



团 体 标 准

T/CASAS 033—2025

代替 T/CASAS 033—2024

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管 (SiC MOSFET) 功率器件开关动态测试方法

Switching dynamic test method for SiC MOSFET power device

2025 – 12 – 30 发布

2025 – 12 – 30 实施

目 次

前言..... III

引言..... IV

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 符号和缩略语..... 2

5 测试电路与测试条件..... 2

 5.1 测试电路..... 2

 5.2 测试条件..... 3

 5.2.1 测试环境..... 3

 5.2.2 直流电源..... 3

 5.2.3 直流母线..... 4

 5.2.4 钳位电感..... 4

 5.2.5 驱动电路..... 5

 5.2.6 温控平台..... 7

 5.2.7 脉冲发生器..... 7

 5.3 其他事项..... 7

6 测试仪器与测试方法..... 8

 6.1 测试仪器..... 8

 6.1.1 测试系统..... 8

 6.1.2 电压探头..... 8

 6.1.3 电流探头..... 8

 6.1.4 示波器..... 9

 6.1.5 同轴电缆..... 9

 6.2 测试方法..... 9

7 测试结果与计量方法..... 9

 7.1 开关时间..... 9

 7.2 开关损耗..... 10

 7.3 开关速度..... 11

附 录 A （资料性） SiC MOSFET 功率器件开关动态测试记录表..... 12

参 考 文 献..... 13

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。

本文件所涉及的技术内容均为公开可实施技术，不含需许可的专利壁垒。

本文件起草单位：重庆大学、国网江苏省电力有限公司经济技术研究院、华润润安科技有限公司、北京华峰测控技术股份有限公司、杭州飞仕得科技有限公司、合肥功立德半导体科技有限公司、是德科技（中国）有限公司、忱芯科技（上海）有限公司、国网重庆市电力公司电力科学研究院、深圳麦科信科技有限公司、西安交通大学、浙江大学、浙江大学绍兴研究院、合肥工业大学、中国工程物理研究院电子工程所、深圳市禾望电气股份有限公司、苏州汇川联合动力系统股份有限公司、泰克科技（中国）有限公司、山东阅芯电子科技有限公司、工业和信息化部电子第五研究所、深圳平湖实验室、湖北九峰山实验室、中国电力科学研究院有限公司、株洲中车时代半导体有限公司、东风汽车集团有限公司、智新半导体有限公司、广电计量检测集团股份有限公司、上海瞻芯电子科技股份有限公司、深圳市新凯来技术有限公司、一汽旗新动力(长春)科技有限公司、广东省东莞市质量监督检测中心、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：曾正、孙鹏、孙文涛、袁伟、张文嘉、吴倩、蔡晖、潘效飞、牛富丽、袁琰、刘伟、孙钦华、孙承志、毛赛君、李永福、张兴杰、王来利、吴新科、林氮、赵爽、李俊焘、谢峰、张太之、孙川、余超群、陈媛、陈刚、王晓萍、袁俊、吴畅、杨霏、张雷、常桂钦、李钾、王民、李汝冠、黄海涛、杜凯、刘志强、宋鑫宇、李本亮、高伟。

本文件于2024年首次发布，本次为第一次修订。

引 言

得益于高压、高频、高温等优异特性，SiC MOSFET功率器件在交通电气化、新能源发电等领域逐渐得到广泛应用。然而，SiC MOSFET功率器件的额定电压更高、开关速度更快、工作温度更宽，其性能参数超出传统Si器件的典型范围，传统Si器件的开关动态测试方法，已无法满足SiC MOSFET功率器件的新兴发展需求。现有的SiC MOSFET功率器件开关动态测试，缺乏定量的技术规范和测试方法，测试结果的精度和稳定性难以统一；由于缺乏广泛的技术共识和行业认同，测试结果难以实现有效的溯源和评比。因此，建立SiC MOSFET功率器件的开关动态测试标准具有重要意义。

为了服务SiC功率器件行业的良性发展，应对SiC MOSFET功率器件开关测试的紧迫需求，制定本文件。本文件给出了SiC MOSFET功率器件开关动态测试的电路、条件、仪器和方法。本文件将依据技术发展进行修订。

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管(SiC MOSFET)功率器件开关动态测试方法

1 范围

本文件描述了双脉冲测试条件下SiC MOSFET功率器件开关动态测试的术语和定义、符号、测试电路、测试条件、测试仪器、测试方法、计量方法等相关内容。

本文件适用于分立器件和功率模块等封装SiC MOSFET功率器件的开关动态测试与评估,对于SiC JFET、SiC BJT、SiC IGBT等其他类型的SiC晶体管功率器件,可参照本文件执行。

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 4793.5—2008 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求 第5部分:电工测量和试验用手持探头组件的安全要求

GB/T 15289—2013 数字存储示波器通用规范

GB/T 19212.17—2019 电源电压为1100V及以下的变压器、电抗器、电源装置和类似产品的安全第17部分:开关型现行电源装置和开关型电源装置用变压器的特殊要求和试验

GB/T 37140—2018 检验检测实验室技术要求验收规范

T/CASAS 002—2021 宽禁带半导体术语

T/CASAS 006—2020 碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管通用技术规范

3 术语和定义

T/CASA 002—2021、T/CASA 006—2020界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管 silicon carbide metal-oxide-semiconductor field effect transistor; SiC MOSFET

