

Power switching device

Gate-Source 전압 측정 시의 주의점

MOSFET 및 IGBT 등의 power switching device 는 여러 전원 application 및 전력 line 의 switching 소자로써 사용되고 있습니다. 최근 채용이 가속되고 있는 SiC MOSFET 는 switching 시의 전압 및 전류의 변화가 상당히 크기 때문에, application note 「Bridge 구성에 있어서 Gate-Source 전압의 동작」*1 에서 설명한 Gate-source 간에 발생하는 Surge 를 정확하게 측정할 필요가 있습니다. 본 application note 에서는 Gate-Source 간의 전압 측정에 있어서 주의점에 대하여 설명하겠습니다.

일반적인 측정 방법

전원 unit 등의 제품에 사용되는 Power switching device는 일반적으로 냉각을 위하여 Heat sink를 부착하는 경우가 많아, device 단자 간의 전압 측정에 있어서, 전압 probe 등을 device의 단자에 직접 접촉하는 것은 일반적으로 불가능 합니다. 따라서 device의 lead 선 연장 cable을 soldering하여 제품의 body 외부에 전압 probe를 접속하여 측정하는 법이 있습니다.

Figure1 은 ROHM 평가기판 (P02SCT3040KR-EVK-001)에 Head sink 를 부착하여, 연장 Cable 에 전압 probe 를 접속한 예를 나타냅니다. 피 측정 device DUT 의 단자에 전압 probe 접속용 연장 cable (길이 약 12cm)을 soldering 하여, twist wire 로 하여 복사 noise 의 영향을 억제하도록 하고 있습니다.

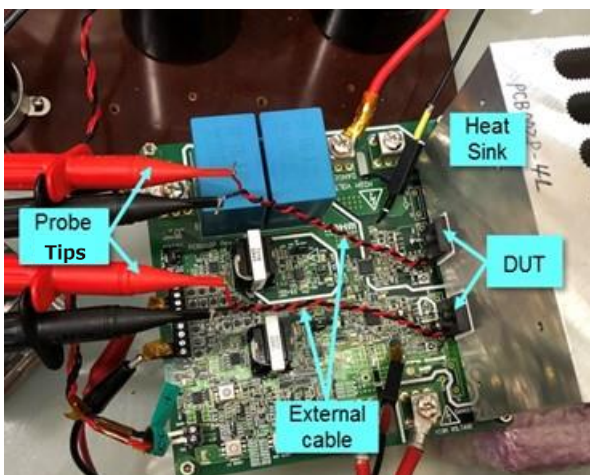


Figure 1. 연장 cable 에 전압 probe 를 접속하여
gate-source 전압을 측정

이 측정 방법을 이용하여 Figure 2 에 나타난 bridge 구성에 의한 double pulse test 를 실시하였습니다. High side(HS)와 Low side(LS)에 ROHM 의 SCT3040KR 을 실장하여, HS 측을 switching 하고, LS 측은 상시 OFF 상태 (Gate = 0V)로 합니다. Figure 1 에 나타난 연장 cable 은, HS 측의 Gate 단자와 Source 단자에 직접 soldering 하여 부착하였습니다.

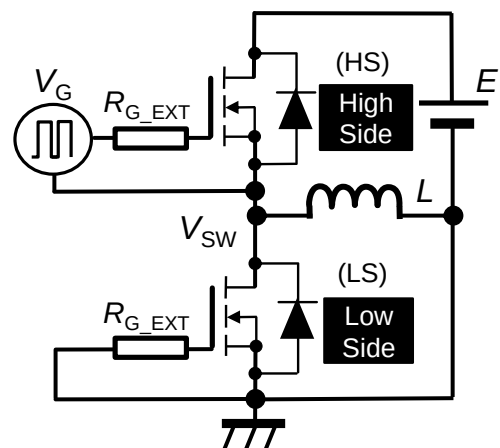
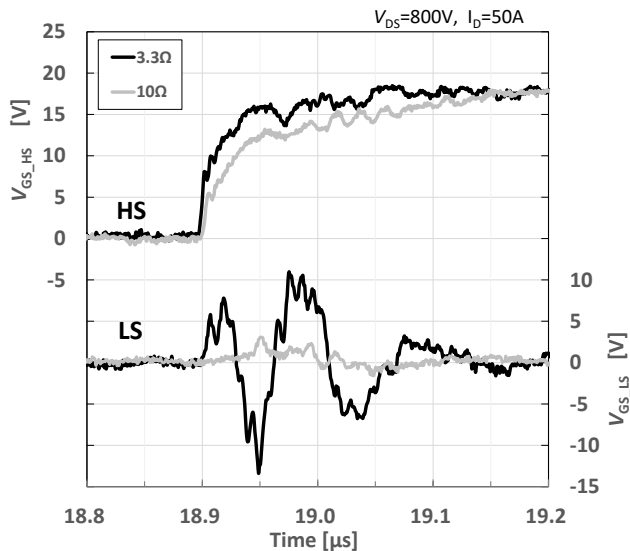


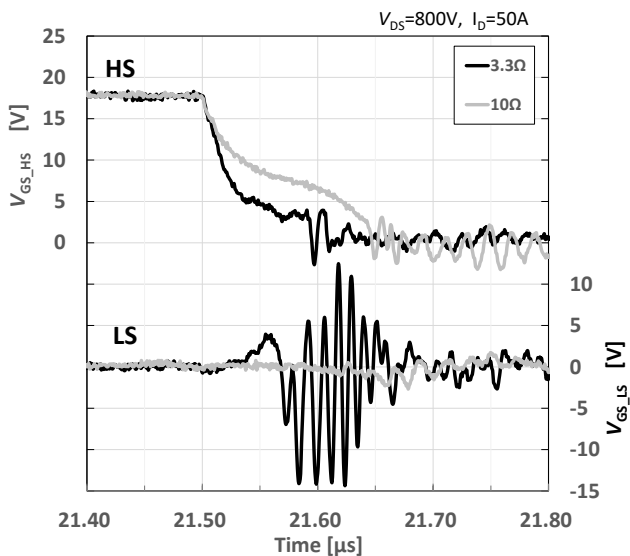
Figure 2. Double pulse test 회로

Figure 3 에 측정한 gate-source 전압 파형을 나타냅니다. 외장 gate 저항 R_{G_EXT} 가 10 Ω 의 경우, 연장 cable 의 영향은 어느 정도 크지는 않지만, R_{G_EXT} 를 3.3 Ω 으로 설정하여 switching speed 를 증가시키면, 전압 및 전류의 변화에 의한 noise 및 회로적인 고주파 동작을 유발하여, 측정 파형이 크게 변화합니다.

측정을 위해 외부에 부착한 연장 cable 에 의하여, 측정기의 주파수 대역이 변화하여, 불필요한 impedance의 부가에 따라 본래의 주파수와 완전히 다른 파형이 관측되게 되므로 주의가 필요합니다.



