

MOSFET シリーズ

MOSFET の破壊メカニズムについて

MOSFET などのスイッチング素子は、様々な要因によって破壊が発生する可能性があります。したがって、製品の定格や動作条件を正しく理解するのはもちろん、回路動作における様々な破壊要因について十分検討することが重要です。本アプリケーションノートでは、代表的な MOSFET の破壊メカニズムについて解説します。

SOA(Safety Operation Area)破壊

SOAとは Safety Operation Area の略で、安全動作領域を意味しています。MOSFET を安全に使用するには、この SOA 範囲内で使用する必要があります。この範囲を超えると破壊に至る可能性があります。この SOA の範囲外で動作させた場合の破壊を SOA 破壊と呼んでいます。例として、弊社 SJ-MOS(Super Junction MOSFET) R6024KNX の SOA を図 1 に示します。

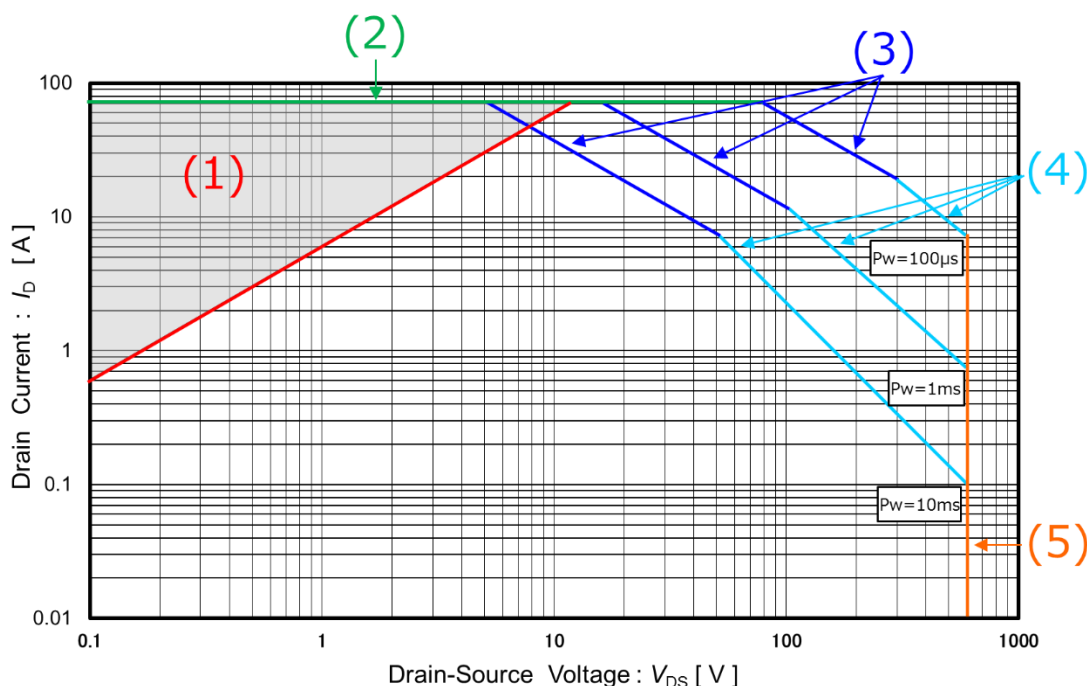


図 1. R6024KNX の SOA

図 1 から分かるように SOA は縦軸がド레인電流 I_D 、横軸がド레인・ソース間電圧 V_{DS} で表されます。つまり、 V_{DS} 、 I_D およびそれらの積である電力損失 P_D 、そして二次降伏領域によって決まります。また、電力印加パルス幅 P_W も SOA を決定する重要な要素です。一般的に SOA は、図 1 の(1)~(5)の領域に分類されます。

■領域(1)：MOSFET のオン抵抗 $R_{DS(ON)}$ によってド레인電流 I_D が制限される領域

印加電圧 V_{DS} が絶対最大定格未満でも、 $R_{DS(ON)}$ によって I_D が制限される領域です。オームの法則 $I = V/R$ より、 I_D は赤色の線までしか流すことができません。図 1 の領域(1)は $V_{GS} = 10V$ 時の例です。

