

1250V/1700V PowiGaN HEMT在800VDC AI数据中心架 构中的应用

作者: Kamal Varadarajan, Jimmy Liu和Chris Lee, Power Integrations



简介

GaN功率半导体器件因其优异的材料特性而非常适合高效率功率变换器。GaN HEMT (氮化镓高电子迁移率晶体管) 已被广泛应用于众多商用电源设计中, 覆盖各类应用场景。该技术凭借其低损耗、快速开关特性, 在电源领域展现出显著优势。

市面上大部分制造商提供的商用器件通常具有低于200V的额定耐压, 或其额定耐压介于600V至650V之间。在650V以上电压领域, 仅有少数制造商推出了900V额定耐压的GaN HEMT。基于硅衬底的商用GaN HEMT技术难以实现900V以上的电压扩展, 因为这需要极厚的缓冲层, 从而带来显著的工艺挑战。

因此, 需要额定耐压1200V及以上宽禁带功率器件的应用一直受限于使用SiC开关器件。然而, 与SiC相比, GaN能够实现更高的开关频率, 在保持高效率的同时, 为满足AI数据中心等应用日益增长的功率密度需求提供了可行路径。Power Integrations采用其专有PowiGaN™技术制造的GaN HEMT具有独特的优势, 可在实际器件中实现极高额定耐压 (高达1700V), 使其成为替代1200V SiC器件及更高电压器件的现成且极具吸引力的选择。

为在800VDC母线应用中充分发挥GaN的优势, 通常会采用两个650V GaN器件进行串联堆叠的半桥结构, 共计使用四个650V GaN器件。虽然这种堆叠拓扑结构可以在GaN所能达到的高频下工作, 但它带来了若干挑战, 包括控制复杂性增加、输入电压不平衡导致的可靠性风险、占用空间增大以及导通损耗增加, 从而导致效率降低和成本上升。相比之下, 在此应用中采用1250V额定耐压的PowiGaN开关, 不仅能显著简化功率变换器拓扑结构, 更能充分利用GaN的特性——正是这些使其成为理想的高频功率开关。

利用1250V的PowiGaN共源共栅开关, 电源设计人员可以非常放心地明确其设计可以工作于1000V的峰值 V_{DS} , 同时满足80%的行业降额标准。对于工作峰值 V_{DS} 超过1000V且高达1360V的应用场景, 采用1700V PowiGaN共源共栅开关可让用户设计出同样高效的电源方案, 但此时却是在更高的电压下工作。本文阐述了业界首款额定耐压超过1200V的GaN功率开关的可靠性与耐用性, 并证明其完全满足NVIDIA 800VDC AI数据中心架构对功率密度和超过98%效率的要求。

Power Integrations的1250V/1700V GaN HEMT共源共栅开关

1250V/1700V GaN HEMT是一款基于Power Integrations的专有PowiGaN技术制造的常开、耗尽型器件。它与低压硅MOSFET串联, 形成共源共栅结构, 以实现有效的常关操作, 这对于电力电子系统的安全运行至关重要。耗尽型GaN器件被认为具有极高的可靠性, 因为它们无需p型GaN栅极层。因此, 它们避免了阈值电压漂移及相关的不稳定性问题, 确保了长期稳定性。图1所示为高压GaN HEMT和低压硅MOSFET构成的共源共栅开关的电路原理图。图2所示为一款60m Ω (25°C下最大值)、1250V GaN共源共栅开关的显微照片, 其中低压硅MOSFET堆叠在GaN HEMT顶部。

