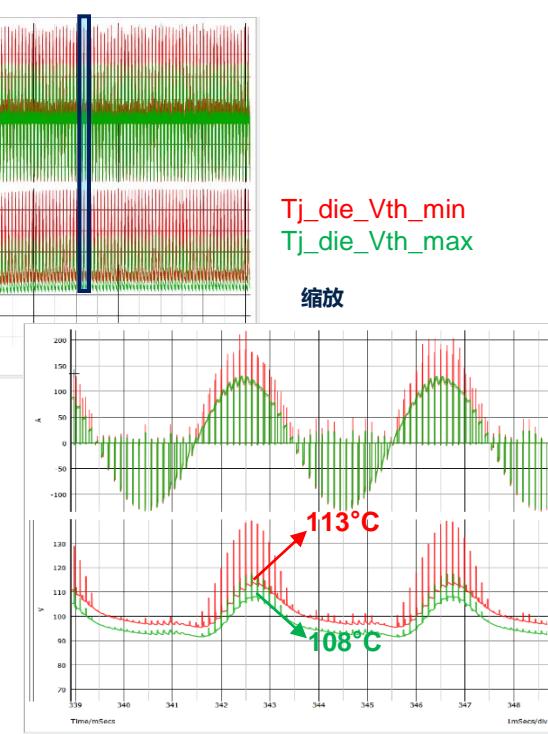
STPAK



STPAK



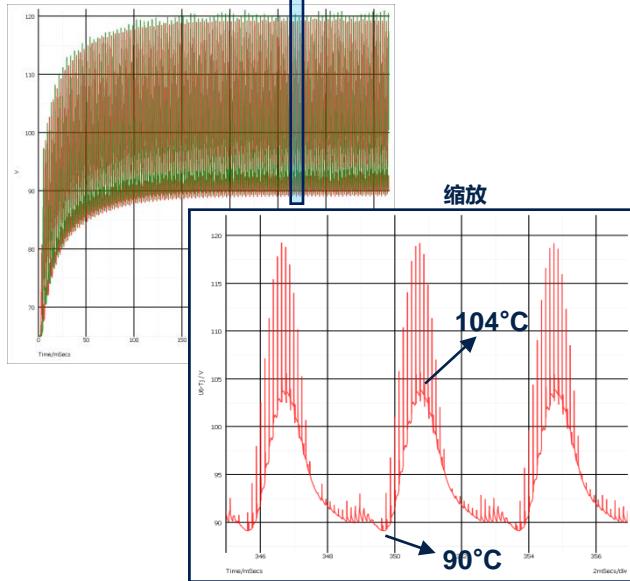
$\Delta T_j = 5^\circ C$



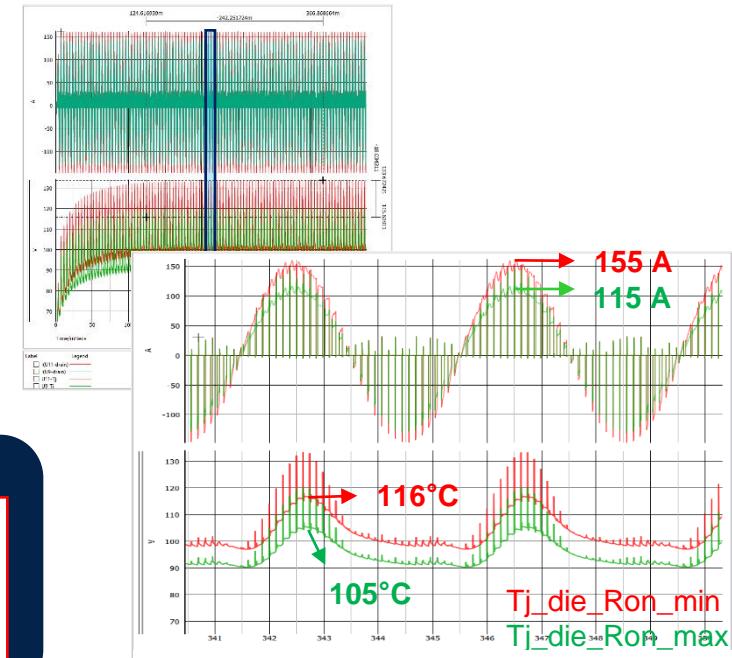
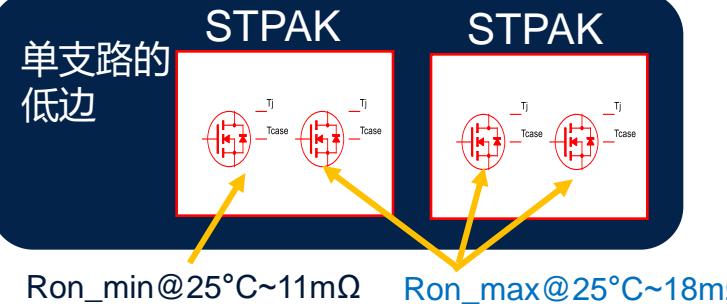
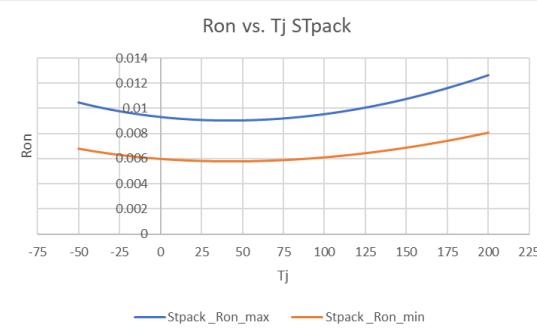
RDSon和Vth分组

