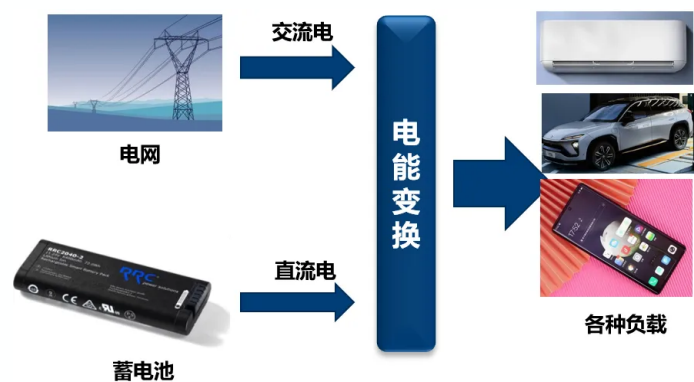
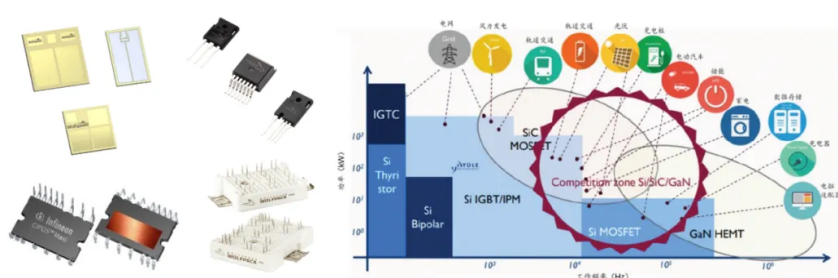




电力电子技术以功率器件为基础，通过对电能进行高效变换与精确控制，实现电压、电流、频率等电参量在不同形式之间的转换。典型变换形式包括 AC-DC（整流）、DC-DC（斩波）、DC-AC（逆变）以及 AC-AC（变频/调压）等。



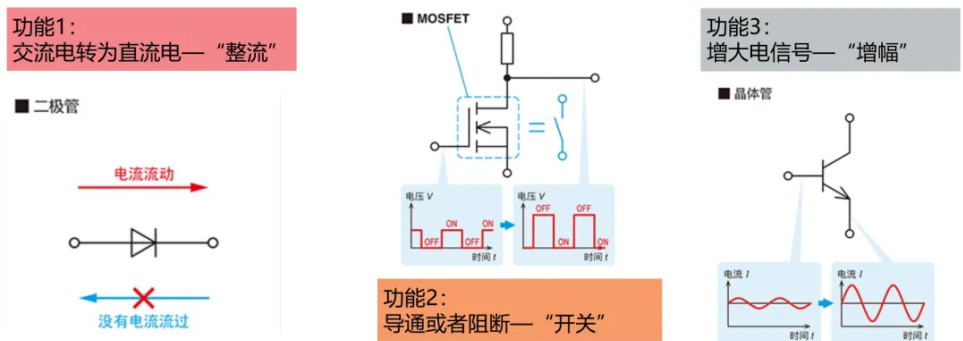
功率器件（又称功率半导体器件或电力电子器件）作为电力电子设备中的核心元器件，其承担整流、逆变、开关、保护及能量调节等关键任务。无论是在消费电子电源、工业自动化、电机驱动，还是在新能源汽车、光伏逆变、储能系统和充电基础设施中，功率器件都发挥着基础而关键的作用，其性能优劣将直接影响整机系统的转换效率、热设计难度、功率密度、寿命和运行安全性。



功率器件封装类型和应用领域

功率器件的核心原理，是通过微小控制信号，利用PN结或场效应机制，实现对高电压、大电流的高效开关与电能变化。从功能角度看，功率器件本质上是一种电力开关，通常工作在关断或开通两种状态，以实现对电压、电流、频率及相位等电参量的调控。

在实际应用中，单个器件往往无法独立完成复杂的能量变换功能，通常需要按照特定电路拓扑进行组合，例如半桥、全桥、三相桥、PFC、LLC、Buck、Boost 等结构，以满足不同场景下的系统需求。



功率器件功能示意图

1.功率器件分类

根据半导体材料、制造工艺、工作机理以及开通和关断控制方式等的不同，功率器件通常可分为以下几类：

01 不可控型器件：

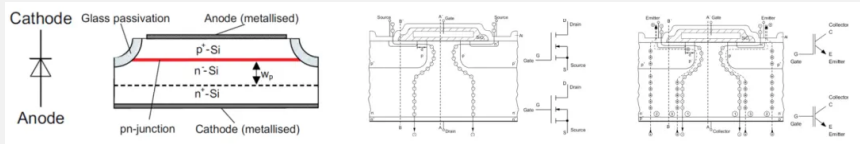
此类器件本身不具备主动控制关断能力，典型代表为各类功率二极管，包括：大功率二极管、快恢复二极管、肖特基二极管等；

02 半控型器件：

此类器件可通过控制信号实现开通，但关断过程通常依赖外部电路条件。典型器件包括：单向晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管等；