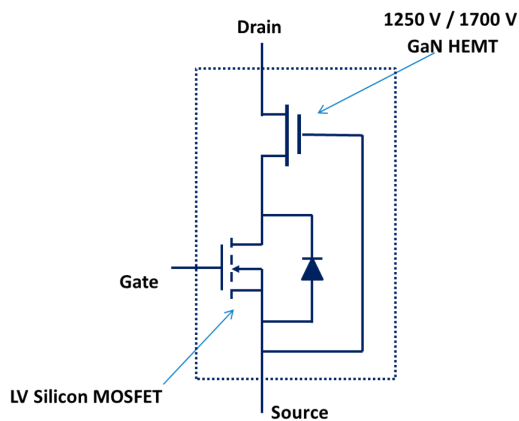


图1. 高压PowiGaN共源共栅开关的电路原理图

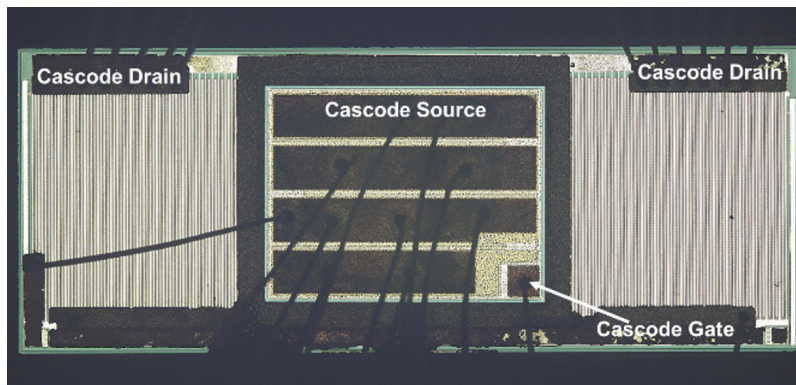


图2. 60mΩ、1250V PowiGaN共源共栅开关的显微照片

图3和图4显示了典型的1250V和1700V PowiGaN共源共栅开关的关断状态特性，其漏电特性在远超额定电压时仍保持稳定，确保了出色的瞬态过压承受能力。这表明与同等耐压规格的硅或SiC器件相比具有显著的安全裕量。

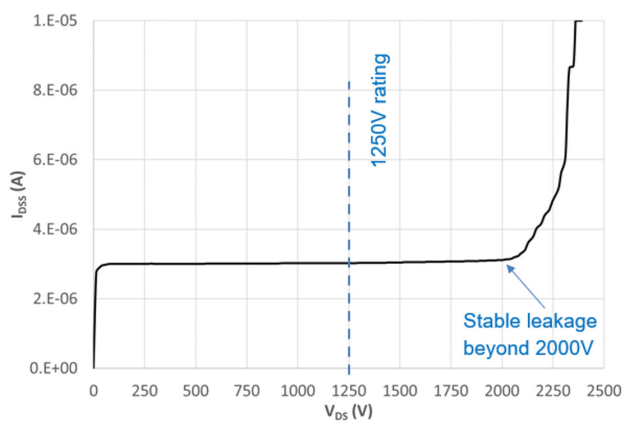


图3. 1250V PowiGaN共源共栅开关的典型关断状态特性

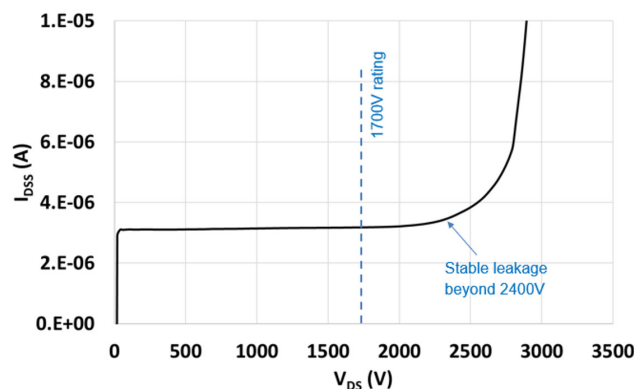


图4. 1700V PowiGaN共源共栅开关的典型关断状态特性

确保应用可靠性

虽然优良的电气特性至关重要,但功率器件还必须满足并超越行业标准的可靠性认证要求,以确保在实际应用中可靠工作。在本节中,我们将分享1250V GaN HEMT在静态及动态条件下测得的高压可靠性应力评估结果,而这些评估通常用来作为对应用于功率变换的高压GaN HEMT进行认证的部分测试。

A. 高温反偏压(HTRB)测试

高温反向偏压(HTRB)是一种关断状态可靠性应力测试,用于评估功率器件在高漏源偏压下的长期稳定性,旨在通过长时间高电场作用加速热激活故障机制。1250V GaN共源共栅开关的HTRB应力测试在150°C的环境中进行,并以1000V (1250V额定值的80%)的关断状态 V_{DS} 进行1000小时的应力测试,结果符合JEDEC HTRB指南JEP198中规定的规格要求。如图5所示,该器件展现出优异的漏电流稳定性,验证了其适用于高压环境下的高可靠性应用。

