

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

パワーMOSFET

応用上の注意点

株式会社 **東芝** セミコンダクター社

4. 応用上の注意点

4.1 スイッチング時間を短縮するドライブ条件の注意点

飽和領域を保持するのに、バイポーラトランジスタでは大きなベース電流が必要です。しかし、パワーMOSFETは電圧制御素子ですので、ゲートに電圧を印加するだけの小さな電力でドライブができます。

ただし、パワーMOSFETの入力容量 C_{iss} はやや大きいため、特に高速スイッチングの場合、低インピーダンス信号源で入力容量を急速に充電する必要があります。

ターンオン時間を短くするためには低インピーダンスドライブが必要ですが、印加電圧を高くするとゲート・ソース間が過充電されるため、逆に $t_d(off)$ が長くなります。

パワーMOSFETのターンオフはゲート電圧をゼロにすることでできますが、バイポーラトランジスタと同様にゲート・ソース間を逆バイアスすることで（ゲート・ソース間容量あるいはゲート・ドレイン間容量の充電電荷 Q をゲート電流の形で瞬時に引き抜くことで）、パワーMOSFETのターンオフをさらに速くすることができます ($i_g = dQ/dt$)。

逆バイアスの大きさとスイッチング時間の関係を図 4.1に示します。

N チャネル MOSFET の場合、負電源を設けること、すなわち低インピーダンス回路を構成することで、スイッチング時間 t_f と t_{off} を速めることができます。

パワーMOSFET を高速動作させようとするれば、ゲート・ソース間の等価入力容量の充放電を速く行うためのスピードアップ回路を付加する必要があります。

スピードアップ回路例を図 4.2に示します。

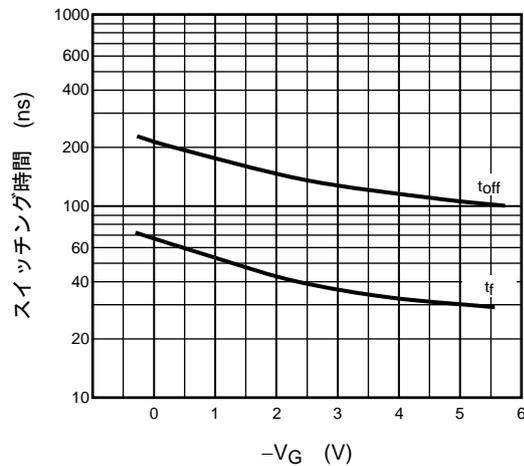
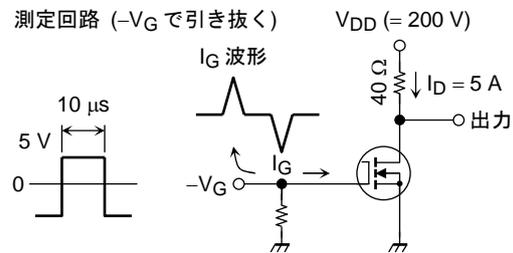


