

功率开关器件 (Power switching device)

# 桥式电路相关的 Gate-Source 电压的动作

MOSFET 和 IGBT 等功率开关器件在各式各样的电源应用或电气线路中作为开关元件使用。并且，电路中的使用形式也有多种，除了单独使用还可以串联和并联使用，特别是将器件上下串联连接而成的桥式电路，一般将两个器件交替 On/Off、通过电流和电压的变化复杂地互相影响着彼此。本应用笔记着眼于 MOSFET 桥式电路的各 MOSFET 的 Gate-Source 电压，以其中最简单的同步方式 boost 电路为例，目的是理解开关动作的详细内容。

## MOSFET 的桥式电路

MOSFET 的桥式电路最简单的类型：同步方式 boost 电路 (Figure 1)。

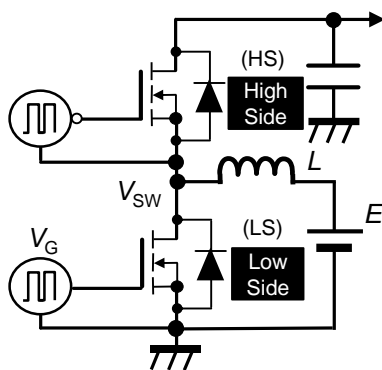


Figure 1. 同步方式 Boost 电路

这个电路所使用的 MOSFET 上侧 (HS) 和下侧 (LS) 交替导通 (On)，为防止出现同时导通的情况，设置了两个 MOSFET 均为 Off 的死区时间 (dead time) (Figure 2)。

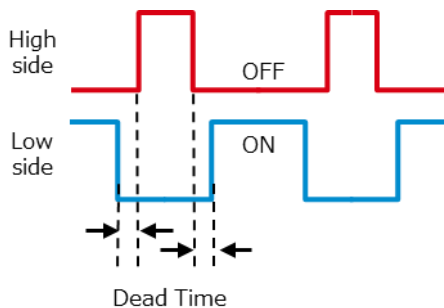


Figure 2. 门极信号 ( $V_G$ ) 时序图

下图 (Figure 3) 是这个动作 HS 和 LS 的 MOSFET 的 Drain-Source 电压 ( $V_{DS}$ )、漏极电流 ( $i_D$ ) 波形的大致形状。

