パワースイッチングデバイス

ドライバソース端子によるスイッチング損失の改善

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。その スイッチング素子で発生するスイッチング損失や導通損失は、可能な限り小さくする必要がありますが、アプリケーションによって損失低減のアプローチ は様々で、そのひとつの手法としてドライバソース端子(いわゆるケルビンソース端子)を有する新しいパッケージが近年発表されています。そこで、 このアプリケーションノートでは、パワースイッチングデバイスがドライバソース端子を有することによって生み出される効果と使用上の注意事項について 説明します。

従来 MOSFET の駆動方法

MOSFET は一般的に電圧駆動型であり、ゲート端子への電圧をオ ンオフすることでスイッチング動作を制御します。Figure 1.に従来 (TO-247N)の MOSFET における一般的なゲート駆動回路例を示 します。



Figure 1. MOSFET のゲート駆動回路例

駆動電源 V_Gとゲート端子 Gate の間に外付け抵抗 R_{G_EXT}を接続 しスイッチング速度を制御しますが、駆動回路には PCB パターンのインダ クタンス L_{TRACE}と、MOSFET のソース端子 Source に存在するパッケー ジインダクタンス L_{SOURCE} が含まれており、このパラメータを考慮することが とても重要です。ゲート端子のパッケージインダクタンスは L_{TRACE}に包含さ れており、またドレイン端子 Drain のインダクタンス L_{DRAIN} はゲート駆動 回路に含まれないため、ここでは省略しています。

この駆動回路の一般的な動作については様々な文献で詳細に解説 されておりここでは省略しますが、従来のスイッチング速度では見落とされ やすい動作として、ドレイン-ソース間を流れるドレイン電流 I_Dの変化によ る L_{SOURCE} での起電 V_{LSOURCE} があります。

Figure 2.に駆動回路におけるスイッチング動作中の電圧印加を示します。 V_{G} が印加され MOSFET がターンオンすると I_{D} は増加し、 L_{SOURCE}

に図中(I)の方向に $V_{LSOURCE}$ が発生します。一方、ゲート端子には電流 I_G が流入するため、 $R_{G_{EXT}}$ で電圧降下 $V_{RG_{EXT}}$ (I)が発生します。これらの電圧はターンオン時の駆動回路網に含まれており、MOSFET のターンオン動作に必要なチップ上の電圧 $V_{GS_{INT}}$ を式(1)のように減少させてしまい、結果としてターンオン速度の低下を招いています。 L_{TRACE} による起電も発生していますが、小さいためここでは省略しています。

$$V_{\rm GS_INT} = V_{\rm G} - I_{\rm G} * R_{\rm G_EXT} - L_{\rm SOURCE} * \frac{dI_{\rm D}}{dt}$$
(1)

ターンオフ時も同様の理由から、式(1)で示される I_{G} および dI_{D}/dt が 負となることから、 $R_{G_{EXT}}$ と L_{SOURCE} に電圧上昇(II)を発生させ、 $V_{SG_{INT}}$ の増加によるターンオフ速度の低下を引き起こします。

一般的にパワースイッチングデバイスの L_{SOURCE} は数 nH から十数 nH となっており、dI_D/dt が数 A/ns に達すると 10V 以上の V_{LSOURCE} が発 生することもあり、スイッチング動作に大きな影響を及ぼすことになります。



Figure 2. スイッチング動作中の電圧印加

ドライバソース端子は、この V_{LSOURCE} の影響を取り除き、スイッチング 速度の改善を図ったものです。

ドライバソース端子を有するパッケージ

Figure 3.にドライバソース端子を有するパッケージ例とピンアサイン を示します。ROHM で製品化しているパッケージとしては、(a)TO-247-4Lと、(b)TO-263-7L があります。



Figure 3. ドライバソース端子を有するパッケージ (a)TO-247-4L, (b)TO-263-7L

ドライバソース端子による効果

ドライバソース端子を有するデバイスの駆動回路を Figure 4.に示します。従来の駆動回路 Figure 2.との違いは、駆動回路のリターン線をドライバソース端子に接続したのみとなっています。



Figure 4. ドライバソース端子を有するデバイスの駆動回路

この図からも明らかなように、 V_{G} を含む駆動回路に L_{SOURCE} が含まれていないため、スイッチング動作時の I_{D} の変化による $V_{LSOURCE}$ の影響を全く受けないことが分かり、式(2)で示す $V_{GS_{INT}}$ が印加されることが分かります。

$$V_{\rm GS_INT} = V_{\rm G} - I_{\rm G} * R_{\rm G_EXT}$$
(2)

