

SiC MOSFET

缓冲电路的设计方法

近几年，SiC MOSFET 作为各种各样的电源应用和电源线的开关元件，其应用范围在迅速地扩大中。其中一个主要原因是与以前的功率半导体相比，SiC MOSFET 使得高速开关动作成为可能。不过，由于开关的时候电压和电流的急剧变化，元件自身的封装电感和周边电路的布线电感影响变得无法忽视，导致漏极源极之间会有很大的电压尖峰。这个尖峰不可超过使用的 MOSFET 的最大规格，对此有各种各样的抑制方法。在本应用笔记本中，将对漏极源极尖峰抑制方法之一的缓冲电路的设计方法进行说明。

漏极源极之间的电压尖峰

漏极源极之间的电压尖峰是由于在 Turn ON 时流过的电流的能量储存在线路和基板布线的寄生电感中，并与开关元件的寄生电容共振所产生的。Figure 1.说明尖峰产生时的振铃电流路线。该图显示了由 High 侧 (HS) 和 Low 侧 (LS) 的开关元件组成的桥梁结构中,当 LS 元件 Turn ON 时,开关电流 I_{MAIN} 流动的情况。这个 I_{MAIN} 通常从 V_{sw} 流入再通过配线电感 L_{MAIN} 。

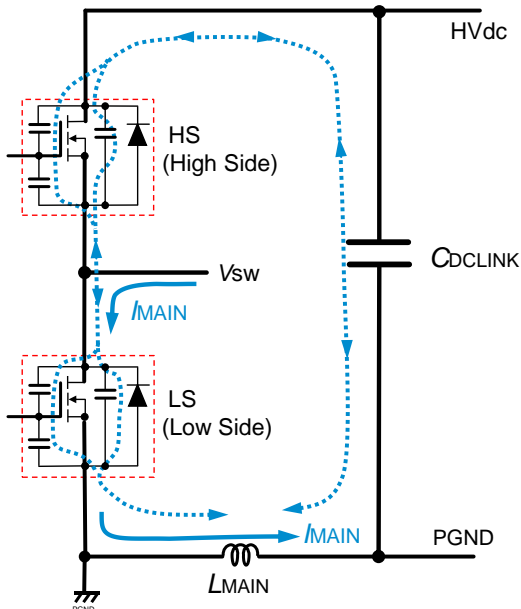


Figure 1. Turn OFF 尖峰发生的环路电流路线

接着，当 LS 元件 Turn OFF 时，在 L_{MAIN} 流动的 I_{MAIN} 通常会通过接在输入电源 HVdc-PGND 之间的 Bulk 电容 C_{DLINK} ，经由 HS 元件和 LS 元件的寄生电容如图中虚线所示流动。此时，在 LS 侧漏极源极之间 L_{MAIN} 和 MOSFET 的寄生电容 C_{OSS} ($C_{DS} + C_{DG}$) 之间发生谐振现象，在漏极源极之间产生尖峰。

该尖峰的最大值 V_{DS_SURGE} 如下式所示(*1)，其中 V_{HVDC} 表示 HVdc 端的电压， R_{OFF} 表示 MOSFET Turn OFF 时的电阻。

$$V_{DS_SURGE} = \frac{V_A * e^{-(a/\omega)[\tan^{-1}(a/\omega)+\phi]}}{1+(a/\omega)^2} + V_{HVDC} \quad (1)$$

$$V_A = \sqrt{V_{HVDC}^2 + (a/\omega)^2 * (2 * R_{OFF} * I_{MAIN} - V_{HVDC})^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_{HVDC}}{(a/\omega) * (2 * R_{OFF} * I_{MAIN} - V_{HVDC})}$$

$$a = \frac{1}{2 * R_{OFF} * C_{OSS}}$$

$$\omega_{SURGE} = \frac{1}{\sqrt{L_{TRACE} * C_{OSS}}} * \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{L_{TRACE} / C_{OSS}}}{2R_{OFF}}\right)^2}$$

