

如何精确测试和表征 碳化硅器件的栅极电荷(Qg)

正确、高效地使用动/静态测试设备测量 Qg

目录

引言	3
使用静态参数测试设备测量栅极电荷 Q_g	4
使用动态参数测试设备测量栅极电荷 Q_g	12
理解 SiC MOSFET Q_g 测试新规 JEP192	25
实测分析——两种测试方法的对比	29
实测分析——负载类型的选择	30
实测分析——SiC 器件迟滞效应对开启和关断 Q_g 的影响	31
总结	32

引言

栅极电荷 Q_g 通常是描述以栅极电压来控制功率器件(Power MOSFET/IGBT)开关特性的一个关键参数，它是指栅极从某个关闭电压（例如 0V）上升到完全开启电压（例如 15V）时所需的栅极电荷量。栅极电荷的大小直接影响功率器件的开关性能。栅极电荷量越大，导通 MOSFET 所需的电容充电时间越长，开关损耗增加，从而影响开关速度和效率。因此，较小的栅极电荷有助于实现高速开关，减少开关损耗。此外，栅极电荷也是设计栅极驱动电路的关键参数。

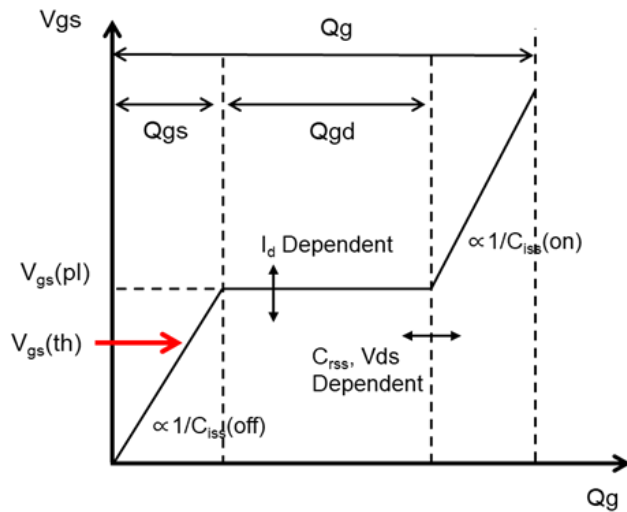


图 1. 典型栅极电荷曲线

栅极电荷指标通常出现在规格书的动态特性表格和特性图中，显示栅源电压与总栅极电荷的特性曲线，典型的曲线如图 1 所示。整个过程可以分为以下几个阶段：

1. **初始阶段**：当开通脉冲加到G和S极时，输入电容 C_{iss} 开始充电，栅极电压 V_{GS} 线性上升。
2. **阈值电压阶段**：当 V_{GS} 达到阈值电压 V_{TH} 时，漏极开始流过电流，但此时漏源电压 V_{DS} 仍然保持不变。
3. **米勒平台阶段**： V_{GS} 继续上升，到达米勒平台电压 $V_{GS(pl)}$ ，此时漏极电流达到最大值，漏源电压开始下降。
4. **稳定阶段**：米勒平台结束后，漏极电流仍然保持最大值，但漏源电压继续下降，直到稳定在 $V_{DS}=I_{D(max)} \times R_{DS(on)}$ 。

栅极电荷曲线在功率器件的开通过程中可以帮助理解整个开关过程中的状态变化和电流、电压的变化规律。通过分析栅极电荷曲线，可以更好地设计驱动电路，优化开关性能，减少开关损耗。

使用静态参数测试设备测量栅极电荷 Q_g

传统硅基器件的栅极电荷测试可以通过静态参数测试设备完成，然后通过算法拟合提取 Q_g 曲线。下面将介绍如何使用静态参数测试系统来测试 Q_g 。

静态参数设备测试 Q_g 过程

栅极电荷 (Q_g) 的测试通常需要能够提供从高电压到高电流输出的无缝切换的激励源。同时，仪器必须具有高精度电流和电压测量功能，以确保结果准确。对于标准的功率器件静态参数测试仪来说，高电压和大电流输出通常由独立的功率模块提供。

- 高压模块通常用于击穿参数测试（例如， BV_{dss} ），不需要大电流输出。
- 大电流模块用于测试输出特性和传输特性，不需要高电压输出。

这种配置使得单个源表模块很难满足 Q_g 测试中漏极和源极之间从高电压到高电流快速过渡的要求。静态参数测试仪利用高压和大电流模块进行单独测试，从而克服了这一限制。然后，通过两步栅极电荷测量方法将这些测试的数据拟合在一起，生成高电压和高电流条件下综合的 Q_g 结果。这种两步法的具体拟合过程如图 2 所示。

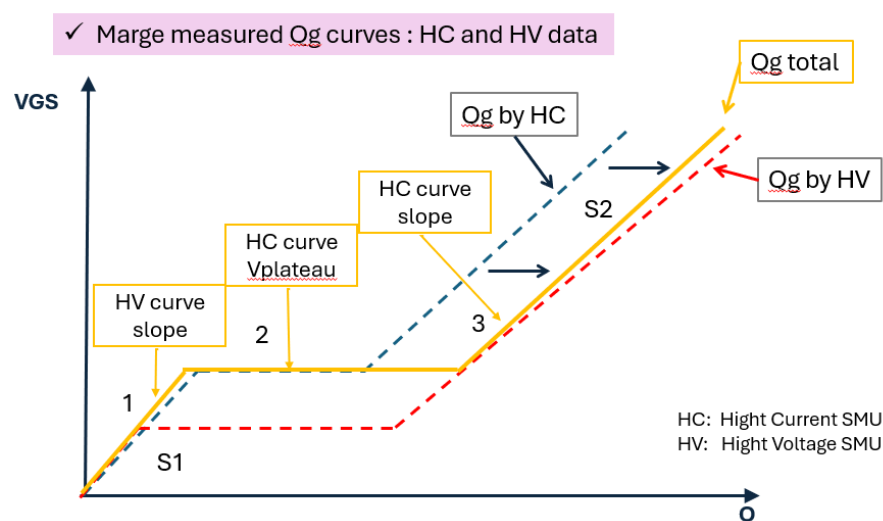


图 2. 两步法测量栅极电荷

第一步：低电压/大电流测试

使用大电流模块，进行低电压、大电流的 Q_g 测试（根据测试条件）。栅极驱动采用恒流源方式，便于进行积分运算，结果如图中 Q_g by HC 曲线所示。

第二步：高电压/低电流测试

使用高压模块进行高电压、低电流的 Q_g 测试（根据测试条件）。结果如图中的 Q_g by HV 曲线所示。

最后对这两条曲线进行拟合，得到同时满足高电压和大电流测试条件的 Q_g 结果，如图中的 Q_g total 所示。

拟合过程：

1. 延长S1 段

将高压测试的S1 段向上延伸至大电流测试的平台电压。（S1 段与 $V_d(\text{off})$ 期间的 C_{gs} 相关，平台电压 $V_{gs(pl)}$ 由 $I_d(\text{on})$ 确定）

2. 延长平台

延长平台直至与高压测试中的 S2 段相交。（平台长度与高压测试一致）

3. 延长S2 段

根据大电流测试结果的斜率，将S2 段向上延长。（S2段的斜率由 $I_d(\text{on})$ 期间的 C_{iss} 确定）

是德科技静态参数测试设备测试 Qg 过程

是德科技提供两款用于功率器件测试的静态参数测试设备：功率器件分析仪 B1505A 和 B1506A。

1. B1505A

- 主要面向专业的研发人员
- 能够输出高达10kV的电压
- 支持各种在片参数测试，包括IV、CV、Qg测试

2. B1506A

- 面向功率器件的使用者
- 专为验证功率器件数据手册中的各项参数定制
- 针对封装器件高效测试做了优化

这两台设备提供全面、精确、可靠的静态参数测试功能，能够覆盖从功率器件的研发到应用全流程中的不同阶段。

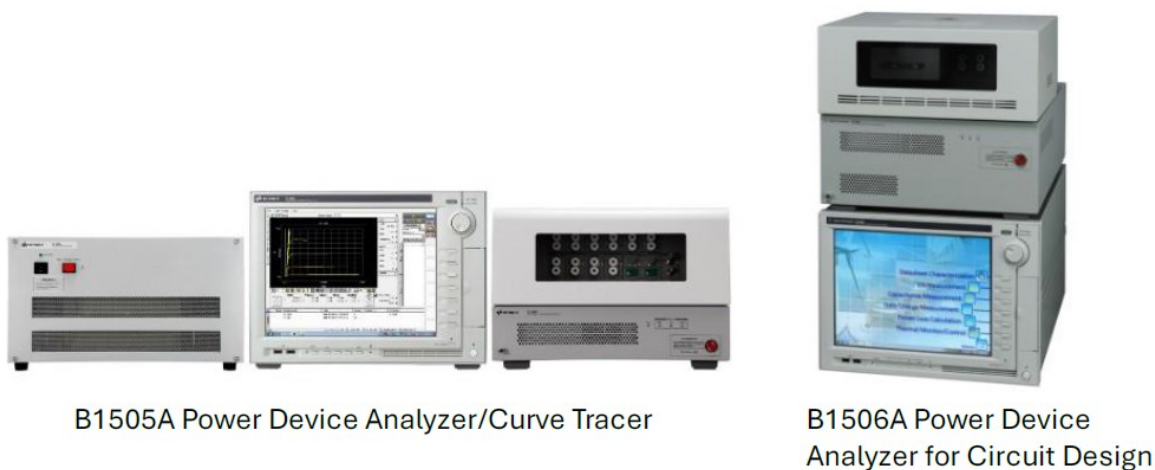


图 3. B1505A 和 B1506A

下表列出了 B1505A 和 B1506A 特性和功能。

	B1505A	B1506A
Flexibility	Configurable	Fixed Configuration
Output Range	10 kV/1500 A	3 kV/1500 A
Coverage	From small to large devices using a single instrument	500 A/1500 A versions cannot be used for small sized device ($I < 10$ A)
Ease of Use	<ul style="list-style-type: none"> Requires device knowledge to connect up DUTs Supported only by EasyEXPERT group+ SW – Requires measurement expertise to get good data 	<ul style="list-style-type: none"> Automated and simplified DUT connections Intuitive software (Datasheet Mode of ETN) Automated switching
IV	<ul style="list-style-type: none"> 10 kV /1500 A wide coverage Can cover 20 A and 1500 A by single mainframe Sub pA level precision leakage current measurement Multi-channel measurement (ex. Sense emitter current meas.) Package and on-wafer Multiple HVSMU support (up to 5) Need to wiring manually even for packaged device 	<ul style="list-style-type: none"> Max.3 kV/1500 A For $I_d < 10$ A, 20 A model is required. For $I_d > 20$ A, 500 A or 1500 A model are required Sub nA level leakage current 3 terminal + 1 bias Package only Single HVSMU
Qg	<ul style="list-style-type: none"> Can cover 20 A and 1500 A by single mainframe Need to switch HC and HV Qg manually (excluding 20 A on-wafer Qg) On-wafer Qg is supported 	<ul style="list-style-type: none"> For $I_d < 10$ A, 20 A model is required For $I_d > 20$ A, 500 A or 1500 A model are required Can switch HC Qg and Hv Qg automatically
CV	<ul style="list-style-type: none"> IV and CV switching requires manual connection change On-wafer CV support 	<ul style="list-style-type: none"> Automated IV and CV switching Only supports CV on packaged devices
Thermal Test	<ul style="list-style-type: none"> IV and CV has to be switched manually by changing the wiring Need different enclosure for Thermostream and thermal plate 	<ul style="list-style-type: none"> IV/CV automatic switch IV/CV under temperature test Thermal test does not require extra test enclosure

在 Qg 的测试过程中，B1505A/B1506A 同样是通过 HVSMU 高压源表(High Voltage Source Measure Unit)和 UHCU 超高电流单元(Ultra High Current Unit)或者 HCSMU 高电流源表(High Current Source Measure Unit)的分步测试来实现的。

使用 HVSMU 测试高压 Qg

HVSMU 的高电压测试过程比较简单，原理如图 4 所示。HVSMU 输出设置为测试条件要求的高电压，当器件导通时高压模块则会输出该模块最高的 12mA 电流输出。图 5 是 400V 高压条件下对某功率器件的 Qg 测试曲线。设置中栅极驱动电流 I_g 是非常重要的设置，如果 I_g 设置过小，则没有足够的电荷给被测件进行充

电让其开启，也就没有办法测到准确的 Q_g 。具体的 I_g 计算可以参考文献中的具体介绍¹。图 6 显示的是 HVSMU 在 Q_g 测试中输出的电压、电流波形切换过程以及栅极电压的上升过程。

