

## パワーMOSFET の アバランシェエネルギー ( $E_{AS}$ )計算

### 概要

MOSFET に耐圧以上の電圧が発生すると、ブレイクダウン状態となり電流が流れます。これをアバランシェブレイクダウンと呼び、その時に流れる電流をアバランシェ電流、MOSFET に加わるエネルギーをアバランシェエネルギーと呼びます。

本資料では、データシートの値またはグラフを使用して、アバランシェ電流に応じたアバランシェエネルギーを計算する方法を示しています。回路のインダクタンスに蓄積されたエネルギーにより、デバイスはブレイクダウン状態となりデバイスの温度が上昇します。アバランシェ電流(単発) $I_{AS}$ は、ブレイクダウン時に許容される単発の最大電流です。アバランシェエネルギー(単発) $E_{AS}$ は、アバランシェ電流(単発) $I_{AS}$ が流れる場合に許容される最大エネルギーを示します。即ち、アバランシェエネルギーは、アバランシェ電流に依存した計算値です。

尚、本資料に掲載している内容は代表的な製品での考え方であり、製品によっては適用できない場合があります。使用可否については、お問い合わせください。

## 目次

概要 .....	1
目次 .....	2
1. データシート上の保証値について.....	3
1.1. アバランシェ電流(単発) $I_{AS}$ .....	3
1.2. アバランシェエネルギー(単発) $E_{AS}$ .....	3
2. 電流に応じたアバランシェエネルギーを計算する方法 .....	3
3. 計算例 .....	6
製品取り扱い上のお願い.....	7

## 1. データシート上の保証値について

図 1.1 は、代表製品におけるデータシートのアバランシェ最大定格を示しています。アバランシェモードを考えるための重要なパラメーターである、最大チャネル温度、単発のアバランシェ条件下でのアバランシェエネルギー、およびアバランシェ電流の最大定格が定義されています。

項目		記号	定格	単位
アバランシェエネルギー (単発)	(注4)	E <sub>AS</sub>	14	mJ
アバランシェ電流 (単発)	(注4)	I <sub>AS</sub>	92	A
チャネル温度		T <sub>ch</sub>	175	°C

注4: アバランシェエネルギー (単発) 印加条件  
V<sub>DD</sub> = 32 V, T<sub>ch</sub> = 25 °C (初期), L = 1.3 μH, I<sub>AS</sub> = 92 A

図 1.1 TPH3R704PL のアバランシェ最大定格及び印加条件

### 1.1. アバランシェ電流(単発) I<sub>AS</sub>

アバランシェ電流(単発)I<sub>AS</sub>は、ブレイクダウン状態で許容しうる最大の電流を示しており、それを超えると、チャネル温度またはエネルギーに関係なくデバイスが破損する可能性があります。

### 1.2. アバランシェエネルギー(単発) E<sub>AS</sub>

データシートに表示されているアバランシェエネルギー(単発)E<sub>AS</sub>は、定義されたアバランシェ電流(単発)I<sub>AS</sub>とチャネル温度から計算される最大保証値になります。そのため、I<sub>AS</sub>の条件が変われば、E<sub>AS</sub>も変化します。

アバランシェエネルギーは、下記式より計算されます。

$$E_{AS} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{AS}^2 \cdot \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}} \quad \text{-- 式 1-1}$$

BV<sub>DSS</sub> : ブレイクダウン電圧

I<sub>AS</sub> : アバランシェ電流(単発)

これは、データシートで定義された条件下のアバランシェエネルギーであり、実際の応用における条件とは異なります。式の中で、BV<sub>DSS</sub>は波形から観測したり、V<sub>DSS</sub>から推定したりできますが、回路インダクタンス“L”（データシートの例（図 1.1）では 1.3μH を示しています）の測定は容易ではありません。E<sub>AS</sub>と I<sub>AS</sub>の関係をより分かりやすくするためには、式から不明なパラメーターを削除する必要があります。

## 2. 電流に応じたアバランシェエネルギーを計算する方法

チャネル温度は下記式にて定義されます。:

$$T_{ch(Avalanche)} = 0.473 \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AS} \cdot r_{th(ch-a)} \cdot t_w + T_a \quad \text{-- 式 2-1}$$

0.473 : 損失への実効係数

T<sub>ch(Avalanche)</sub> : アバランシェ期間における最大チャネル温度

r<sub>th(ch-a)\_tw</sub> : アバランシェ期間の過渡熱抵抗

t<sub>w</sub> : アバランシェ期間

T<sub>a</sub> : 外気温度 (初期温度)

