

SiC MOSFET

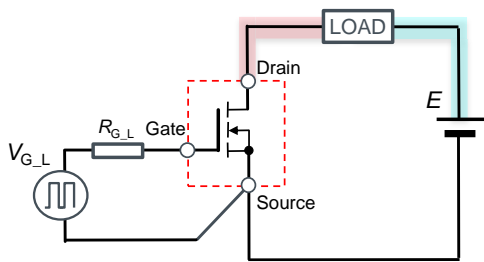
SiC MOSFET 基板 Layout 设计上的注意点

SiC MOSFET 被用作各种电源应用和功率线的开关元件。为了最大限度地导出开关特性，要求非常快速的工作，不过，众所周知需要各种各样的对策，如栅极-源极间电压和漏极-源极间电压的浪涌和桥结构中的错误点弧等。因此，在本应用手册中，对使用分离元器件封装的 SiC MOSFET 的基板布局设计中的注意点进行说明。

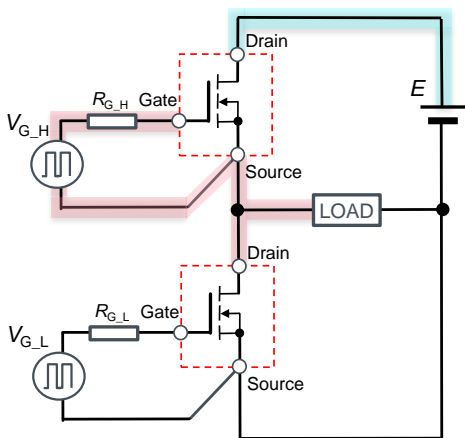
高压电路和驱动电路的共存

SiC MOSFET 控制超过 1000V 的电压，转换为系统所需的电压，一般使用被称为电压驱动型的驱动电路，SiCMOSFET 的栅极引脚用十几 V 的电压来驱动，从而接通或断开高压电路。因此，在封装 SiC MOSFET 的基板上，1000V 以上的高压电路和十几 V 的驱动电路通常是混在一起的。

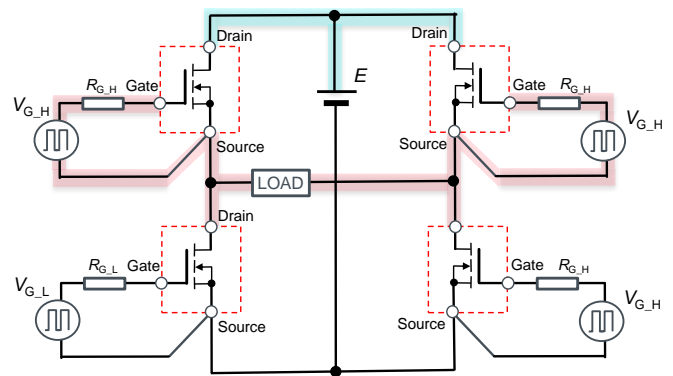
Figure 1 是使用 SiC MOSFET 的一般电路结构。该图(a)为单端型，(b)为半桥型，(c)为全桥型。图中的蓝色部分是以对地为基准的高压部分，红色是高电位和对地电位高速开关工作的部分。



(a) 单端型



(b) 半桥型



(c) 全桥型

Figure 1. SiC MOSFET 的使用电路示例

(a)单端型使用一个 SiC MOSFET，接通和断开与高压电源 E 连接的负载 LOAD。(b)半桥型串联连接两个 SiC MOSFET，交替导通它们的同时将负载与高压电源连接，或与 GND 连接。(c)全桥型连接两个半桥型，以负载作为对照，通过各桥交替接通和关断上下 SiC MOSFET，对负载施加正负电压。

在任何电路构成中，在包含高压电源 E 的电路中都存在高速接通和断开负载电流的路径。为了尽可能地减小电流变化引起的辐射噪声的影响，必须尽可能地分离高压电路和驱动电路。另外，由于开关速度快到数十 ns，共模电流也容易流动，在所有的地方被生成的寄生电容和寄生电感也必须注意。

此外，由于 SiC MOSFET 的散热也是一个重要的设计要素，因此在设计电路板布局时必须考虑冷却机制。当 SiC MOSFET 通过散热器等冷却时，布局设计还必须考虑有效散热和便于组装。

