

功率开关元器件

通过驱动源极端子改善开关损耗

在各种各样的电源产品和功率电路部分，经常将 MOSFET 和 IGBT 等功率开关元器件作为开关器件进行使用。有必要尽量减小在开关器件上所产生的开关损耗和导通损耗，根据不同应用减小损耗的方法多种多样，其中一种方法是使用近年来新面市的具有驱动源极端子(即开尔文端子)的新封装。本应用手册专门就功率元器件使用驱动源极端子所产生的效果和使用注意事项进行说明。

现有 MOSEFET 的驱动方法

MOSFET 是电压驱动型元器件，通过向栅极端子施加或者撤去驱动电压来控制 MOSFET 进行开关动作。图 1 所示为现有 TO-247N 封装 MOSFET 的一般性驱动电路示意图。

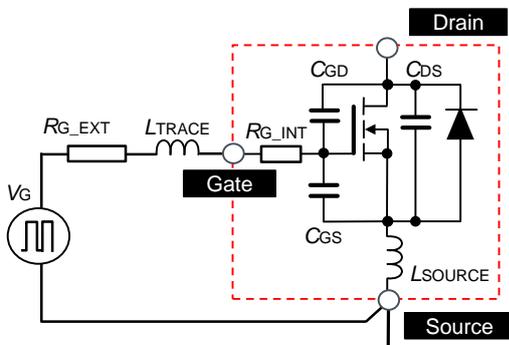


图 1. MOSFET 的栅极驱动电路示意图

一般通过调节驱动电源 V_G 与栅极端子 Gate 之间所连接的外接栅极电阻 R_{G_EXT} 来控制开关速度，但是需要对驱动回路中所包含的 PCB 走线寄生感量 L_{TRACE} 和 MOSFET 源极端子的封装寄生感量 L_{SOURCE} 这些寄生感量特别加以关注。因为 MOSFET 栅极端子的封装寄生感量包含在 L_{TRACE} 之中，漏极端子的寄生感量 L_{DRAIN} 与驱动电路无关，此处加以省略。

关于图 1 所示驱动电路的一般性动作原理，在各式各样的文献中有详细的说明，此处加以省略。但是在图 1 所示封装中，由于漏极-源极之间流过的电流 I_D 发生变化时，在 L_{SOURCE} 上所形成的感应电动势 V_{L_SOURCE} 会造成开关速度的下降。

图 2 所示为在开关动作过程中，驱动电路各处所施加的电压。当施加 V_G 、MOSFET 导通之后 I_D 增加，在 L_{SOURCE} 上产生如图中(I)方向所示的 V_{L_SOURCE} 。另外，由于栅极端子上有电流 I_G 流过，在 R_{G_EXT} 上会产生电压降 $V_{R_G_EXT}(I)$ 。以上电压存在于 MOSFET 开通时的驱动电路中，会使得如算式(1)所示，使 MOSFET 开通所必须的施加于芯片上的电压 V_{GS_INT} 有所减小，结果导致 MOSFET 的开通速度下降。虽然也存在由 L_{TRACE} 所产生的感应电动势，但值较小此处加以省略。

$$V_{GS_INT} = V_G - I_G * R_{G_EXT} - L_{SOURCE} * \frac{dI_D}{dt} \quad (1)$$

当 MOSFET 关断时，也是出于同样的理由，此时算式(1)中的 I_G 和 dI_D/dt 变成负值，在 R_{G_EXT} 和 L_{SOURCE} 上产生电压升高(II)，这会导致 V_{SG_INT} 增大，从而造成 MOSFET 关断速度下降。

一般来说，功率开关元器件的 L_{SOURCE} 为几个 nH 到十几个 nH，当 dI_D/dt 达到几个 A/ns 时， V_{L_SOURCE} 可能会达到 10V 以上，会对开关动作产生非常大的影响。