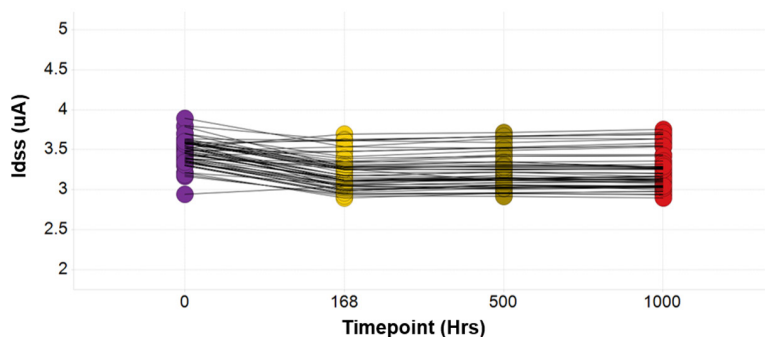


图5. 在1000V/150°C条件下经1000小时HTRB应力测试后,仍保持稳定的关断状态漏极漏电流

Voltage/Temperature	80 °C	100 °C	120 °C
2100 V		✓	
2150 V	✓	✓	✓
2200 V		✓	

表1. 关断状态下的加速评估条件

除了上述描述的HTRB认证测试外, 还通过在加速 V_{DS} 条件 (2100V至2200V) 下, 对大量器件在多个温度 (80°C至120°C) 下进行测试, 提取了本征关断状态故障率, 如表1所示。

根据本组实验获得的无故障时间威布尔分布, 使用指数模型提取电压加速因子, 通过Arrhenious模型提取温度加速因子。提取的模型预测在1000V/100°C的条件下运行15,000多年以后的累积故障率为1ppm, 这表明1250V GaN共源共栅功率开关具有显著的内在可靠性裕量 (图6)。

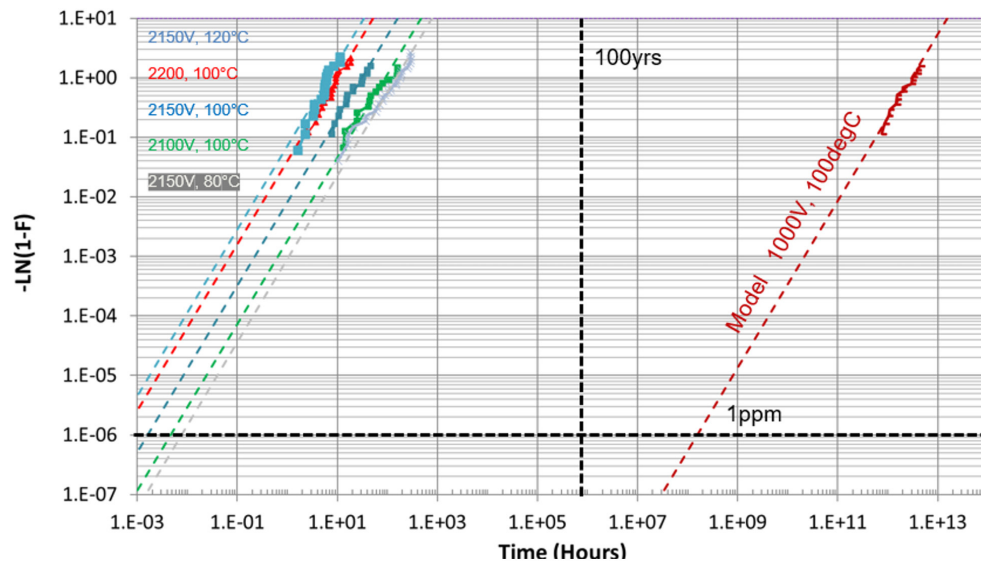


图6. 威布尔分布表示在多种加速应力条件下的无故障时间, 以及在1000V/100°C下的预估分布结果

B. 高压高湿高温反向偏压(HV-H3TRB))

对于许多有可靠性要求的应用而言, 仅通过基于HTRB的关断状态可靠性认证应力测试是不够的。终端产品可能会经常暴露在恶劣的外部环境条件下, 在极端关键应用场合需要连续或长时间运行。对于此类应用, 通过HV-H3TRB测试非常重要, 该测试在原有HTRB测试的基础上, 使用受控高湿环境作为额外的应力因素。该应力测试包含由于湿气渗透而导致的其他故障模式, 并且是对器件所有方面的测试, 包括钝化层、有源和接线设计以及底层结构。