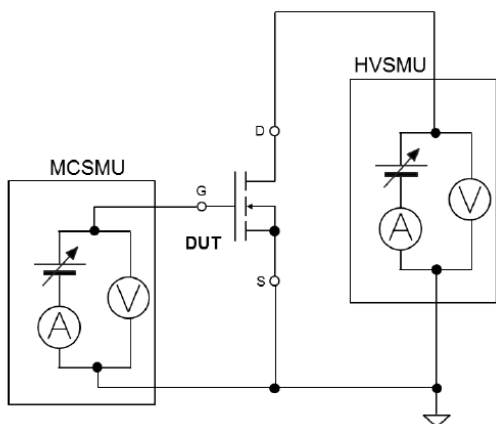


图 4. 高压栅极电荷测试原理图

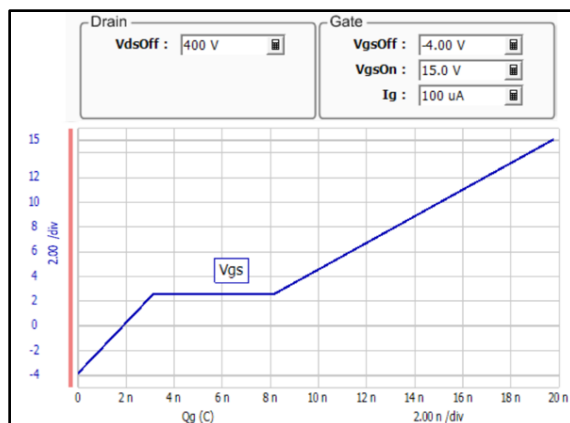


图 5. 高压栅极电荷测试曲线

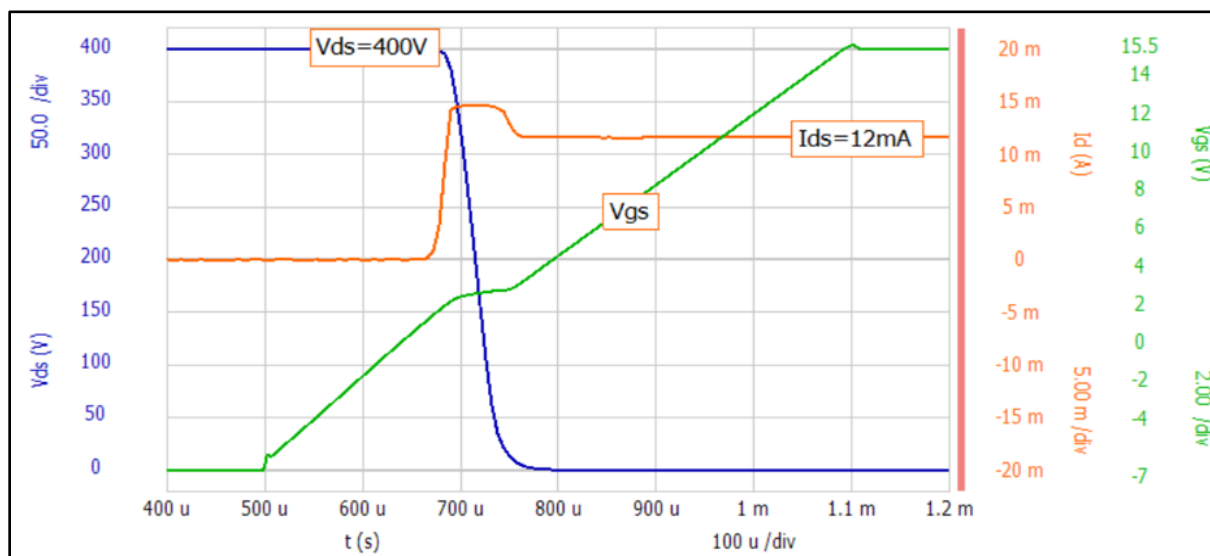


图 6. 高压 Q_g 测试过程中电压电流开关波形

使用 UHCU 测试高电流 Q_g

UHCU 高电流条件的测试有两种方法：

- 电流负载
- 阻性负载

过程相对复杂，原理如图 7 所示。

¹ <https://www.keysight.com/us/en/assets/3124-1556/application-notes/Static-and-Dynamic-Gate-Charge-measurement.pdf?courseId=98>

使用电流负载测试

UHCU 的输出电流设置为测试条件要求的高电流值，电压通常情况默认设置为 UHCU 可以输出的最高电压 60V。为了保证 UHCU 在 Qg 测试过程中器件开启的电流能够保持在设置的电流值上，通常最好的方法需要另一个功率器件作为电流负载与被测器件（DUT）串联。为了 UHCU 在器件开启过程中有稳定的电流输出，电流负载需要通过栅极的电压控制使其工作在恒流区（如图 8 所示），这样可以保证被测器件在开启过程中电流尽量稳定。需要注意的是电流负载的选择一定要保证其安全工作区可以覆盖 Qg 测试的电压电流条件。图 9 是一个典型的电流负载测试过程中的电压、电流波形切换过程图。此方法通过利用电流负载并有效控制流经 DUT 的电流，确保高电流条件下测量 Qg 的高精度。

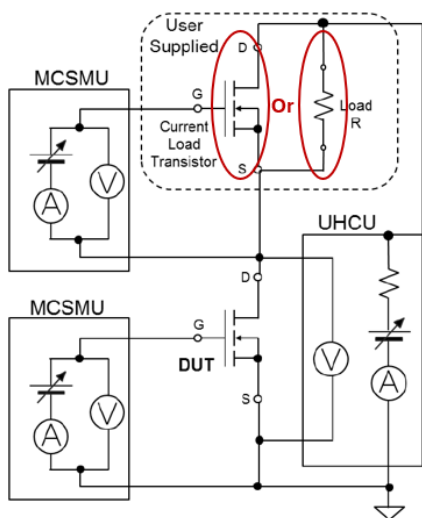


图 7. 高电流 Qg 测试原理图

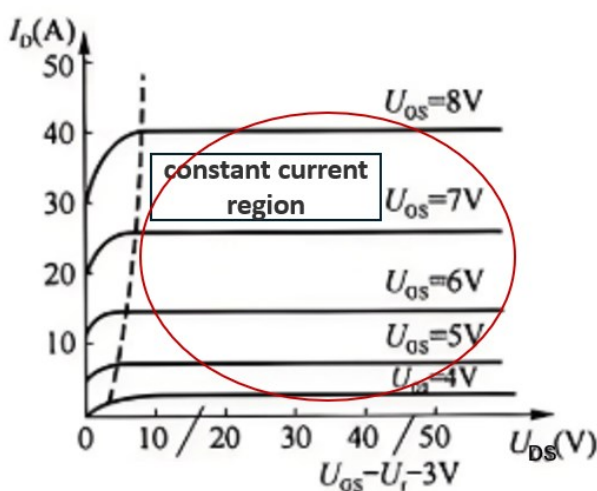


图 8. 典型硅基功率器件恒流区

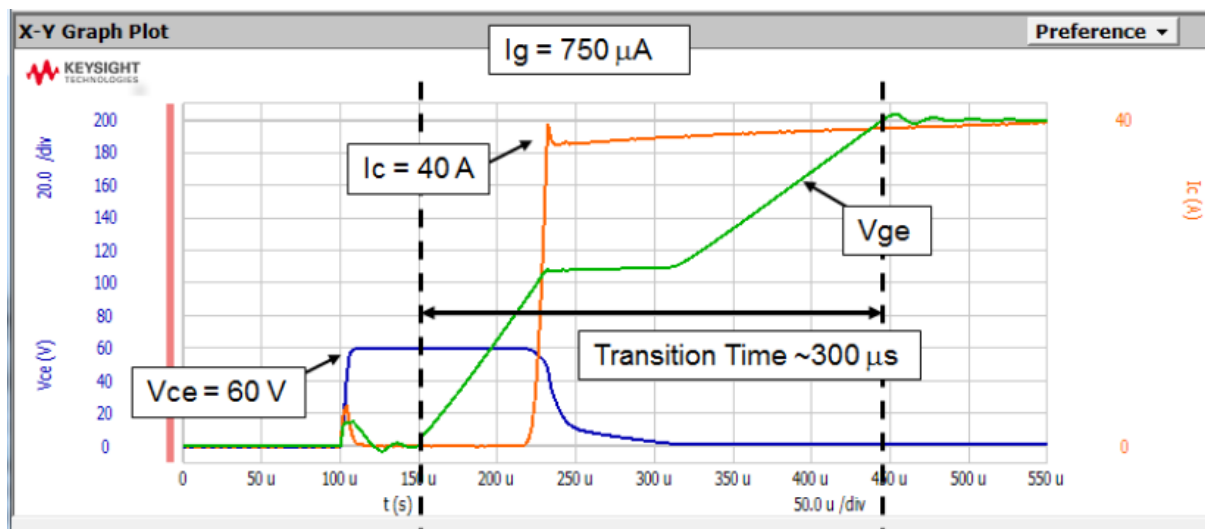


图 9. 高电流 Qg 测试过程中电压电流开关波形

使用阻性负载测试

对于功率模组的 Qg 测试，由于测试的电流很大，可能高达上千安培，所以很难找到合适的电流负载，通常就可以选择阻性负载的测试方法。原理同样如图 7 所示，用一个小电阻代替电流负载与被测器件串联。

测试过程中，UHCU 会根据设置的电流条件自动寻找合适的输出电压来保证开启的电流满足设置的要求。注意选择的串联电阻加上 UCHU 的内阻不要使 UCHU 的电流输出能力小于设置的电流值。

图 10 是一个 IGBT 模组在 1.47kA 下的 Qg 测试波形图。这种方法在器件开启过程中 Rds 的变化使得电流输出不能快速恒定(相比电流负载)，这也有可能导致电压平台不平坦，如图 11 的 Qg 测试曲线所示。

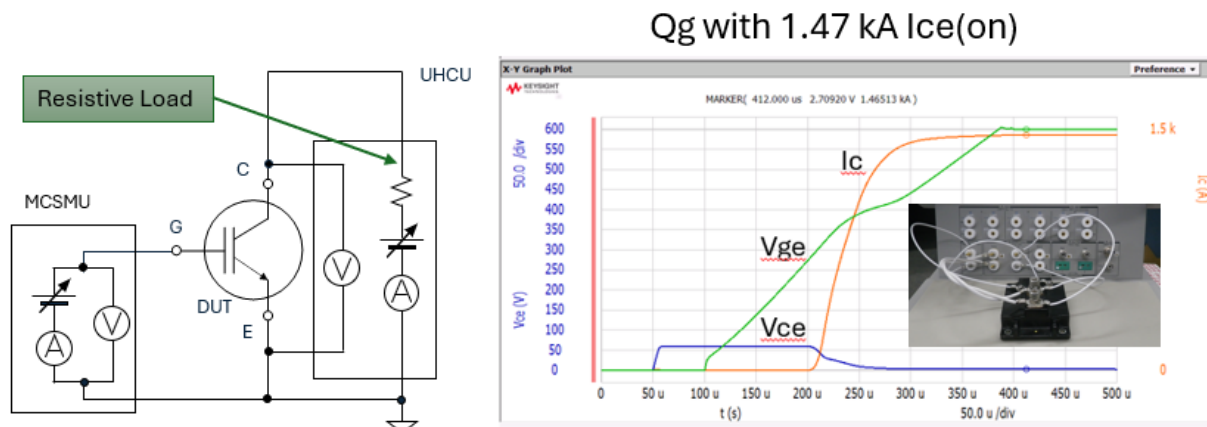


图 10. 功率模组高电流 Qg 测试电压电流开关波形

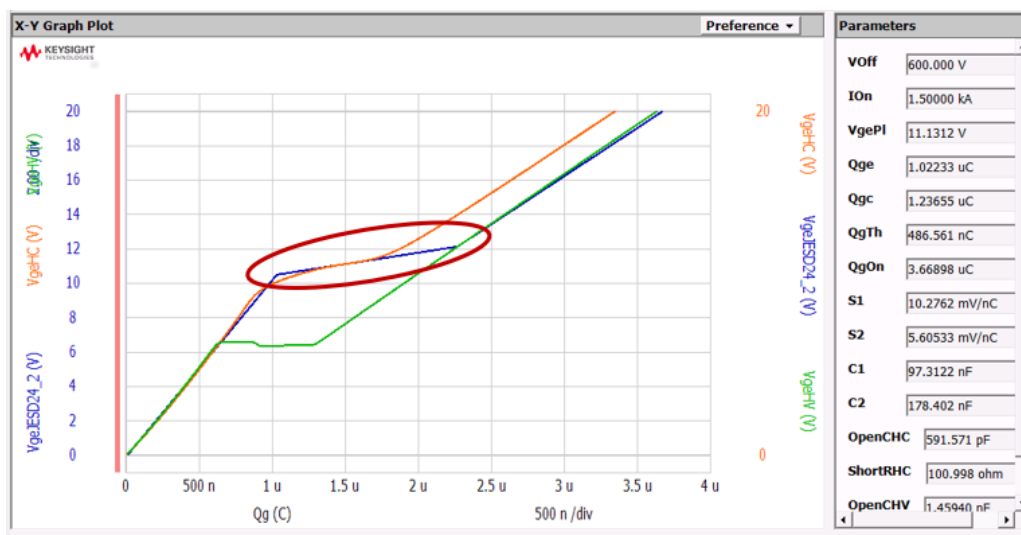


图 11. 功率模组 Qg 测试结果

使用静态参数测试设备测试碳化硅器件 Q_g

由于 DIBL 效应, SiC 器件的输出特性与 Si 有所不同。在相同的 V_{gs} 条件下, 器件的饱和电流会随着 V_{ds} 上升而上升, 如图 12 所示。这一现象会导致测试得到的平台电压不平坦, 所以在测试 SiC 器件高电流条件下的 Q_g 曲线时, 平台电压出现明显的斜坡, 而传统的硅基器件平台电压则非常平坦, 如图 13 所示。