为了最大限度地发挥 SiC MOSFET 的高速开关操作性能，我们将从下一节开始详细说明基板布局设计时的注意事项。

驱动电路布线长度的最优化

驱动电路是指栅极驱动器 IC 和 SiC MOSFET 之间的所有电路，其布线电感通过开关操作时产生的栅极电流产生正浪涌和负浪涌(*1)。因此，必须尽可能地减小寄生电感，方法只有缩短布线长度。另外，从 SiC MOSFET 到栅极驱动器 IC 的返回路径(GND 接线)与从栅极驱动器 IC 到 SiC MOSFET 的信号线放在不同层，在其正下方作为 GND 层布线。减小电流路径的环路，使寄生电容和寄生电感最小化，可以减轻噪声和避免误动作的风险，在功率线路上的电流变化时将噪声抑制到最小。

Figure 2 是罗姆制造的第四代 SiC MOSFET 评估基板 (P04SCT4018KE-EVK-001)(*5)的驱动电路及其 Layout。

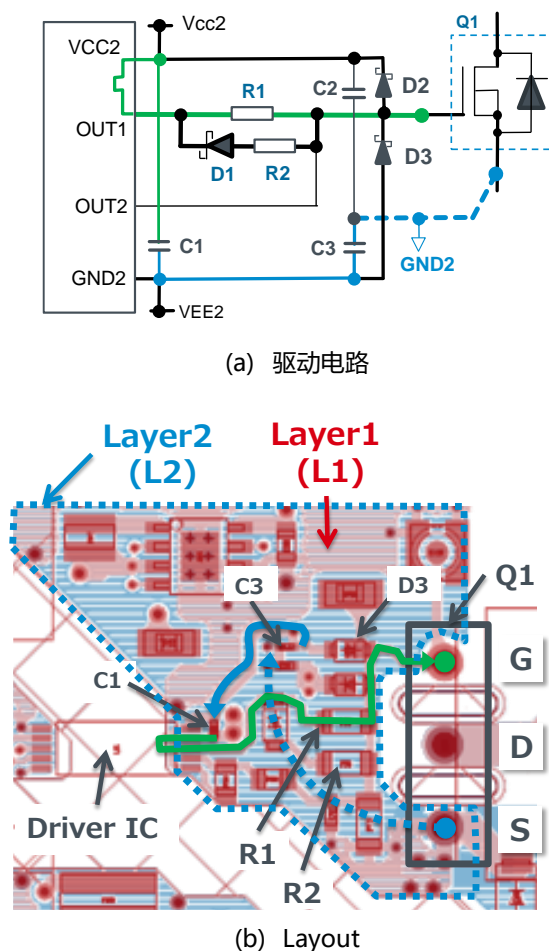


Figure 2. TO-247N 驱动电路和 Layout 示例

SiC MOSFET 的驱动功率在从栅极驱动器 IC (BM61S41RFV-C) 的去程(绿色路径)和从 SiC MOSFET 的回程(蓝色路径)形成的空间中传播。作为去程的驱动信号通常被插入用于调整开关速度的栅极电阻(R1,R2)，因此从栅极驱动器 IC 的 OUT 引脚到 SiC MOSFET 的栅极引脚(G)的布线铺设在表层(L1)上，从 MOSFET 的 Source 引脚(S)到栅极驱动器 IC 的 GND2 引脚的布线要在 L1 层的正下方的 L2 层，覆盖 L1 层的全部布线。这次展示的驱动电路，虽然使用了负偏置电源 VEE2，但是因为

使用了不支持 VEE2 的栅极驱动器 IC，回程通过 L2 层到旁路电容器 C3，经由安装在 L1 层 C3 在 L1 层与栅极驱动器 IC 的 GND2 引脚连接。

一般使用的 3 引脚 TO-247N 的情况下，G 端子和 S 端子位于封装的相对两侧，因此在驱动信号的往复路径上总是会形成一定的空间。因此，SiC 由于 MOSFET 的 D-S 之间流动的大电流的变化所产生的辐射噪声很大，容易在栅极驱动电路中引起不必要的电压感应，因此可以在 L2 层中来布线 S 端子到栅极驱动器 IC 的返回路径，从而将噪声影响降至最低。