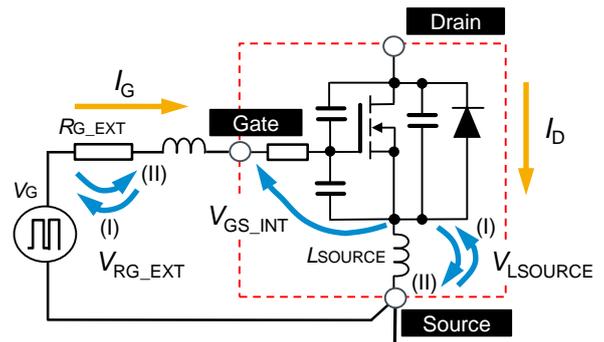


图 2. 开关动作过程中各处所施加的电压

驱动源极端子即是通过消除上述 V_{L_SOURCE} 的影响，达到改善开关速度目的的封装形式。

具有驱动源极端子的封装

图 3.所示为具有驱动源极端子的封装示例和管脚示意图。ROHM 公司已经进行量产的封装产品为(a)TO- 247-4L 和 (b)TO-263-7L。

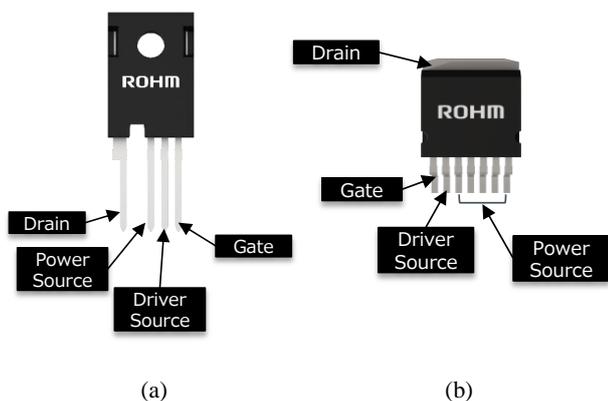


图 3. 具有驱动源极端子的封装
(a)TO-247-4L, (b)TO-263-7L

驱动源极端子的效果

图 4.所示为具有驱动源极端子器件的驱动电路。与图 2.所示现有封装的驱动电路的不同，是在于其驱动电路的返回线仅与驱动源极端子相连。

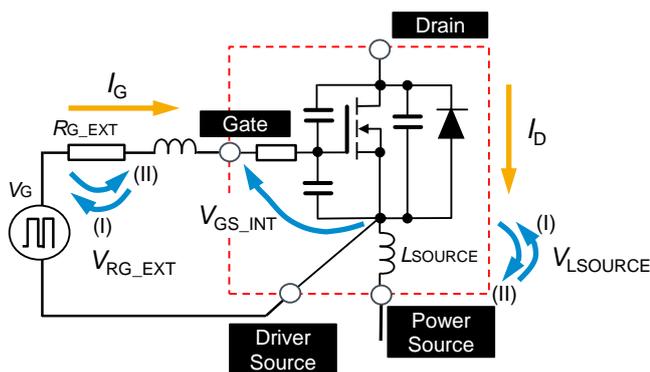


图 4. 具有驱动源极端子器件的驱动回路

从上图明显可以看出，因为驱动电路中不包含 L_{SOURCE} ，完全不受开关动作时 I_D 变化所形成的感应电动势 $V_{LSOURCE}$ 的影响，此时在 V_{GS_INT} 上所施加的电压如式(2)所示。

$$V_{GS_INT} = V_G - I_G * R_{G_EXT} \quad (2)$$

通过双脉冲试验与现有封装产品进行对比

图 5.所示是为了对比现有封装产品和具有驱动源极端子产品的实际开关动作，所实施的以 Low Side(LS)的 MOSFET 进行开关动作的双脉冲试验。High Side(HS)的 MOSFET 的栅极通过 R_{G_EXT} 连接到源极或者驱动源极，仅利用其体二极管进行续流。

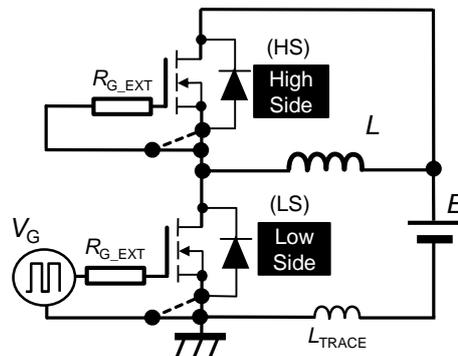


图 5. 双脉冲试验电路

图 6.、图 7.所示分别为 MOSFET 开通和关断时，漏极-源极电压 V_{DS} 和漏极电 I_D 的波形以及开关损耗。所使用的元器件为最大额定 (V_{DSS}) 1200V、导通电阻 ($R_{DS(on)}$) 40m Ω 的开关器件，现有封装产品为 SCT3040KL(TO-247N)，具有驱动源极端子的产品为 SCT3040KR(TO-247-4L)和 SCT3040KW7(TO-263-7L)。

图中所示为驱动条件 $R_{G_EXT}=10\Omega$ ，所施加电压 V_{HVDC} 为 800V， I_D 大约为 50A 时的波形。

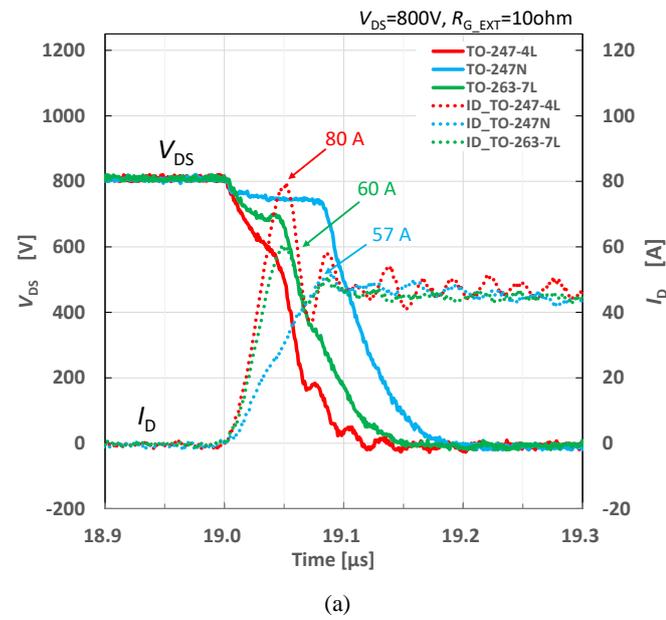
由图 6.可以看出，在开通过程中与现有封装产品相比，具有驱动源极端子产品的 I_D 急剧上升，结果导致其开通损耗减小了 19%~38%。