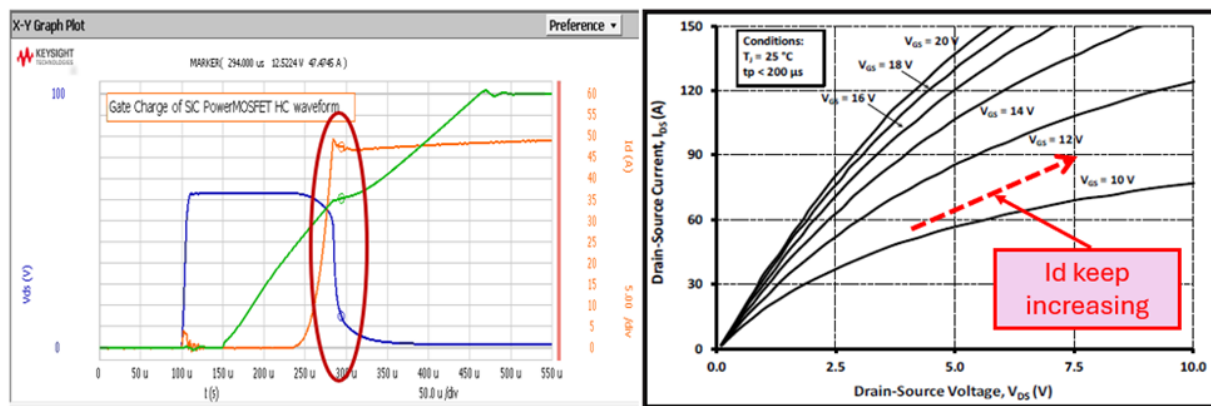


图 12. SiC MOSFET 开启过程

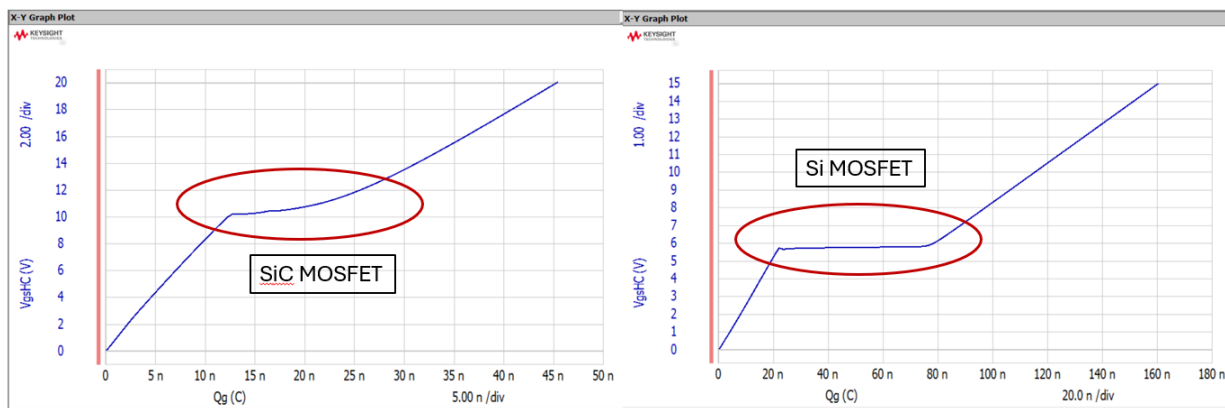


图 13. SiC 和 Si 器件高电流 Q_g 测试对比图

同时, 对于我们实验中的某些 SiC MOSFET 器件, 在测试高电流的过程中发现其在开启的初始过程中电流会有不连续性变化, 栅极的电压也会随之发生波动。这种波动如果比较剧烈, 甚至出现振荡就会导致在生成 Q_g 的曲线时, 初始斜率和米勒平台的误判, 结果异常。过程如图 14 所示。

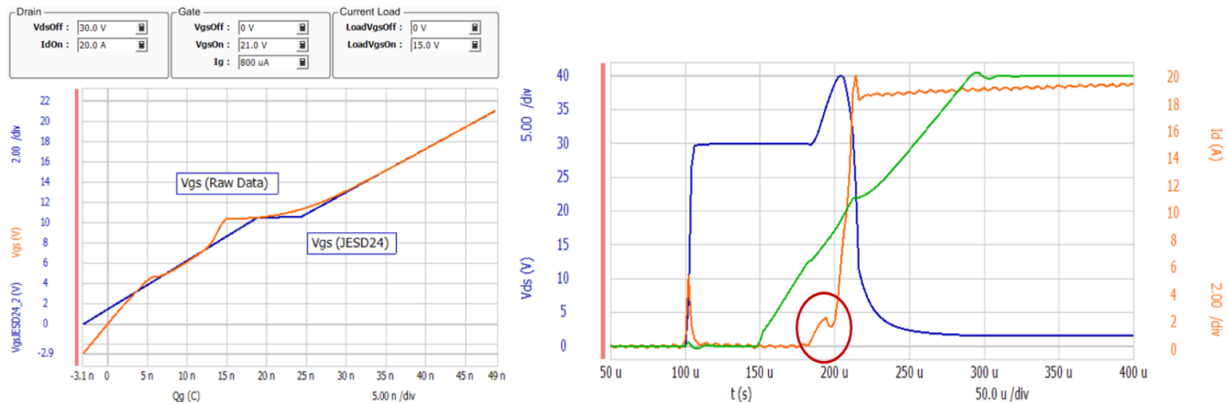


图 14. SiC 器件高电流测试过程中的异常现象

为了减少这种异常的波动，可以适当调整高电流测试过程中 V_{dsoff} 电压的设置（B1505A 需在高电流 Q_g 应用测试程序中单独编辑设置，B1506A 在 High Current Setup 中进行设置）。从实际的测试对比来看 V_{dsoff} 电压的适当降低可以有效减小 I_{ds} 在开启初期的波动，从而使得曲线可以正常生成，如图 15。

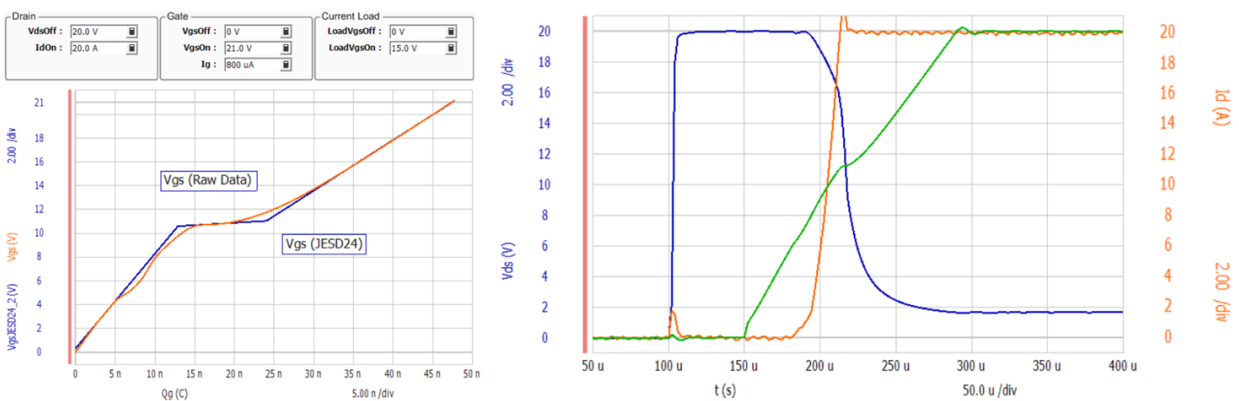


图 15. 调整 V_{dsoff} 设置后的 SiC 器件高电流 Q_g 测试结果

使用静态参数测试系统的 Q_g 测量技巧

1. 选取合适的器件作为电流负载，既能够提供恒定的电流，又能承受相应量级的电压电流，保证测试能够正常进行。
2. 设置合适的栅极驱动电流 I_g 。
3. 合理设置 V_{dsoff} ，以保证测试过程中器件开关波形正常。

使用动态参数测试设备测量栅极电荷 Q_g

栅极电荷的另一种测量方法是使用动态参数测试仪来进行测量。半导体动态参数分析仪，即双脉冲测试系统，是用来测试半导体功率器件动态参数的必备仪表。是德科技提供两款动态参数测试设备 PD1500A 和 PD1550A，如图 16 所示。

PD1500A 主要用于测量 Si、SiC 和 GaN 分立器件，能够提供 V_{ds}/V_{ce} 高达 1200V 和 I_{ds}/I_{ce} 高达 200A 的测量能力，可以测试开关参数、反向恢复、 Q_g 、动态导通电阻等参数。

PD1550A，专为更高的测量能力而设计，除了测试分立功率器件外，还可以测量功率模组。它具有 $V_{ds}/V_{ce} \sim 1500V$ 、 $I_{ds}/I_{ce} \sim 3000A$ 的测量能力，并且可以同时测量模组中电桥的上臂和下臂，还包括短路测试能力。这些分析仪是在高电压和电流条件下准确测试半导体功率器件动态特性的重要工具。



PD1500A



PD1550A

图 16. 是德科技动态参数测试仪

下表列出了 PD1500A 和 PD1550A 的主要特点。

	PD1500A	PD1550A
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • Turn-On / Turn-Off Characteristics • Switching Characteristics • Reverse Recovery • Gate Charge • Derived Output Characteristics (IdVg, IdVd) 	<ul style="list-style-type: none"> • Turn-On / Turn-Off Characteristics • Switching Characteristics • Reverse Recovery • Gate Charge • Derived Output Characteristics (IdVg, IdVd) • Short Circuit Test
Output Range	1200 V / 200 A	1500 V / 3000 A
Coverage	<ul style="list-style-type: none"> • Power Discretes: Si, SiC, GaN 	<ul style="list-style-type: none"> • Power Discretes • Power Modules
General	<ul style="list-style-type: none"> • Sample Rate :16 GSa/s • Sampling Accuracy: 8 ppb + 75 ppb / year • Deskew Accuracy: 200 ps (typical) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sample Rate :16 GSa/s • Sampling Accuracy: 8 ppb + 75 ppb/year • Deskew Accuracy: 200 ps (typical)
Drain/ Collector Channel	<ul style="list-style-type: none"> • Output Max:1200 V / 200 A • Voltage Programming Resolution:23 mV • Measure Voltage Accuracy: 2% of range • Measure Current Accuracy 4% of range • Voltage Measure Bandwidth:500 MHz • Current Measure Bandwidth: 400 MHz (typical) 	<ul style="list-style-type: none"> • Output Max:1500 V /3000 A • Voltage Programming Resolution:23 mV • Measure Voltage: < 2000 V, accuracy 2% of range • Measure Current:< 5000 A, accuracy 4% of range • Voltage Measure Bandwidth:400 MHz • Current Measure Bandwidth: 200 MHz / 400 MHz (typical)
Gate	<ul style="list-style-type: none"> • High / Low Level Voltage Output: -28 V to 0 / 0 to +28 V • Voltage Resolution: < 0.1 V (typical) • Typical 1st Pulse Width: 1 to 60 μs • Off-Time between 1st and 2nd Pulse: 25 ns to 25 μs • Pulse Width (2nd Pulse): 200 ns to 10 μs • Voltage Measure Bandwidth:500 MHz • Current Measure Bandwidth: 800 MHz 	<ul style="list-style-type: none"> • High / Low Level Voltage Output: -28 V to 0 / 0 to +28 V • Voltage Resolution: < 0.1 V (typical) • Typical 1st Pulse Width: 1 to 60 μs • Off-Time between 1st and 2nd Pulse: 10 μs to 200 μs • Pulse Width (2nd Pulse): 1 μs to 25 μs • Voltage Measure Bandwidth:200 MHz • Current Measure Bandwidth: 200 MHz

双脉冲系统测量原理

是德科技双脉冲测试系统采用一个半桥电路的结构，来测试被测件的开启、关断、反向恢复等参数。其中半桥电路的下桥臂为被测件，上桥臂为陪测管，测试中主要用其体二极管做续流，另外用一个电感做被测件的感性负载。测试过程如下

1. 测试前配置

测试开始前，由外部电源Vdd给大容量电容组C充电，充电到设定电压后断开电源，测试过程中由电容给测试电路供电。

2. 第一个脉冲

测试过程中会产生两个脉冲，首先控制下管开启，开始第一个脉冲。这个过程中， V_{gs} 首先开始升压，到达阈值电压后， V_{ds} 开始下降， I_d 开始增加。电流方向如下图 17 最左侧框图所示，电流由电容流经电感和下管 MOS 管，电容给负载电感充电，测量的下管电流 I_d 会线性增大，直至到达设定电流。

3. 关断过程

I_d 到达设定电流后，控制关断下管， V_{gs} 首先下降，之后 V_{ds} 和 I_d 各自反向变化，这个过程为管子的关断过程，时间约十到几十 ns 量级，管子的动态关断参数在这个过程中测得。而同时负载电感中的电流将改为从上管的续流二极管回路续流，维持设定电流值。如图 17 的中上框图所示。