1250V GaN共源共栅开关的HV-H3TRB应力测试在85°C的环境温度下进行, 相对湿度(RH)为85%, 关断状态 V_{DS} 为1000V, 持续1000小时, 遵循JEDEC标准JESD22-A101。该应力测试获得合格的通过结果, 其关断状态漏电流稳定性与HTRB期间相同, 如图5所示。

C. 动态高温工作寿命(DHTOL)试验

最初延缓GaN HEMT商业化应用的主要顾虑之一, 在于其在高压开关应用中的可靠性问题。研究发现, 相较于直流工作状态, 器件在导通后其导通电阻会立即升高。这种现象称为动态 $R_{DS(ON)}$, 归因于高电场强度下器件内的电荷捕获效应。为解决这一问题, 已采用多种技术手段, 包括外延结构工程和精心优化的工艺技术。

PI的1250V GaN共源共栅开关的可靠性在符合JEDEC DHTOL指南JEP180的定制测试平台上进行了评估, 该平台具备在125°C环境下并行测试多个器件的能力。根据指南所述的开关轨迹, 选择了最严苛的工作条件——在1000V电压下进行硬开关的开通与关断操作。对于GaN器件而言, 高压开关期间的动态导通电阻 $R_{DS(ON)}$ 尤为重要。设计不当的GaN HEMT器件在高压开关转换过程中, 可能因额外的电子捕获导致 $R_{DS(ON)}$ 显著增大, 这不仅会损害变换器效率, 更可能引发硬性故障。

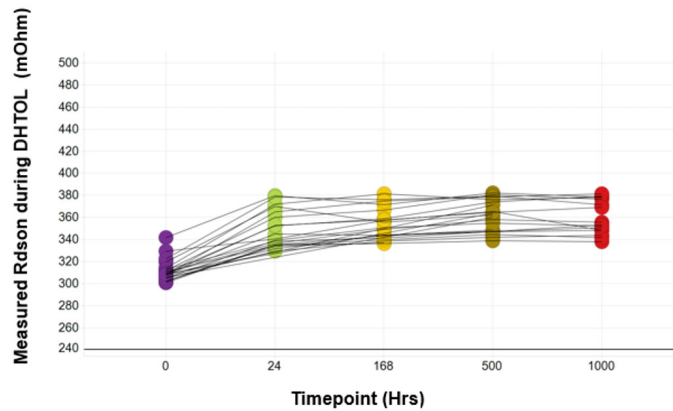


图7. 在1000小时DHTOL期间观察到稳定的 $R_{DS(ON)}$, 且具有极小偏移(<20%)

在1000V/125°C条件下进行1000小时DHTOL测试期间, 1250V GaN共源共栅开关的 $R_{DS(ON)}$ 表现出稳定性能(图7), 与测试起始时的数值相比仅出现小于20%的极小偏移, 与在类似硬开关条件下测试的最先进的650V GaN HEMT相当。这一结果表明, GaN HEMT的电压可扩展至1200V以上, 而不会对性能(包括关键的硬开关能力)产生任何影响, 并证明其具备满足所有潜在高可靠性应用需求的耐用性。

NVIDIA 800VDC AI数据中心架构中的用例

A. HVDC AI数据中心架构背景

日益清楚的是, 高压直流(HVDC)配电系统将取代AI数据中心中传统的54VDC母线架构。其中一项主要提案来自于谷歌、Meta和微软发起的开放计算项目(OCP), 该项目定义了一套800VDC供电系统。这种新型架构彻底改变了功率传输方式, 将传统机架功率从低于100kW提升至1MW, 同时实现了更高效的功率变换和更高的功率密度。