具有金属氧化物半导体结构,以栅极隔着氧化层利用电场效应来控制半导体沟道的SiC场效应晶体管。

3.2

双脉冲测试 double pulse test

给功率器件施加两个脉冲作为驱动控制信号的测试方法。

注:第一个脉冲开通器件至负载上的电流达到目标测试电流值。第一个脉冲的下降沿作为关断过程的观测时刻,而第二个脉冲的上升沿作为开通过程的观测时刻。

3.3

被测器件 device under test; DUT

双脉冲测试中,被测试的SiC MOSFET功率器件。

3.4

桥臂 phase-leg

由两个SiC MOSFET功率器件串联形成的组合电路，包括上桥臂和下桥臂。

4 符号和缩略语

T/CASA 002—2021、T/CASA 006—2020界定的以及下列符号和缩略语适用于本文件。

L_{ESL} : 电容的等效串联电感。

C_{EPC} : 电感的等效并联电容。

$t_{d(on)}$: 开通延迟时间。

t_r : 上升时间。

t_{on} : 开通时间。

$t_{d(off)}$: 关断延迟时间。

t_f : 下降时间。

t_{off} : 关断时间。

E_{on} : 开通损耗。

E_{off} : 关断损耗。

I_{rr} : 反向恢复电流峰值。

t_{rr} : 反向恢复时间。

Q_{rr} : 反向恢复电荷。

dv/dt : 电压变化率。

di/dt : 电流变化率。

CMRR: 共模抑制比 (Common mode rejection ratio)。

CMTI: 共模瞬态抑制 (Common mode transient immunity)。

5 测试电路与测试条件

5.1 测试电路

5.1.1 采用电感钳位双脉冲测试电路，测试 SiC MOSFET 功率器件的开关动态，测试电路应符合图 1 所示结构。以下桥臂 SiC MOSFET 器件的开关测试为例，应根据实际应用电路选择上桥臂器件类型及栅极控制方式，并在测试结果中记录所用电路。测试上桥臂 SiC MOSFET 功率器件时，钳位电感应连接桥臂中点与直流母线负极。测试二极管的反向恢复特性，宜将被测功率器件放置在下桥臂。

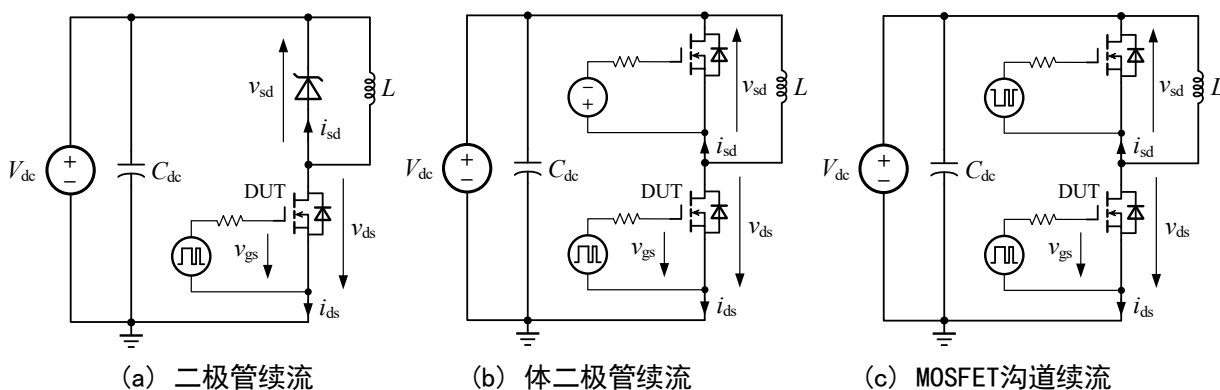


图1 开关测试电路

标引序号说明:

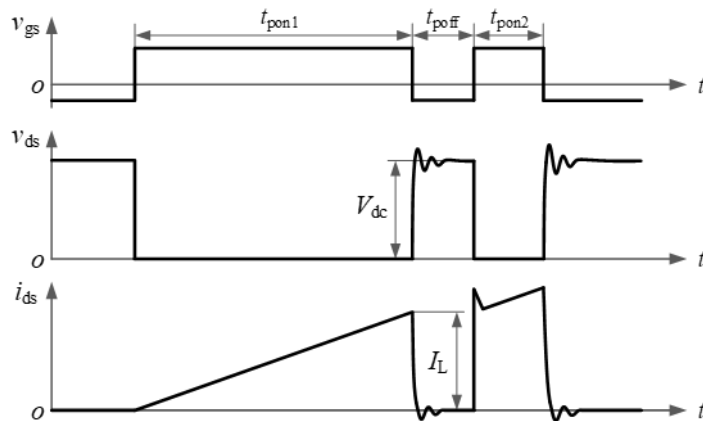
DUT——被测器件;

V_{dc} ——直流母线电压，单位为伏（V）；
 C_{dc} ——直流母线电容，单位为法（F）；
 L ——钳位电感，单位为亨（H）；
 v_{gs} ——被测器件的栅-源电压，单位为伏（V）；
 v_{ds} ——被测器件的漏-源电压，单位为伏（V）；
 i_{ds} ——被测器件的漏-源电流，单位为安（A）；
 v_{sd} ——续流通道的源-漏电压，单位为（V）；
 i_{sd} ——续流通道的源-漏电流，单位为安（A）。