4. 第二个脉冲

当下管充分关断后，再次控制下管打开，进入第二个脉冲。此时续流二极管回路中维持的电流将再次转向流入下管，此过程为设定 I_d 条件下的开启过程，管子的动态开启参数在这个过程中测得。如图 17 的右上框图所示。

5. 测量结束

等待管子充分开启后，整个双脉冲测量结束，系统将控制管子关断并切换开关对电感和电容进行放电，并进行数据采集和测量。

6. 参数提取

根据测量波形和测试规范，可以在示波器波形上提取开启和关断参数，比如 Turn on delay time $T_{d(on)}$, Turn on rise time T_r 等。这些参数对于表征被测器件的动态开关行为至关重要。

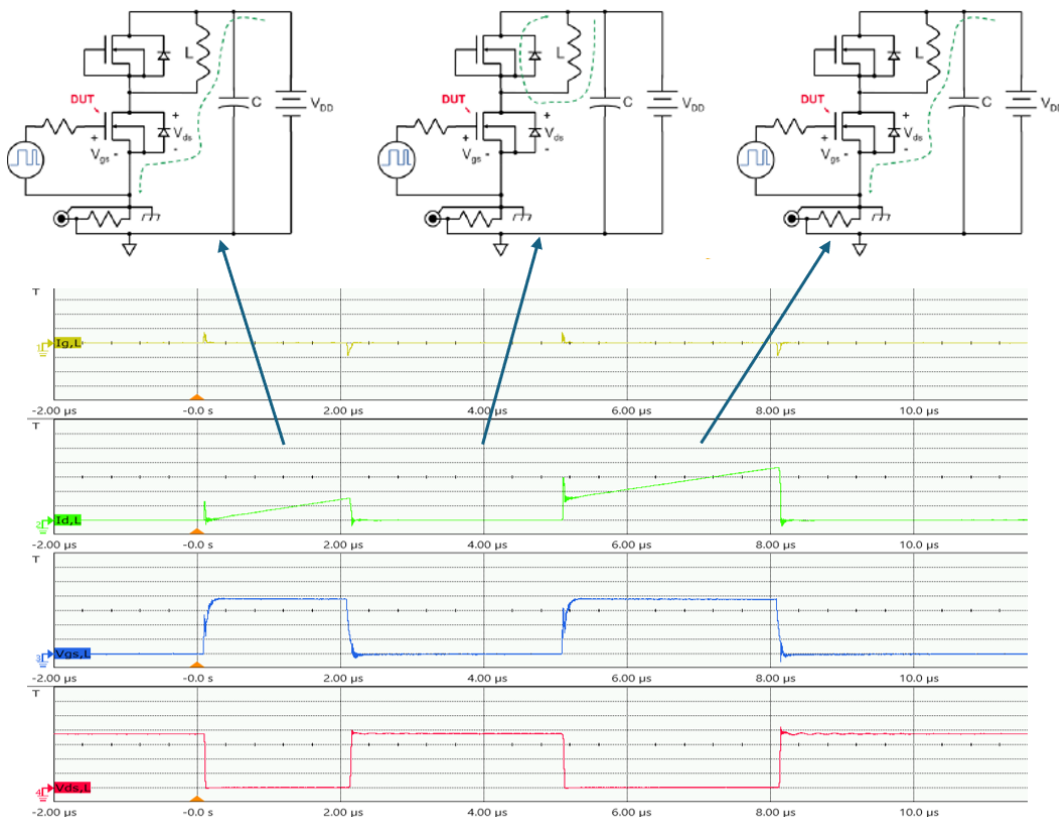


图 17. 双脉冲系统测试原理图

上述就是双脉冲的测量过程，当然测试波形并不是都如上图所示一般理想，由于参数基本都是从波形中提取，波形越接近理论，越能够测得准确且有重复性的结果。不过这里涉及到很多影响因素，比如器件本身特性，测试夹具的杂散，系统频响，时域测量原理等等，后续的章节中，我们将详细讨论这些因素的具体影响。

使用动态参数测试系统测量栅极电荷 Qg 原理

动态参数系统测试 Qg 的原理并不复杂，如下述公式所述，栅极电荷就是栅极电流的积分，由此我们可以对 Ig-t（图 18 的曲线 1）积分得到 Qg-t 曲线（曲线 2）。规范要求的 Q-V 的关系，因此还要对 Q-t 曲线和 Vgs-t 曲线（曲线 3）做一个 X-Y 变换，即可得到 Qg_Vg total（曲线 4）。

$$Q = \int I \times t dt \quad (1)$$

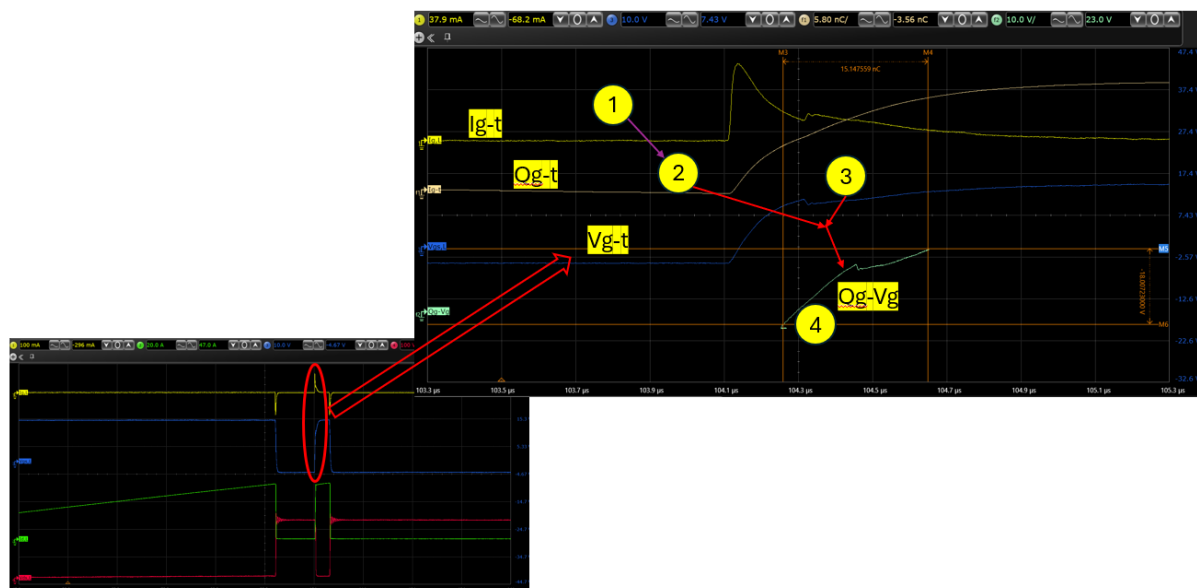


图 18. Qg 测量原理

积分的边界值按规范来设定，比如根据 JEDEC24_2，整个 Qg 曲线分为 3 段：

1. 管子关断区间——S1
2. 管子开启区间——S2
3. 米勒平台区间——S3

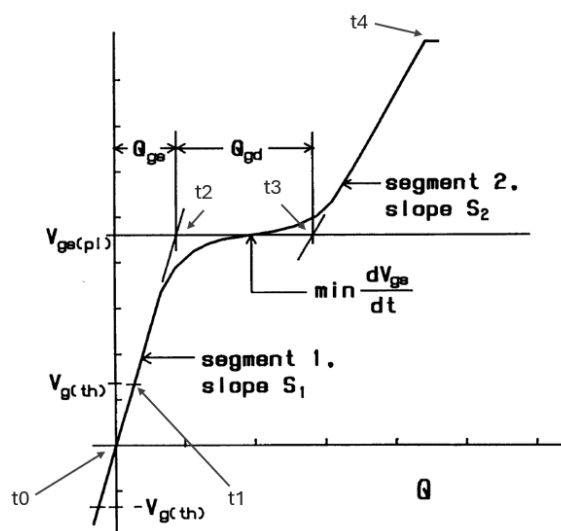


图 19. Qg 积分边界示意图²

从 t0 时刻开始积分，过程如下：

² JESD24-2, "Gate Charge Test Method" (JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION, JANUARY 1991 (Reaffirmed: OCTOBER 2002)), page 3

- t_0 到 t_1 为 $Q_{gs(th)}$ ，阈值栅极电荷
- t_0 到 t_2 为 Q_{gs} ，导通相关的栅极电荷
- t_2 到 t_3 为 Q_{gd} ，栅极-漏极电荷
- t_0 到 t_4 为 Q_{g_total} ，总栅极电荷

针对 SiC 的新规 JEP192 中，积分边界获取方法与 JEDEC24-2 不同，后续章节会进行叙述。

R_g 选取原则

前述章节给出的是较为理想的曲线，其中是 I_{gs} 、 V_{gs} 都比较平滑，但在实际测量中，由于被测件和测试夹具都有一定的杂散电感，从而会产生两方面的副作用

- 与被测器件的管脚间电容作用产生 LC 震荡，从而导致波形震荡
- 由于电流的快速变化产生感生电动势，导致管子的杂散开启

如下图所示，影响栅极回路的就包括驱动电路杂感 L_g 以及被测 MOSFET 源级的共源杂散 L_{ss} (Common Source Inductance)。

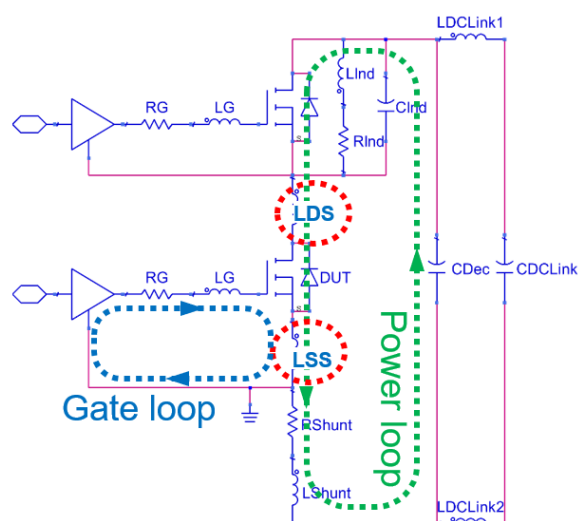


图 20. 测试电路杂散示意图

比如一个开关较快的 SiC MOSFET 器件，当 R_g 选开关测试标准值（如 2.5Ω ）时， V_{gs} 和 I_{gs} 的波形都不是很平滑。如下图 21 所示，较小的 R_g 容易与杂散电感 L_g 和栅极电容 C_{gg} 形成 RLC 震荡。同时快速变化的电流感生出的电压也对栅极回路形成干扰，使波形 I_g 和 V_g 波形都很不平滑，从而导致无法形成有效的 Q_g 积分，积分图中完全看不出 Q_g - V 应有的形状和米勒平台。

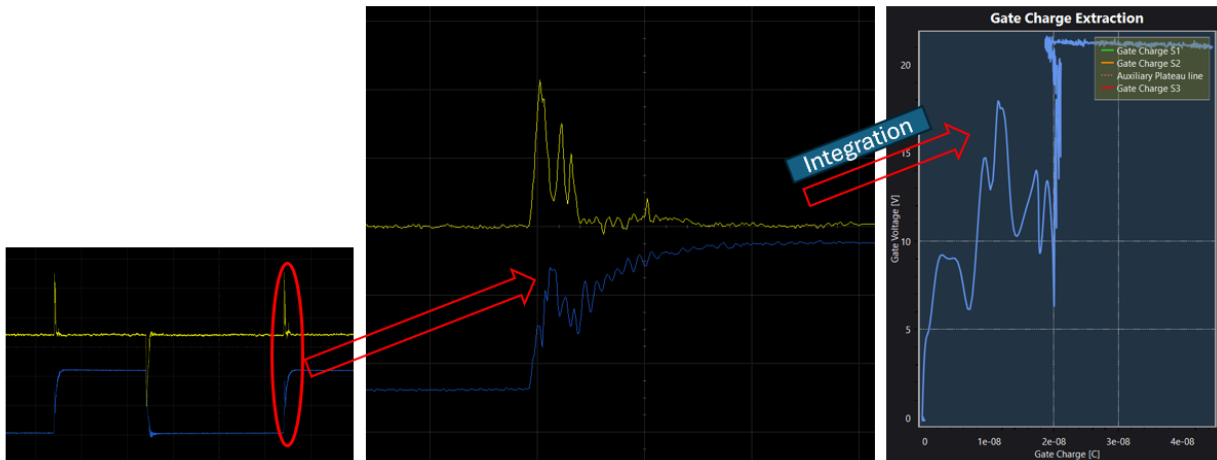


图 21. R_g 较小时的开关波形及 Q_g 测试结果

此时我们可以采取的有效方法是更换一个较大的 R_g ，使被测 MOSFET 的开启速度变慢，减小了 LC 震荡，以及感生电压的影响，从而可以得到平滑曲线。注意由于 Q_{g_total} 实际是对 C_{iss} 和 C_{rss} 充电，因此减缓开启速度并不会导致总电荷的变化。如图 22 所示，当 R_g 增加时， Q_g 曲线变得更接近理想形状。这表明较大的 R_g 有助于减少波形不规则性，从而在不改变总栅极电荷的情况下实现更准确、更可靠的 Q_g 测量。