NVIDIA还为下一代AI数据中心提出了一套800VDC架构方案。通过采用直流800VDC输入, 计算机架可以更高效地接收电力, 而无需依赖传统的集成AC-DC PSU级。相反, 机架采用双导线800VDC供电, 并在机架内部使用高压隔离式DC-DC变换器为xPU子系统供电。该方案消除了机架级AC-DC变换模块, 节省出来的空间可用于增加计算资源, 并能改善温升管理。相较于传统的AC-DC架构, 直流800VDC输入简化了机架设计, 同时提高了性能。

在器件层面, 1250V和1700V的PowiGaN技术将在推动这一变革中发挥关键作用。更简洁的拓扑结构、快速的开关速度和强大的耐压能力相结合, 使其成为新兴800VDC AI数据中心架构中高效率、高功率密度HVDC变换的理想选择。本节将阐述1250V/1700V PowiGaN相较于以下两种方案的技术优势: 1) 堆叠式650V增强型GaN; 2) 1200V SiC MOS。

B. 1250V PowiGaN与650V增强型GaN比较

图8展示了采用650V增强型GaN器件与1250V PowiGaN器件的800VDC、12.5V输出固定比的LLC拓扑结构对比。由于采用了快速开关的GaN器件, 这两种方案都可以在800VDC输入下以超过500kHz的高频率进行工作。对于650V增强型GaN方案, 需要采用堆叠式LLC变换器以耐受800VDC输入电压。在初级侧, 该架构采用两管串联的堆叠半桥 (总共四个650V增强型GaN开关)。在次级侧, 输出并联连接, 使得每个半桥支持总输出功率的一半。然而, 这种堆叠拓扑结构带来了若干挑战:

- 输入电压不平衡: 正常工作期间的输入电压不平衡必须得到妥善控制。如果半桥之间出现不平衡, GaN器件两端的应力电压可能会超过预期的约400V。在这种较高的电压应力下, 由于HEMT的2DEG通道内的电流捕获效应, 动态 $R_{DS(ON)}$ 退化将变得更加明显。这些限制凸显了在800VDC输入系统中采用650V增强型GaN堆叠结构时存在的可靠性与效率风险。
- 复杂的驱动设计: 堆叠拓扑结构还会增加设计复杂性, 特别是在栅极驱动电路中。每个半桥都需要专用上管驱动器及隔离偏置电源, 这进一步增加了系统成本、占用空间和设计负担。
- 效率较低且成本较高: 采用具有相同 $R_{DS(ON)}$ 的GaN器件时, 与1250V PowiGaN单管半桥拓扑结构相比, 堆叠拓扑结构会产生更高的导通损耗。这意味着1250V PowiGaN设计可采用 $R_{DS(ON)}$ 值高出2倍的器件, 同时仍能实现相同的整体效率和损耗特性。

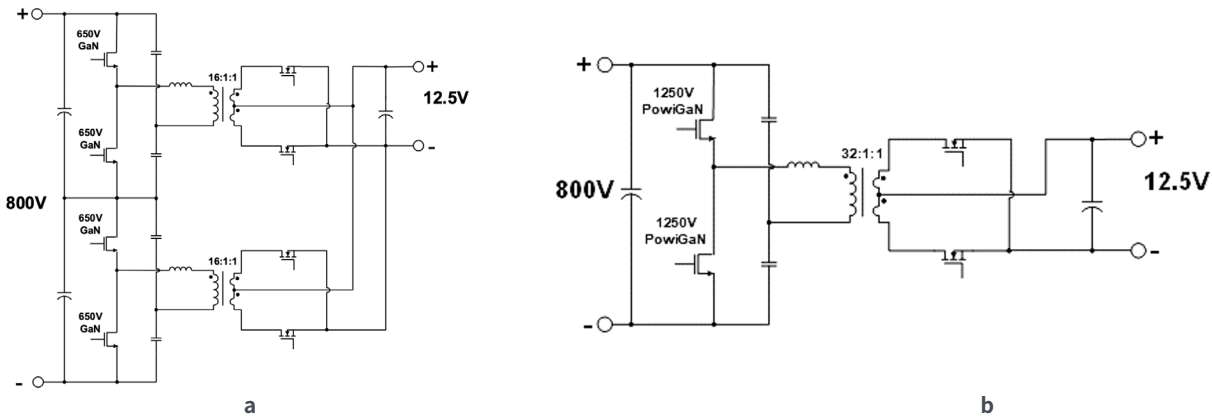


图8. (a) 基于650V增强型GaN的堆叠半桥LLC; (b) 基于1250V PowiGaN的单管半桥LLC

表2总结了650V增强型GaN与1250V PowiGaN在半桥LLC应用中的差异, 展示了采用1250V PowiGaN的单管半桥方案在高功率密度800VDC供电架构中的显著优势。