Figure 2.为使用 ROHM 的 SiC MOSFET (SCT2080KE) 在 Turn OFF 时的电压尖峰波形。HVdc 电压为 800V 时， V_{DS_SURGE} 为 961V，振铃频率约为 33MHz。使用方程式 (1) 根据该波形计算出 L_{MAIN} 约 110nH。

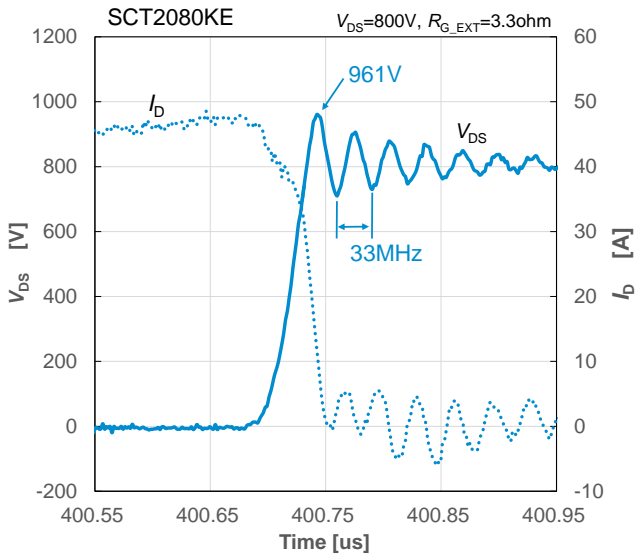


Figure 2. Turn OFF 电压尖峰波形

接下来，在电路中添加 Figure 3.所示的缓冲电路 C_{SNB} ，事实上 L_{MAIN} 被去除掉的 Turn OFF 电压尖峰波形即为 Figure 4 所示波形。

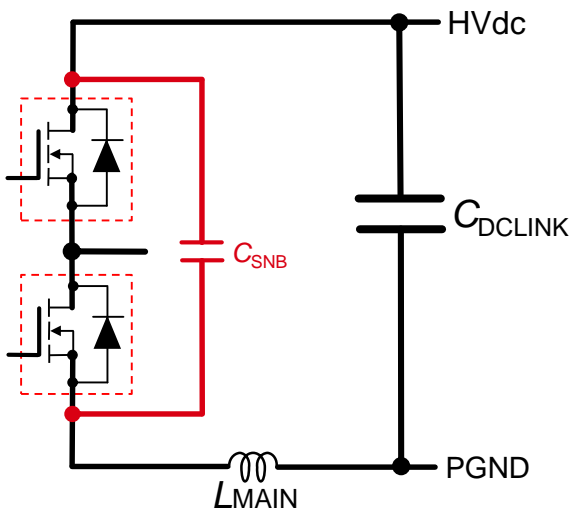


Figure 3. C 缓冲电路

这个时候电压尖峰降低了 50V 以上(约 901V)，振铃频率也变大为 44.6MHz，可知包含 C_{SNB} 在内的电路网中的 L_{MAIN} 变小了。同样，使用式 (1) 可算出 L_{MAIN} 约为 71nH。

