

パワーMOSFET アバランシェ設計ガイドライン

本書について

適用範囲と目的

このアプリケーションノートは、International Rectifier 社 (現インフィニオンテクノロジーズ) が発行した AN-1005 「Power MOSFET Avalanche Design Guideline」 [1] の改訂版です。インフィニオンテクノロジーズのウェブサイトで入手可能な他のアプリケーションノート [2][3] と合わせて、設計エンジニアがアバランシェの内訳を理解し、データシートのアバランシェ定格を正しく読み出すのに役立ちます。

対象者

電気設計エンジニア, 技術者, および電子システムの開発者。

目次

目次

本書について	1
目次	2
1 はじめに	3
1.1 概要.....	3
1.2 アバランシェモードの定義.....	3
1.3 産業用途におけるアバランシェ発生.....	3
1.3.1 フライバックコンバータの例.....	3
1.3.2 自動車燃料インジェクタコイルの例.....	4
2 アバランシェ故障モード	5
2.1 概要.....	5
2.2 パワーMOSFET デバイス物理設計	5
2.3 堅牢な MOSFET.....	6
3 アバランシェテストの詳細	9
3.1 概要.....	9
3.2 クランプ無しのシングルパルス インダクティブ スイッチング	9
3.3 デカップリングされた VDD 電圧源.....	9
4 アバランシェ定格.....	11
4.1 概要.....	11
4.2 E_{AS} 熱制限アプローチ	11
4.2.1 シングルパルス	11
4.2.2 繰り返しパルス	13
4.3 統計的アプローチ.....	16
5 購入者のための注意	17
6 結論.....	18
参考資料	19
改訂履歴	20
免責事項	21

1 はじめに

1 はじめに

1.1 概要

International Rectifier 社 (現インフィニオンテクノロジーズ) は、1980 年代から堅牢なパワー MOSFET 半導体デバイスを提供してきました。インフィニオンテクノロジーズの IR MOSFET™ をよりよく理解し、活用するためには、アバランシェブレイクダウンの背後にある理論を探求し、堅牢な MOSFET の設計と定格を理解することが重要です。いくつかの異なるアバランシェ評価について説明し、それらの有用性と設計上の限界について考察します。

1.2 アバランシェモードの定義

すべての半導体デバイスは、特定の最大電圧 (MOSFET の BV_{DSS}) が定格で定められています。この閾値を超える動作では、逆バイアスされた pn 接合で高電界が発生します。衝突電離により、高電界は電子と正孔の対を形成し、それが増倍効果を受けて電流が増加します。デバイスの逆電流により電力損失が高くなり、それに伴う温度上昇が発生し、デバイスが破壊される可能性があります。

1.3 産業用途におけるアバランシェ発生

1.3.1 フライバックコンバータの例

一部の設計者はアバランシェ動作を許可しておらず、代わりに定格 BV_{DSS} と V_{DD} (通常は 90%以下) の間で電圧ディレーティングを維持します。ただし、そのような場合、設計よりも大きな電圧スパイクが発生する可能性があります。最良の設計でもまれにアバランシェイベントが発生する可能性があります。そのような例の 1 つであるフライバックコンバータを Figure 1 に示します。

