

团 体 标 准

T/CASAS 052—2025

非钳位感性负载开关应力下 GaN HEMT 在线 测试方法

Online test method of GaN High-Electron-Mobility-Transistor under
unclamped inductive switching

-

2025 - 05 - 26 发布

2025 - 05 - 26 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

5 测试条件..... 3

6 仪器设备..... 3

7 测试步骤..... 4

 7.1 测试方法..... 4

 7.2 测试流程..... 5

8 试验数据处理..... 6

9 试验报告..... 6

附录 A （资料性） 非钳位感性负载开关应力下 GaN HEMT 在线测试方法记录表..... 7

参考文献..... 8

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：电子科技大学、工业和信息化部电子第五研究所、大连理工大学、上海大学、北京大学、北京大学东莞光电研究院、深圳平湖实验室、湖南三安半导体有限责任公司、苏州能讯高能半导体有限公司、杭州长川科技股份有限公司、是德科技（中国）有限公司、佛山市联动科技股份有限公司、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：孙瑞泽、陈万军、明鑫、施宜军、黄火林、任开琳、魏进、刘强、曾威、王小明、石瑜、夏云、刘成、裴轶、孙海洋、耿霄雄、孙承志、陈希辰、高伟。

引 言

GaN HEMT功率器件具有工作频率高、开关损耗低和耐高温等优点，能够有效提高电力电子系统的工作效率和功率密度，在数据中心、电机驱动和航空航天电子等领域具有广泛的应用前景。随着GaN HEMT商业化程度的不断提高，器件工作特性的稳定性成为了业内研究热点之一。在实际功率变换应用场景下的电力电子系统中，GaN HEMT处于高速、高频开关工作状态下，电路中存在较高的电流变化率（ di/dt ）与电压变化率（ dv/dt ）并与寄生元件耦合，在器件端口上产生较大的电学应力。此时，GaN HEMT器件内部陷阱会发生对载流子的俘获与发射，导致器件出现动态导通电阻增加和阈值电压漂移等性能变化，器件损耗显著增大。因此，对GaN HEMT器件工作特性的在线测试与监控十分重要。

GaN HEMT器件在电动机驱动等感性负载的应用环境中，如果负载出现故障则需要立即关断负载和功率器件。此时感性负载元件中存储能量未能及时释放，器件漏极将承受较大的电压应力，使器件工作在非箝位感性负载开关（UIS）条件下。在确定GaN HEMT器件耐压安全裕度和性能边界时，研究UIS电应力作用下器件在线工作时的特性稳定性是十分必要的。通过调整UIS电应力生成电路，将器件漏极电压应力水平设置在额定电压与最大瞬态击穿电压之间，实现对器件工作特性进行在线测试与评估，同时避免因超过最大瞬态击穿电压而导致不可逆损坏。

GaN HEMT器件无寄生PN结，不能像Si基功率器件一样通过雪崩过流以耗散感性负载中储存的能量，同时GaN器件内部存在大量缺陷和陷阱，对载流子的俘获与发射导致器件性能变化存在时变特性，因此基于Si基功率器件的UIS电应力测试方法与退化机理无法直接应用于GaN HEMT。采用在线测试方法，分析单次或重复UIS电应力后GaN HEMT器件性能的变化，对揭示GaN HEMT器件在非箝位感性负载开关中的工作特性稳定性具有重要意义。此标准明确了在UIS电应力条件下的GaN HEMT器件动态导通电阻和阈值电压的在线测试方法，可实现UIS电应力结束后的微秒至毫秒时间内对器件动态导通电阻和阈值电压的在线测试。

本文件适用于封装级器件产品测试，为GaN HEMT的生产研发、特性表征、量产测试、可靠性评估及应用评估提供依据，为GaN功率器件在电力电子系统中的推广应用奠定基础。

非钳位感性负载开关应力下 GaN HEMT 在线测试方法

1 范围

本文件描述了执行非钳位感性负载应力下氮化镓高电子迁移率晶体管在线测试方法，包括原理、测试条件、仪器设备、测试步骤、试验数据处理和试验报告。

本文件适用于封装级GaN HEMT器件的生产研发、特性表征、量产测试、可靠性评价及应用评估。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 14264 半导体材料术语

