

第 4 代 SiC MOSFET

分立器件的特性

和电路设计的注意点

应用笔记

Rev.001

【注意】

这份应用笔记中记载的评估数据等是在ROHM的
同一条件下评测的结果作为参考展示。

敝司对这份应用笔记中展示的特性不作任何保证。

目录

1 前言.....	3
1.1 关于本应用笔记	3
1.2 第 4 代 SiC MOSFET 的开发目标	3
2. 第 4 代 SiC MOSFET 的特性	4
2.1 单位面积导通电阻(RonA)	4
2.2 $V_{DS}-I_D$ 特性	5
2.3 栅极驱动电压和导通电阻	6
2.4 导通电阻的温度系数	7
2.5 $V_{GS}-I_D$ 特性	7
2.6 Turn on/Turn off 特性	8
2.7 容量特性	10
2.8 内部栅极电阻	11
2.9 开关特性与温度的关系	12
2.10 体二极管的恢复特性	12
2.11 开关损耗与栅极电压的关系	13
2.12 短路耐量	14
3. 栅极驱动	15
3.1 SiC MOSFET 用栅极驱动 IC	15
3.2 推荐驱动电压($V_{G(on)}$)	15
3.3 外置栅极电阻(R_{G_EXT})的选择	15
3.4 死区时间(t_{DT})设计	15
3.5 Self turn on 措施	15
3.6 负浪涌抑制措施	15
3.7 推荐的 Layout	15
4. 第 4 代 SiC MOSFET 的可靠性	15
5. 分立器件的评估板 5.1 第 4 世代 SiC MOSFET 分立器件评估电路板	17
6. 第 4 代 SiC MOSFET 产品阵容	21
7. 总结	22

1. 前言

1.1 关于本应用笔记

近年, SiC MOSFET 在电力电子行业的应用正在迅速普及。由于 SiC MOSFET 的高耐压和高速开关的优势, 使其适用范围飞跃性地扩张。ROHM 早在 2010 年(全球第一)就成功地实现了 SiC MOSFET (平面结构) 量产化。在 2015 年采用沟槽结构, 实现了产品(第 3 代)的大幅度小型化。ROHM 作为 SiC 的龙头企业, 持续保持着技术创新。这次, 进一步进化 ROHM 独有的沟槽技术, 实现了“第 4 代”SiC MOSFET 的量产 (Figure 1-1)。

在本应用笔记中, 说明了第 4 代 SiC MOSFET 的特点, 详细解说了最大限度发挥其性能的使用方法。另外, 关于旧产品的详细信息, 已在“SiC 功率器件&模块应用笔记 Rev.003”中总结(*1)。除本应用笔记外, 还准备了许多帮助熟练使用 SiC MOSFET 的技术资料 (*1~*21)。同时在 ROHM 官方网站开放了针对第 4 代 SiC MOSFET 的 Web 仿真“ROHM Solution Simulator”。请好好利用。



Figure 1-1. ROHM SiC MOSFET 开发历程

1.2 第 4 代 SiC MOSFET 的开发目标

第 4 代碳化硅的开发主要着力于以下 3 点：

- 低损耗：行业顶级的单位面积导通电阻（RonA）和高速开关；
- 提高易用性：+15V~+18V 的栅极驱动电压和不要负压；
- 高可靠性：高短路耐受能力。

首先, 关于“低损耗”：由于 MOSFET 的晶胞小型化等, 关键指标之一的“单位面积导通电阻：RonA”与第三代产品相比降低了 40%。通过优化器件的结构以降低寄生电容, 与传统产品相比, 导通损耗与开关损耗大幅度降低。

其次, 关于“提高易用性”：相对于第 3 世产品的 $V_{G(ON)}=18V$ 驱动, 用与硅(Si)MOSFET 同等规格的 $V_{G(ON)}=15V$ 就可以驱动。这样使得用 SiC 替换 Si-MOSFET 变得更加容易, 极大提高了客户电路设计上的灵活度。而且, 为了抑制 Self turn on, 通过优化器件的栅极电容、以及提高栅极阈值电压的设计, 使器件在关断时不需要负压。这样简化了驱动电路, 并且通过最小化电路规模, 使电路成本降低。

至于“高可靠性”：尽管降低了 RonA, 但确保了与第 3 代产品同等或更高的短路耐受能力^{*}。（一般情况下随着 RonA 的降低短路耐受能力会下降）。可以说这是放心使用单位面积电流密度增大的 SiC MOSFET 的非常重要的特性。

(※请注意我们并不保证)

如上所述, 第 4 代产品与传统产品相比较, 由于显著提高了产品的性能、易用性、可靠性等, 我们相信我们能够解决客户的设计难点。另外, 我们不仅仅提供第 4 代产品的分立器件和模块产品, 也可以供应晶圆或芯片。关于产品阵容等详细资料, 请随时联络我司的销售窗口。

从下一章开始, 我们将详细说明第 4 代 SiC MOSFET 优秀的器件特性。

2. 第 4 代 SiC MOSFET 的特性

2.1 单位面积导通电阻(RonA)

SiC 的介电击穿场强是 Si 的 10 倍，因此可以实现低电阻率和薄漂移层高耐压。由于这个原因，和同样耐压规格进行比较，可以实现单位面积导通电阻(RonA:单位面积的导通电阻)小的器件。如 Figure 2-1 所示，击穿电压 650V 的器件进行比较，在相同的导通电阻条件下，SiC MOSFET 芯片面积大约是 Si-MOSFET 的 1/100、超级结 (Super Junction: SJ) MOSFET 的 1/10，在实现比传统器件更小的封装且更低的导通电阻的同时，栅极电荷 Qg、容量等也变小，对开关特性非常有利。

目前、一般只有最高 900V 的超级结 MOSFET 产品。即使在 1700V 以上耐压，SiC MOSFET 也可以实现低导通电阻。此前，为了实现 1700V 以上的耐压，需采用像 IGBT 一样的双极型器件结构(导通电阻低，但开关速度慢)。但现在 SiC 可作为兼具低导通电阻、高耐压和高速开关的优秀器件使用。

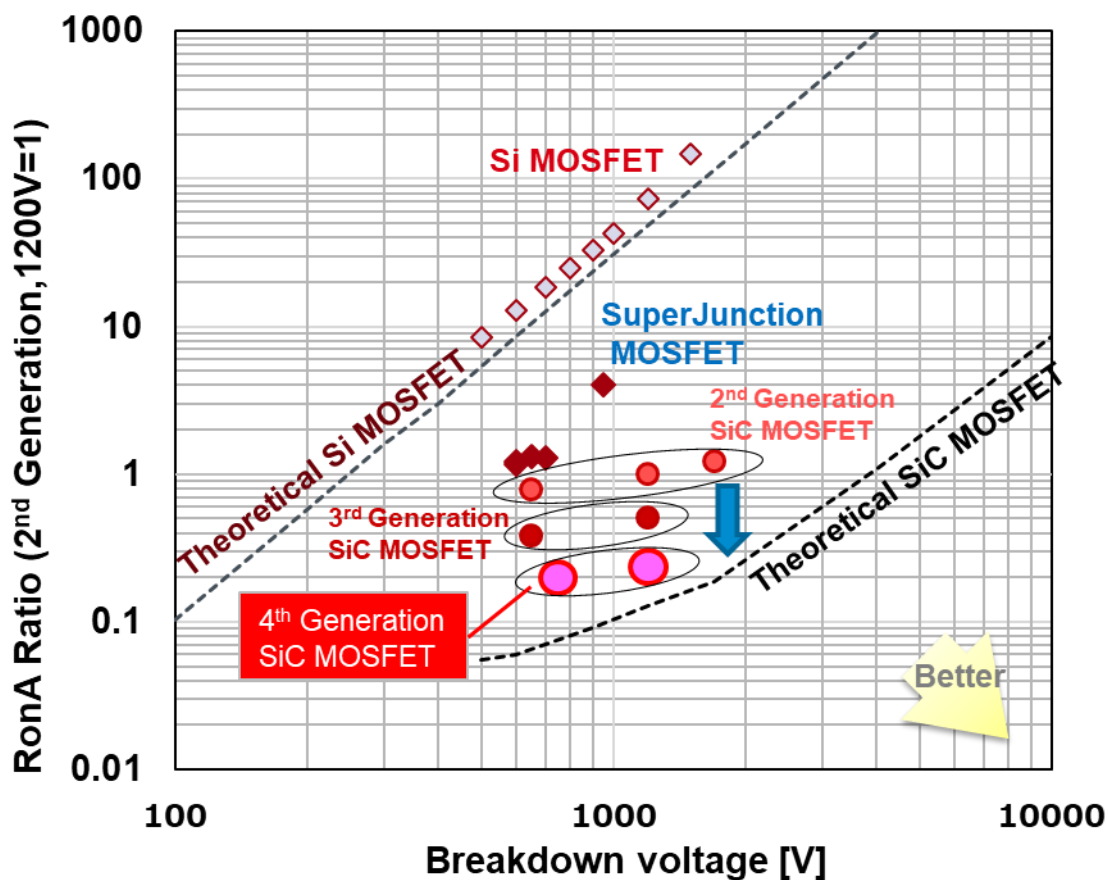
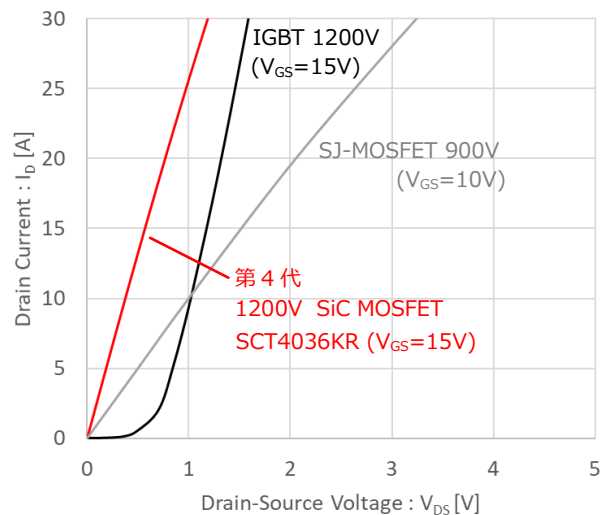
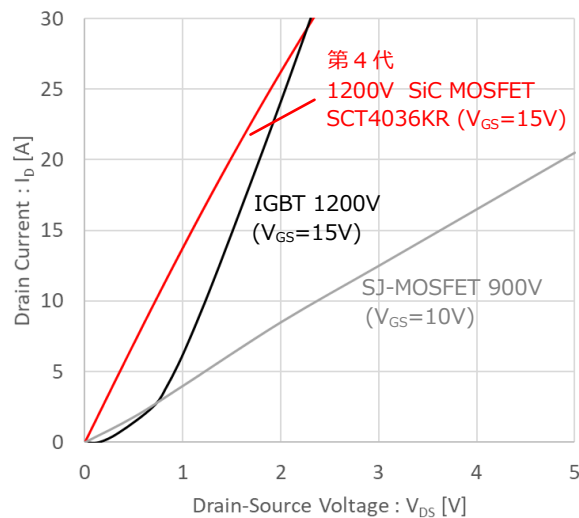


