

SiC MOSFET

栅极-源极电压的浪涌抑制方法

在各类电源电路和大功率供电电路中,经常使用 MOSFET 和 IGBT 等功率元器件来作为开关器件。近年来得到加速应用的 SiC MOSFET 的动作速度很快,以至于不可忽视器件本身的封装电感和外围电路的布线电感出于电压电流变化而对开关动作所产生的影响。特别是当器件自身的电压和电流发生变化时,器件的栅极与源极之间的电压有时会产生预期之外的正向或者负向浪涌,针对该现象已经有各种各样的应对策略研究。本应用手册的目的,是在于阐明 MOSFET 的栅极和源极之间浪涌产生的原因,并提出最适合的应对方法。

在栅极-源极电压上所产生的浪涌

在应用手册《桥式电路中,器件的栅极-源极电压动作特性》* 1 中,详细说明了桥式电路中的开关元器件,在开通或者关断过程中所产生的栅极-源极电压浪涌现象。在图 1 所示的同步整流 boost 电路中,不仅是开关动作一侧(LS),在同步整流一侧(HS)也同样会因为开关动作一侧的电压和电流变化而产生驱动电压浪涌。

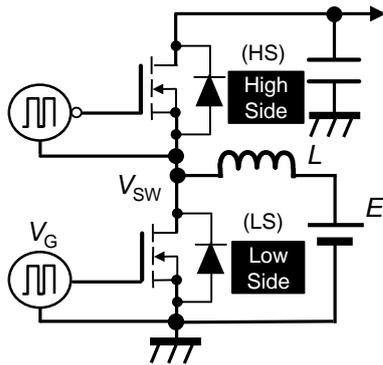


图 1. 同步整流 boost 电路

图 2 和图 3 分别标出了器件在开通和关断过程中的栅极-源极电压动作情况。其中,横轴代表时间,各个时间段 T_k ($k=1\sim 8$) 的具体定义如下。

- T1: LS 侧器件开通, MOSFET 的电流发生变化阶段
- T2: LS 侧器件开通, MOSFET 的电压发生变化阶段
- T3: LS 侧器件完全导通阶段
- T4: LS 侧器件关断, MOSFET 的电压发生变化阶段
- T5: LS 侧器件关断, MOSFET 的电流发生变化阶段
- T4-T6: 截止到 HS 侧器件开通的死区时间

T7: HS 侧器件完全导通阶段(同步整流阶段)

T8: HS 侧器件关断,截止到 LS 侧器件开通的死区时间

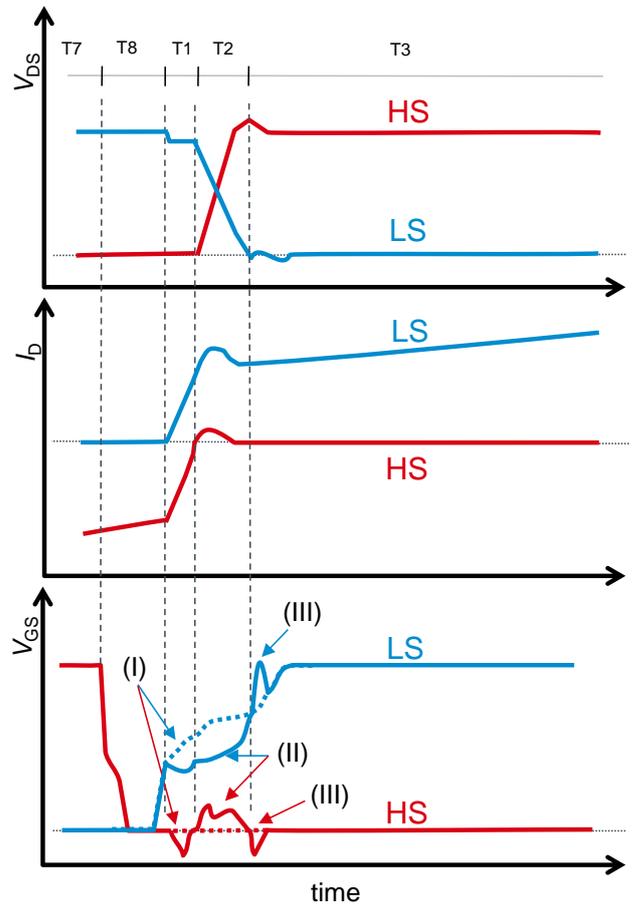


图 2. 栅极-源极电压的动作特性(开通时)

