ROHII

ゲート-ソース電圧測定時の注意点

MOSFET や IGBT などのパワースイッチングデバイスは、様々な電源アプリケーションや電力ラインのスイッチング素子として使用されています。近 年採用が加速している SiC MOSFET はスイッチング時の電圧や電流の変化が非常に大きいために、アプリケーションノート「ブリッジ構成におけるゲ ートーソース電圧の振る舞い」*1 で説明したゲートーソース間に発生するサージを正確に測定する必要があります。そこで、このアプリケーションノー トでは、ゲートーソース間の電圧測定において注意するべき点について説明します。

一般的な測定方法

電源ユニット等の製品に使用されているパワースイッチングデバイス は、一般的に冷却のためのヒートシンクを取り付けていることが多く、デ バイス端子間の電圧測定において、電圧プローブ等をデバイスの端子 に直接取り付けることは通常出来ません。そのため、デバイスのリード線 に延長ケーブルをはんだ付けし、製品の筐体外で電圧プローブを接続 し測定することがあります。

Figure 1 はローム製評価基板(P02SCT3040KR-EVK-001) にヒートシンクを取り付けて、延長ケーブルに電圧プローブを接続した例 を示します。被測定デバイス DUT の端子に電圧プローブ接続用の延 長ケーブル(長さ約 12cm)をはんだ付けし、より線化して輻射ノイ ズの影響を抑えようとしています。



Figure 1. 延長ケーブルに電圧プローブを接続してゲートーソース 電圧を測定

この測定方法を用いて、Figure 2 に示すブリッジ構成によるダブル パルス試験を実施しました。ハイサイド(HS)とローサイド(LS)にロ ーム製 SCT3040KR を実装後、HS 側をスイッチングし、LS 側は常 時オフ状態(ゲート=0V)にします。Figure 1 で示した延長ケーブ ルは、HS 側のゲート端子とソース端子に直接はんだ付けしています。



Figure 2. ダブルパルス試験回路

Figure 3 に測定したゲート-ソース電圧波形を示します。外付けゲ ート抵抗 R_{G_EXT}が 10Ωの場合、延長ケーブルの影響はそれほど大き くありませんでしたが、R_{G_EXT}を 3.3Ωに設定しスイッチング速度を速く すると、電圧や電流の変化によるノイズや回路的な高周波動作を誘 発し、測定波形が大きく変わります。

今回、測定のために取り付けた延長ケーブルにより、測定機器での 周波数帯域が変化し、余分なインピーダンスの付加により本来の波形 と全く違う波形を観測してしまうことに気が付かなければなりません。









Figure 4 に差動電圧プローブの等価回路を示します。*2,*7 通常、電圧プローブの周波数特性はプローブのヘッド部を含めて設 定されていますが、DUT の測定端子に延長ケーブルを取り付けると、 数十 ns の高速なスイッチング波形を観測する場合、浮遊インダクタン ス*L*_{EXT}と電圧プローブ本体の入力容量*C*との間で共振現象を誘発し、 本来の電圧波形に重畳した高周波の電圧リンギングが発生し、実際 のサージよりも大きなサージを観測してしまうことになります。



Figure 4. 差動電圧プローブの等価回路

プローブの取り付け方

このように、電圧プローブの取り付け方によって、測定波形に大きく 影響するため、一般的に行われている以下の取り付け方による測定 波形の違いを検証してみました。

- (a)プローブヘッドをデバイス端子部に直接取り付ける
- (b)より線で引き出し、プローブヘッドを取り付ける
- (c)長いより線のそれぞれにダンピング抵抗 100Ωを挿入し、プロー ブヘッドを取り付ける
- (d)短いより線のそれぞれにダンピング抵抗 100 Ωを挿入し、プロ ーブヘッドを取り付ける