Figure 2-1. 单位面积导通电阻 RonA 的比较

2.2 $V_{DS}-I_D$ 特性

一般来说, MOSFET 在到达饱和区之前是电阻区, 因此会产生与漏极电流 I_D 成正比例的漏-源极间电压 V_{DS} 。而由于 IGBT 具有 PN 结, 因此要产生集电极电流 I_C , 集电极-发射极电压 V_{CE} 必须超过 PN 结电位。因此, 正如 Figure 2.2 所示的 $V_{DS}(V_{CE}) - I_D(I_C)$ 特性, $I_D(I_C)$ 越小, MOSFET 的导通损耗越低。

而且, SiC MOSFET 和 SJ-MOS 相比较, 不只是导电电阻低, 由于温度上升导致的电阻上升率小, 即使在高温条件下, 也能保持较低的导电电阻。SiC MOSFET 这个特点, 使电路的热设计容易。Figure 2-2 是分别在常温和高温时, 展示第 4 代 SiC MOSFET (1200V 36m Ω : SCT4036KR) 和 IGBT、SJ-MOSFET 的 $V_{DS}-I_D$ 特性。

(a) $T_a=25^\circ\text{C}$ (a) $T_a=150^\circ\text{C}$ Figure 2-2. 各个器件的 $V_{DS}-I_D$ 特性 (常温和高温)

2.3 栅极驱动电压和导通电阻

SiC MOSFET 的漂移层电阻低于 Si-MOSFET，但在当前技术水平下，MOSFET 沟道中的载流子迁移率较低，导致沟道电阻高于 Si-MOSFET。因此，栅极电压 V_{GS} 越高，导通电阻越低（在 $V_{GS}=18V$ 或更高时逐渐饱和）。

在 Figure 2-3(b)、展示了第 4 代 SiC MOSFET SCT4026DR 的 $V_{GS}-R_{DS(on)}$ 特性。如曲线所示、SiC MOSFET 与 SJ-MOSFET 不同：即使沟道在导通的状态，根据 V_{GS} 值的不同值导通电阻变动很大。因此为了降低导通电阻充分发挥 SiC MOSFET 的性能，提升 V_{GS} 值是有效果的。

此外，当 V_{GS} 较低的条件下，导通电阻往往会随着工作温度的升高而降低。所以、在高温且低 V_{GS} 条件下并联使用、请注意防止一个器件的集中电流所导致的热失控。

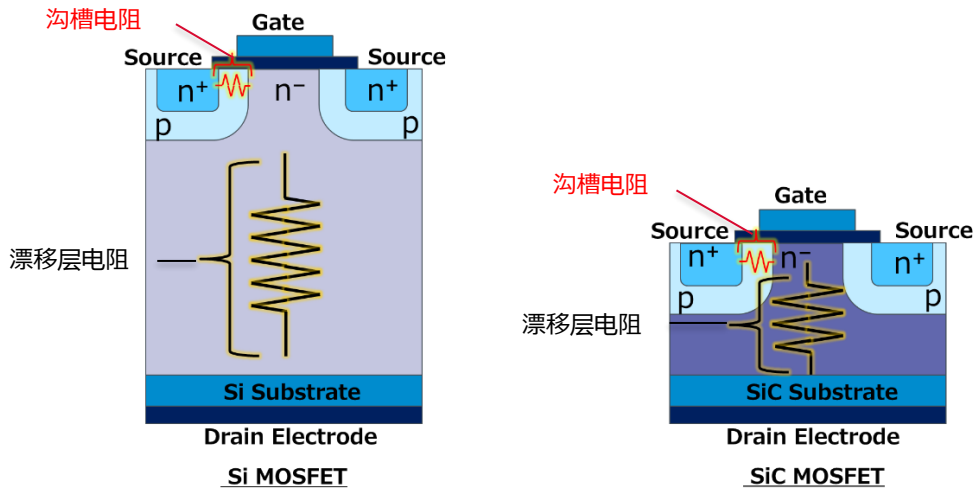


Figure 2-3(a). MOSFET 结构图

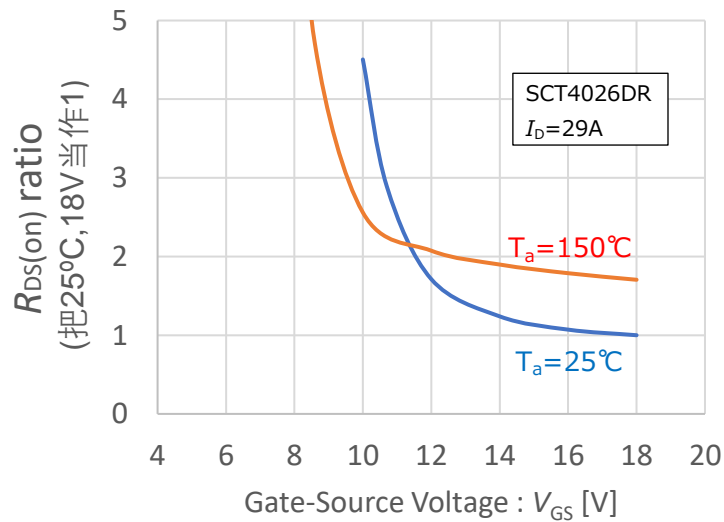


Figure 2-3(b). $V_{GS}-R_{DS(on)}$ 特性

2.4 导通电阻的温度系数

一般高温会使 SJ-MOSFET 的导通电阻增大很多。这是因为占器件的导通电阻中 90% 以上的漂移层电阻在温度上升 100°C 时, 电阻值大约增加到 2 倍。SiC 漂移层电阻也表现出和 Si 同样的温度特性、器件总体的电阻上升率一般情况下比 SJ-MOSFET 低。这是因为在 SiC-MOSFET 的总体导通电阻中漂移层电阻(由于温度上升, 电阻值上升部分的电阻)占的比例小。

而且, 和其他半导体器件一样: 基于 SiC MOSFET 的耐压、器件设计, 导通电阻的温度系数不同。例如由于 750V 产品的漂移层电阻成分占比小, 温度也系数较小。但是由于 1200V 产品的漂移层比较厚(电阻成分大), 导致温度系数比 750V 产品大。Figure 2-4 是 X 轴表示结温(T_j)、Y 轴表示电阻率(把 25°C 当作 1)的导通电阻的温度特性曲线。随着 T_j 的上升, 由于温度系数的差异, 1200V 产品导通电阻率大于 750V 产品。

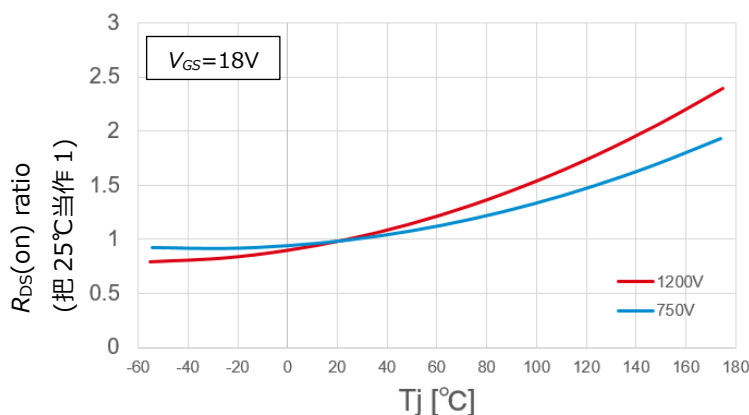


Figure 2-4. 第 4 代 SiC MOSFET 标准化 $R_{DS(on)}$ 的温度特性

2.5 $V_{GS}-I_D$ 特性

在 Figure 2-5 表示 SCT4036KR(1200V 36m Ω) 的 $V_{GS}-I_D$ 特性。左右的曲线是相同的数据、左侧以 Log 函数表示纵轴、右侧以 Linear 函数表示纵轴。从中可以看出, 第 4 代 SiC MOSFET 的阈值电压在 $I_D=10\text{mA}$ 时在室温下约为 4V(常关)。而且, 为了通过 5A 以上的电流, 在室温下需要约 7V 以上的栅极电压。通常, 阈值电压随着温度升高而降低。

(T_{vj} : Virtual junction temperature)

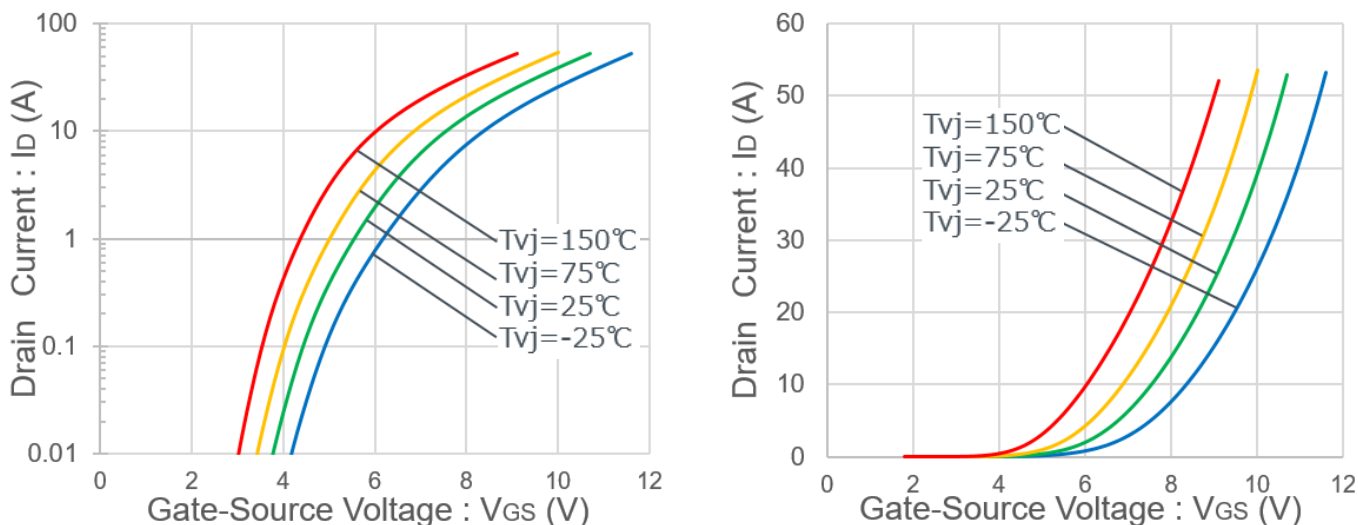


Figure 2-5. $V_{GS}-I_D$ 特性(SCT4036KR)

