

功率开关元件

栅源电压测定时的注意点

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。近年得到加速采用的 SiC MOSFET 由于在开关时的电压电流的变化非常大，有必要准确地测定应用笔记「桥式电路栅源电压的动作」*1 所述栅源极间的电压尖峰。由此，这份应用笔记会对栅源极间电压测定的注意点予以说明。

一般测定方法

电源单元等产品中所使用的功率开关元件多数会安装冷却用的散热片，于是在测定元件端子间的电压时，通常无法在元件端子上直接安装测定电压的探头。一般会在元件的引脚线上焊接延长线，在产品的筐体之外接上电压探头来测定。

Figure 1 所示的是在罗姆评价基板 (P02SCT3040KR-EVK-001) 上安装散热片，再在延长线处连接电压探头的案例。被测元件 DUT 的端子上焊接用来连接电压探头的延长线 (长度约 12cm)，通过双绞线来抑制辐射噪声的影响。

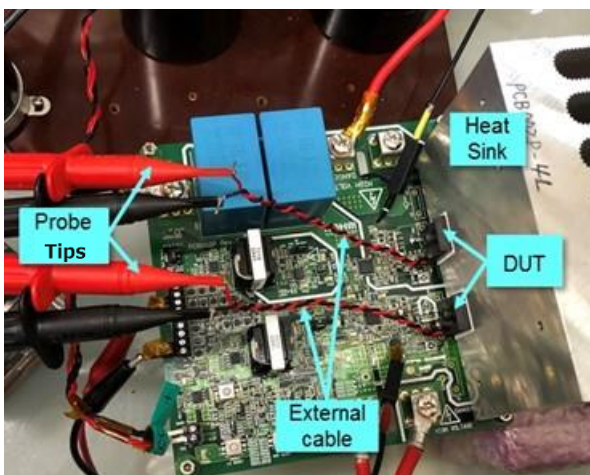


Figure 1. 在延长线处接上电压探头以测定栅源电压

使用这样的测定方法，在如 Figure 2 所示桥式结构中进行了双脉冲试验。在高边 (HS) 和低边 (LS) 安装了罗姆的 SCT3040KR 后，在 HS 侧切换开关，LS 侧会保持 Off 状态 (栅极 = 0V)。Figure 1 所示的延长线是直接焊接在 HS 侧的栅极端子和源极端子上的。

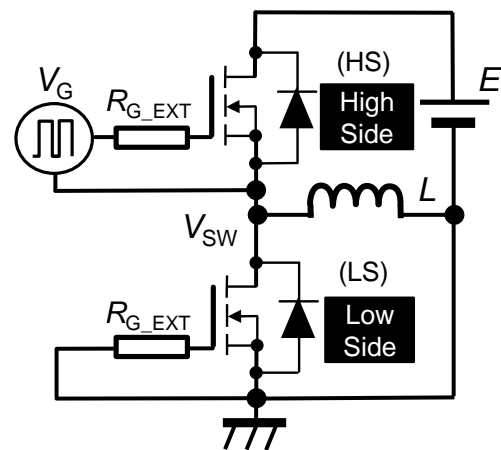
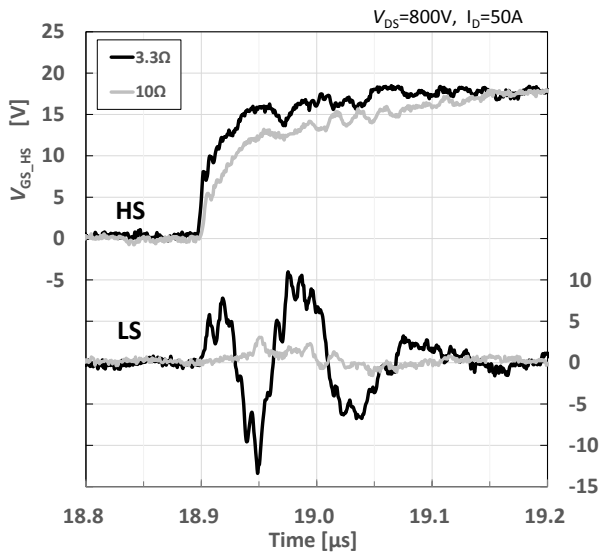


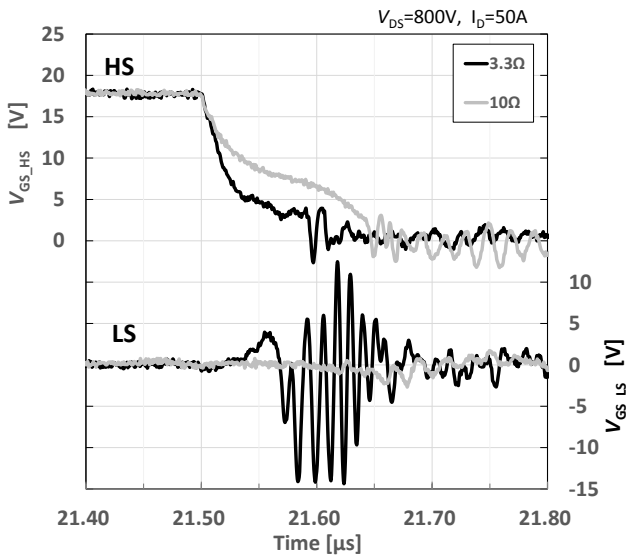
Figure 2. 双脉冲试验电路

Figure 3 所示的是实测的栅源电压波形。外接栅极电阻 R_G 为 10Ω 时，延长线的影响并不大，但将 R_G 设定为 3.3Ω 并加快开关速度的话，由于电压电流的变化会诱发噪声和电路的高频动作，使得测定波形大幅度改变。

必须注意到，此次为测定而安装了延长线而使测定机器的频带发生变化，并由于附加了多余的阻抗，使得观测到的波形与本来的波形完全不同。



(a)



(b)

Figure 3. 栅源电压的测定波形
(a)Turn On, (b)Turn Off

Figure 4 所示 差分电压探头的等价电路 *2, *7
通常,电压探头(包含探头顶端)的频率特性已经被设定好了,不过如果对 DUT 的测定端子安装延长线,在观测数十 ns 的高速开关波形时,会在浮游电感 L_{EXT} 和电压探头本体的输入电容 C 之间引发谐振现象,产生与本来的电压波形重叠的高频电压振铃,会观测到比实际的电压尖峰还要大的尖峰。

