

团 体 标 准

T/CASAS 057—2025

高频开关应用下 GaN 功率器件开关运行状态可靠性试验方法

Test method for continuous-switching operation reliability of GaN power devices under high frequency switched conditions

2025 - 08 - 29 发布

2025 - 08 - 29 实施

第三代半导体产业技术创新战略联盟 发布

目 次

前言..... II

引言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 原理..... 2

 4.1 通则..... 2

 4.2 阻性感性负载或阻性负载的硬开关电路..... 2

 4.3 半桥、全桥等多器件拓扑 Buck 降压或 Boost 升压电路..... 3

 4.4 准谐振反激电路..... 4

5 试验条件..... 5

6 仪器设备..... 5

7 试验步骤..... 5

 7.1 试验方法..... 5

 7.2 试验流程..... 6

8 试验数据处理..... 7

9 试验报告..... 7

附 录 A （资料性） GaN 功率器件开关运行状态可靠性测试记录表..... 9

附 录 B （资料性） 开关运行状态可靠性试验测试过程应力条件建议..... 10

附 录 C （资料性） 开关运行状态可靠性试验建议的样本数量及失效判据..... 11

附 录 D （资料性） 开关运行状态可靠性试验示例..... 12

参考文献..... 14

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由第三代半导体产业技术创新战略联盟（CASA）制定发布，版权归CASA所有，未经CASA许可不得随意复制；其他机构采用本文件的技术内容制定标准需经CASA允许；任何单位或个人引用本文件的内容需指明本文件的标准号。

本文件主要起草单位：厦门三安集成电路有限公司、湖南三安半导体有限责任公司、中山大学、广东工业大学、电子科技大学（深圳）高等研究院、深圳平湖实验室、苏州晶湛半导体有限公司、中国科学院半导体研究所、诸暨市氮矽科技有限公司、中国电子技术标准化研究院、江苏能华微电子科技有限公司、杭州长川科技股份有限公司、深圳市大能创智半导体有限公司、北京大学东莞光电研究院、北京第三代半导体产业技术创新战略联盟。

本文件主要起草人：叶念慈、刘成、徐涵、严丹妮、许亚坡、刘扬、贺致远、明鑫、曾威、王小明、王文平、戴婷婷、罗卓然、向鹏、贾利芳、刘家才、营端端、武乐可、孙海洋、耿霄雄、谢斌、刘强、高伟。

引 言

氮化镓（GaN）功率开关器件具有高耐压、高开关频率、低损耗及高功率密度等显著优势，目前已被广泛地应用于快充适配器等领域。然而，GaN基功率器件在开关应用中也面临着一些挑战：1）GaN器件可以工作在极高的开关频率，然而在快速开关状态切换过程中，器件会经历更高的开关应力与更多的应力循环，增加了失效的风险；2）GaN器件在开关过程中存在导通电阻（ $R_{DS(ON)}$ ）退化的现象，即器件的导通电阻随着应力循环的累积而暂时增加，从而直接影响系统的性能和稳定性；3）应用高频开关的GaN器件能极大缩减系统体积及提升系统的功率密度，其中GaN器件在工作时会产生显著的热量，自热效应导致器件高的结温会进一步影响器件的可靠性。

功率器件在实际工作过程中都会经历开关应力，对于高频率开关应用的GaN功率器件，高速开关过程中存在的瞬态高电压、大电流及其组合应力将会导致器件退化甚至失效，其中退化还会随着开关过程的延续而累积，进而造成器件可靠性失效。除了传统的消费电子领域，GaN器件在以服务器电源为代表的工业领域及以车载充电器为代表的汽车电子领域也展示了成本与性能的优势及广阔的应用前景。在高可靠度、高稳定性要求的应用场景下，GaN器件需要承受长时间的电应力并长期工作在恶劣环境（高温、高负载等）中，其开关运行状态下的可靠性测试变得极其必要。通过严格的可靠性测试以确保GaN器件在实际工况下的稳定性，是实现其在系统优势的先决条件。开关运行状态下可靠性测试作为可靠性考核的重要一环，通过模拟器件在实际工作中的开关动作，表征其在长时间运行下的性能退化及可靠性失效，以全面评估芯片性能，为后续优化产品特性及提升质量提供数据基础及理论依据。

随着GaN器件技术的不断发展和其应用领域的不断延伸，GaN功率器件开关可靠性测试及保障也成为其在消费电子、工业及汽车电子等应用领域推广和实践的必要条件。建立GaN功率器件在高频开关运行状态可靠性试验方法，对进一步推动GaN功率器件技术的进步和应用领域的拓展具有重要意义。GaN功率器件高频开关运行状态下可靠性试验将成为GaN功率器件必备的测试及可靠性评估项目，相关标准及规范的建立也将完善GaN功率器件可靠性测试方法、测试设备及对应的数据分析。