分组选择与应用的开关频率关系

Vth_typ/Ron_typ

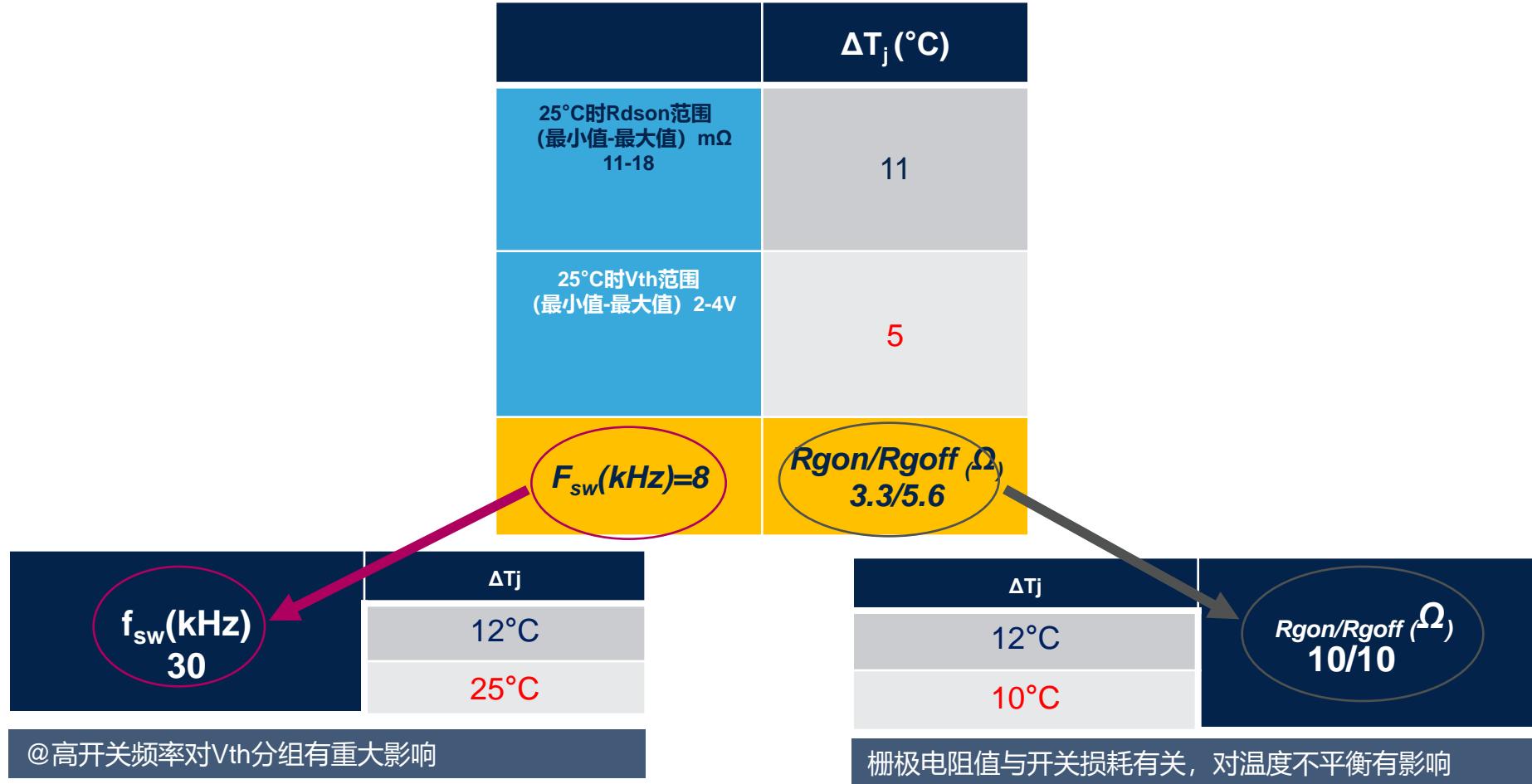


无电流和温度不平衡!



$\Delta T_j = 11^\circ C$
电流不平衡=40A

f_{sw}和栅极电阻是否会对最终的不平衡产生影响？





工业峰会
资料下载中心



能以激励子网站



Our technology starts with You



了解更多信息，请访问www.st.com

© STMicroelectronics - 保留所有权利。

ST徽标是STMicroelectronics International NV或其附属公司在欧盟和/或其他国家的商标或注册商标。若需意法半导体商标的更多信息，请参考www.st.com/trademarks。

其他所有产品或服务名称是其各自所有者的财产。