図 4.1 スイッチング時間 - V_G 特性

(a) スピードアップ回路

(b) 立ち上がり時の電流経路

(c) 立ち下がり時の電流経路

C₁、Q₂、D₁、D₂ などで構成されたスピード・アップ回路。

パワーMOSFET をオンさせる
とき、電流を矢印の向きに流
し、入力容量 (C_{in}) を瞬時に充
電する。

パワーMOSFET をオフさせると
き、C₁ に蓄えられた電圧を利用し、
Q₂ をオン状態にしてゲート・ソー
ス間の電荷を急速に引き抜く。

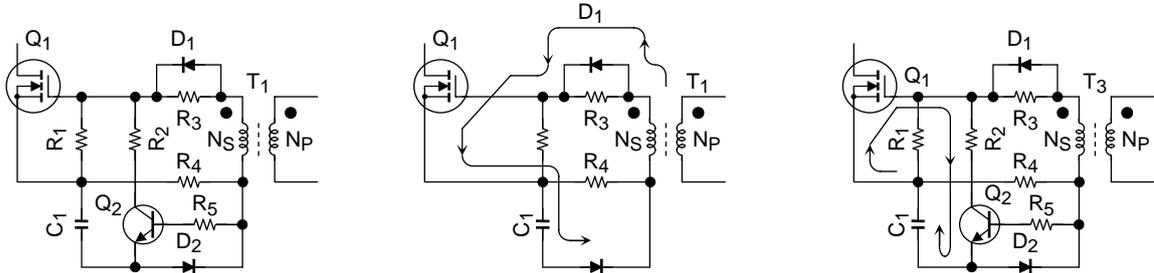


図 4.2 ゲート・ドライブのスピードアップ回路

4.2 配線インダクタンスの影響

パワーMOSFET のスイッチング時間は、バイポーラトランジスタのそれと比べて一桁以上速いため、高速スイッチングの分野で威力を発揮します。しかし、この高速スイッチング特性のために、回路的な工夫がないと、ストレーインダクタンス L_S によるサージ電圧が MOSFET に印加されてしまいます。その大きさ V_{surge} は、

$$V_{surge} = -(L_S + L'_S) \cdot di/dt + V_{DD}$$

となり、この値がドレイン・ソース間降伏電圧 V_{DSS} に対して、十分余裕がとられていることが必要です。また、この低減方法としては、di/dt やストレーインダクタンスを小さくすることですが、di/dt を小さくすることは高速スイッチングの本来の目的に合致しないため、ストレーインダクタンスを低減する必要があります。例えばワイヤの代わりに銅板を用いると、インダクタンスを大幅に低減させることができます。また、発生したサージ電圧を低減させるには、図 4.3 のようにコンデンサを入れると効果があります。

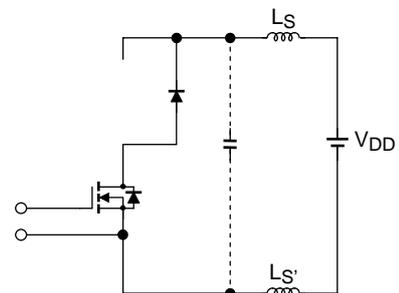


図 4.3 回路のストレーインダクタンス

4.3 寄生発振について

パワーMOSFETは、バイポーラトランジスタに比べて寄生発振を起こしやすい特性を持っています。これはパワーMOSFETの特長である高周波ゲインが高いということに起因しています。寄生発振は、ゲート・ドレイン間の容量 C_{rss} や配線浮遊容量 C_s によって入出力間の結合が強まり、入力からみたインピーダンスが負の抵抗となったときに発生します。これを避ける方法を以下に示します。

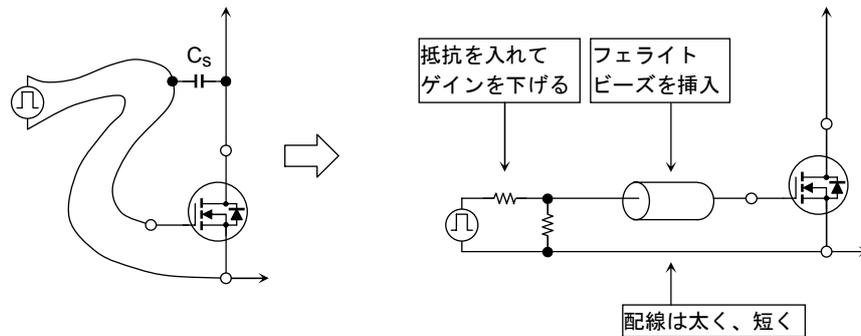


図 4.4 寄生発振を防ぐ方法

- ① 配線を太く、短くする。また、ほかの配線と結合させないために撚り線を使う。
- ② ゲートになるべく近い場所にフェライトビーズを挿入する。
- ③ ゲートに直列抵抗を挿入する。

4.4 ソース・ドレイン間ダイオード耐量について

一般的なモータコントロール回路では、ブリッジ構成でパワーMOSFETが使用され上下のパワーMOSFETが交互にオン/オフを繰り返します。

いま、図 4.5においてパワーMOSFET Q_1 、 Q_4 がオンして、Aのように電流が流れます。次にモータの速度をコントロールするためにFET Q_1 をオフすると、FET Q_2 のフライホイールダイオードを通してBのように電流が還流します。その後、再びFET Q_1 をオンにすると、FET Q_2 のフライホイールダイオードが逆回復するまでの時間 (t_{rr})、短絡電流がFET Q_1 からFET Q_2 に流れて、この損失による発熱が発生します。よって、モータコントロールにパワーMOSFETを使用する場合、内蔵ダイオードには t_{rr} の短いものが要求されます。基本的には、パワーMOSFETの内蔵ダイオードをフライホイールダイオードとして利用することはできますが、使用条件によっては図 4.6に示すように外付けダイオードが必要になります。

