

東芝半導体アプリケーションノート

メカリレー駆動用 MOSFET の安全設計

(アクティブクランプ MOSFET)

はじめに

メカリレー駆動用 MOSFET はメカリレーなどの誘導性負荷のドライブに強いアクティブクランプ構造の MOSFET です。

現在、自動車に搭載される車載 ECU^{*1}をはじめ、家電製品や OA 機器、FA 機器など、メカリレーやソレノイドなどの誘導性負荷が幅広く使用されています。特に高機能化に伴い電装数が増加傾向にある車載用途向けを中心に需要が高まっております。

ドライブ素子としてはトランジスタや MOSFET などが使用されますが、CPU 等からの直接の電圧駆動が可能な MOSFET の使用が広がっています。

誘導性負荷のドライブ素子は、そのインダクタンスから発生する逆起電圧などの電圧サージから、ドライブ素子の破壊を防ぐため、ダイオードなど、保護素子を用いるのが一般的です。

メカリレー駆動用 MOSFET は、MOSFET にダイオードの保護素子を内蔵したアクティブクランプ MOSFET で、誘導性負荷のドライブに強い製品となります。保護素子を削減できるため、周辺部品の削減ができるだけでなく、実装スペースの小スペース化も可能となり、今後も幅広い用途での使用が期待されます。

本アプリケーションノートでは、アクティブクランプ MOSFET の構造や動作、基本的な回路設計の考え方、安全設計について説明しています。製品設計時の参考資料としてご活用頂ければ幸いです。

*1 : ECU : Electrical Control Unit

アクティブクランプ MOSFET の基礎知識

アクティブクランプ MOSFET は図 1 に示しますように、MOSFET のドレイン-ゲート端子間にダイオードを内蔵した構造となっています。

(ゲート-ソース端子間のダイオードはゲート端子の ESD サージ保護を目的としたダイオードです。プロセスの微細化にともなう ESD 耐量低下を補うために、ESD 保護ダイオードが搭載される製品が増えてきています。)

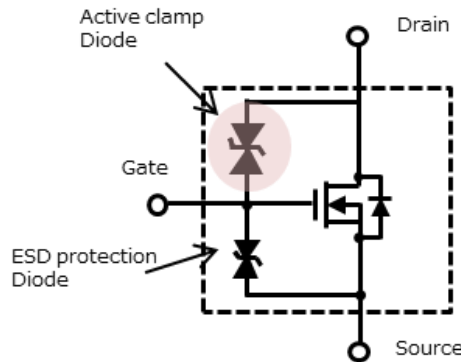


図 1 アクティブクランプ MOSFET

次に、誘導性負荷をドライブする際のアクティブクランプ MOSFET の動作について説明します。

誘導性負荷を ON から OFF へ切り替える際に、インダクタンス成分は電流の流れを維持しようとします。この電流は OFF している MOSFET に対しても引き続き電流を流がそうとするため、ドレイン-ソース間がブレークダウン(アバランシェブレークダウン)に至ります。

最近では MOSFET に対して、アバランシェブレークダウンのスクリーニング試験を行い、その耐量をデータシート上に規定している製品が増えていますが、図 2 に示すように、ブレークダウン状態が続くことによりチップが発熱し、最終的には破壊に至る可能性があり、MOSFET にとって必ずしも好ましい状態ではありません。