高频开关应用下 GaN 功率器件开关运行状态可靠性试验方法

1 范围

本文件描述了用于评估高频开关应用下（频率 ≥ 100 kHz）GaN功率器件开关运行状态可靠性试验方法，用以表征及评估GaN功率器件在连续开关应力作用下器件的退化及失效。

本文件适用于GaN 功率器件的生产研发、特性表征、量产测试、可靠性评估及应用评估等工作场景。可应用于以下器件：

- 1) GaN增强型（E-Mode）和耗尽型（D-Mode）分立功率电子器件；
- 2) GaN功率集成器件和共源共栅GaN功率器件；
- 3) 以上的晶圆级及封装级产品。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

动态高温工作寿命 dynamic high temperature operating life; DHTOL

被测器件在动态且高温的条件下进行长期不间断运行测试的一种方法。

注：这一方法一般用于深入评估和验证氮化镓功率器件在复杂多变的实际应用环境中的使用寿命和可靠性。深入评估和验证氮化镓功率器件在复杂多变的实际应用环境中的使用寿命和可靠性。

3.2

漏极电流（随时间实时变化） drain current of the DUT, time varying

i_{DS}

被测器件工作过程中漏极电流的实时变化。

3.3

漏源电压（随时间实时变化） drain to source voltage of DUT, time varying

v_{DS}

被测器件工作过程中源漏电压的实时变化。

3.4

结温 junction temperature of DUT

T_J

工况下芯片内部实际工作温度，反映芯片在工作状态下的热状态。

3.5

被测器件壳温 case temperature of DUT

T_C

在被测器件工作时封装外壳规定点测得的温度。

注：壳温又称管壳温度，用来反映器件在工作时由于内部功耗产生的热量与外界环境热交换后的平衡状态的参数。

3.6

结壳热阻 thermal resistance from device junction to case

$R_{\theta JC}$

器件结到壳的热阻，热量从半导体器件的内部结点（即结温所在的位置）传递到其封装外壳时所遇到的阻力。

3.7

开关频率 switching frequency

 f_{sw}

器件在单位时间内完成开关动作的次数。

3.8

占空比 duty cycle

 D

开关测试过程中，器件处于导通状态的时间与整个开关周期时间的比值。

3.9

上升时间（开关） rise time of V_{DS} while switching

 t_r

器件从关断状态到完全导通状态所需的时间（漏极电压从10%母线电压上升至90%母线电压）。

3.10

下降时间（开关） fall time of V_{DS} while switching

 t_f

器件从导通状态到完全关断状态所需的时间（漏极电压从90%母线电压下降至10%母线电压）。

3.11

动态导通电阻 dynamic on-resistance of DUT in fast switching conditions

 $R_{DS(dyn)}$

被测器件在快速开关状况中的动态导通电阻值。

4 原理

4.1 通则

GaN功率器件开关运行可靠性测试过程中通过对器件施加的动态电压和电流信号来模拟实际应用场景中器件受到的电应力，而单个开关切换周期的动态波形信号可用 i_D - v_{DS} 开关轨迹曲线来定性演示。以当前GaN功率器件广泛应用的快充适配器为例，其常用的拓扑结构包含准谐振反激（QR）、功率因数校正（PFC）和谐振变换器（LLC）电路等。以上电路中器件的开关过程包含硬开关、软开关及其组合的过程，可以用简化的硬开关/软开关测试电路或者实际的系统电路（如QR电路）来对应，以模拟器件开关应力激励及开展可靠性测试。

4.2 阻性感性负载或阻性负载的硬开关电路

其对应的电路图及 i_D - v_{DS} 轨迹图如图1及图2所示。硬开关电路中器件的开启及关断均为硬开关模式。硬开关模式特点是器件开启或关断过程中存在电压和电流的交叠区域，如图3。基于硬开关电路的开关运行状态可靠性表征可以用于评估器件在以PFC为代表的高频AC/DC转换电路中器件的可靠性表现及寿命预测。