(a)は電圧プローブのヘッド部を直接 DUT に取り付けます。(b)はよ り線(約 12cm)に加工した延長ケーブルを DUT の端子にはんだ付け し反対側に電圧プローブのヘッド部を取り付けます。 (c)は(b)の延長 ケーブルの途中に 100Ωの抵抗を挿入します。(d)は(b)の線長を短く (約 4cm)にしています。Figure 5 は実際に使用した延長ケーブル、 Figure 6 はプローブヘッドを取り付けた状態を示します。

(b) Twisted cable



(c) Twisted cable with 100 ohm damping



(d) Twisted shorter cable with 100 ohm damping



Figure 5. 検証に使用した延長ケーブル



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 6. 電圧プローブの取り付け方法 (a)直接, (b)長い延長ケーブル, (c)長い延長ケーブル+100Ω, (d)短い延長ケーブル+100Ω Figure 7 に Figure 6(a)~(d)の取り付け方によるダブルパルス試 験でのゲート-ソース電圧波形の比較結果を示します。同図(a)はター ン・オン時、(b)はターン・オフ時のゲート-ソース電圧です。

LS 側のスイッチングに注目すると、それぞれの測定方法で大きく波 形が異なっていることが判ります。(a)はターン・オン時、HS 側 MOSFET のスイッチング動作が始まり電流変化が起こると、Figure 8 に示す電圧プローブのヘッド部が形成するループ内を突き抜ける方向 に磁束変化が発生しています。そして、その磁束変化がヘッド部のルー プに時計周りの起電を発生させ、観測される波形にあたかも負サージ が発生したように見えてしまうのです。本来は(c)や(d)のように正側へ のサージが見えます。*3

また、(b)は延長ケーブルによるインピーダンスが、高速スイッチングに よるリンギングを誘発し、大きなサージが発生しているように観測されて います。









Application Note



Figure 8. 転流側プローブでの起電

このようにゲート-ソース端子と測定治具との間に形成されるループが 主回路の電流変化による磁束変化に反応し、本来の波形と全く異な る波形を観測してしまうので、測定治具とゲート-ソース端子間に形成 される閉ループを最小にする必要があります。

ちなみに、Figure 6(b)~(d)は、延長ケーブルを MOSFET のパッ ケージ直下の端子部分にはんだ付けしているため、形成されるループ は最小となります。

測定箇所の選定

次に注意しなければならない事は DUT の測定箇所です。

実際の製品において DUT の波形観測をする場合、測定し易い箇 所にプローブ等を取り付けてしまうことが多いです。これは、DUT には 通常ヒートシンク等の冷却器具が取り付けられおり、DUT のリード端 子を直接触ることが困難な場合や、リードフォーミングによりリード端子 が長いまま実装されている場合があるからです。そのため、測定できる 箇所は製品の構造に大きく影響され、必ずしも最適な箇所を測定で きるとは限りません。

そこで、次の3つの測定箇所を想定し、その違いを検証しました。

(a)DUT のモールドパッケージ直近

- (b)DUT 実装後の PCB はんだ部分
- (c)PCB にはんだ付けしたチェック端子

(d)PCB にはんだ付けしたチェック端子+より線+100Ω

Figure 9 に測定箇所の違いについて示します。(a)は DUT のリード端子を最短にした場合、(b)はフォーミング等によりリード端子が延びた場合を想定し基板はんだ面のリード端子で測定した場合、(c)はあらかじめ用意されたチェック端子等を使用する場合を想定しており、 MOSFET の近傍にあらかじめ用意されているチェック端子用パットを使いました。 (d)は(c)と同じ場所ですがより線をはんだ付けし、プローブへッド部を主回路から離した場合を想定しました。











(b)