03 全控型器件：

此类器件能够实现主动开通与主动关断，是现代电力电子系统中最常见的一类器件，典型代表包括：MOSFET、IGBT、GTR、GTO、IGCT等。



功率二极管、功率MOSFET、IGBT符号及结构示意图

2.功率器件封装形式

封装不仅影响器件的机械结构和安装方式，也直接影响其寄生参数、热阻、绝缘性能、电流承载能力及可靠性。根据集成程度和应用形态的不同，功率器件通常可分为以下三种封装形式：

01 分立器件：

分立器件以单颗功率芯片为核心，用于实现基本的功率开关、整流或保护功能。其结构相对简单，对外引脚较少，常见引脚形式如G/D/S或A/K。常见封装包括TO-220、TO-247、IPAK、DPAK、DFN和TOLL等。

分立器件通常适用于中低功率、结构灵活、设计自由度较高的应用场景，如开关电源、适配器、车载电源辅助电路及工业控制单元等。

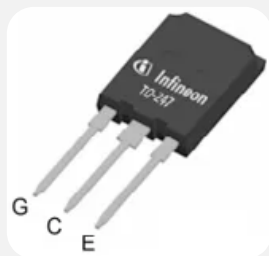
02 功率模块：

功率模块通过将多颗功率芯片及其必要的互连结构、绝缘结构和散热结构集成在同一封装内部，构成功能完整的功率单元。常见模块形式包括半桥模块、全桥模块、三相桥模块、整流桥模块及PFC模块等。

模块化设计能够有效提升功率密度、热管理能力和系统集成度，适用于大功率、高可靠性场景，如新能源汽车主驱、电机控制、光伏逆变、储能变流器和工业驱动系统。常见形式包括焊接式模块、平板压接式模块和内压接式模块等。

03 功率IC

功率IC是将部分或全部功率器件，以及控制、驱动、保护和检测电路集成于同一芯片或封装中的器件。其特点是集成度高、外围电路简化、设计效率高，适用于电源管理、负载开关和中小功率控制应用。



分立器件



功率模块



功率IC

1. 测试简介

在功率器件的设计、制造和封装过程中，材料缺陷、结构偏差、工艺波动及封装应力等因素均可能对器件性能产生影响。为了识别潜在缺陷、筛除不良产品、验证设计目标并实现产品分档，必须进行系统化测试。

功率器件测试通常覆盖以下几个维度：电气性能测试、可靠性测试、物理外观与结构检查。其中，电气性能测试是器件研发验证、生产测试和应用评估中最核心的部分，通常可分为直流（静态）参数测试和交流（动态）参数测试。

2. 常用测试标准

功率器件测试通常参考国际与行业标准，常见标准包括：

IEC 60747系列：如60747-8（MOSFET）、IEC60747-9（IGBT）等；

JEDEC系列：如JEP173、JEP182（GaN HEMT）及JEP183A、JEP192、JEP201（SiC MOSFET）等；

GB/T 4586（MOSFET）、GB/T 29332（IGBT）、MIL-STD-750D等。

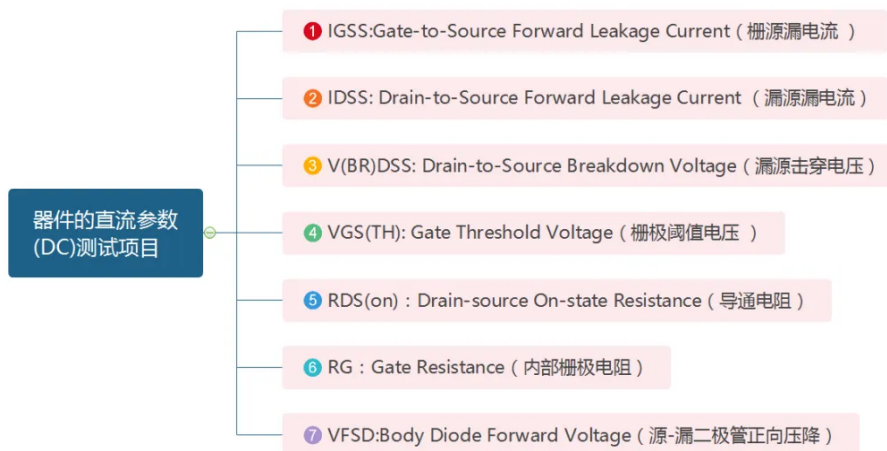


功率器件测试参考标准

以下测试项目以功率MOSFET为例，通过功率MOSFET测试项目可以比较典型地理解功率器件的电性能测试原理。

3. 直流（静态）参数测试

典型的MOSFET器件静态参数测试项目包括：IGSS（栅源极漏电流）、IDSS（漏源极漏电流）、V(BR)DSS（漏源极击穿电压）、VGS(th)（栅极阈值电压）、RDS(on)（导通电阻）、RG（内部栅极电阻）、VFSD（体二极管正向压降）等。这些参数主要反映器件在稳态工作条件下的阻断能力、导通能力和工艺一致性。