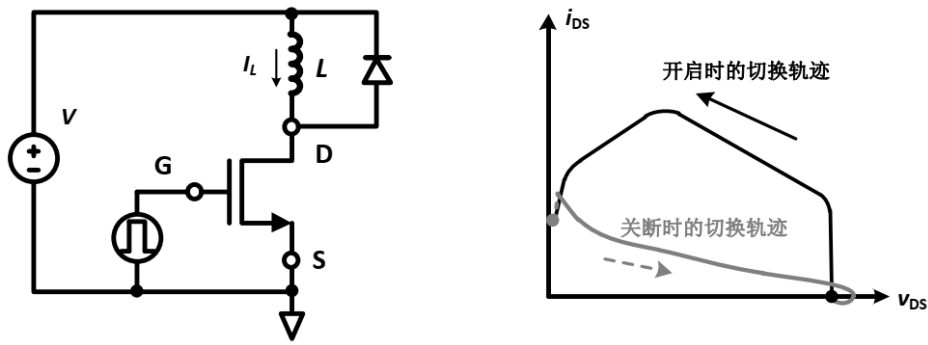


图1 阻性感性负载硬开关过程：电路图及 i_D-v_{DS} 轨迹图

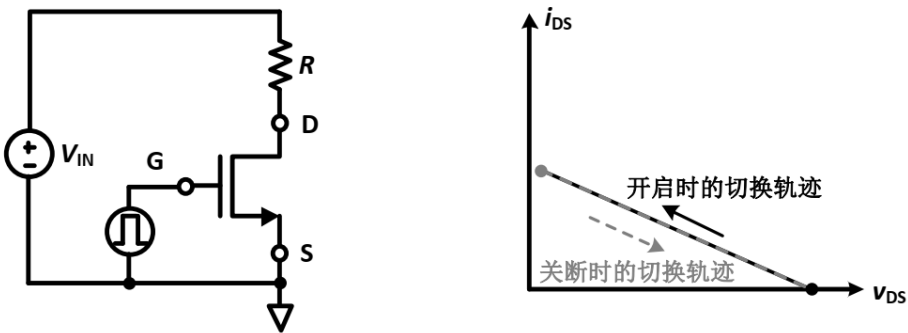


图2 阻性负载硬开关过程：电路图及 i_D-v_{DS} 轨迹图

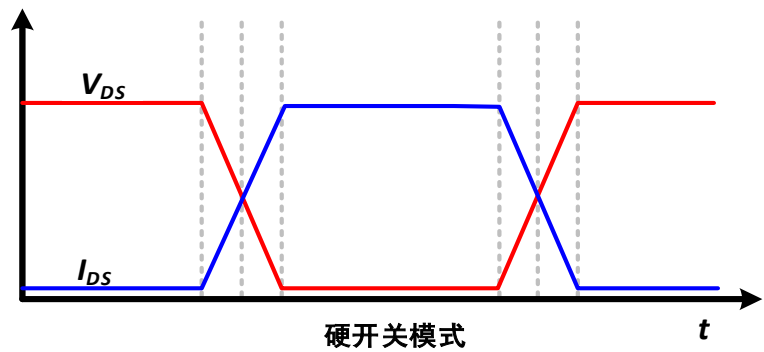


图3 硬开关模式下器件漏源电压电流波形图

4.3 半桥、全桥等多器件拓扑 Buck 降压或 Boost 升压电路

以同步Buck降压电路为例（Boost电路为Buck电路输入/输出互换，器件所受电应力一致），其对应的电路图及 i_D-v_{DS} 轨迹图如图4所示。Buck降压电路驱动互补的上下两个桥臂：上桥臂晶体管开启为硬开关模式，而关断为软开关模式；下桥臂晶体管开启及关断均为软开关模式。软开关模式特点是器件开启或关断过程中不存在电压和电流的交叠区域，如图5。基于同步Buck降压电路的开关运行状态可靠性表征可以用于评估器件在以LLC为代表的高频DC/DC转换电路的可靠性表现及寿命预测。