2.6 Turn on/Turn off 特性

使用相同导通电阻等级的第 4 代 SiC MOSFET SCT4036KR 和第 3 代产品 SCT3040KR 构建半桥电路，并通过感性负载双脉冲测试(DPT)比较开关特性。试验电路如 Figure 2-6 所示。

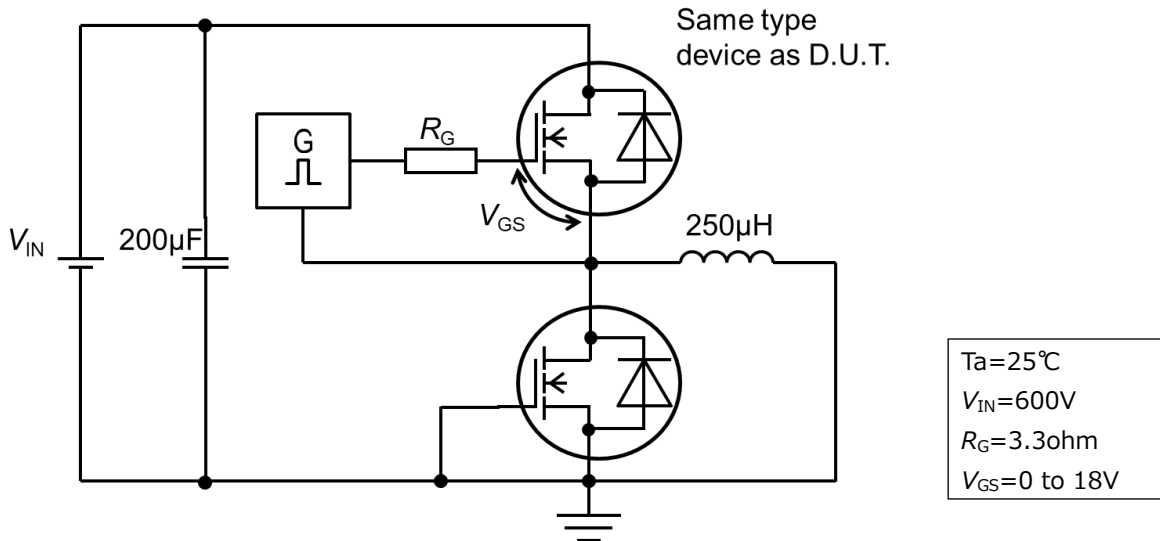


Figure 2-6. 双脉冲试验电路

在 Figure 2-7 和 Figure 2-8 展示了双脉冲试验的开关波形和损耗的比较(Low-side 侧)。从下图可以看出，第 4 代产品比第 3 代产品的开关速度快、而且也降低了开关损耗。这样的结果是因为在第 4 代产品中，降低了影响开关速度的内部栅极电阻值、以及 $C_{oss} \cdot C_{rss}$ 的容量。

另外关于容量和内部电阻、在 2-7 节以及 2-8 节有详细说明。

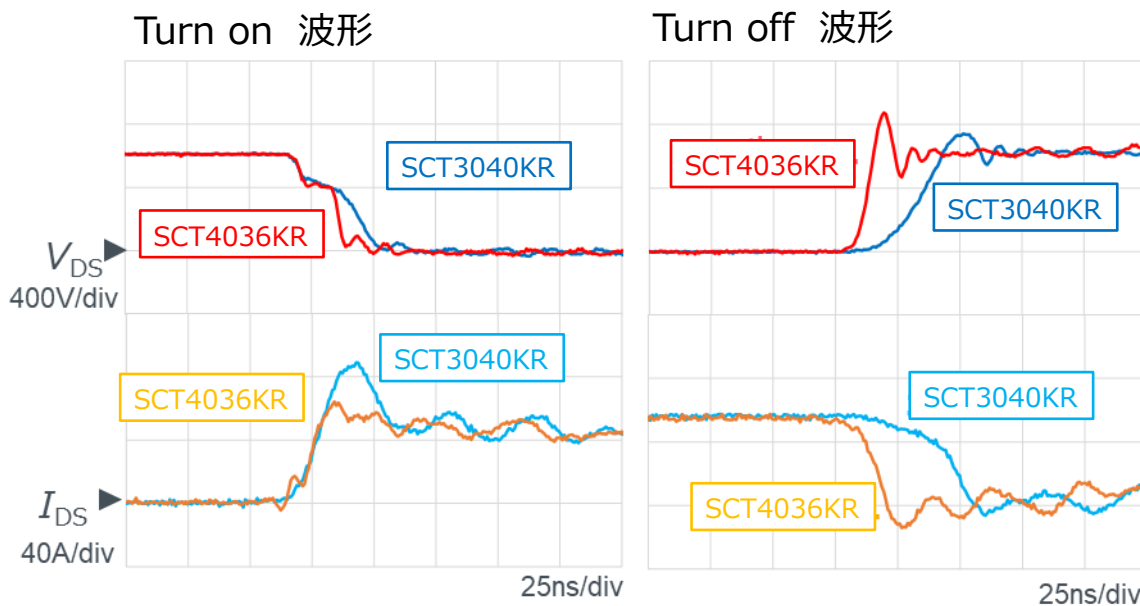


Figure 2-7. Turn on/Turn off 波形比较

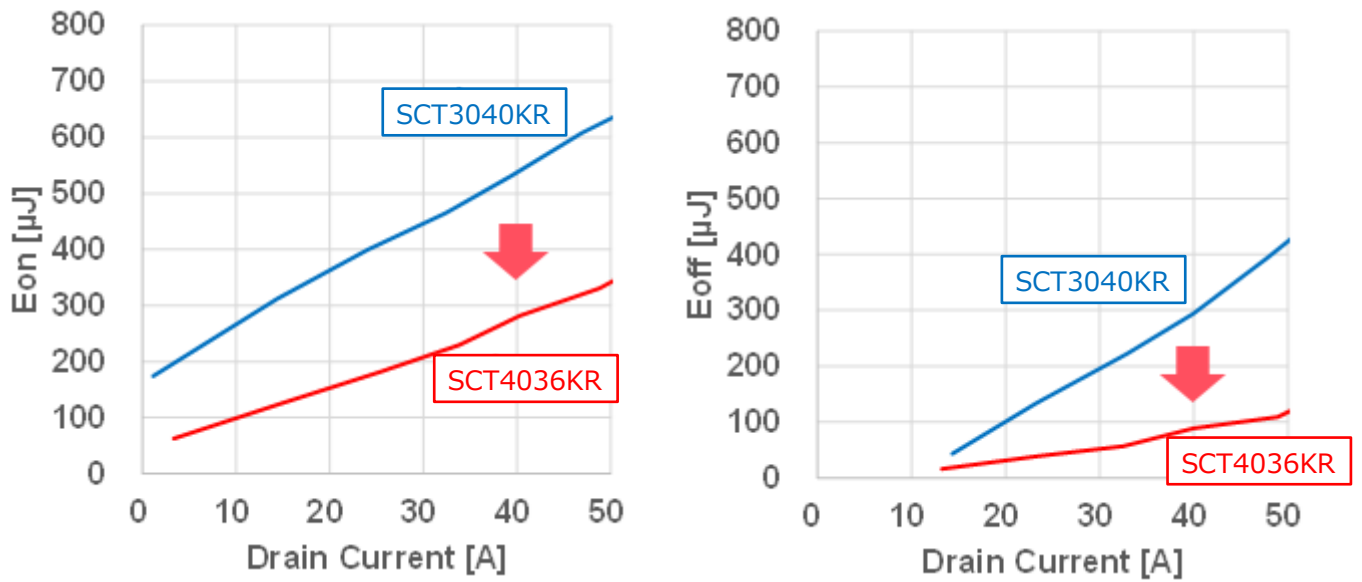


Figure 2-8. 开关损耗的比较

2.7 容量特性

如 2.1 所述、与第 3 代产品相比较、第 4 代产品显著降低了的单位面积导通电阻。正因如此、即使相同导通电阻的产品、第 4 代产品的元件尺寸更小。一般情况下 SiC MOSFET 的元件尺寸变小的话，寄生电容 C_{oss} 和 C_{rss} 也变小(Figure 2-9)。结果如 2.6 节所说的一样，开关速度提高。

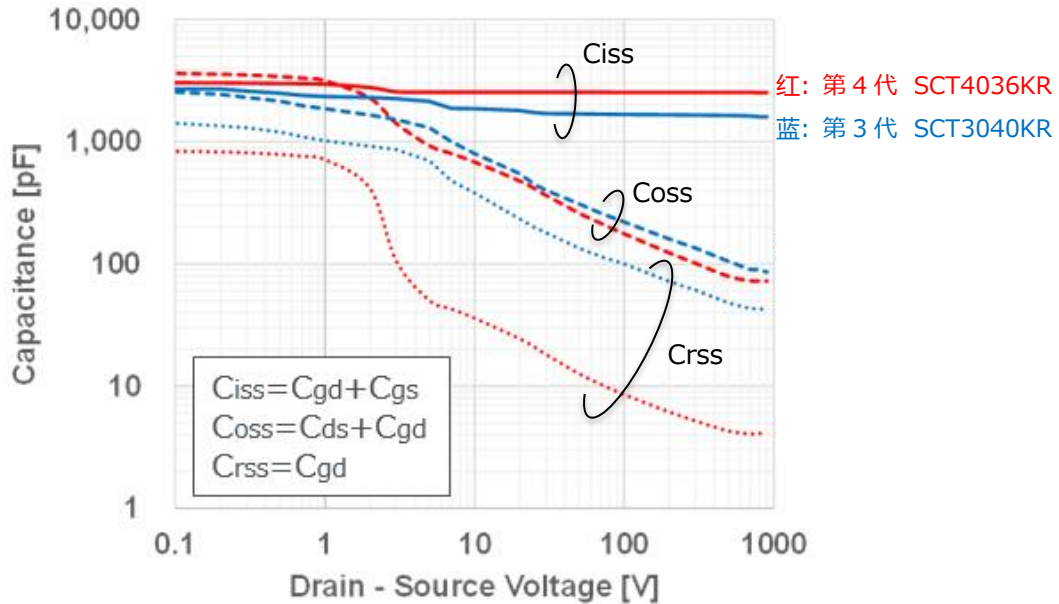


Figure 2-9. 第4代、第3代容量比较

而且第 4 代产品不仅仅是单单降低了 C_{oss} 和 C_{rss} 的容量值。由于也大幅度降低了 C_{rss}/C_{iss} 的容量比(Figure 2-10)、高速开关时发生 Self turn on 的风险也降低了。

Self turn on 的示意图如 Figure 2-11 所示。在 off 状态 MOSFET 的漏极-源极之间，在开关过程中出现陡峭的 dv/dt 时、栅极-源极间会产生和寄生电容 C_{gd}/C_{gs} 的容量比(近似 C_{rss} と C_{iss} 电容比)对应的电压。这时如果栅极-源极间的电压值超过 V_{th} 、就会错误地将 MOSFET turn on。这个现象被称作 Self turn on。