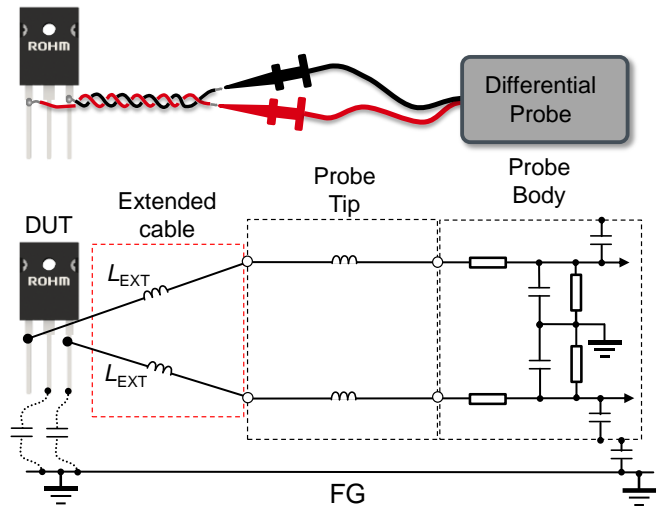


Figure 4. 差分电压探头的等价电路

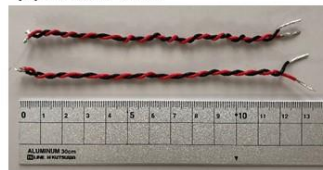
探头的接续方法

根据上述电压探头的接续方法,因为显著地影响了测量波形,我们验证了下述常见的接续方法所测量的波形的差异。

- (a)将探头直接接到元件端子部
- (b)用双绞线引出, 接上探头
- (c)在较长的双绞线上插入 100Ω 的阻尼电阻, 再接上探头
- (d)在较短的双绞线上插入 100Ω 的阻尼电阻, 再接上探头

(a) 是将电压探头顶端直接与 DUT 相接。(b) 是将双绞线(约 12cm)加工而成的延长线焊接到 DUT 的端子,在另一侧与电压探头顶端相接。(c)是在(b)延长线的中间插入 100Ω 的电阻。(d)把(b)的线长缩短(约 4cm)。Figure 5 表示实际使用的延长线, Figure 6 表示接好之后的探头状态。

(b) Twisted cable



(c) Twisted cable with 100 ohm damping



(d) Twisted shorter cable with 100 ohm damping



Figure 5. 验证中使用的延长线

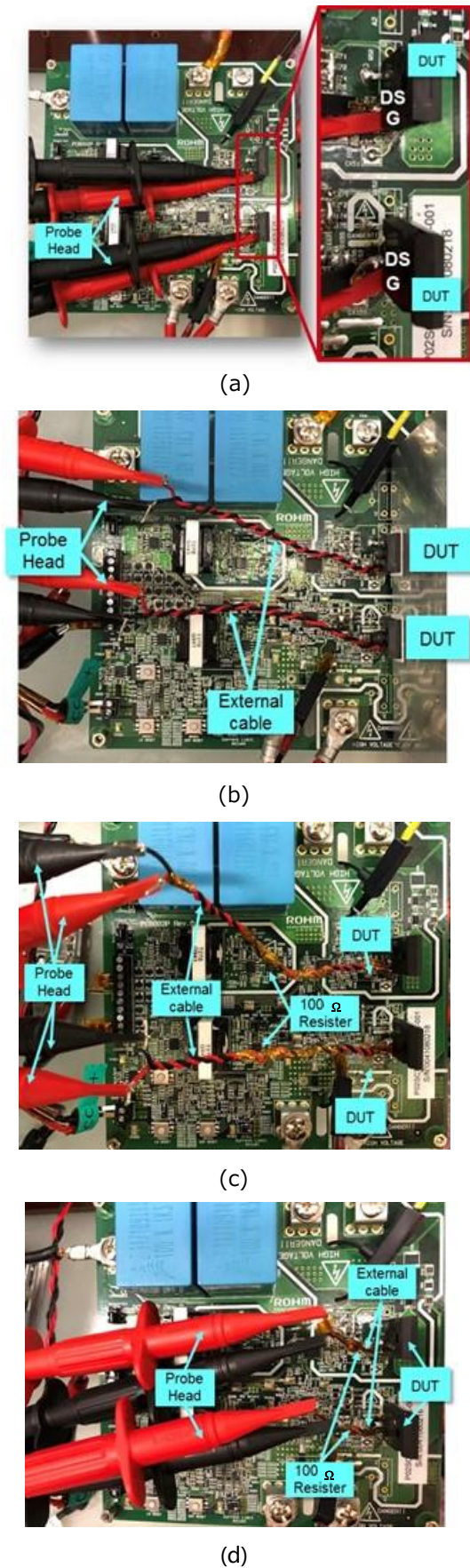
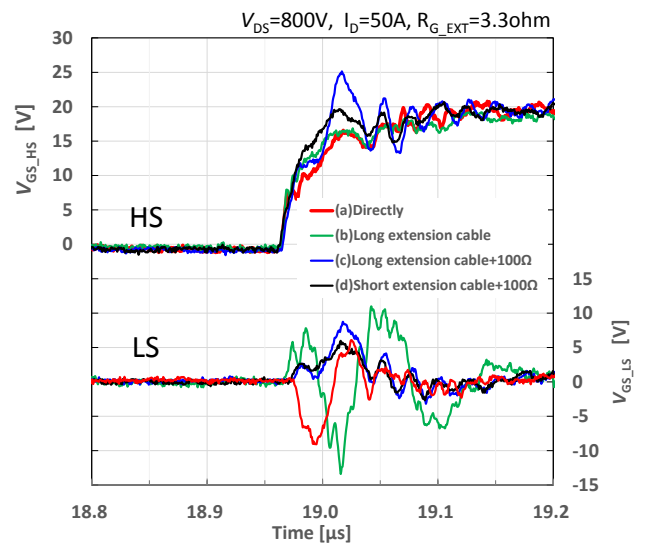