■領域(2)：パルス印加におけるドレイン電流の絶対最大定格 I_{DP} によって決定される領域

(2) の緑色の線は、仕様書に定められている絶対最大定格 I_{DP} の値です。当然、絶対最大定格は超えてはいけない値なので、この値を超えた I_{DP} では使用できません。この値を超えた領域（電流値）で使用すると、動作保証範囲外ですので破壊の恐れがあります。

■領域(3)：熱制限領域

MOSFET の許容損失 P_D によって決定される領域です。電力印加パルス幅 P_W と過渡熱抵抗により制限されます。この範囲内であれば、一般的に T_j は絶対最大定格 T_{jMAX} を超えないので安全に使用することができます。ただし、このラインは、周囲温度や MOSFET の実装条件、放熱条件などによって変動しますので注意が必要です。また、MOSFET をスイッチング動作する際は瞬間的に高電圧、大電流が印加されることがあるので、スイッチングの過渡状態においても領域(3)の制限を超えないように注意が必要です。

■領域(4)：二次降伏領域

高電圧印加状態で電流を流すと、素子内で局所的に大電流が流れて破壊することがあり、これを二次降伏と言います。このラインは、二次降伏状態に陥らないための制限ラインになります。二次降伏領域も、領域(3)の熱制限領域と同様に、周囲温度や実装条件、放熱条件などの影響を受けます。

■領域(5)：MOSFET のドレイン-ソース間電圧の絶対最大定格 V_{DSS} によって決定される領域

仕様書に定められている V_{DSS} による制限領域で、これを超えるとブレイクダウンが発生し破壊の原因になります。フライバック電圧や寄生インダクタンスによる起電によって、瞬間的にこの制限を超える可能性がありますので注意が必要です。

アバランシェ破壊

MOSFET に絶対最大定格 V_{DSS} 以上の電圧が印加されるとブレイクダウンが起こります。 V_{DSS} 以上の高電界が印加されると自由電子が加速され、大きなエネルギーを持ちます。これによりインパクトイオン化が発生し、電子-正孔対を生成します。この電子-正孔対がなだれ的に増大する現象をアバランシェ降伏と言います。このアバランシェ降伏時に MOSFET の内部ダイオードに対して逆方向に流れる電流をアバランシェ電流 I_{AS} といいます。

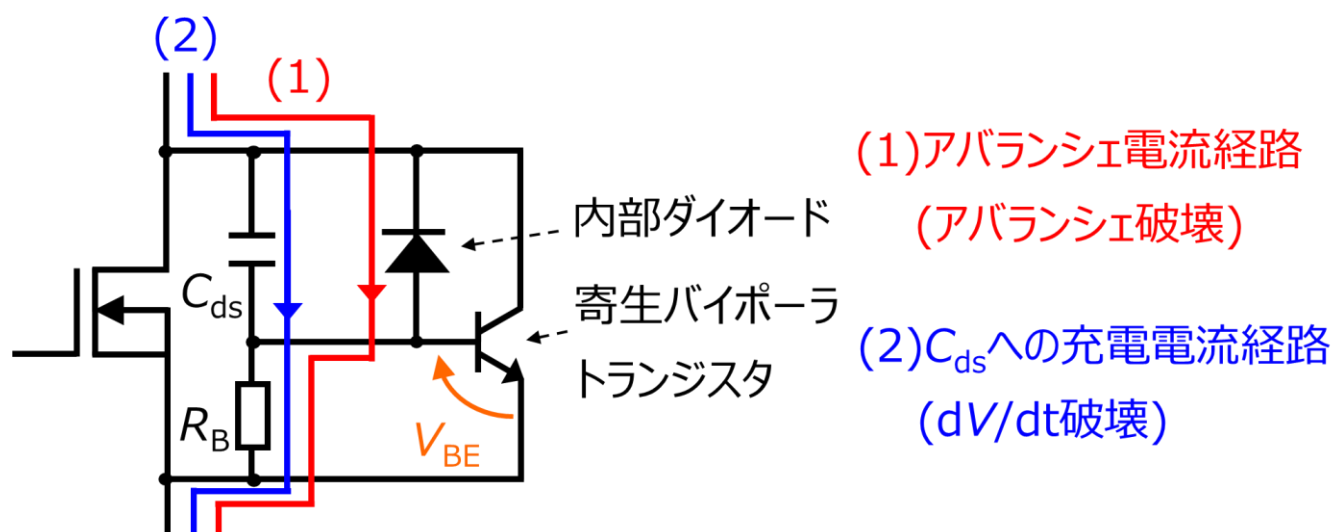


図 2. アバランシェ破壊と dv/dt 破壊の電流経路

図2の電流経路(1)に示すように I_{AS} は MOSFET の寄生ベース抵抗 R_B に流れます。このとき寄生バイポーラトランジスタのベース-エミッタ間に電位差 V_{BE} が生じ、この電位差が大きいと寄生バイポーラトランジスタが ON 状態になる可能性があります。この寄生バイポーラトランジスタが ON すると大電流が流れ、MOSFET がショート破壊する恐れがあります。