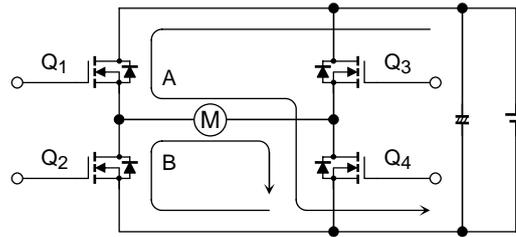


図 4.5 パワーMOSFET を使ったモータ・コントロール回路

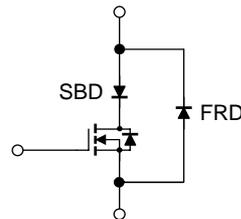


図 4.6 外付けダイオードの接続方法

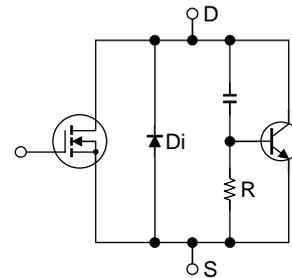
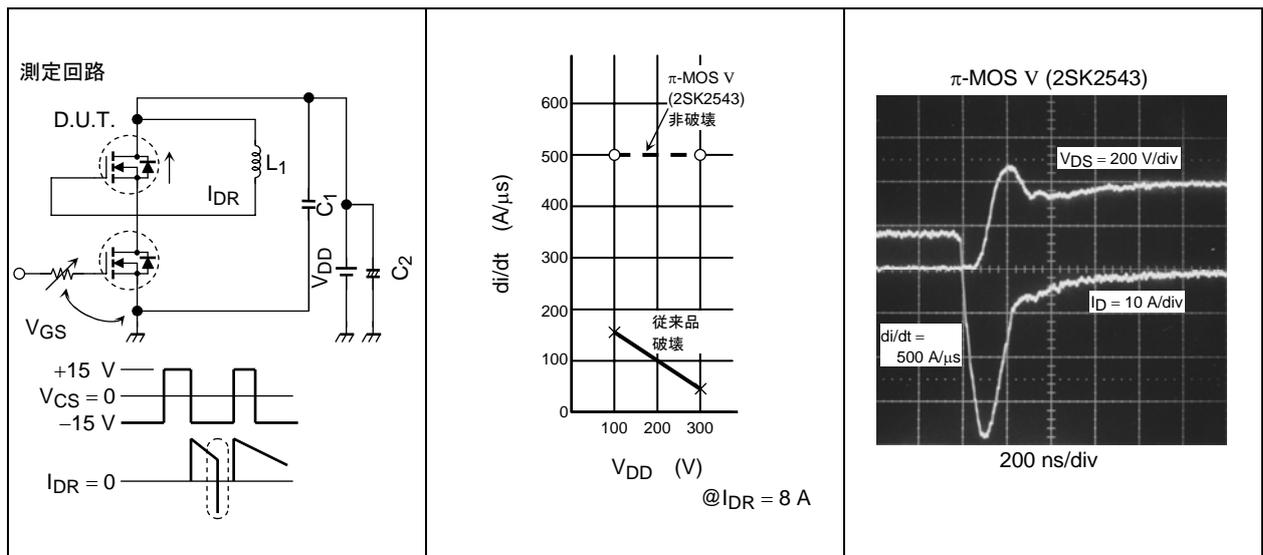


図 4.7 パワーMOSFET の寄生トランジスタ

また、パワーMOSFET のドレイン・ソース間には、寄生のバイポーラトランジスタが等価的に存在します。これを図 4.7に示します。パワーMOSFET がオンからオフへ移行する過渡的狀態で、ベース・エミッタ間抵抗 R の電圧降下によって寄生トランジスタがオンし、パワーMOSFET を破壊させることがあります。注意が必要です。

上記のようにモータ・コントロール回路、電源回路、照明回路などでドレイン・ソース間内蔵ダイオードを使用する場合は、高破壊耐量タイプ 製品 (例: π -MOS V シリーズなど)の使用を推奨します。

内蔵ダイオード耐量



4.5 アバランシェ耐量

パワーMOSFETを高速スイッチング素子として使用する場合、回路自体のインダクタンスおよび浮遊インダクタンスにより、ターンオフ時に高いサージ電圧がドレイン・ソース間に印加され、時にはサージ電圧が素子の最大定格を超える場合があります。