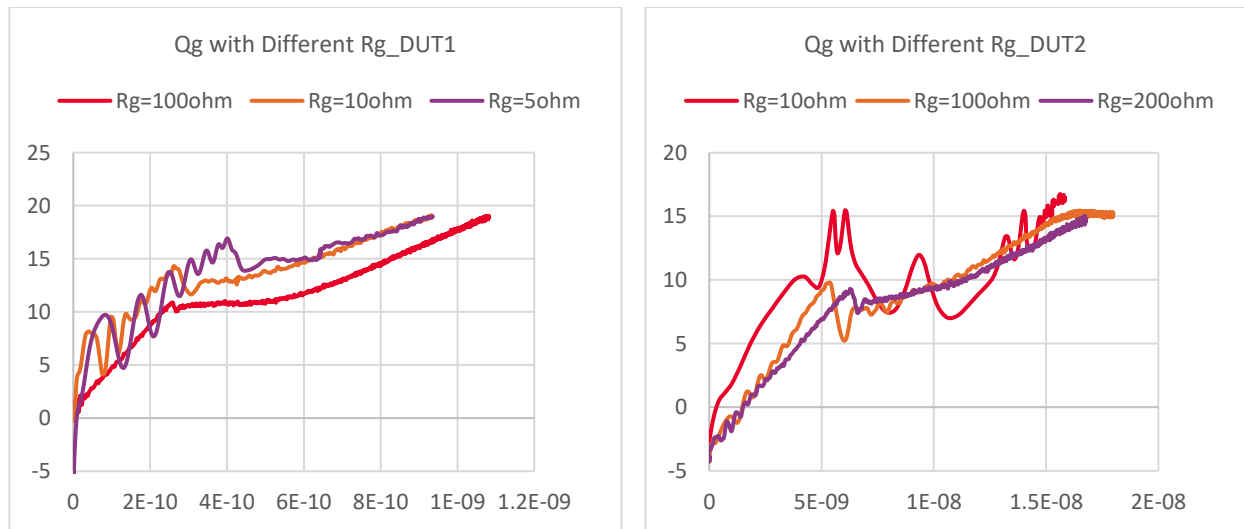


图 22. 不同 R_g 测试 Q_g 结果对比

总之，不理想的情况会使测量波形失真，因此仔细控制杂散电感至关重要。正确选择栅极电阻 (R_g) 有助于通过减慢开关过程、减少振荡和不需要的开启行为以及实现更平滑的波形来缓解这些问题。

恒流驱动和电阻驱动

在实际应用中，栅极驱动有时也会选取恒流管做驱动，而不是驱动电阻 R_g ，如图 23 所示。理论上，使用恒流管的栅极充电电流为 I_{const} ，在测量 Q_g 时，使用 $Q_g(t) = I_{const} * t$ ，可很容易的得到 Q_{g_total} 曲线，似乎比使用示波器探头测量 R_g 两端变化电压，进而求得 I_{gs_t} 曲线再积分要容易很多。但实际上恒流管开始充电到建立恒定电流也需要时间，也就是开始时并不是恒流，且当 V_{gs} 接近设定高压时，恒流管电流也会下降，这样结束时也不是恒流，从而使 $Q_g(t)$ 计算出现错误，因此不适合采用恒流管做驱动。

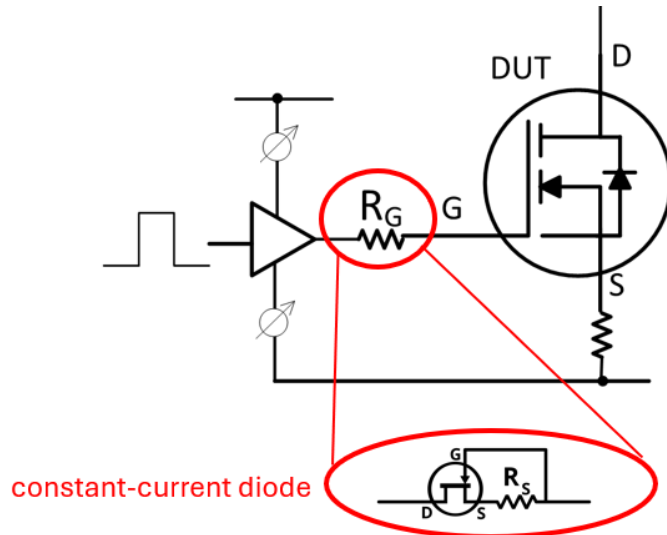


图 23. 恒流管做栅极驱动

通过开关时间、电感负载、栅极电压的设置最优化 Qg 测量

根据前一章节的分析，较大的 R_g 有利于得到更理想的结果，那么是不是 R_g 越大越好呢？结论是并不是，因为双脉冲测量系统还有很多要考虑的其他因素。

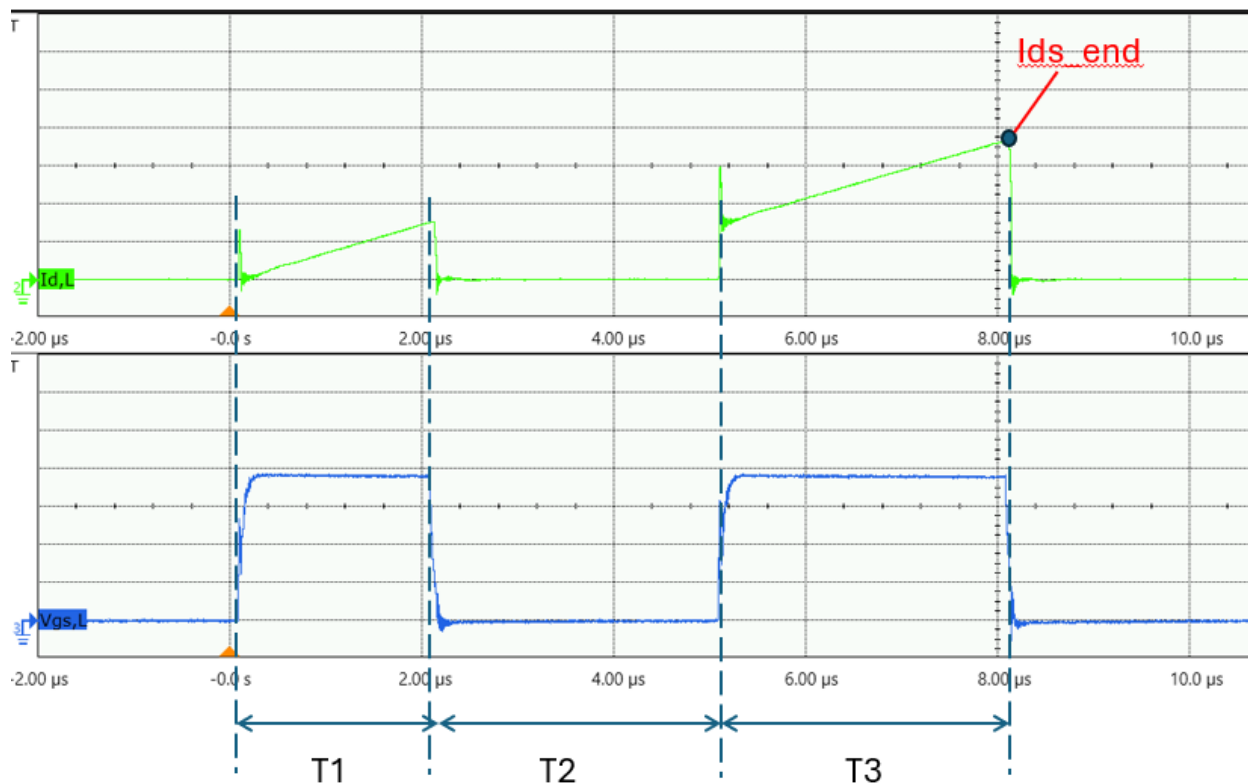


图 24. 双脉冲时序图

首先，如图 24 所示，双脉冲有三个典型时间

T1: 电感充电时间

这段时间不能直接设置，由设置的 V_{ds} 值、 I_{ds} 值和电感负载决定。公式为 $T1 = I_{ds} \cdot L_{load} / V_{ds}$ ，也就是 $T1$ 随着 L_{load} 增大而增大。

T2: 关断时间 (Off Time)

可以设置的栅极关断时间，要保证器件充分关断

T3: 第二脉冲开启时间

可以设置的栅极打开时间，保证器件充分开启， V_{gs} 达到设置值， I_{ds} 从开启时刻的震荡区进入线性增长区。

因此，如果 R_g 增大，首先一个典型的影响就是栅极充电和放电都变慢， V_{gs} 需要更长的时间才能到达设置值，这直接导致 T_3 需要更长的时间，否则不能得到正确的 Q_{gs_total} 。但 T_3 变长之后，由于在第二个脉冲电感会被继续充电，其最终大小 $I_{ds_end} \approx I_{d_set} + V_{ds} \cdot T_3 / L_{load}$ ，显然可能导致 I_{ds_end} 会超过器件的最大电流，或者双脉冲系统的最大允许测量电流。当然 T_2 也需要更长时间，以保证充分关断。

为了解决 I_{ds_end} 过高的问题，可以选择一个较大的电感负载，从而降低电流上升的斜率。但是又带来新的问题：

1. T_1 充电时间变长，从而导致整体测量和采集数据时间变长，数据量增多，数据分析时间变长。
2. 双脉冲测试本质原理是电容给电感充电，电容在放电时能量转移给电感造成电压下降，根据下面公式，显然 L_{load} 增大会使电容两端压降 ΔV 变大，极限情况下，如低压高电流被测件，很可能导致无法满足测试设备的要求。

$$\frac{1}{2} C V_{ds_set}^2 - \frac{1}{2} C (V_{ds_set} - \Delta V)^2 = \frac{1}{2} L_{load} I_{ds}^2 \quad (2)$$

因此要测量得到较为理想的 Q_g 曲线，需要测量系统有多种 R_g 阻值可选择，同时还可以选择多种电感值，在测试 Q_g 时，可由低到高尝试 50Ω ， 100Ω ， 200Ω 甚至更高的阻值，当 I_{gs} 震荡抑制足够时，选择合适较大的电感挡位，防止 I_{ds_end} 过高。还要观察双脉冲曲线，是否有电容能量下降太快的现象。理论上， R_g 和 L_{load} 挡位越细致越有利于找到最佳测试条件，但还要注意的是， R_g 可调不能采用旋钮式可调电阻的设计，因为会带来 R_g 精度的变差和额外的环路杂散，得不偿失，更多档位得电感也会带来设计复杂度和路径杂散参数得恶化，因此对于测试系统而言，这是一个平衡的过程。

是德科技的动态参数测量系统 PD1500A 和 PD1550A 的测试夹具，采用可更换 R_g 的设计，并配置了 EEPROM 来存储 R_g 值，如图 25 所示，这样既保证了栅极环路的低杂散，又能存储和自动调用校准后的 R_g 值，方便测试。电感除了内部提供几个挡位外，也可以采用外接订制电感，这样能够最优化 Q_g 的测量参数。