图1 开关测试电路（续）

被测SiC MOSFET功率器件应具有完整封装，封装形式可为分立器件、功率模块或智能功率模块。若被测SiC MOSFET功率器件额外并联SiC SBD二极管，应在测试结果中记录。

测试电路的典型工作波形如图2所示。测试脉冲的宽度（ t_{pon1} 和 t_{pon2} ）和间隔（ t_{poff} ）可调，宜不超过4 μs ，时间分辨率不小于0.1 μs 。第一个测试脉冲的宽度（ t_{pon1} ）宜小于200 μs ，避免被测器件自发热引起结温升高从而影响开关测试结果。



标引序号说明：

t_{pon1} ——第一个脉冲的宽度，单位为秒（s）；
 t_{pon2} ——第二个脉冲的宽度，单位为秒（s）；
 t_{poff} ——两个脉冲之间的间隔，单位为秒（s）；
 I_L ——开关测试的负荷电流，单位为安培（A）。

注：对于图1(c)所示测试电路，上桥臂器件的栅-源电压与下桥臂器件互补，并设置死区时间。

图2 开关测试波形

5.2 测试条件

5.2.1 测试环境

- 5.2.1.1 实验环境条件参考 GB/T 37140—2018 相关规定。
- 5.2.1.2 若无特别规定，环境温度应控制在 20 $^{\circ}C$ ~ 30 $^{\circ}C$ 。
- 5.2.1.3 若无特别规定，海拔高度应控制在 2 000m 以内。
- 5.2.1.4 若无特别规定，相对湿度应控制在 30 % ~ 65 %。

5.2.2 直流电源

- 5.2.2.1 直流电源输出电压应可调，稳态输出电压误差小于 $\pm 0.5\%$ ，电压分辨率宜小于 0.1 V 。
- 5.2.2.2 直流电源应具有限流能力，以限制故障电流和电容充电涌流，并避免直流母线电压过冲。充电速度宜不超过 $1\,000\text{ V/s}$ ，或超调不超过 10% 。
- 5.2.2.3 直流电源供电侧应设接地端子，开关测试过程中应可靠接地。
- 5.2.2.4 直流电源应符合 GB 4793.5—2008 和 GB/T 19212.17—2019 的相关安全规定。

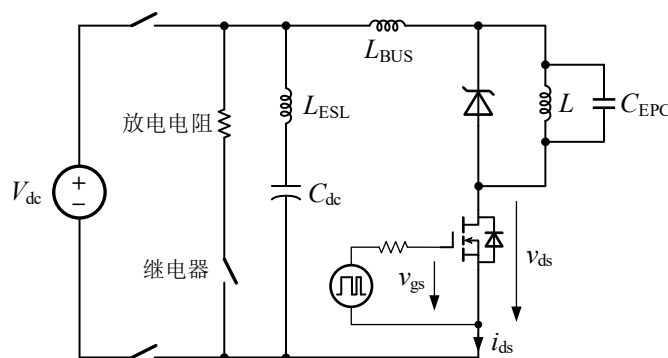
5.2.3 直流母线

开关测试过程中，直流母线电压应保持恒定，测试电路应配置直流母线电容，其容值应按式(1)计算。

$$C_{\text{dc}} \geq \frac{L_{\text{L}}^2}{K_{\text{v}} V_{\text{dc}}^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中： K_{v} ——直流母线的电压波动率，通常为 $1\% \sim 5\%$ 。

- 5.2.3.1 以图 1(a)所示测试电路为例，开关测试电路应采取措施降低寄生电感，如图 3 所示。应选用等效串联电感 L_{ESL} 小的电容，采用合理的电容串并联方式及低感母排布局，以控制直流母线的寄生电感 L_{BUS} 。功率回路中总寄生电感（ $L_{\text{ESL}} + L_{\text{BUS}}$ ）应不大于 15 nH ，并在测试结果中记录，宜采用阻抗分析仪测量功率回路的寄生电感值。



标引序号说明：

L_{ESL} ——直流母线电容的等效串联电感，单位为亨（H）；

L_{BUS} ——直流母排的寄生电感，单位为亨（H）；

C_{EPC} ——钳位电感的等效并联电容，单位为法（F）。

图3 含寄生参数的等效功率回路

- 5.2.3.2 若无特别要求，直流母线应不配置缓冲吸收电路。如需配置，应在测试结果中记录电路结构和关键参数。
- 5.2.3.3 直流母线应配置放电电阻。开关测试完成后，应断开直流电源并闭合继电器，以快速释放母线电容的能量。

5.2.4 钳位电感

- 5.2.4.1 钳位电感钳位电感的电感值应满足式（2）的要求。

$$\frac{V_{\text{dc}} t_{\text{on}}}{K_{\text{i}} I_{\text{L}}} \leq L \leq \frac{V_{\text{dc}} t_{\text{max}}}{I_{\text{Lmax}}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