ダブルパルス試験による従来品との比較

実際に従来品とドライバソース端子を有するデバイスのスイッチング動作を比較するために、Figure 5.に示す回路で、Low Side(LS)の MOSFET をスイッチングさせるダブルパルス試験を実施しました。High Side(HS)は R_{G_EXT}を接続し、ソース端子あるいはドライバソース端子 に接続し、ボディダイオードによる転流動作のみで使用しています。



Figure 5. ダブルパルス試験回路

Figure 6.はターンオン時、Figure 7.はターンオフ時のドレイン-ソース 電圧 V_{DS} とドレイン電流 I_D の波形およびスイッチング損失を示しています。 最大定格 (V_{DSS}) 1200V、オン抵抗 ($R_{DS(on)}$) 40m Ω のスイッチン グデバイスを使用し、従来品が SCT3040KL(TO-247N)、ドライバソ ース端子を有するデバイスが SCT3040KR(TO-247-4L)および SCT3040KW7(TO-263-7L)です。

駆動条件は、R_{G_EXT が}10Ω、印加電圧 V_{HVDC}を800Vとし、I_Dが約 50A 時の波形です。

Figure 6.のターンオン時では、従来品に比べドライバソース端子を有 するデバイスの *I*_D は急峻に立ち上がっており、その結果、スイッチング損 失が 19%~38%も小さくなっていることが判ります。

ただ、ここで注意しなければならないことは、TO-247-4L の *I*_D ピーク 値が TO-247N に比べ 23A も大きくなっていることです。これは、デバイ スのスイッチング動作に伴う *C*_{OSS} への充放電エネルギは一定にも関わら ず、ドライバソース端子による高速スイッチングが可能となったことで、充 放電時間が短くなり、結果として充電電流のピーク値が大きくなってしま った結果であり、決して HS 側 MOSFET のセルフターンオンによるピーク 電流の増加ではありません。

なお、TO-263-7L の I_D ピーク値は 60A と TO-247-4L ほど大きく ありませんが、後述しますターンオフサージでの違いと同様に、転流側 MOSFET のパッケージインダクタンスの違いによるものです。つまり、 dI_D/dt によるスイッチング側および転流側 MOSFET の合計したパッケー ジインダクタンスによる起電が、スイッチング側 MOSFET の V_{DS} を押し下 げ、スイッチング側 MOSFET の C_{OSS} に蓄積されたエネルギを放電させま すが、TO-263-7Lの場合、その放電電流が小さく、ターンオン時の I_D ピ ーク値も小さくなっています。また、ターンオン時のスイッチング損失 E_{ON} も 同様の理由により、TO-247-4L はスイッチング側 MOSFET の V_{DS} が

Application Note

押し下げられており、結果としてスイッチング損失 EoN が小さくなっています。

しかしながら、TO-247-4LやTO-263-7Lはセルフターンオン対策が 無ければ、セルフターンオンによるターンオン電流のピーク値は更に増加す る恐れがありますので、必ずミラークランプ回路やゲートーソース間に数 nFのコンデンサを接続するなど、セルフターンオン対策の実施を推奨しま す。詳しくは、アプリケーションノート「ゲートーソース電圧のサージ抑制方 法」^(*2)をご参照下さい。

また、Figure 7.に示すターンオフ時は、ターンオン時ほどのスイッチング 損失の改善効果は無いものの、約 30%改善しています。







一方、ターンオフ時 V_{DS} に観測されるターンオフサージの発生要因は、 主回路の総寄生インダクタンスであり、Figure 5.で示す主回路の配線 インダクタンス L_{MAIN} とスイッチング側および転流側 MOS FET のパッケー ジインダクタンス 2*(L_{DRAIN} + L_{SOURCE})の合計値です。そのため、パッケ ージインダクタンスがほぼ同じである TO-247-4L と TO-247N では dI_D/dt が高速化するほどサージは大きくなります。今回 TO-247-4L が 約 119V 程度大きくなっていますので、スナバ回路等のサージ対策が必 要となる場合もあります。

なお、TO-263-7L が TO-247-4L よりもサージが小さい理由は、 TO- 263-7L のドレイン端子であるパッケージ背面が PCB へ直接半田 付けされ、またソース端子も複数本アサインされていることで、パッケージ インダクタンスが TO-247-4L よりも小さいためと考えられます。また、スイ ッチング側ではなく転流側のパッケージインダクタンスが小さいほどスイッチ ング側のサージは小さくなります。





Figure 7. ターンオフスイッチング波形 (a) *V*_{DS}, *I*_D 波形, (b)スイッチング損失

Table 1.にスイッチング損失の比較をまとめました。

Table 1. Eon、Eoff 比較

DUT	Eon [µJ]	Eoff [µJ]
SCT3040KL	2742	2093
SCT3040KR	1690	1462
SCT3040KW7	2083	1488