(a)



(b)

Figure 3. Gate-Source 전압의 측정파형
(a)Turn on, (b)Turn off

Figure 4 에 차동 probe 의 등가회로를 나타냅니다.*2,*6

통상적으로, 전압 probe 의 주파수 특성은 probe 의 head 를 포함하여 설정되어 있지만, DUT 의 측정단자에 연장 cable 을 부착하면, 수 십 ns 의 고속 switching 파형을 관측할 경우, stray inductance L_{EXT} 와 전압 probe body 의 입력용량 C 와의 공진 현상을 유발하여, 본래의 전압 파형에 중첩된 고주파의 전압 ringing 이 발생하여, 실제 surge 보다도 큰 surge 가 관측되게 됩니다.

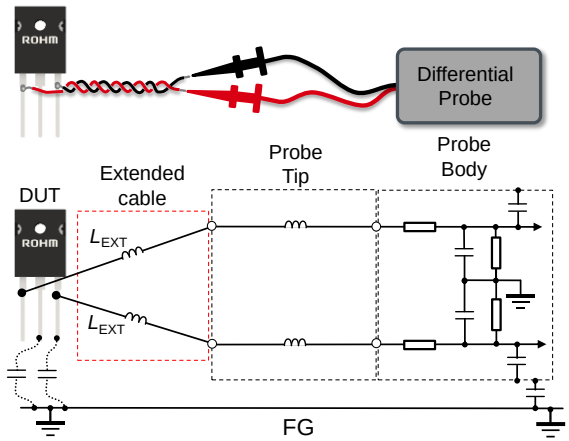


Figure 4. 차동전압 Probe 의 등가회로

Probe 의 부착 방법

이와 같이, 전압 probe 의 부착 방법에 따라서 측정 파형에 큰 영향을 끼치므로 일반적으로 시행되는 아래의 부착 방법에 따른 측정 파형의 차이를 검증해 보았습니다.

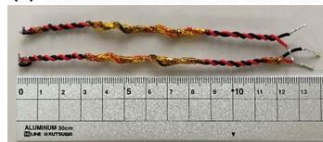
- (a)Probe head 를 device 단자에 직접 부착
- (b)twisted wire 로 연장하여, probe head 를 부착
- (c)긴 twisted wire 에 damping 저항 100Ω을 삽입하여, probe head 를 부착
- (d)짧은 twisted wire 에 damping 저항 100 Ω을 삽입하여, probe head 를 부착

(a)는 전압 probe head 를 직접 DUT 에 부착합니다. (b)는 twisted wire (약 12cm)로 가공한 연장 cable 을 DUT 의 단자에 soldering 하여 반대측에 전압 probe head 를 부착합니다. (c)는 (b)의 연장 cable 의 도중에 100Ω의 저항을 삽입합니다. (d)는 (b)의 길이를 짧게 (약 4cm) 하였습니다. Figure 5 는 실제로 사용한 연장 cable, Figure 6 은 Probe head 를 부착한 상태를 나타냅니다.

(b) Twisted cable



(c) Twisted cable with 100 ohm damping



(d) Twisted shorter cable with 100 ohm damping



Figure 5. 검증에 사용한 연장 cable

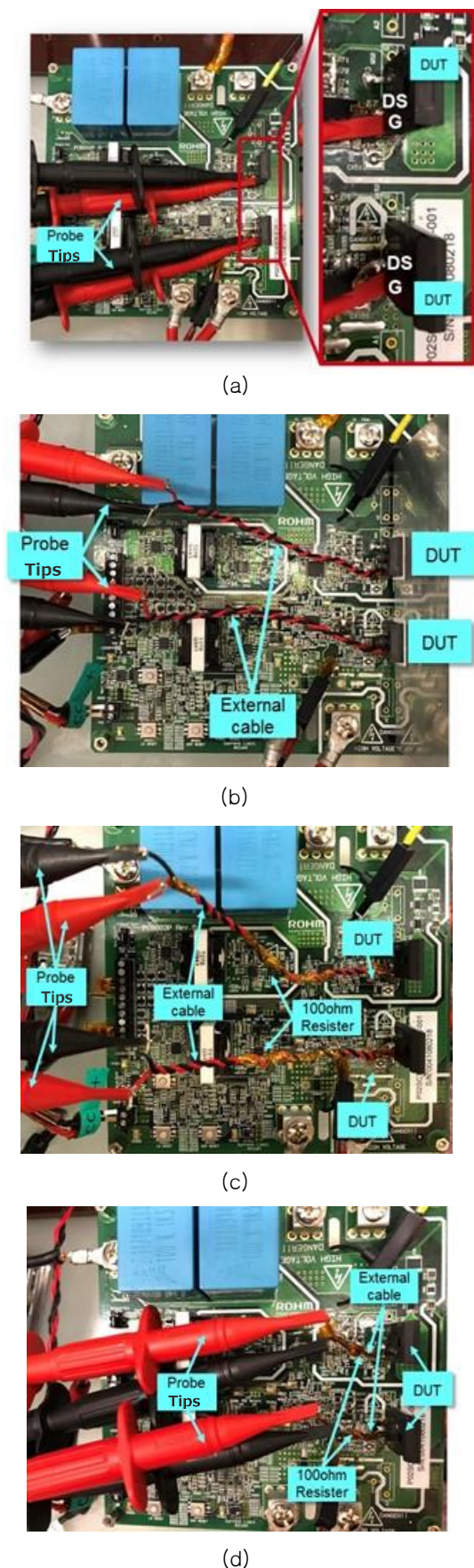


Figure 6. 전압 probe의 부착 방법

(a)직접, (b)긴 연장 cable, (c)긴 연장 cable+100Ω,
(d)짧은 연장 cable+100Ω

Figure 7에 Figure 6(a)~(d)의 부착 방법에 따른 double pulse test에서의 gate-source 전압 파형의 비교결과를 나타냅니다. 같은 그림 (a)는 turn on 시, (b)는 turn off 시의 gate-source 전압입니다.

LS 측의 switching에 주목하면, 각각의 측정 방법에서 크게 파형이 다른 것을 알 수 있습니다. (a)는 turn on 시, HS 측 MOSFET의 switch 동작이 시작되어 전류변화가 일어나면, Figure 8에 나타난 전압 probe head에 형성되는 loop 내를 통과하는 방향으로 자속 변화가 발생하고 있습니다. 그리고 그 자속의 변화가 head의 loop에 시계방향의 EMF가 되어, 관측되는 파형에 negative surge가 발생하는 것과 같이 보이게 됩니다. 본래는 (c) 및 (d)와 같이 positive 측으로 surge가 관측됩니다.*³

또한, (b)는 연장 cable에 의한 impedance가 고속 switching에 의한 ringing을 유발하여, 큰 surge가 발생하는 것처럼 관측됩니다.