但是此处必须注意的是，TO-247-4L 的 I_D 峰值要比 TO-247N 大 23A。这是因为在器件的开通过程中，虽然向 C_{oss} 进行充放电的能量是一定的，但是由于使用驱动源极端子实现了高速开通动作，使得充放电时间缩短，结果导致充电电流的峰值变大，这并非 HS 侧 MOSFET 误导通所造成的峰值电流增大。

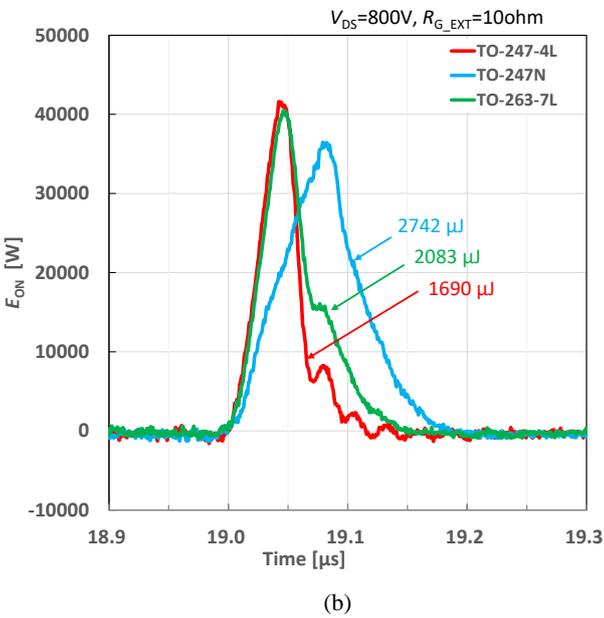
并且，TO-263-7L 的 I_D 峰值为 60A，并没有 TO-247-4L 的 I_D 峰值那么大，这和后述两者关断浪涌的区别一样，是由于续流侧 MOSFET 的封装寄生感量不同所造成的。也就是说，由于 dI_D/dt 在续流侧 MOSFET 的封装感量上所产生的感应电动势引起开关动作侧 MOSFET 的 V_{DS} 下降，使得开关动作侧 MOSFET 的 C_{oss} 上所积蓄的能量进行放电，但是因为 TO-263-7L 封装的放电电流较小，MOSFET 开通时 I_D 峰值也较小。另外，出于同样的理由，TO-247-4L 封装因为开关动作侧 MOSFET 的 V_{DS} 被压低，其在开通时的开通损耗 E_{ON} 有所减少。

但是，如果不对 TO-247-4L 和 TO-263-7L 采取措施防止误导通，有可能由于误导通导致开通电流的峰值进一步增大，因此，强烈推荐追加米勒钳位电路，或者在栅极-源极之间连接几个 nF 的电容等对策防止误导通。详细方法请参考应用手册《栅极-源极电压的浪涌抑制方法》^(*)。

此外，如图 7.所示在关断过程中，虽然不如开通时开关损耗改善效果那么明显，也有大约 30%的改善。



(a)



(b)