下述波形是电感  $L$  电流的连续动作，即硬开关状态。

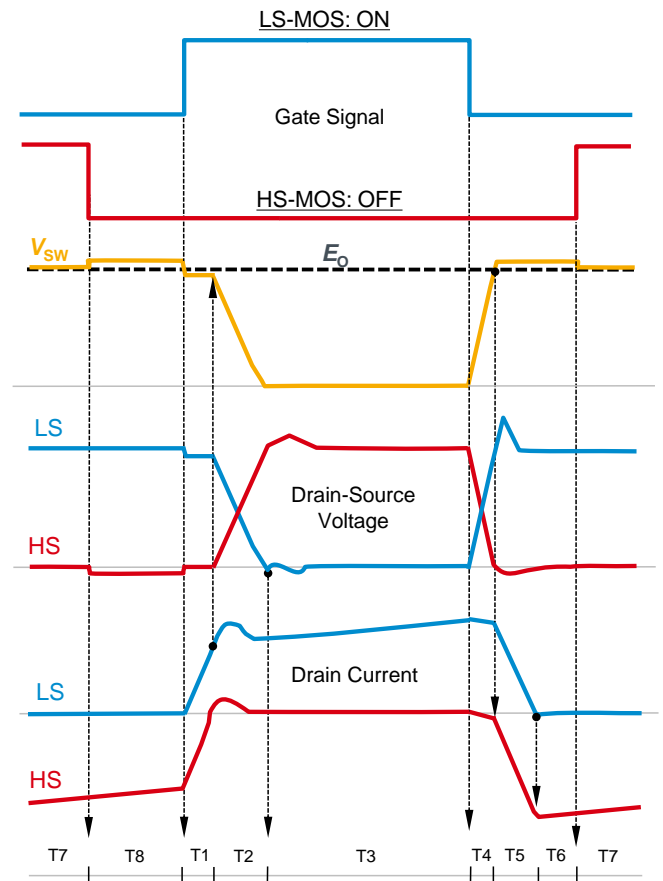


Figure 3. 各 MOSFET 的电压·电流波形。

横轴为时间，时间区域  $T_k(k=1\sim8)$  的定义如下：

- T1:LS 为 ON 时 MOSFET 电流变化的时间段
- T2:LS 为 ON 时 MOSFET 电压变化的时间段
- T3:LS 为 ON 时的时间段
- T4:LS 为 OFF 时 MOSFET 电压变化的时间段
- T5:LS 为 OFF 时 MOSFET 电流变化的时间段

- T4-T6:HS 变为 ON 之前的死区时间(dead time)
- T7:HS 为 ON 的时间段 (同步整流时间段)
- T8:HS 为 OFF 且 LS 变为 ON 之前的死区时间(dead time)

### 门极驱动电路

LS 侧 Turn on 时和 Turn off 时, 众所周知  $V_{DS}$  和  $i_b$  的变化是不同的, 为考虑他们的变化对 Gate-Source 电压 ( $V_{GS}$ ) 的影响, 有必要画出门极驱动电路的等价电路。  
Figure 4 是基本的等价电路:

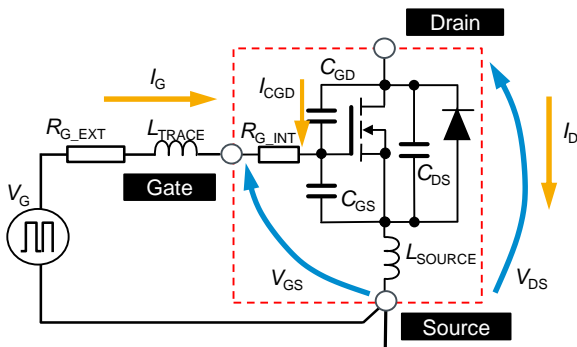


Figure 4. 门极驱动电路与 MOSFET 等价电路

在门极驱动电路中存在着这些等效器件: 门极信号 ( $V_G$ )、器件内部的门极线路内阻 ( $R_{G\_INT}$ )、器件封装的源极电感 ( $L_{SOURCE}$ )、门极电路布局产生的电感 ( $L_{TRACE}$ ) 和外加门极电阻 ( $R_{G\_EXT}$ )。Figure 3 中各电压电流的极性以 Figure 4 所示的门极电流 ( $I_G$ ) 和  $i_b$  的方向为正, 以源极端子为基准定义了  $V_{GS}$  及  $V_{DS}$ 。此外, 器件内部的门极线路也存在电感, 但由于比  $L_{TRACE}$  小, 这里忽略不计。

### Turn on · Turn off 动作

关于 Figure 3 的波形, 以下是详细说明:

为使 LS 侧导通 (ON), 对 LS 侧门极信号施加正的  $V_G$ , Gate-Source 间电容 ( $C_{GS}$ ) 开始充电,  $V_{GS}$  上升、到达门极阈值电压 ( $V_{GS(th)}$ ) 以上时 LS 的  $i_b$  开始流动, 同时 Source-Drain 方向流动的 HS 侧  $i_b$  开始减少 (Figure 3-T1)。接下来 HS 侧的  $i_b$  变为 0、寄生二极管 Turn off、中间点的电压 ( $V_{SW}$ ) 开始下降, 同时 HS 侧的 Drain-Source 间电容 ( $C_{DS}$ ) 及 Drain-Gate 电容 ( $C_{GD}$ ) 开始充电 (Figure 3-T2)。HS 侧的  $C_{DS} + C_{GD}$  在充电 (LS 侧是放电) 结束后, LS 侧的  $V_{GS}$  到达所定的电压值、LS 侧 Turn on 动作结束。