	采用650V增强型GaN的堆叠半桥LLC	采用1250V PowiGaN的单管半桥LLC
--	----------------------	-------------------------

输入电容不平衡	是	否
栅极驱动器	4个驱动器, 其中3个为隔离驱动器	2个驱动器, 其中1个为隔离驱动器
驱动器的隔离偏置电源	3个	1个
GaN $R_{DS(ON)}$ Rdson相同时的导通损耗	损耗高出2倍	-
具有相同效率和损耗时所需的GaN $R_{DS(ON)}$	—	$R_{DS(ON)}$ 高出2倍

表2. 650V增强型GaN与1250V PowiGaN在半桥LLC应用中的比较

C. 1250V PowiGaN与1200V SiC MOSFET在1MHz LLC工作模式下的比较

为了实现高功率密度, 使LLC变换器工作于高频率至关重要, 其最大工作频率由几个关键参数决定。图9所示为死区时间切换期间的LLC等效电路及其波形。为实现开通时的零电压开关(ZVS), 应利用每次死区时间内的峰值励磁电流 I_{lm_pk} , 使晶体管的寄生输出电容完全放电/充电。然而, 在死区时间内, 励磁电流将在初级侧产生额外的环流损耗。因此, 尽量降低励磁电流 I_{lm_pk} 是提高LLC变换器频率和效率的目标。

为了实现更高的频率, 功率开关应该具有较小的 $C_{o(tr)}$ (与时间相关的有效输出电容) 值, 或称为 Q_{oss} (输出电荷), 其值是 $C_{o(tr)} \cdot V_{dc}$ 的乘积。半桥LLC的ZVS实现条件的最小死区时间 $t_{deadmin}$ 可由公式(1)得出。

$$(1) \quad t_{deadmin} = 8 \cdot C_{o(tr)} \cdot L_m \cdot f_s$$

其中, L_m 是主变压器的励磁电感, f_s 是开关频率。

由公式(1)可知, $C_{o(tr)}$ (用来表述将漏极电压被动转换至源极电压所需的输出电容) 是实现高效率、高功率密度LLC变换器的关键参数。对于给定的 L_m 和 t_{dead} , 有效 $C_{o(tr)}$ 值越低, 就可以在ZVS条件下使用更高的开关频率 f_s , 从而实现更高的功率密度。

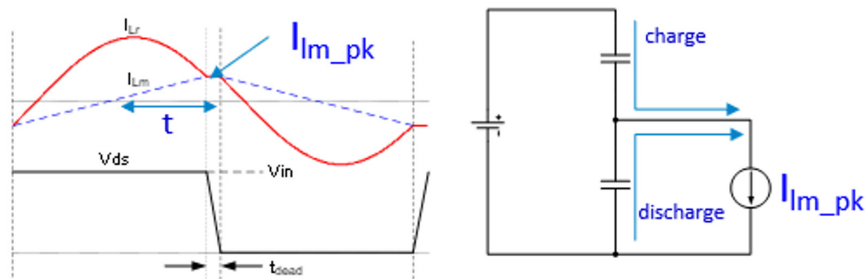


图9. 死区时间切换期间半桥LLC等效电路的初级电流和电压波形

影响开关频率的其他关键器件参数是总栅极电荷 Q_g 和关断延迟时间 $T_{d(off)}$ 。简而言之, Q_{oss} 、 Q_g 和 $T_{d(off)}$ 的值越低, 为提高效率和功率密度而设计的LLC变换器的性能就越好。表3显示了1250V PowiGaN与1200V SiC MOS之间的比较。结论很明确, 与具有近似 $R_{DS(ON)}$ 的1200V SiC MOS相比, 1250V PowiGaN可以实现更高频率的LLC。