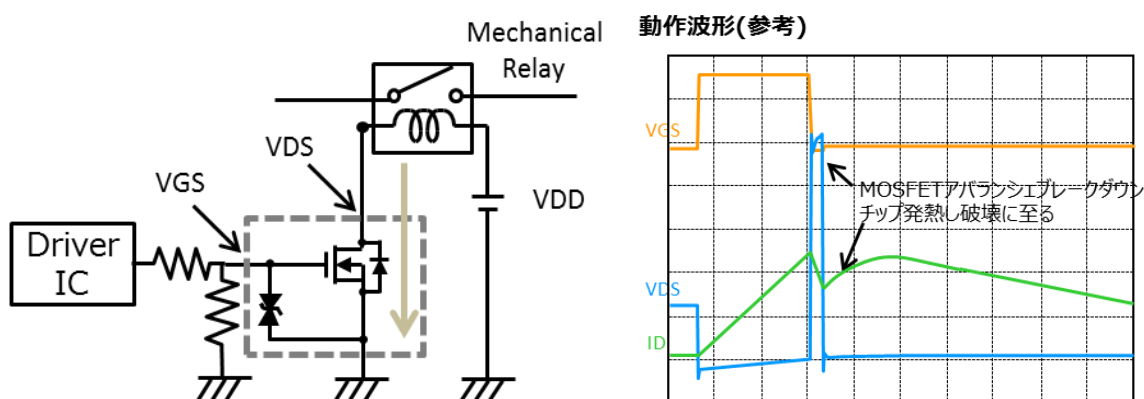


図 2 誘導性負荷(例：メカリレー)に対する MOSFET のアバランシェ破壊波形

アクティブクランプ構造はそのアバランシェブレイクダウンを回避するために使用されます。図 3 のように、ドレイン-ゲート間に配置されたアクティブクランプダイオードは、MOSFET のドレイン-ソース間のブレイクダウン電圧よりも低く設定してあります。

ドレイン側に電流を流し続けようとすると、アクティブクランプダイオードはドレイン-ソース間の電圧より低いため、先にブレイクダウンし MOSFET 側を守ります。

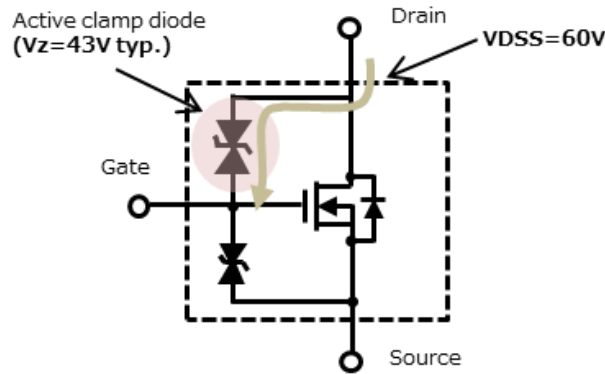


図 3 アクティブクランプ MOSFET の構造 (例 : SSM3K337R)

また、アクティブクランプダイオードがブレイクダウンし、ゲート端子の抵抗に電流を流し、図 4 に示すようにゲートに電圧を発生させます。このゲート電圧が MOSFET を ON させることで、MOSFET のドレイン-ソース間に誘導負荷のエネルギーを流し、MOSFET が破壊するのを防ぎます。このように、誘導性負荷のエネルギーを安全に逃がすことができます。

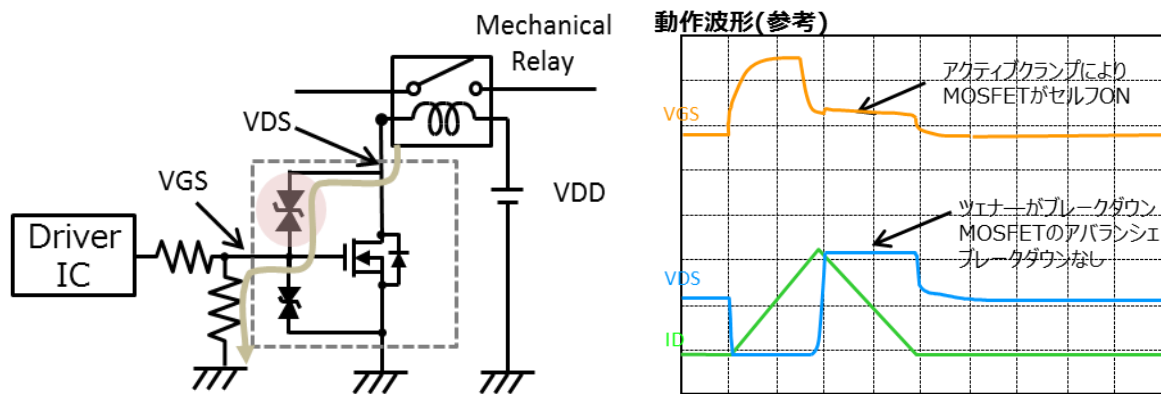


図 4 誘導性負荷(例 : メカリレー)に対するアクティブクランプ MOSFET の動作

アクティブクランプ MOSFET の使用上の注意点

この項ではアクティブクランプ MOSFET の使用上の注意すべき点について説明していきます。

1. 外付け抵抗

外付け抵抗は、シリーズ抵抗 R1 とプルダウン抵抗 R2 のそれぞれをゲート端子に接続する必要があります。

・推奨抵抗値

シリーズ抵抗 R1 はその値により、スイッチング速度の調整が可能です。1 k Ω ～10k Ω 程度の抵抗値を推奨いたします。

プルダウン抵抗 R2 はドライバ IC 側の CMOS 出力が不定の状態においても、ゲートの電位を GND 側に安定化させることができます。50k Ω 程度の抵抗値を推奨いたします。