另一方面, Turn off 动作在 LS 侧  $V_G$  Off 的时刻开始, LS 侧  $C_{GS}$  的蓄积电荷开始放电, 当 MOSFET 到达平台电压 ( $V_{plateau}$ ) (进入米勒效应区域), LS 侧的  $V_{DS}$  开始上升, 同时  $V_{SW}$  也上升。在这个时间点, 大部分的负载电流仍在 LS 侧流动 (Figure 3-T4), HS 侧的寄生二极管中还没有转流电流。LS 侧的

$C_{DS} + C_{GD}$  充电 (HS 侧为放电) 结束时,  $V_{SW}$  超过输入电压 ( $E$ )、HS 侧的寄生二极管 Turn on、LS 侧的  $i_b$  开始转向 HS 侧流动 (Figure 3-T5)。LS 侧的  $i_b$  是很快变为 0, 并进入死区时间 (Figure 3 -T6), HS 侧 MOSFET 在门极信号中印加了正的  $V_G$  并 Turn on, 此时进入到同步动作时间段 (Figure 3-T7)。  
这一连串的开关闭作、由于 HS 侧和 LS 侧的 MOSFET 的  $V_{DS}$  和  $i_b$  的变化导致各种不同的门极电流流动, 造成了与印加信号  $V_G$  不同的  $V_{GS}$  的变化。这些门极电流如 Figure 5 所示。图中的 (I)、(I')、(II)、(III) 是  $V_{GS}$  变化时象的编号, 下为详述。

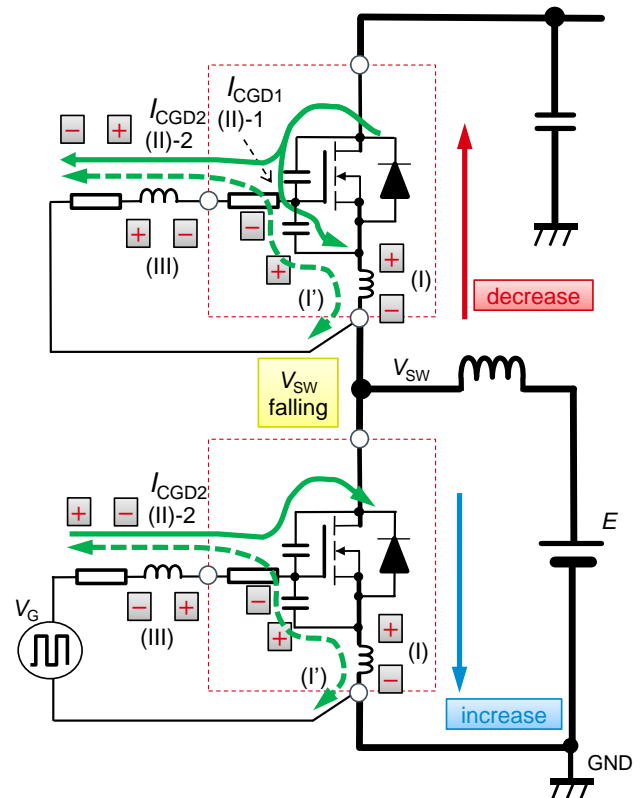


Figure 5. LS 侧 Turn on 时门极信号的电流动作

### dV<sub>DS</sub>/dt 产生的电流

如 Figure 4 所示, 随着  $V_{DS}$  的变化,  $C_{GD}$  中电流 ( $i_{CGD}$ ) 流过。该电流如 Figure 5 所示, 分为  $C_{GS}$  侧流动的电流 ( $i_{CGD1}$ : (II)-1) 和门极电路侧流动的电流 ( $i_{CGD2}$ : (II)-2)。变化开始时门极电路侧的电感值较大,  $i_{CGD}$  大部分在  $C_{GS}$  侧流动, 此时  $i_{CGD1}$  如计算式 (1):

$$i_{CGD} \approx i_{CGD1} = \frac{C_{GD}}{1 + C_{GD}/C_{GS}} \cdot \frac{dV_{DS}}{dt} \quad (1)$$