ブリッジ構成時のゲートーソース信号の振る舞い

パワースイッチングデバイスの最も一般的なアプリケーションとして、 Figure 5.で示したブリッジ構成があり、既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-ソース電圧の振る舞い」^(*1)で、お互いに影響し 合う動作について説明しましたが、TO-247-4L や TO-263-7L は、 TO-247N と動作が異なっており、ゲート-ソース電圧のサージ対策を的 確に実施するためには、その動作を理解しておく必要があります。

そこで、TO-247-4L をブリッジ構成に接続し、LS 側をスイッチングした 時の波形を Figure 8.および Figure 10.に示します。 Figure 8.がター ンオン時、 Figure 10.がターンオフ時となっています。

まずターンオン時の動作について TO-247N との違いを中心に説明し ますが、TO-247N のターンオン・オフ動作の詳細については、「ブリッジ構 成におけるゲート-ソース電圧の振る舞い」^(*1)を参照して下さい。

Figure 8、Figure 10(a)の横軸は時間を表し、時間領域 Tk(k=1~8)の定義は各々以下の通りとなっており、各々の時間領域 で発生する事象を(I)~(VII)で示しています。なお、事象(III)は期間 T2 が終了した直後、事象(VII)は期間 T5 が終了した直後に発生 しています。

- T1:LS が ON し MOSFET の電流が変化している期間 (事象(I)が同時に発生)
- T2:LS が ON し MOSFET の電圧が変化している期間 (事象(II)が同時に発生)
- T3:LS が ON している期間
- T4:LS が OFF し MOSFET の電圧が変化している期間 (事象(IV)が同時に発生)
- T5:LS が OFF し MOSFET の電流が変化している期間 (事象(VI)が同時に発生)
- T4-T6:HS が ON するまでのデッドタイム期間
- T7:HS が ON している期間(同期整流期間)
- T8:HS が OFF し LS が ON するまでのデッドタイム期間

TO-247-4Lの事象(I) のみが、TO-247Nと大きく違い、非スイッチ ング側(HS)の V_{GS} に正サージが観測されています(従来は負サージ)。 これは、ゲート端子の電流の挙動を示す Figure 8.(b)において、図中 (I)の電流 I_{CGD} が流れることで発生しています。

この電流は CGD を経由して流れていますが、この電流が流れる理由を



次に説明します。







スイッチング動作前には HS 側 MOSFET のボディダイオードにソースか らドレインに向かって転流電流 I_{D_HS} が流れていますが、その後スイッチン グ動作が開始すると、まずスイッチング側の電流 I_{D_LS}が増加していくため I_{D_HS} は減少していきます。一方、一般的に SiC MOSFET のボディダイ オードの順方向電圧 V_{F_HS} (Figure 8(a)中の破線丸部分) は、Si

ドライバソース端子によるスイッチング損失の改善

系 MOSFET に比べ電流依存が大きいため、スイッチング動作を高速化 すると dI_{D_HS}/dt が大きくなり dV_{F_HS}/dt も大きくなります。そして、この dV_{F_HS}/dt は結果として転流側 MOSFET の dV_{DS_HS}/dt であるため、 ドレイン端子からゲート端子へ C_{GD} を通して I_{CGD} が流れ込み、ゲートーソ ース電圧の上昇を招きます。従来の TO-247N では、 I_{D_LS} の電流変 化が小さく、事象(I)の I_{CGD} はほとんど観測されていなかったと考えられま す。

Figure 9.にターンオン時のスイッチング側(LS)と転流側(HS)の V_{DS} 波形を示します。転流側 MOSFET の V_{DS_HS} において、スイッチング動 作が開始した直後に、TO-247-4L の V_{DS_HS} が急激に上昇しているこ とがよく判ります。



Figure 9. ターンオン時の V_{DS} 波形

また、事象(II)も高速化されており、Figure 8.(b)の HS 側から LS 側へ流れる C_{DS} への充電電流も大きくなっていますので、スイッチング側 のみならず非スイッチング側のドレインーソース間サージ対策も必要となる 場合があります。

次に、ターンオフ時の動作ですが、Figure 10(a)に示します事象(VI)、 事象(VII)が TO-247N と異なっています。

事象(VI)は、ターンオン時と同様に I_D 変化時であり、HS 側の I_{D_HS} が急激な増加により、ボディダイオードの V_{F_HS} が急激に上昇します。そのため、 dV_{F_HS}/dt による電流 I_{CGD} が再び流れ負サージが発生します。 (Figure 10.(a)破線丸部分)

Figure 11.にターンオフ時のスイッチング側(LS)と転流側(HS)の V_{DS} 波形を示しますが、ターンオン時と同様に HS 側 V_{DS_HS} が本来の dV_{DS_HS}/dt (期間 T4)が完了した後の I_D 変化時(期間 T5)に、 負側へ変化しており、 dV_{F_HS}/dt が発生していることが判ります。