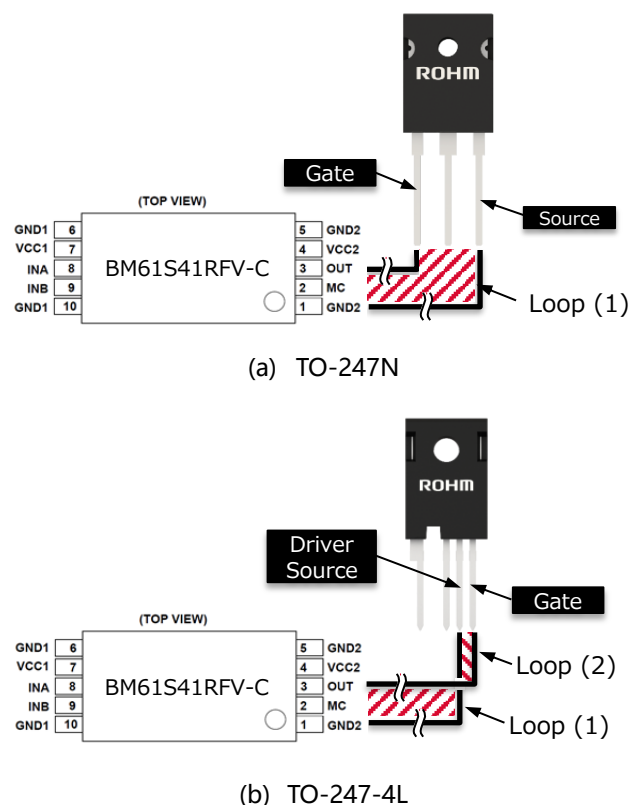
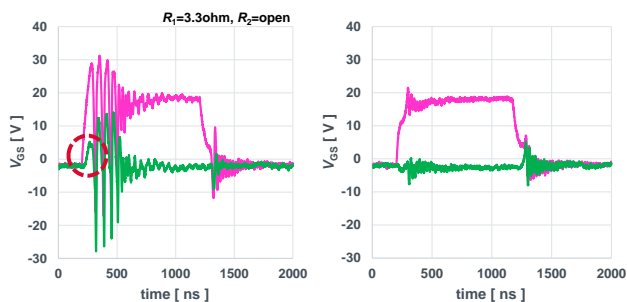


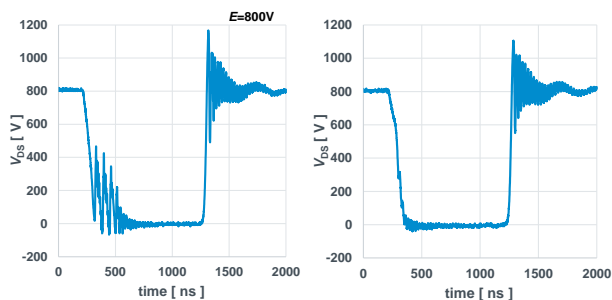
Figure 3. 驱动电路 布线 Layout 示例

另外，到目前为止的栅极驱动器 IC 是如 Figure 3(a)所示，很多情况下 TO-247N 是在单个平面上布局驱动电路的引脚分配，而可以大幅改善开关损耗的 4 引脚封装 TO-247-4L 是同(b)所示的引脚分配，作为信号线的 Gate 引脚和成为回程的 Driver Source 引脚的配置与驱动器 IC 的引脚分配相反，必须布线交叉所以，在同一面上不能 pattern layout。因此，由于该图(b)所示的 OUT 信号和 GND2 信号所形成的环路面积(1)和(2)所引起的电压极性相反，所以必须使其面积比相等，否则会造成误动作。这是因为 TO-247-4L 的电流变化 dI_D/dt 非常大，当该 dI_D/dt 引起的磁通变化 ($d\Phi/dt$) 穿过该环路区域时，就会产生电压电动势。而且，SiC MOSFET 的 G 和 S 之间会产生与该环路面积成正比的电压，如正浪涌或负浪涌，从而引起振荡和其他故障，导致电路损坏。因此，为了尽量减小 OUT 信号和 GND2 信号所形成的 LOOP 面积，从 SiC MOSFET 到栅极驱动器 IC 的返回路径采用在 L2 层进行布线。