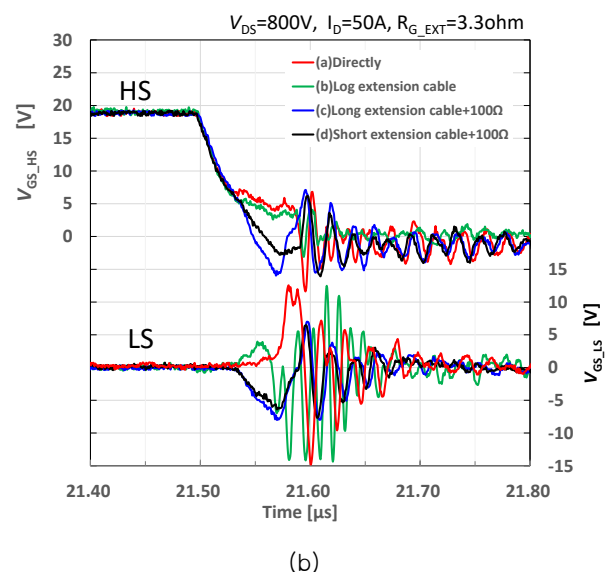
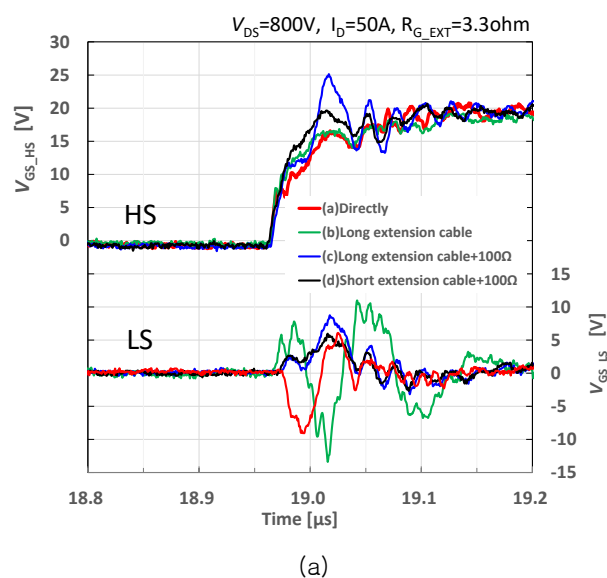


Figure 7. 전압 probe의 부착방법에 따른 측정파형 비교
(a)Turn on, (b)Turn off

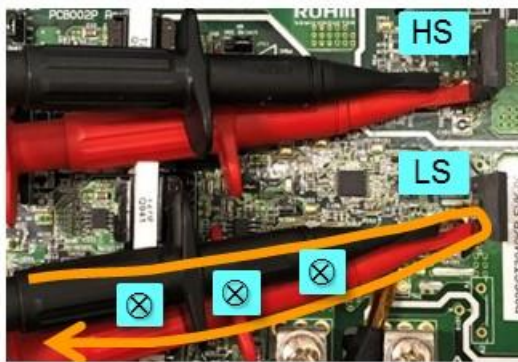


Figure 8. commutation 방향 probe 에서의 EMF

이와 같이 gate-source 단자와 측정 JIG 사이에 형성되는 loop 가 주 회로의 전류 변화에 의한 자속 변화에 반응하여, 본래의 파형과 전혀 다른 파형을 관측하게 되므로, 측정 JIG 와 gate-source 단자 사이에 형성되는 close loop 를 최소화 할 필요가 있습니다. 추가하면, Figure 6(b)~(d)는, 연장 cable 을 MOSFET 의 package 바로 아래의 단자 부분에 soldering 하였으므로, 형성되는 loop 는 최소화됩니다.

측정 부분의 선정

다음에 주의해야 할 것은 DUT 의 측정 부분입니다.

실제 제품에 있어서 DUT 의 파형을 관측할 경우, 측정하기 쉬운 부분에 probe 등을 부착하는 경우가 많습니다. 이는 DUT 에는 통상 heat sink 등의 냉각기구가 부착되어, DUT 의 lead 단자를 직접 접근하는 것이 곤란한 경우나, lead forming 에 의하여 lead 단자가 긴 상태로 실장되는 경우가 있기 때문입니다. 따라서 측정 가능한 부분은 제품의 구조에 크게 영향을 받기 때문에, 반드시 최적의 장소를 측정 할 수 있다고는 할 수 없습니다.

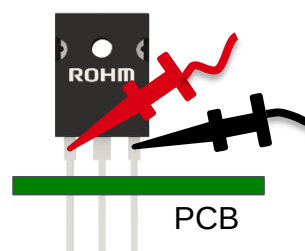
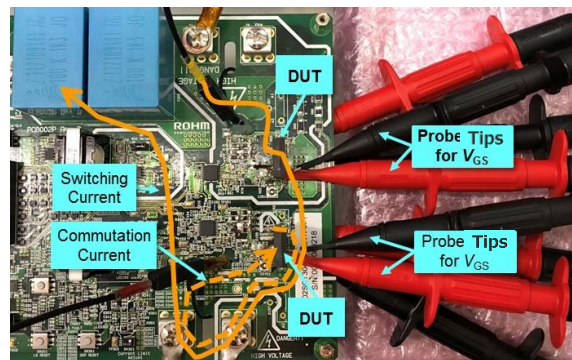
여기서, 다음의 3 가지 측정 장소를 고려하여, 그 차이를 검증 하였습니다.

- (a) DUT 의 mold package 근처
- (b) DUT 실장 후의 PCB solder 부분
- (c) PCB 에 soldering 한 check 단자
- (d) PCB 에 soldering 한 check 단자+twisted wire+100Ω

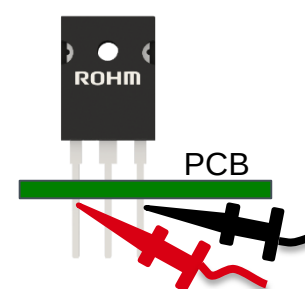
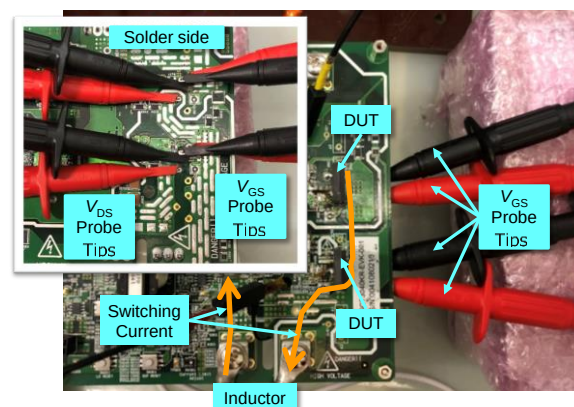
Figure 9 에 측정 장소의 차이에 대하여 나타내었습니다.