3 术语和定义

GB/T 14264界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

非钳位感性负载开关 unclamped inductive switching; UIS

工作在感性负载条件下经受高压和电流应力的开关。

注：感性负载无并联电压钳位电路。

3.2

双脉冲测试 Double Pulse Test; DPT

一种针对功率半导体器件开关性能评估的测试方法。通过施加两个脉冲信号，模拟器件在实际电路中的开关过程。

3.3

封装级 GaN HEMT 晶体管

GaN HEMT

被封装的氮化镓高电子迁移率晶体管器件。

3.4

UIS 测试后的器件动态导通电阻 dynamic on-resistance after UIS phase

$R_{DS(dyn)}$

UIS电应力后的器件导通电阻，值取自双脉冲测试（DPT）中 I_{DS} 第二个上升时段从关断状态转换为开启状态后，在 $t_m=1\ \mu s$ 时测量的 V_{DS}/I_{DS} 。

3.5

UIS 测试后的器件阈值电压 threshold voltage after UIS phase

$V_{TH(UIS)}$

UIS电应力后的器件阈值电压，值取自双脉冲测试（DPT）中 I_{DS} 第一个上升时段到达器件datasheet阈值电压测量点的电流值时的栅极电压 V_{GS} 。

3.6

开态脉冲宽度 on-state pulse width

T_{on}

被测器件在测试中处于开启的脉冲宽度。

3.7

器件漏源两端峰值电压 peak drain voltage

V_{PEAK}

UIS电应力测试时，被测器件漏极相对源极的电压峰值。

3.8

UIS 测试电流预设值 current preset in UIS phase

I_{UIS}

UIS电应力测试时，被测器件最大漏极电流设定值。

3.9

DPT 测试电流预设值 current preset in DPT phase

I_{DPT}

DPT测试时，被测器件漏极电流设定值。

3.10

UIS 应力测试次数 stress cycle number

N_{SC}

重复UIS电应力测试中，被测器件累计承受的应力测试次数。

3.11

UIS 恢复时间 recovery time after UIS

t_{REC}

UIS电应力测试中IDS由负值变化至零的时刻与DPT测试中 I_{DS} 第一个上升沿时刻之间的间隔时间。

4 原理

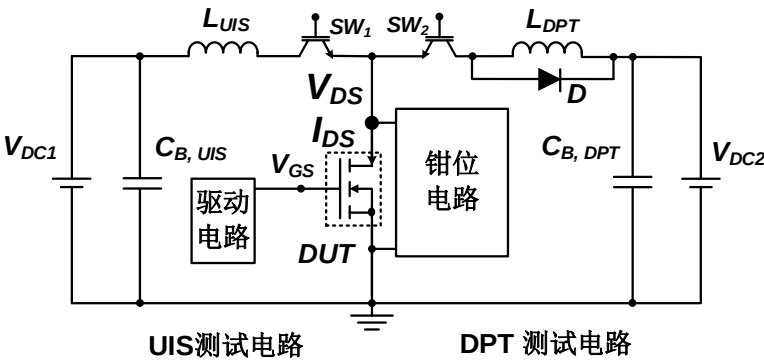


图1 测试电路

如图1所示，为实现UIS电应力结束后对DUT的 $R_{DS(dyn)}$ 和 $V_{TH(UIS)}$ 进行表征，UIS测试电路和双脉冲测试（DPT测试）电路被合并至同一电路中，利用两个可双向阻断/单向导通的开关 SW_1 和 SW_2 分别控制UIS电路和DPT电路的激活状态。测试电路可以简要划分为“UIS测试电路”、“DPT测试电路”、“测量钳位电路”、“驱动电路”四部分，其中驱动电路控制DUT的开启与关断。在测试过程中DUT的导通压降和关断压降值相差较大，为了提升 $R_{DS(dyn)}$ 和 $V_{TH(UIS)}$ 的测试精度，通常DUT漏极与源极间引入钳位电路以准确测试器件导通压降。