Figure 9. 測定箇所 (a)リード根元, (b)リード先端



プローブヘッド部の設置場所

もうひとつ注意しなければならない事があります。それは、電圧プロー ブのヘッド部の設置場所です。

ー般的にパワースイッチングデバイスが使用される環境は、数十~ 数百アンペアの電流が高速でスイッチングされているために、その電流 変化 di/dtによって発生する磁束変化 dΦ/dtも非常に大きくなってい ます。また、電圧変化 dv/dt も非常に大きく、また電圧も非常に高い ため、電圧変化時に流れる電流変化も決して小さくありません。

従って、そういった磁束変化の速い空間に電圧プローブを無造作に 設置すると、そのプローブのヘッド部が磁束変化の影響を受け、測定 波形に重畳してしまうことがあります。

そこで、4つの設置方法を想定し、その違いを検証しました。

(a)主回路ループの内側

(b)主回路ループの外側

(c)より線 12cm で離した主回路ループの外側

(d)より線 12cm+100Ωで離した主回路ループの外側

Figure 11 にプローブヘッド部の設置場所の違いを示し、主回路ル ープの電流経路を矢印で示しています。(a)は主回路ループの内側に 設置し dΦ/dt が最も大きい場所、(b)は主回路ループの外側に設置 していますが、直近の場所のため比較的 dΦ/dt が大きい場所、(c)は 延長ケーブルで主回路ループから遠ざけ dΦ/dt の影響を極力取り除 いた場所に設置しています。

Figure 12 に想定した 4 つの設置方法で観測したゲートーソース 電圧波形を示します。LS 側に注目すると、磁束変化の最も大きい (a)で、スイッチング動作と同じタイミングでサージが発生しており、輻射 ノイズの影響を大きく受けていることが分かります。また、(c)は延長ケー ブルのインダクタンスの影響により(b)よりも大きく変動しています。そこ で延長ケーブルによるリンギングを抑えるダンピング抵抗100Ωを挿入し た(d)が、最も変動が少ない結果となっています。今回の評価では、 HS 側をスイッチングしているため、LS 側は常にオフ状態(0V)となっ ています。そのためゲート端子への駆動電流は全く流れておらず、磁束 変化の影響を受けやすいと考えられます。一方、HS 側はスイッチング 動作時には、MOSFET のゲート端子に駆動のための充電電流が流 れており影響を受けにくく、LS 側ほど波形が乱れていないと考えられま す。





(a)





Figure 11. プローブヘッド部の設置場所 (a)主回路ループ内, (b)主回路ループ外で直近

ゲート-ソース電圧測定時の注意点

Application Note





(c)











(d)

Figure 11. プローブヘッド部の設置場所 (c)延長ケーブルで離す, (d)延長ケーブル+100Ωで離す

ブリッジ構成における注意点

最後に、ブリッジ構成におけるハイサイド側 MOSFET の測定では、 高電圧差動プローブや差動ペアプローブ*4 を用いて波形観測を行い ますが、使用するプローブの同相信号除去比(CMRR)が高周波 領域で低下し、波形変動が大きくなります。特にゲートーソース電圧 V_{GS}は数 V のサージを測定しなければならず、観測した波形が本来の 波形か CMRR 不足による変動波形かを見分ける必要あります。

Figure 13 にブリッジ構成における HS 側をスイッチングした時と LS 側をスイッチングした時の波形を比較しました。使用した差動電圧プロ ーブは YOKOGAWA 製 701297(150MHz、1400V)です。転 流側のサージを見ると明白ですが、LS 側をスイッチングした時の転流 側(HS 側)V_{GS} が大きく変動していることが判ります。これは、転流 側が 20~ 50V/ns といった高速 dV/dt で変化した時、CMRR 低下 により発生したものです。







そこで、差動電圧プローブのCMRR性能を測定した結果をFigure 14 に示します。電圧プローブヘッドのプラス側とマイナス側をHS側およ び LS 側の Driver Source 端子に接続して測定しています。詳しい 測定方法はテクトロニクスのアプリケーションノート「ABCs of Probes」 *2 に詳しく記載されていますので参照して下さい。