MOSFET静态参数测试项目

01 IGSS-栅源极漏电流测试

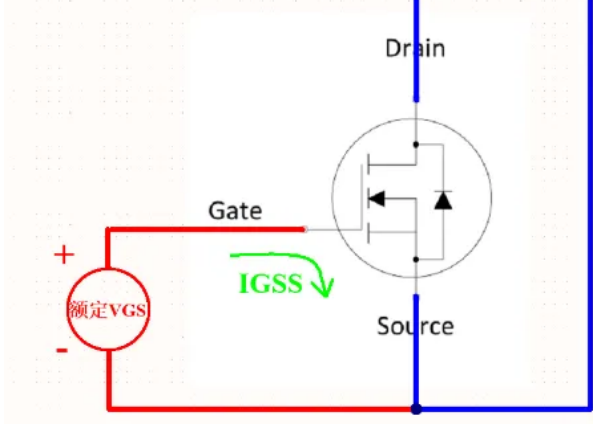
Gate-source leakage current	I_{GSS}	$V_{GS}=20V, V_{DS}=0V$	-	-	100	nA
-----------------------------	-----------	-------------------------	---	---	-----	----

定义：

器件关断时，在规定VGS电压下，栅极G与源极S之间的漏电流。

测试方法：

将MOS管漏极D与源极S短接，使VDS=0，在G、S之间施加额定正向电压VGS，测量栅极漏电流IGSS，通常为nA级。



测试目的：

- ① 评估栅极氧化层的完整性与潜在缺陷情况；
- ② 检测器件ESD/过压应力可靠性。

02 IDSS-漏源极漏电流测试

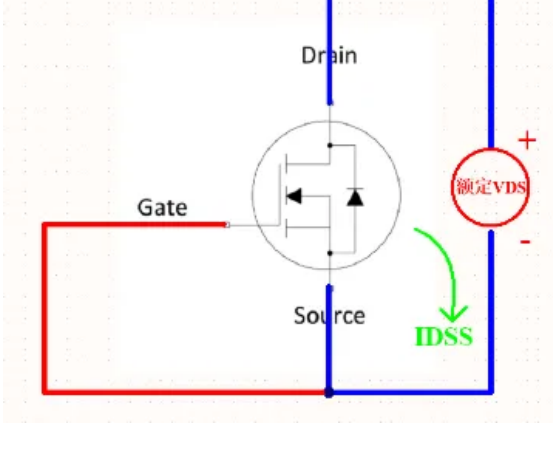
Zero gate voltage drain current	I_{DSS}	$V_{DS}=100V, V_{GS}=0V$	-	0.1	1	μA
		$V_{DS}=100V, V_{GS}=0V, T_J=125^{\circ}C^2)$	-	10	100	

定义：

器件关断时，在规定VDS电压下，漏极D与源极S之间的漏电流。

测试方法：

将栅极G与源极S短接，使VGS=0，在D、S之间施加额定正电压VDS，测量漏极漏电流IDSS，该参数通常为μA级，并具有正温度系数。



测试目的：

- ①评估关断损耗和待机功耗；
- ②检测PN结漏电与表面漏电缺陷；
- ③用于高温条件下的可靠性筛查。

03 V(BR)DSS-漏源极击穿电压测试

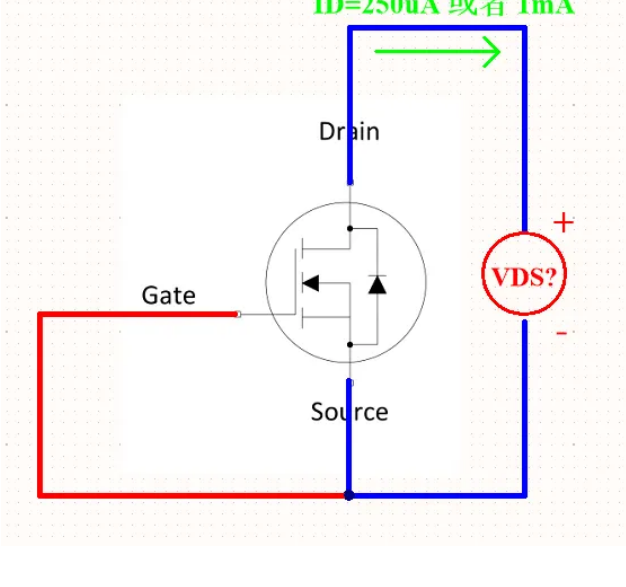
Drain-source breakdown voltage	$V_{(BR)DSS}$	$V_{GS}=0V, I_D=1mA$	100	-	-	V
--------------------------------	---------------	----------------------	-----	---	---	---