K_{i} ——负荷电流的波动率，通常为 $1\% \sim 5\%$ ；

t_{on} ——被测器件的开通时间，单位为秒（s）；

t_{max} ——最大测试脉冲宽度，单位为秒（s）；

I_{Lmax} ——最大目标测试电流，单位为安（A）。

5.2.4.2 钳位电感应为抗磁饱和能力强的空心电感，其最低饱和电流应大于目标测试电流。

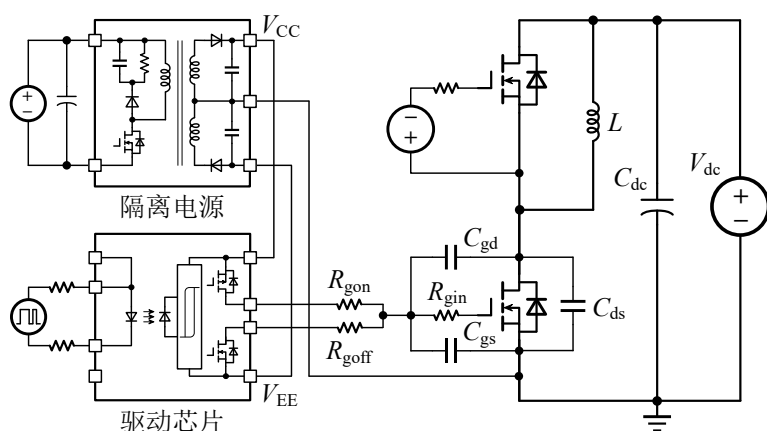
5.2.4.3 钳位电感的绕组之间应具有足够高的匝间绝缘和层间绝缘，额定电压应高于目标测试电压。

5.2.4.4 应选择合适的导线线材和绕制方式，以控制钳位电感的等效并联电容 C_{EPC} ，其值应不超过被测器件输出电容的10%，如图3所示。开关测试结果应该记录钳位电感等效电容的实际值，宜采用阻抗分析仪测量钳位电感的输入阻抗。

5.2.4.5 为了降低电磁干扰，钳位电感与脉冲发生器、驱动电路和电流探头的距离应不少于50 mm。

5.2.5 驱动电路

5.2.5.1 驱动电路用于控制SiC MOSFET器件，保证器件按预定时序和幅值工作，由隔离电源和驱动芯片构成，如图4所示。上、下桥臂功率器件的驱动电源、驱动芯片和驱动电阻应保持一致。



标引序号说明：

V_{CC} ——隔离电源输出的正电压，单位为伏（V）；

V_{EE} ——隔离电源输出的负电压，单位为伏（V）；

R_{gon} ——开通驱动电阻，单位为欧（ Ω ）；

R_{goff} ——关断驱动电阻，单位为欧（ Ω ）；

R_{gin} ——被测器件的栅极内电阻，单位为欧（ Ω ）；

C_{gd} ——被测器件的栅-漏结电容，单位为法（F）；

C_{gs} ——被测器件的栅-源结电容，单位为法（F）；

C_{ds} ——被测器件的漏-源结电容，单位为法（F）。

图4 典型驱动电路

5.2.5.2 应采取措施减小驱动回路的寄生电感。对于有开尔文源极封装的SiC MOSFET功率器件，若无特别规定，应采用开尔文源极作为驱动回路的源极连接。

5.2.5.3 隔离电源应提供足够的输出电压和输出功率。隔离电源输出的正电压 V_{CC} 应确保被测器件完全导通，输出的负电压 V_{EE} 可根据被测器件特性选择，并在测试结果中记录。隔离电源的最小功率应按式(3) - (5)确定。

$$P_{GD} = V_{CC} I_{CC1} + P_{source} + P_{sink} \quad (3)$$

$$P_{source} = \frac{1}{2} Q_g f_{sw} (V_{CC} - V_{EE}) \frac{R_{gdron}}{R_{gon} + R_{gin} + R_{gdron}} \quad (4)$$

$$P_{sink} = \frac{1}{2} Q_g f_{sw} (V_{CC} - V_{EE}) \frac{R_{gdoff}}{R_{goff} + R_{gin} + R_{gdoff}} \quad (5)$$

式中：

P_{GD} ——隔离电源的功率，单位为瓦（W）；

V_{CC1} ——驱动芯片原边输入电压，单位为伏（V）；

I_{CC1} ——驱动芯片原边输入电流，单位为安（A）；

P_{source} ——驱动芯片的拉电流功率，单位为瓦（W）；

P_{sink} ——驱动芯片的灌电流功率，单位为瓦（W）；

Q_g ——栅极电荷，单位为库（C）；

f_{sw} ——开关频率，单位为赫兹（Hz）；

R_{gdron} ——开通过程中驱动芯片的导通电阻，单位为欧（ Ω ）；

R_{gdoff} ——关断过程中驱动芯片的导通电阻，单位为欧（ Ω ）。

驱动芯片应提供足够的峰值电流。宜采用开通电阻 R_{gdron} 和关断电阻 R_{gdoff} 分离的结构，分别控制开通和关断的峰值电流。驱动芯片的峰值电流和驱动电阻应按式(6)和(7)协同设计，并在测试结果中记录实际值。