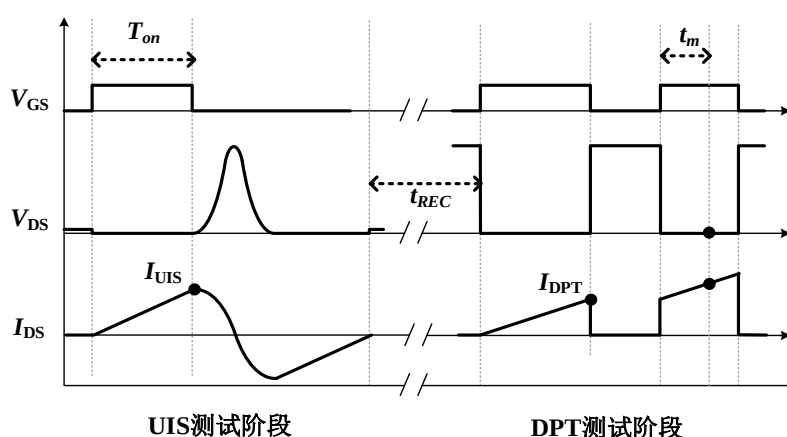


图2 电路工作时序原理图

图2为测试电路的工作时序图，具体工作流程如下：

在UIS测试阶段（ SW_1 开启且 SW_2 关断），当DUT导通时，改变 T_{on} 来改变电感储存的能量。高压直流电源 V_{DC1} 和储能电容 $C_{B,UIS}$ 向电感 L_{UIS} 充电使电流达到 I_{UIS} ，同时 I_{DS} 增大。随后DUT关断并发生UIS过程，电感中的能量导致在DUT漏、源极间产生峰值为 V_{PEAK} 的电压应力。UIS测试阶段在 I_{DS} 由负值变化至零后结束，此后经过一个可以调节的恢复时间 t_{REC} ，电路进入DPT测试阶段以完成UIS电应力后器件 $R_{DS(dyn)}$ 和 $V_{TH(UIS)}$ 的测试。

在DPT测试阶段（ SW_1 关断且 SW_2 开启），当DUT第一次导通时， V_{DC2} 向电感 L_{DPT} 充电使电流达到 I_{DPT} 。在 I_{DS} 第一个上升时段到达器件datasheet阈值电压测量点的电流值时，记录栅极电压 V_{GS} 为器件 $V_{TH(UIS)}$ 。此后DUT关断，电感电流通过续流二极管D形成电流回路。经过一个设定的间隔时间 $T_{OFF,DPT}$ 后，DUT第二次导通，电感电流从 I_{DPT} 值开始增大（忽略DUT两次开启之间的电感电流下降）， I_{DS} 上升时段从关断状态转换为开启状态后，在 $t_m=1\mu s$ 时测试DUT漏源电流 I_{DS} 以及漏源电压 V_{DS} ，计算得到动态导通电阻值 $R_{DS(dyn)}$ 。

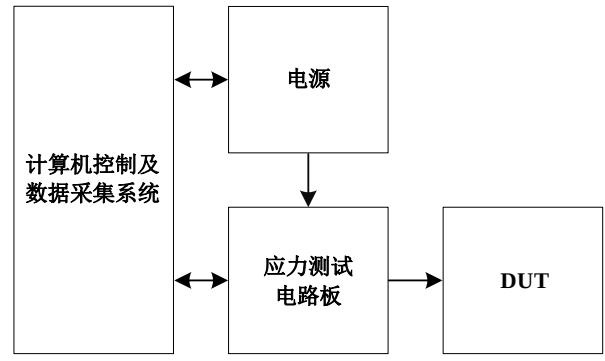
5 测试条件

测试环境应符合以下要求：

- 测试环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本测试方法同样适用于更高环境温度（ $25\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）；
- 测试环境相对湿度不超过65%。

6 仪器设备

测试装置主要包括计算机控制及数据采集系统、电源系统、测试电路板及被测样品等，其典型构成图如图3所示。



注1：计算机控制及数据采集系统。用于自动控制测试过程中的参数设置、试验波形及数据记录等；
注2：电源系统。提供直流电源 V_{DC1} 、 V_{DC2} 和驱动电路电源；

图3 应力测试装置的典型构成

7 测试步骤

7.1 测试方法

GaN HEMT非钳位感性负载开关下动态导通电阻的标准测试方法，包括将器件驱动在规定的栅极驱动电压、开/关脉冲宽度、占空比、直流电源电压等条件下，实时记录器件开启/关断瞬间和关断过程中漏源两端电压 V_{DS} 、栅源两端电压 V_{GS} 及器件电流 I_{DS} 等数据，表征器件在UIS电应力测试前、后的动态导通电阻和阈值电压参数。