定义：

在特定温度下，当G、S短接且流过漏极的电流ID达到规定值时，对应的漏源电压，亦称雪崩击穿电压。

测试方法：

将G、S短接，缓慢升高VDS，当漏极电流ID增加到规定值（如250uA或1mA）时，DS间对应的电压即为V(BR)DSS，该参数通常具有正温度系数。



测试目的：

- ①验证器件耐压能力以及工艺和边缘终端质量；
- ②筛除早期击穿和边缘缺陷器件；
- ③为系统浪涌裕量设计提供依据。

04 VGS(th)-栅极阈值电压测试

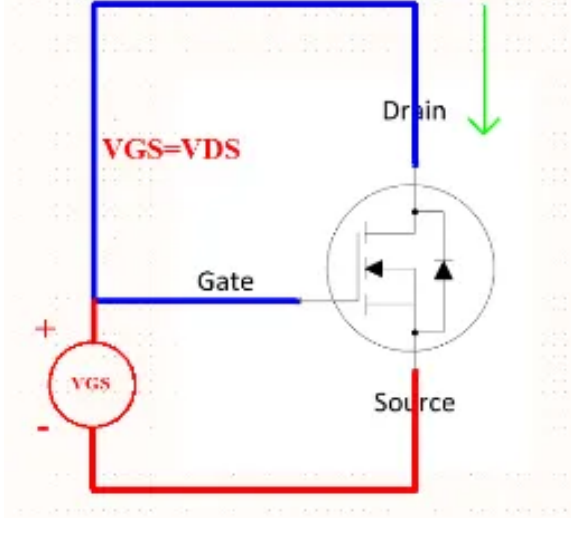
Gate threshold voltage	$V_{GS(th)}$	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=120\mu A$	2.0	2.7	3.5	
------------------------	--------------	-------------------------------	-----	-----	-----	--

定义：

在规定VDS条件下，当漏极电流达到规定小电流值时，对应的栅源电压VGS。

测试方法：

将G、D短接，在G、S之间施加电压。当漏极电流ID达到规定数值时，对应的G、S间电压即为阈值电压VGS(th)，该参数通常具有负温度系数。



测试目的：

- ①检测沟道开启特性；
- ②用于工艺监控与参数分档；
- ③评估器件抗噪声能力。

05 RDS(ON)-导通电阻测试：

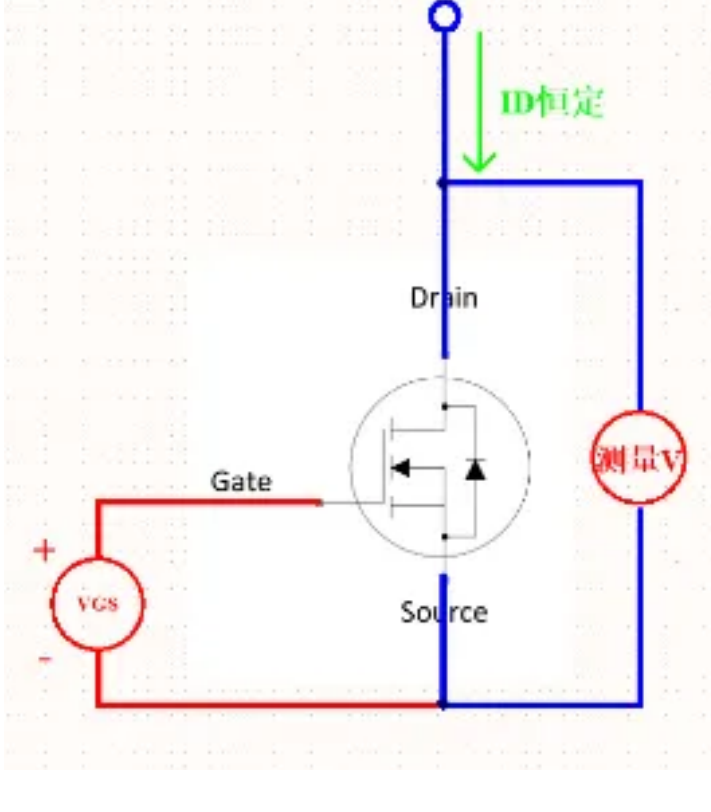
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS}=10V, I_D=100A$	-	4.5	5.3	mΩ
		$V_{GS}=10V, I_D=100A, SMD\ version$	-	4.2	5.0	

定义：

在规定VGS、ID和温度条件下，MOSFET导通时的等效电阻，通常具有正温度系数。

测试方法：

- ①在G、S之间施加电压VGS，确保器件完全导通；
- ②在D、S间施加恒定电流ID；
- ③测量D、S间导通压降VDS；
- ④根据欧姆定律公式 $R_{DS(ON)}=V_{DS}/I_D$ ，计算导通电阻。