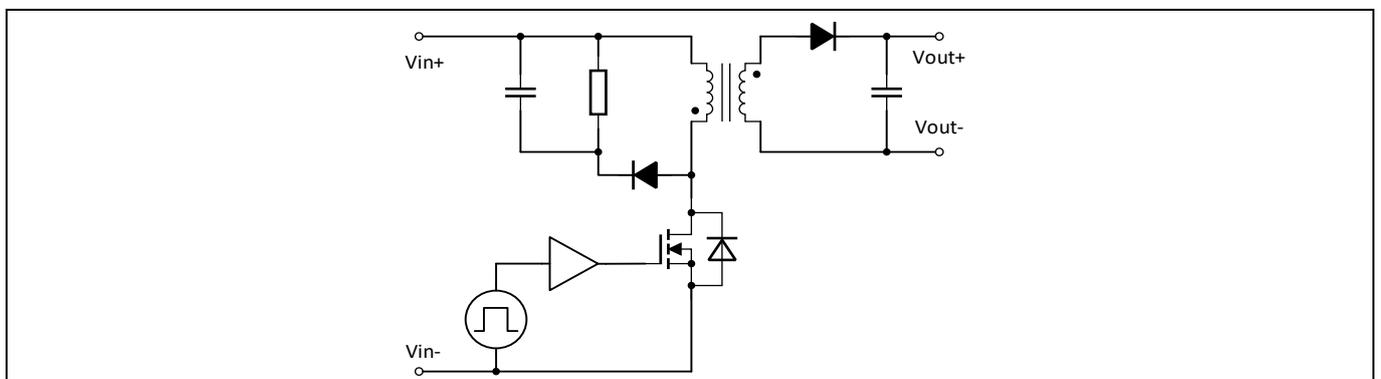


Figure 1 簡略化されたフライバックコンバータ回路の例

フライバックコンバータの MOSFET 動作中、エネルギーはリークインダクタに蓄積されます。インダクタが適切にクランプされていないと、MOSFET のターンオフ時に、Figure 2 の V_{DS} , I_{DS} , および V_{GS} 対時間波形に示すように、1 次スイッチを介して漏れインダクタンスが放電し、アバランシェ動作を引き起こす可能性があります。このアプリケーションでは、内蔵のアバランシェ特性がパワー MOSFET の特長であり、回路動作の限界で発生する可能性のある予期しない電圧オーバーストレスから保護します。

1 はじめに

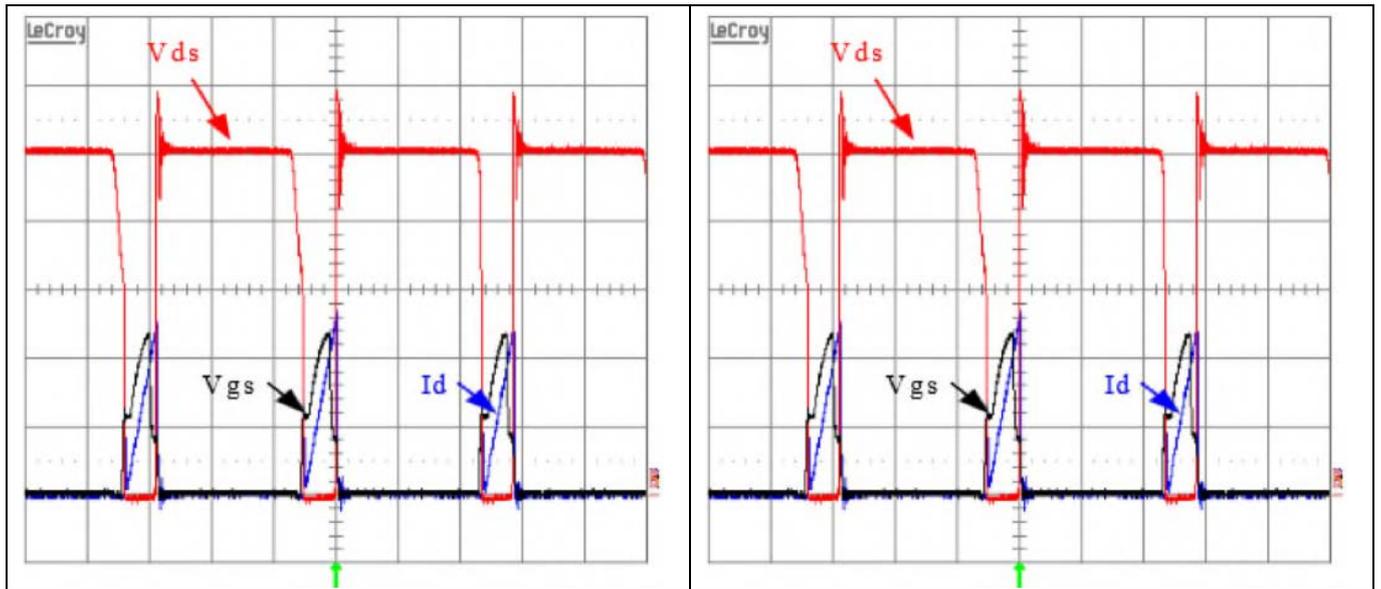


Figure 2 アバランシェ下のフライバックコンバータスイッチ波形 (左) と詳細 (右)