本来，希望将线路布局设计为配线电感最小化，但通常优先考虑的是元件的散热设计，因此布线设计不一定理想。因此通过尽可能在开关装置附近布置缓冲电路，以形成旁路电路，

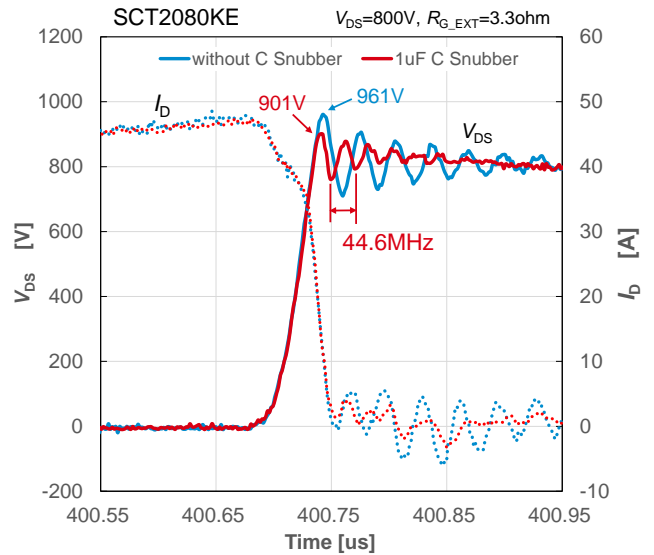


Figure 4. C 缓冲电路减小 Turn OFF 尖峰电压

将电压尖峰产生的源头——布线电感最小化，还可以吸收积蓄在布线电感中的能量。这样就可以将开关元件的电压钳位住，缩小 Turn OFF 电压尖峰。

缓冲电路的种类与选定

缓冲电路分为由电阻、线圈和电容器等被动部件组合的电路，和包含半导体元器件的主动电路。^(*) 本应用笔记将对无需控制、成本优良的电路方式进行说明。

Figure 5.为缓冲电路示例。MOSFET 桥式结构的上下部连接了电容 C_{SNB} 的 C 缓冲电路(a)，在各开关元件的漏极源极之间连接电阻 R_{SNB} 和电容 C_{SNB} 的 RC 缓冲电路(b)，在 RC 缓冲电路中追加二极管的放电型 RCD 缓冲电路(c)，将放电型 RCD 缓冲电路的放电路径变更而成的非放电型 RCD 缓冲电路(d)。

为了更好地发挥其的效果，必须将这些缓冲电路尽可能布局在在开关元件的附近。

(a)零件数目少,但必须连接到桥式结构的上下部之间,因此缺点是线路会变得较长,因此通常不是用分立元器件,而是多用 2 in 1 的分立元器件模块。

(b)可在各开关元件附近能布局缓冲电路,不过,必须确保每次元件 Turn ON 时 C_{SNB} 中积存的全部能量均由 R_{SNB} 消耗掉。因此,当开关频率变高时, R_{SNB} 所消耗的电力可能会变为数 W,而 C_{SNB} 很难很大,所以抑制尖峰的效果也会变得有限。此外, R_{SNB} 的尖峰吸收能力有限,因此抑制效果也会受限。

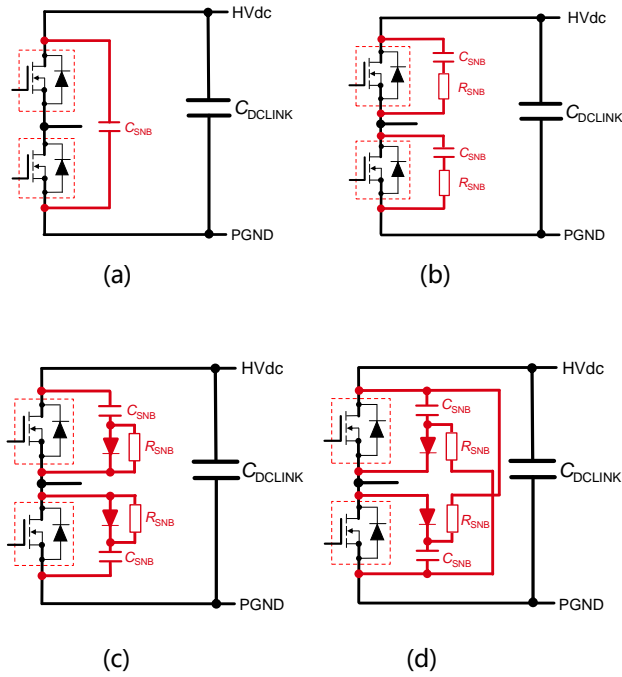


Figure 5. 缓冲电路的种类

(a)C 缓冲电路, (b)RC 缓冲电路,

(c)放电型 RCD 缓冲电路, (d)非放电型 RCD 缓冲电路

(c) 的 R_{SNB} 消耗的电力与(b)相同,但因为只经由二极管吸收尖峰,比起(b)的吸收效果高、更实用。但是,需要注意使用的二极管的恢复特性,因为吸收尖峰时的电流变化大,需要极力减少缓冲电路的配线电感。另外,如果将 R_{SNB} 与 C_{SNB} 并联,在动作上也是相同的。

