



## 第4章 エネルギー耐量オーバーや寄生発振、 静電による破壊から守るために

### パワーMOSFETのトラブル対策

高川 恭一  
Kyoichi Takagawa

パワーMOSFETは、パワー回路の最終出力段に使用されることが多く、かついろいろな動作条件や環境条件で扱われるため、しばしば思わぬところで素子が破壊し、問題に直面する場合があります。

ここでは、パワーMOSFETを上手に使いこなすために、基本的な破壊メカニズムの知識を身につけ、発熱や破壊などのトラブルをできる限り避けることを目的とします。

#### パワーMOSFETの破壊モード

表4-1にパワーMOSFETが使用されている主な応用分野とそれらの用途で予想される破壊モードの関連性を示します。

パワーMOSFETの破壊モードは、大きく分けて五つのモードに分けることができます。

#### ● アバランシェ破壊(過電圧)モード

素子の最大定格  $V_{DSS}$  を越えるサージ電圧が、ドレイン-ソース間に加えられ、さらに降伏電圧  $V_{(BR)DSS}$  領域まで達し、ある一定のエネルギー(温度、電流、 $dv/dt$ )以上の条件に達することで破壊する現象です。

#### ● ASO(Area of Safe Operation)破壊

素子の最大定格であるドレイン電流  $I_d$ 、ドレイン-ソース間電圧  $V_{DSS}$ 、許容チャネル損失  $P_{ch}$  を越え、過電流、過電圧、そして過電力により安全動作領域をオーバーし熱的な要因で破壊する現象をいいます。

発熱の要因となる特性や動作としては、以下に示す連続的なものと過渡的なものとに分けられます。

##### ▶ 連続的なもの

- (1) 活性領域(アナログ動作)での直流電力、またはある一定のデューティで、連続したパルス電力が加えられることによる発熱
- (2) ON抵抗  $R_{DS(on)}$  による損失(特に温度上昇により、その損失が許容放熱電力容量を越えた場合)
- (3) ドレイン-ソース間のリーク電流  $I_{DSS}$  による損失

(特に自立放熱フィンなしの実装条件で、高温動作で使用する場合。ただし、一般的にはほかの損失に比べると非常に小さい)

##### ▶ 過渡的なもの

- (1) パルスのな過電力(ワンショット・パルス ASO 破壊)  
→温度依存性あり
- (2) 負荷短絡による過電力(負荷短絡 ASO 破壊)  
→温度依存性あり
- (3) スwitching損失(ターンON, ターンOFF時)  
→動作周波数に依存
- (4) 内蔵ダイオードの逆回復時間  $t_{rr}$  による損失  
→温度と動作周波数に依存(フル・ブリッジ, 三相ブリッジ回路における上/下素子のアーム短絡損失)

#### ● 内蔵ダイオード破壊

内蔵ダイオードの電圧が逆回復時に、パワーMOSFETの寄生バイポーラ・トランジスタを動作させ、破壊してしまう現象です。詳細は後述します。

#### ● 寄生発振による破壊

主に回路の寄生インダクタンス(ゲート、ソース、負荷ドレインと各回路との接続間のインダクタンスにより発生するもの)により発振した振動電圧が、正帰還やゲート・オーバーシュート電圧などを引き起こし、破壊する現象です。詳細は後述します。

#### ● 静電破壊(ゲート・サージなどによる過電圧)

パワーMOSFETのゲート-ソース間に外部回路からサージ電圧などの過電圧が加えられ破壊するゲート過電圧破壊と、取り扱い時(人体や実装工程、測定装置からの帯電物からの)静電気によるゲート破壊ESD(Electro Static Discharge)があります。ゲート破壊品は、破壊後の特性によっては動作してしまうという問題があります。詳細は後述します。

実際にパワーMOSFETを使用する場合は、以上の破壊のトリガとなる要因が複数絡んできます。したが

表4-1 応用分野と破壊モードの関連性(◎：重要項目、回路定数などの設計および性能・破壊特性を念頭に素子を選定、○：要注意項目)