	SiC MOS	PowiGaN	PowiGaN 技术优势
--	---------	---------	--------------

电压额定值(V)	1200	1250	额定耐压值更高
$R_{DS(ON)}$ m Ω 25 °C	60	60	$R_{DS(ON)}$ 相同
Q_{oss} @ 800 V; nC	180	140	高工作频率
LLC iQ_g ; nC	106	45	低驱动损耗
$T_{d(off)}$; ns	48	15	低关断损耗

表3. 1200V SiC MOS与1250V PowiGaN参数比较

为了验证1250V、60m Ω PowiGaN器件的最大开关频率,图10显示了800VDC输入、1MHz半桥LLC谐振波形,并与一流的1200V、60m Ω SiC MOS进行了比较。结果表明,1250V PowiGaN技术实现了1MHz ZVS操作,且切换死区时间小于100ns。相比之下,1200V SiC MOS在硬开关换向时无法在1MHz频率下实现ZVS,在温度升高时会出现明显的振铃。图11提供了在相同 $R_{G(off)}=2\Omega$ 下关断时 V_{GS} 和 V_{DS} 波形的局部放大图:SiC MOS显示出明显更长的 V_{GS} 下降时间(比PowiGaN的下降时间长约3倍),从而有效地将其实际工作频率限制在500kHz以下。

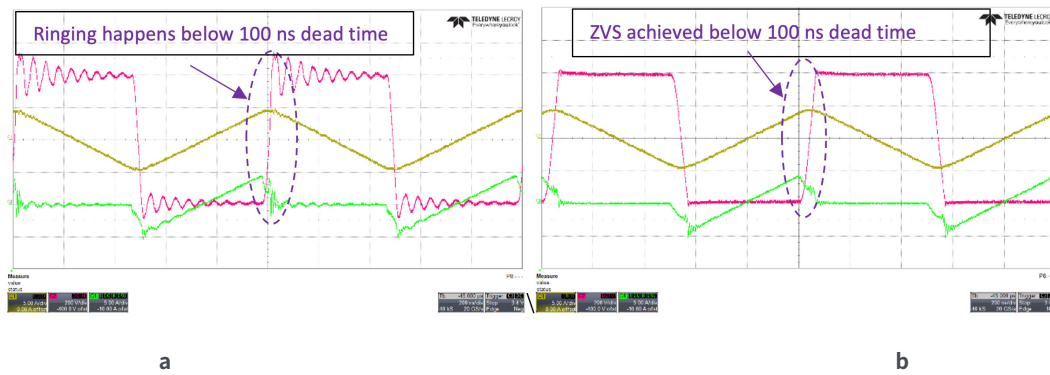


图10. (a) 1200V 60m Ω SiC MOS 1MHz谐振波形;(b) 1250V 60m Ω PowiGaN 1MHz谐振波形(200ns / 格)

(绿色:下管 I_D 电流5A / 格;红色:半桥开关节点 V_{DS} 电压200V / 格;黄色:励磁电流5A / 格)

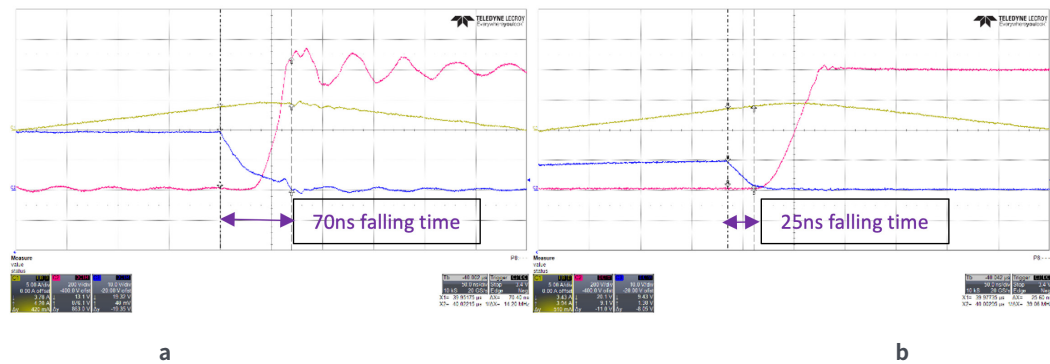


图11. 关断期间的 V_{GS} 和 V_{DS} 波形局部放大图 (a) 1200V 60m Ω SiC MOS 1MHz谐振波形;(b) 1250V 60m Ω PowiGaN 1MHz谐振波形(50ns / 格)