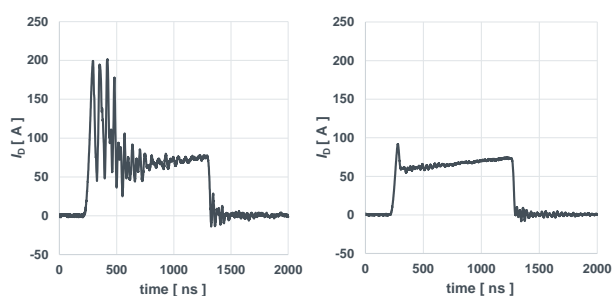
Figure 4 是返回路径不是闭锁布线的桥结构(Figure 1(b))中的开关波形。在背面布线中正常工作时的波形也在该图右侧示出,显示了两者的差异。(a)是栅极电压波形, (b)是漏极-源极电压波形, (c)是漏极电流波形。栅极电压波形显示的是低边(桃红色)和高边(绿色)的两种波形,在导通时,高边的栅极电压与低侧同步上升(红虚线),导致本应关闭的高边 MOSFET 导通,由于贯通电流流动增加的平台电压而暂时进入关断状态,之后栅极电压出现剧烈的电压波动。



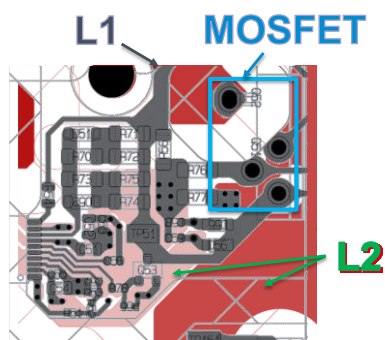
(a) 栅极电压波形



(b) 漏极-源极波形



(c) 漏电流波形



(d) 回路没有闭锁布线的 Layout 示例

Figure 4. Layout 故障时的开关波形

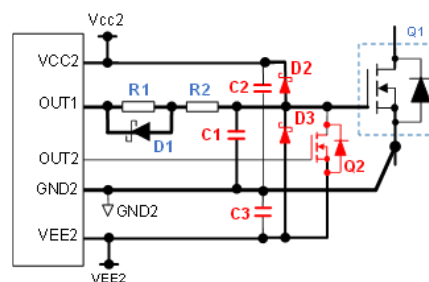
栅极浪涌保护电路的 Layout 优先顺序

SiC MOSFET 与 Si MOSFET 相比,在栅极引脚的额定电压范围的余量较窄的状态下使用的情况较多,需要注意。特别是在桥接结构使用的情况下,如果不实施栅极浪涌对策,常常发生超过栅极额定的电压浪涌而苦恼应对。因此,预先设置栅极浪涌对策电路是极其重要的。栅极浪涌的保护电路有以下几种。^(*)2)

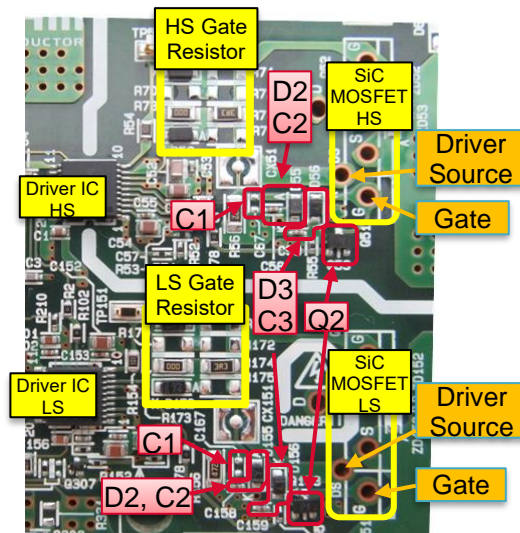
- active mirror clamp 电路
- 二极管钳位电路 (正浪涌 · 负浪涌)
- G-S 间电容

active mirror clamp 电路,有内置于栅极驱动器 IC 的内嵌型和外置 active mirror clamp 用 MOSFET 型,这两种电路都需要距离 SiC MOSFET 约 20 mm 或更短的布线长度,以消除几十 ns 的短栅极浪涌。

另外,二极管钳位电路中的二极管的选择也很重要,需要选择封装电感小的二极管,比起翼型,下电极型更适合。并且在 SiC MOSFET 附近 Layout 的优先顺序是 active mirror clamp 电路→负浪涌用钳位二极管→正浪涌用钳位二极管→G-S 间电容器。