由此可知,  $C_{GD}$  较大或  $C_{GD}/C_{GS}$  比值变小的话,  $i_{CGD1}$  会增大。

### di/dt 产生的电压

ib 的变化速率 di/dt 产生的电压:

$$V_{L_{SOURCE}} = L_{SOURCE} \cdot \frac{di}{dt} \quad (2)$$

对应途中的是事象(I)。由于该电压, 使得电流(I')流动。

dVDS/dt 和 di/dt 可正可负, 因此产生的电流和电压的极性在 Turn on 或 Turn off 时是不同的。

### Turn on 时门极信号的动作

LS Turn on 时, 首先是 ib 发生变化 (Figure 3-T1), LS 侧、HS 侧都是 di/dt > 0。根据事象(I), 会按照 Figure 5 所示的极性产生自感电动势 (算式 (2))。此时流动的电流会以 CGS 的 Source 侧为正极冲电, LS 侧会将 VGS 压低, 而 HS 侧的 VGS 则会被拉向负值一侧, 造成负电压尖峰。

ib 的变化结束时 LS 侧的 VDS 的电位会减小 (Figure 3-T2)。因此算式 (1) 的电流会如 Figure 5 中的(II)-1、(II)-2 那样流动, 在 VGS 会发生下述算式的电压上升 (尖峰)。

$$\begin{aligned} V_{SURGE2-1} &= \frac{1}{C_{GS}} \int (i_{CGD1}) dt \\ &= \frac{1}{1 + C_{GS}/C_{GD}} \cdot \Delta V_{DS} \end{aligned} \quad (3)$$

$$V_{SURGE2-2} = i_{CGD2} \cdot R_{G\_EXT} + L_{TRACE} \cdot \frac{di_{CGD2}}{dt} \quad (4)$$

VDS 开始变化时, 首先是算式 (3) 所述的 VGS 上升占主导地位, 但随着时间推移算式 (4) 所述的 VGS 上升也会渐渐显现。也就是说, MOSFET 的 CGD/CGS 比值、驱动电路的 RG\_EXT、门极驱动信号的电感 L\_TRACE 都会造成较大影响。

如 Figure 5 所示, HS 侧相关的(II)-2 电流 i\_CGD2 的方向是会使 VGS 被拉高的方向。由于这个原因, 本来应当 off 的 HS 侧会根据 VGS 被拉高的程度可能会 Turn on (Self-Turn on), 与 LS 侧的 ON 动作发生重叠, 这样两个 MOSFET 同时 ON, 会产生贯通电流。

i\_CGD2 会一直流动到 Turn on 动作结束为止, 并把一部分能量存储在 L\_TRACE 中, 最终在 VSW 的变化结束时消失, 此时 L\_TRACE 会如 Figure 5 所示产生自感电动势, 这些就是图中的事象(III)。从而导致 i\_CGD2 的数值根据 RG\_EXT 等开关条件的不同, 可能会达到几安培、自感电动势较大。