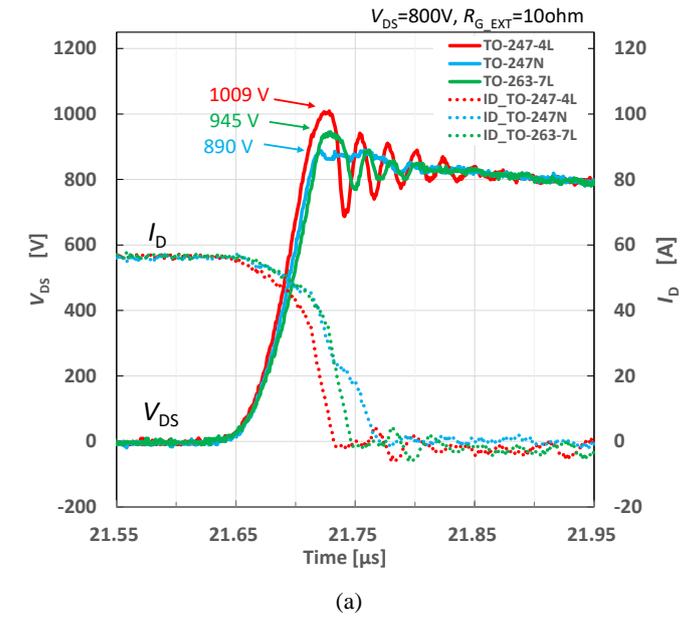
图 6. 开通波形

(a) V_{DS} , I_D 波形, (b)开通损耗

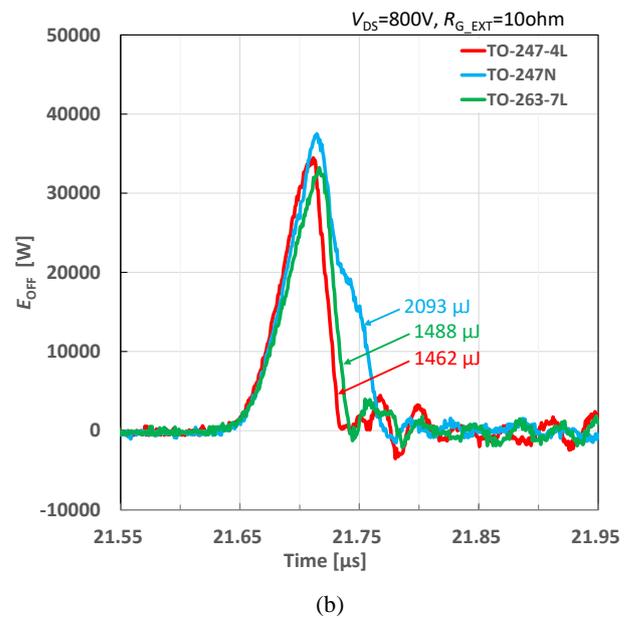
另外，关断过程中在 V_{DS} 上所观测到的关断浪涌，是由主回路的整体寄生感量，也就是图 5 所示主回路的走线寄生感量 L_{TRACE} 和开关动作侧以及续流侧 MOS FET 的封装寄生感量 $2 \times (L_{DRAIN} + L_{SOURCE})$ 进行叠加总和所造成的。因此，封装寄生感量基本相同的 TO-247-4L 和 TO-247N 相比由于 dI_D/dt 的高速化，关断浪涌电压也有所增大。本次测试中 TO-247-4L 大约增大了 119V，因此需要追加缓冲电路等对策加以对应。

并且，TO-263-7L 比 TO-247-4L 的浪涌电压小的原因，是由于 TO-263-7L 的漏极端子（即封装背面）是直接焊在 PCB 板上的，以及其源极端子是好几个并联，因此与 TO-247-4L 相比，其封装寄生感量要小。

此外，续流侧而非开关动作侧的封装寄生感量越小，开关动作侧的关断浪涌电压越小。



(a)



(b)

图 7. 关断波形

(a) V_{DS} , I_D 波形, (b)关断损耗

表 1. 是开关损耗的对比总结。

表 1. E_{on} 、 E_{off} 对比

$V_{DS}=800V, I_D=50A, R_{G_EXT}=10\Omega$		
DUT	$E_{on} [\mu J]$	$E_{off} [\mu J]$
SCT3040KL	2742	2093
SCT3040KR	1690	1462
SCT3040KW7	2083	1488

桥式电路中，栅极-源极信号的动作特性

图 5.所示为功率开关元器件最常见的应用方式-桥式电路，之前在应用手册《桥式电路中，栅极-源极电压的动作特性》^(*)中，已经对管子之间的串扰进行了说明，但是由于 TO-247-4L 和 TO-263-7L 的动作原理与 TO-247N 有所不同，为了针对栅极-源极电压浪涌采取有效对策，需要首先理解开关动作过程。

图 8.和图 10.所示为由 TO-247-4L 所构成的桥式电路中，当 LS 侧进行开关动作时的波形。图 8.和图 10.分别是开通时和关断时的波形。

首先就开通过程中 TO-247-4L 与 TO-247N 的不同点进行说明，关于 TO-247N 的开通和关断动作的详细解释请参考应用手册《桥式电路中，栅极-源极电压的动作特性》^(*)。

图 8.、图 10. (a)的横轴代表时间，各个时间段 $T_k(k=1\sim 8)$ 的定义如下。各个时间段内所发生的现象以(I)~(VII)进行表示。此外，现象(III)是在 T_2 时间段刚刚结束之后，现象 (VII) 是在 T_5 时间段刚刚结束之后所发生的。

- T1:LS ON、MOSFET 的电流发生变化的时间段
(同时产生现象(I))
- T2:LS ON、MOSFET 的电压发生变化的时间段
(同时发生现象(II))
- T3:LS ON 的时间段
- T4:LS OFF、MOSFET 的电压发生变化的时间段
(同时发生现象(IV))
- T5:LS OFF、MOSFET 的电流发生变化的时间段
(同时发生现象(VI))
- T4-T6:HS ON 之前的死区时间
- T7:HS ON 的时间段 (同步整流时间段)
- T8:HS OFF、LS ON 之前的死区时间

TO-247-4L 仅有现象(I)与 TO-247N 有较大的差别，观测到了在续流侧(HS)的 V_{GS} 上，发生了正向浪涌 (TO-247N 是负向浪涌)。这是由于在如图 8.(b)所示的栅极端子的电流变化中，存在图中(I)所示的电流 I_{CGD} 而造成的。