(d) 的 R_{SNB} 只消耗 C_{SNB} 所吸收的电压尖峰能量, C_{SNB} 所积蓄的能量不会每次开关都充分释放出来。因此,即使开关频率加快, R_{SNB} 的消耗功率也不会变得很大,可以将 C_{SNB} 增大,大幅提高电路的抑制效果。但样线路布局变得复杂,如果不是 4 层以上的基板,布线会极为困难。

如上所述,这里介绍的缓冲电路各有长短,需要根据电源电路结构和转换功率容量选择最佳的缓冲电路。

下面说明一下各个缓冲电路的设计方法。

C 缓冲电路的设计

Figure 6.所示的 C 缓冲电路是通过 C_{SNB} 吸收 L_{MAIN} 积蓄的能量。因此,在缓冲电路中形成的 L_{SNB} 必须比 L_{MAIN} 小。由于 C_{SNB} 中积蓄的能量基本不放电,静电容量越大电压尖峰抑制效果变好,但使用的电容器的等价串联电感(ESL)也必须考虑到 L_{SNB} 中。一般来说,电容器的尺寸越大 ESL 越大,在选择静电容量时要注意。

为了将 L_{MAIN} 中积蓄的能量全部用 C_{SNB} 吸收,需以算式(2)所示静电容量为依据选定电容。

$$C_{SNB} > \frac{L_{TRACE} * I_{MAIN}^2}{V_{DS_SURGE}^2 - V_{HVDC}^2} \quad (2)$$

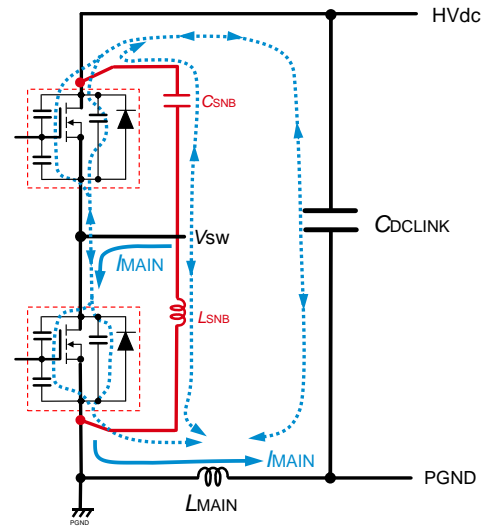


Figure 6. C 缓冲电路

RC 缓冲电路的设计

Figure 7.所示为 RC 缓冲电路动作时的电流路径。

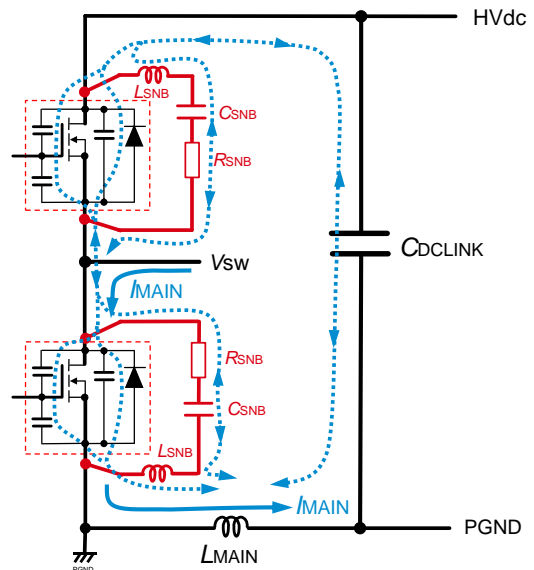


Figure 7. RC 缓冲电路

与 C 缓冲电路一样, C_{SNB} 的数值由算式(2)决定,而 R_{SNB} 的参考值根据算式(3)求得。

$$R_{SNB} < \frac{-1}{f_{sw} * C_{SNB} * \ln[(V_{DS_SURGE} - V_{SNB}) / V_{DS_SURGE}]} \quad (3)$$

f_{sw} :开关频率

V_{SNB} :放电缓冲电压 (V_{DS_SURGE} 的 0.9 倍)