(a)



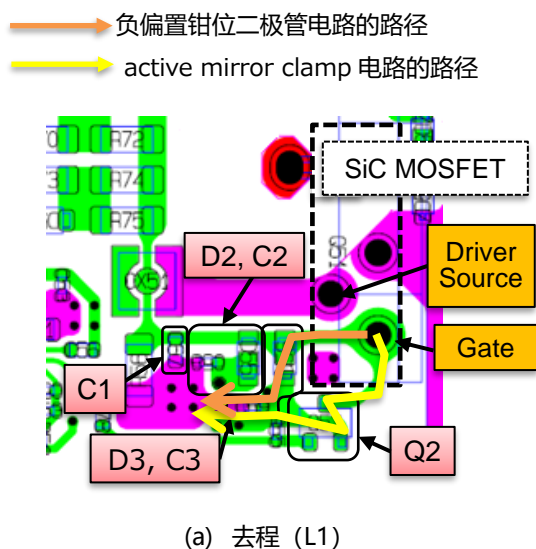
(b)

Figure 5. 栅极浪涌保护电路和 Layout 示例

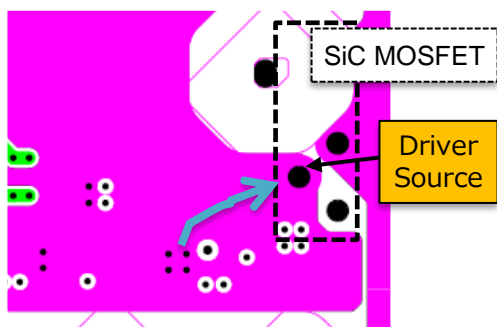
Figure 5(a)中显示了 TO-247-4L 封装用评估板中的栅极浪涌电路示例及其基板照片(b)。在该电路中,桥式配置的 SiC MOSFET 分上下两个位置,每个 SiC MOSFET 都设有栅极驱动器 IC,包括钳位 MOSFET(Q2)、负浪涌钳位二极管(D3)及其旁

路电容器(C3)、正浪涌钳位二极管(D2)及其旁路电容器(C2), G-S 间电容器(C1), 按照优先顺序排列。(*6)

Figure 6(a)显示了 L1 层 Layout, 同图(b)显示 L2 层 Layout。通过 Q2 到 VEE2 的 active mirror clamp 电路的路径(黄色)和通过 D3、C3 到 VEE2 的负浪涌钳位二极管的路径(橙色), 每一个 SiC MOSFET 的 G - DS 引脚之间都以最短的路径连接。



(a) 去程 (L1)



(b) 回程 (L2)

Figure 6. 栅极浪涌保护电路的线路 (往返)

驱动电路和高压电路的分离

SiC MOSFET 如 Figure 1 所示, 存在高压电源 E 和 GND 之间高速开关的区域。因此, 高阻抗电路和在 5V 和 3.3V 下工作的一般逻辑电路容易受到在大电流反复接通和断开的开关区域中产生的辐射噪声以及由于高速工作而产生的共模式噪声的影响。因此, 必须尽可能确保栅极驱动电路和高压区域的间隔。

Figure 7 显示了桥结构且并联使用 TO-247-4L 封装的 SiC MOSFET 时的 Layout 示例。右侧为高压电路侧, 左侧为栅极驱动电路侧, 完全分离, 栅极驱动电路的回程由 L2 层形成, 在驱动源 (DS) 端单点接地, 并与 SiC MOSFET 封装中高压电路侧的 GND 相连。