作为结果, 门极电压的变化可见 Figure 6。图中的编号与 Figure 5 的编号一致, 而 VGS 的虚线则表示理想的电压波形。

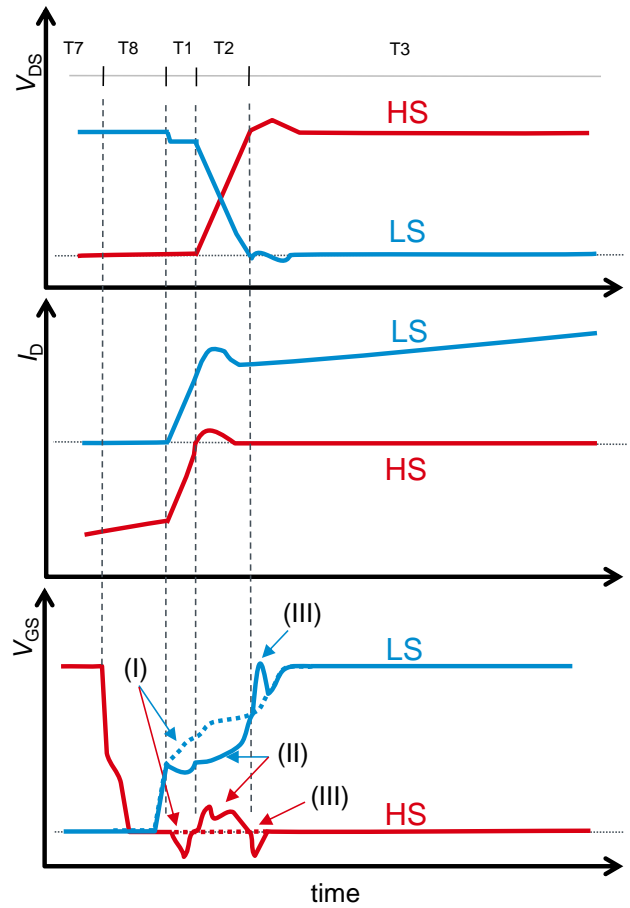


Figure 6. Gate-Source 电压的变化 (LS 侧 Turn on 时)

Figure 7 表示将罗姆制造的 MOSFET 用于桥式电路, LS 侧 Turn on 时的双脉冲试验结果。外接门极电阻 RG\_EXT 为 0Ω (Figure 7(a)) 和 10Ω (Figure 7(b))。

RG\_EXT 较小时, Figure 7(a)事象(I)表示的 VGS 的减少幅度会较大。而且, 由于开关速度非常快, 虽然事象(III)很显著, 但由于 RG\_EXT 为 0Ω, 事象(II)的波形几乎观测不到。另一方面, 查看 Figure 7(b)的事象(II)-2, 会发现在 RG\_EXT 的影响下 VGS 显著被拉高。

从这个结果可以明白, 要减小 LS 侧 ON 时会诱发 HS 侧 Self-Turn On 的事象(II)-2 的 VGS 上升, 应该减小 HS 侧 Turn off 时外接门极电阻 RG\_EXT。但是通常会将 HS 侧和 LS 侧的 RG\_EXT 设为相同数值, 因此减小 RG\_EXT 的话 LS 侧的 dVDS/dt 会增大, 如算式 (1) 所示 HS 侧的 i\_CGD 会增加。结果如算式 (4), HS 侧电压尖峰会增大。所以, Turn on 时和 Turn off 时的 RG\_EXT 需要分别设定, 仅在 Turn off 时减小 RG\_EXT 数值。实现的手法通常是像 Figure 8 那样追加二极管等元件, 这样 Turn on 时动作电阻仅有 RG\_ON, 而 Turn off 时则是 RG\_ON 和 RG\_OFF 的并联电阻, 即 Turn on 时电阻更大。