决定 R_{SNB} 之后，以算式(4)计算出 R_{SNB} 的消耗功率，选定功率满足要求的电阻。

$$P_{SNB} = \frac{L_{TRACE} \times I_{MAIN}^2 \times f_{SW}}{2} + \frac{C_{SNB} \times V_{HVDC}^2 \times f_{SW}}{2} \quad (4)$$

对于 RC 缓冲电路，算式(4)追加了第二项，因为 f_{SW} 或 V_{HVDC} 越高 R_{SNB} 所消耗的电功率越大， P_{SNB} 太大导致电阻选定困难时，必须降低 C_{SNB} 的静电容量值重新计算。

另外，为了 RC 缓冲电路充分吸收电压尖峰， R_{SNB} 和 C_{SNB} 的谐振频率 ω_{SNB} 必须比电压尖峰的谐振频率 ω_{SURGE} 低很多，需要结合算式(5)所示的 RC 缓冲电路的谐振频率 ω_{SNB} 来确认。

$$\omega_{SNB} = \frac{1}{R_{SNB} \times C_{SNB}} \ll \omega_{SURGE} \quad (5)$$

放电型 RCD 缓冲电路的设计

放电型 RCD 缓冲电路的设计基本上与 RC 缓冲电路相同。只是由于是通过二极管吸收的尖峰，所以不需要通过算式(5)确认谐振频率。

并且，二极管必须选定为恢复电流小的型号。

非放电型 RCD 缓冲电路的设计

非放电型 RCD 缓冲电路与放电型 RCD 缓冲电路不同， R_{SNB} 消耗的电功率仅限于电压尖峰的能量，用于抑制容许损失的 R_{SNB} 的选择范围很广。因此可以增大 C_{SNB} 的静电容量，提高钳位的效果。

C_{SNB} 由算式(2)决定， R_{SNB} 由算式(3)决定，而 R_{SNB} 的消耗功率由算式(6)决定，没有算式(4)中包含 C_{SNB} 及 f_{SW} 的第二项。因此，由 C_{SNB} 或 f_{SW} 产生的消耗功率增加基本没有，能选择大的静电容量的 C_{SNB} ，不仅仅缓冲电路的钳位效果更好，还能对应 f_{SW} 的高频化。

$$P_{SNB} = \frac{L_{TRACE} \times I_{MAIN}^2 \times f_{SW}}{2} \quad (6)$$

Figure 8.所示为非放电型 RCD 缓冲电路动作时的放电路径。因为上臂的尖峰朝向 PGND、下臂的尖峰朝向 HVdc，放电流经由 R_{SNB} 流动，不那么受线路电感影响。另一方面，连接到 MOSFET 的漏极源极之间的布线电感 L_{SNB} 因为电流变化大，电感值需要尽量小。

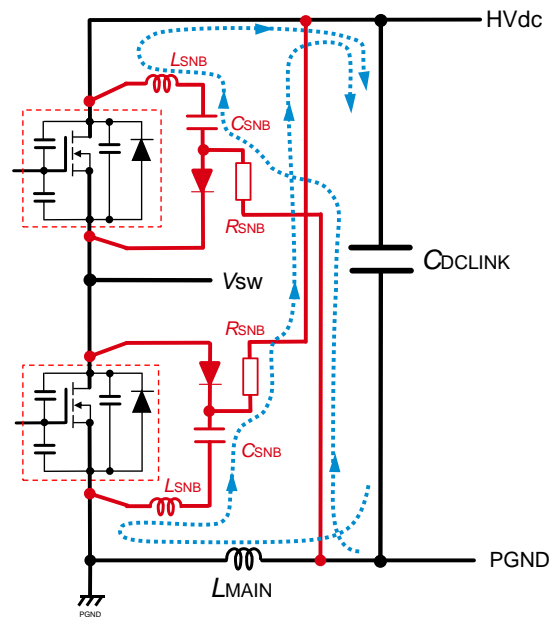
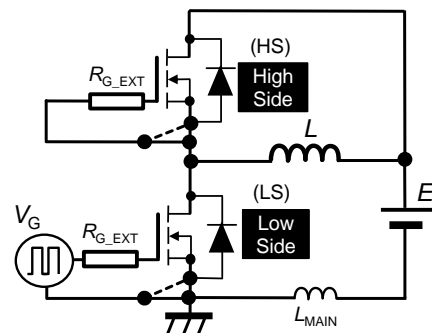