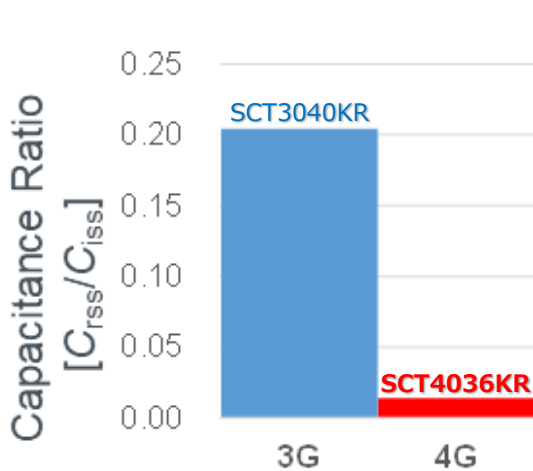


Figure 2-10. 降低 C_{rss}/C_{iss} 的容量比

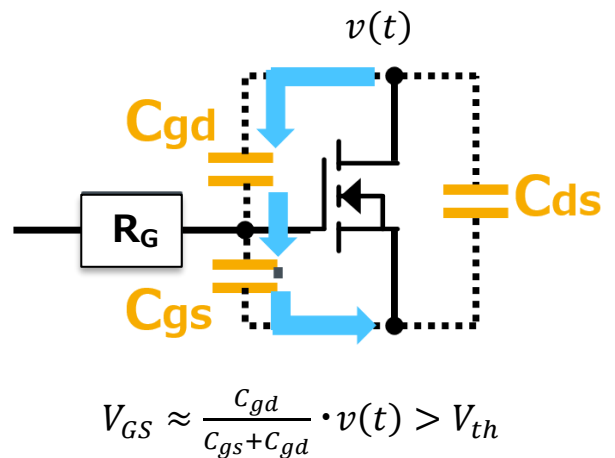


Figure 2-11. Self turn on 现象

2.8 内部栅极电阻

一般来说，对于相同结构的器件，器件尺寸越小，内部栅极电阻越高。但是、尽管第 4 代产品元件比第 3 代产品小，通过优化晶圆工艺和元件模型、能显著降低栅极电阻(约 1/6)。

驱动 MOSFET 的栅极时，如 Figure 2-12 所示。外部栅极电阻(R_{G_EXT} ：用于调整浪涌等)和内部栅极电阻(R_{G_INT} ：元件的栅极配线上的固有电阻)串联连接在栅极驱动器和栅极氧化膜之间。因此、 R_{G_EXT} 和 R_{G_INT} 的“和”越小，开关速度越快、开关损耗越小。

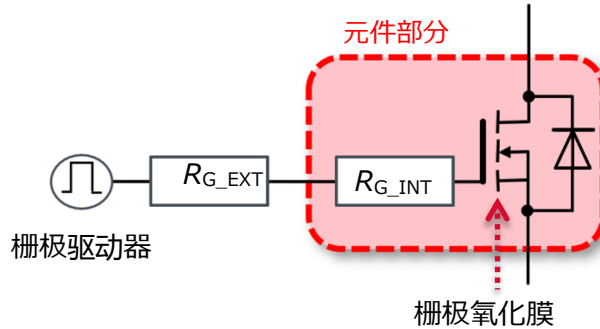


Figure 2-12. 外置栅极电阻“ R_{G_EXT} ”和内部栅极电阻“ R_{G_INT} ”

接下来的 Figure 2-13 是表示改变外置栅极电阻 R_{G_EXT} 、第 4 代产品和第 3 代产品的开关损耗的比较。评估方法是采用与 2.6 节一样的双脉冲试验。我们可以看到，即使使用相同的 R_{G_EXT} 驱动，第 4 代产品也可以显著降低开关损耗。这是由于如 2.7 节的说明一样，第 4 代产品的寄生电容和内部栅极电阻 R_{G_INT} 小、栅极电阻的总和($R_{G_INT}+R_{G_EXT}$)也变小、提高了开关速度。

另外开关速度由 R_G 的总和($R_{G_INT}+R_{G_EXT}$)决定， R_{G_INT} 变小、 R_{G_EXT} 的调整范围变大、可以灵活对应栅极浪涌的抑制或开关速度的改善。可以说这也是第 4 代产品的一大特点。

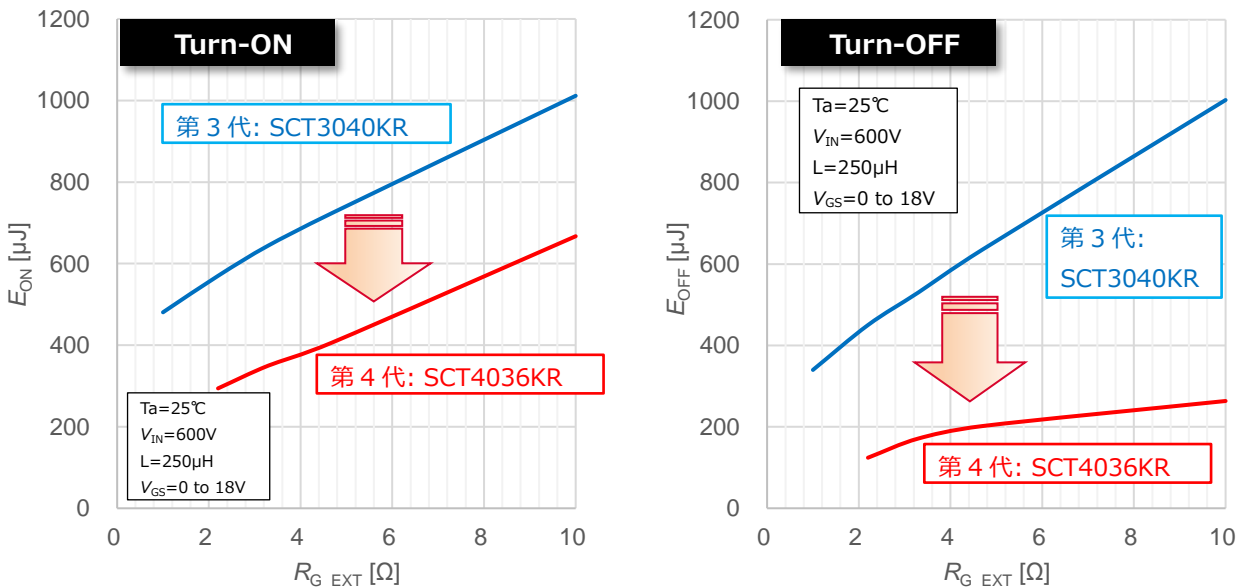


Figure 2-13. 开关损耗与 R_{G_EXT} 的关系比较 (第 4 代产品 vs.第 3 代产品)

2.9 开关特性与温度的关系

一般来说，半导体器件的开关速度高度依赖于寄生电容、可是由于 SiC MOSFET 的寄生电容几乎不随温度变化、开关损耗的温度特性也非常稳定。在 Figure 2-14 中表示了第 4 代 SiC MOSFET SCT4036KR 的开关损耗和温度的关系。从下图中可以看出，开关损耗相对于温度变化几乎是平坦的。

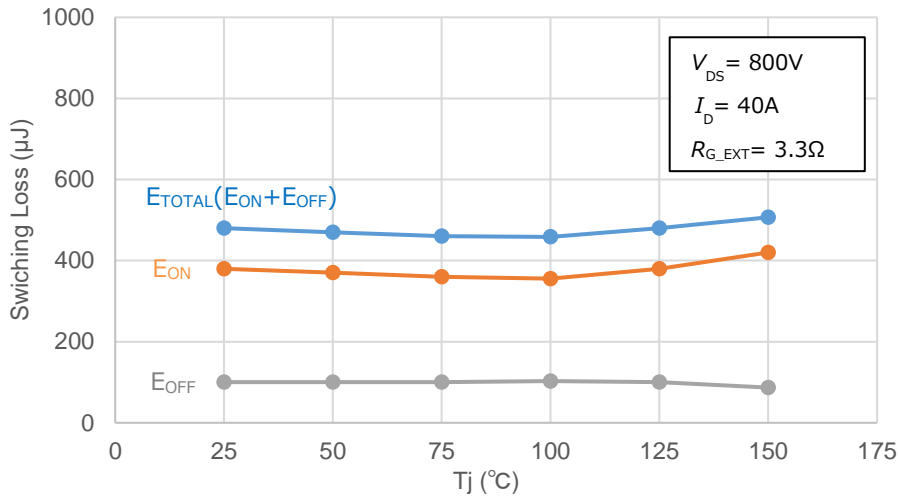


Figure 2-14. 开关损耗与温度的关系 (SCT4036KR)

2.10 体二极管的恢复特性

在 Figure 2-15 中展示了第 4 代产品和第 3 代产品的体二极管恢复特性比较。如“2.8 内部栅极电阻”所述，由于降低了内部栅极电阻、第 4 代产品的开关速度比第 3 代产品更快。一般来说，与之相反的是浪涌增大会导致恢复特性恶化。但从数据上来看，第 4 代产品的开关速度更快，恢复电流几乎没有增大。这意味着它可以为图腾柱 PFC 和逆变器产生恢复电流的各种桥式电路中的开关损耗显著降低做出贡献，还可以降低由恢复电流引起的故障风险和噪声。

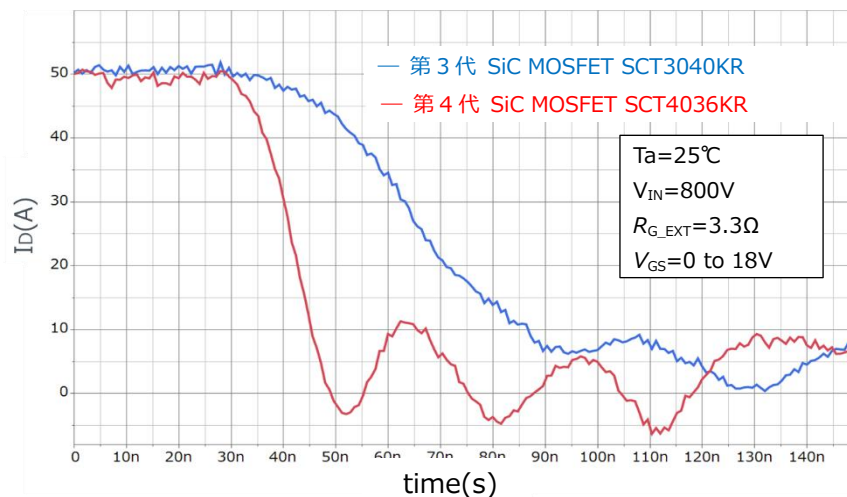


Figure 2-15. 体二极管的恢复特性比较

2.1.1 开关损耗与栅极电压的关系

由于栅极电压引起的开关损耗的差异如图 Figure 2-16 所示。Turn on 时的开关损耗 E_{ON} 随着驱动电压 $V_{G(ON)}$ 的提高而降低, $I_D=50A$ 时 18V 比 15 的开关损耗比小 1.6 倍。这是由于 $V_{G(ON)}$ 和平台电压 (在开关时, 米勒电容开始充放电的栅极电压值) 的电位差变大, 使栅极电流 $I_{G(ON)}$ 增大, C_{rSS} 的放电, 换而言之就是加快了漏极电压 V_{DS} 的下降速度 (Figure 2-17(a))。