また、アバランシェ降伏時はアバランシェ電流による寄生バイポーラトランジスタの誤 ON によるショート破壊だけでなく、導通損失により熱的に破壊する可能性があります。前述のように、MOSFET がブレイクダウン状態になるとアバランシェ電流が流れます。この状態は、MOSFET に V_{DSS} が印加されており、さらにアバランシェ電流が流れることにより、それらの積が大きな電力損失となります。この電力損失をアバランシェエネルギー E_{AS} といいます。アバランシェ試験回路とその試験結果の波形を以下の図に示します。また、アバランシェエネルギーは式 (1) で表すことができます。

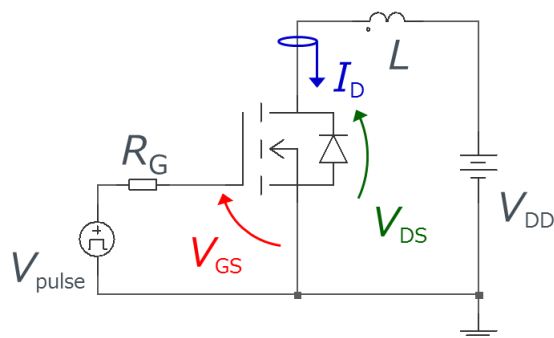


図 3. アバランシェ試験の簡略回路図

V_{DD} : 電源電圧
 L : インダクタンス
 R_G : ゲート抵抗
 V_{pulse} : ゲート入力電圧

V_{GS} : ゲート電圧
 V_{DS} : ドレイン電圧
 I_D : ドレイン電流

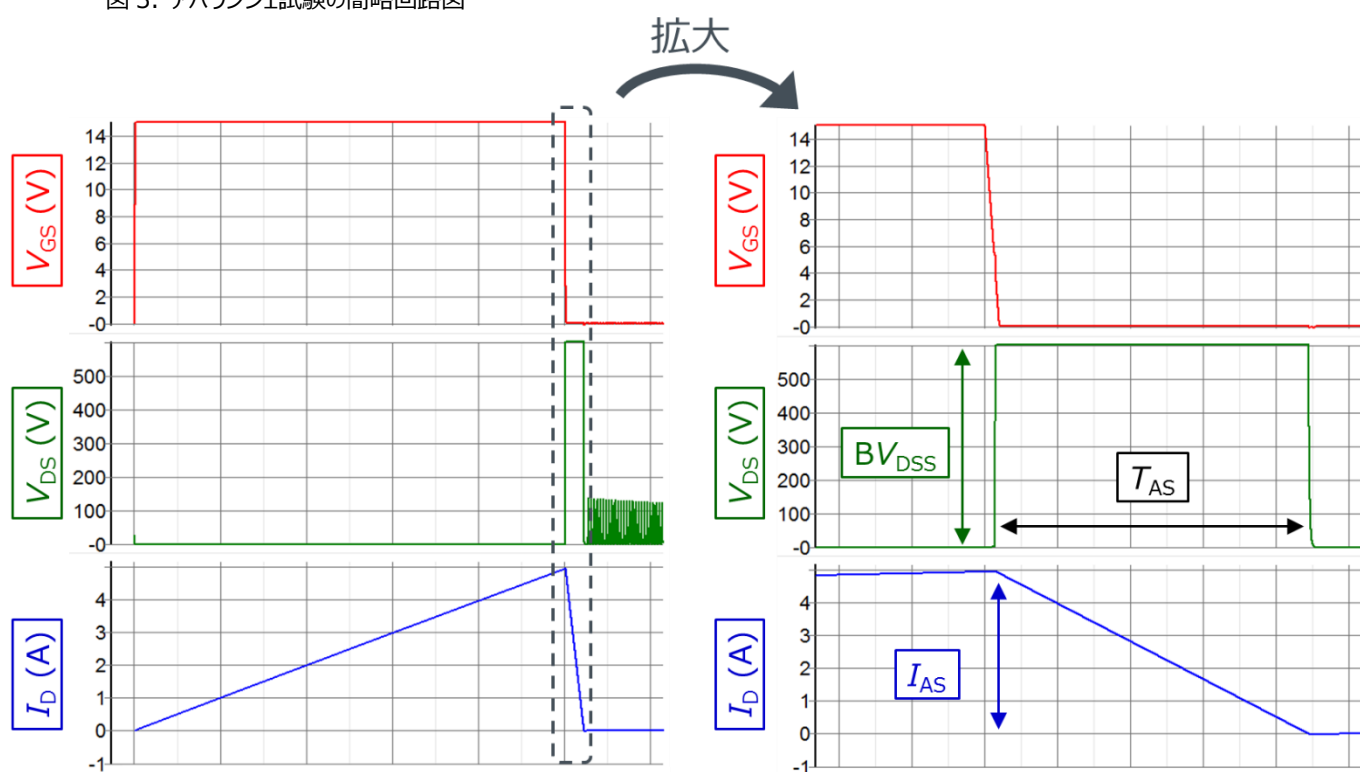


図 4. アバランシェ試験での MOSFET の電圧、電流波形

$$E_{AS} = P_{AS} \times T_{AS} = \frac{1}{2} BV_{DSS} \times I_{AS} \times T_{AS} = \frac{1}{2} L \times I_{AS}^2 \times \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}} \dots \dots \dots (1)$$

(E_{AS} : アバランシェエネルギー、 BV_{DSS} : MOSFET のブレイクダウン電圧、 I_{AS} : アバランシェ電流、 T_{AS} : アバランシェ時間)