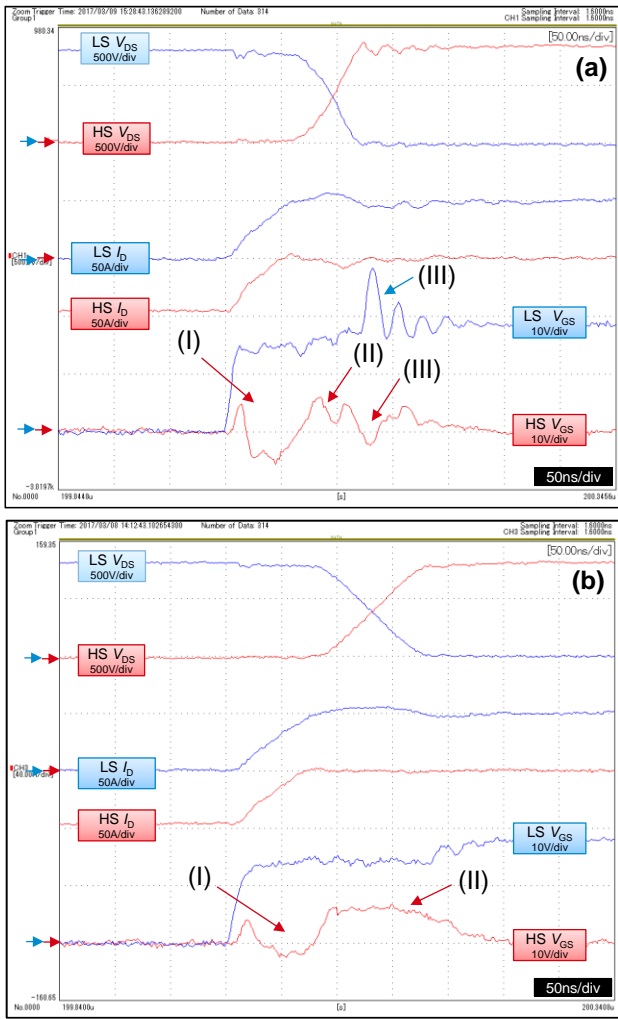


Figure 7. Turn on 波形  
(a)  $R_{G\_EXT} = 0\Omega$ 、(b)  $R_{G\_EXT} = 10\Omega$

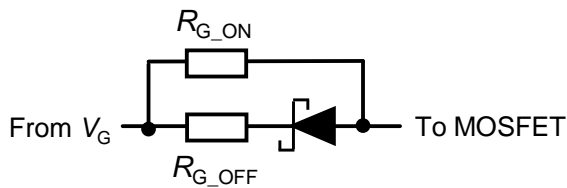


Figure 8. 门极电阻调整电路 (将 Turn off 加快)

此外, 关于 Figure7, HS 侧门极波形在事象(I)即将动作之前有一正向的电压尖峰, 是因为事象(I)的电流开始流动的瞬间  $L_{SOURCE}$  产生了自感电动势, 并通过  $C_{GS}$  观测到。

### Turn off 时门极信号的动作

接下来说明 LS Turn off 时的动作。

Figure 9 表示了 LS 侧 MOSFET 在 Turn off 时的电流状况。与 Turn on 时相同、各事象附上了(IV)、(V)、(VI)的编号。与 Turn on 时相比, 仅  $V_{DS}$  和  $I_D$  的变化顺序不同, 基本动作是相

同的:

- |          |         |
|----------|---------|
| Turn off | Turn on |
| 事象(IV) → | 事象(II)  |
| 事象(V) →  | 事象(III) |
| 事象(VI) → | 事象(I)   |

事象(IV)是指  $dV_{DS}/dt$  引发的 LS 侧  $V_{GS}$  的上扬和 HS 侧  $V_{GS}$  的负电压尖峰 (Figure 3-T4)。事象(V)是指 T4 时间段结束时随着算式 (1) 所示的  $I_{CGD1}$  消失时产生的电压尖峰。而在这之后漏极电流变化 (Figure 3-T6)、 $L_{SOURCE}$  引发自感电动势 (算式 (2))、电流的流动为事象(VI) (figure 9)。由于该电流对 MOSFET 的  $C_{GS}$  充电 (以 Source 侧为负极), 在 HS 侧将  $V_{GS}$  拉高、在 LS 侧将  $V_{GS}$  推高到正侧, 以此妨碍  $V_{GS}$  下降。根据上述,  $V_{GS}$  的动作如 Figure 10 所示。图中  $V_{GS}$  的虚线和 Figure 6 一样, 表示理想的电压波形。