Figure 6. 电压探头的接续方法
 (a)直接, (b)较长的延长线,
 (c)较长的延长线+100Ω, (d)较短的延长线+100Ω

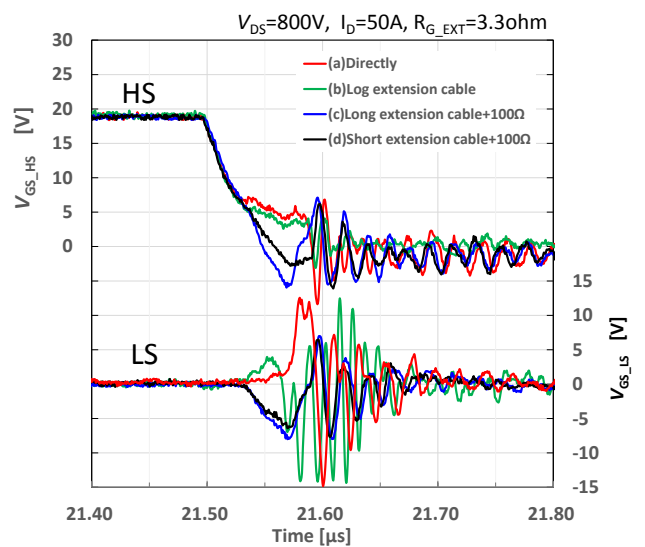
Figure 7 所示的是按照 Figure 6(a) ~ (d)的接续方法分别进行双脉冲试验的栅极-源极电压波形的比较结果。图(a)是 Turn On 时, (b)是 Turn Off 时的栅极-源极电压。

需注意 LS 侧的开关情况,可见用不同的测量方法测得的波形有很大的不同。(a)是 Turn On 时, HS 侧 MOSFET 的开关动作开始、电流发生变化,在穿过 Figure 8 所示的电压探头构成的环路的方向上发生磁场变化。并且,那个磁通量变化还转化为探头环路的顺时针方向的自感电动势,被观测的波形看起来产生了负方向的电压尖峰。而原本是可以看到(c)和(d)的正方向的电压尖峰。

同时, (b)由于延长线的阻抗,诱发了高速开关下的振铃,产生显著的电压尖峰。



(a)



(b)

Figure 7. 电压探头的各种接续方法和测定波形比较
 (a)Turn On, (b)Turn Off

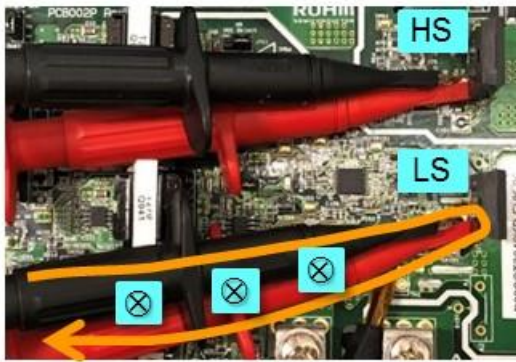


Figure 8. 换流侧探头的自感电动势

如上所述，栅源端子与测定治具之间形成的环路会反应主电路的电流变化引起的磁通量变化，观测到与本来的波形完全不同的波形，需要把测定治具与栅源端子之间形成的闭环路尽可能缩小。

顺带一提，由于 Figure 6(b)~(d)是将延长线焊接到 MOSFET 封装正下方的端子部分，所以形成的环路最小。

测定位置的选定

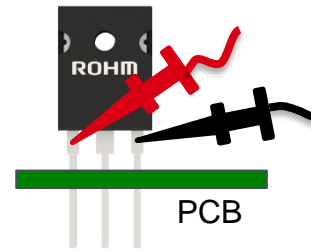
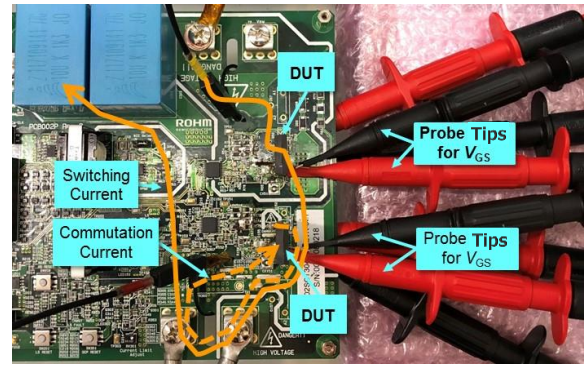
接下来需要注意的是 DUT 的测定位置。

在实际的产品中观测 DUT 的波形时，通常在容易测量的地方安装探头。这是因为在 DUT 通常安装有散热片等的冷却装置，如果直接接触 DUT 的引脚端子有困难，有时引脚端子会按照成型时原有的长度直接安装。因此，测量的位置受到产品结构的影响，不一定是最适合测量的位置。

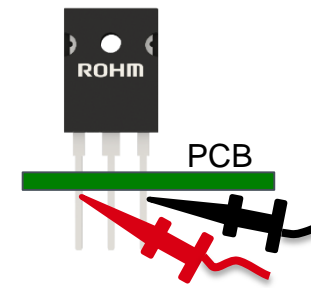
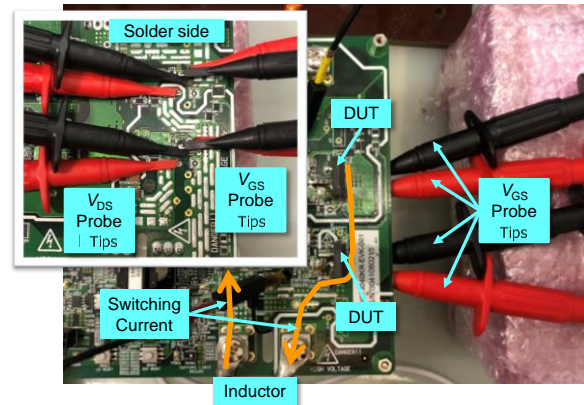
下面是设想的 4 个测定位置，验证了这一点：