另一方面, Turn off 时的开关损耗 E_{off} 几乎与 $V_{G(ON)}$ 的变化没有关系。Turn off 时平台电压 V_p 和栅极关断电压 (这时是 0V) 的电位差决定了对 C_{rSS} 充电的栅极电流 $I_{G(off)}$, 不受 $V_{G(ON)}$ 的影响。(参考 Figure 2-17(b): 从这个 $I_{G(off)}$ 公式可以清楚地看出, 因为 $V_{G(ON)}$ 不包括在公式中)。

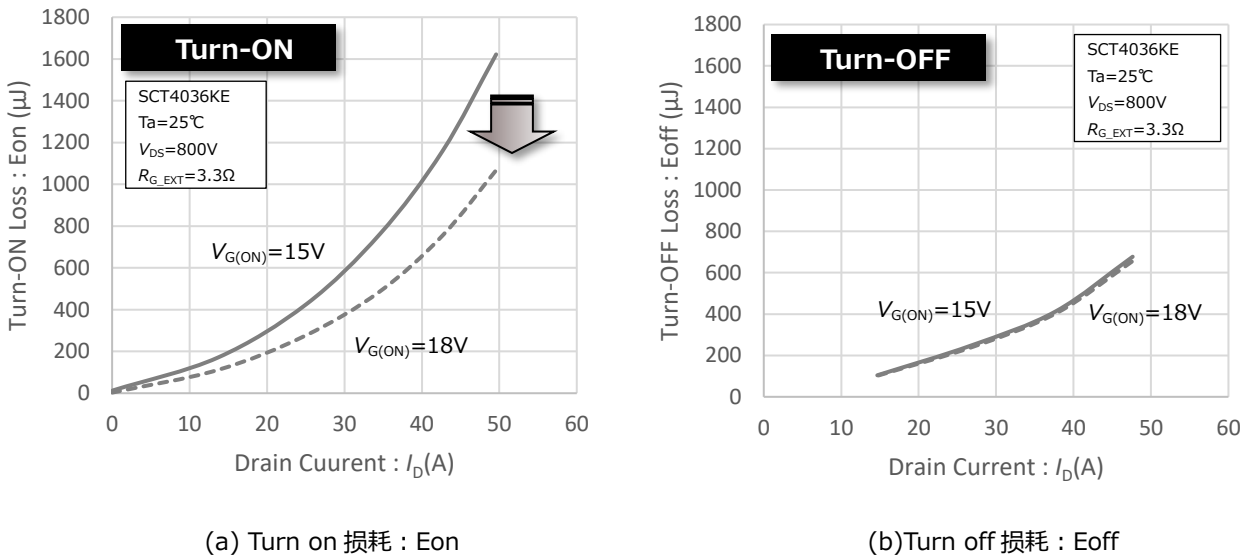


Figure 2-16. 开关损耗与 $V_{G(ON)}$ 的关系

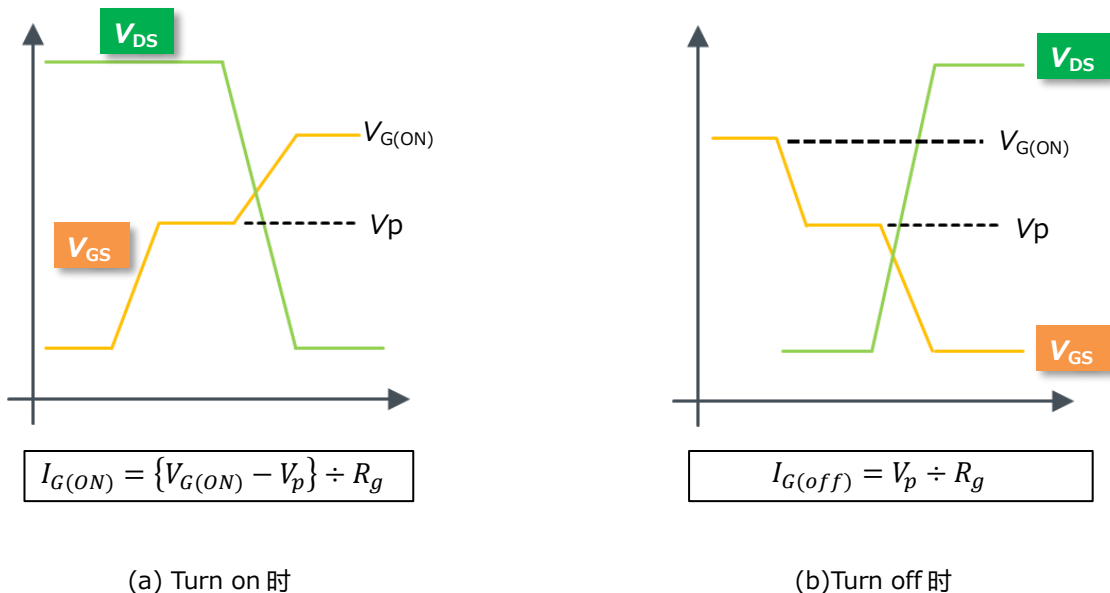


Figure 2-17. Turn on/off 时的栅极电流 I_G

2.12 短路耐量

第 4 代 SiC MOSFET 采用了独有的器件结构、打破了 RonA 和短路耐受时间的平衡、兼具低 RonA 和高短路耐受能力 (Figure2-18)。一般情况下降低 RonA 导致饱和电流增大、使短路耐受时间缩短。但是，由于和第 3 代 SiC MOSFET 相比，第 4 代 SiC MOSFET 的漏极-源极之间电流 I_D 的饱和电流低，抑制着短路期间的峰值电流。因此、能够打破 RonA 和短路耐受时间的平衡、成功确保了短路耐受时间(Figure2-19)。(图中所示的短路耐量是某种条件下的测量值。请注意，此数字并非保证值。)

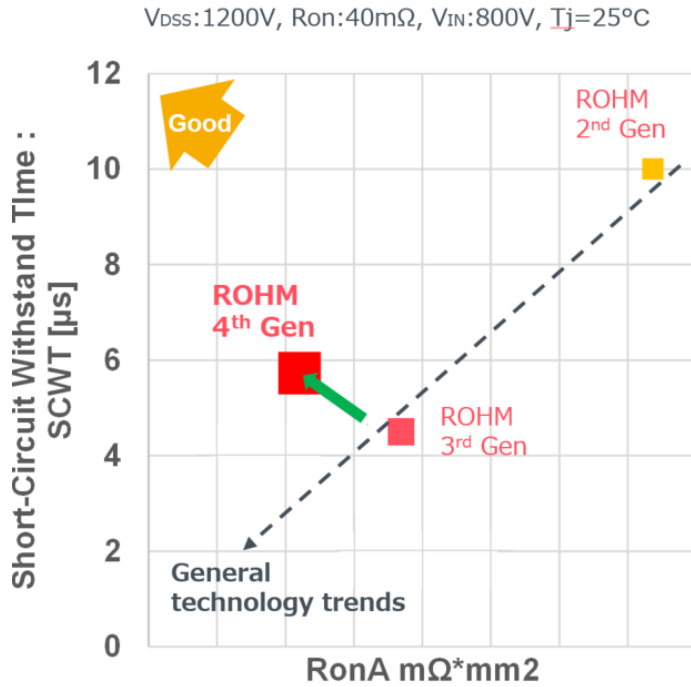


Figure 2-18. RonA vs 短路耐受时间

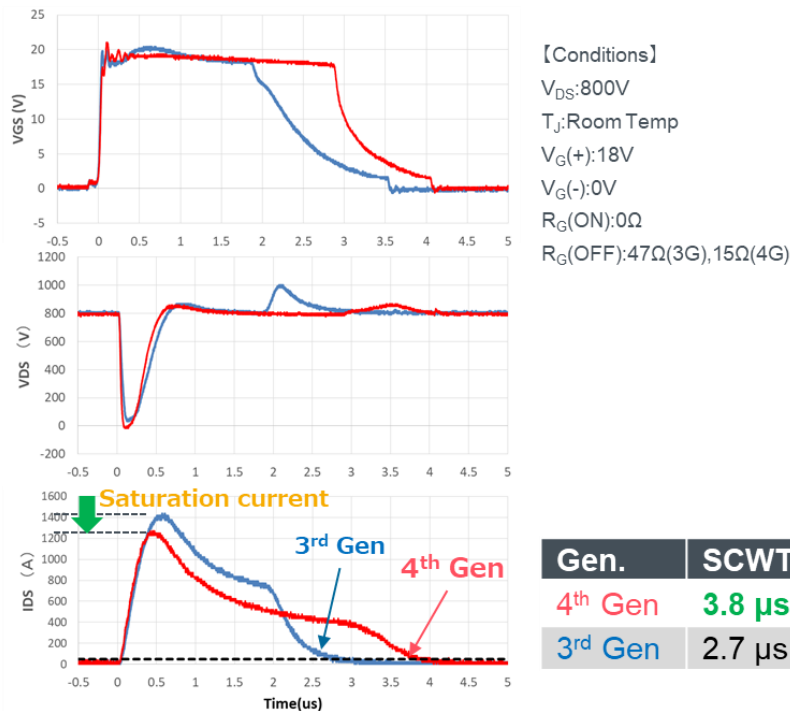


Figure 2-19 比较饱和电流(第 4 代 vs 第 3 代)

·3. 栅极驱动

4. 第 4 代 SiC MOSFET 的可靠性

可靠性试验的结果如 Table 4-1 所示。(民用和工业用途)

Table 4-1. 直插封装(TO-247N / TO-247-4L)的可靠性试验项目和结果

Product	MOSFET	Package	Through Hole Devices	Type	SCT4*** 6inch wafer
---------	--------	---------	----------------------	------	------------------------

1. Life Test

Test Item	Test Method/ Standard	Test Condition	Sample Size n [pcs]	Failure(s) Pn [pcs]
High Temperature Reverse Bias	$T_a = T_{jmax}$, $V_{DS} = V_{DSmax}$ JEITA ED-4701/100A-101A	1000 h	22	0
High Temperature Gate Bias	$T_a = T_{jmax}$, $V_{GS} = V_{GSmax}$ JEITA ED-4701/100A-101A	1000 h	22	0
High Temperature Gate Bias	$T_a = T_{jmax}$, $V_{GS} = V_{GSmin}$ JEITA ED-4701/100A-101A	1000 h	22	0
Temperature humidity bias	$T_a = 85^\circ\text{C}$, RH = 85%, $V_{DS} = 100\text{V}$ JEITA ED-4701/100A-102A	1000 h	22	0
Temperature cycle	$T_a = -55^\circ\text{C}$ (30 min) ~ $T_a = 150^\circ\text{C}$ (30 min) JEITA ED-4701/100A-105A	100 cycles	22	0
Pressure cooker	$T_a = 121^\circ\text{C}$, 203kPa [2 atm], RH = 100% JESD22-A102C	48 h	22	0
High Temperature storage	$T_a = 175^\circ\text{C}$ JEITA ED-4701/200A-201A	1000 h	22	0
Low Temperature storage	$T_a = -55^\circ\text{C}$ JEITA ED-4701/200A-202A	1000 h	22	0