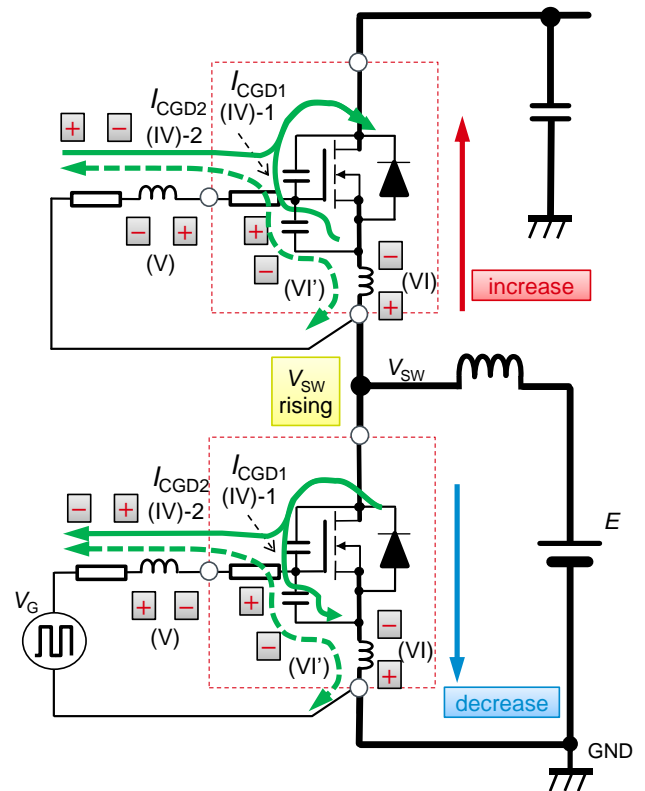


Figure 9. LS Turn off 时门极信号电流动作

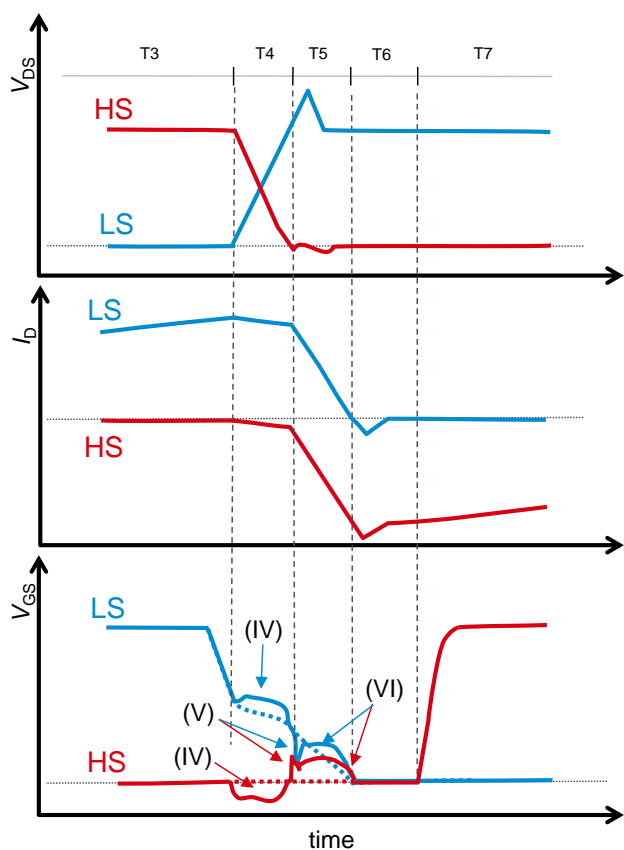


Figure 10. Gate-Source 电压的动作 (LS 侧 Turn off 时)

Figure 11 为罗姆制造的 MOSFET 在 Turn off 时的双脉冲测定波形。外接门极电阻与 Turn on 时一样,为 0Ω(Figure 11(a)) 和 10Ω (Figure 11(b))。