- (a) DUT 的模具封装附近
- (b) DUT 实装后的 PCB 焊接部分
- (c) PCB 上焊接的检测用端子
- (d) PCB 上焊接的检测用端子+双绞线+100Ω

Figure 9 所示的是测定位置的不同。(a)是将 DUT 的引脚端子最短化，(b)是由于成型等原因引脚端子延长的情况下用基板焊接面的引脚端子来测定，(c)是预先准备了检查端子，并在 MOSFET 的附近预先准备了检查用的焊盘。(d)是在与(c)同样的位置焊接双绞线，让探头远离主电路。



(a)



(b)

Figure 9. 测定位置
(a)引脚根部，(b)引脚前端

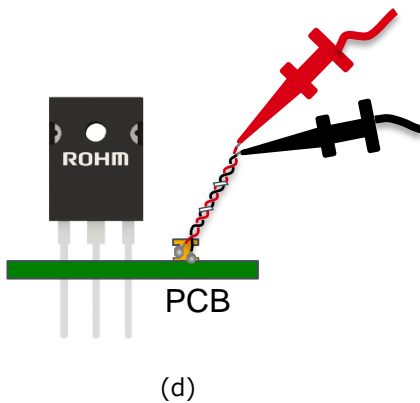
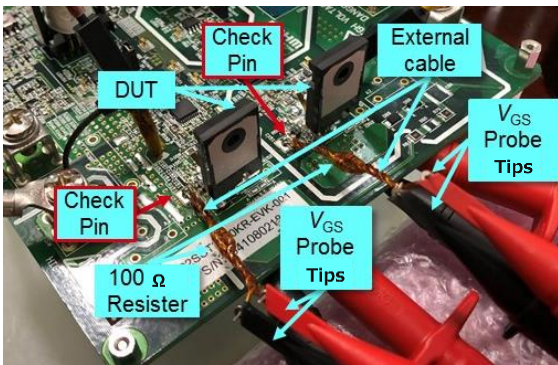
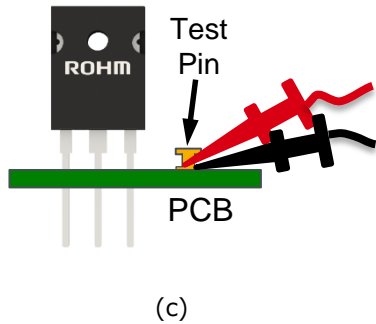
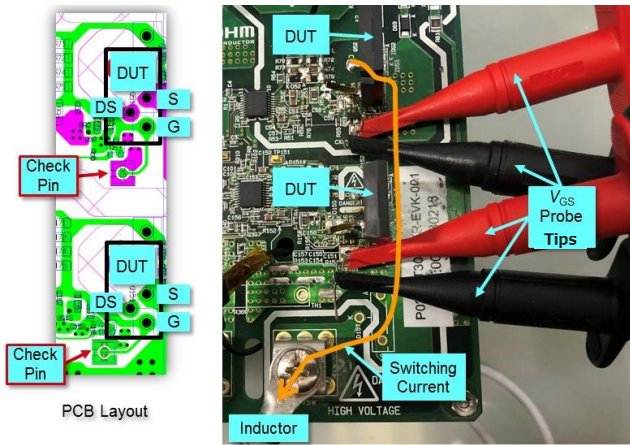
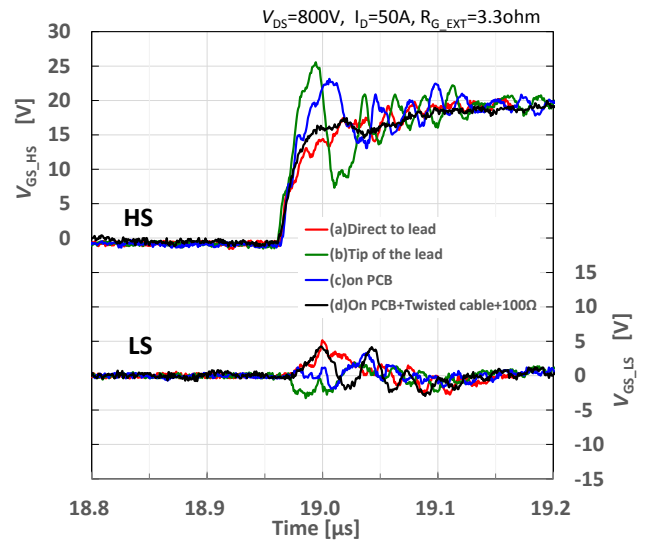
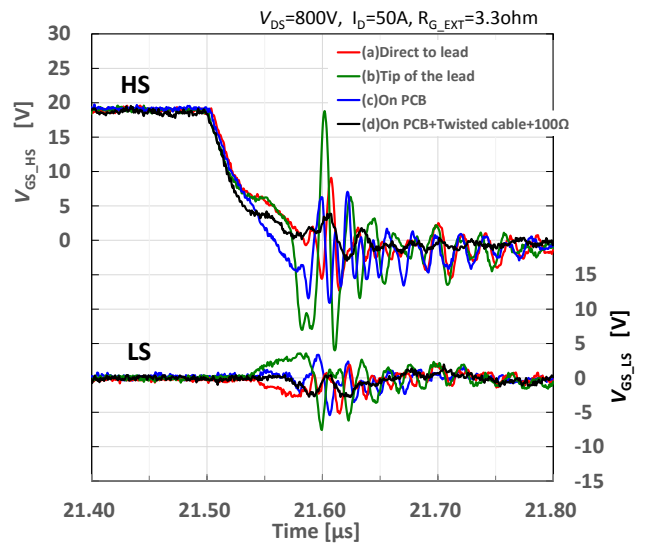


Figure 9. 测定位置

(c)PCB 上, (d)PCB 上+延长线+100Ω



(a)



(b)

Figure 10. 不同测定位置的测定波形对比

(a)Turn On, (b)Turn Off

Figure 10 所示为各个结果。根据测定位置的不同，波形有很大的差异。

(a)测定的是与设备最接近的位置，是稳定的波形，不过，(b)在器件和测量点隔着封装引脚的一部分，观测结果包含了引脚产生的感应电动势。因此电压尖峰的极性与(a)完全相反。(c)、(d)从元件到检查端子的布局形成了闭环回路，没有完全去除噪声。