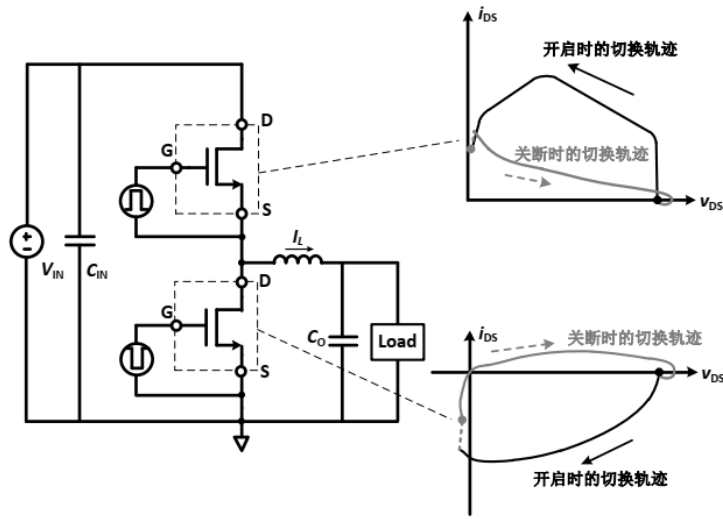


图4 Buck 电路示意图及上小桥臂晶体管的 i_D - v_{DS} 轨迹图

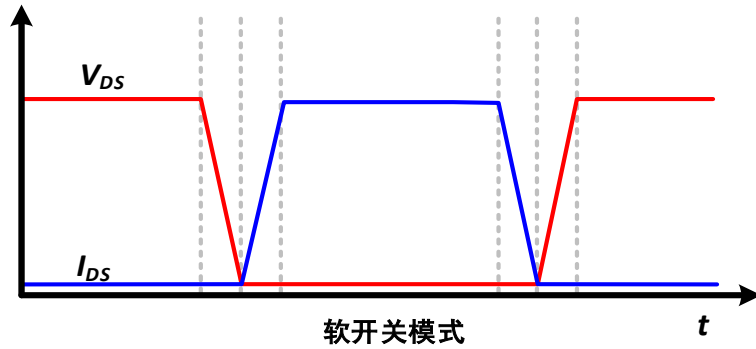


图5 软开关模式下器件漏源电压电流波形图

4.4 准谐振反激电路

其为目前中低瓦数快充适配器主要采用的电路，其简化的电路示意及 i_D - v_{DS} 轨迹图如图6所示。在大部分输入及输出工况下，晶体管开启为软开关模式，而关断为硬开关模式（如图7所示）。基于GaN器件的快充适配器方案已经非常成熟，因而部分GaN器件或系统厂商会直接采用多组适配器系统来开展开关运行状态可靠性表征以及器件在快充适配器应用下的寿命预测。

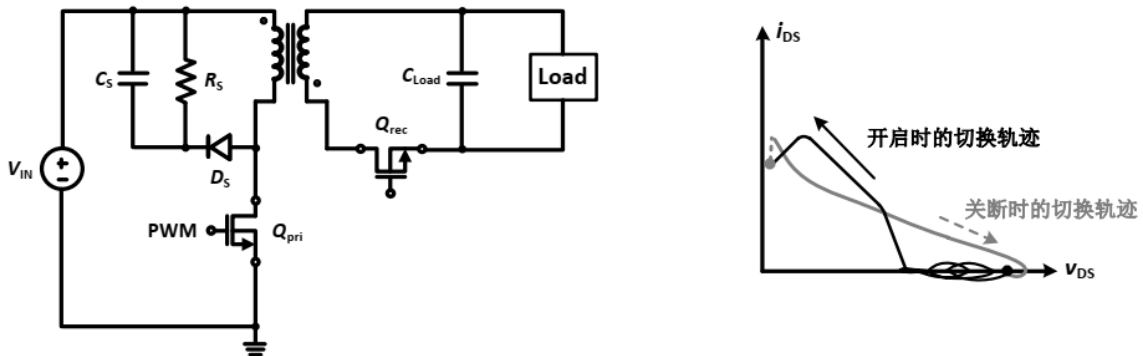


图6 准谐振反激电路：电路图及 i_D - v_{DS} 轨迹图

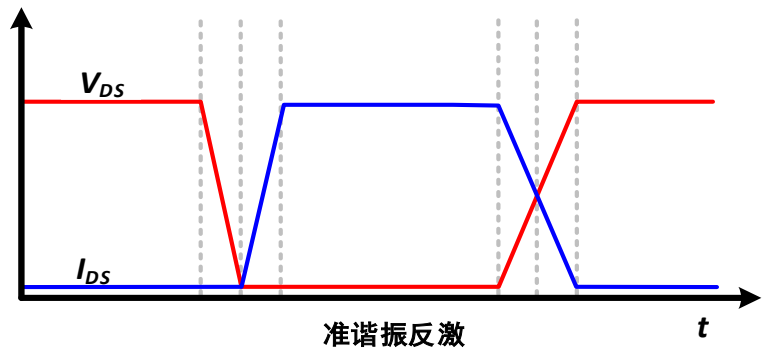


图7 准谐振反激模式下器件漏源电压电流波形图

5 试验条件

外部测试环境温度要求为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，测试环境相对湿度不超过65 %。（测试环境指温控系统以外的自然环境）