従来はサージ吸収回路を付属させて素子を保護する必要がありましたが、部品点数の削減や機器の小型化からサージ吸収回路を廃止し、最大定格を超える場合でもそのエネルギーをパワーMOSFETで吸収させる要求が強まっています。

この要求にこたえるため、当社では素子の自己ブレイクダウン電圧まで使用できる製品をラインアップしています。

(1) 保証方法

T_{ch} = 保証 T_{chmax} となるアバランシェエネルギー量を個別仕様の最大定格に記載しています。

実使用時には、アバランシェエネルギー量が最大定格以内であることを確認してください。

実際には下記手順で確認してください。

① 最大チャネル温度の算出

アバランシェ状態での素子チャネル温度の上昇値を算出し、定常損失とスイッチング損失を含むトータルの温度上昇値を求め、最大チャネル温度が保証 T_{chmax} 以下であることを確認します。

A: 単発パルス

$$\Delta T_{ch} = 0.473 \cdot V(BR)_{DSS} \cdot I_{AR} \cdot \theta_{ch-a}$$

$V(BR)_{DSS}$: ドレイン・ソース間ブレイクダウン電圧

I_{AR} : アバランシェ電流

θ_{ch-a} : アバランシェ状態の、チャネル・エアー間熱抵抗

B: 連続パルス

$$\Delta T_{chpeak} = P_0 \left[\frac{T_1}{T} \theta_{ch-a} + \left(1 - \frac{T_1}{T} \right) \cdot r_{th}(T+T_1) - r_{th}(T) + r_{th}(T_1) \right]$$

P_0 : 先頭値

T_1 : パルス幅

T : 周期

θ_{ch-a} : チャネル・外気間熱抵抗

注1: 連続パルスの T_{chpeak} 算出の詳細に関しては、この章の「5. 放熱設計と放熱板への取り付け」を参照ください。

② アバランシェエネルギー E_{AS} の算出

実動作でのアバランシェ部分が最大定格のエネルギー以下であることを確認します。

$$E_{AS} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{AR}^2 \cdot \left(\frac{V(BR)_{DSS}}{V(BR)_{DSS} - V_{DD}} \right)$$