从这些结果来看，测量位置最好是尽可能在器件附近。

探头顶端的设置位置

还有一点需要注意的是，那便是电压探头顶端的设置位置。

一般使用功率开关器件的环境，由于有数十~数百安培的电流在高速地开关，由电流变化 di/dt 产生的磁通量变化 $d\Phi/dt$ 也非常大。此外电压变化 dv/dt 也非常大，而且电压也非常高，电压变化时电流的变化也绝对不小。

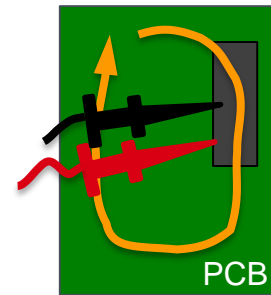
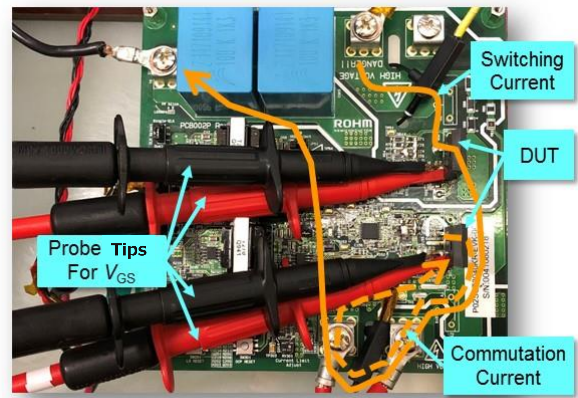
因此，如果在磁场变化较快的空间里随意地设置电压探头，探头顶端会受到磁场变化的影响，测定结果会叠加在测量波形上。

因此，我们设想了四种安装方法，并验证了它们的不同。

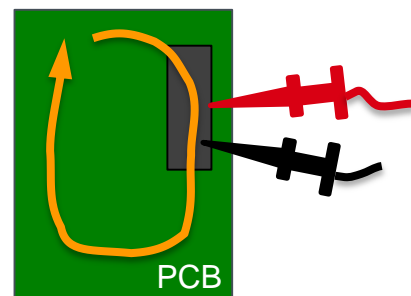
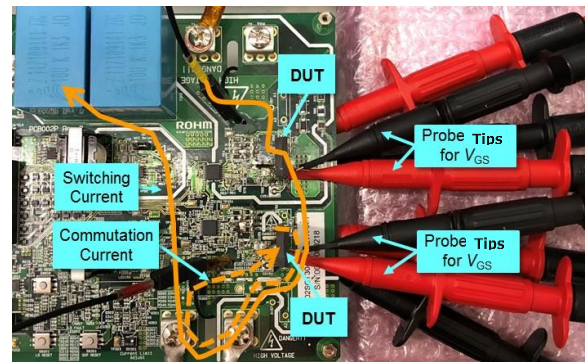
- (a)主电路环路的内侧
- (b)主电路环路的外侧
- (c)用 12cm 长的双绞线远离主电路环路的外侧
- (d)用 12cm 长的双绞线 + 100Ω 远离主电路环路的外侧

Figure 11 所示的是探头顶端的设置位置的不同，用箭头表示了主电路环路的电流路径。(a)设置在主电路环路的内侧，这个位置 $d\Phi/dt$ 最大，(b)设置在主电路环路的外侧，比最近处的 $d\Phi/dt$ 大一些，(c)用延长线远离主电路环路，尽可能去除了 $d\Phi/dt$ 的影响。

Figure 12 为上述 4 个设置方法观测到的栅极-源极电压波形。关注 LS 侧的话，对于磁通量变化最大的(a)，开关动作发生的同时产生电压尖峰，可知受到辐射噪声的显著影响。同时，(c)由于延长线的电感影响比(b)变动更大。因此为了抑制延长线缆的振铃而插入了 100Ω 的阻尼电阻。(d)则是变动最少的。此次的评价中，因为 HS 在切换开关，LS 经常成为关断状态(0V)。因此栅极端子的驱动电流完全没流动，容易受到磁通量变化的影响。另一方面，HS 侧在开关动作时，驱动 MOSFET 的栅极端子流动着直流电流而不容易受到影响，一般认为没有 LS 侧那样的波形紊乱。

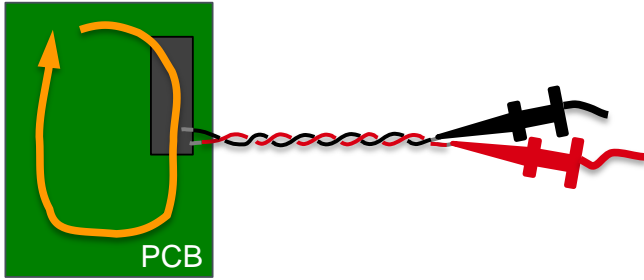
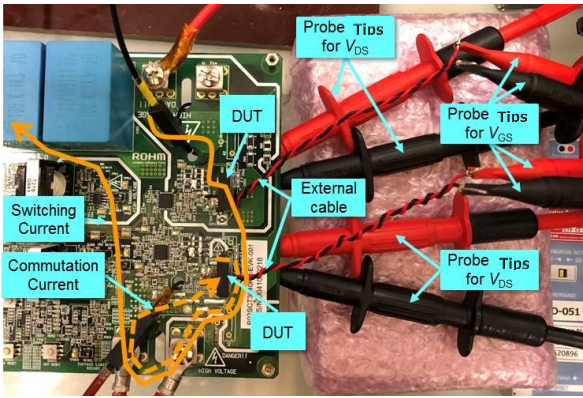


(a)