该电流 I_{CGD} 通过 C_{GD} 形成通路，下面说明该电流的产生原因。

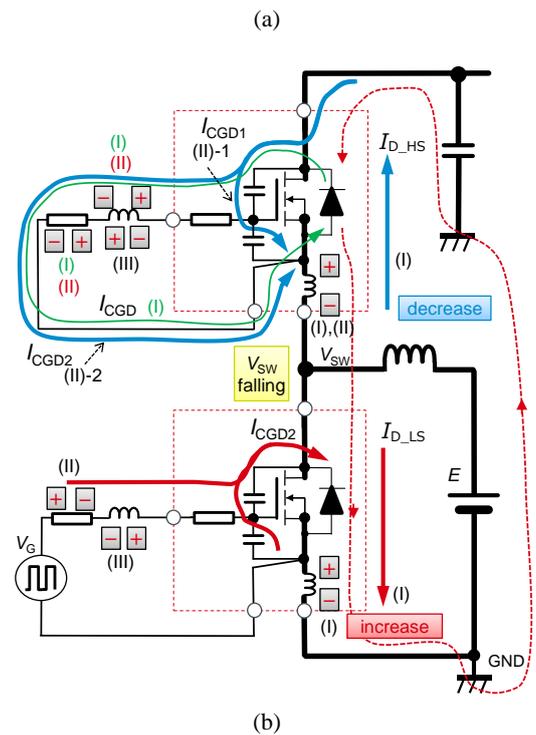
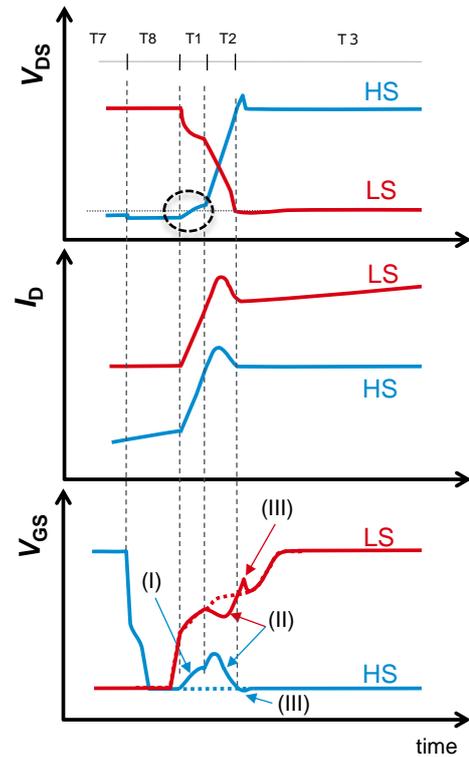


图 8. 开通时的动作

(a)各时间段的开关波形, (b)栅极端子的电流

在 LS 侧开通之前，续流电流 I_{D_HS} 通过 HS 侧 MOSFET 的体二极管由源极向漏极进行续流。之后 LS 侧开通动作开始，首先 LS 侧的电流 I_{D_LS} 增大，从而导致 I_{D_HS} 逐渐减小。另外，一般来说 SiC MOSFET 的体二极管的正向压降 V_{F_HS} (Figure 8(a)的虚线圆框部分) 比 Si 基 MOSFET 的体二极管的电流依存性大，因此随着开关动作高速化， dI_{D_HS}/dt 变大，结果导致 dV_{F_HS}/dt 也变大。

此外，该 $dV_{F_{HS}}/dt$ 实际上等同于续流侧 MOSFET 的 $dV_{DS_{HS}}/dt$ ，因此产生的 I_{CGD} 经由 C_{GD} 通过漏极端子流向栅极端子，导致栅极-源极之间的电压有所上升。在现有的 TO-247N 封装中，因为 $I_{D_{LS}}$ 变化率小，几乎观测不到现象(I)中的 I_{CGD} 。

图 9.所示为关断时开关动作侧(LS)和续流侧(HS)的 V_{DS} 波形。可以看到在续流侧 MOSFET 的 $V_{DS_{HS}}$ 中，当关断动作一开始进行，TO-247-4L 的 $V_{DS_{HS}}$ 就急剧上升。