また、Gate に印加される電圧は R1 と R2 の分圧比となります。ゲート駆動に必要な電圧(SSM3K337R の場合は 4V)が十分に印加されるよう、抵抗値の分圧比を設定頂くようお願いいたします。

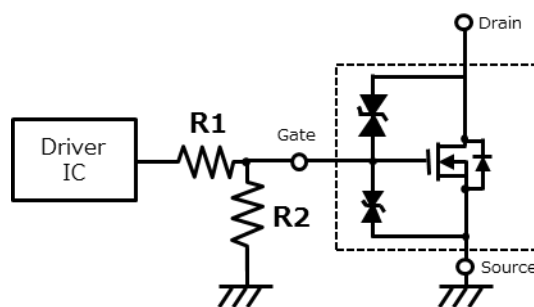


図5 アクティブクランプ MOSFET 外付け抵抗の接続例

抵抗	推奨抵抗値
シリーズ抵抗 R1	1～10k Ω
プルダウン抵抗 R2	50k Ω 程度

・アクティブクランプ動作時の外付け抵抗の役割

誘導性負荷を ON から OFF にドライブする際に、前述したようアクティブクランプダイオードがブレイクダウンします。その際、ドライバ IC 側の出力段は OFF となっていますので、簡易的に図 6 のように示されます。

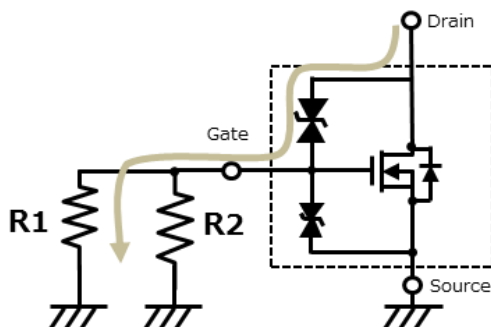


図 6 アクティブクランプ動作時の電流経路

アクティブクランプダイオードがブレイクダウンした電流は、シリーズ抵抗 R1 とプルダウン抵抗 R2 の並列抵抗に電流が流れます。(実際は、推奨抵抗値より一般的にシリーズ抵抗 R1 のほうが、抵抗値が低いために R1 に流れる電流が支配的です。)

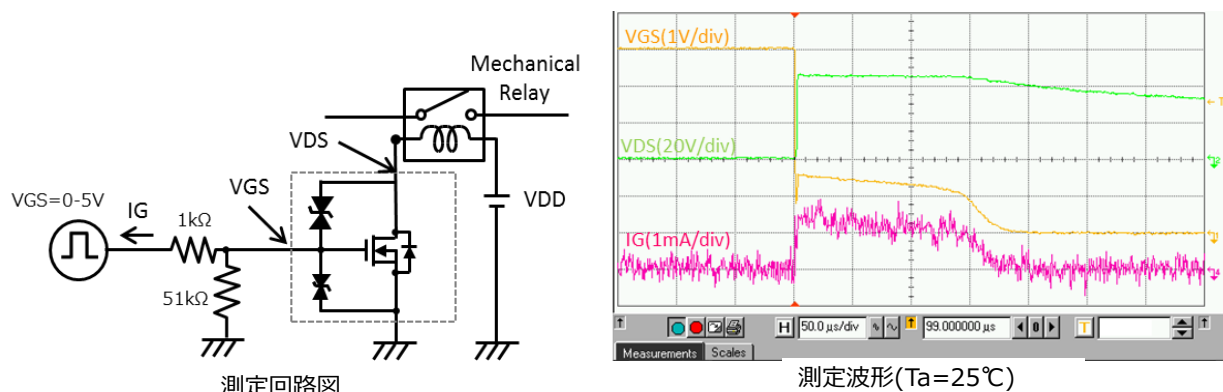
この抵抗値に流れる電流によりゲートに電圧が発生し、MOSFET を ON させることができます。