(蓝色:栅源极 V_{GS} 电压10V / 格;红色:半桥开关节点 V_{DS} 电压200V / 格;黄色:励磁电流5A / 格)

D. 适用于HVDC AI数据中心的1700V PowiGaN

2024年, Power Integrations发布了业界首款基于1700V PowiGaN开关的产品IMX2353F (25°C时为520mΩ), 可轻松支持1000VDC额定输入电压, 同时完美匹配HVDC AI数据中心应用的辅助电源要求。如图12所示, IMX2353F属于InnoMux™2-EP产品系列, 该产品系列将具有保护功能的初级和次级控制器、检测元件以及符合安全标准的反馈机制(FluxLink™)集成到了采用1700V PowiGaN开关的单个IC中。该器件可对每路输出提供独立调整和保护, 从而消除多个后级变换级。

IMX2353F可灵活地提供一至三个电压稳定的稳压输出, 并仅在初级开关具有零电压开关 (ZVS) 特性的DCM SR-ZVS模式下工作。这一特性对于800VDC至1000VDC输入范围内的高压应用非常有益, 可降低开通期间的寄生电容放电损耗以及整体温升。

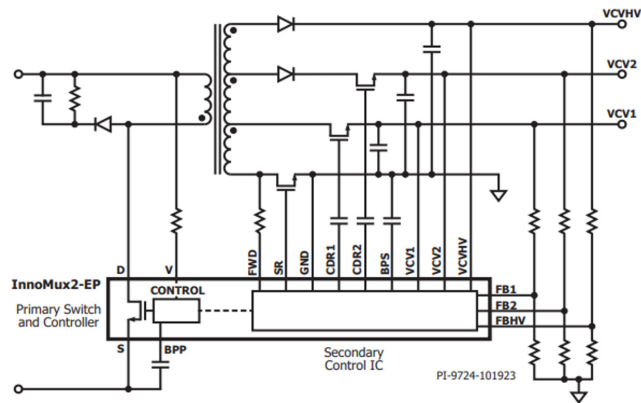


图12. IMX2353F的典型应用

图13所示为使用IMX2353F、输入电压为1000V的60W参考设计的波形和温升表现。由于采用了1700V PowiGaN和独特的SR-ZVS控制, 在1000V输入和满功率下温升仅为22.3°C。它有助于为HVDC AI数据中心实现小尺寸的低温升辅助电源设计; 该器件特别适合于在800VDC电源中给流行的48V风扇供电, 同时还可提供12V的系统供电输出。



图13. 采用IMX2353F和1000V输入的60W参考设计

结论

凭借Power Integrations专有的PowiGaN技术,可以实现额定耐压超过1200V的高可靠性GaN HEMT。这些业界首创的1250V GaN开关可以帮助设计人员为NVIDIA 800 VDC AI数据中心架构构建高功率密度、高效率的电源,与使用1200V SiC的解决方案或使用650V GaN的堆叠拓扑结构相比,性能有显著提升。

展望未来,在现代数据中心每个机架电力需求不断增长的推动下,HVDC系统的电压趋势将超过800VDC。这一转变为主功率级中的高可靠性1700V PowiGaN器件带来了新的机遇,其较低的导通电阻可实现更高的效率和功率密度。未来正以前所未有的速度到来。

延伸阅读清单:

K. Varadarajan et al. “Reliability Qualification of 1250 V Lateral GaN HEMTs for High Reliability Industrial Applications,”

IEEE International Reliability Physics Symposium proceeding, 3A2.1-3A2.6 (2025)

K. Varadarajan et al. “Reaching Beyond 1200 V: Lateral GaN HEMTs for High-Reliability EV and Industrial Applications”

PCIM Europe proceeding, 1593-1598 (2024)

K. Murukesan et al. “State of the Art 1.7kV Lateral GaN HEMTs, an Alternative to SiC”, IEEE Applied Power Electronics Conference proceeding, 180-184 (2025)

For more
information,



© 2025 Power Integrations | Power Integrations, the Power Integrations logo, power.com, PowiGaN, InnoMux and FluxLink are trademarks or registered trademarks of Power Integrations, Inc. in the U.S. and/or other countries. NVIDIA, Google, Microsoft and Meta are trademarks of their respective owners.