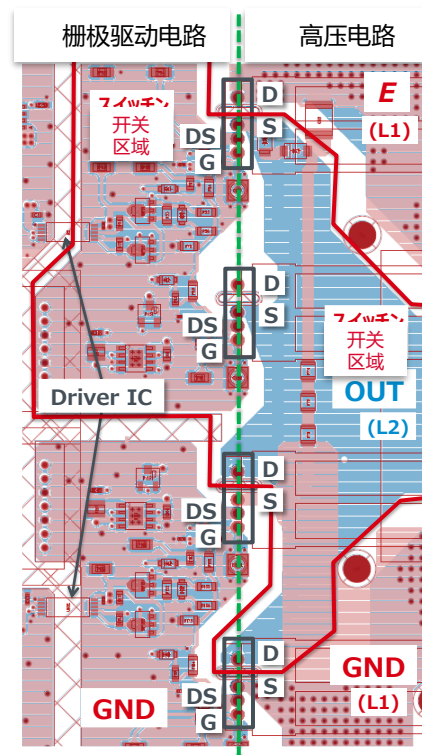


Figure 7. TO-247-4L 并联连接时的 Layout 示例

但是, 用红线围起的区域是开关区域, 通过在 E 和 GND 之间进行高速开关动作而变化, OUT 部分的 pattern Layout 需要尽可能减小与 E 和 GND 部的 pattern Layout 重叠的区域。这是因为与 PCB 层之间的重叠面积成比例的寄生电容与 SiC MOSFET 的输出电容 C_{oss} 并联, 导致开关损耗的增加。

关于高边驱动用绝缘电源的注意事项

为了驱动桥接结构中的高边 SiC MOSFET, 除非使用自举电路等非绝缘方式, 否则绝缘型电源是必要的。通常, 绝缘电源使用绝缘变压器, 但要注意一次和二次之间形成的耦合电容的充放电电流。

Figure 8 表示经由高边驱动电源的共模电流路径, 通常, 作为控制信号侧的一次侧(▽)和作为高压电源侧的二次侧(▼)的 GND 是分离的。因此, 高压侧驱动隔离电源隔离变压器耦合电容的充电电流是图中红色虚线路径上的共模电流。桥式结构中 SiC MOSFET 的开关速度比 Si MOSFET 快得多, 因此 dV_{DS}/dt 很大。共模电流的峰值与这个 dV_{DS}/dt 成比例, 有时可以达到数安培。因此, 不仅会诱发一次侧电路和一次侧电源 VCC1 的误动作, 还会引发无法预料的系统故障等危险。

在这种情况下, 一次侧(▽)和二次侧(▼)的 GND, 如图中蓝虚线那样连接, 可抑制流向接地的共模电流, 从而解决问题。

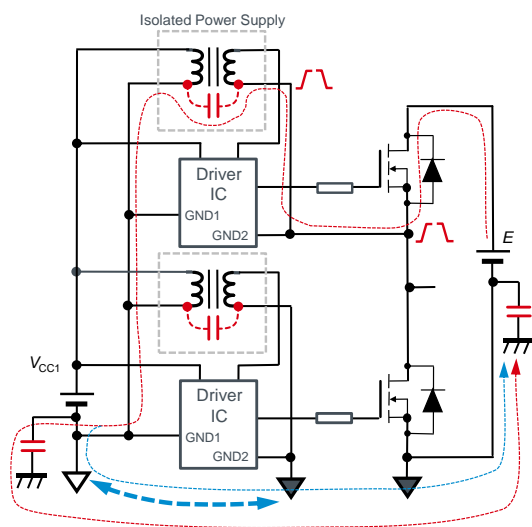


Figure 8. 经由高边驱动电源的共模电流路径

顺便说一下，绝缘型电源使用的绝缘变压器的一次至二次间耦合容量的标准是 10 pF 以下，最好是 5 pF 以下。

另外，对自举电路方式中的自举电容器的充电路径也需要注意。在 Figure 9 是充电路径。为了进行自举电容的充电，提供充电电流的电源 V_{CC1} 的 GND 必须与高压电路的 GND 连接，并且为了最小化高压电路侧噪声的影响，在低边 MOSFET 的 source 引脚附近一点接地。