アバランシェに入っている期間、チャネル温度は最大定格以下に抑える必要があります。よって、まずは最大チャネル温度とアバランシェ電流との関係性を表します。T<sub>ch(Avalanche)</sub> = T<sub>ch(Max)</sub> と仮定すると、式 2-1 は次のように表すことができます。

$$T_{ch(Max)} = 0.473 \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AS} \cdot r_{th(ch-a)_tw} + T_a \quad \text{式 2-2}$$

アバランシェ期間の熱抵抗 r<sub>th(ch-a)\_tw</sub> は、式 2-2 を変形して以下の様に表せます。

$$r_{th(ch-a)_tw} = \frac{T_{ch(Max)} - T_a}{0.473 \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AS}} \quad \text{式 2-3}$$

次に、アバランシェ期間 t<sub>w</sub> について考えます。通常、アバランシェ期間の長さ t<sub>w</sub> は、V=L dI/dt<sub>w</sub> の様にパラメーター“L”を用いて計算されます。このパラメーターは未知であるため、時間に依存性のあるもう一つのパラメーター、熱抵抗から計算する事で消去していきます。

アバランシェ期間の熱抵抗 r<sub>th(ch-a)\_tw</sub> は、期間の長さに関連するパラメーターの 1 つです。ほとんどの場合、アバランシェ期間 t<sub>w</sub> は 1ms より短いです。このような短い時間であれば MOSFET のチップ内から発熱は広がらないため、熱抵抗は次のように近似できます。

$$r_{th(ch-a)_tw} \approx r_{th(ch-a)_1ms} \sqrt{\frac{t_w}{t_{1ms}(=0.001s)}}$$

$$t_w = 0.001 \cdot \left( \frac{r_{th(ch-a)_tw}}{r_{th(ch-a)_1ms}} \right)^2 \quad \text{式 2-4}$$

式 2-4 に式 2-3 を代入すると:

$$t_w = 0.001 \cdot \left( \frac{T_{ch(Max)} - T_a}{0.473 \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AS} \cdot r_{th(ch-a)_1ms}} \right)^2 = 0.00447 \cdot \left( \frac{T_{ch(Max)} - T_a}{BV_{DSS} \cdot I_{AS} \cdot r_{th(ch-a)_1ms}} \right)^2 \quad \text{式 2-5}$$

この様に、アバランシェ期間 t<sub>w</sub> は測定値及びデータシートの値から算出する事が出来ます。

次のステップでは、未知のパラメーター“L”を別の測定値及びデータシートの値で置き換えます。図 2.1 に、アバランシェ測定回路を示します。この回路条件下では、アバランシェ波形は図 2.2 のような形になり、アバランシェ期間 t<sub>w</sub> は式 2-6 でも表現できます。

$$t_w = L \frac{I_{AS}}{BV_{DSS} - V_{DD}} \quad \text{-- 式 2-6}$$

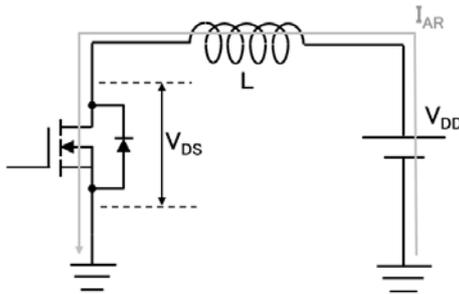


図 2.1 アバランシェ測定回路

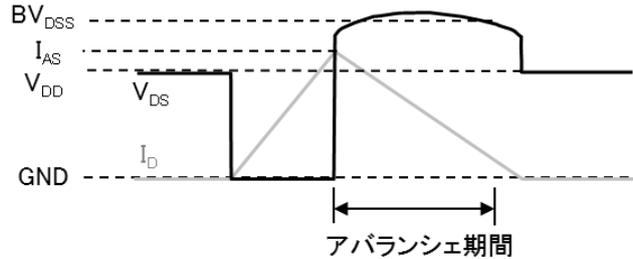


図 2.2 アバランシェ波形

式 2-6 より、未知のパラメーター“L”は下記の様に表せます。

$$L = t_w \frac{BV_{DSS} - V_{DD}}{I_{AS}} \quad \text{-- 式 2-7}$$

この式 2-7 を式 1-1 に代入する事で、“L”を消去します。

$$\begin{aligned} E_{AS} &= \frac{1}{2} \cdot t_w \cdot \frac{BV_{DSS} - V_{DD}}{I_{AS}} \cdot I_{AS}^2 \cdot \frac{BV_{DSS}}{BV_{DSS} - V_{DD}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot t_w \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AS} \quad \text{-- 式 2-8} \end{aligned}$$