6 仪器设备

所使用的测试装置主要包括电源系统、监控设备（包含控制系统、数据采集系统、温度传感器）、高温试验箱、测试电路及负载设备。其典型构成图如图8所示。

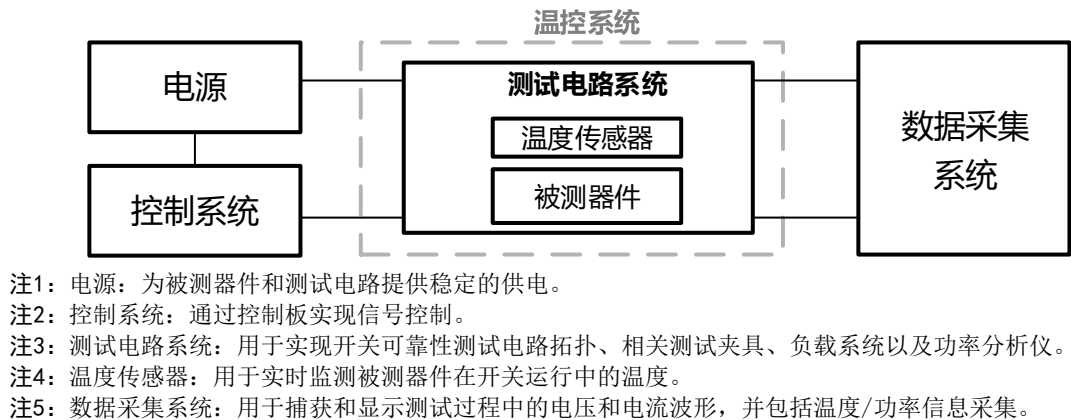


图8 GaN 功率器件开关运行状态测试装置典型构成图

7 试验步骤

7.1 试验方法

开关运行状态可靠性试验一般方法是在固定的温度环境下（根据器件实际应用场景选择测试温度条件），对测试器件施加动态的电压和电流应力，以模拟其在实际应用中的工作状态，并持续监测其特定电学特性参数变化。测试过程中对器件施加动态的电压和电流信号符合前文讨论的 i_D-v_{DS} 开关轨迹曲线，包括硬开关、软开关、准谐振开关等过程，以充分模拟器件在不同应用下的实际工况。在特定试验时间（如168/500/1000小时）后下机检测测试器件的电学特性参数（常温，导通电阻、阈值电压、关态漏电流等）并结合该段时间内实时监控数据（动态导通电阻、效率等），与测试前器件的性能参数进行对比，综合评估器件的性能退化情况。其主要测试流程步骤如图9所示，对应的试验过程中典型的波形图如图10。