$$I_{gopk} = \frac{V_{CC} - V_{EE}}{R_{gon} + R_{gin} + R_{gdron}} \quad (6)$$

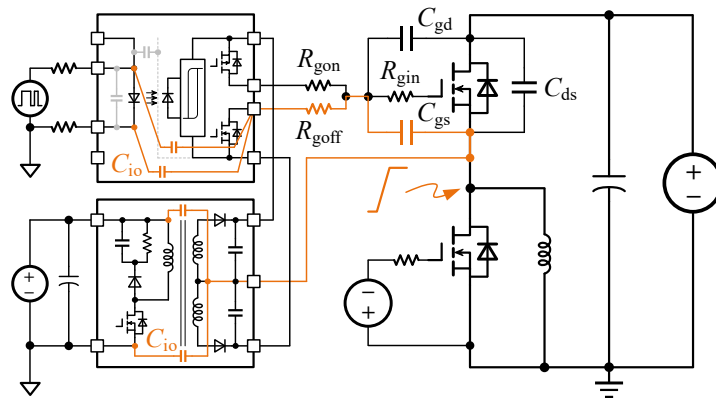
$$I_{gipk} = \frac{V_{EE} - V_{CC}}{R_{goff} + R_{gin} + R_{gdoff}} \quad (7)$$

式中：

I_{gopk} ——开通过程中驱动拉电流峰值，单位为安（A）；

I_{gipk} ——关断过程中驱动灌电流峰值，单位为安（A）。

驱动电路应能适应SiC MOSFET器件开关过程中的高 dv/dt ，确保不发生误开关。隔离电源和驱动芯片应具有足够的共模瞬态抑制能力，CMTI宜大于100 V/ns，输入输出共模电容 C_{io} 宜不超过5 pF，如图5所示。



标引序号说明：

C_{io} ——隔离电源或驱动芯片的输入输出电容，单位为法（F）。

图5 驱动电路的共模回路

驱动电路应能适应SiC MOSFET器件开关过程的串扰，如图6所示。如有必要，可在驱动回路中引入米勒钳位或栅-源电容等抑制电路，但应在测试结果中记录具体电路和关键参数。

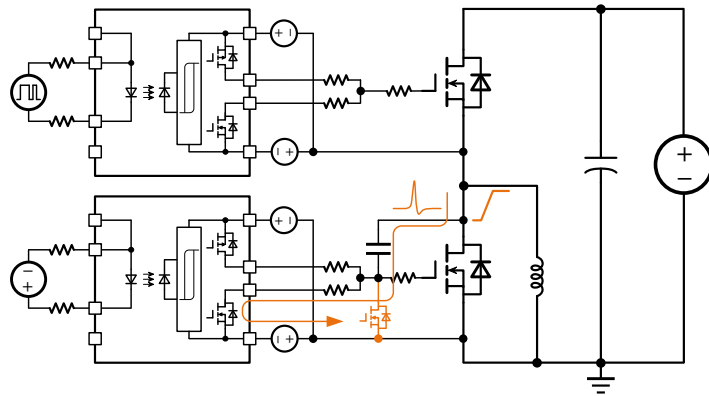


图6 驱动电路的串扰回路

5.2.6 温控平台

5.2.6.1 温控平台用于控制被测 SiC MOSFET 功率器件的工作温度，应具备闭环调节功能。温度调节分辨率应小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度均匀度宜小于 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.2.6.2 温控平台的温度调节范围应至少覆盖室温 $\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可选配低温功能，温度调节精度应优于 $\pm 2\%$ ，温度波动应小于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5.2.6.3 温控平台的加热板应该具有较好的平整度，被测器件与加热板的接触面应涂覆导热硅脂，以降低接触热阻并确保充分接触。

5.2.6.4 加热板与被测器件之间应施加适当压力，保证可靠接触，加热板应能承受相应压力。

5.2.6.5 在开关动态测试前，应对被测器件进行预热，应在器件结温与温控平台稳定温度一致后方可进行测试。。

5.2.6.6 温控平台应可靠接地，加热板的隔离电压应大于测试电压。若被测器件基板不绝缘，应在被测器件与加热板之间设置导热绝缘隔离层。

5.2.6.7 对于上、下桥臂独立的功率器件，应采用分离的温控平台或独立的散热结构，降低被测器件之间通过温控平台形成的耦合，提高开关动态测试的精度。

5.2.7 脉冲发生器

5.2.7.1 脉冲发生器应由信号发生器或其他微处理器电路构成，其输出脉冲宽度应可调，时间分辨率应小于 $0.1\text{ }\mu\text{s}$ ，最小脉冲宽度应不小于 $1\text{ }\mu\text{s}$ 。

5.2.7.2 脉冲发生器与驱动电路之间的接线应尽可能短。当连接长度不超过 10 cm 时，可采用双绞线；当长度超过 10 cm 时，应采用射频同轴电缆。采用射频同轴电缆连接时，脉冲发生器的输出阻抗应与同轴电缆及驱动电路输入端阻抗匹配。

5.3 其他事项

5.3.1 测试区域应符合 GB/T 37140—2018 中 5.2 条的环境要求，地面和设备周围应设置隔离与警示标志，必要时可配置声光报警。

5.3.2 测试电路的高压和高温部分应设置保护屏障，可采用绝缘箱或安全联锁等防护措施。必要时，测试区域应具备防爆能力，并符合 GB/T 3836 系列中相应要求。