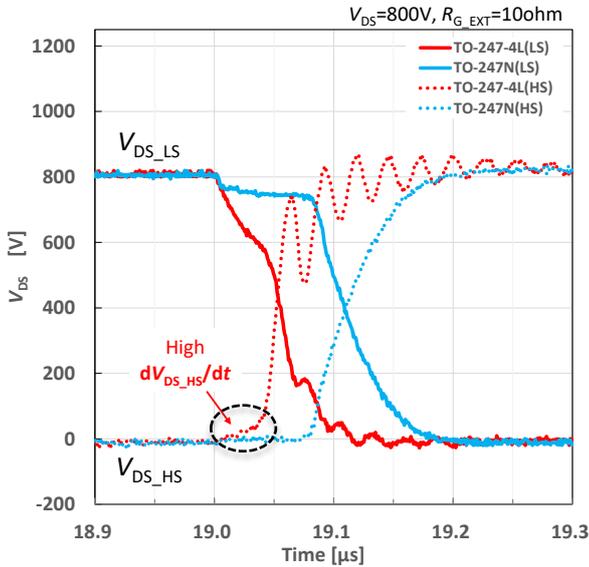


图 9. 关断时的 V_{DS} 波形

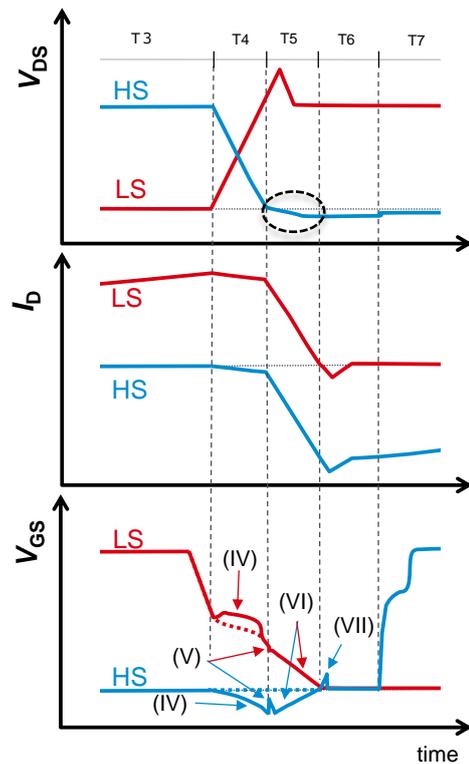
此外，由于现象(II)也实现了高速化，图 8.(b)所示从 HS 侧流向 LS 侧的 C_{DS} 的充电电流也变大，因此不仅是开关动作侧 LS，续流侧 HS 也需要考虑漏极-源极之间的浪涌对策。

此外，在关断过程中，图 9(a)所示的现象(VI)和现象(VII)是与 TO-247N 有所不同的。

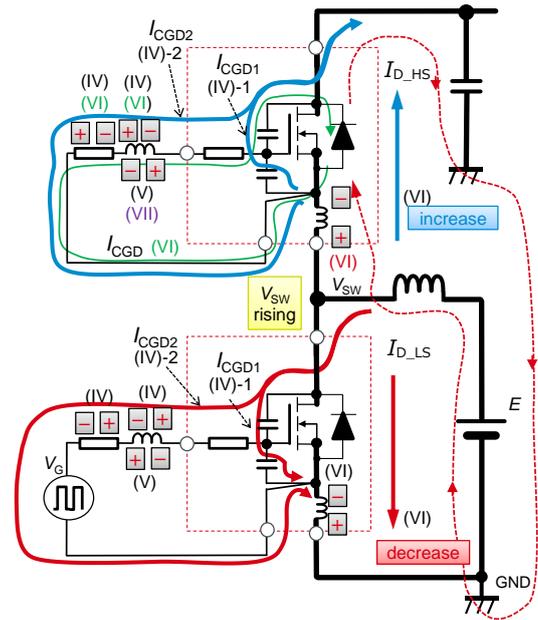
现象(VI)是与开通时一样，属于电流 I_D 发生变化时，由于 HS 侧 $I_{D_{HS}}$ 的急剧增大，导致体二极管的 $V_{F_{HS}}$ 急剧上升。因此，由 $dV_{F_{HS}}/dt$ 所产生的电流 I_{CGD} 导致负向浪涌产生。(图 10.(a)的虚线圆框部分)

图 11.所示为关断时开关动作侧(LS)和续流侧(HS)的 V_{DS} 波形，可以看出和开通时一样，当 HS 侧 $V_{DS_{HS}}$ 在 $dV_{DS_{HS}}/dt$ (T4 时间段) 变化完了， I_D 发生变化时 (T5 时间段)，发生了负向变化，可以判断是 $dV_{F_{HS}}/dt$ 所造成的。

现象(VII)是当 T5 时间段完了， $I_{D_{HS}}$ 的变化消失后， $dV_{F_{HS}}/dt$ 也消失了，流向栅极端子的电流 I_{CGD} 也消失了，此时由于在 I_{CGD} 电流路径的走线电感中所积蓄的能量而产生了反感应电动势，从而在栅极-源极之间观测到了正向浪涌。该正向浪涌在 TO-247N 中几乎观测不到。



(a)



(b)