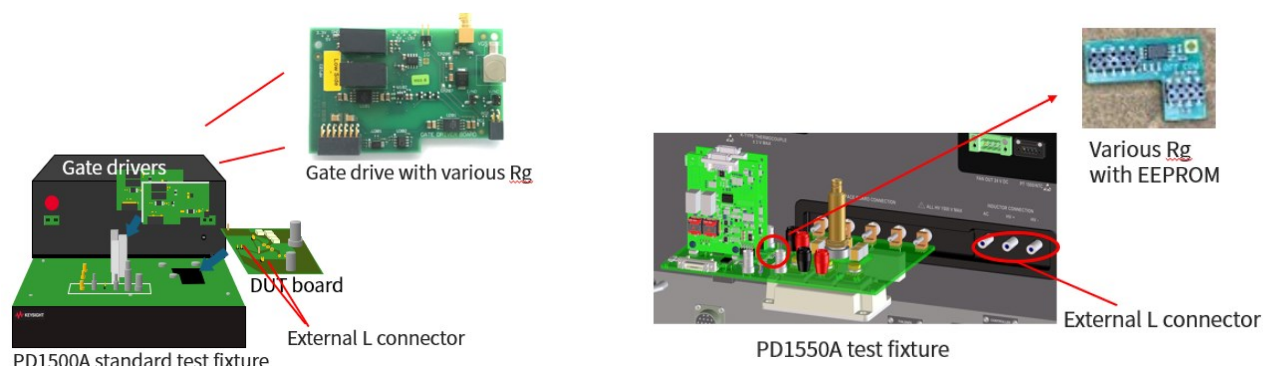


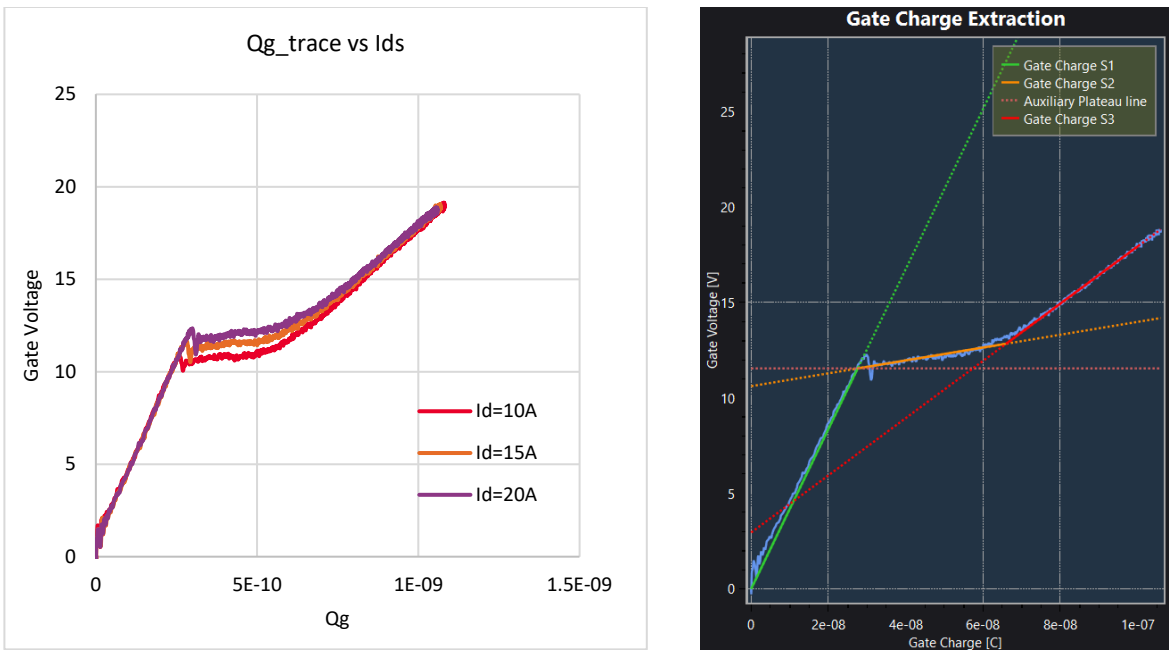
图 25. 是德科技双脉冲测试系统测试夹具

不同电流电压条件对 Qg 结果的影响

不同电压电流条件对 Qg 的结果是有影响的，这里的电压电流指的是工作电流 Vds 和 Ids。

不同电流条件

使用是德科技 PD15xx 双脉冲分析仪，可以方便得对 Ids 进行扫描测试，然后对结果进行比对。如图 26.a，可以看到在其他条件不变的情况下，Qg_total 随着电流增大略有增加，变化很小。但米勒平台电压 Vgs_pl 有明显的上移，随电流变大而增大，Qgs_pl 也随电流增大而增大，这与第一章节的原理一致。图 26.b 展示了根据 JEP192 规范的得到 Qg 拟合线，Qgd 值基本不随 Ids 变化影响。



a. 不同 Ids 条件测得的 Qg 结果

b. Qg 参数展开

图 26. Qg 曲线与 Ids 关系

下表列出了 Qg 展开参数随 Ids 的变化。

Id (A)	Qg (nC)	Qgd (nC)	Qgs_pl (nC)	Vgs_pl (V)
10	101.1	29.56	24.17	10.4
15	100.2	29.72	26.29	11.09
20	99.74	29.78	27.58	11.55

不同电压条件

使用是德科技 PD15xx 双脉冲分析仪，可以方便地对 V_{ds} 进行扫描测试，然后对结果进行比对。如图 27 所示，是一款 SiC 模组的实测 Q_g 曲线，可以看到 V_{ds} 增加后，米勒平台后的 Q_g 积分曲线显然随着 V_{ds} 的增加而增大。图 28 更直接展示了 Q_g 展开值和电压的关系。 Q_{g_total} ， Q_{gd} 与 V_{ds} 为线性增加关系，这也与第一章 Q_g 的原理相一致。

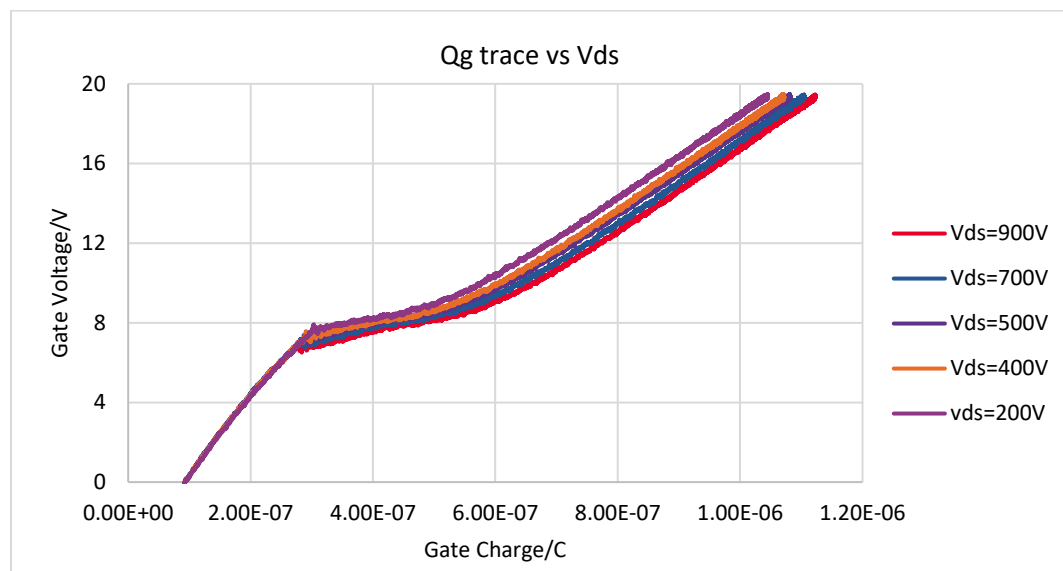


图 27. Q_g 曲线与 V_{ds} 关系

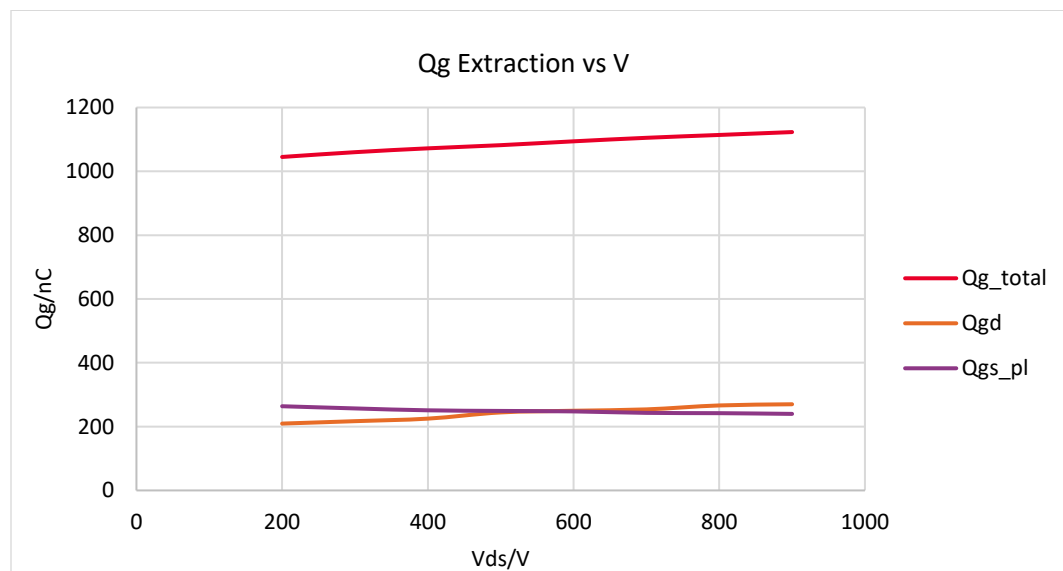


图 28. Q_g 展开参数与 V_{ds} 关系

用阻性负载测量 Qg

如前所述，使用电感做负载进行双脉冲测试时，电路以及被测件寄生参数会导致测试波形震荡，积分得到的 Qg 波形也相应的震荡明显。不过这也是接近使用场景的测试电路，在某些小部分场景中，负载为阻性，使用单脉冲测试电路来进行动态参数测试。单脉冲测试原理图如图 29 所示，负载更换为电阻，也不再需要二极管续流，被测管开启后电流直接由 V_{ds}/R_{load} 来决定，经过一个短暂的过程后在脉内表现为恒流。部分较早推出市场 SiC 器件在其数据手册上也采用阻性负载来测试 Qg。对于部分寄生参数较大的器件，感性负载会导致较大的震荡，而阻性负载则相对比较平滑。

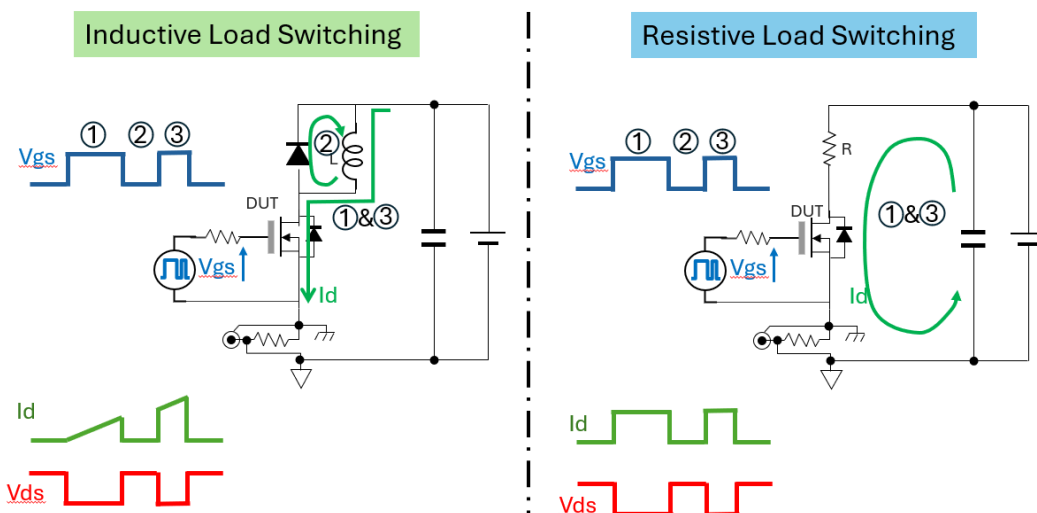


图 29. 单脉冲测试原理图

是德科技的双脉冲测试系统 PD15xx 也支持电阻负载，并支持 Qg 展开。图 30 展示了一款 Si IGBT 在相同测试条件下，使用不同负载得到的 Qg 曲线的差异。可以看到，感性负载由于 Vgs 和 Igs 波形的震荡导致 Qg 在开始进入米勒平台时明显的曲线震荡，即使使用较大的 Rg 也没有很好的改善，这时可以考虑使用阻性负载，得到更平滑的曲线。

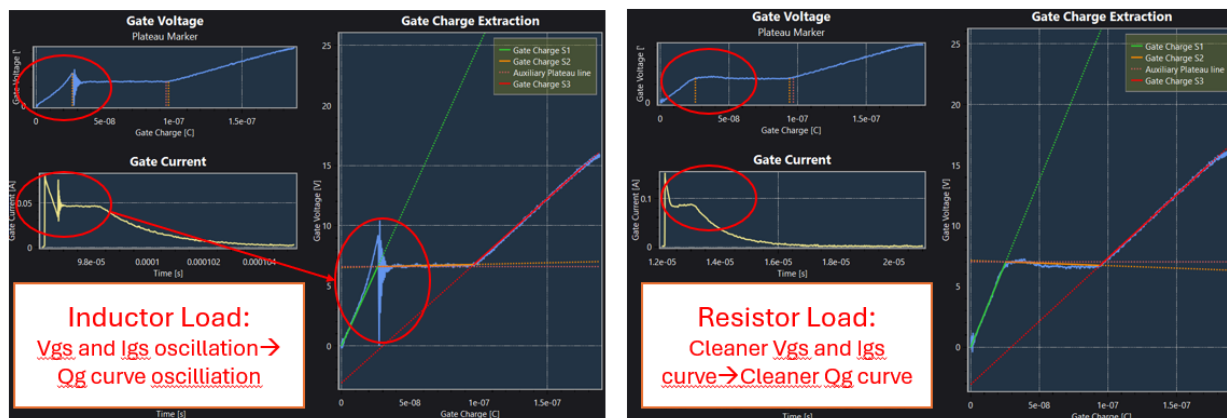


图 30. 电感负载与电阻负载测量得到的 Qg

使用动态参数测试系统的 Qg 测量技巧

1. 选取足够大的Rg，以尽量减缓器件开启速度，减低杂散对曲线的影响，从而得到更光滑的曲线，也能够更准确地展开参数。
2. 被测件开启变慢后要增大T2和T3的时间，以确保Vgs能够达到既定电压。
3. 要调整电感负载，增大感值，以确保结束测量电流不会超限。
4. 阻性负载也能测量Qg，尤其当曲线震荡较高时，平台电荷较大时，可选用阻性负载。
5. Vgs关断电压可以设置稍高于测量条件，保证实际测量Vgs能到达测量条件。