可以看出事象(V)中尖峰电压很显著。另外,由于  $V_{DS}$  的变化带来的事象(IV)的影响较小,由于 HS 侧的事象(IV)负尖峰电压会时常超过规格,因此电路方面需要做出对策。为了使 Turn off 时 HS 侧负尖峰电压变小,HS 侧门极电阻  $R_{G\_EXT}$  可以设置得较小,如 Figure 8 说明了在通常会使用的门极电阻调整电路中,如果使用阻值较大的  $R_{G\_ON}$ ,事象(IV)会变得显著因此需要注意。关于驱动电路的对策例,会在别的应用手册中说明(\*1)。

此外,事象(VI)导致  $V_{GS}$  被拉高,这个情况出现在 Turn off 即将结束之前,于是即使 HS 侧 Turn on,LS 侧依旧在 Turn off 状态,所以通常没有问题。

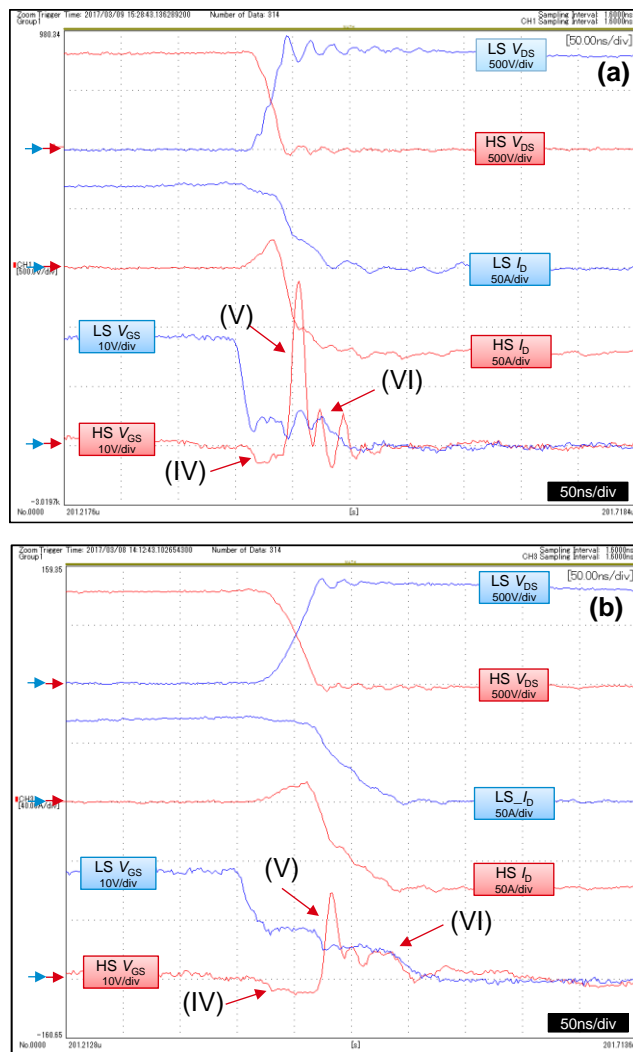


Figure 11. Turn off 波形  
(a)  $R_{G\_EXT}=0\Omega$ 、(b)  $R_{G\_EXT}=10\Omega$

### 总结

正如以上说明,桥式电路 MOSFET 门极信号的动作是两个 MOSFET 互相关联而动作,情况非常复杂,而且根据门极驱动电路的条件动作也会变化。因此,即使电路完全一样,仅仅基板发生变化,也有可能电路动作变得完全不同。我们需要以这里说明的基本动作来考虑,进行波形解析、考虑问题对应方法。此外,这次所示的电路是 LS 侧 MOSFET 开关的 BOOST 电路,而对于 HS 侧开关的 BUCK 电路,只是 LS 和 HS 互换,动作其实是完全相同的。因此,可以作为基本的考虑方法应用于各类硬开关的电路拓扑。

以上

参考文献:

- \*1 「栅极-源极电压的浪涌抑制方法」  
应用手册 (No. 62AN043C Rev.002)  
ROHM 有限公司, 2020 年 4 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/>