Figure 14. 絶縁型電圧プローブの CMRR 性能 (a)ターン・オン, (b)ターン・オフ

Figure 14(a)はターン・オン時、(b)はターン・オフ時を示しています が、Driver Source 端子の電位は HS 側、LS 側共にスイッチング時 に電圧変動が発生しています。ところが、スイッチング動作終了後に、 LS 側はスイッチング前の状態に戻るのに対し、HS 側は一定電位が残 っています。これが CMRR 誤差です。HS 側の Driver Source 端子 は約 200kHz(Duty50%)で 800Vと 0Vをスイッチングしており、 時間経過(数µs)によりこの残留電位は消滅します。

今回の測定では、V_{DS} が立ち上がるときは負側へ、立ち下がる時は 正側へ変動していますが、差動プローブの特性により、逆方向に変化 することもありますので注意が必要です。

最近では、CMRRの影響を受けない測定機器として、光絶縁方式の差動プローブが測定機器メーカから製品化されており、正確な波形 測定の有効な解決手段として注目されています。

Figure 16 にテクトロニクス製 IsoVu®技術による光アイソレーショ ン型差動プローブ (TIVH08,MMCX50X) と一般的な高電圧差 動プローブを用いて測定したゲート-ソース電圧の波形を示します。測 定に使用した基板(P02SCT3040KR-EVK-001)には、光アイソレ ーションプローブを接続するMMXCコネクタを実装するためのパターンが 準備されており、Figure 15 に示すように光アイソレーションプローブと 電圧プローブを同時に接続して測定しました。

これまで述べたとおり測定箇所や差動電圧プローブの設置箇所による波形の影響を極力取り除くため、電圧プローブの測定箇所は MOSFET の直下に短い延長線をはんだ付けし、ダンピング抵抗 100 Ωを接続しています。

HS 側をスイッチングしているため、HS 側のゲート-ソース電圧 V_{GS} が差動電圧プローブ測定時は、CMRR 低下により(a)ターン・オン後に 駆動電圧 18Vを上回り、(b)ターン・オフ後に 0Vを下回る結果となっ ている一方で、光アイソレーションプローブは 18V および 0V が全く変動 しておらず、スイッチング動作時の正確な波形を観測していると言えま す。

これらの結果は、Figure17 に示す CMRR の周波数特性からも 明白です。*4,*5 光アイソレーションプローブの CMRR 周波数帯域 は高電圧差動プローブに比べて非常に大きく、数十 MHz の同相ノイ ズも十分に除去できることがわかります。



Figure 15. 光アイソレーション型差動プローブ(手前)と 高電圧差動プローブ(奥)









まとめ

MOSFETのゲート-ソース電圧を正確に測定するための注意点は、 以下の3つです。

- プローブの取り付け方は、プローブのヘッド部が形成するルー プをできるだけ小さくする。
- デバイスの測定箇所を選定する時は、デバイス測定端子と
 形成されるループができるだけ小さくなる場所とする。
- プローブヘッドの設置場所は、主回路の磁束変化の影響が 極力小さい場所とする。

今回の検証では、「延長ケーブル+ダンピング抵抗」を使用し、デバ イスの端子直下で測定することにより、もっとも本来の波形に近い測定 結果となりました。しかし、回路構成や配線によって最善の方策は変 わりますので、個々の状況に応じて、今回の傾向を踏まえた対策が必 要となります。

今後、ますます高速化するパワースイッチングデバイスの性能評価で は、測定方法に細心の注意を払うだけでなく、製品の設計段階から 測定のための機能を組み込み、正確な測定ができる環境を事前に準 備しておくことが不可欠となってくるでしょう。

最後に、それぞれの製品において測定環境は大きく異なりますので、 このアプリケーションノートで説明したことに留意しながら、測定波形に ついて正しい判断が出来ることを期待します。

参考資料:

- *1「ブリッジ構成におけるゲートーソース電圧の振る舞い」 アプリケーションノート(No. 60AN134JRev.002) ローム株式会社, 2020 年 4 月
- *2「ABCs of Probes」 Application Note (No. EA 60W-6053-14) Tektronix, 2016 年 1 月
- *3「ドライバソース端子によるスイッチング損失の改善」 アプリケーションノート(No. 62AN039JRev.002) ローム株式会社, 2020 年 4 月
- *4 「インバータ回路の評価方法」 アプリケーションノート(V1.3) 岩崎通信機株式会社, 2018 年 12 月
- *5 [Complete ISOLATION Extreme COMMON MODE REJECTION] White Paper (0/16 51W-60485-1) Tektronix, 2016

- *6「Model 701927PBDH0150 差動プローブ・ユーザーズマニュ アル」 ユーザーズマニュアル(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®はテクトロニクスの登録商標です。

	ご 注 意
1)	本資料の記載内容は改良などのため予告なく変更することがあります。
2)	本資料に記載されている内容は製品のご紹介資料です。ご使用に際しては、別途最新の仕様書を必ず ご請求のうえ、ご確認ください。
3)	ロームは常に品質・信頼性の向上に取り組んでおりますが、半導体製品は種々の要因で故障・誤作動する 可能性があります。 万が一、本製品が故障・誤作動した場合であっても、その影響により人身事故、火災損害等が起こらない ようご使用機器でのディレーティング、冗長設計、延焼防止、バックアップ、フェイルセーフ等の安全確保 をお願いします。定格を超えたご使用や使用上の注意書が守られていない場合、いかなる責任もローム は負うものではありません。
4)	本資料に記載されております応用回路例やその定数などの情報につきましては、本製品の標準的な動作 や使い方を説明するものです。 したがいまして、量産設計をされる場合には、外部諸条件を考慮していただきますようお願いいたします。
5)	本資料に記載されております技術情報は、製品の代表的動作および応用回路例などを示したものであり、 ロームまたは他社の知的財産権その他のあらゆる権利について明示的にも黙示的にも、その実施また は利用を許諾するものではありません。上記技術情報の使用に起因して紛争が発生した場合、ロームは その責任を負うものではありません。
6)	本資料に掲載されております製品は、耐放射線設計はなされておりません。
7)	本製品を下記のような特に高い信頼性が要求される機器等に使用される際には、ロームへ必ずご連絡 の上、承諾を得てください。 ・輸送機器 (車載、船舶、鉄道など)、幹線用通信機器、交通信号機器、防災・防犯装置、安全確保のため の装置、医療機器、サーバー、太陽電池、送電システム
8)	本製品を極めて高い信頼性を要求される下記のような機器等には、使用しないでください。 ・航空宇宙機器、原子力制御機器、海底中継機器
9)	本資料の記載に従わないために生じたいかなる事故、損害もロームはその責任を負うものではありません。
10)	本資料に記載されております情報は、正確を期すため慎重に作成したものですが、万が一、当該情報の 誤り・誤植に起因する損害がお客様に生じた場合においても、ロームはその責任を負うものではありま せん。
11)	本製品のご使用に際しては、RoHS 指令など適用される環境関連法令を遵守の上ご使用ください。 お客様がかかる法令を順守しないことにより生じた損害に関して、ロームは一切の責任を負いません。 本製品の RoHS 適合性などの詳細につきましては、セールス・オフィスまでお問合せください。
12)	本製品および本資料に記載の技術を輸出又は国外へ提供する際には、「外国為替及び外国貿易法」、 「米国輸出管理規則」など適用される輸出関連法令を遵守し、それらの定めにしたがって必要な手続を 行ってください。
13)	本資料の一部または全部をロームの許可なく、転載・複写することを堅くお断りします。



ローム製品のご検討ありがとうございます。 より詳しい資料やカタログなどご用意しておりますので、お問合せください。

ROHM Customer Support System

http://www.rohm.co.jp/contact/