最後に式 2-5 を式 2-8 代入する事で“t<sub>w</sub>”が消去されます。

$$\begin{aligned} E_{AS} &= \frac{1}{2} \cdot 0.00447 \cdot \left( \frac{T_{ch(Max)} - T_a}{BV_{DSS} \cdot I_{AS} \cdot r_{th(ch-a)_{1ms}}} \right)^2 \cdot BV_{DSS} \cdot I_{AS} \\ &= \frac{1}{I_{AS}} \cdot \frac{0.00224}{BV_{DSS}} \cdot \left( \frac{T_{ch(Max)} - T_a}{r_{th(ch-a)_{1ms}}} \right)^2 \quad \text{-- 式 2-9} \end{aligned}$$

定数

短時間(1ms 以下)の条件下では、I<sub>AS</sub> と E<sub>AS</sub> の間に反比例の関係があります。アバランシェ電流(単発)I<sub>AS</sub> が最大定格未満の場合、チャネル温度が最大定格 T<sub>ch</sub>(Max)未満に抑えられる事を条件により大きなアバランシェエネルギー(単発)E<sub>AS</sub> が許容されます。

1 つの I<sub>AS</sub> 条件下での E<sub>AS</sub> の値が各製品のデータシートに示されています。したがって、式 2-9 の定数は、これら 2 つの値から簡単に計算できます。

## 3. 計算例

計算例として、TPH3R704PL(V<sub>DSS</sub>=40V)の例を示しています。データシートから、式 2-9 に沿って各値を取得します。1ms の熱抵抗 r<sub>th(ch-a)\_1ms</sub> のみグラフから読み取る必要があります。

BV <sub>DSS</sub>	: 52V	*250V 以下の MOSFET では、BV <sub>DSS</sub> は 1.3 × V <sub>DSS</sub> で推定します。
T <sub>ch(Max)</sub>	: 175°C	
T <sub>a</sub>	: 25°C (初期温度)	
r <sub>th(ch-a)_1ms</sub>	: 0.85 °C/W	

これらの値と式 2-9 から、TPH3R704PL の E<sub>AS</sub> は次のように表示できます。

$$E_{AS} = \frac{1}{I_{AS}} \cdot \frac{0.00224}{52} \left( \frac{175-25}{0.85} \right)^2 = \frac{1.34}{I_{AS}} *$$

\* E<sub>AS</sub> および I<sub>AS</sub> のデータシート値は、有効数字以下を切り捨てて計算されています。したがって、データシートの値は式 2-9 から計算された値よりも小さくなります。

この計算は、1ms 以下の時間に対してのみ有効です。次のステップでは、t<sub>w</sub>=1ms 時の I<sub>AS</sub> を計算します。この I<sub>AS</sub> は、式 2-3 を次のように変形して計算されます。

$$I_{AS} = \frac{T_{ch(Max)} - T_a}{0.473 \cdot BV_{DSS} \cdot r_{th(ch-a), tw(=1ms)}}$$

$$= \frac{175 - 25}{0.473 \cdot 52 \cdot 0.85} = 7.2A$$

図 3-1 は、TPH3R704PL のアバランシェエネルギー(単発)とアバランシェ電流(単発)の関係を示しています。このデバイスには、このラインと同じかそれよりも小さいエネルギーが許容されます。

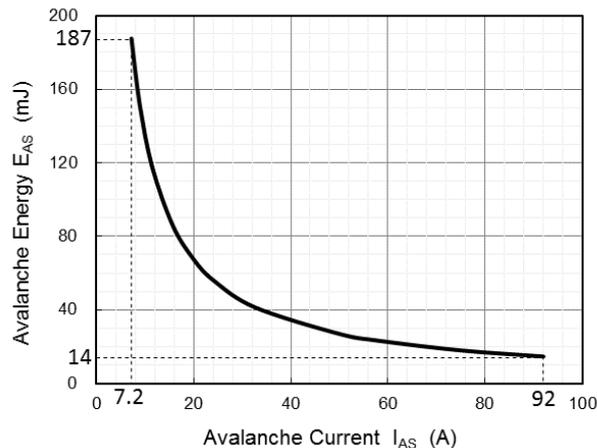


図 3.1 アバランシェエネルギー - アバランシェ電流特性

E<sub>AS</sub> と I<sub>AS</sub> は相関関係があるので、応用機器によってアバランシェ状態に入る電流から E<sub>AS</sub> を計算し、安全な設計をお願いします。

## 製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

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を以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、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（ヘルスケア除く）、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、発電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、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームから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。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>