2. Stress Test

Test Item	Test Method/ Standard	Test Condition	Sample Size n [pcs]	Failure(s) Pn [pcs]
Resistance to solder heat 1	Dipping leads into solder bath at $260 \pm 5^\circ\text{C}$. JEITA ED-4701/301-302A	10 s	22	0
Resistance to solder heat 2	Dipping leads into solder bath at $350 \pm 10^\circ\text{C}$. JEITA ED-4701/301-302A	3.5 s	22	0
Solderability	Dipping into solder bath at $245 \pm 5^\circ\text{C}$. JEITA ED-4701/301-303A	5 s	22	0
Thermal shock	$0 \overset{+5}{-0}$ (5 min) ~ $100 \overset{+0}{-5}$ (5 min) JEITA ED-4701/302-307B	100 cycle	22	0
Terminal strength (Pull)	Pull force = 20 N JEITA ED-4701/400A-401A	10 s	22	0
Terminal strength (Bending)	Bending Load = 10 N JEITA ED-4701/400A-401A	2 times	22	0

※ Failure criteria : According to the electrical characteristics specified by the specification.

Regarding solderability test, failure criteria is 95% or more area covered with solder.

※ Sample standard:[Reliability level: 90%][Failure reliability level(λ 1): 10%][C=0 decision] is adopted

And the number of samples is being made 22 in accordance with single sampling inspection plan with exponential distribution type based on MIL-STD-19500.



5.分立器件的评估板

5.1 第 4 世代 SiC MOSFET 分立器件评估电路板

ROHM 发布的第 4 代 SiC MOSFET(分立器件)评估电路板一览表如 Table 5-1 所示。它使用半桥配置评估开关特性，除了双脉冲测试之外，还可以采用最少的外围器件评估 buck 和 boost 拓扑。此外，调节开关速度、改变驱动电压，并提供栅极浪涌保护电路。

请参考在 ROHM 官方网站第 4 代 SiC MOSFET 的支持内容(<https://www.rohm.com.cn/products/sic-power-devices/sic-mosfet#easyPartFinder>)的详细信息。

Table 5-1. SiC MOSFET(分立器件)评估板一览表

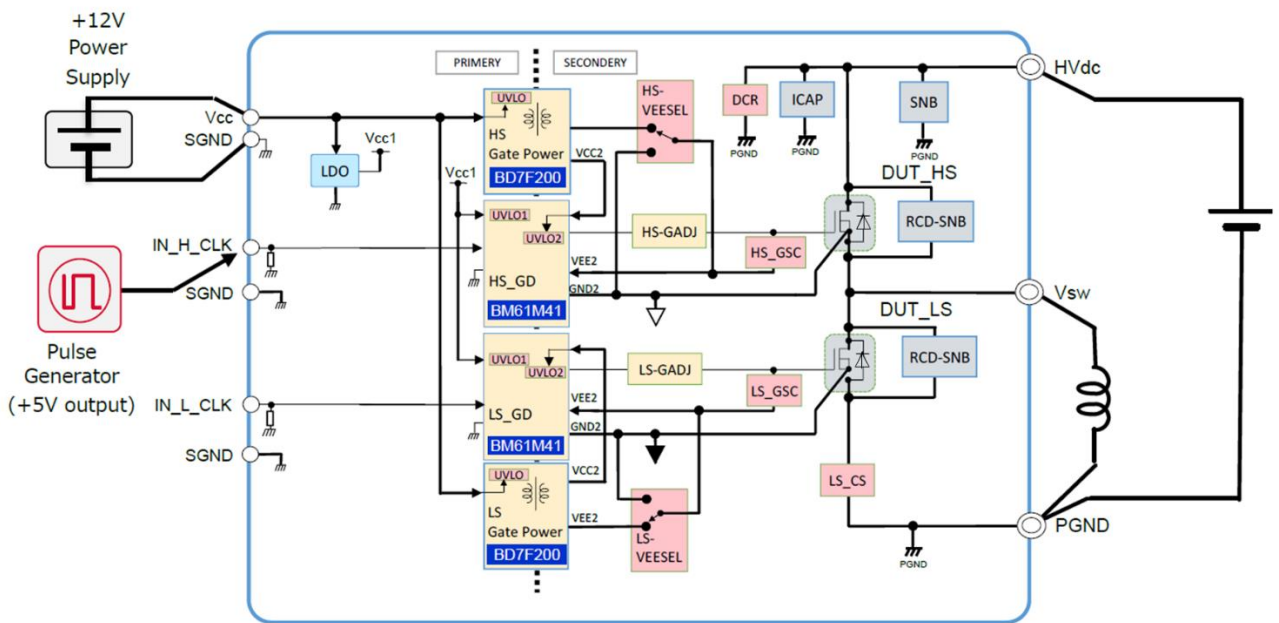
评估器件	外观	型号
TO-247N 第 4 代 SCT4xxxxxxxEseries		P04SCT4018KE-EVK-001
TO-247-4L 第 4 代 SCT4xxxxxxxR series		P05SCT4018KR-EVK-001

对使用评估电路板 P04SCT4018KE-EVK-001 和 P05SCT4018KR-EVK-001 做双脉冲试验进行说明。各自分别搭载器件 SCT4036KR、SCT4036KE(1200V 36mΩ)。Figure 5-1(a)是试验电路、(b)是测量场景、(c)是 MOSFET 的栅极驱动电路。

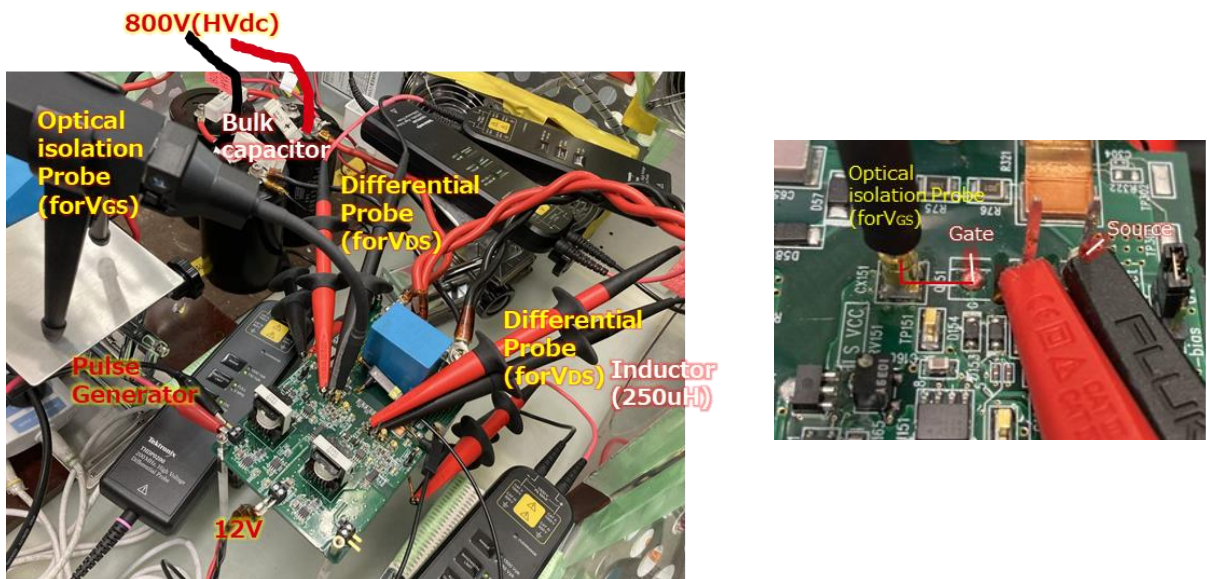
试验电路运行必要的设备、有(a)所示的控制电源(12V)、脉冲发生器(PG)、负载电感(250μH)、高压直流电源(V_{HVdc})等。由于 V_{HVdc} 到电路板有一定距离、在此次双脉冲试验连接了大容量电容器(Bulk capacitor)。由于在评估电路板上也安装了 10μF 薄膜电容、大容量电容器基本不需要、但建议根据实际使用条件连接。

就(b)所示的 V_{GS} 测量方法进行说明。通常使用隔离探头或者差分探头观察 MOSFET 的波形、可是由于 SiC MOSFET 的高速度开关速度、探头容易收到噪声的影响。因此、靠近器件安装连接器、使用不受噪声影响的光隔离绝缘探头进行测量。另外、如(c)的红色虚线中所示的元件是用于去除 MOSFET 的栅极-源极间发生浪涌的保护电路、其效果已经全部验证了。

此次实验中，高边(HS)侧 MOSFET 作为开关器件运行、低边(LS)侧作为续流二极管使用。V_{HVdc} 是 800V、按照 I_D 在 55A ~60A 的范围调整脉宽、观察 Turn on 和 Turn off 时的开关动作。波形如 Figure 5-2、5-3 所示。



(a) 测量电路模块图(P05SCT4018KR-EVK-001)



(b) 测量场景(P04SCT4018KE-EVK-001)