一般的にアバランシェ保証されている MOSFET は、仕様書において I_{AS} や E_{AS} の絶対最大定格が規定されていますので、詳しい値はそちらをご参照下さい。アバランシェ電流が流れる動作環境では、 I_{AS} 、 E_{AS} の実際の値を把握し、絶対最大定格の範囲内で使用する必要があります。

アバランシェ降伏が起こる例として、フライバックコンバータにおける MOSFET ターン OFF 時のフライバック電圧や、寄生インダクタンスによるサージ電圧などが挙げられます。フライバック電圧によるアバランシェ降伏の対策としては、フライバック電圧を下げるよう回路設計をする、もしくはより高耐圧の MOSFET を用いるなどが挙げられます。寄生インダクタンスによるアバランシェ降伏の場合は、端子がより短いパッケージの MOSFET に変更したり、基板レイアウトを改善して寄生インダクタンスを減らすなどの対策が有効です。

dV/dt 破壊

dV/dt 破壊は図 2 の電流経路(2)に示すように、MOSFET のターン OFF 時に寄生容量 C_{ds} に過渡的に流れる充電電流が、ベース抵抗 R_B を流れることにより、寄生バイポーラトランジスタのベース-エミッタ間に電位差 V_{BE} を発生させ、寄生バイポーラトランジスタが ON 状態になりショート破壊を引き起こす現象です。一般的に dV/dt が大きいほど（急峻なほど） V_{BE} の電位差が大きくなり、寄生バイポーラトランジスタが ON しやすくなるため破壊しやすくなります。

また、インバータ回路や Totem-Pole PFC など上下ブリッジ構成の回路においては、MOSFET に逆回復電流 I_{rr} が流れます。この逆回復電流による dV/dt により、寄生バイポーラトランジスタが誤 ON する危険性がありますので、この点にも注意が必要です。dV/dt 破壊と逆回復特性の関係は、ダブルパルス試験で確認することができます。以下にダブルパルス試験の概略回路図を示します。ダブルパルス試験の詳しい動作については参考文献[1]をご確認ください。