(a)는 DUT 의 lead 단자를 최단으로 할 경우, (b)는 forming 등에 의하여 lead 단자가 길어진 경우를 고려하여 기판 solder 면의 lead 단자에서 측정 할 경우, (c)는 미리 준비된 check 단자 등을 사용 할 경우를 고려하여, MOSFET 의 근처에 미리 준비된 check 단자용 pad 를 사용하였습니다. (d)는 (c)와 같은 장소이지만,

twisted wire 를 soldering 하여, probe head 를 main 회로에서 거리를 두었을 경우를 고려하였습니다.



(a)



(b)

Figure 9. Measurement point
(a)mold 근처 lead, (b)lead 끝 부분

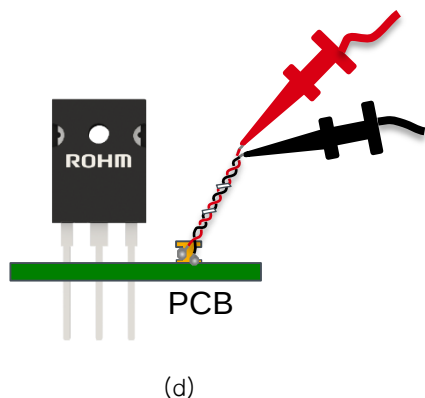
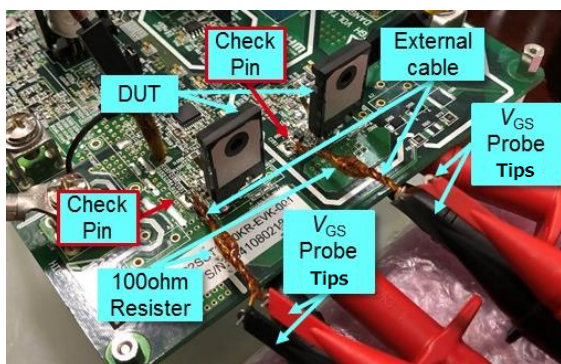
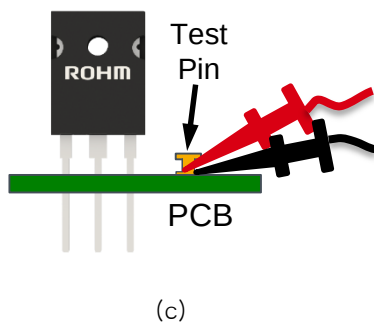
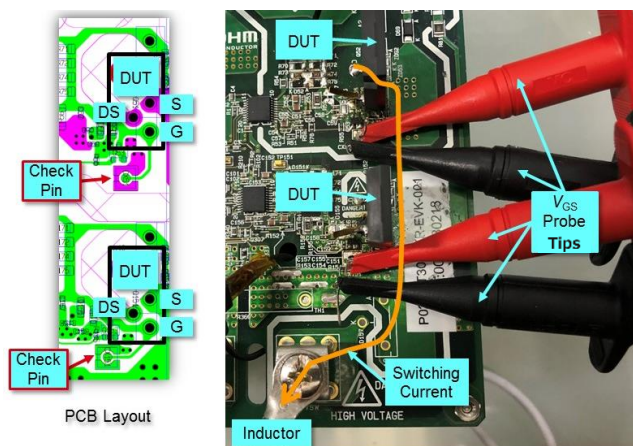
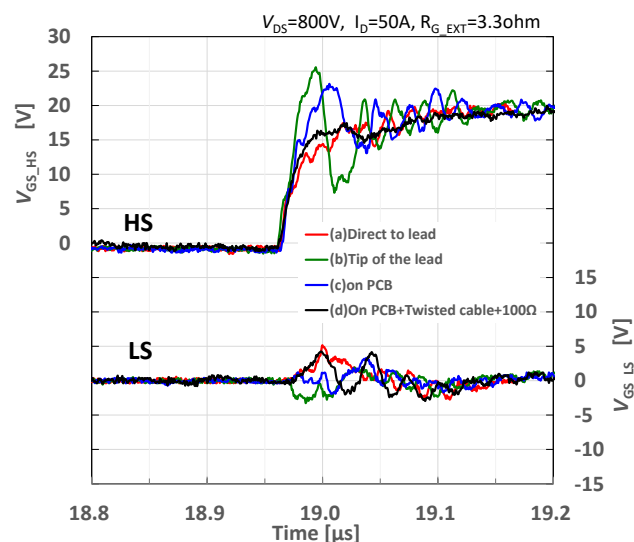
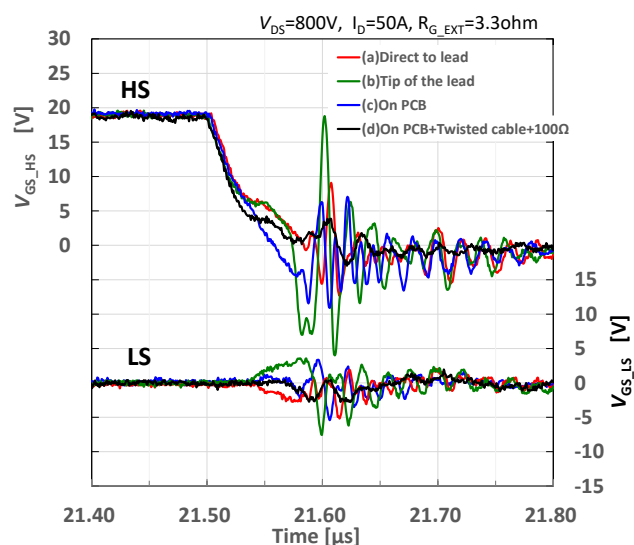


Figure 9. Measurement point

(c)On PCB, (d)On PCB + twisted cable + 100ohm



(a)



(b)

Figure 10. 측정 개소에 의한 측정 파형 비교

(a)Turn-on, (b)Turn-off

Figure 10 에 그 결과를 표시하였습니다. 측정 개소의 차이에 의해 서지 파형에 큰 차이가 발생하고 있음을 알 수 있습니다. (a)는 디바이스에 가장 가까운 개소를 측정하고 있어 안정된 파형입니다만, (b)는 디바이스와 측정점에 패키지 리드선이 존재하고 있어 리드선에서 발생한 전압이 포함되어 관측되고 있습니다. 그 때문에 서지의 극성이 (a)와 완전히 반대가 되고 있습니다. (c), (d)는 디바이스로부터 체크 단자까지의 패턴에 의한 폐경로가 형성되어 있어, 완전히 노이즈가 제거되지 않습니다. 위 결과로부터 측정 개소는 가능한 한 디바이스에 가깝게 측정하는 것이 바람직합니다.

Probe Head 부의 설치 장소

한가지 더 주의해야 할 부분이 있습니다. 바로 전압 Probe head 부의 설치 장소입니다.