プルダウン抵抗 R1 がない場合は、ゲート電位が直接 GND に落ちるため、ゲート電圧が発生せず、正常なアクティブクランプ動作とはなりません。プルダウン抵抗 R1 を設定頂きたいをお願いします。

また、プルダウン抵抗 R2 がない場合は、ドレイン側に電圧が印加された際に、ドレイン-ゲート間のアクティブクランプダイオードを介してゲート電圧がドレイン電圧側に引き上げられます。MOSFET が ON となることで、負荷側に影響を与えるだけでなく、最悪の場合、MOSFET 側に大電流が流れ破壊に至る可能性があるため、プルダウン抵抗 R2 も同様に確実に設定頂くようお願いいたします。

2. ゲート端子側に流れる電流

実際にメカリレーを動作させた際の波形を図7に示します。下記の測定条件では、電源電圧が14Vで、内蔵抵抗が135Ω程度であることからリレー回路には最大で100mA程度の電流が流れます。MOSFETがONからOFFにスイッチングし、MOSFETがアクティブクランプ動作に入っても、メカリレー内のインダクタンスの影響により100mAの電流が流れ続けます。その際、ゲート側にもドレイン-ソース間のダイオードがクランプし、電流が流れ込みますが、ゲートの外付け抵抗により約1m~2mAに抑えられます。残りの電流についてはMOSFETがONすることにより、ドレイン-ソース間を通してGND側に流れていきます。



測定条件

メカリレー： 内蔵抵抗 $R=135\Omega\pm 5\%$ 、 $L=42\text{mH}\pm 10\%$ 、電源電圧：14V、ゲート入力電圧：+0~+5V、周囲温度： $T_a=-40\sim 125^\circ\text{C}$

ドライブ素子製品名：SSM3K337R

図7 メカリレー動作時の波形

3. ジャンクション温度 T_j

アクティブクランプ動作時には、MOSFETのジャンクション温度が上昇します。

周囲温度とチップの上昇温度分を考慮して、マージンをもってジャンクション温度 T_j を最大定格内に抑えることが重要です。以下、概算でのチップ上昇温度を求める計算方法について説明させていただきます。

また、計算に当たっては誘導性負荷のインダクタンス値、内部抵抗値が必要となります。不明な場合は製造メーカーへお問い合わせください。

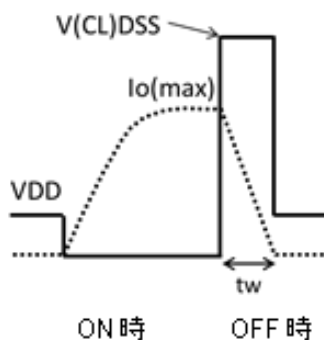


図8 アクティブクランプ動作時の波形イメージ

・導通時(ON 時)の損失

MOSFET のオン抵抗値の温特を考慮したワースト値 $R_{DS(ON)max}$ に、通電電流 $I_{o(max)}$ をかけて算出した損失に、飽和熱抵抗 R_{th} をかけた値で算出します。

$$\Delta T_{ch1} = R_{DS(ON)max} \times I_{o(max)} \times I_{o(max)} \times R_{th} \quad \dots \text{式(1)}$$

(飽和熱抵抗 R_{th} : SOT-23F パッケージ : 125°C/W、UFM パッケージ : 250°C/W)

・アクティブクランプ動作時(OFF 時)の損失

図9にリレーを接続した際の例を示します。リレーのインダクタンス L と MOSFET 側のクランプ電圧により、アクティブクランプ動作時の回路方程式は式(2)で示されます。