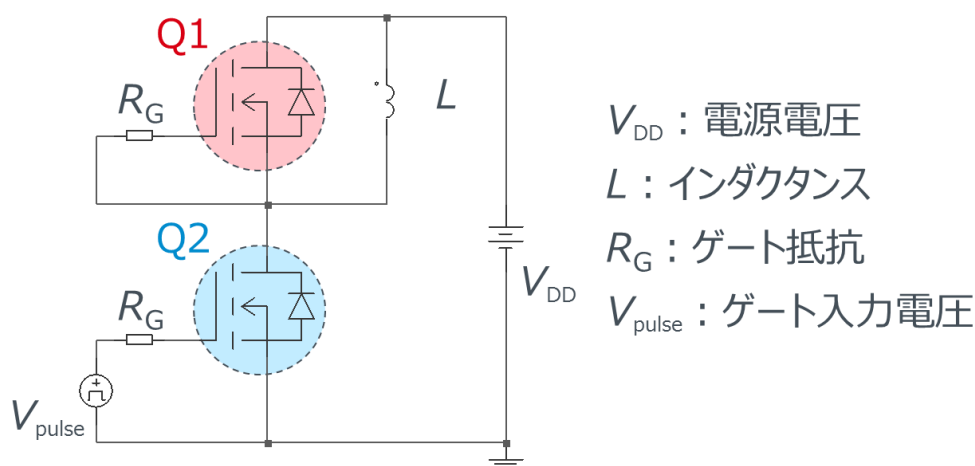


図 5. ダブルパルス試験の概略回路図

図 6 に、dV/dt と逆回復電流のシミュレーション結果を示します。ゲート抵抗 R_G や電源電圧 V_{DD} などの回路条件は同じで、逆回復特性のみが異なる MOSFET ①～③を想定しています。Q1 が還流動作から逆回復動作に移行する際の、ドレイン-ソース間電圧 V_{DS} とドレイン電流（内部ダイオード電流） I_D を示しています。

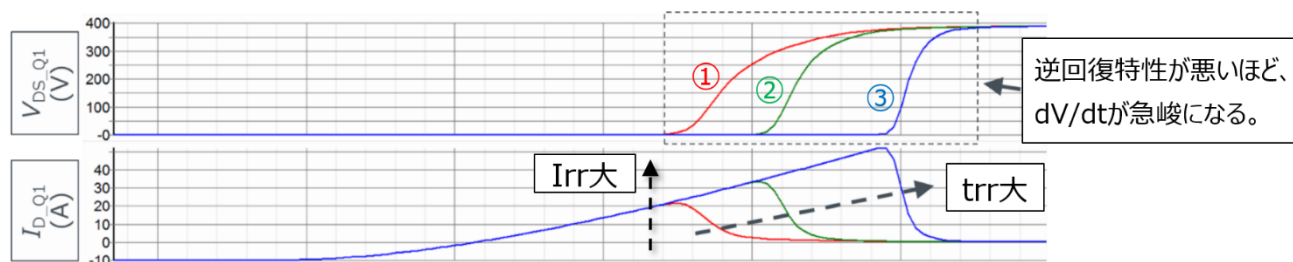


図 6. ダブルパルス試験のシミュレーション結果

一般的に MOSFET ③は、①と比較した場合「逆回復特性が悪い（ I_{rr} , trr が大きい）」製品と言えます。このシミュレーション結果から、逆回復特性が悪いほど dV/dt が急峻になることが分かります。このことは、一般的にコンデンサに流れる過渡電流が $I = C \times dV/dt$ で表されることがからも理解できます。また、上記のシミュレーションでは I_{rr} の傾き（ di/dt ）は全て同じ条件に揃えましたが、 di/dt が急峻な場合も同様に dV/dt は急峻になります。

以上より、ブリッジ回路などに使用する際、一般的に逆回復特性が悪い MOSFET ほど dV/dt 破壊の危険性が大きいと言えます。

まとめ

- ・MOSFET を使用する際は、SOA 範囲内であることをご確認の上ご使用下さい。
- ・アバランシェ降伏時は、アバランシェ電流による寄生バイポーラトランジスタの誤 ON によるショート破壊と、アバランシェエネルギーによる素子の熱的な破壊が起こる可能性があります。
- ・ dV/dt 破壊は、MOSFET のターン OFF 時に寄生容量 C_{ds} に流れる充電電流により、寄生バイポーラトランジスタが誤 ON することで発生する可能性があります。また、インバータ回路や Totem-Pole PFC など逆回復電流 I_{rr} が発生する回路では、MOSFET の逆回復特性が悪いと dV/dt 破壊が発生し易くなります。

参考文献

[1]ダブルパルス試験を用いた PrestoMOS™ のデバイス特性の優位性実証, アプリケーションノート(No.60AN116J), ローム株式会社.

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。
したがって、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いません。
- 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。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でご使用ください。
お客様に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/>