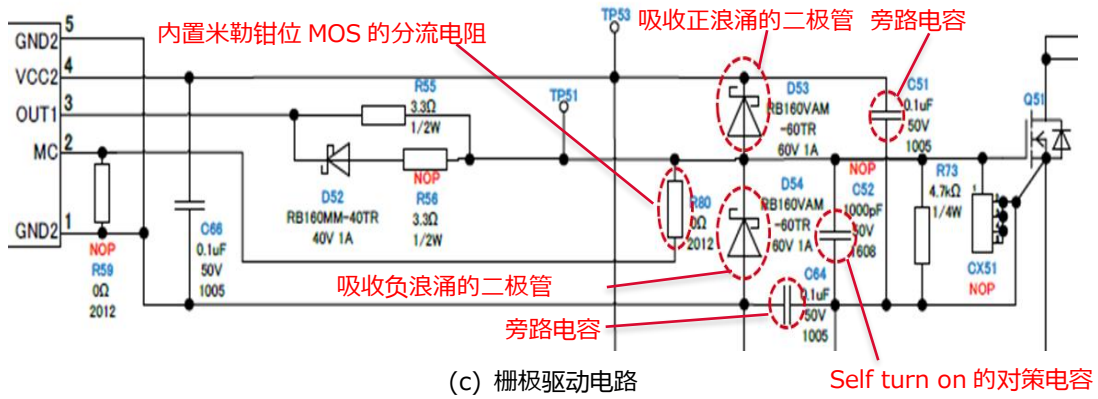
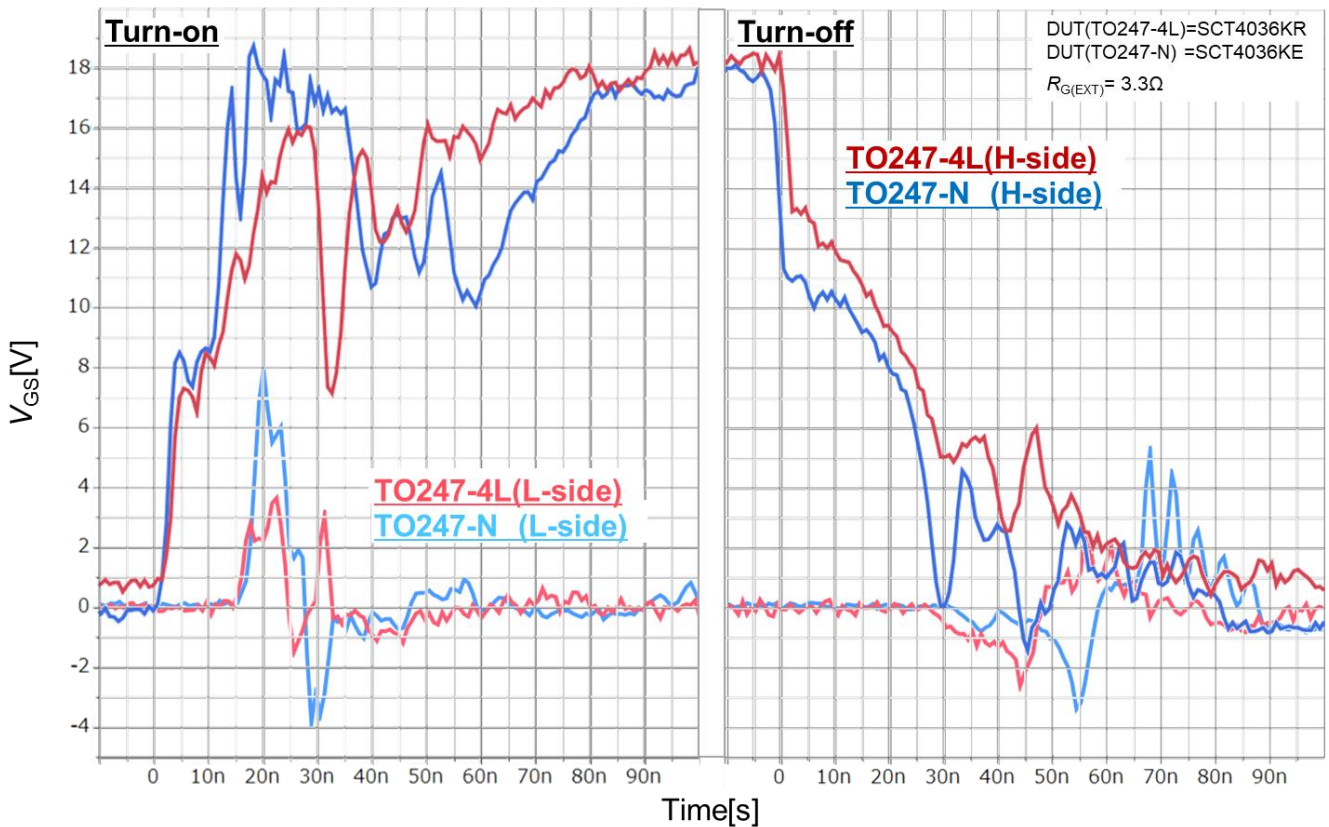


Figure 5-1. P04SCT4018KR-EVK-001 测量电路

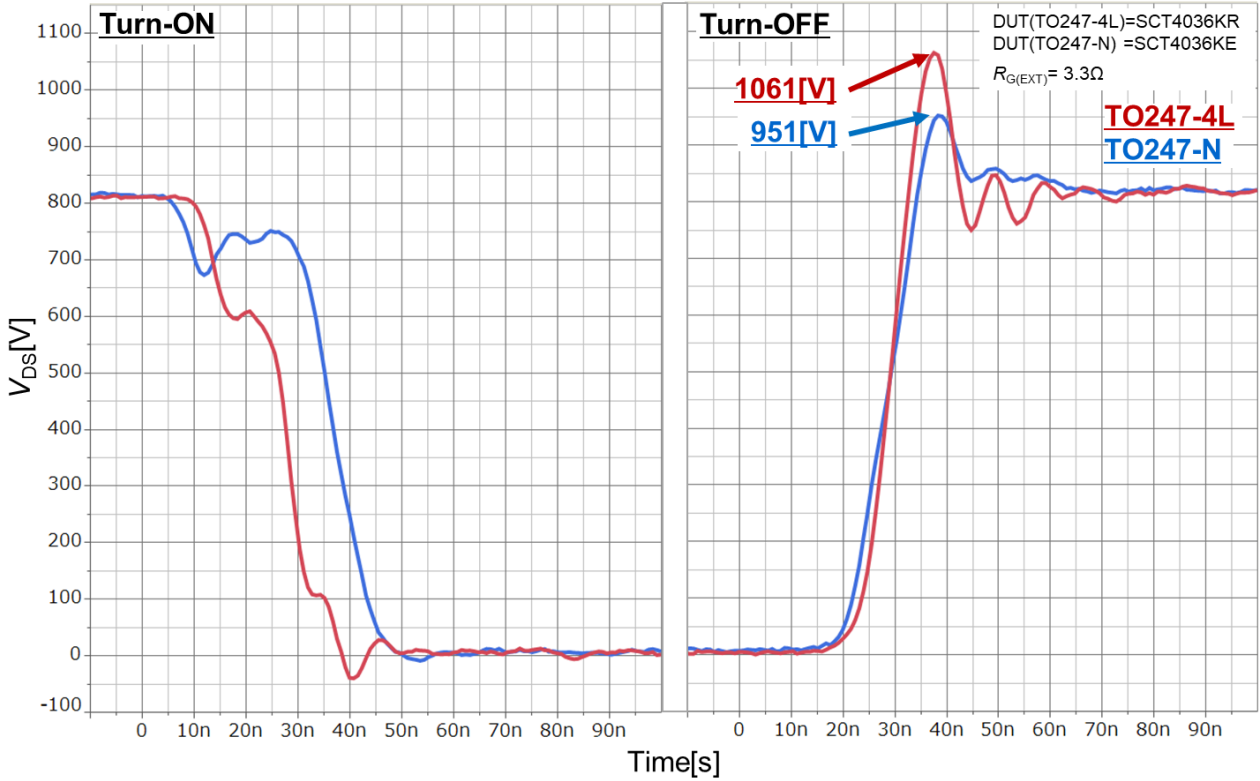
Figure 5-2(a)是 V_{GS} 波形、同图(b)是 V_{DS} 波形,图(c)是 I_D 波形。比较 SCT4036KE(TO-247N)和 SCT4036KR(TO-247-4L)。在图(a)中开关侧的 V_{GS_HS} 波形的转换率几乎相等；在图(c)中 I_D 波形无论是在 Turn on 时还是 Turn off 时 TO-247-4L 的转换率都非常快，这就是基于驱动源极端子的效果。关于细节，请参考应用笔记“[通过驱动源极端子改善开关损耗](#)”*5。

图 Figure 5-1(c)所示的保护电路消除了“3.6 负浪涌对策”在栅极-源极所描述的负浪涌，非开关(LS)侧 MOSFET 栅极-源极电压 V_{GS_LS} 能满足 SiC MOSFET 特有的窄栅极额定电压规格。



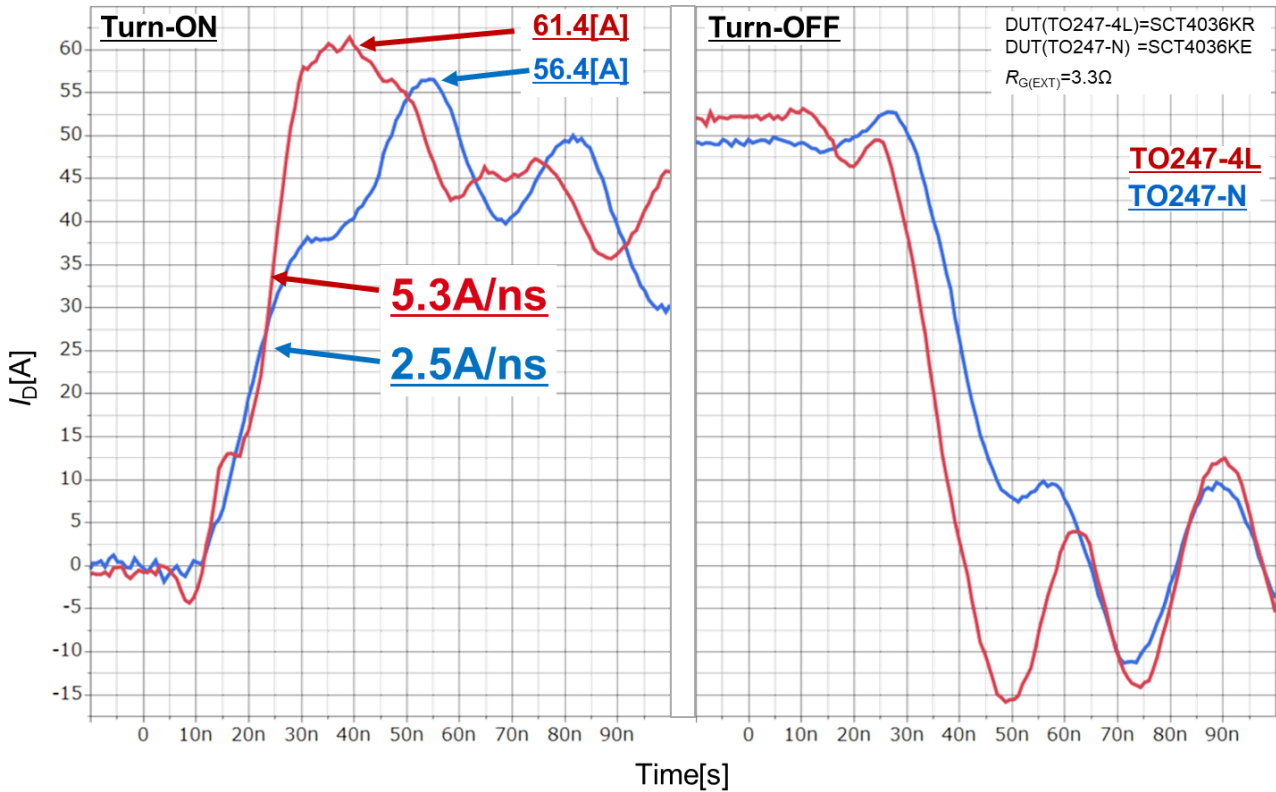
(a) Turn on/off 时(H-side, L-side)的 V_{GS}