测试目的：

- ①评估导通损耗、效率与发热；
- ②对器件进行一致性筛选。

06 VFSD-体二极管正向压降测试

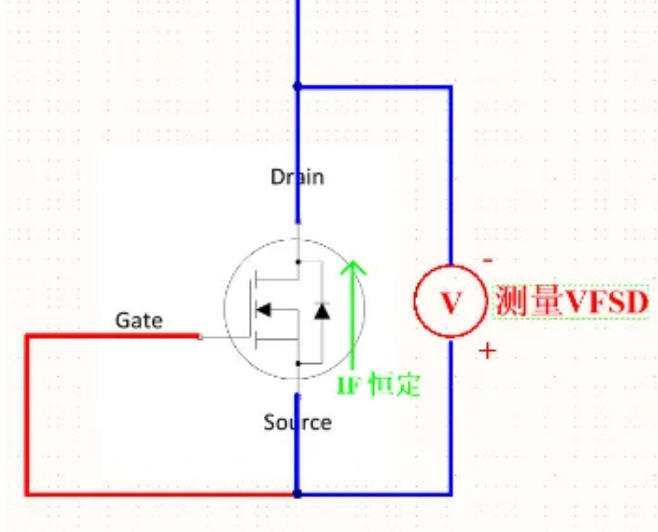
Diode forward voltage	V_{SD}	$V_{GS}=0V, I_F=100A, T_J=25^{\circ}C$	-	1.0	1.3	V
-----------------------	----------	--	---	-----	-----	---

定义：

MOSFET内部寄生体二极管导通时，在规定电流IF下的正向压降。

测试方法：

- ①将G、S短接；
- ②在D、S之间施加额定反相电流IF，使体二极管正向导通；
- ③测量S、D之间电压，即寄生二极管的正向导通压降VSD。

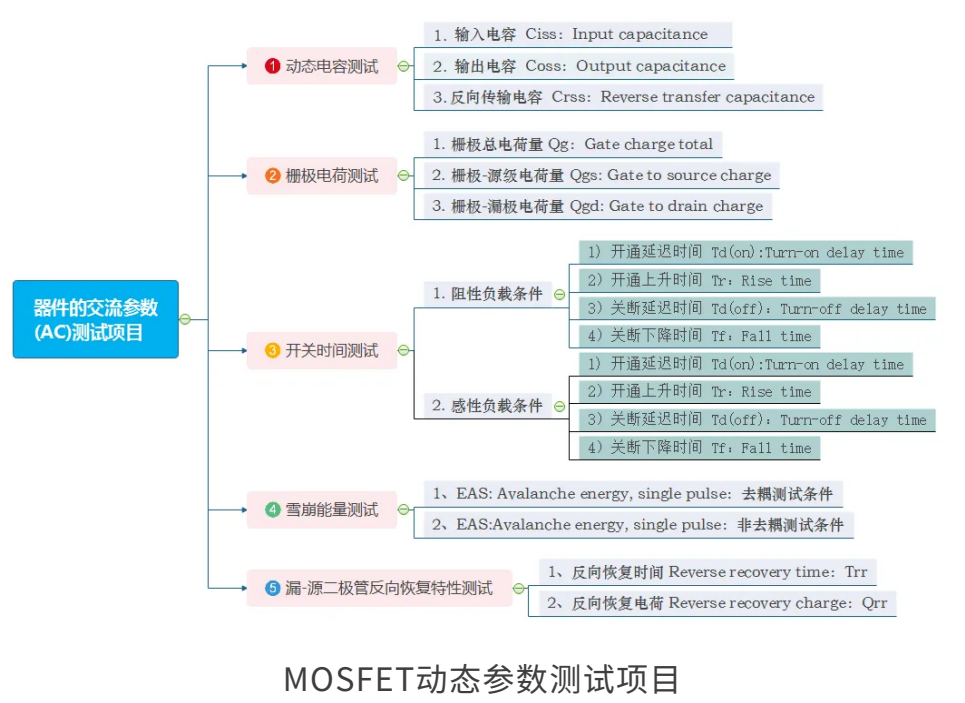


测试目的：

- ①评估二极管损耗与发热情况；
- ②比较不同器件在反向导通场景下的效率表现

4. 交流（动态）参数测试

相较于静态参数，动态参数更能反映器件在实际电源、电机驱动和变换器应用中的行为特征。MOSFET动态参数测试项目包括：动态电容测试、栅极电荷测试、开关时间测试、雪崩能量测试、二极管反向恢复特性测试等。



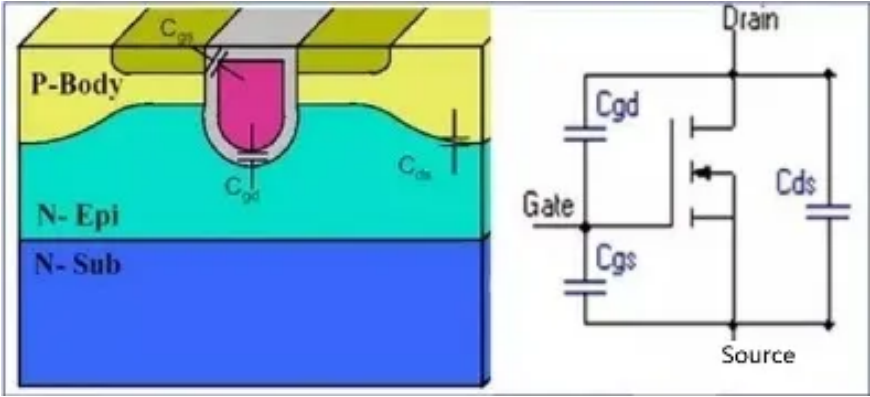
MOSFET动态参数测试项目

01 动态（寄生）电容测试：

Input capacitance	C_{iss}	$V_{GS}=0V, V_{DS}=25V, f=1MHz$	-	5030	6540	pF
Output capacitance	C_{oss}		-	1600	2080	
Reverse transfer capacitance	C_{rss}		-	100	200	