1.3.2 自動車燃料インジェクタコイルの例

他のアプリケーション、例えば自動車の燃料インジェクタはアバランシェを経験するように設計されています。Figure 3 (左) のインジェクタコイル回路の例を参照してください。スイッチ動作中、エネルギーはソレノイドインダクタンスに蓄えられます。スイッチのターンオフ後、1次スイッチでインダクタが放電し、Figure 3 (右) に示すようなアバランシェ動作が発生します。このアプリケーションでは、信頼性の高い回路動作のために、アバランシェテスト済みおよびアバランシェ定格のデバイスが必要です。

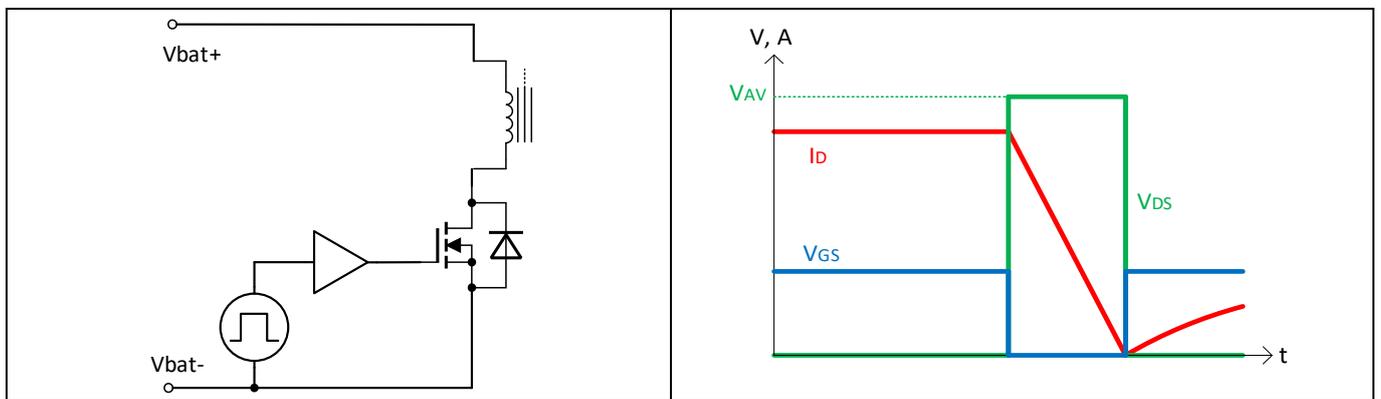


Figure 3 簡略化された燃料インジェクタコイル回路の例 (左) とアバランシェ動作時の波形図 (右)

2 アバランシェ故障モード

2 アバランシェ故障モード

2.1 概要

一部のパワー半導体デバイスは、一定量のアバランシェ電流に限られた時間に耐えるように設計されているため、アバランシェ定格にできます。一方でアバランシェの発生後、すぐに故障するものもあります。性能の違いは、特定のデバイスの物理特性, 設計, および製造に起因します。

2.2 パワーMOSFET デバイス物理設計

すべての半導体デバイスには、デバイスの物理設計に固有の寄生部品が含まれています。パワーMOSFET では、p 領域と n 領域の接合部の電荷転移によるコンデンサ, 材料の抵抗率に関連する抵抗器, p+ のボディ拡散を n-エピ層にしたボディダイオード, および n+ソース接点を拡散させた NPN (Bi-Polar Junction Transistor Sequence または BJT) などがあります。Figure 4 に、上記の寄生部品を組み込んだパワーMOSFET の回路図と、デバイスの完全な回路モデルを示します。