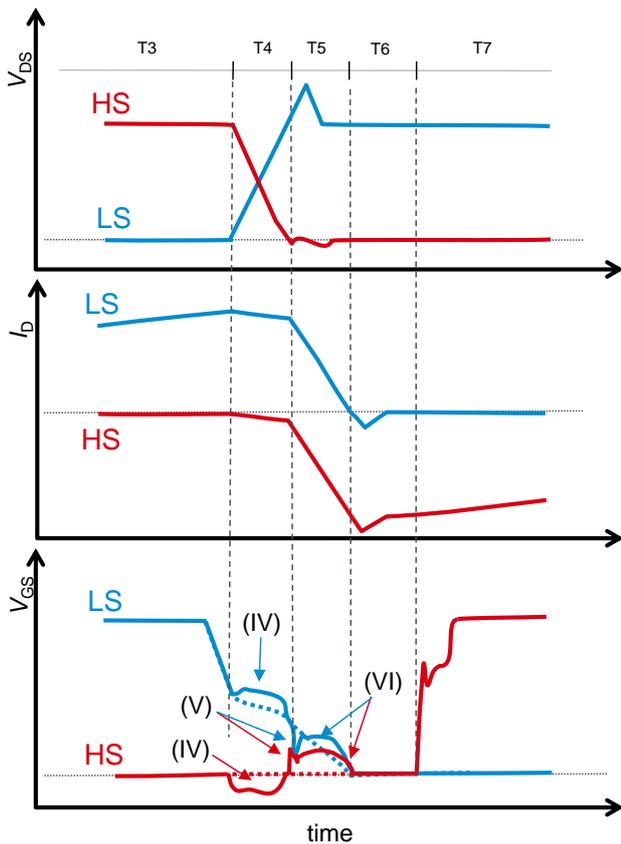


图 3. 栅极-源极电压的动作特性（关断时）

在图 2 和图 3 中所标注的现象 (I) ~ (IV) 主要由以下原因所引起。

- 现象 (I)、(VI): 漏极电流变化 (dI_b/dt)
- 现象 (II)、(IV): 漏极-源极电压变化 (dV_{DS}/dt)
- 现象 (III)、(V): 漏极-源极电压变化过程结束

浪涌抑制电路

如前所述，栅极-源极电压 (V_{GS}) 的正向浪涌在开关动作一侧和非开关动作一侧都有发生，但是需要特别关注的是发生在非开关动作一侧的正向浪涌（图 2 的现象 (II)）。其原因在于此时开关动作一侧的器件已处于开启状态，如果非开关动作一侧器件的栅极正向浪涌电压超过 MOSFET 的栅极阈值电压 ($V_{GS(th)}$)，则上下桥臂同时导通会产生贯穿性短路电流。但是，因为 SiC MOSFET 的跨导比 Si 基 MOSFET 要小一个数量级以上，因此不会立即流过较大的贯穿性短路电流。因此，即便有贯穿性短路电流流过，只要有充分的冷却能力，只要不超过 SiC MOSFET 的 $T_{j(max)}$ 基本认为没有问题。然而即便如此，此时系统整体的效率降低，绝非所希望得到的状态，因此需要追加浪涌抑制电路，以尽量避免正向浪涌超过 $V_{GS(th)}$ 。

图 4 是浪涌抑制电路的一个示例电路。

图 4 是在普通的驱动电路中，追加了浪涌抑制电路的示例电路，其具体功能在表 1 中进行了说明。

另外，下图 VCC2 是开通驱动电源，VEE2 是负压关断电源，OUT1 输出 MOSFET 的开通/关断控制信号，OUT2 输出米勒钳位控制信号，GND2 代表驱动电路的 GND。采用负压关断时参考图 4 (a)，不使用负压关断时参考图 4 (b)。