在UIS电应力结束后对GaN HEMT器件 $R_{DS(dyn)}$ 和 $V_{TH(UIS)}$ 的在线测试，其主要测试流程步骤如图4所示。

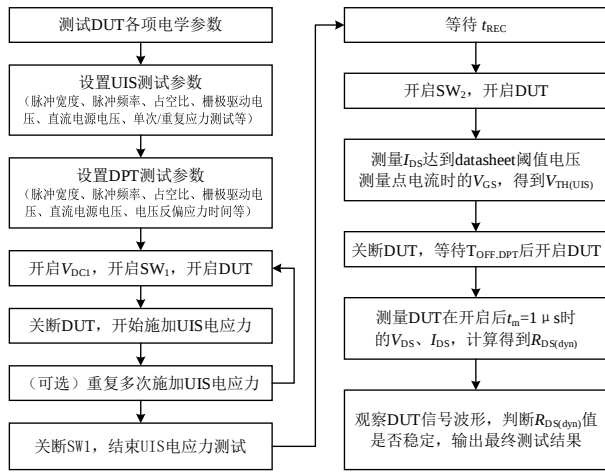


图4 测试简化流程图

测试方法中UIS电应力测试包括单次电应力测试和重复多次电应力测试。重复UIS电应力测试典型波形如图5所示。

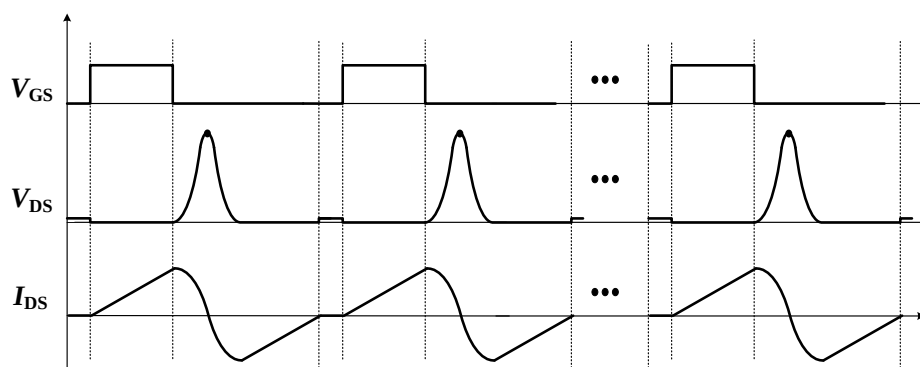


图5 重复 UIS 电力应力测试波形

7.2 测试流程

具体测试程序如下：

- a) 根据 GaN 功率器件的封装形式，选择合适的探针台或测试夹具；
- b) 表征 DUT 各项电学性能，在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下依次测试器件转移特性、阈值电压、栅极漏电特性、输出特性、漏极漏电特性、未承受 UIS 电应力时动态导通电阻 $R_{\text{DS(dyn)}}$ ；
- c) 在控制设备和电源设备上设置相关测试参数，包括直流电源供电电压 (V_{DC1} 、 V_{DC2})、串联电感 (L)、充电电容 (C_B)、栅极开启电压 ($V_{\text{GS(ON)}}$)、UIS 测试栅极关断电压 ($V_{\text{GS(OFF),UIS}}$)、UIS 测试开态脉冲宽度 ($T_{\text{ON,UIS}}$)、UIS 电应力重复次数 (N_{SC})、UIS 电应力测试结束后进行 DPT 测试的间隔时间 t_{REC} 、DPT 测试开态脉冲宽度 ($T_{\text{ON,DPT}}$)、DPT 测试关态脉冲宽度 ($T_{\text{OFF,DPT}}$)、DPT 测试栅极关断电压 ($V_{\text{GS(OFF),DPT}}$)。调整钳位电路参数
- d) 进行 UIS 电应力测试阶段，具体测试要求如下：
 - 1) SW_1 开启，DUT 开启，维持开启时间为 $T_{\text{ON,UIS}}$ ，此间 V_{DC1} 向电感 L_{UIS} 充能，电感电流随着时间持续上升并到达设定值 I_{UIS} ，此后立即关断 DUT；
 - 2) 当器件电流 I_{DS} 由负值变化至零时，结束单次 UIS 电应力测试；
 - 3) 如果进行重复多次 UIS 电应力测试，设置驱动电路以重复步骤 1) 和 2)，重复次数为 N_{SC} ，此后结束重复多次 UIS 电应力测试，关断 SW_1 ；
- e) 进行 DPT 测试，具体测试要求如下：
 - 1) UIS 电应力测试结束后间隔时间 t_{REC} ；
 - 2) 开启 SW_2 ，开启 DUT，维持开启时间为 $T_{\text{ON,DPT}}$ ，此间 V_{DC2} 向电感 L_{DPT} 充能，电感电流随着时间持续上升记录 I_{DS} 到达器件 datasheet 阈值电压测量点的电流值时的栅极电压 V_{GS} 为器件 $V_{\text{TH(UIS)}}$ 。 I_{DS} 到达设定值 I_{DPT} 后即关断 DUT；
 - 3) DUT 关断，维持关断时间为 $T_{\text{OFF,DPT}}$ ，续流二极管 D 为电感提供电流路径，保持电感电流维持不变。此时测试电路两端被钳位电路钳住，以便测量仪器以合适的量程测量；
 - 4) DUT 再次开启，维持开启时间为 $T_{\text{ON,DPT}}$ ，电感电流从设定值 I_{DPT} 开始上升；测量开启后 $t_{\text{m}}=1\text{ }\mu\text{s}$ 时 DUT 的导通电流 I_{DS} 以及 V_{DS} ，计算得到动态导通电阻值 $R_{\text{DS(dyn)}}$ ；
 - 5) DUT 关断， SW_2 关断，结束 DPT 测试；
- f) 第六步结束测试，输出和记录相关测试结果及测试波形。