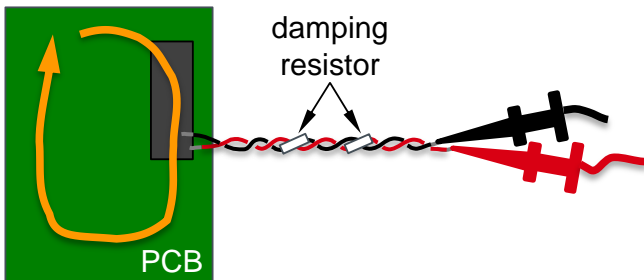
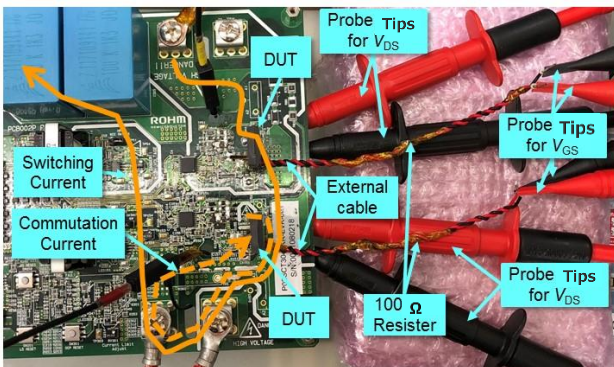


(b)

Figure 11. 探头顶端的设置位置
(a)主电路环路内，(b)主电路环路外的近处



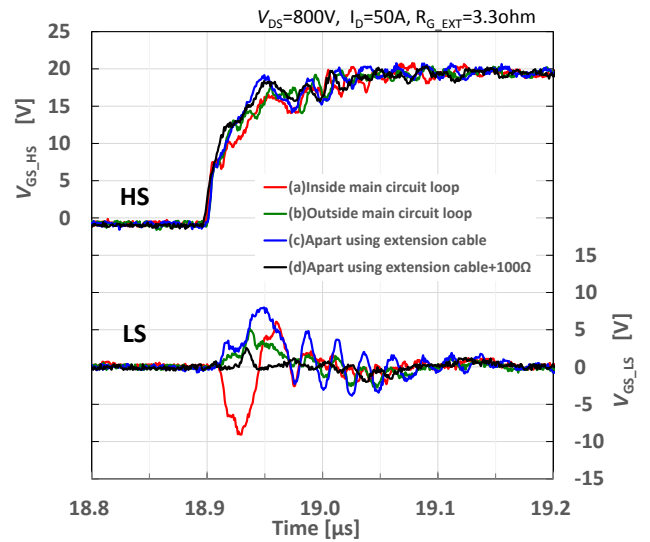
(c)



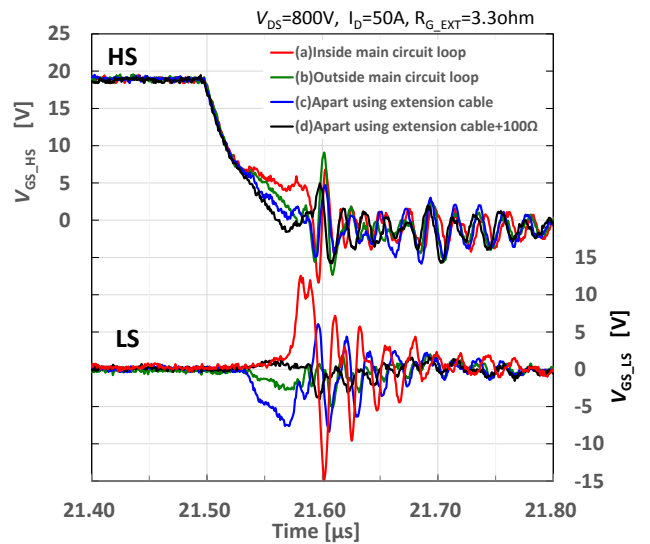
(d)

Figure 11. 探头顶端的设置位置

(c)使用延长线来远离, (d)使用延长线+100Ω来远离



(a)



(b)

Figure 12. 探头顶端的各个设置位置的测定波形的区别

(a)Turn On, (b)Turn Off

桥式结构的注意点

最后,在桥式结构的高边侧 MOSFET 的测量中,使用高电压差分探头和差分双探头*4 进行波形观测,但所用探头的共模信号抑制比(CMRR)在高频区域较低,波形变动较大。特别是栅极-源极电压 V_{GS} 必会测得几 V 的电压尖峰,需要辨别观测到的波形究竟是本来的波形还是 CMRR 不足导致变化后的波形。

Figure 13 所示的是桥式结构中 HS 侧开关时的波形和 LS 侧开关时的波形。所使用的差分电压探头为 YOKOGAWA 的 701297(150MHz、1400V)。看换流侧的电压尖峰可以明白,LS 侧开关的时候 HS 侧的 V_{GS} 会有很大的变动。这个由于 HS 侧以 20~50V/ns 的 dV/dt 发生高速变化时,由 CMRR 下降而产生的。