応用分野 アプリケーション		スイッチング電源				DC-DC コンバータ	
		AC-DCコンバータ					
		1石フォワード	共振方式	フル・ブリッジ 回路	大出力パラレル接続		
破壊モード							
アバランシェ破壊		◎	◎	◎	◎	◎	
ASO 破壊	順バイアス ASO	—	—	—	—	—	
	負荷短絡 ASO (上下アーム短絡含む)	—	○	○	—	—	
	発熱の 要因	$R_{DS(on)}$	○	◎	◎	◎	◎
		スイッチング	◎	◎	○	○	◎
	内蔵ダイオード $t_{rr}$	—	◎	○	—	—	
内蔵ダイオード破壊		—	○	◎	—	—	
並列接続動作時の寄生発振による 破壊		—	—	○	◎	○	
ゲート・サージ、静電破壊		取り扱い(実装置からの帯電など含む)静電気、回路への外部サージに注意					

(a) 民生・産業用

応用分野 アプリケーション		エンジン制御ECU			安全制御装置			
		ソレノイド・バルブ			小型センサ	インフレータ 点火	電源	ABSソレノ イド
		ハイ・サイド	ロー・サイド	小型モータ				
破壊モード								
アバランシェ破壊		○	◎	—	—	○	◎	
ASO 破壊	順バイアス ASO	○	○	—	◎	○	—	
	負荷短絡	—	—	◎	—	—	—	
	発熱の 要因	$R_{DS(on)}$	—	—	—	○	—	—
		スイッチング	—	—	—	—	○	—
	内蔵ダイオード $t_{rr}$	—	—	○	—	—	—	
内蔵ダイオード破壊		—	—	○	—	—	—	
並列接続動作時の寄生発振による 破壊		○	—	—	—	—	—	
ゲート・サージ、静電破壊		取り扱い(実装置からの帯電など含む)静電気、回路への外部サージに注意						

(b) 自動車用

って、どんな用途でどのような動作になる場合にこれらの破壊モードに対して事前に注意を払うべきか、す

なわち最適な素子を選定し、回路定数や実装時にどんな注意をするかが、回路設計段階で重要になります。

## アバランシェ破壊とその対策

アバランシェ破壊とは、誘導負荷におけるスイッチング動作のターンOFF時に発生するフライバック電圧や、ドレイン負荷の寄生インダクタンスによるスパイク電圧が、パワーMOSFETのドレイン・ソース定格電圧を越え、ブレイクダウン領域に入り破壊する現象です。

### アバランシェ破壊耐量の測定回路と波形

図4-1に、アバランシェ破壊耐量の測定回路とその動作波形、アバランシェ・エネルギーの計算式を示します。

図で示す電圧波形の期間  $t_a$  をアバランシェ期間と定義しています。例えば、サージ電圧が発生し、そのピーク電圧  $V_{ds(peak)}$  が、

$V_{DSS}$  (最大定格)  $< V_{ds(peak)} < V_{(BR)DSS}$  の範囲では、いわゆる定格電圧オーバーであってもアバランシェ降伏には至ってない領域にあります。

このような動作領域では、実際には素子の実力耐圧  $V_{(BR)DSS}$  により、アバランシェ領域に入るものとそうでないものがありえることとなりますが、素子の選定では、アバランシェ耐量保証品の使用を推奨します。

アバランシェ耐量保証品は、アバランシェ電流定格  $I_{AP}$ 、アバランシェ・エネルギー値  $E_{AR}$  を規定します。 $E_{AR}$  は、以下の式で表されます。

$$E_{AR} = P_{dt} = \frac{1}{2} V_{(BR)DSS} I_{AP} t_a$$

$$= \frac{1}{2} L I_{AP}^2 \left( \frac{V_{(BR)DSS}}{V_{(BR)DSS} - V_{DD}} \right) \quad [J]$$