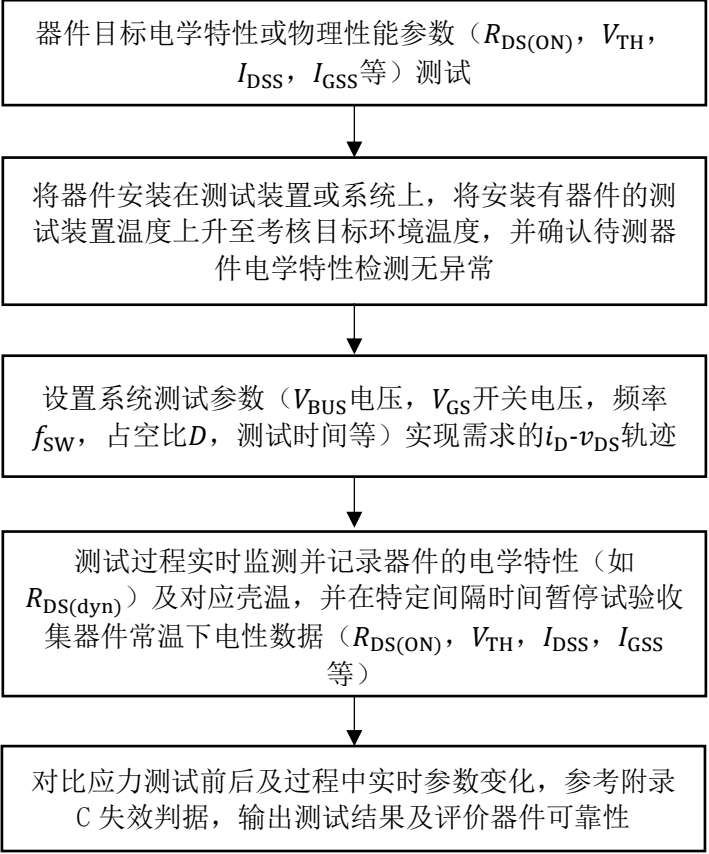


图9 开关运行状态可靠性试验测试简化流程图

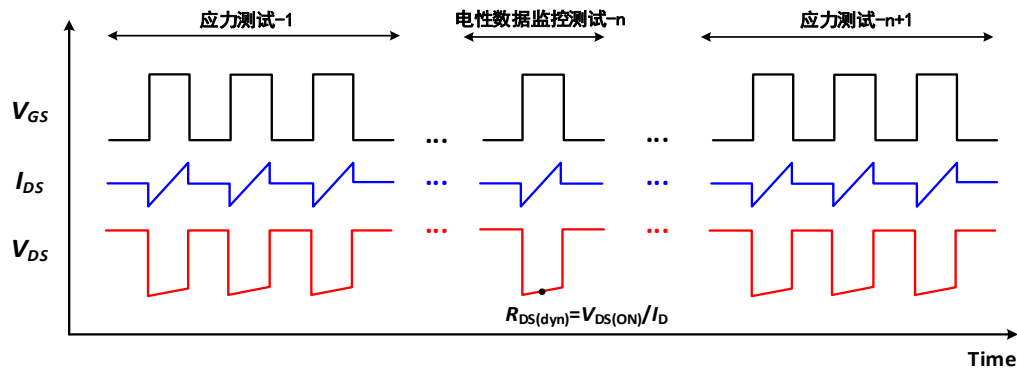


图10 开关运行状态可靠性试验波形示意图

7.2 试验流程

GaN功率器件开关运行状态可靠性试验测试流程如下：

- a) 应力前表征器件电学特性、物理性能及系统参数等特性参数，电学特性包括常温下导通电阻（ $R_{DS(ON)}$ ）、阈值电压（ V_{TH} ）、漏极关断电流（ I_{DSS} ）、栅极电流（ I_G ）等，物理性能包含器件热阻（ $R_{\theta JC}$ ）等，系统参数包含效率（ η ）等。其中作为失效判据的电学特性为必须测试项，若拓扑能够实时监控特定参数（如效率 η 、动态导通电阻 $R_{DS(dyn)}$ 、结温 T_J 、壳温 T_C ），则上机稳定后的数据也为必要测试记录项。

- b) 根据GaN功率器件的封装形式,选择合适的测试装置及系统。依据器件实际工作的环境温度设置高温测试箱的温度。
- c) 依据需求的 i_D - v_{DS} 轨迹,在控制设备上设置相关测试参数,包括对应母线电压(V_{BUS})或输入电压(V_{IN})、负载电感(L)、负载电阻(R_L)、栅极开启电压($V_{GS(ON)}$)、栅极关断电压($V_{GS(OFF)}$)、开关频率(f_{SW})、占空比(D)。具体的测试要求如下:
 - 1) 流过器件的尖峰电流(I_{peak})能覆盖需求 i_D - v_{DS} 轨迹;
 - 2) 器件开关过程中上升时间(t_r)和下降时间(t_f)满足开切换速度大于10 V/ns;
 - 3) 器件工作过程中结温 T_j 小于等于额定最大值,结温根据实际应用场景设置,推荐设置为工作结温允许范围内的最严苛值;
- d) 设置测试时间,启动应力测试,并在应力测试过程中持续监控器件或系统的关键物理参数,关键物理参数包含器件壳温(T_C)或结温(T_j)和系统输入/输出功率(P_{in}/P_{out})以及效率(η)等(如拓扑无法收集功率、效率等参数则无需记录);同时在特定的间隔时间的应力测试后对器件的电学特性($R_{DS(ON)}$ 、 V_{TH} 、 I_{DSS} 、 I_G 等)进行表征。
- e) 第五步结束测试,对比测试前后及过程中参数变化,输出测试结果;同时记录一次开关的实际波形以及测试环境的温度、湿度等条件,以便后续分析。

8 试验数据处理

开关运行状态可靠性试验,以下参数的记录可用于描述开关应力状况:

- a) 施加在其漏端的电压(V_{DS})
- b) 施加在其栅端的电压(V_{GS})
- c) 流过器件的尖峰电流(I_{peak})
- d) 流过器件的平均电流(I_{avg})
- e) 开关频率(f_{SW})
- f) 占空比(D)
- g) 上升时间(t_r)
- h) 下降时间(t_f)
- i) 单一周期内开关波形

以下参数的记录可用于表征应力过程中关键系统参数:

- j) 开关过程中的壳温(T_C)
- k) 系统输入功率(P_{in})
- l) 系统输出功率(P_{out})
- m) 系统效率(η)

在可靠性试验中,对器件开关应力前后及过程中特性的表征需要包含以下关键参数并做记录:

- n) 导通电阻($R_{DS(ON)}$)
- o) 阈值电压(V_{TH})
- p) 漏极关断电流(I_{DSS})
- q) 栅极电流(I_G)

9 试验报告

试验报告至少应给出以下几方面的内容:

- a) 样品编号，样品数量，型号；
- b) 试验使用标准；
- c) 结果；
- d) 观察到的异常现象；
- e) 试验日期。

附 录 A

(资料性)