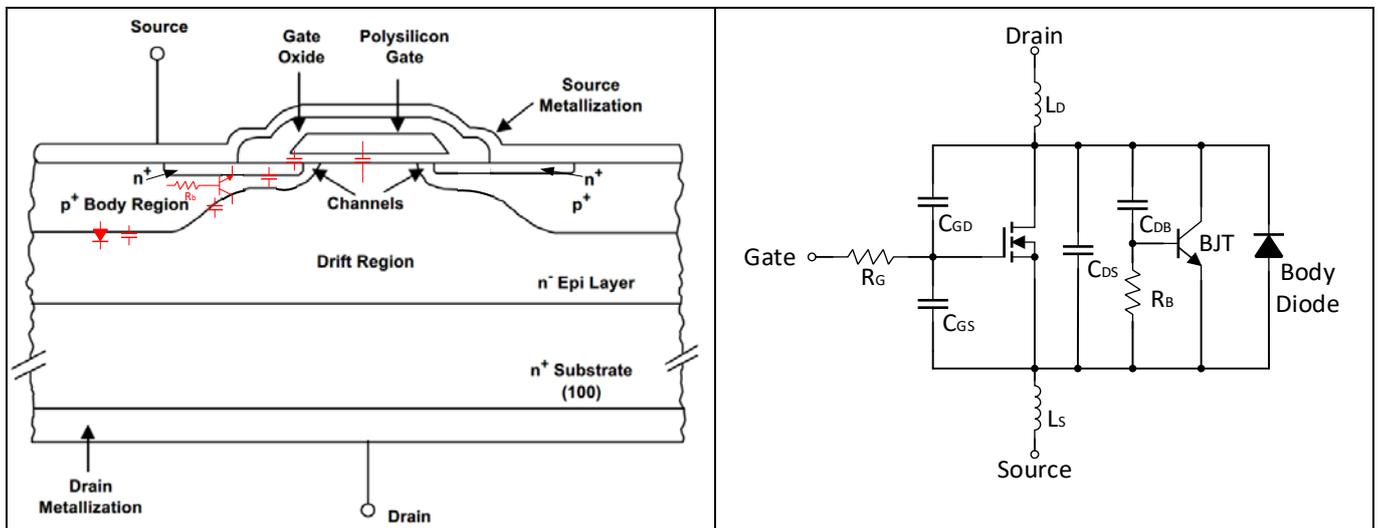


Figure 4 パワーMOSFET の回路図(左)と回路モデル(右)

アバランシェでは、ダイオードとして機能する pn 接合が電圧をブロックしなくなります。印加電圧が高くなると、衝突電離が無限大になり臨界場に達し、アバランシェの増倍によりキャリア濃度が上昇します。ラジアル磁界成分により、デバイス内の電界は接合部が曲がるポイントで最も強くなります。この強い電界により、Figure 5 に示すように、寄生 BJT のすぐ近くに最大電流が流れます。電力放散は温度を上昇させ、シリコンの低効率が温度を上昇させるため、 R_b を増加させます。オームの法則から、定電流回路に於いて抵抗が増加すると、抵抗器両端の電圧降下が増加することがわかっています。電圧降下が寄生 BJT を順方向バイアスするのに十分な場合、スイッチの制御が失われるため、BJT がオンになり、壊滅的な結果になる可能性があります。