Figure 8. 非放电型 RCD 缓冲电路的放电

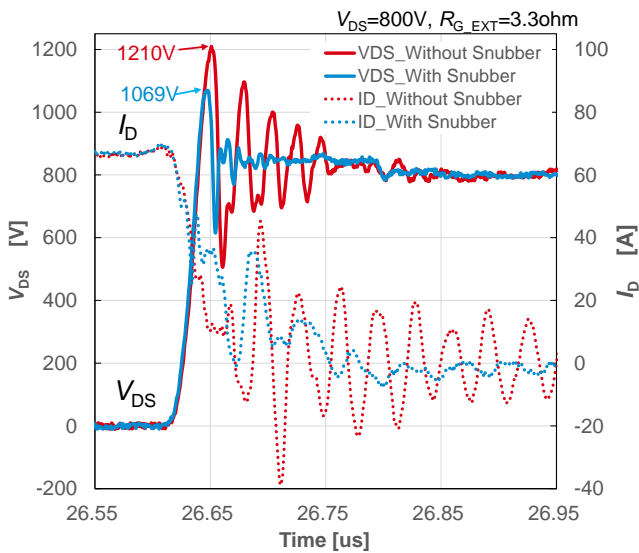
Figure 9 是对非放电 RCD 缓冲电路使用 ROHM 评估基板 (P02SCT3040KR-EVK-001) 进行效果验证的测试电路 (a) 和波形 (b)，该评估基板使用了 ROHM 的 SiC MOSFET (SCT3080KR)。

R_{G_EXT} 为 3.3Ω，HVdc 为 800V，漏极电流 I_D 为约 70A 时的 Turn OFF 波形。

当不连接缓冲电路时，电压尖峰高达 1210V，添加缓冲电路后降低为 1069V，减少了约 12%。



(a) 测试电路



(b) Turn OFF V_{DS} , I_b 波形

Figure 9. Turn OFF 电压尖峰对比 (缓冲电路有·无)

Figure 10.是对比 Buck Converter 的变换效率的图表。表示输入电压 400V，输出电压 200V， R_{G_EXT} 6.8 Ω ，振荡频率 100kHz 这一条件下的效率。

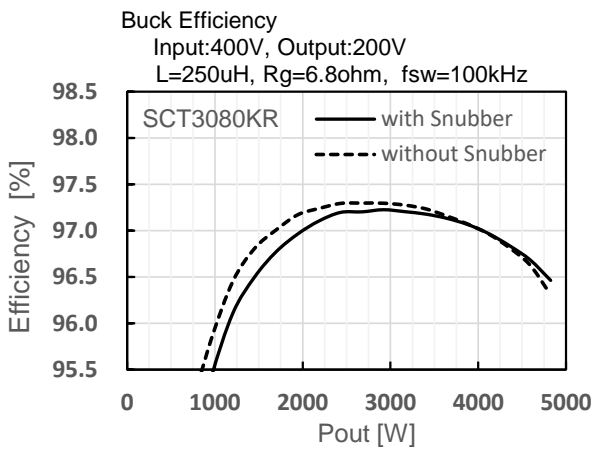


Figure 10. 非放电型 RCD 缓冲电路的放电

当负载功率在 1kW ~ 4.8kW 之间变化时，约 4kW 以下无缓冲电路的情况下的效率提高了最大 0.4%；另一方面，在 4kW 以上有缓冲电路情况下则效率提高了 0.15%。这是因为负载功率变大的话电压尖峰造成的功率损失变大，于是缓冲电路的尖峰抑制造成的开关损失就减少了。