理解 SiC MOSFET Qg 测试新规 JEP192

由于以 SiC 为代表的三代半导体的一些新特性与 Si 部分或者完全不同，因此，一些测量测试方法也需要重新定义。国际上一些标准组织纷纷针对 SiC 的新特点改进或者指定新规范。比如 JEDEC 标准协会自 2016 年起成立了 JC70.2 SiC 器件新规工作组，从 2021 年至今陆续发布了诸多新规范。其中 2023 年 1 月发布了 JEP192 《Guidelines for Gate Charge (Qg) Test Method for SiC MOSFET》³，就是针对 SiC 器件的。也就是 SiC 器件或者模组要依据新规范进行测试，Si 器件可以依据旧规范 JESD24-2, IEC60747-8 来进行测试。

新规有几项主要不同：

1. 测试电路不同

旧规中并没有提及双脉冲的测试方法，只给出了测试简图，如图 31.b 和图 31.c，都是用电流源做驱动，测量 Vgs 电压，总体上属于静态测试的方法。同时也未指明负载类型，原理图相对简单，测试细节不充分，比如 Qg 在管子关闭和开启阶段的电流量级是差别很大的，如何处理都未指明。

而 JEP192 新规则明确给出两种测试电路图，如图 31.a.1 是双脉冲测试原理图，属于新增的动态测试的方法，明确了以下管作为被测件，使用电压源驱动栅极。同时也补充完善了静态测试 Qg 的方法，如图 31.a.2，其中(a)和(b)分别为管子截止段测量，此时使用电流源驱动栅极和高压源驱动漏极。以及管子开启段测量，此时改用高电流源驱动漏极，并使用另一个场效应管或者电阻作为电流负载。分高压 (HV)、高电流 (HC) 两段测量，然后拟合形成完整 Qg 曲线。显然，JEP192 规范更明确更细致。

³ JEP192, "Guidelines for Gate Charge (QG) Test Method for SiC MOSFET" (JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION, DECEMBER 2022)

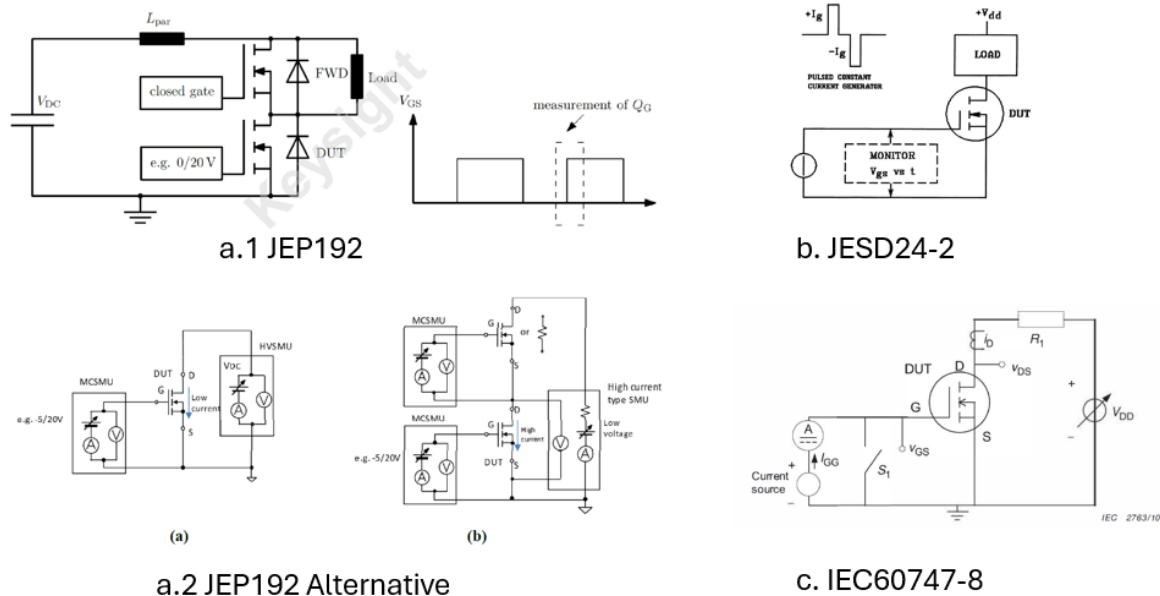


图 31. 新旧规范测试原理图

2. 米勒平台曲线有显著不同

由于SiC MOSFET的典型的短沟道（DIBL）效应，其米勒平台呈明显的斜坡特性，而Si基器件则没有这个特点，其米勒平台接近平直，如图 32所示。而米勒平台代表给Cgd的充电电荷，这意味着如果仍采用旧的展开方法，Qgd会超过Cgd贡献的电荷量。因此，如图 33所示，JEP192在Qgd部分取值采取的是从a-b段线的拐点作为Qgd起点，然后做水平延长，与c段反向延长的交点作为Qgd终点。因此可以这么理解，JEP192是向下兼容的，Si器件使用JEP192测得的Qgd结果与JESD24-2理论上相同。

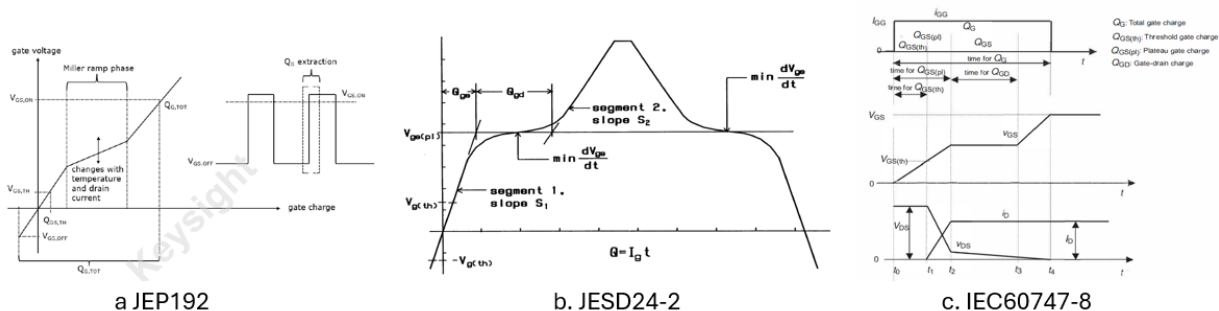


图 32. 新旧规范米勒平台差异

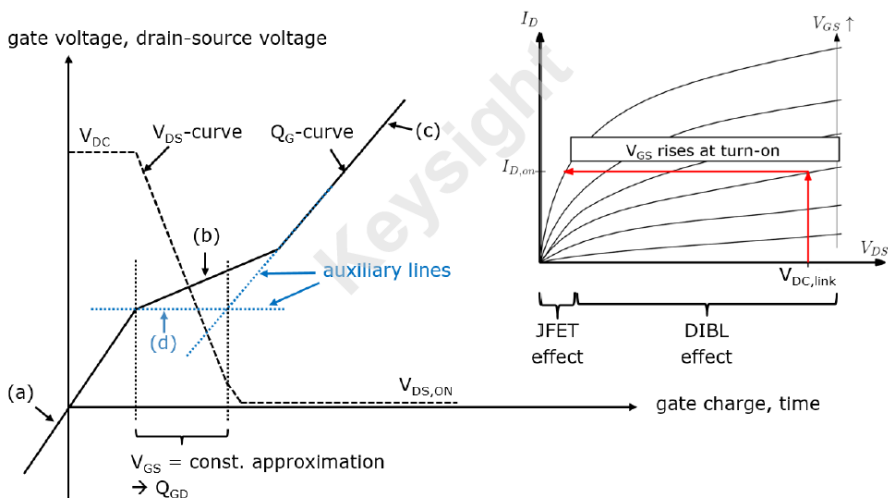


图 33. JEP192 中规定的 Qgd 展开方法

3. 开启Qg和关断Qg

SiC器件还有一个新的特点是由于其栅氧界面缺陷导致的阈值漂移现象，当栅极施加一定的电压预应力后，其阈值 V_{GS_th} 会产生漂移，这在JEP192中称为阈值电压迟滞（ V_{GS_th} hysteresis）。因从理论上当我们从开启脉冲展开Qg和从关断脉冲展开Qg时，SiC器件的阈值电压并不一样，这会导致在关断时刻米勒平台更高，如图34所示，因此开启和关断的 Q_{GS_pl} 会不一样，但并不会影响Qgd。JEP192中规定统一用开启脉冲计算Qg来解决这个问题。

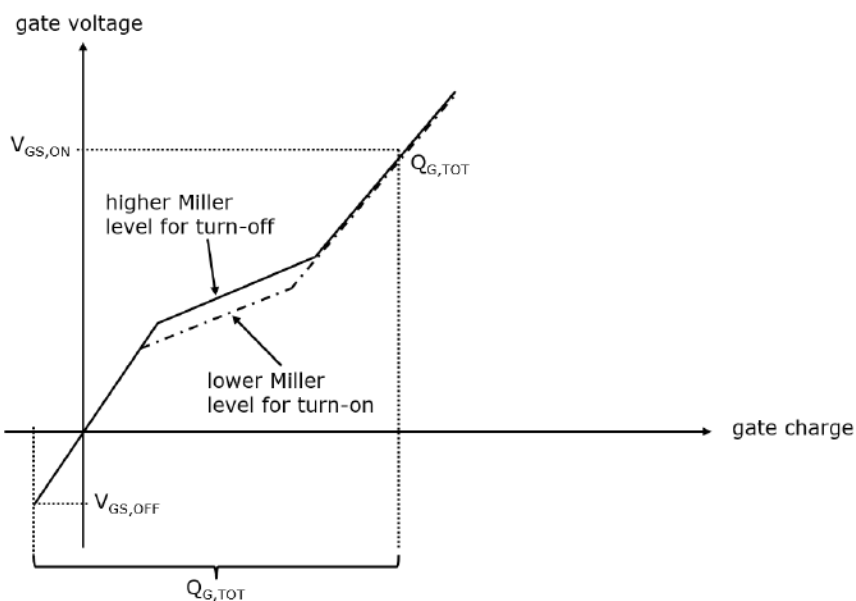


图 34. JEP192 由于迟滞效应导致的开启和关断 Qg 差异

可以看到，新旧规范存在明显差异，新规也更细致，方法更具体。是德科技的静态参数分析仪 B1505/06A，和动态参数分析仪 PD15x0A，都已更新了应用软件，可以支持新规范 JEP192 和旧规范 JESD24-2。图 35 展示了使用是德科技静态参数分析仪 B1505A 分别用不同规范对某 SiC MOSFET 器件的 Qg 曲线进行展开，Qgd 和 Vgs_pl 存在明显差异。

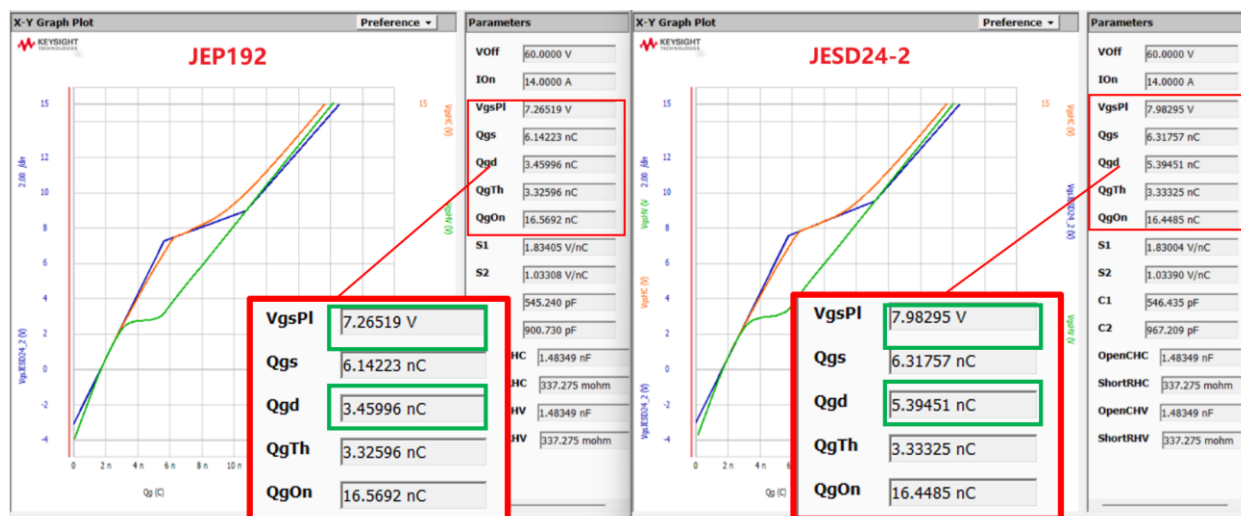


图 35. B1505A 基于新旧规范测试同一 SiC 器件的结果

实测分析——两种测试方法的对比

Q_g 既可以使用动态测试分析仪测量，又可以使用静态参数分析仪测试，两者的结果有可比性么？这是部分工程师会想到的问题。我们接下来会展示同一器件分别用两种方法的测试结果对比。如图 36 所示，使用 PD1500A 和 B1505A 分别对两款 SiC MOSFET 进行测试，可以看到，动静态方法结果总体是一致的，但略有差异，动态方法 Q_{g_pl} 要小于静态，总的 Q_{g_total} 也会小一些，且静态方法由于是高电流和高压分别测量两条曲线拟合而成，其拟合出来的平台斜率略小于一些。