일반적으로 파워 스위칭 디바이스가 사용되는 환경은 수십~수백 A의 전류가 고속으로 스위칭하고 있기 때문에 그 전류변화 dI/dt 에 의해서 발생하는 자속변화 $d\Phi/dt$ 도 상당히 큼니다. 또한, 전압변화 dV/dt 도 상당히 크고 전압 또한 높기 때문에, 전압변화 시에 흐르는 전류변화도 결코 작지 않습니다.

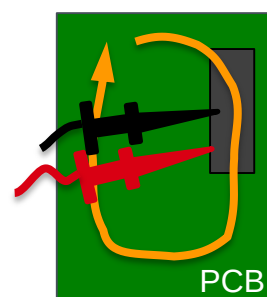
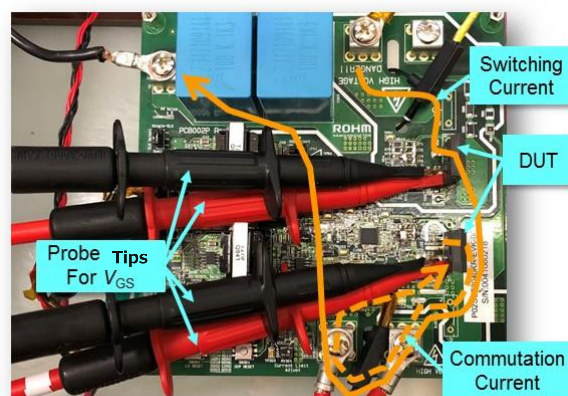
따라서, 이러한 자속변화가 빠른 공간에 전압 Probe를 그대로 설치하면, Probe head 부가 자속변화의 영향을 받아, 측정 파형에 중첩될 수 있습니다.

하여, 4 가지 설치방법을 상정하고 그 결과를 검증합니다

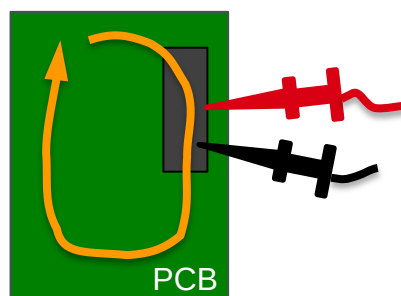
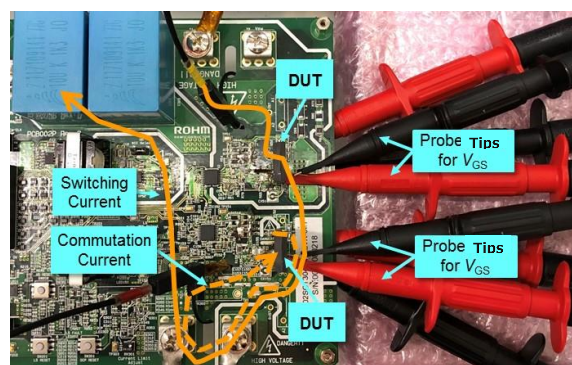
- (a) 주회로 Loop의 내측
- (b) 주회로 Loop의 외측
- (c) 12cm twisted wire를 이용한 주회로 Loop의 외측
- (d) 12cm twisted wire + 100Ω으로 주회로 Loop 외측

Figure 11에 Probe head 부의 설치 장소의 차이를 표시하고, 주회로 Loop의 전류경로를 화살표로 표시하였습니다. (a)는 주회로 Loop의 내측에 설치하고 $d\Phi/dt$ 가 가장 큰 장소, (b)는 주회로 Loop의 외측에 설치하였으나 비교적 $d\Phi/dt$ 가 큰 장소, (c)는 연장 케이블로 주회로 Loop로부터 떨어뜨려 $d\Phi/dt$ 의 영향을 최대한 줄인 장소에 설치하고 있습니다.

Figure 12에 상정한 4 가지의 설치 방법으로 측정한 게이트-소스 전압파형을 표시하였습니다. LS 측에 주목하면, 자속변화가 가장 큰 (a)에서 스위칭 동작과 동일한 타이밍으로 서지가 발생하고 있어, 복사 노이즈의 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있습니다. 또한, (c)는 연장 케이블의 인덕턴스의 영향에 의해 (b)보다 크게 변동하고 있습니다. 여기서 연장 케이블에 의한 Ringing을 억제하는 덤핑 저항 100Ω을 삽입한 (d)가 가장 변동이 작은 결과가 되고 있습니다. 이번 평가에서는 HS 측을 스위칭하고 있기 때문에, LS 측은 OFF 상태 (0V)로 되어 있습니다. 그 때문에 게이트 단자로의 구동전류는 완전히 흐르지 못하고, 자속변화의 영향을 받기 쉬워질 것으로 사료됩니다. HS 측은 스위칭 동작 시에는 MOSFET의 게이트 단자에 구동을 위해서 직류전류를 흘리고 있어 영향을 받기 어렵기 때문에 LS 측 정도로 파형이 지저분하지 않은 결과가 되고 있다고 판단됩니다.



(a)



(b)