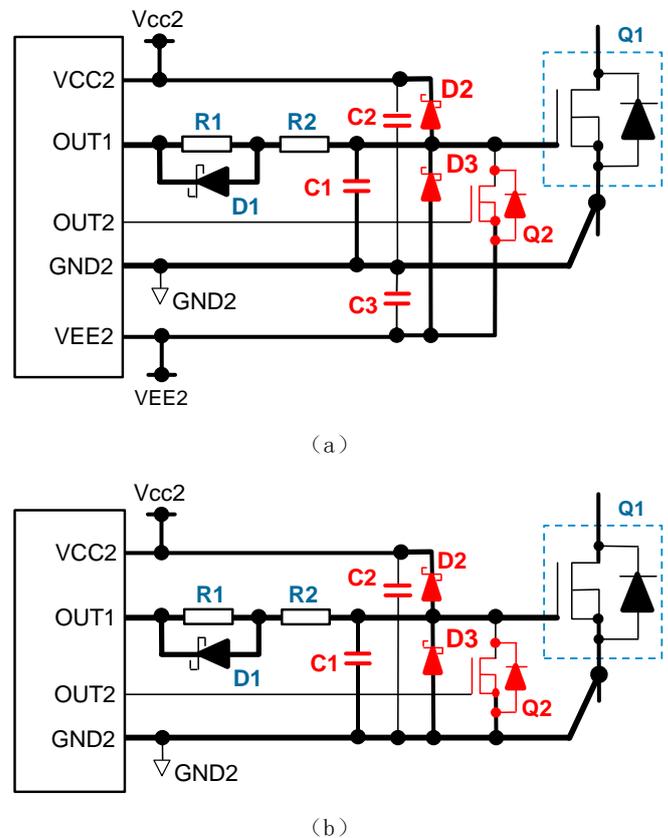


图 4. 正向电压浪涌抑制电路

(a) 负压关断驱动（有 VEE2），(b) 0V 关断驱动（没有 VEE2）

表 1 浪涌抑制电路中的功能说明

用途	符号	详细信息
抑制正向浪涌	D2 (C2)	在开关动作一侧器件开通时，用来抑制正向浪涌电压。 (C2 是旁路电容)
抑制负向浪涌	D3 (C3)	抑制开关动作一侧与非开关动作一侧的负向浪涌。 (C3 是旁路电容器)
抑制正向和负向浪涌	Q2	抑制非开关动作一侧的正向和负向浪涌。
抑制误开启	C1	抑制非开关动作一侧的正向浪涌。

一般要求 D2, D3 能够吸收数十纳秒的浪涌，并且希望以尽可能低的电位进行钳位，所以推荐使用肖特基二极管 (SBD)。另外，如果选择 SOD-323FL 等背面电极封装的低寄生感量封装 SBD，钳位效果会更好。

正向电压浪涌抑制对策

为了抑制图 2 中所示的，在器件关断时非开关动作一侧器件的 V_{GS} 上所产生的正向浪涌现象 (II)，比较有效的方法是采用表 1 中所示的追加 Q2 或者 C1。