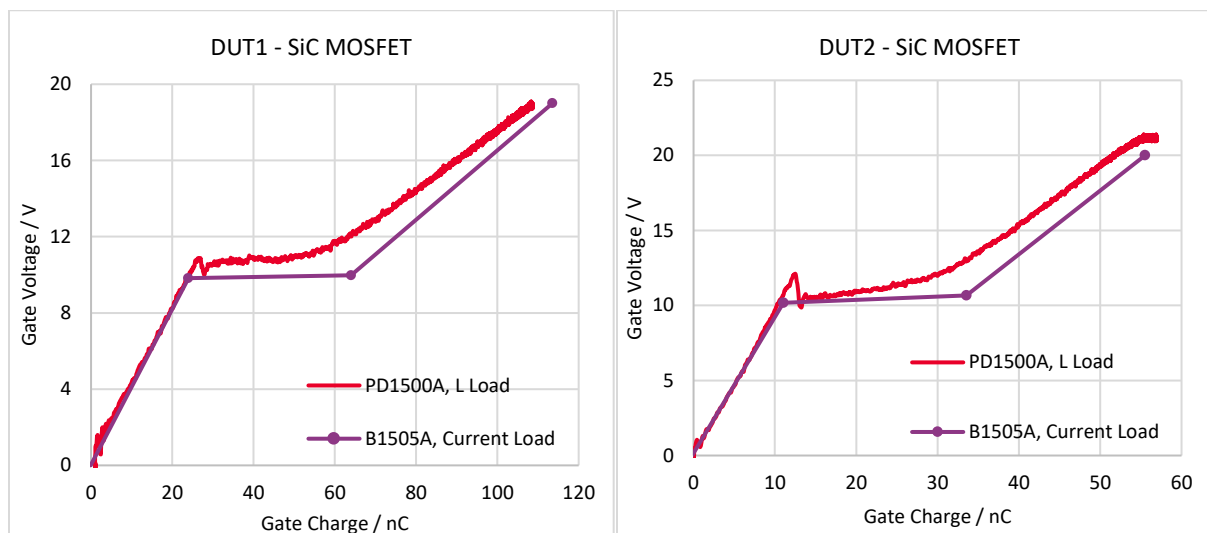


图 36. SiC 器件静态与动态 Q_g 测试结果对比

而在对比测试实验中的一款 Si IGBT，动静态得到的 Q_g 曲线就比较吻合，如图 37。

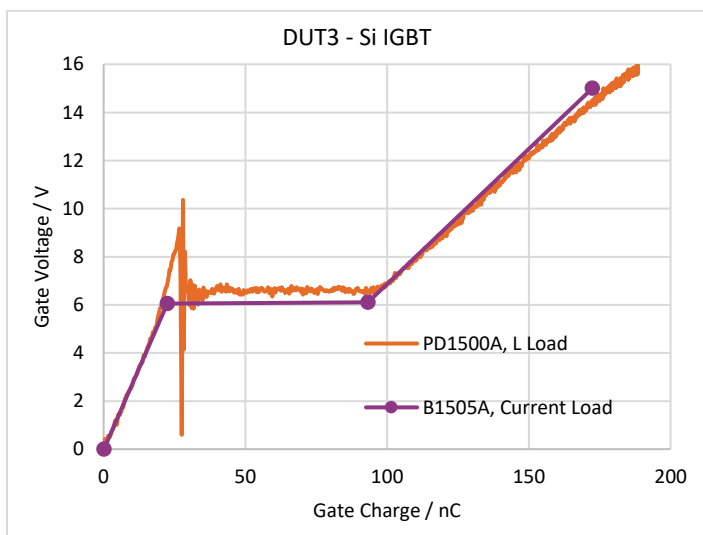


图 37. Si 器件静态与动态 Q_g 测试结果对比

由上述分析可以得到简单结论，动静态参数分析仪都能够测试 Q_g ，结果基本吻合，但针对 SiC 器件的测试，最好标明测试方法，以便得到更加一致的结论。

实测分析——负载类型的选择

测量 Q_g 时，除了方法差异，负载也可以有不同选择，那么不同负载会对 Q_g 测试结果产生影响么？如上述章节提到过的，是德科技静态参数分析仪 B1505A/06A 可以使用电流负载或者电阻负载进行 Q_g 测试，动态参数分析仪 PD1500A/PD1550A 可以使用电感负载或者电阻负载进行测试，我们分别针对三款被测件搭配不同负载做了 Q_g 测试，并把结果展示在下面。

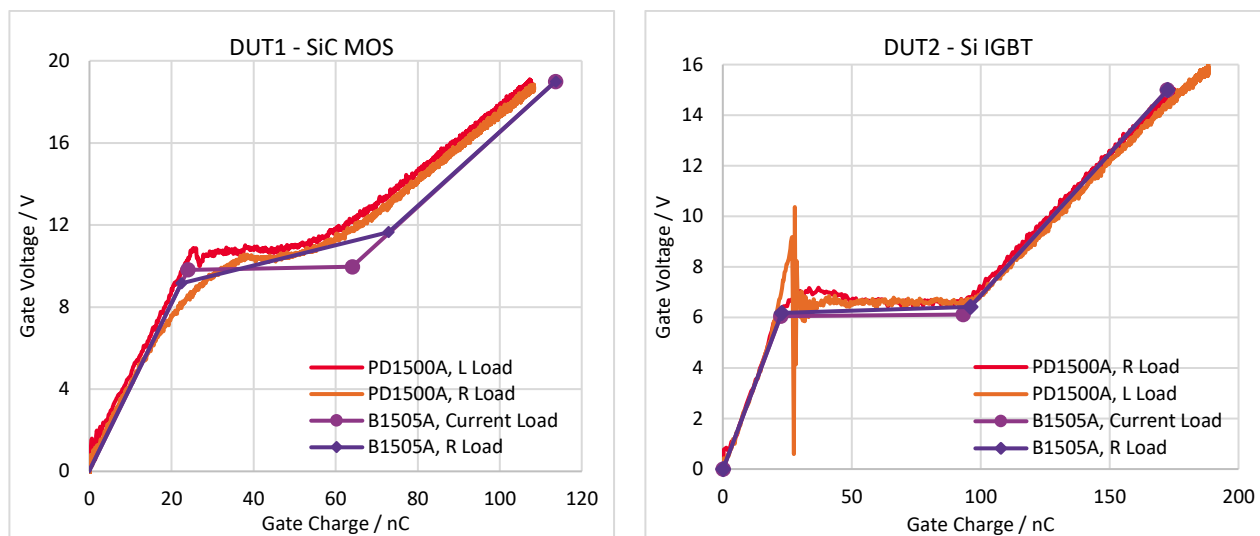


图 38. 不同负载测试结果对比

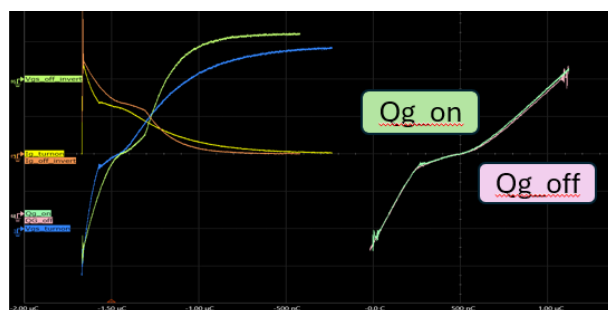
如图 38 所示，SiC 器件使用动态方法测试 Q_g 时，电阻负载和电感负载的总体曲线基本一致，电阻负载虽然更平滑，震荡小，但也不容易找到两曲线的拐点，不利于准确得到 Q_{gd} 结果，因此更推荐用电感负载。静态方法中，电流负载与电阻负载总体曲线也基本吻合，但米勒平台部分，电阻负载拟合的斜率较高，电流负载略偏低些，相比来讲更推荐使用电流负载来测试。

实测分析——SiC 器件迟滞效应对开启和关断 Q_g 的影响

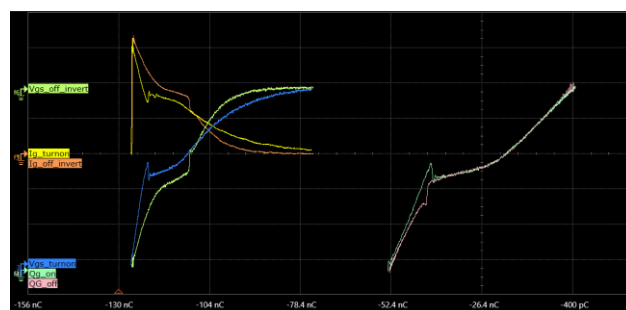
规范 JEP192 虽然提到了 SiC 器件的开启 Q_g 和关断 Q_g ，在米勒平台部分可能出现迟滞效应，但并不要求测量关断 Q_g 。本文出于研究目的，我们也使用是德科技的动态参数测试系统对开启和关断 Q_g 做了一些的测试。

本文共测试了如图 39 所示的四种不同的 SiC MOSFET，并使用示波器的处理功能得到四组 Q_g 曲线。每组曲线左边是 I_{g_on} , $I_{g_off_invert}$ 和 V_{g_on} , $V_{g_off_invert}$ 曲线，右侧则是经 XY 变换得到的 Q_{g_on} 和 Q_{g_off} 的对比。

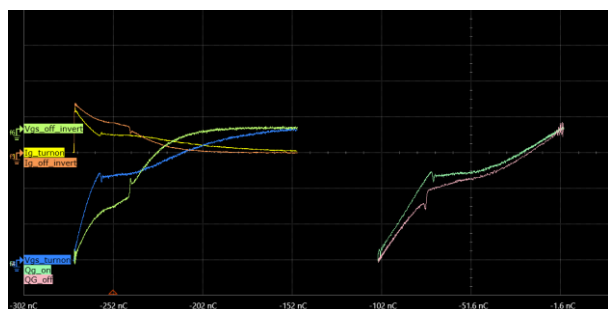
可以看到 I_g 和 V_g 的开启和关断时域波形是不一致的，这也在意料之中，因为开启和关断的过程并不相同。对比 Q_{g_on} 和 Q_{g_off} 曲线，首先 Q_{g_total} 一致性都较好，如图 39.a 所示，也就是 $Q_{g_on_total}$ 基本上等于 $Q_{g_off_total}$ ，但观察并没有预期的迟滞现象，这与 JEP192 预期有所差别的，也就是 SiC 器件的阈值并没有因为 μs 级的脉冲压力，而产生偏移。这种情况在某些条件下可能会发生，但在本例中没有观察到。



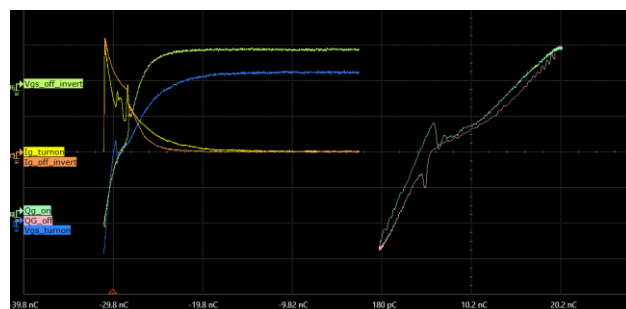
a. DUT1



b. DUT2



c. DUT3



d. DUT4

图 39. 开启和关断 Q_g

总结

新能源领域的快速发展大大推动了第三代功率半导体的相关应用。栅极电荷 Q_g 是功率半导体器件动态参数中的重要指标之一，它直接影响了功率器件在动态工作场景中的开关时间及驱动损耗等，是提高功率器件工作效率的重要因素。但由于 SiC 为代表的三代半导体开关速度快，栅极电荷小，以及存在开关迟滞效应等，使栅极电荷测试的一致性、可靠性、重复性很难保证。

本文针对 SiC 栅极电荷测试的特点，介绍了栅极电荷的两种主流测试方法，使用静态和动态测试设备测量栅极电荷的方法。并分析了不同方法的特点，详细阐述了影响栅极电荷测量准确性的各种因素，总结了测试注意事项和测量技巧。再通过相关新、旧测试标准的解读来进一步了解新器件特点和新旧规范差异。最后，通过基于是德科技功率器件动、静态参数测试系统的大量比对测试及数据分析，给大家展示如何更准确高效地测量栅极电荷。

测试设备对于确保结果的准确性和可靠性也起着至关重要的作用。本文介绍的所有测试结果均使用是德科技静态参数分析仪 B1505A / B1506A 和动态参数分析仪 PD1500A / PD1550A 得到。是德科技在功率半导体行业深厚的专业知识以及对测量技术的全面理解确保了测试数据的准确性和可靠性。

是德科技为创新者提供强大解决方案，助力探索、设计和实现创新技术，创造最佳产品体验。有关是德科技产品、应用或服务的更多信息，请访问 www.keysight.com



本信息如有更改，恕不另行通知。© 是德科技，2024，美国发行，
2024年12月13日，3124-1871.CHCN