Figure 11. Probe head 부의 설치 장소
(a) 주회로 Loop 내, (b) 주회로 Loop 밖으로 근접

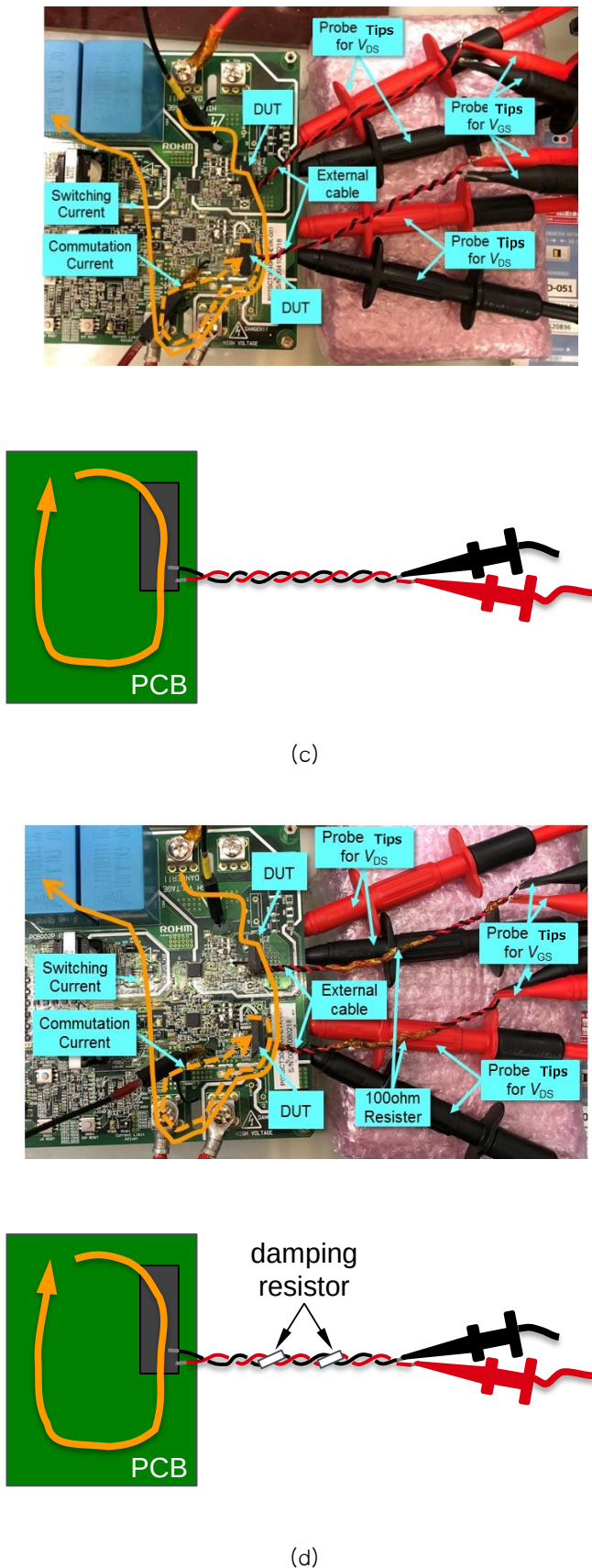
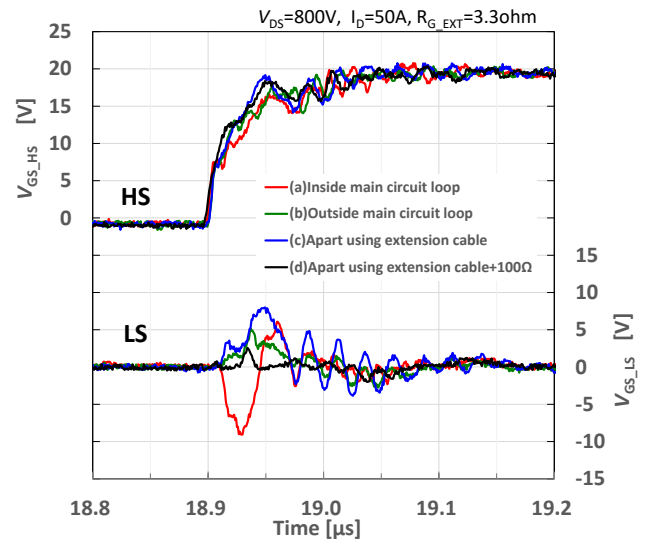
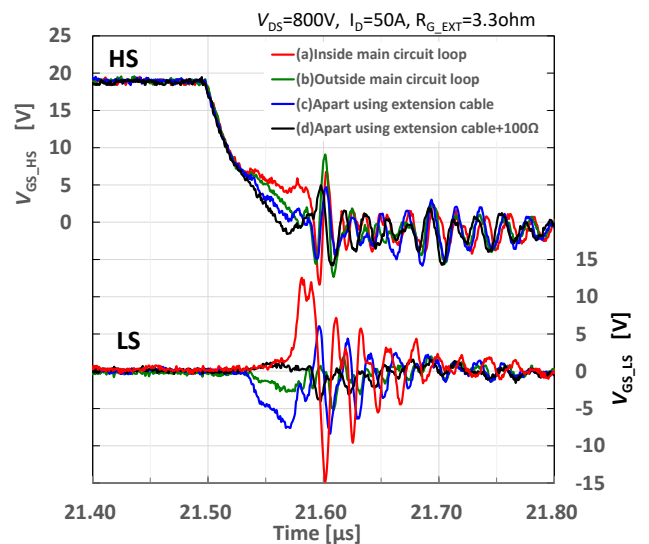


Figure 11. Probe head 부의 설치 장소
(c)연장케이블 사용, (d)연장케이블+100Ω으로 연결



(a)



(b)

Figure 12. Probe head 설치 장소에 의한 측정 파형 차이
(a)Turn-on, (b)Turn-off

Bridge 구성에 있어서의 주의점

마지막으로, Bridge 구성에 있어서 HS 측 MOSFET의 측정에서는 고전압 차동 Probe 나 차동 Pair Probe 4 개를 이용하여 파형 관측을 합니다만, 사용되는 Probe의 동상신호제거비 (CMRR)가 고주파 영역에서 저하되어, 파형 변동이 커지게 됩니다. 특히 게이트-소스전압 V_{GS} 는 수 V의 서지를 측정해야 하므로, 관측된 파형이 본래의 파형인지 CMRR 부족에 의한 변동 파형인지를 파악할 필요가 있습니다.

Figure 13에 Bridge 구성에 있어서 HS 측을 스위칭하는 경우와 LS 측을 스위칭하는 경우의 파형을 비교하였습니다.

사용한 차동전압 Probe 는 YOKOGAWA 사의 701297 (150MHz, 1400V)입니다. Commutation 방향의 서지를 보면 명백합니다만, LS 측을 스위칭할 때의 HS 측 V_{GS} 가 크게 변동됨을 알 수 있습니다. 이것은 HS 측이 20~50V/ns의 고속 dV/dt 로 변화할 때, CMRR 저하에 의해 발생하는 부분입니다.