定义：

MOSFET内部主要包含三个寄生电容：



- ①栅源电容Cgs；
- ②栅漏电容Cgd，也称反向传输电容或米勒电容；
- ③漏源电容Cds。

动态电容测试通常包括：

- ①输入电容：Ciss=Cgs+Cgd；
- ②输出电容：Coss=Cds+Cgd；
- ③反向传输电容：Crss=Cgd。

测试方法：（以Ciss为例）

- ①在VGS=0，VDS=BVDS/2，f=1MHz条件下。使用LCR电桥或半导体参数分析仪，在漏源极之间施加直流偏置电压（从0V扫描到额定电压），并叠加1MHz小信号交流激励。
- ②测量G、S两端交流电压V和电流I，根据阻抗关系Z=V/I计算G、S间阻抗，并据此得到输入电容Ciss的容抗特性。

02 栅极电荷测试：

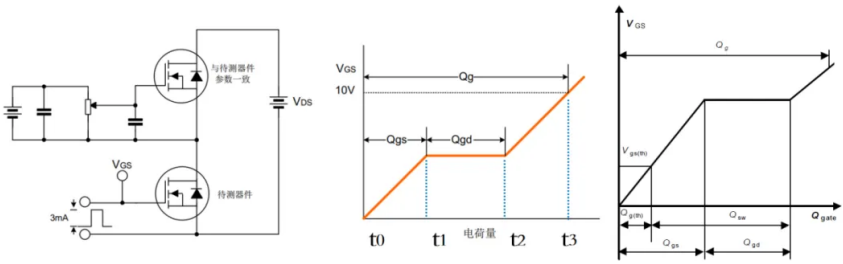
Gate to source charge	Q_{gs}	$V_{DD}=80V, I_D=120A,$ $V_{GS}=0 \text{ to } 10V$	-	24	31	nC
Gate to drain charge	Q_{gd}		-	14	28	
Gate charge total	Q_g		-	70	91	

定义：

在规定的VDS、ID条件下，VGS从0V充电至规定电压所需的栅极电荷，包括栅极总电荷Qg、栅漏电荷Qgd和栅源电荷Qgs。

测试方法：（以Ciss为例）

- ①将VDS和ID设置为规定值；
- ②使用恒流源Ig对DUT栅极进行充电；
- ③测量VGS波形随时间的变化；
- ④根据公式 $Q_g = \int I_g \cdot dt$ 得到 Qg-VGS 曲线，并提取 Qgs、Qgd，其中米勒平台对应 Qgd。



03 单脉冲雪崩能量(EAS)测试：

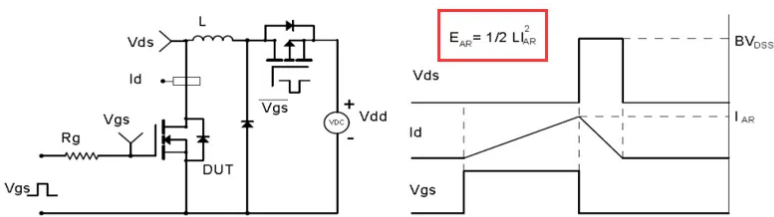
Avalanche energy, single pulse ²⁾	E_{AS}	$I_D=60A$	330	mJ
--	----------	-----------	-----	----

定义：

用于描述功率MOSFET在雪崩击穿状态下承受负载能量的能力。EAS表示单次雪崩状态下器件能够吸收的最大能量。

测试方法：（以Ciss为例）

- ①使待测MOSFET和另一只器件同时导通，电源电压Vdd加在电感上，电流线性上升；
- ②经导通时间tp后，电感电流达到最大值；
- ③随后两只器件同时关断，由于电感电流不能突变，电流在切换瞬间维持原方向和大小；
- ④此时续流通路建立，电感能量转移至待测MOSFET；
- ⑤分别测量Vds和Id波形，并计算雪崩能量；
- ⑥若器件未损坏，则说明其EAS能力满足要求。



04 开关时间测试：

Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$V_{DD}=50V, V_{GS}=10V,$ $I_D=120A, R_G=3.5\Omega$	-	15	-	ns
Rise time	t_r		-	10	-	
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	30	-	
Fall time	t_f		-	35	-	