5.3.3 测试系统应可靠接地，并满足 GB 4793.5—2008、GB/T 19212.17—2019 规定的绝缘和隔离要求。

5.3.4 测试过程中，操作人员不得触摸带电体或高温部件。在接触测试电路或元器件时，应确认直流母线电压已降至安全电压以下，高温部位温度已降至安全范围以内。

6 测试仪器与测试方法

6.1 测试仪器

6.1.1 测试系统

测试系统应由电压探头、电流探头、示波器（或数据采集卡）和上位机构成，如图7所示。电压探头用于测量被测器件的漏-源电压和栅-源电压；电流探头用于测量被测器件的漏极电流。示波器（或数据采集卡）用于采集电压和电流信号，上位机用于系统的运行控制和测试数据处理。

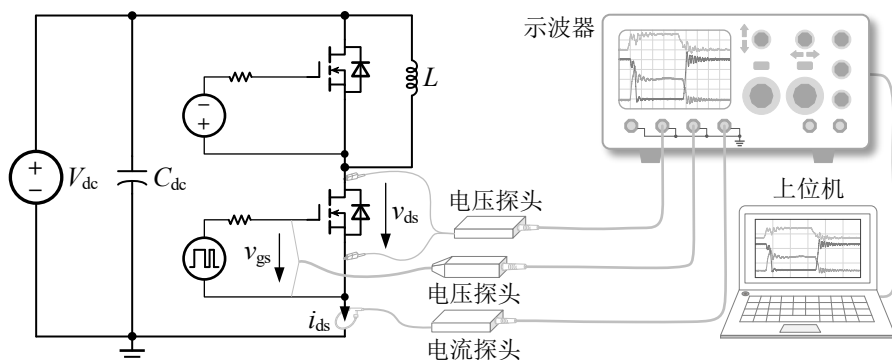


图7 测试系统构成

6.1.2 电压探头

6.1.2.1 电压探头可采用差分电压探头、光隔离电压探头、有源单端电压探头或无源高阻电压探头。在开关动态测试过程中，探头应符合 GB 4793.5—2008 规定的隔离和绝缘要求。宜优先采用隔离能力较高的光隔离电压探头。

6.1.2.2 电压探头的测试回路应尽可能短，宜采用 SMA、MCX 或 MMCX 等射频接口。对于差分电压探头等长回路结构，应采用并联平行布线或双绞线的方式，以降低共模干扰。

6.1.2.3 在漏-源电压测试中，电压探头的取样点应尽量靠近被测器件的漏极和源极，测试回路应不包括电流探头及其测试引线，尤其应避免同轴电阻引入的附加影响。

6.1.2.4 电压探头的带宽宜不小于 500 MHz（或响应时间不大于 0.7 ns），或大于被测信号观测频率的 5 倍，其最大平坦度带宽应不小于 100 MHz。

6.1.2.5 电压探头的量程应覆盖目标测试的电压范围，使用前应校零。其直流测量误差应不大于 $\pm 2\%$ 。

6.1.2.6 对于存在浮动电位的漏-源电压和栅-源电压测量，应采用具有高共模抑制能力的差分电压探头或光隔离电压探头，其 CMRR 宜不小于 80 dB@0 Hz、60 dB@100 MHz。

6.1.2.7 电压探头应不对测试对象产生明显的负荷效应，其输入电容应小于 5 pF，或不超过被测位置器件结电容的 10%。

6.1.2.8 电压探头的噪声宜小于 10 mVrms。

6.1.2.9 电压探头带宽、直流精度、CMRR、输入电容等关键指标的测试和校准，应符合 GB/T 15289—2013 的要求，宜采用网络分析仪测试电压探头的频域特性。

6.1.3 电流探头

6.1.3.1 电流探头可为同轴电阻、电流钳或罗氏线圈，应符合 GB 4793.5—2008 规定的隔离和绝缘要求。

6.1.3.2 为了降低干扰，电流探头应放置在被测器件电位较低侧，应不包含驱动回路电流。为了保证测量精度，被测电流应穿过探头的中心。宜优先采用隔离能力强的光隔离电流探头。

6.1.3.3 电流探头的带宽宜不小于 200 MHz（或响应时间不超过 1.75 ns），或大于被测信号观测频率的 5 倍，直流测量误差应不大于 $\pm 2\%$ 。

6.1.3.4 电流探头应不引入过大的寄生电感，探头及测试引线的寄生电感应小于 5 nH，或小于功率回路寄生电感的 10%。

6.1.3.5 电流探头的量程应覆盖目标测试的电流范围，使用前应校零。测试过程中，应避免电流探头饱和。对于同轴电阻，测试电流产生的损耗应小于其最大能承受的脉冲能量。