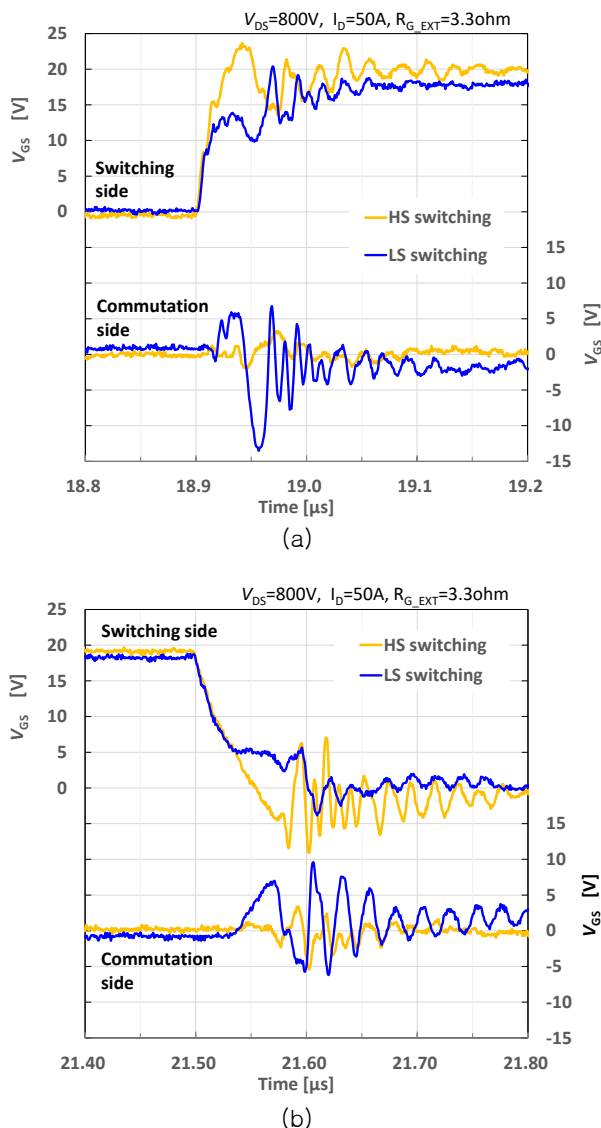


Figure 13. HS 측 스위칭과 LS 측 스위칭 시의 V_{GS} 파형
(a)Turn-on, (b)Turn-off

여기서, 차동전압 Probe 의 CMRR 성능을 측정한 결과를 Figure 14 에 표시하였습니다. 전압 Probe tips 의 플러스측과 마이너스측을 HS 측 및 LS 측의 Driver Source 단자에 접속하여 측정하고 있습니다. 상세 측정방법은 텍트로닉스 사의 어플리케이션 노트 「ABCs of Probes」*2 에 자세히 기재되어 있으니 참고하여 주십시오.

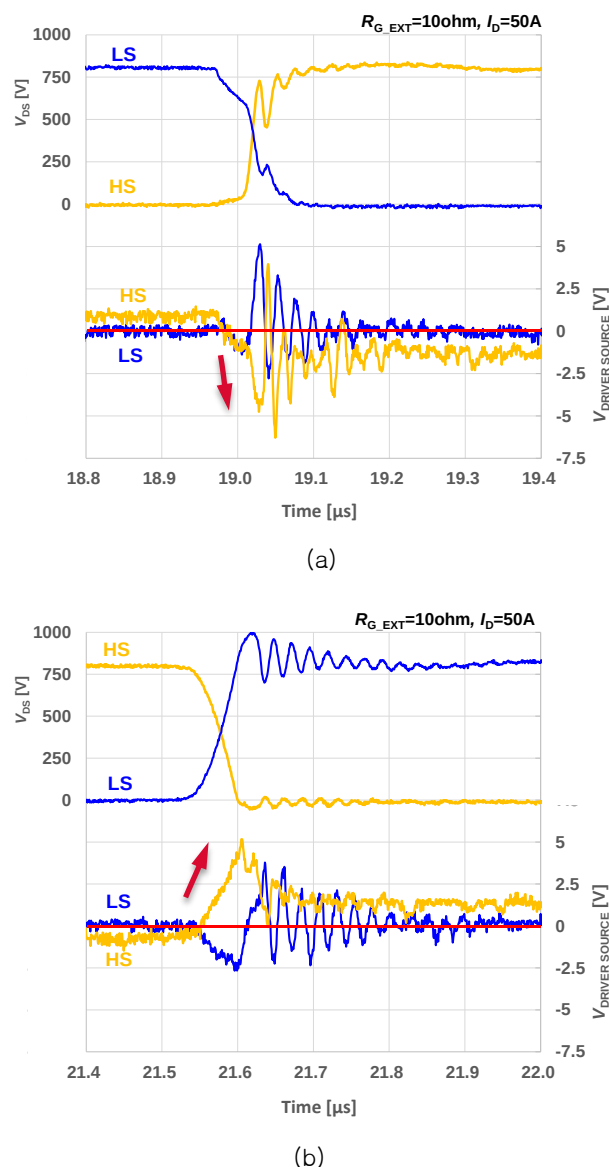


Figure 14. 절연형 전압 Probe 의 CMRR 성능
(a)Turn-on, (b)Turn-off

Figure 14(a)는 Turn-on 시, (b)는 Turn-off 시를 표시하고 있습니다만, LS 측 MOSFET 의 소스 전위는 거의 일정한 것에 비해서, HS 측의 소스 전위는 800V 가 약 200kHz (Duty50%)로 스위칭하고 있어, HS 측 V_{GS} 의 변화에 동기되어 변동되고 있습니다. 이번 측정에서는 V_{GS} 가 Rising 할 때는 마이너스 측으로, Falling 할 때에는 플러스 측으로 변동하고 있습니다만, 차동 Probe 의 특성에 의해서 역방향으로 변화할 수도 있으니 주의가 필요합니다.

최근에는 CMRR 의 영향을 받지 않는 측정기기로써 광절연 방식의 차동 Probe 가 측정기기 메이커로부터 제품화되고 있어, 정확한 파형 측정의 유효한 해결 수단으로써 주목받고 있습니다.

Figure 16 에 텍트로닉스 사의 IsoVu® 기술에 의한

광절연형 차동 Probe (TIVH08,MMCX50X)와 일반적인 고전압 차동 Probe 를 이용하여 측정한 게이트-소스전압의 파형을 표시하였습니다. 측정에 사용한 기판 (P02SCT3040KR-EVK-001)에는 광 절연형 Probe 를 접속하는 MMXC 커넥터를 실장하기 위한 패턴이 준비되어 있어, Figure 15 에 표시되어 있듯이 광 절연형 Probe 와 전압 Probe 를 동시에 접속하여 측정하였습니다.

여기까지 기술된 바대로 측정 개소와 차동전압 Probe 의 설치 개소에 의한 파형의 영향을 최대한 회피하기 위해서, 전압 Probe 의 측정 개소는 MOSFET 의 바로 아래에 짧은 연장선으로 납땜하고, 댐핑 저항 100 Ω 을 접속하고 있습니다.

HS 측을 스위칭하고 있기 때문에, HS 측의 게이트-소스전압 V_{GS} 가 차동전압 Probe 측정 시에는 CMRR 저하에 의해 (a)Turn-on 후에 구동전압 18V 를 상회하고, (b)Turn-off 후에 0V 를 하회하는 결과가 되고 있으나, 광 절연형 Probe 는 18V 및 0V 가 완전히 변동하지 않고 스위칭 동작 시의 정확한 파형을 관측하고 있다고 할 수 있습니다.

이 같은 결과는 Figure17 에 표시된 CMRR 의 주파수 특성으로부터도 명백히 알 수 있습니다.*4,*5 광 절연형 Probe 의 CMRR 주파수 영역은 고전압 차동 Probe 와 비교하여 상당히 큰 수십 MHz 의 동상 노이즈도 충분히 제거할 수 있다는 것을 알 수 있습니다.