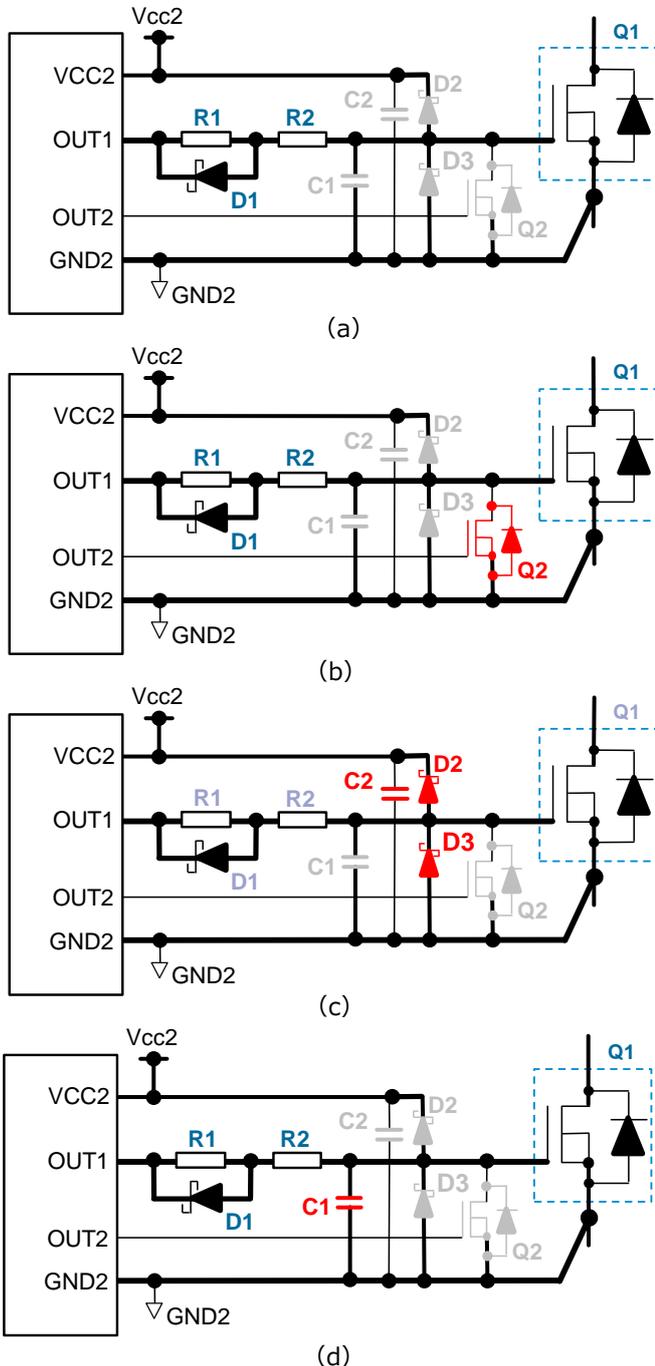


图 5 浪涌抑制的实际验证电路

- (a) 没有抑制电路
- (b) 仅使用米勒钳位 MOSFET
- (c) 仅使用电压钳位 SBD
- (d) 仅使用防止误开启的电容

为了验证使用罗姆的 SiC MOSFET (SCT3040KR) 时，浪涌抑制电路是否能发挥作用，我们分别采用了不同的浪涌抑制电路，并对实际开关波形进行了观测。图 6 是所使用功率器件

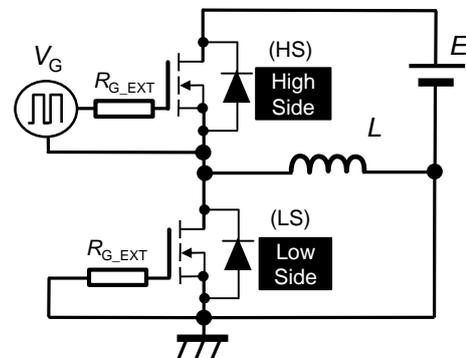
(SCT3040KR) 的外观和规格。



V_{DS}	1200 V
$R_{DS(ON)}$	40 mΩ
I_D	55 A
P_D	262 W ^c

图 6 SCT3040KR (4L) 的外观和大致规格

如图 5 所示，浪涌抑制电路分别为以下 4 种组合：(a) 没有抑制电路，(b) 只有米勒钳 MOSFET (Q2)，(c) 只有电压钳位 SBD (D2, D3, C2)，(d) 只有误开启抑制电容 (C1)。对以上 4 种组合进行如图 7 所示的双脉冲试验，确认 V_{GS} 的浪涌电压情况。



E : 800V, L : 250uH, R_{G_EXT} : 10 Ω

图 7 双脉冲测试电路

图 8 是器件导通时的波形。从上到下依次为开关动作一侧器件的栅极-源极电压 ($V_{GS,HS}$)，非开关动作一侧器件的栅极-源极电压非 ($V_{GS,LS}$)，开关动作一侧器件的漏极-源极电压 (V_{DS}) 和漏极电流 (I_D)。在图 8 中，将浪涌抑制电路 (a)、(b)、(c) 与图 4 (b) 中的抑制电路 (e) 的实测波形叠加在一起进行了比较。

如从图 8 中可以明显看出，对于没有采取浪涌抑制对策的电路 (a) 和仅使用钳位 SBD 抑制的电路 (c) 中，正向浪涌电压无法得到有效抑制， $V_{GS,LS}$ 上升较多，超过了 $V_{GS(th)}$ ，与其他 2 种抑制措施相比，可以看到其 I_D 有所增大。也就是说，此时非开关动作一侧 MOSFET (本例为 LS 侧 MOSFET) 发生了误开启。为了防止这种现象发生，必须采用抑制对策 (b) 的电路。

然而，为了实现电路 (b)，必须能够提供用于驱动米勒钳位 MOSFET 的驱动信号。该信号需要实时监视 V_{GS} 电压以掌握发出驱动信号的时机，一般来说使用驱动芯片的方式比较多。因此如果选用了没有该控制功能的驱动芯片，则无法实现该抑制功能。