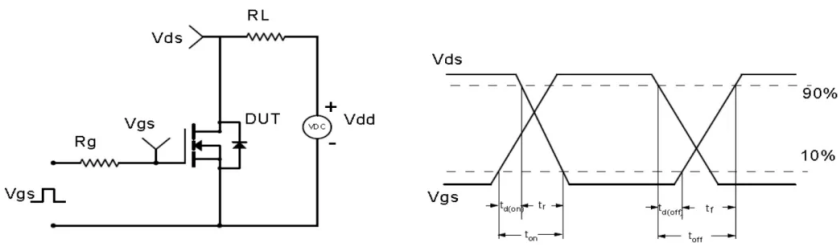
定义：

用于模拟器件在实际应用中的工作条件，测试其动态开关过程中的关键参数，包括：

- ①开通延迟时间 $t_{d(on)}$ ： 导通条件下，从 V_{GS} 上升到规定值的10%到 V_{DS} 下降到规定值的90%的时间间隔；
- ②上升时间 t_r ： 从 V_{DS} 规定值的90%下降到10%的时间间隔；
- ③关断延时时间 $t_{d(off)}$ ： 关断条件下，从 V_{GS} 下降到规定值90%到 V_{DS} 上升到规定值的10%的时间间隔；
- ④下降时间 t_f ： 从 V_{DS} 规定值的10%上升到90%的时间间隔。

测试方法1：阻性负载

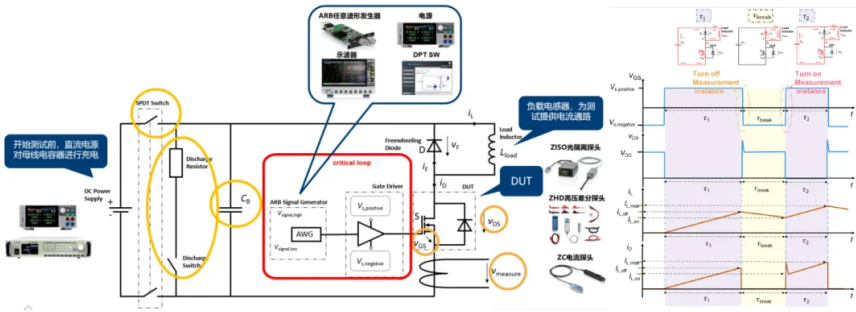
采用纯电阻负载 R_L 。器件开通时，电流从0线性上升至最大值，同时 V_{ds} 电压由最大值下降至0；关断时过程相反。



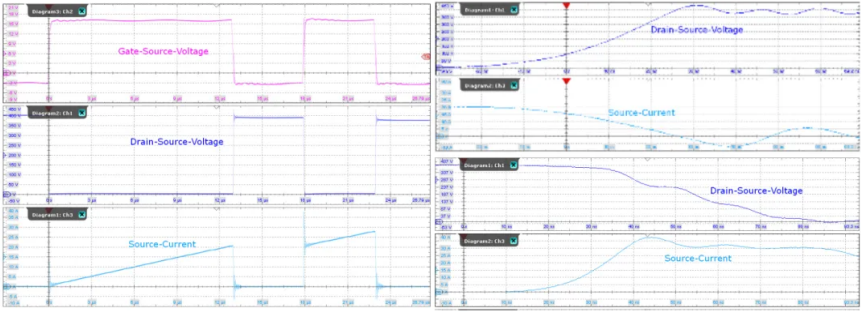
测试方法2：感性负载

在实际应用中，负载大多具有感性特征，如电源系统和电机控制中的逆变器功率单元等。因此，感性负载条件下通常采用双脉冲测试方法。双脉冲测试可在不同换流时刻测量不同参数：

- ① 第一次关断时刻：测量关断特性参数，如 $t_{d(off)}$, t_f , t_{off} , E_{off} 等；
- ② 第二次开通时刻：测量开通特性参数，如 $t_{d(on)}$, t_r , t_{on} , E_{on} 等。



双脉冲测试环境及测试过程示意图



双脉冲实测波形图

05 反向恢复特性测试：

Reverse recovery time ²⁾	t_{rr}	$V_R=50V, I_F=50A, di_F/dt=100A/\mu s$	-	65	-	ns
Reverse recovery charge ²⁾	Q_{rr}		-	130	-	nC

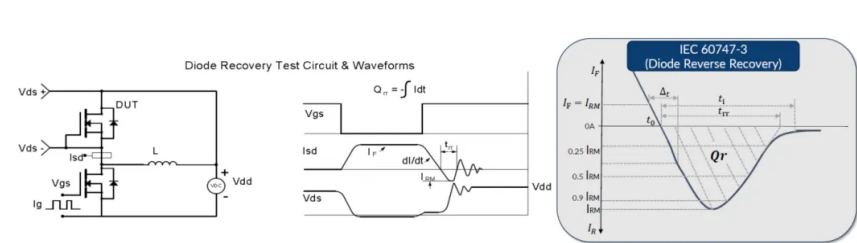
定义：

用于表征寄生体二极管从正向导通转为反向阻断时的动态参数，主要包括反向恢复时间Trr和反向恢复电荷Qrr。

测试方法：

同样采用感性负载下的双脉冲测试法，具体测试步骤如下：

- ①在双脉冲第二次开通时进行测量；
- ②先使寄生体二极管导通（死区/续流状态）；
- ③再驱动半桥中的另一只器件导通，使二极管进入反向恢复过程；
- ④测量体二极管电流波形，根据标准定义提取反向恢复时间Trr，并通过积分得到反向恢复电荷Qrr。