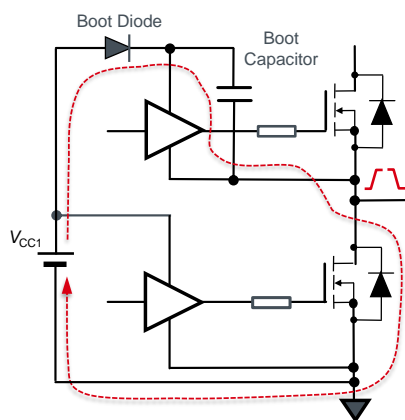


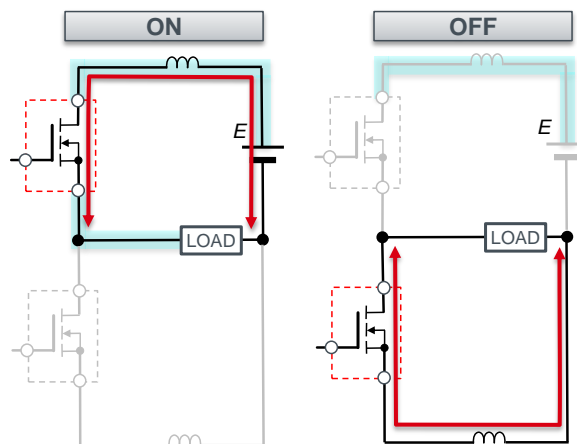
Figure 9. 向 Boot capacitor 充电的路径

关于与高压电源的配线的注意点

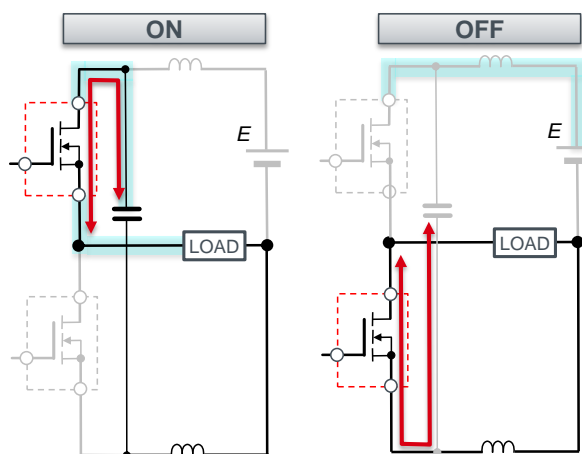
SiC MOSFET 是高速开关操作，所以开关时的电流变化 dI_D/dt 也非常大。因此，当基板上的 pattern 或来自高压电源 E 的配线等存在的寄生电感变大时，由 dI_D/dt 引起的电压也变大，在进行开关操作后，D-S 之间会产生巨大的浪涌。因此，通过连接 DCLink 电容(薄膜电容器和 MLCC 等)作为旁路电容器，尽可能减小布线电感，从而降低施加到 SiC MOSFET 上的浪涌。

在 Figure 10 中表示根据桥结构中 DCLink 电容的有无，开关电流路径的切换是不同的。(a)是 DCLink 电容未连接的情况，(b)是连接的情况。两个箭头所示的红线是接通和关闭时电流路径的

切换。包括负载 LOAD 在内的布线被视为负载 LOAD 的一部分，不会受到影响，因为 SiC MOSFET 的开关操作不会导致电流切换。



(a) DCLink 电容无



(b) DCLink 电容有

Figure 10. 开关电流路径的切换

该图明显的是 DCLink 电容器尽可能配置在桥结构中的 SiC MOSFET 附近，可以将布线电感的影响降到最低。因此，建议最起码将等效串联电感 (ESL) 较低的 DCLink 电容器 (如薄膜电容器、多层陶瓷电容器) 与 SiC MOSFET 放在同一 PCB 上。但是，静电容量 C_{DCLink} 是以公式 (1) 为标准、纹波电流 I_{DCLink} 是以公式 (2) 为标准。

$$C_{DCLink} > \frac{I_{D_MAX}}{\Delta V_E} * t_r \quad (1)$$

$$I_{DCLink} > I_{D_MAX} * \sqrt{\frac{t_r}{t_s}} \quad (2)$$

I_{D_MAX} : 最大负载电流

ΔV_E : 容许电压下降

t_r : rise time

t_s : 开关频率的倒数 (一周期)

I_{D_MAX} 是流过 SiC MOSFET 的 Turn On 时的漏极电流的峰值， ΔV_E 以高压电源 E 为基准，设定在 1~2%左右。 t_r 是参考 Data Sheet 等，设定实际使用条件下的值。

但是，公式（1）是 Turn ON 时的目标，Turn Off 时为了抑制浪涌需要另外商讨。详细请参考应用手册中的「缓冲电路的设计方法」(*3)。

总结

SiC MOSFET 是一种在高压电路中也能充分发挥高速开关特性的优质器件，在各种电路中得到广泛应用。在高速开关动作中容易产生噪声等问题，为了从设计阶段抑制这些问题，SiCMOSFET 的驱动电路和高压电路的基板 Layout 非常重要，我们总结了这些注意事项。在本应用手册中，没有对基板上的 Pattern、Cable、连接 PCB 层的 VIA 等设计基准进行解说，详细解释请参阅应用说明“降压转换器的 PCB Layout 方法”(*4)。