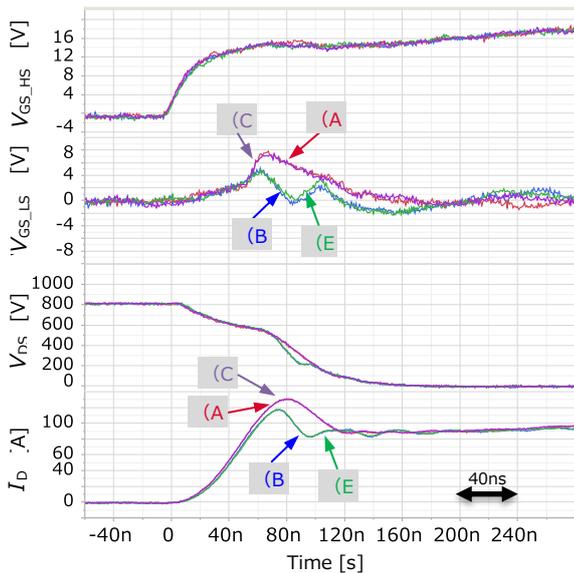


图 8 开通波形

- (a) 没有抑制电路 (b) 仅使用米勒钳位 MOSFET
- (c) 仅使用电压钳位 SBD (e) 米勒钳位 MOSFET + 电压钳位 SBD

出于以上原因，也建议使用如图 5 (d) 所示的电路，通过在 MOSFET 的栅极-源极之间连接误开启抑制电容，来抑制浪涌电压。图 9 列出了接有误开启抑制电容条件下的开通波形。从实测波形可以看出，与不带抑制电容的电路 (a) 相比，接有抑制电容的电路 (b)、(c)、(d) 中，其 V_{GS_LS} 的正向浪涌变小， I_D 的开启浪涌也减小。

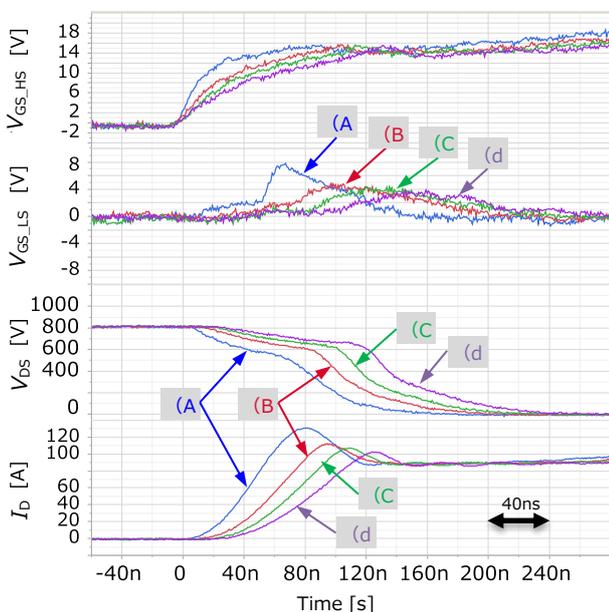


图 9 使用误开启抑制电容的实测器件开通波形

- (A) 没有抑制电路 (b) 2.2nF (C) 3.3nF (d) 4.7nF

然而，从 I_D 波形也可以看出来，追加误开启抑制电容后，器件开通过程会变慢，开关损耗会增大。因此，需要选择能够满足要求的最小电容值。本例中，采用 2.2nF 就足够了。

负向电压浪涌对策

为了抑制如图 3 的现象 (IV) 所示，在开关动作一侧的器件关断时，非开关动作一侧器件的 V_{GS} 产生的负向浪涌，比较有效的做法是追加如表 1 所示的 Q2 或者 D3。