反向恢复测试过程示意图及参考标准

5. 测试设备

功率器件静态参数测试通常采用半导体参数分析仪、静态参数测试系统和源表（SMU）等设备。这类仪器能够提供高精度电压、电流源输出及测量能力，适用于器件静态电参数的表征、评估与筛选，如漏电流、击穿电压、阈值电压和导通电阻等测试。



半导体参数分析仪



功率器件静态参数测试系统



源表SMU

功率器件动态参数测试通常采用双脉冲（DPT）测试平台。该平台一般由示波器、电压探头、电流探头、高压母线电源、脉冲发生器、直流母线、电感负载、栅极驱动器及其驱动电源、温控装置和测试夹具等组成。根据应用需求，测试平台既可采用模块化方式自主搭建，也可直接选用集成化的成套双脉冲测试系统，以提高测试效率、系统一致性及操作安全性。对于动态电容参数测试，通常可采用 LCR 表或半导体参数分析仪进行测量。



Base frame:

- Base cabinet
- Sliding hood
- Worktop
- Safety Circuit

+ Additional Equipment

- Contacting Unit
- Temperature Unit
- DC Link
- Optimized Test Fixtures
- Flexible Driver
- Different Load Inductors
- High-Performance Measurement Equipment
- Laboratory Source
- High Voltage Source
- ThermoStream
- Automatization Software
- Training / Service

双脉冲测试系统及其组成

在双脉冲测试平台的仪器配置方面，示波器作为动态波形采集与分析的核心设备，其性能直接关系到测试结果的准确性与完整性。推荐选用 R&S MXO3、MXO4、MXO5/5C系列示波器。其在 HD模式下可提供最高18位垂直分辨率，并具备最高450万波形/秒的波形捕获率及大容量存储深度，能够满足功率器件动态测试对高分辨率、高动态范围及高速瞬态捕获的严格要求。其中，MXO3与MXO5/5C系列可配置8个模拟输入通道，支持对半桥拓扑上下桥臂多个关键节点进行同步测量，适用于双脉冲测试中对栅极驱动、电压应力、电流变化及开关过程的多通道联合分析。

在高压电压测量方面，推荐采用 RT-ZHD 系列高压差分探头。该系列探头具备较高的动态范围（最高6000V）和带宽（最大200MHz）性能，可满足传统硅基功率器件在高压浮地条件下的电压测量需求，同时还具有最高±2000V的偏置能力，适用于器件开关过程中的母线电压波动、纹波及噪声分析。

对于GaN、SiC等宽禁带功率器件，由于其具有更高的开关速度和更大的dv/dt，应优先选用RT-ZISO光隔离探头。该类探头具备优异的高频测量能力（带宽最高1GHz）和CMRR共模抑制性能（90dB@1GHz），更适合快上升沿、高开关频率场景下的精确电压测量，有助于提升宽禁带器件动态测试的抗干扰能力与结果可信度。

在电流测量方面，可选用RT-ZC系列钳式电流探头或CWT系列罗氏线圈电流探头。RT-ZC系列适用于常规功率器件动态电流测试，能够覆盖大多数实验室双脉冲测试应用需求。对于更大电流量程或安装空间受限的测试场景，CWT系列罗氏线圈具有更好的适应性，其结构灵活、对被测回路影响较小，适合用于大电流、高di/dt条件下的动态电流测量。



R&S电力电子设计与测试的示波器组合（MXO3、MXO4、MXO5/5C）



RT-ZHD系列高压差分探头



RT-ZISO光隔离探头



RT-ZC系列钳式电流探头



CWT罗氏线圈电流探头



总结



功率器件作为电力电子系统中的核心基础元器件，是决定系统效率、可靠性和功率密度的关键因素。随着应用场景不断向高压、高频、高效率和高可靠性方向发展，对功率器件测试的深度、精度和系统性提出了更高要求。

以功率MOSFET为代表的器件电性能测试，既包括对漏电流、击穿电压、阈值电压和导通电阻等静态参数的评估，也包括对寄生电容、栅极电荷、开关时间、雪崩能量和反向恢复特性的动态分析。特别是双脉冲测试，因其更贴近实际感性负载工况，已成为功率器件动态性能评估中最具代表性的测试方法之一。

未来，随着Si、SiC、GaN等不同材料体系功率器件的持续发展，测试技术也将进一步向高带宽、高隔离、高精度、自动化和标准化方向演进，从而更好地支撑下一代高性能电力电子系统的设计与落地。



END

R&S中文资料库



罗德与施瓦茨业务涵盖测试测量、技术系统、网络与网络安全，致力于打造一个更加安全、互联的世界。成立90多年来，罗德与施瓦茨作为全球科技集团，通过发展尖端技术，不断突破技术界限。公司领先的产品和解决方案赋能众多行业客户，助其获得数字技术领导力。罗德与施瓦茨总部位于德国慕尼黑，作为一家私有企业，公司在全球范围内独立、长期、可持续地开展业务。