参考資料:

- *1 「桥式电路相关的 Gate-Source 电压的动作」
应用手册 (No. 62AN044C Rev.002)
罗姆半导体集团, 2020 年 4 月
[桥式电路相关的 Gate-Source 电压的动作](#)
- *2 「栅极-源极电压的浪涌抑制方法」
应用手册 (No. 62AN043C Rev.002)
罗姆半导体集团, 2020 年 4 月
[栅极-源极电压的浪涌抑制方法](#)
- *3 「缓冲电路的设计方法」
应用手册 (No. 62AN0069C Rev.002)
罗姆半导体集团, 2020 年 4 月
[缓冲电路的设计方法](#)
- *4 「降压转换器的 PCB 布局设计方法」
应用手册 (No. 63AN010C Rev.004)
罗姆半导体集团, 2024 年 1 月
[降压转换器的 PCB 布局设计方法](#)
- *5 「第 4 代 SiC MOSFET 半桥评估板 产品规格书」
用户指南 (No. 63UG058C Rev.001)
罗姆半导体集团, 2022 年 2 月
[第 4 代 SiC MOSFET 评估板 产品规格书](#)
- *6 「TO-247-4L 半桥评估板 产品规格书」
用户手册 (No. 62UG025C Rev.001)
罗姆半导体集团, 2019 年 7 月
[TO-247-4L 半桥评估板 产品规格书](#)

注 意 事 项

- 1) 本资料中的内容旨在介绍ROHM集团(以下简称“ROHM”)的产品。在使用ROHM产品之前,请务必另行确认最新版的技术规格书或产品规格书。
- 2) ROHM的产品是面向普通电子设备(AV设备、OA设备、通信设备、家电产品、娱乐设备等)或技术规格书中指定的应用领域而设计和制造的。因此,如果要在要求极高可靠性、产品故障或误动作可能会危及人的生命、造成人身危害或损害,或可能造成其他严重损害的设备或装置(包括医疗设备、运输设备、交通设备、航空航天设备、核电控制装置、燃料控制、含汽车配件在内的车载设备、各种安全装置等)(以下简称“特殊用途”)中使用ROHM产品,请事先咨询ROHM销售部门。如果未经ROHM事先书面同意而将ROHM产品用于特殊用途,因此造成的客户或第三方的任何损害,ROHM不承担任何责任。
- 3) 含有半导体的电子产品存在一定的误动作或故障概率。客户有责任采取Fail Safe设计等安全对策,来避免万一发生误动作或故障时对人的生命、身体或财产造成危害或损害。
- 4) 本资料中出现的应用电路示例和常数等信息仅用于说明ROHM产品的标准工作和使用方法,并非明示保证或默示保证在实际应用设备中的工作。因此,在客户设备的设计过程中使用这些电路、常数以及相关信息时,请结合各种外部条件自行判断并对自己的判断负责。对于因使用这些数据和信息造成的客户或第三方的任何损害,ROHM不承担任何责任。
- 5) 向海外出口或提供ROHM产品和本资料中的技术时,请遵守《外汇及外国贸易法》、《美国出口管制条例》等适用的出口相关法律法规,并根据这些法律法规中的规定办理必要的手续。
- 6) 本资料中的应用电路示例等技术信息和各种数据仅为示例,并非保证不侵犯与这些内容相关的第三方的知识产权及其他权利。另外,对于本材料中的信息,ROHM并未明示或默示同意客户可以实施、使用或利用ROHM或第三方拥有或管理的知识产权以及其他权利。
- 7) 未经ROHM事先书面同意,严禁转载或复制本资料的全部或部分内容。
- 8) 本资料中的内容为截至本资料发行之时的信息,如有更改,恕不另行通知。在购买和使用ROHM产品之前,请通过ROHM销售部门确认最新信息。
- 9) ROHM不保证本资料中的信息无误。万一客户或第三方因本资料中的信息错误而受损,ROHM不承担任何责任。



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>