$$L di/dt + V_{(CL)DSS} = V_{DD} \quad \dots \text{式(2)}$$

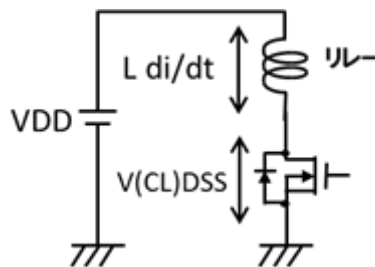


図9 アクティブクランプ動作時の回路イメージ

上記方程式を展開すると以下の式となります。

$$i = V_{DD} - V_{(CL)DSS} / L \times t_w + i(0) \quad \dots \text{式(3)}$$

$i(0)$ はリレーの通電電流 $I_{o(max)}$ 値、アバランシ動作が終わる時間は $i=0$ となることから、式を展開すると以下の式(4)になります。この式よりアクティブクランプ動作時の時間 t_w を算出します。

$$t_w = I_o \times L / \{V_{(CL)DSS} - V_{DD}\} \quad \dots \text{式(4)}$$

クランプ電圧 $V_{(CL)DSS}$ はデータシート上に記載されているクランプ電圧の最大値を簡易的に使用できますが、実際の動作波形を確認ください。

式(4)より求められたアバランシ時間 t_w において、データシートの過渡熱抵抗カーブから過渡熱抵抗値 $R_{th(tw)}$ を読み取り、アバランシ動作時のチップ上昇温度 ΔT_{ch2} を、以下の式(5)から算出します。

$$\Delta T_{ch2} = 0.473 \times V_{(CL)DSS} \times I_o \times R_{th(tw)} \quad \dots \text{式(5)*}$$

* 0.473 の数値の算出方法は以下、補足を確認下さい

・概算チップ上昇温度

以上より、チップ上昇温度は概算で $\Delta T_{ch} = \Delta T_{ch1} + \Delta T_{ch2}$ で示されます。

なお本計算式から算出される値は概算値となります。実際に動作波形を確認頂き、十分なマージンをもった設計をお願い致します。

(補足)

0.473の数値に関して

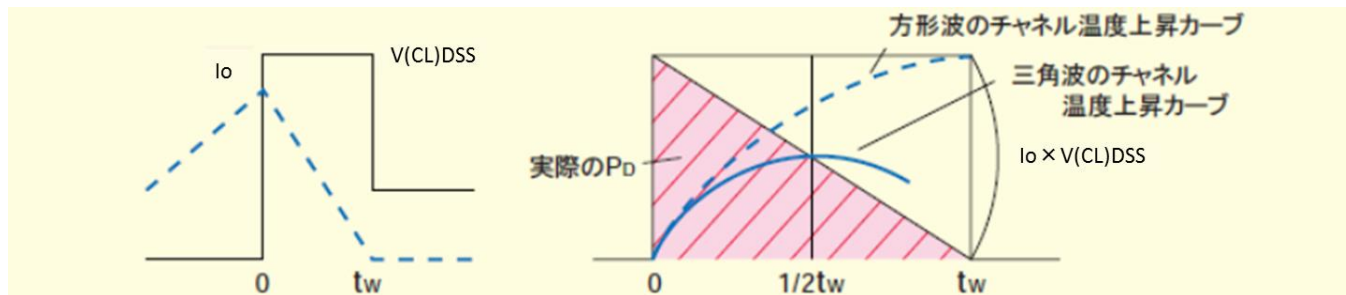


図10 電流・電圧波形

図11 パワー損失 P_D

図10のような電流・電圧波形のパワー損失 P_D は図11の斜線部のような三角波形となります。

このときの温度上昇カーブは図中の実線で示すようになり、温度は $1/2t_w$ で最大となります。

$1/2t_w$ における最大チャンネル温度は、方形波のチャンネル温度に対して、0.669の比率で表せます。

よってチャンネル温度 ΔT_{ch} は式(6)で表せます。

$$\Delta T_{ch} = 0.669 \times V_{(CL)DSS} \times I_o \times R_{th}(1/2t_w) \quad \dots \text{式(6)}$$

$R_{th}(1/2t_w) = 1/\sqrt{2} \times R_{th}(t_w)$ で近似できるので、

$$\Delta T_{ch} = 0.669 \times 1/\sqrt{2} \times V_{(CL)DSS} \times I_o \times R_{th}(t_w)$$

$\Delta T_{ch} = 0.473 \times V_{(CL)DSS} \times I_o \times R_{th}(t_w)$ となり、式(5)が表せます。

製品取り扱い上のお願い

- 本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステム（以下、本製品という）に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、電力機器、金融関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口までお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。