6.1.3.6 电流探头的噪声应小于 0.1 mArms，灵敏度应小于 10 mA/div。

6.1.3.7 电流探头带宽、直流精度、噪声等关键指标的测试和校准，应符合 GB/T 15289—2013 的要求，宜采用网络分析仪测试电流探头的频域特性。

6.1.4 示波器

6.1.4.1 示波器的带宽宜不小于 500 MHz（或响应时间应不超过 0.7 ns），测量通道数量应不少于 4 路。

6.1.4.2 示波器的垂直分辨率应不小于 10 位，测试过程中应使波形占满栅格。

6.1.4.3 示波器的本底噪声应小于 1 mVrms（1 V/div、50 Ω 输入）。

6.1.4.4 示波器的采样率应不小于 5 GS/s，单通道存储深度应不小于 10 Mpts。

6.1.4.5 探头与示波器输入通道之间应保持阻抗匹配。

6.1.4.6 若无特别规定，示波器应可靠接地，宜不采用浮地测试。

6.1.4.7 示波器带宽、噪声等关键指标的测试和校准，应符合 GB/T 15289—2013 的要求。

6.1.5 同轴电缆

6.1.5.1 采用同轴电缆连接时，应尽可能缩短同轴电缆的长度，宜采用外径较大的同轴电缆。

6.1.5.2 采用取样电阻较小的同轴电阻等探头时，为避免干扰，应采用双层屏蔽的同轴电缆。

6.1.5.3 采用需外接同轴电缆的探头时，探头、同轴电缆与示波器三者之间应保持阻抗匹配。

6.2 测试方法

开关动态的关键测试方法如下：

- a) 探头校准。开关动态测试前，探头应校零，部分探头需预热。应校核探头和示波器的带宽与精度，并应采用延迟校正夹具，校正各测试通道的延迟时间，各通道同步误差应小于 0.2 ns。
- b) 电路接线。探头与被测器件之间应采用开尔文连接。电压测量中，电压探头的测试点应连接至被测器件的开尔文漏极和开尔文源极；电流测量中，电流探头的测试点应连接至同轴电阻的开尔文连接端。
- c) 可靠接地。测试电路和测试仪器应设置可靠接地，宜采用单点接地方式，以保证充分的电气隔离并抑制共模干扰。
- d) 驱动校核。首先为测试仪器、脉冲发生器、驱动电路等低压系统供电，控制脉冲发生器输出脉冲信号，确认驱动信号是否正常。高压系统安全上电之后方可开展开关动态测试。
- e) 数据处理。可采用数字滤波等预处理方法，以降低噪声干扰。测试数据应记录至小数点后两位。
- f) 重复测试。同一个被测器件应在相同条件下重复测试多次，取平均值作为最终测试结果。重复测试之间应保持足够的时间间隔，多次测试的偏差应不大于 $\pm 5\%$ 。

7 测试结果与计量方法

7.1 开关时间

7.1.1 双脉冲测试中，第一个脉冲结束的时刻作为关断过程的观测位置，第二个脉冲开始的时刻作为

开通过程的观测位置。

7.1.2 如图 8 所示, 脉冲时间 t_{pon} 定义为器件栅 - 源极电压上升沿 50 % 到下降沿 50 % 的时间间隔。

7.1.3 对于开通过程, 如图 8 所示, 开通延迟时间 $t_{\text{d(on)}}$ 定义为: 开通过程中, 器件栅 - 源极电压上升至 10 % 到器件漏 - 源极电流 i_{ds} 上升至 10 % 的时间间隔。上升时间 t_{r} 定义为: 器件漏 - 源极电流从 10 % 上升至 90 % 的时间间隔。开通时间 t_{on} 为开通延迟时间与上升时间之和。

7.1.4 对于关断过程, 如图 8 所示, 关断延迟时间 $t_{\text{d(off)}}$ 定义为: 关断过程中, 器件栅 - 源极电压下降至 90 % 到器件漏 - 源极电流下降至 90 % 的时间间隔。下降时间 t_{f} 定义为器件漏 - 源极电流从 90 % 下降至 10 % 的时间间隔。关断时间 t_{off} 定义为关断延迟时间与下降时间之和。

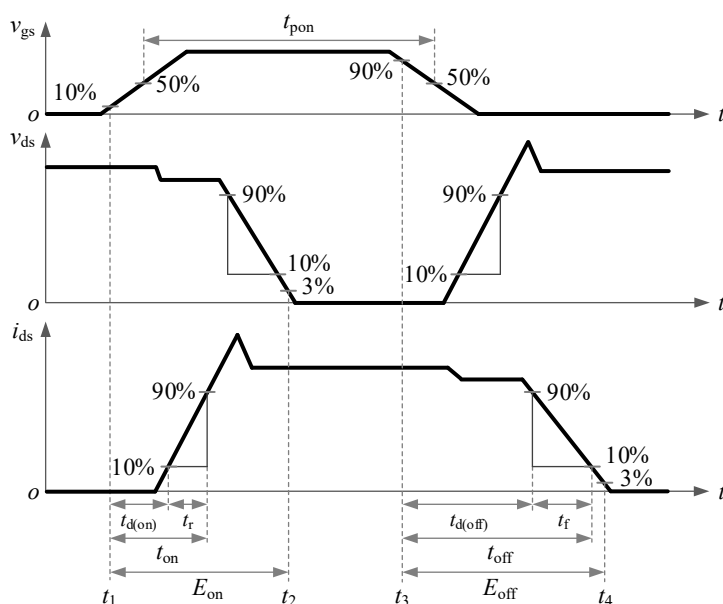


图8 SiC MOSFET 的开关过程

7.1.5 对于反向恢复过程, 如图 9 所示, 反向恢复时间 t_{rr} 定义为: 反向恢复过程中, 器件源 - 漏极电流从 0 经反向恢复电流峰值 I_{rr} 再下降至 10 % 的时间间隔。反向恢复电荷 Q_{rr} 定义为: 反向恢复过程中, 源 - 漏极电流 i_{sd} 的积分值, 积分区间与 t_{rr} 定义相同, 即 $Q_{\text{rr}} = \int_{t_5}^{t_7} i_{\text{sd}} dt$ 。