设置参数参考值与取值范围：

V_{DC1} : 30 V (15 V~105 V，与 DUT 耐压和电流等级相关)

V_{DC2} : 30 V (10 V~600 V, 与DUT耐压和电流等级相关)

C_B : 12 μ F

$V_{GS(ON)}$: 6 V (0 V~15 V)

$V_{GS(OFF)}$: 0 V (-5 V~0 V)

栅极驱动电压值应保证器件完全开启或关断, 开关状态切换速度不低于10 V/ns;
器件开启后, 钳位电路延迟时间以及漏极电压电流震荡时间均不大于1 μ s。

8 试验数据处理

试验数据包含以下内容:

- 被测器件漏极电流 I_{DS} ;
- 被测器件漏源两端电压 V_{DS} ;
- 被测器件栅源两端电压 V_{GS} ;
- 被测器件阈值电压 $V_{TH(UIS)}$;
- 被测器件导通电阻 $R_{DS(dyn)}$ 。

9 试验报告

试验报告至少应给出以下几方面的内容:

- 具体给出本文件指导下的试验报告中的试验对象;
- 本文件编号(可增加除此之外的其它文件编号);
- 具体表述本文件要求的试验报告中须用到的试验方法(一个或多个);
- 结果;
- 观察到的异常现象;
- 试验日期。

附 录 A
(资料性)

非钳位感性负载开关应力下 GaN HEMT 在线测试方法记录表

非钳位感性负载开关应力下GaN HEMT在线测试记录表如表A. 1所示。

表A. 1 非钳位感性负载开关应力下 GaN HEMT 在线测试记录表示例

产品名称型号			组别	
检测项目	□ UIS+DPT 测试 □UIS 测试 □DPT 测		项目类型	□单次测试 □重复测试（次数： ）
产品规格	额定电压：		测试仪器仪表	型号：
	额定电流：			编号：
环境条件	环境温度： 环境相对湿度：		计量有效期	
检测依据标准条款	T/CASAS 052—2025		样品数量	
测试条件及技术要求	直流电源电压($V_{DC1/2}$):		充电电容值(C_B):	
	串联电感值(L):		漏极电流值(I_{DS}):	
	栅极开启电压($V_{GS(ON)}$):		栅极关断电压($V_{GS(OFF)}$):	
	开启/关断切换速度：		关断/开启切换速度：	
	导通/关断漏极电压(V_{DS}):			
	导通电阻测试条件：双脉冲测试中 I_{DS} 第二个上升时段从关断状态转换为开启状态后，在 $t_m=1\text{ us}$ 时测量。			
样品编号	测试结果			
	漏极电压 V_{DS}	漏极电流 I_{DS}	阈值电压 $V_{TH(UIS)}$	动态导通电阻值 $R_{DS,dyn}$
1				
2				
3				
...				

参 考 文 献

- [1] IEC 60747-8:2010 Semiconductor devices-Discrete device-Part 8: Field-effect transistors
 - [2] IEC 63284:2022 Semiconductor devices. Reliability test method by inductive load switching for gallium nitride transistors
 - [3] JEP180.01:2020 Guideline for Switching Reliability Evaluation procedures for Gallium Nitride Power Conversion Devices
 - [4] JEP173:2019 Dynamic ON-Resistance Test Method Guidelines for GaN HEMT based Power Conversion Devices, Version 1.0
 - [5] JEDEC-JESD24-5 Single Pulse Unclamped Inductive Switching (UIS) Avalanche Test Method
 - [6] JEP184: 2021 Guideline for evaluating Bias Temperature Inst
 - [7] T/CASAS 005—2022 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
 - [8] T/CASAS 034—2024 用于零电压软开通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
 - [9] AEC_Q101 Failure mechanism based stress test qualification for discrete semiconductors in automotive applications
-