图 10. 关断时的动作
(a)各时间段的开关波形, (b)栅极端子的电流

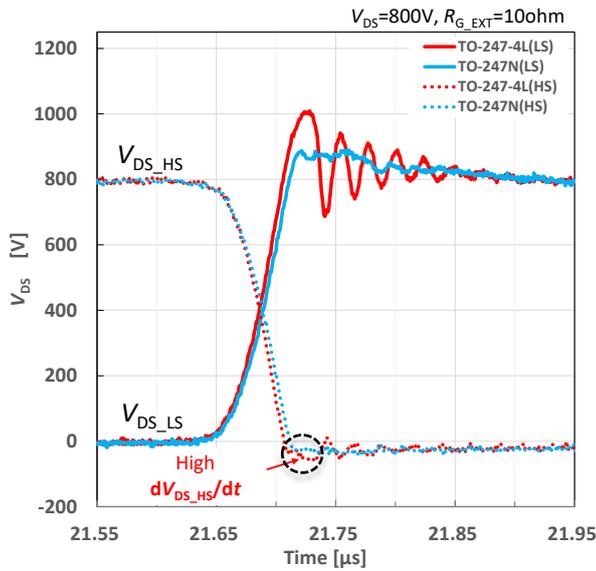


图 11. 关断时的 V_{DS} 波形

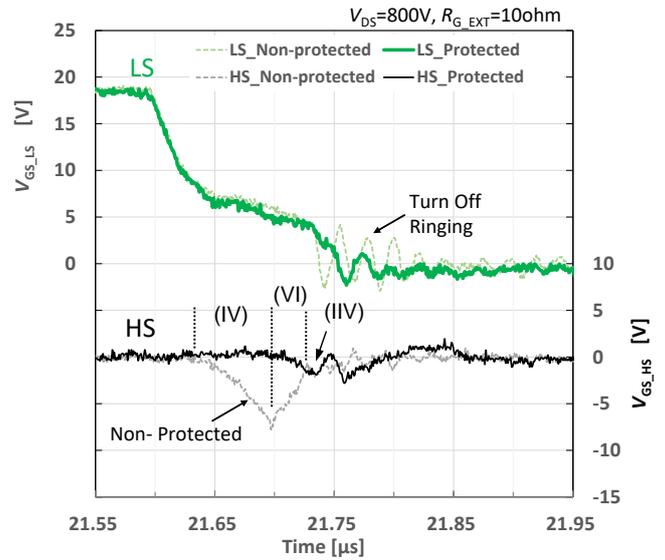


图 13. SCT3040KR 关断时的 V_{GS} 波形

图 12.及图 13.所示为使用 ROHM 公司的 SCT3040KR 进行双脉冲试验的 V_{GS} 波形。可以看出当不采取浪涌抑制对策时 (Non-Protected), 会发生之前所说明的浪涌现象, 当采取浪涌抑制对策时 (Protected), 可以抑制 V_{GS} 浪涌。为了抑制以上浪涌, 强烈建议将浪涌抑制电路在尽量靠近 MOSFET 的位置进行布置。详细内容请参考应用手册《栅极-源极电压的浪涌抑制方法》(*2)。

Layout 注意事项

最后关于 TO-247-4L 的 Layout 注意事项进行说明。

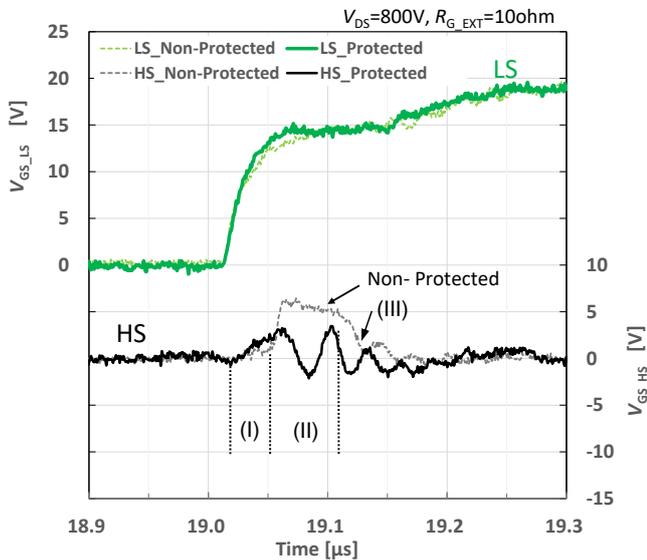


图 12. SCT3040KR 开通时的 V_{GS} 波形

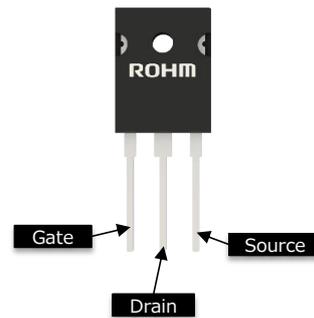


Figure 14. TO-247N 管脚布局

如 3.(a)所示, TO-247-4L 的栅极端子是从封装正面看最右侧的端子, 现有的 TO-247N 是如图 14.所示, 栅极端子为最左侧端子, 是和 TO-247-4L 极性相反的。通常应用中是使用驱动 IC 来驱动 MOSFET, 但是绝大多数驱动 IC 的管脚布局是适合现有 TO-247N 的管脚布局的。

图 15.所示为使用 ROHM 公司驱动 IC(BM61S40RFV-C)的连线图。当使用(a)TO-247N 时, 驱动 IC 中 MOSFET 的驱动信号 OUT 和返回信号 GND2 与 MOSFET 的栅极端子以及源极端子采用了相同的布局, 因此能够在同一平面上进行平行布线。