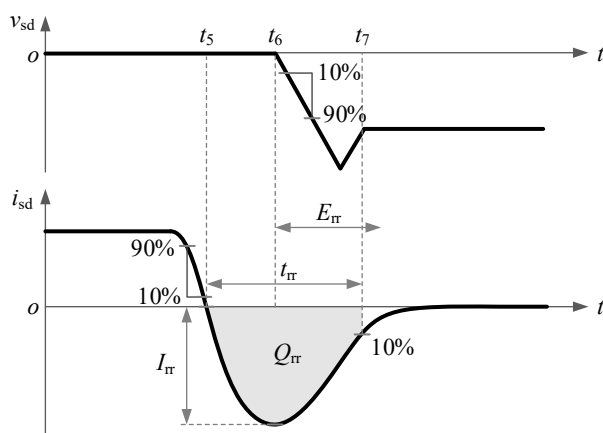


图9 SiC MOSFET 的反向恢复过程

7.2 开关损耗

7.2.1 对于开通损耗, 如图 8 所示, 定义为: 开通过程中, 漏 - 源极电压 v_{ds} 与漏 - 源极电流 i_{ds} 乘积的

积分值，积分区间为器件栅 - 源极电压上升至10 %到器件漏 - 源极电压下降至3 %，即 $E_{\text{on}} = \int_{t_1}^{t_2} v_{\text{ds}} i_{\text{ds}} dt$ 。

关断损耗定义为：关断过程中，漏 - 源极电压 v_{ds} 与漏 - 源极电流 i_{ds} 乘积的积分值，积分区间为器件栅 - 源极电压下降至90 %到器件漏 - 源极电流下降至3 %，即 $E_{\text{off}} = \int_{t_3}^{t_4} v_{\text{ds}} i_{\text{ds}} dt$ 。

7.2.2 对于反向恢复损耗，如图9所示，定义为：反向恢复过程中，源 - 漏极电压 v_{sd} 与源 - 漏极电流 i_{sd} 乘积的积分值，积分区间为器件源 - 漏极电压从0开始下降至器件源 - 漏极电流下降至10 %，即 $E_{\text{rr}} = \int_{t_6}^{t_7} v_{\text{sd}} i_{\text{sd}} dt$ 。

7.3 开关速度

7.3.1 如图8和图9所示，电压变化率 dv/dt 定义为：器件开关过程中，漏 - 源极（或源 - 漏极）电压从10 %上升至90 %，或从90 %下降至10 %区间，漏 - 源极（或源 - 漏极）电压的变化速率。

7.3.2 如图8和图9所示，电流变化率 di/dt 定义为：器件开关过程中，漏 - 源极（或源 - 漏极）电流从10 %上升至90 %，或从90 %下降至10 %区间，漏 - 源极（或源 - 漏极）电流的变化速率。

7.3.3 在给出开通时间、开通损耗测试结果时，应注明对应的 di/dt 。在给出关断时间、关断损耗测试结果时，应注明对应的 dv/dt 。在给出反向恢复时间、反向恢复损耗测试结果时，应注明对应的 di/dt 。

7.3.4 对于开关振荡处的电压、电流变化率定义，参考 JEP 190—2022 执行。

附 录 A

(资料性)

SiC MOSFET 功率器件开关动态测试记录表

SiC MOSFET功率器件开关动态测试记录表如表A.1。

表A.1 开关动态测试记录表示例

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						样品 数量							
测试电路		<div><input type="checkbox"/>二极管续流 <input type="checkbox"/>体二极管续流 <input type="checkbox"/>MOSFET 续流（死区时间_____）</div> <div>其他_____</div>											
测试条件		第一个脉冲测试时间：			脉冲间隔时间：			第二个脉冲测试时间：					
		功率回路寄生电感（nH）：					负荷电感寄生电容（pF）：						
		驱动正压（V）：					驱动负压（V）：						
		直流母线电压设定值（V）：					负荷电流设定值（A）：						
		开启/关断切换速度（V/ns）：					关断/开启切换速度（V/ns）：						
样品编号		测试结果											
		开通过程				关断过程				反向恢复过程			
		t_{don}	t_r	t_{on}	E_{on}	t_{doff}	t_f	t_{off}	E_{off}	t_{rr}	I_{rr}	Q_{rr}	E_{rec}
1													
2													
3													
...													

参 考 文 献

- [1] IEC 60747-1-1983 Semiconductor devices - Discrete devices - Part 1: General
 - [2] IEC 60747-2-2000 Semiconductor devices: Discrete devices and integrated circuits, Part 2: Rectifier diodes
 - [3] IEC 60747-8-2010 Semiconductor devices - Discrete devices - Part 8: Field-effect transistors
 - [4] IEC 60747-9-2010 Semiconductor devices - Part 9: Discrete devices - Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)
 - [5] JEP 190-2022 Guideline for Evaluating dv/dt Robustness of Sic Power Devices
 - [6] Sun Peng, Zou Mingrui, Wang Yulei, Gong Jiakun, Liang Yuxi, Niu Fuli, Jiang Ke, Gao Wei, Zeng Zheng. Focuses and concerns of dynamic test for wide bandgap device: A questionnaire-based survey[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(12): 15522-15534.
 - [7] 曾正, 王宇雷, 龚佳坤. 宽禁带功率器件的开关动态测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2025.
-