封装不同而造成的电压尖峰差异

最后说明的是，Turn OFF 尖峰根据封装的不同而有差异。

Figure 11.是 ROHM 的 SiC MOSFET 的代表性封装。(a)是被广泛采用的 TO-247N(3L)，(b)是近几年渐渐扩大采用的用于

驱动电路的源极端子(即所谓的开尔文接法)的 TO-247-4L。

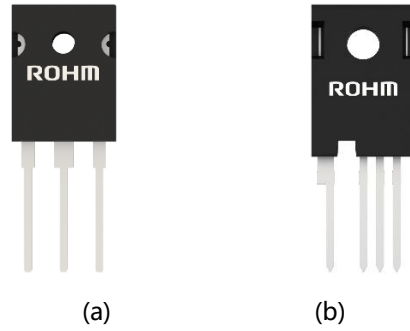


Figure 11. SiC MOSFET 的封装示例
(a)TO-247N, (b)TO-247-4L

4L 型与 3L 型相比，改变了驱动电路路径，使开关速度加快。由于这个原因，Turn ON 电压尖峰和 Turn OFF 电压尖峰变得更大。

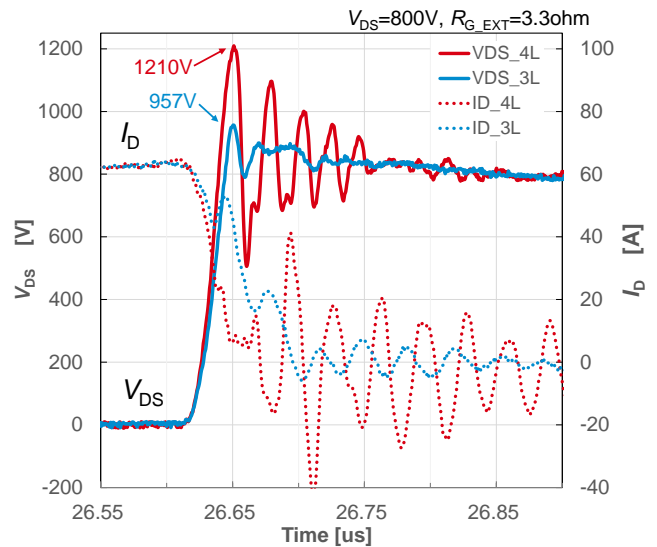


Figure 12. Turn OFF 电压尖峰对比
(TO-247N VS. TO-247-4L)

Figure 12.为 3L 类型和 4L 类型的 Turn OFF 电压尖峰的对比波形。 $V_{DS} = 800V$ 、 $R_{G_EXT} = 3.3\Omega$ 、 $I_b = 65A$ 时的 Turn OFF 波形，漏极源极间电压尖峰 3L 类型为 957V，而 4L 类型则为 1210V。

如 Figure 7和 Figure 8.所示，由于该尖峰产生的 V_{DS} 振铃不仅流过 C_{DS} ，也流过 C_{DG} 和 C_{GS} ，使 MOSFET 的栅源电压 V_{GS} 产生预期之外的电压尖峰，并有可能超越 V_{GS} 的规格。关于 V_{GS} 的电压尖峰抑制方法这里由另外的应用笔记(*2)说明。当该笔记所记录的方法抑制效果不足时，在漏极源极之间附加缓冲电路也是抑制 V_{GS} 尖峰的有效手段。

如上所述，桥式电路中的 MOSFET 的栅极信号在 MOSFET

之间相互关联、动作，并在栅极源极之间产生预料之外的电压尖峰，其抑制方法需要考虑基板的线路布线，根据情况不同采取不同的对应。期待这份笔记能作为有用的资料得到灵活运用。

以上

参考资料:

- *1 「开关转换器的基础」 P95~P107
原田耕介、二宫保、顾文建 著
Corona 社, 1992 年 2 月
- *2 「栅源电压尖峰的抑制方法」
应用笔记 (No. 62AN043CRev.002)
罗姆株式会社, 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/>