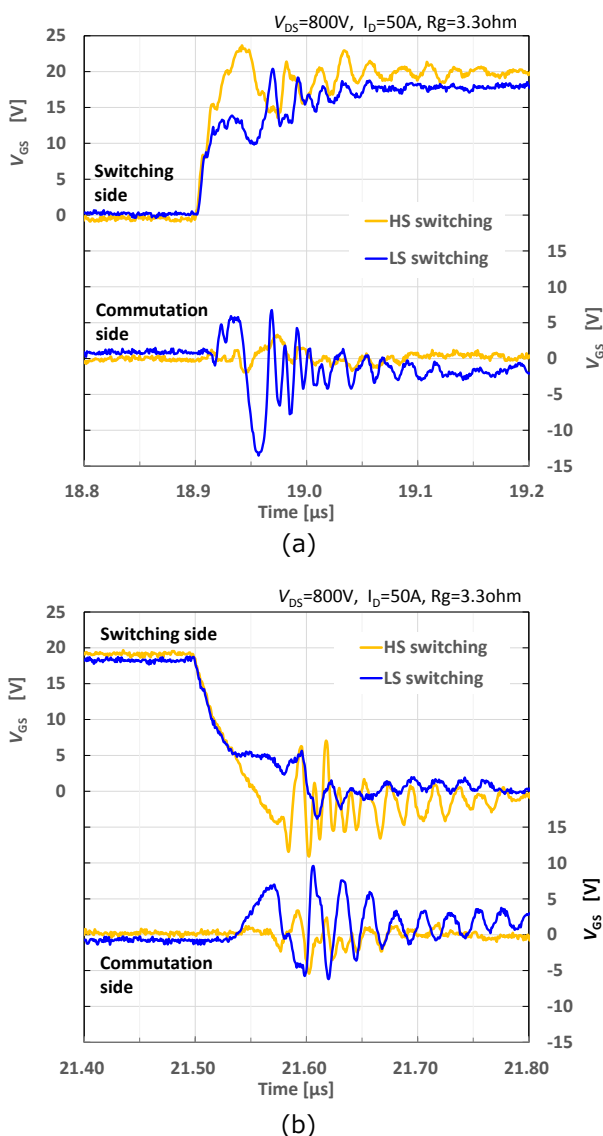


Figure 13. HS 侧开关和 LS 侧开关时的 V_{GS} 波形
(a)Turn On, (b)Turn Off

测量差分电压探头的 CMRR 性能的结果如 Figure 14 所示。将电压探头正极和负极连接到 HS 侧和 LS 侧的 DS 端子进行了测量。详细的测量方法在 Tektronix 的应用笔记「ABCs of Probes」*2 中有详细记载,请参考。

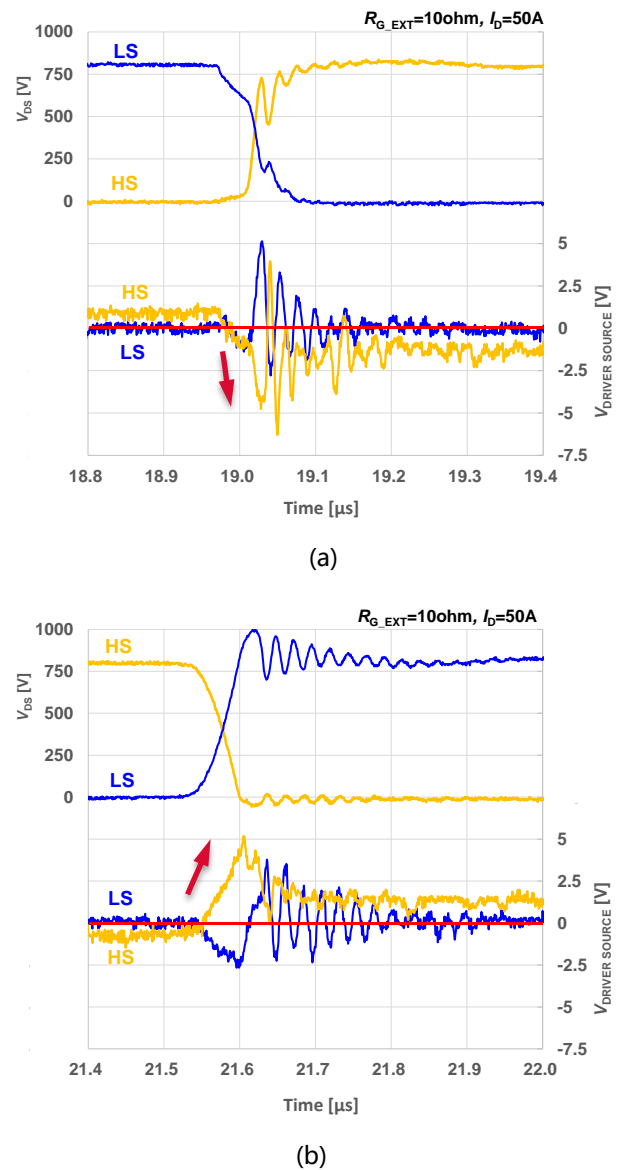


Figure 14. 隔离型电压探头的 CMRR 性能
(a)Turn On, (b)Turn Off

Figure 14(a)表示 Turn On 时,(b)表示 Turn Off 时,LS 侧 MOSFET 的源极电位大体上是固定的,而 HS 侧的源极电位 800V 以大约 200kHz(占空比 50%)的频率在开关,与 HS 侧的 V_{DS} 变化同步变动。在此次的测量中, V_{DS} 上升时向负极、下降的时候向正极变动。不过仍需注意,根据差分探头的特性,也会有反方向的变动。

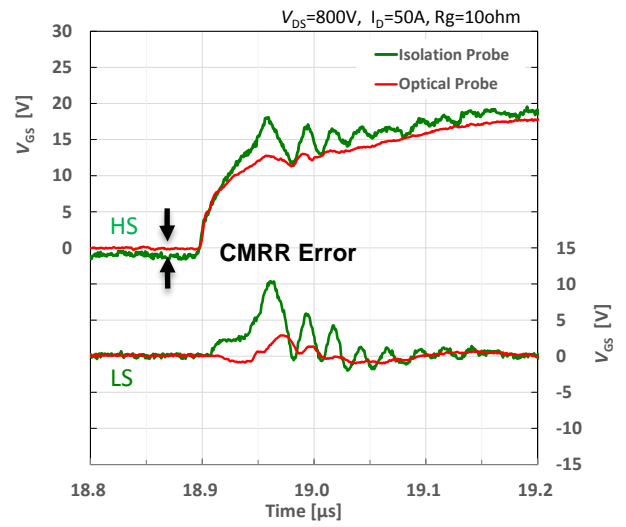
最近，不受 CMRR 影响的光隔离型差分探头由测量仪器制造厂产品化，作为更准确有效的波形测定解决手段而被关注。

Figure 16 所示的是使用了 Tektronix 生产的 IsoVu® 技术光隔离型差分探头(TIVH08, MMCX50X)和一般的高电压差分探头测量的栅极-源极电压的波形。测量所用的基板 (P02SCT3040KR-EVK-001) 上预留了 MMXC 连接器的焊盘用于连接光隔离探头。如 Figure 15 所示，同时连接光隔离探头和电压探头进行了测定。