事象(VII)は、期間 T5 が完了し $I_{D_{HS}}$ の変化が無くなると、 $dV_{F_{HS}}/dt$ が消滅してしまい、ゲート端子へ流入する I_{CGD} が流れなくな り、 I_{CGD} の電流経路に存在するパターンインダクタンスに蓄積されたエネ ルギによる起電がゲートーソース間に正サージとして観測されることがあります。この正サージも TO-247N ではほとんど観測されません。



(a)



(b)

Figure 10. ターンオフ時の挙動 (a)各スイッチング波形, (b)ゲート端子の電流



Figure 11. ターンオフ時の V_{DS} 波形

Figure 12.および Figure 13.に ROHM 製 SCT3040KR を使った ダブルパルス試験での V_{GS} 波形を示します。サージ対策を実施しない場 合(Non-Protected)はこれまで説明したサージが発生し、サージ対 策を実施(Protected)することで、V_{GS} サージが抑えられていることが 判ります。これらのサージを抑えるためには、MOSFET の直近にサージ抑 制回路を接続することを強く推奨します。詳細はアプリケーションノート 「ゲートーソース電圧のサージ抑制方法」^(*2)を参照して下さい。



Figure 12. SCT3040KR ターンオン時の VGS 波形



Figure 13. SCT3040KR ターンオフ時の VGS 波形

レイアウトでの注意事項

最後に TO-247-4L のレイアウトに関する注意事項を説明します。



Figure 14. TO-247N ピンアサイン

Figure 3.(a)で示したとおり、TO-247-4L の Gate 端子は標印面 に向かって一番右側にありますが、従来の TO-247N は Figure 14.に 示すとおり一番左側に Gate 端子がアサインされており、TO-247-4Lと は対極にあります。 MOSFET は通常ドライバ IC によって駆動されますが、 ほとんどのドライバ IC は従来のパッケージである TO-247N に適したピン アサインとなっています。

Figure 15.に ROHM 製ドライバ IC(BM61S40RFV-C)を使った MOSFET の結線図を示します。(a)TO-247N の場合、MOSFET の 駆動信号 OUT とリターン信号 GND2 は Gate 端子および Source 端 子と同じ配列となっており、同一面で並行してパターンを引くことができま す。

ところが、(b)TO-247-4L の場合は、Gate 端子と Driver Source 端子がドライバ IC のピンアサインと逆となっており、同図で示すとおり必ず 配線が交差し、同一面でパターンレイアウトすることは出来ません。その ため、同図(b)で示す OUT 信号と GND2 信号で形成されるループ面 積(1)および(2)の面積比には注意が必要です。





(c)

Figure 15. ROHM 製ドライバ IC(BM61S40RFV-C)での駆 動回路パターンレイアウト例 (a)TO-247N, (b)TO-247-4L, (c)TO-263-7L

なぜなら、TO-247-4L の d*I*_D/dt は非常に大きく、この電流変化に よる磁束の変化 (dΦ/dt) がこのループ面積に直交すると、駆動回路 のループ面積に比例した起電が発生します。そして、MOSFET のゲート ーソース間にこのループ面積の比率次第で、正サージや負サージなどの 誤動作を引き起こしかねない電圧を発生させてしまいます。そのため OUT 信号と GND2 信号で形成されるループ面積を極力小さく、そして ループ(1)とループ(2)を等しくする必要があります。

また、V_{GS}サージ抑制回路の設置を推奨しましたが、それでもV_{DS}ター ンオフ時のリンギングで V_{GS} サージが V_{GS} 規格を越えてしまうことがありま す。その場合は、HVdc からの配線インピーダンスを低減させるか、各々 の MOSFET にスナバ回路等のサージ対策を実施することで、V_{GS}サージ を規格内に抑えることができます。スナバ回路の設計方法については、ア プリケーションノート「スナバ回路の設計方法」⁽³⁾を参照して下さい。

まとめ

TO-247-4L や TO-263-7L のドライバソースを有する MOSFET は、 スイッチング速度の向上により、V_{GS}サージやV_{DS}ターンオフリンギングを抑 制する回路を設計初期段階から検討し、基板上に準備しておくことで、 評価段階での対策が容易となります。このアプリケーションノートがドライ バソース端子を有する高速スイッチングパッケージを正しく使うための一助 になることを期待します。

以上

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「ゲートーソース電圧のサージ抑制方法」 アプリケーションノート(No. 62AN009JRev.002) ローム株式会社, 2020 年 4 月
- *3「スナバ回路の設計方法」 アプリケーションノート(No. 62AN0036JRev.002) ローム株式会社, 2020 年 4 月

 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/