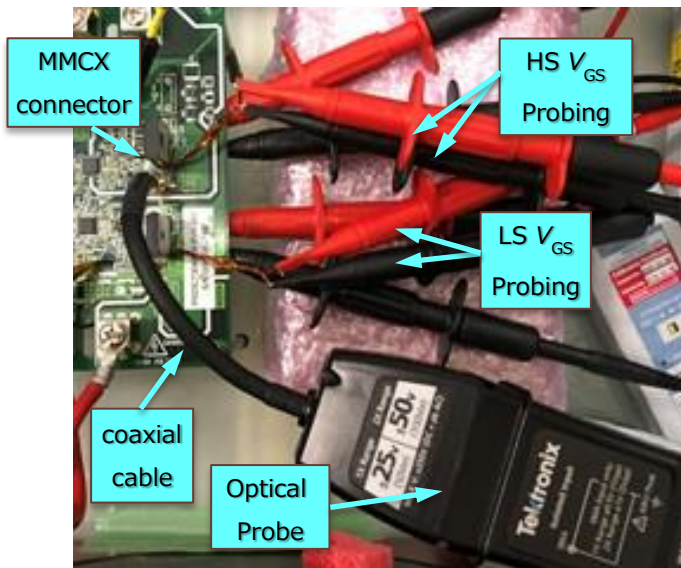
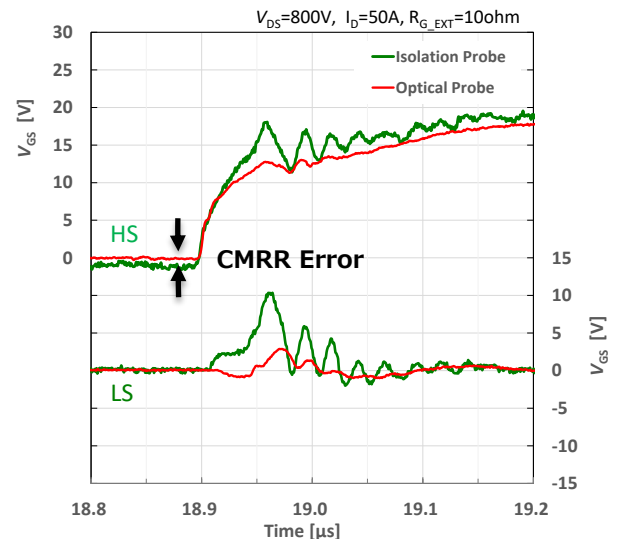
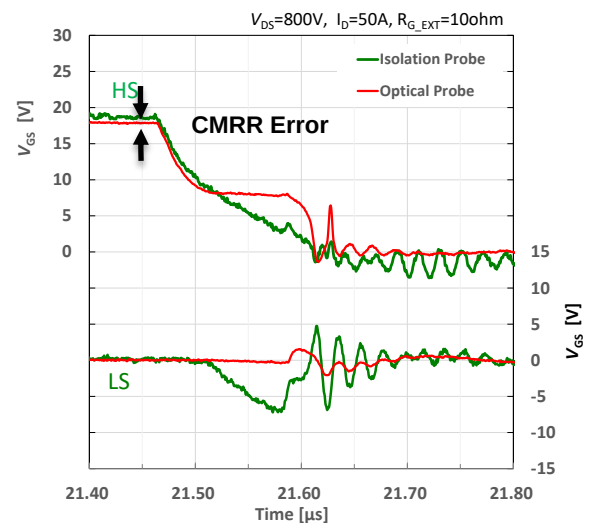


Figure 15. 광 절연형 차동 Probe (Bottom)와 고전압 차동 Probe (Top)



(a)



(b)

Figure 16. HS 스위칭 시의 V_{GS} 파형 비교
(a)Turn-on, (b)Turn-off

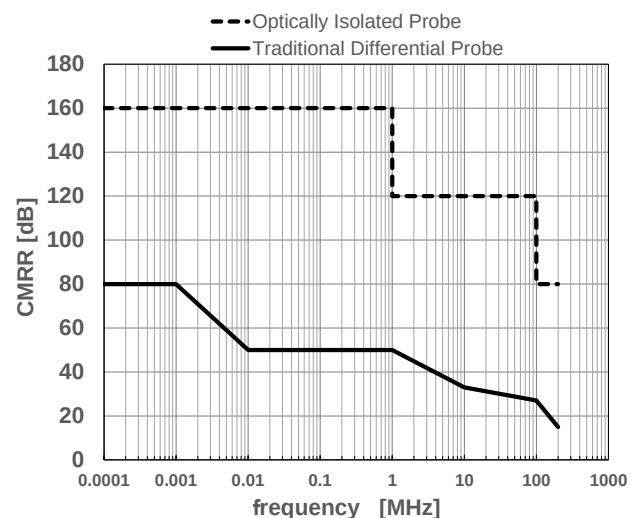


Figure 17. CMRR 주파수 특성

Summary

MOSFET 의 게이트-소스전압을 정확히 측정하기 위한 주의점은 이하의 세 가지입니다.

- Probe 의 접속은 Probe head 부가 형성하는 Loop 를 가능한 한 작게 해야 한다.
- 디바이스의 측정개소를 선정할 때에는 디바이스 측정단자와 형성되는 Loop 를 가능한 한 작아지는 장소로 정한다.
- Probe head 의 설치장소는 주회로의 자속변화의 영향이 최대한 적은 장소로 한다.

금번의 검증에서는 「연장 케이블 + 댐핑 저항」을 사용하여, 디바이스의 단자 바로 밑에서 측정하는 것에 의해 더 본래의 파형에 가까운 측정 결과를 얻을 수 있었습니다. 그러나, 회로구성과 배선에 따라서 최선의 방법은 바뀌므로 각각의 상황에 맞추어 상기 경향성을 감안한 대책이 필요합니다.

향후, 점점 더 고속화되는 파워 스위칭 디바이스의 성능 평가에서는 측정 방법에 세심한 주의뿐만 아니라, 제품의 설계 단계에서부터 측정을 위한 기능을 추가하여, 정확한 측정이 가능한 환경을 사전에 준비해 두는 것이 불가결한 상황이 되어 가고 있습니다.

마지막으로, 각각의 제품에 있어서 측정 환경은 크게 상이할 수 있으므로 이 어플리케이션 노트에서 설명한 내용에 유의하시어, 측정파형에 대해서 올바른 판단을 하시기를 기대합니다.

이상

- *5 「User's Manual Model 701927 PBDH0150 Differential Probe」
User's Manual (IM701927-01EN, 6th Edition)
Yokogawa Test & Measurement Corporation, March, 2018
- *6 「WaveLink Medium Bandwidth(8-13GHz) Differential Probe」
Operator's Manual (924243-00)
TELEDYNE LECROY, May 2014

IsoVu®는 텍트로닉스의 등록상표입니다.

참고자료 :

- *1 「Bridge 구성에서 Gate-Source 전압의 작용」
Application Note (No. 63AN110K Rev.001)
로옴 주식회사, 2020 년 9 월
- *2 「ABCs of Probes」
Application Note (No. EA 60W-6053-14)
Tektronix, January, 2016
- *3 「Gate-Source 전압의 Surge 억제 방법」
Application Note (No. 63AN049K Rev.001)
로옴 주식회사, 2020 년 9 월
- *4 「Complete ISOLATION Extreme COMMON MODE REJECTION」
White Paper (0/16 51W-60485-1)
Tektronix, 2016

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 from 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/>