Figure 5-2(b)是 V_{DS} 的波形。在关断时 TO-247-4L 有更快的变化率、但浪涌值升高了。



(b) Turn on/off 时的 V_{DS}

Figure 5-2(c)是 I_D 的波形。如上一页所述、Turn on 和 Turn off 时 TO-247-4L 的变化率更快、这也和 V_{DS} 一样，注意浪涌值升高了。



(c) Turn on/off 时的 I_D

Figure 5-2. TO-247-4L (SCT4036KR) 和 TO-247N (SCT4036KE)的开关波形比较

另外, 如 Figure 5-3 所示是开关损耗 E_{on} 、 E_{off} 的波形。

TO-247-4L 解决了由于源极端子上电导致开关速度延迟问题, 将总开关损耗降低了约 65%。

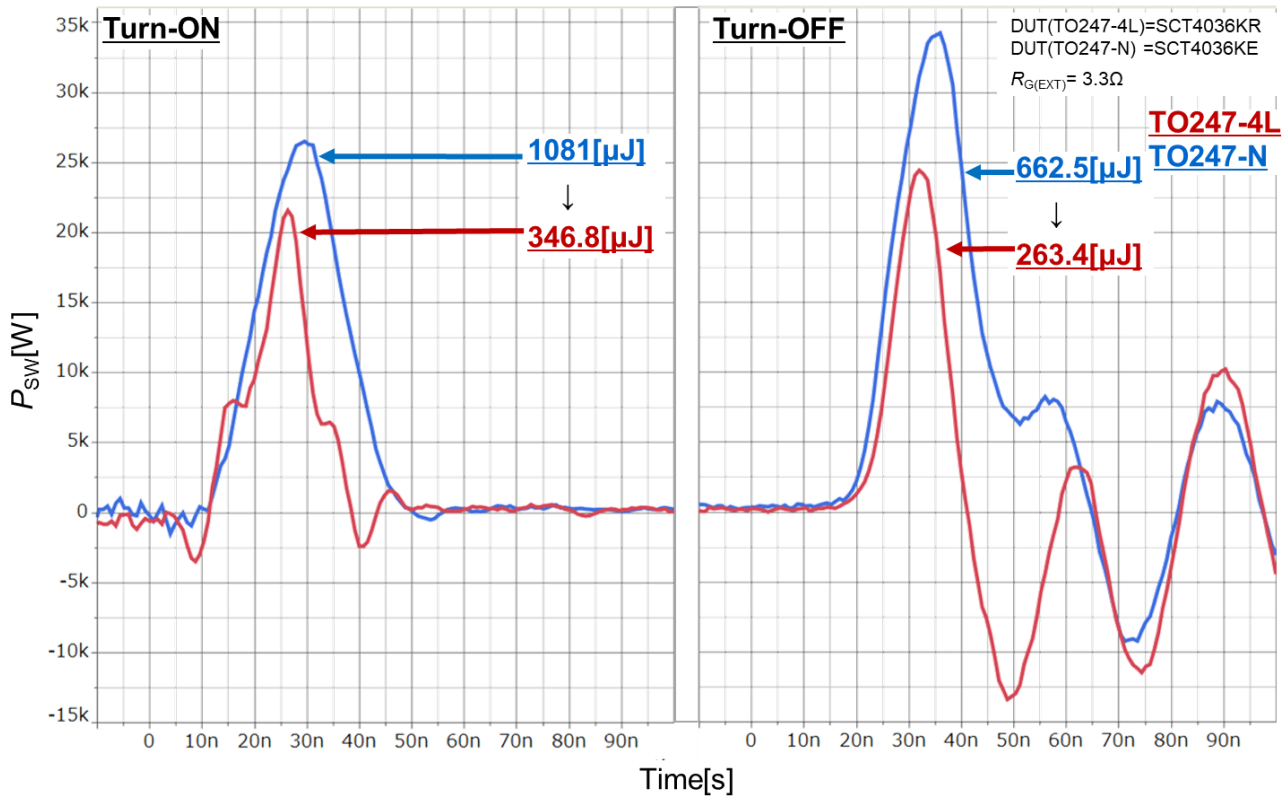


Figure 5-3. TO-247-4L (SCT4036KR)和 TO-247N (SCT4036KE)的开关损耗比较

从结果上看, 与普通 TO-247N 相比, 具有驱动源端子的 TO-247-4L 封装可以降低开关损耗。在第 4 代 SiC MOSFET, 即使 TO-247N 封装也有十分优秀的特性。TO-247-4L 封装可用作低损耗器件, 使用方法请参考本应用笔记设计合适的电路, 同时注意开关浪涌等。

6. 第 4 代 SiC MOSFET 产品阵容

关于第 4 代 SiC MOSFET 分立器件封装的产品阵容, 请查看 ROHM 的网站 (以下的 URL)。

<https://www.rohm.com.cn/products/sic-power-devices/sic-mosfet>

7. 总结

第4代 SiC MOSFET 和传统产品进行比较, 具有低损耗、容易使用、高可靠性的优点。叙述了能解决系统效率等客户的设计难点。而且, 由于开关速度的急剧上升, 产生了抑制 V_{GS} 浪涌、 V_{DS} 开通振铃、布线电感等问题, 有必要更加慎重地探讨深入电路设计。我们希望这份应用笔记能帮助您正确使用第4代 SiC MOSFET、期待为最大限度发挥性能助您一臂之力。

参考资料:

- *1 [“SiC 功率器件·模块应用笔记 Rev.003”](#)
应用笔记 (No. 63AN101JRev.003) ROHM Co., Ltd., 2020 年8 月
- *2 [“桥式电路中Gate-Source电压的动作”](#)
应用笔记 (No. 60AN134JRev.002) ROHM Co., Ltd., 2020 年4 月
- *3 [“栅极-源极电压浪涌的抑制方法”](#)
应用笔记 (No. 62AN009JRev.002) ROHM Co., Ltd., 2020 年4 月
- *4 [“Snubber的电路设计方法”](#)
应用笔记 (No. 62AN036JRev.002) ROHM Co., Ltd., 2020 年4 月
- *5 [“通过驱动源极端子改善开关损耗”](#)
应用笔记 (No. 62AN039JRev.002) ROHM Co., Ltd., 2020 年4 月
- *6 [“栅-源电压测量时的注意点”](#)
应用笔记 (No. 62AP084JRev.002) ROHM Co., Ltd., 2020 年4 月
- *7 [“根据测量波形计算功率损耗”](#)
应用笔记 (No. 62AN133J Rev.002) ROHM Co., Ltd., 2022 年6 月
- *8 [“开关电路的功率损耗计算”](#)
应用笔记 (No. 62AN131J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年7 月
- *9 [“开关波形的监测方法”](#)
应用笔记 (No. 62AN151J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年4 月
- *10 [“功率测量中探针矫正的重要性 倾斜校正篇”](#)
应用笔记 (No. 63AN148J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年12 月
- *11 [“旁路电容器的阻抗特性”](#)
应用笔记 (No. 63AN090J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年9 月
- *12 [“热模型是什么”](#)
应用笔记 (No. 64AN030J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2021 年6 月
- *13 [“热阻和散热的基础”](#)
应用笔记 (No. 64AN042J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2021 年8 月
- *14 [“使用瞬态热阻计算结温的方法”](#)
应用笔记 (No. 64AN027J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2021 年6 月
- *15 [“使用热电偶测量温度时的注意点”](#)
应用笔记 (No. 62AN153J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年4 月
- *16 [“热仿真用 双阻抗模型”](#)
应用笔记 (No. 62AN122J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年3 月
- *17 [“使用PN结的正向电压测量温度的注意点”](#)
应用笔记 (No. 62AN135J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年4 月
- *18 [“何谓热设计”](#)
应用笔记 (No. 62AN098J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2019 年12 月

*19“[热模型使用方法](#)”

应用笔记 (No. 64AN112J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年2 月

*20“[使用热电偶测量封装背面时的注意点](#)”

应用笔记 (No. 63AN066J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年10 月

*21“[热阻抗RthJC的测量方法和使用方法](#)”

应用笔记 (No. 63AN039J Rev.001) ROHM Co., Ltd., 2020 年10 月

Notes

- 1) The information contained herein is subject to change without notice.
- 2) Before you use our Products, please contact our sales representative and verify the latest specifications :
- 3) Although ROHM is continuously working to improve product reliability and quality, semiconductors can break down and malfunction due to various factors.
Therefore, in order to prevent personal injury or fire arising from failure, please take safety measures such as complying with the derating characteristics, implementing redundant and fire prevention designs, and utilizing backups and fail-safe procedures. ROHM shall have no responsibility for any damages arising out of the use of our Products beyond the rating specified by ROHM.
- 4) Examples of application circuits, circuit constants and any other information contained herein are provided only to illustrate the standard usage and operations of the Products. The peripheral conditions must be taken into account when designing circuits for mass production.
- 5) The technical information specified herein is intended only to show the typical functions of and examples of application circuits for the Products. ROHM does not grant you, explicitly or implicitly, any license to use or exercise intellectual property or other rights held by ROHM or any other parties. ROHM shall have no responsibility whatsoever for any dispute arising out of the use of such technical information.
- 6) The Products specified in this document are not designed to be radiation tolerant.
- 7) For use of our Products in applications requiring a high degree of reliability (as exemplified below), please contact and consult with a ROHM representative : transportation equipment (i.e. cars, ships, trains), primary communication equipment, traffic lights, fire/crime prevention, safety equipment, medical systems, servers, solar cells, and power transmission systems.
- 8) Do not use our Products in applications requiring extremely high reliability, such as aerospace equipment, nuclear power control systems, and submarine repeaters.
- 9) ROHM shall have no responsibility for any damages or injury arising from non-compliance with the recommended usage conditions and specifications contained herein.
- 10) ROHM has used reasonable care to ensure the accuracy of the information contained in this document. However, ROHM does not warrants that such information is error-free, and ROHM shall have no responsibility for any damages arising from any inaccuracy or misprint of such information.
- 11) Please use the Products in accordance with any applicable environmental laws and regulations, such as the RoHS Directive. For more details, including RoHS compatibility, please contact a ROHM sales office. ROHM shall have no responsibility for any damages or losses resulting non-compliance with any applicable laws or regulations.
- 12) When providing our Products and technologies contained in this document to other countries, you must abide by the procedures and provisions stipulated in all applicable export laws and regulations, including without limitation the US Export Administration Regulations and the Foreign Exchange and Foreign Trade Act.
- 13) This document, in part or in whole, may not be reprinted or reproduced without prior consent of ROHM.



Thank you for your accessing to ROHM product informations.
More detail product informations and catalogs are available, please contact us.

ROHM Customer Support System

<https://www.rohm.com.cn/contactus>