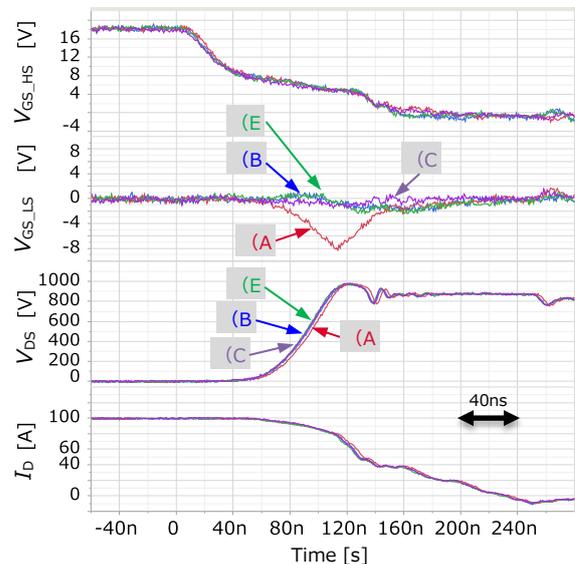


图 10 关断波形

- (a) 没有抑制电路 (b) 仅使用米勒钳位 MOSFET
- (c) 仅使用电压钳位 SBD (e) 米勒钳位 MOSFET + 电压钳位 SBD

图 10 是器件关断过程的波形。与图 8 一样，从上到下依次是 V_{GS_HS} 、 V_{GS_LS} 、 V_{DS} 、 I_D 。图 10 将没有抑制电路的 (a) 与有抑制电路的 (b)、(c)、以及图 4 (b) 所示的抑制电路 (e) 条件下的实测波形进行了重叠对比。从实测波形可以看出，采用各个抑制电路都能够去除负向浪涌。

此外，由于采用误开启抑制电容并不能去除负向浪涌，因此，如果无法使用浪涌抑制电路 (b) (需要专门驱动芯片)，则需要考虑同时使用浪涌抑制电路 (c) 和 (d)，来实现系统整体效率的最优化。图 11 中标出了实测的追加误开启抑制电容时，器件的关断波形。

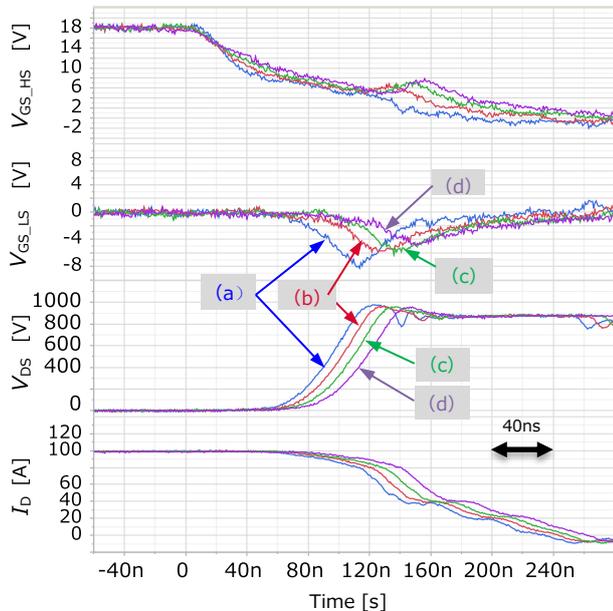


图 11 使用误开启抑制电容的关断波形

(a) 没有抑制电路 (b) 2.2nF (c) 3.3nF (d) 4.7nF

关于浪涌抑制电路的布线设计注意点

图 12 是浪涌抑制电路布线设计的一个实例。

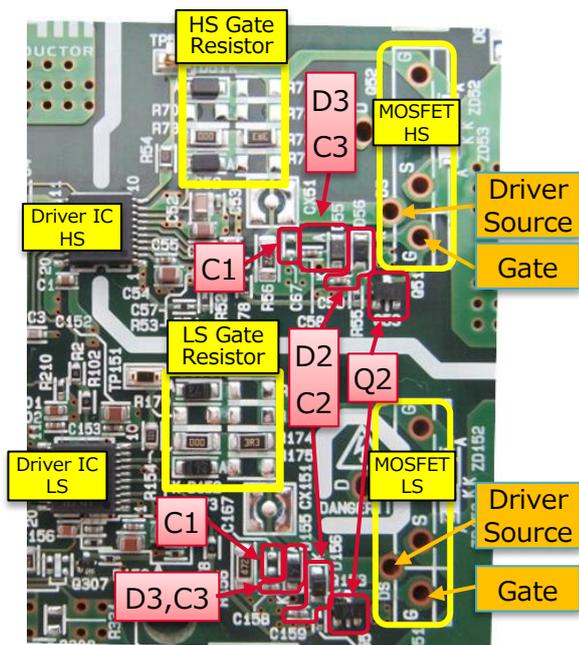


图 12 浪涌抑制电路的布局示例

图 12 所示基板为半桥结构电路，MOSFET 在垂直方向上一上一下配置，栅极端子和驱动源极端子在各个 MOSFET 的下方。并且， V_{GS} 浪涌电压的抑制电路被布置在各个栅极端子非常近的位置，以使抑制电路与栅极端子之间的走线尽可能的短。