但是, 当使用(b)TO-247-4L 时, 因为 MOSFET 的栅极端子和驱动源极端子与驱动 IC 的管脚布局相反, 如图中所示配线一定会出现交叉, 因此无法在同一平面内实现布线。因此, 需要特别注意如图(b)所示的由 OUT 信号和 GND2 信号所形成的环路面积(1)和(2)的面积比。

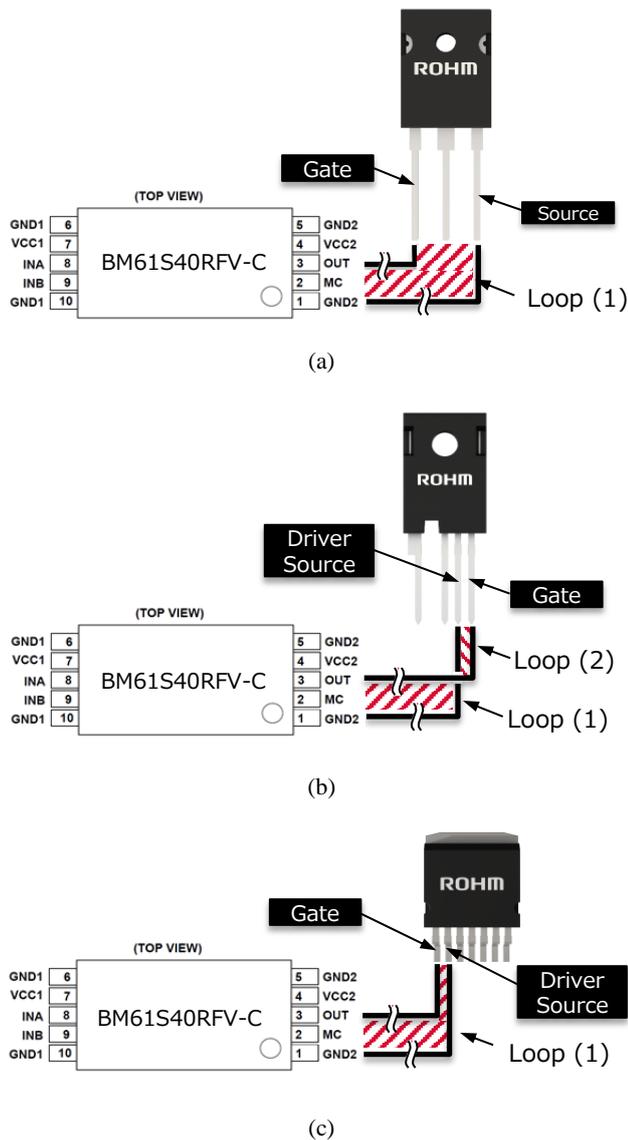


图 15. 使用 ROHM 驱动 IC (BM61S40RFV-C)
的驱动电路 Layout 图例
(a)TO-247N, (b)TO-247-4L, (c)TO-263-7L

关注此环路面积比, 是因为使用 TO-247-4L 时 dI_D/dt 非常大, 当该电流变化所产生的磁场变化 ($d\Phi/dt$) 与该环路面积正交时, 会产生与驱动电路的环路面积成比例的感应电动势。此外, 根据该环路面积, 在 MOSFET 的栅极-源极之间成比例产生的正向或者负向浪涌电压可能会导致误动作发生。因此, 在布线时必须使得 OUT 信号和 GND2 信号所形成的环路面积尽可能小, 并且使得环路(1)和环路(2)相等。

此外, 虽然推荐使用 V_{GS} 的浪涌抑制电路, 但是也存在由于关断时 V_{DS} 振荡导致 V_{GS} 浪涌超过其额定值的现象。在这种情况下, 通过降低 HVdc 之后的走线寄生电感, 或者在各个 MOSFET 处追加缓冲电路等浪涌抑制对策, 能够将 V_{GS} 浪涌控制在额定范围以内。关于缓冲电路的设计方法, 请参考应用手册《缓冲电路的设计方法》⁽³⁾。

总结

由于 TO-247-4L 和 TO-263-7L 等具有驱动源极端子的 MOSFET 的开关速度大幅提高, 通过在设计初期即对 V_{GS} 浪涌以及 V_{DS} 关断振荡的抑制对策电路进行探讨, 并在设计基板时事先进行布线准备, 能够使得实际的测试过程更加顺利地进行。该应用手册有助于帮助大家正确使用具有驱动源极端子的高速开关元器件。

以上

参考资料:

- *1 《桥式电路中, 栅极-源极电压的动作特性》
应用手册 (No. 60AN134JRev.001)
罗姆有限公司, 2018 年 5 月
- *2 《栅极-源极电压的浪涌抑制方法》
应用手册 (No. 62AN009JRev.001)
罗姆有限公司, 2019 年 5 月
- *3 《缓冲电路的设计方法》
应用手册 (No. 62AN0036JRev.001)
罗姆有限公司, 2019 年 6 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

<http://www.rohm.com/contact/>