GaN 功率器件开关运行状态可靠性测试记录表

GaN功率器件开关运行状态可靠性测试记录表测试记录表如表A. 1。

表A. 1 GaN 功率器件开关运行状态可靠性测试记录表示例

产品名称 型号规格			组别	
检测项目			环境条件	
测试 仪器仪表	型号：	计量有效期		
	编号：			
检测依据 标准条款			器件 数量	
测试条件及技术要求	选	阻性感性负载或阻性负载的硬开关电路		
		半桥、全桥等多器件拓扑电路（例如同步Buck降压电路）		
		准谐振反激电路		
	系统电压（ V_{DD} ）或母线电压（ V_{BUS} ）输入电压（ V_{IN} ）		上升/下降时间（ t_r ， t_f ）以及示波器测量带宽（ BW ）	器件壳温（ T_C ）
	施加在栅端的电压（ V_{GS} ）		开关频率（ f_{SW} ）	输入/输出功率（ P_{in}/P_{out} ）
	电流峰值（ I_{peak} ）		占空比（ D ）	开关应力时间（ t_{stress} ）
	过程测试结果记录			
器件编号	器件物理参数（ T_C ， T_J 等）		系统参数（系统效率 η 等）	器件电性参数（ V_{TH} ， I_{DSS} ， $R_{DS(ON)}$ ， $R_{DS(dyn)}$ 等）
1				
2				
3				
4				
.....				

附 录 B

(资料性)

开关运行状态可靠性试验测试过程应力条件建议

开关运行状态可靠性试验测试过程应力条件建议如表B. 1所示。

表B. 1 DHTOL 测试应力条件建议

应力项目	条件范围	推荐值
DC母线电压 V_{BUS}	器件参数表额定电压 V_{DS} 的80%及以上或者实际系统应用母线电压的1.2倍及以上	520 V及以上（对应参数表中 $V_{\text{DS,max}}=650\text{ V}$ ）
工作结温 T_{J}	器件参数表规定的工作结温 T_{J} 范围中最恶劣的情形	一般采用 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\leq T_{\text{J}}\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为工作结温（对应参数表中 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}\leq T_{\text{J}}\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）
尖峰电流 I_{peak}	系统应用最大功率对应电流	如在65 W适配器应用中，尖峰电流 $\geq 1\text{ A}$
开关频率 f_{sw}	$\geq 100\text{ kHz}$	在设定DC电压母线电压和尖峰电流的稳定工况下，满足工作结温的最大开关频率

附 录 C
(资料性)

开关运行状态可靠性试验建议的样本数量及失效判据

开关运行状态可靠性试验建议的样本数量及失效判据参考如表C. 1所示

表C. 1 DHTOL 测试样本数量及失效判据示例

测试项目	开关运行状态可靠性试验（DHTOL）
测试条件	基础测试条件如表B. 1建议
样本数量	3个批次器件，每个批次样本数量≥8颗（单管系统）或组（半桥系统）
测试时间	≥1000小时
失效判据	1) 应力过程中监控系统参数异常（器件壳温或结温超过设定安全工作范围，或者效率 η 低于正常工作范围） 2) 应力过程中或者应力后监控电性参数大于参数表规定范围或者允许的漂移范围（如针对消费电子应用可靠性要求，允许的漂移范围为 $\Delta R_{DS(ON)}<30\%$, $\Delta V_{TH}<30\%$, $\Delta I_X<100$ 倍，X可代表漏极或栅极漏电，应力过程中的监控数据需要在器件温度降至室温后量测） 3) 器件外观损坏
通过标准	0失效

附 录 D

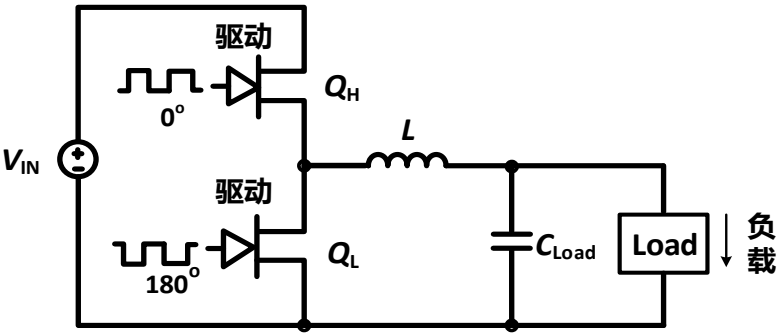
(资料性)