图 13 是浪涌抑制电路的走线布局图。当采用多个（多种）浪涌抑制电路时，最优先考虑的是米勒钳位 MOSFET (Q2) 的

贴装位置，其次是抑制负向浪涌的电压钳位 SBD (D3) 和其旁路电容器 (C3)，之后是抑制正向浪涌的电压钳位 SBD (D2) 和其旁路电容 (C2)，最后是误开启抑制电容 (C1)。特别需要注意的是，如果米勒钳位 MOSFET 的贴装位置距离栅极端子超过几厘米的话，由于布线电感影响，浪涌抑制效果将会被大大削弱。

此外，需要注意的是，要将浪涌抑制电路的返回走线（即返回到驱动源极端子的走线），以及浪涌抑制电路走线所构成的环路做到最小。由 SiC MOSFET 高速开关动作在 I_D 上产生的 di/dt 会产生较大的 EMC 噪声，并耦合到上述布线环路中。

本例所采用的评估板是 4 层结构 PCB，其返回走线是在第 2 层以全层返回走线的方式进行布线。通过这种将返回走线直接配置在浪涌抑制电路走线正下方的做法，可以实现环路面积的最小化。

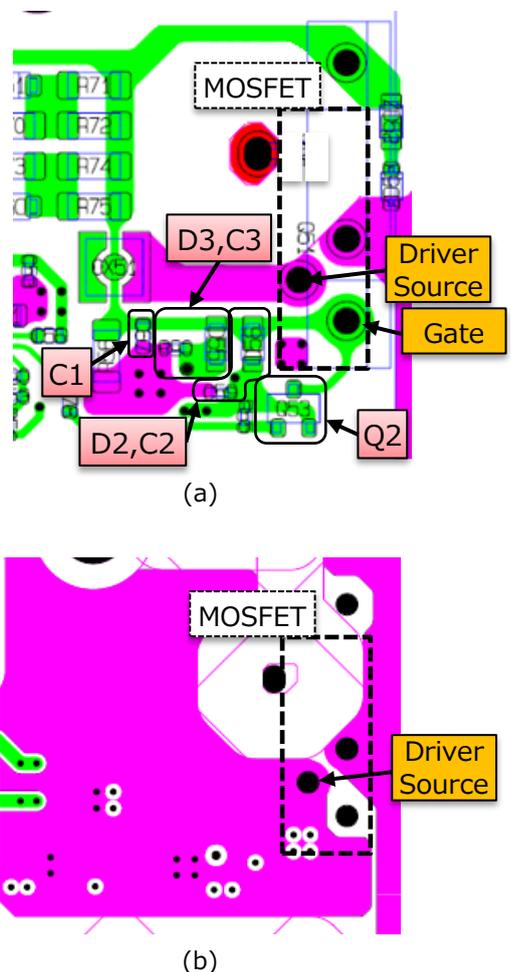


图 13 浪涌抑制电路的走线布局
(a) 第 1 层 (b) 第 2 层

此外，如果从驱动电源过来的布线电感比较小，可以不使用配置在电压钳位 SBD 旁边的旁路电容，但是，一般来说，驱

动电源都会距离较远，因此需要在 SBD 的旁边配置一个旁路电容，使得 SBD 能够在低布线电感影响条件下工作。对于旁路电容的选取，需要充分考虑布线电感特性，推荐选择自身谐振点在几十 MHz 的电容（0.1 μ F，1.0 \times 0.5mm PKG）。

如上所述，在桥式结构电路中，MOSFET 的栅极驱动信号的动作受到各个 MOSFET 相互之间的影响，会在栅极-源极电压上产生预期之外的浪涌电压。因此，需要结合板子布局和外围电路元器件选型进行各种各样的浪涌抑制方法。通过使用本资料所提到的各种方法，可以选择出适合各种实际应用情况的最佳浪涌抑制方案。

结束

参考文献：

- * 1 《桥式电路相关的 Gate-Source 电压的动作》
应用手册（No. 62AN044C 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/>