2 アバランシェ故障モード

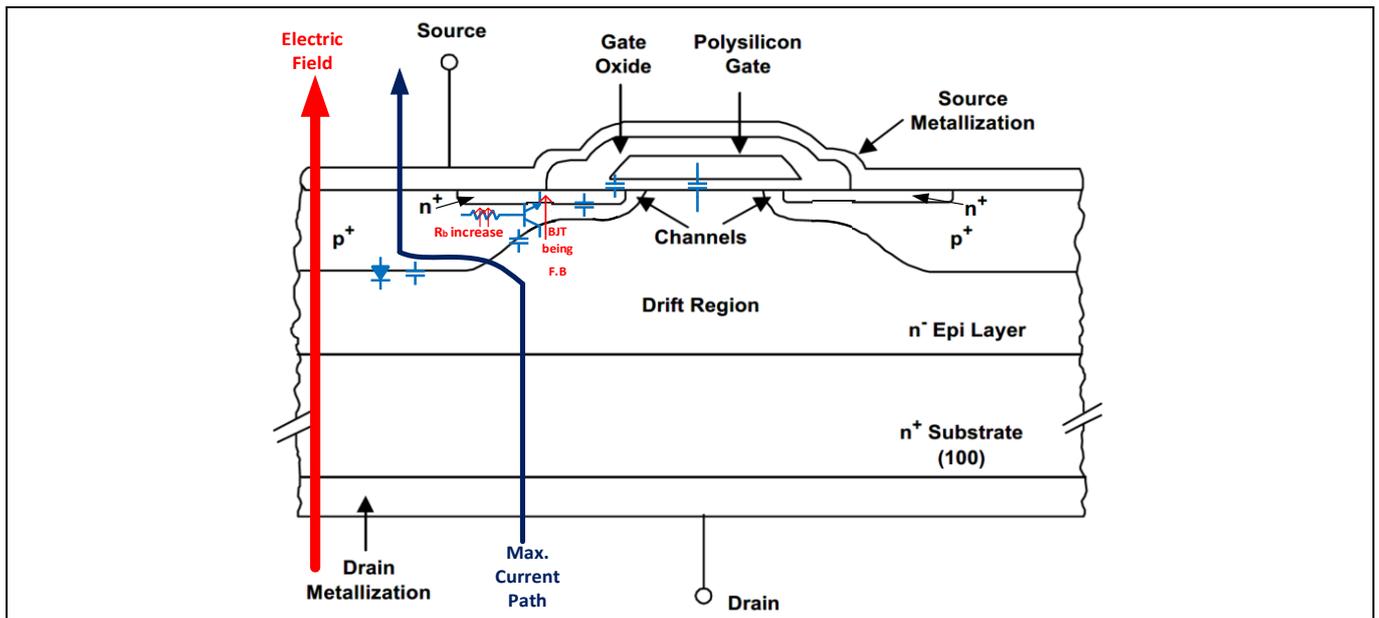


Figure 5 アバランシェ下でのパワーMOSFETの回路図

典型的な最新のパワーMOSFETは、Figure 6に示すように、何百万もの同一のトレンチ、セル、またはストリップを並列に並べて1つのデバイスを形成しています。したがって、堅牢な設計のためには、アバランシェ電流を多くのセル/ストリップ間で均等に共有する必要があります。その後、高温で単一のセルでランダムに故障が発生します。弱い設計では、電界に到達するために必要な電圧が、1つのデバイス領域(セルのグループ)で他の領域よりも低いため、臨界温度に達しやすくなり、デバイスが特定の領域で故障する原因となります。

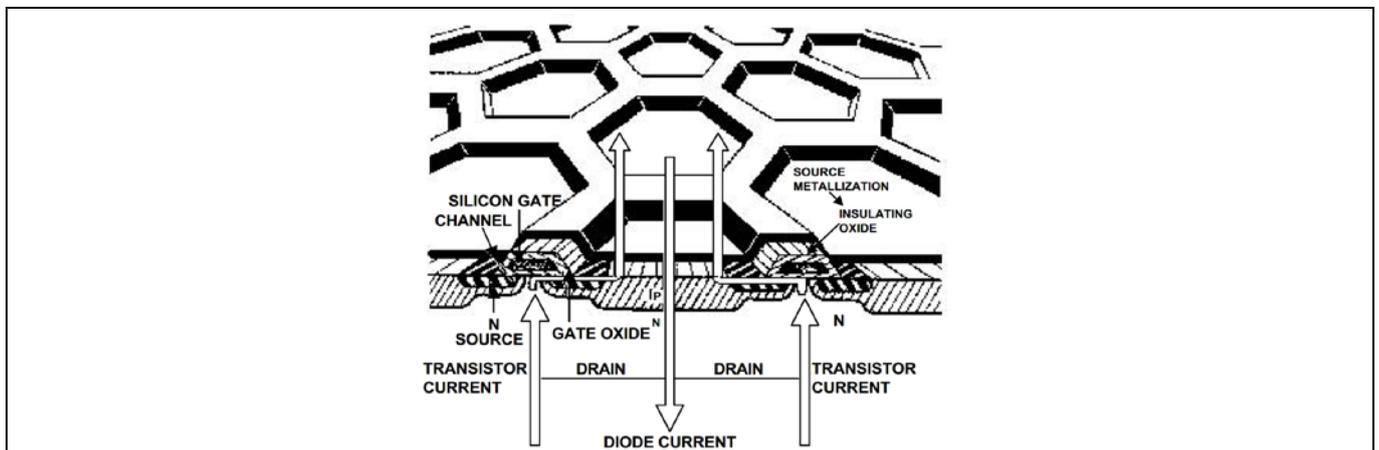


Figure 6 プレーナ MOSFET の構造例

2.3 堅牢な MOSFET

1980年代半ばに初めて登場したアバランシェ耐性 MOSFET は、非常に高い温度または非常に高い電流のアバランシェ電流が発生するまで寄生 BJT をオンにしないように設計されています。これは、次の方法で実現されます。