开关运行状态可靠性试验示例

D.1 测试电路示例

基于B.1示意的测试应力条件以及表C.1示意的测试样本数量建议，一个典型的DHTOL测试实验示例如下：

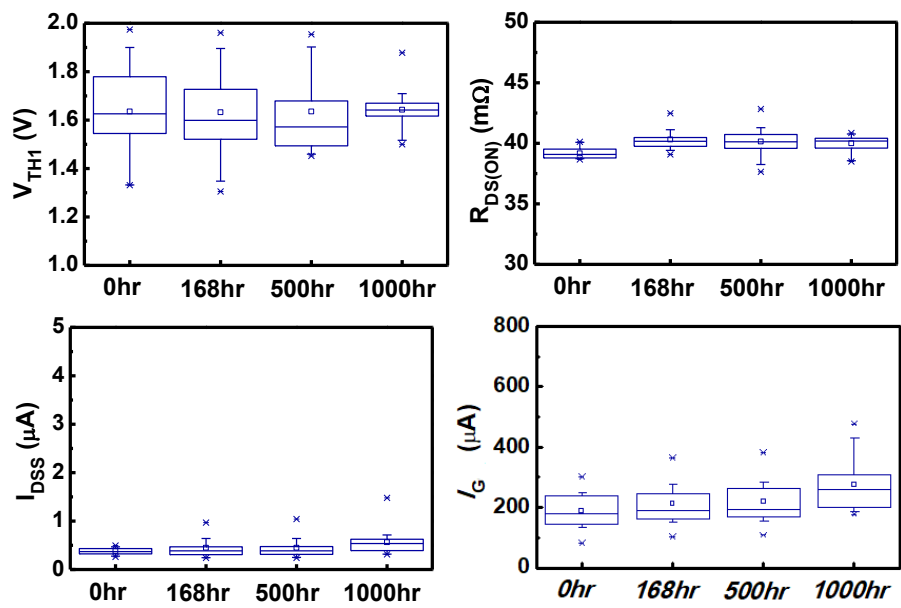
测试电路采用半桥降压电路如图11所示，一组测试电路试验过程中同时对两颗GaN器件（ Q_H ， Q_L ）施加开关应力。对应的器件规格为650V耐压等级，在试验过程中母线电压 V_{BUS} 选择520V，开关尖峰电流 I_{peak} 大于1 A，开关频率 $f_{SW}=100\text{ kHz}$ 。实验中采用的温度环境（ T_{amb} ）为室温，器件在稳定工作过程中由于自热效应其壳温（ T_C ）约60℃，依照器件热阻计算开关运行过程中器件对应结温（ T_J ）约80℃。



图D.1 DHTOL 试验示例采用半桥降压电路示意图

D.2 测试过程监控及数据分析

试验采用的样本数量为20颗（或10组），试验时间为1000小时。试验开始前对器件的关键电性参数（ $R_{DS(ON)}$ 、 V_{TH} 、 I_{DSS} 、 I_G ）进行量测，试验过程中会对测试样品间隔时间（间隔时间 $\leq 5\text{ min}$ ）电性采样（主要 $R_{DS(ON)}$ 或者动态导通电阻 $R_{DS(dyn)}$ ）确认器件是否短路，同时对器件的壳温（ T_C ）监控确认其工作在设定的结温范围。整个可靠性试验期间，会在特定的时间（168小时、500小时和1000小时考核结束时）中断试验，对器件的关键电性参数（ $R_{DS(ON)}$ 、 V_{TH} 、 I_{DSS} 、 I_G ）进行量测以判断器件是否失效及与初始电性对比判断是否漂移出可允许的范围。如图12所示的可靠性试验数据总结汇整，在HTOL实验过程中20颗器件均未出现失效，同时器件关键参数在应力过程中的漂移量在允许范围内，采用的标准为 $R_{DS(ON)}$ 、 V_{TH} 漂移量小于30%，漏电参数 I_{DSS} 、 I_G 漂移量小于100倍。基于以上数据可判断器件通过DHTOL可靠性试验考核。



图D. 2 HTOL 试验示例数据分析中关键电性参数比较

参 考 文 献

- [1] GB/T 2900.32—94 电工术语 电力半导体器件
- [2] GB/T 4586—1994 半导体器件 分立器件 第8部分:场效应晶体管
- [3] T/CASAS 034—2024 用于硬开关电路的氮化镓高电子迁移率晶体管动态导通电阻测试方法
- [4] IEC 60747-8:2010 Semiconductor devices-Discrete device-Part 8:Field-effect transistors
- [5] IEC-63284:2022 Semiconductor devices - Reliability test method by inductive load switching for gallium nitride transistors
- [6] JEP173:2019 Dynamic ON-Resistance Test Method Guidelines for GaN HEMT based Power Conversion Devices, Version 1.0
- [7] JEP180: 2021 Guideline for Switching Reliability Evaluation Procedures for Gallium Nitride Power Conversion Devices, Version 1.0
- [8] JEP182: 2021 Test Method for Continuous-Switching Evaluation of Gallium Nitride Power Conversion Devices, Version 1.0
- [9] JEP183:2021 Guidelines for Measuring the Threshold Voltage (VT) of SiC MOSFETs, Version 1.03
- [10] Li R, Wu X, Yang S, et al. Dynamic On-State Resistance Test and Evaluation of GaN Power Devices Under Hard- and Soft-Switching Conditions by Double and Multiple Pulses[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1044 - 1053
- [11] Li K, Videt A, Idir N, et al. Accurate Measurement of Dynamic On-State Resistances of GaN Devices Under Reverse and Forward Conduction in High Frequency Power Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9650 - 9660