E_{AS} : アバランシェエネルギー

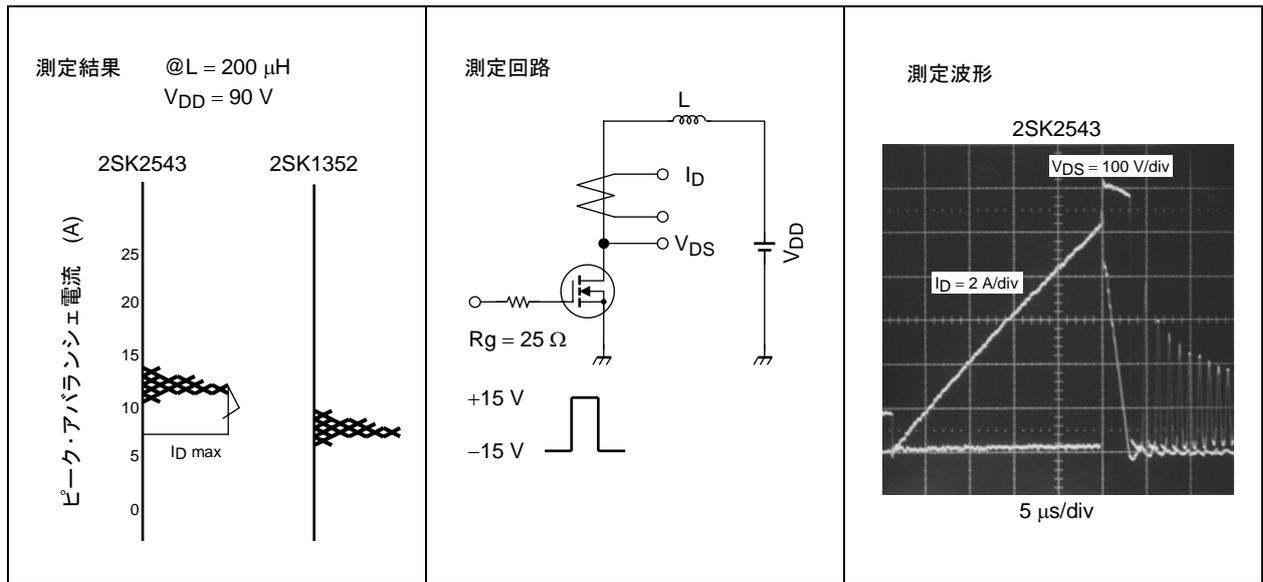
I_{AR} : アバランシェ電流

$V(BR)_{DSS}$: ドレイン・ソース間ブレイクダウン電圧

V_{DD} : 電源電圧

上記①②を満たしていれば、素子が最大定格内であり、使用できるといえます。

アバランシェ耐量



4.6 並列接続

パワーMOSFETは熱暴走などがなくて熱安定性に優れているので、バイポーラトランジスタに比べて並列接続が容易です。

バイポーラトランジスタは、ベース・エミッタ間電圧 V_{BE} のバラツキで電流のバランスが崩れることがあり、並列接続は一般的に難しいと言われています。これに対して電圧駆動であるパワーMOSFETは、並列接続されたFETのおおのにドライブ電圧を与えれば良く、並列接続は比較的安易です。しかし、高速で大電力を制御させる場合には、素子選択や特性バラツキに対する配慮が必要です。並列接続する上で重要なことは、過渡時を含めて電流集中を生じさせないこと、あらゆる負荷条件下でおおのの素子にバランスよく均一な電流を流すことです。

一般に、電流のアンバランスはスイッチングのオンとオフの過渡時に大きく現われます。これはパワーMOSFETのスイッチング時間の差に起因します。このスイッチング時間のバラツキは、ゲート・ソース間のしきい値電圧 V_{th} に大きく依存します。すなわち、 V_{th} が小さい程早くオンし、大きい程遅くオンします。また、逆にオフ時は V_{th} の大きいもの程早くカットオフし、小さいもの程カットオフするのが遅くなります。このことから、オン時、オフ時ともに V_{th} の小さなFETに電流が集中して電流のアンバランスが発生します。この電流のアンバランスは、素子に過大な損失を与えて破壊を招くことがあります。よって、過渡時のスイッチング時間のバラツキを考える場合、並列接続しようとするパワーMOSFETの V_{th} は、すべてそろっていることが望ましいことになります。

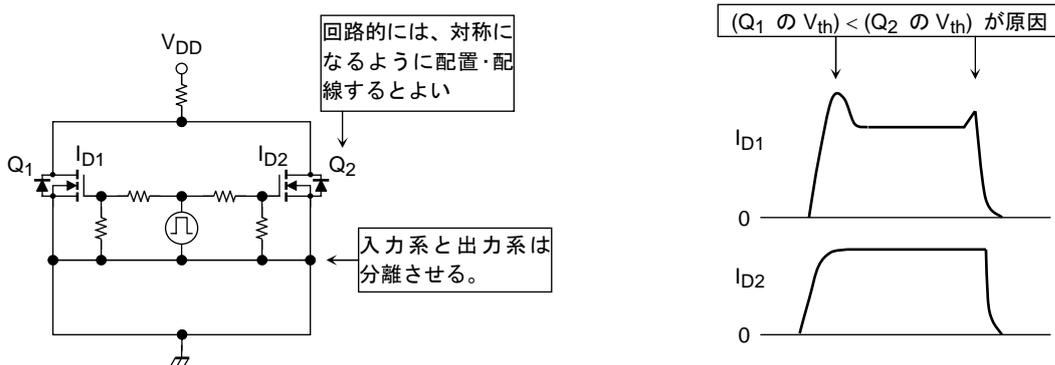


図 4.8 並列接続時の電流のアンバランス

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、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。当社は、適用可否に対する責任は負いません。
- 本製品は、一般的電子機器（コンピュータ、パーソナル機器、事務機器、計測機器、産業用ロボット、家電機器など）または本資料に個別に記載されている用途に使用されることが意図されています。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。本資料に個別に記載されている場合を除き、本製品を特定用途に使用しないでください。
- 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。）をせず、また当社は、本製品および技術情報に関する一切の損害（間接損害、結果的損害、特別損害、付随的損害、逸失利益、機会損失、休業損、データ喪失等を含むがこれに限らない。）につき一切の責任を負いません。
- 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。
- 本製品には、外国為替及び外国貿易法により、輸出または海外への提供が規制されているものがあります。
- 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弊社営業窓口までお問合せください。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。