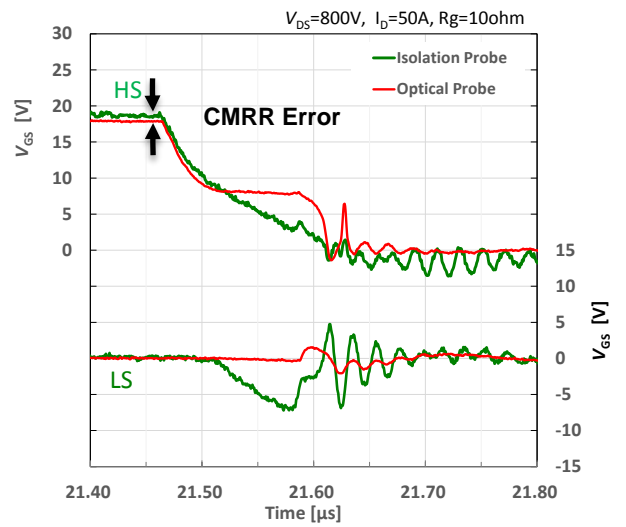
为了尽可能消除前面所述的测量位置和差分电压探头的设置位置对波形的影响，电压探头的测量位置是在 MOSFET 的正下方焊接较短的延长线，连接着阻尼电阻 100Ω。

由于 HS 侧正在开关，当使用差分电压探头测定 HS 侧的栅极-源极电压 V_{GS} 时，由于 CMRR 降低(a)而 Turn On 后驱动电压超过 18V，(b)Turn Off 后驱动电压低于 0V，另一方面，光隔离探头 18V 和 0V 完全没有变动，因此可以说观测到了开关动作时的正确波形。

这些结果从 Figure17 所示的 CMRR 频率特性也能明白。*4，*5 光隔离探头的 CMRR 频带与高电压差分探头相比非常宽，数十 MHz 的共模噪声也能够充分消除。



(a)



(b)

Figure 16. HS 开关时的 V_{GS} 波形比较
(a)Turn On, (b)Turn Off

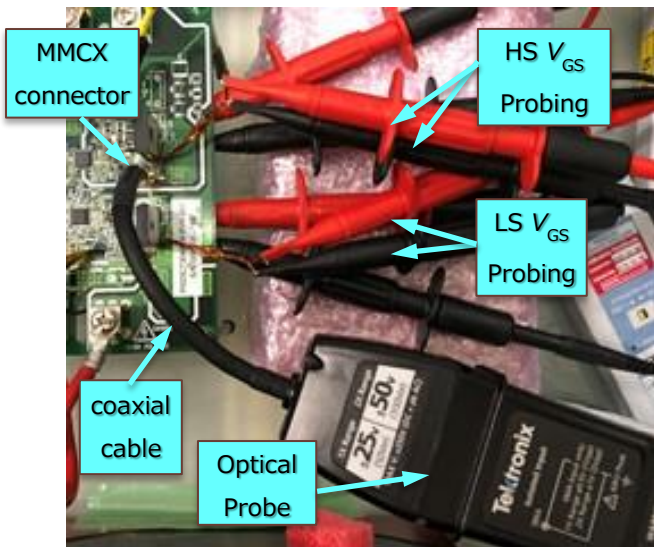


Figure 15. 光隔离型差分探头 (跟前) 和高电压差分探头 (后面)

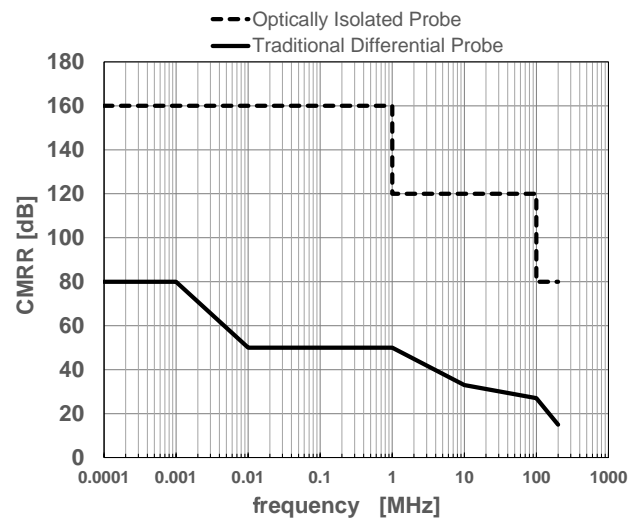


Figure 17. CMRR 频率特性

总结

为了准确测定 MOSFET 的栅源电压，有以下三点要注意：

- 探头的接续方面，探头的顶端形成的环路要尽可能小。
- 测定位置的选定方面，与测定端子形成的环路要尽可能小。
- 探头顶端的设置位置方面，主电路的磁通量变化的影响要尽可能小。

此次的验证，通过使用「延长线+阻尼电阻」在设备的端子正下方测量，是最接近本来波形的测量结果。但由于电路构成和线路的不同，最合适的方法不是一成不变的，需要根据各自不同的状况选择合适的测量对策。

今后，面对越来越高速化的功率开关装置的性能评价，不仅要仔细地注意测量方法，从产品的设计阶段就要为了便于测量做好考虑、预先准备能准确测量的环境，这一点是不可或缺的。

最后，由于各个产品的测定环境大不相同，因此希望您能够在实际测试中留意本应用笔记所述的各种情况，对测量波形做出正确的判断。

参考资料：

- *1 「桥式电路栅源电压的动作」
应用笔记 (No. 60AN134JRev.001)
罗姆株式会社，2018 年 5 月
- *2 「ABCs of Probes」
Application Note (No. EA 60W-6053-14)
Tektronix，2016 年 1 月
- *3 「驱动的源极端子开关损失的改善」
应用笔记 (No. 62AN039JRev.001)
罗姆株式会社，2019 年 8 月
- *4 「逆变器电路的评价方法」
应用笔记 (V1.3)
岩崎通信机株式会社，2018 年 12 月
- *5 「Complete ISOLATION
Extreme COMMON MODE REJECTION」
White Paper (0/16 51W-60485-1)
Tektronix，2016

- *6 「Model 701927PBDH0150 差分探头·用户手册」
用户手册 (IM701927-01JA，6 版)
横河計測株式会社，2018 年 3 月
- *7 「WaveLink Medium Bandwidth(8-13GHz) Differential Probe」
Operator' s Manual (924243-00)
TELEDYNE LECROY，May 2014

IsoVu®是 Tektronix 的注册商标。

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/>