- より高いドーピング拡散による P+領域抵抗の低減
- セル/行のレイアウトを最適化して、 R_b の「長さ」を最小化

2 アバランシェ故障モード

主な効果は R_b の減少であり、したがって、寄生 BJT の順方向バイアスに必要な電圧降下は、より高い電流と温度で発生します。アバランシェ耐性 MOSFET は、一貫して脆弱なスポットを 1 つも含まないように設計されているため、アクティブ領域でランダムに故障が発生するまで、デバイス表面全体でアバランシェが均一に発生します。セルの並列設計を利用すると、アバランシェ電流が多くセルで共有され、単一の弱点を持つ設計よりも高い電流で故障が発生します。堅牢性を考慮して適切に設計されたパワーMOSFET は、温度が定格 T_{JMAX} を大幅に超えた場合にのみ故障します。破壊するまでテストされたさまざまな IR MOSFET™ の複数の分析は、故障箇所がアクティブエリアでランダムに発生することを示しています。いくつかのサンプル領域を Figure 7 に示します。



Figure 7 パワーMOSFET のランダム デバイス障害スポットの例

製造プロセスで「弱いセル」が発生するリスクは常に存在します。Figure 8(左)の SEM 断面顕微鏡写真に、そのような例の 1 つを示します。ソースメタルは、表面付近の $n+$ 層には接触しますが、 $p+$ 層には接触しません。その結果、BJT ベースはフローティングになり、簡単にトリガーできます。良好な接触の例を Figure 8(右)に示します。ソースメタルは $n+$ 層に接触して $p+$ 層に短絡し、寄生 BJT 動作を抑制します。Figure 8 の左側に示すような弱いセルを持つ部品は、製造中に 100% アバランシェ (E_{AS}) ストレストテストを行うことで、母集団から除去できます。

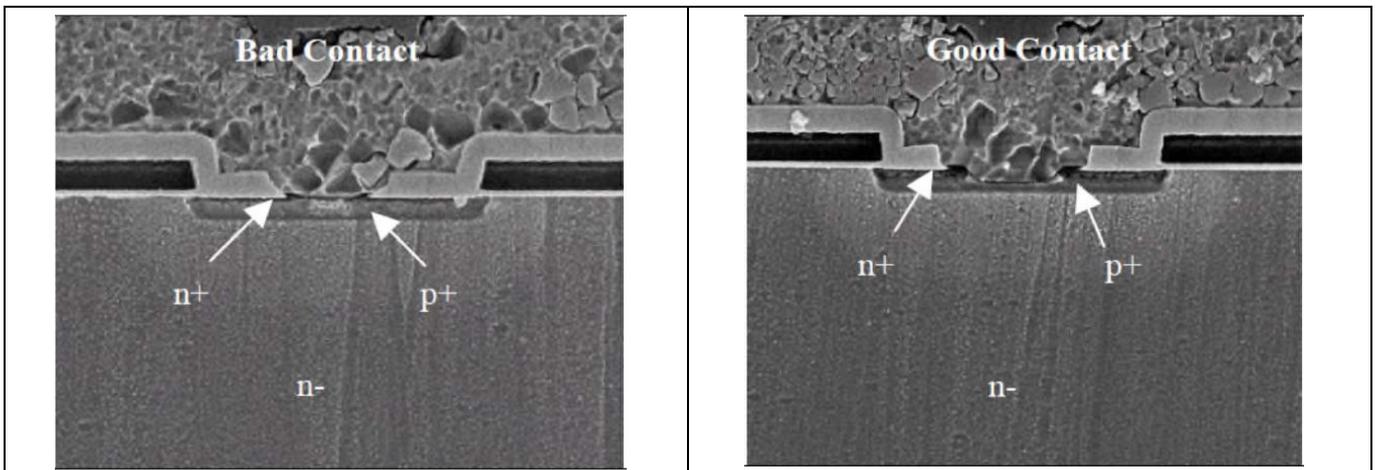


Figure 8 パワーMOSFET の断面画像 - 接触不良 (左) と接触良好 (右)

インフィニオンテクノロジーズは、長年の経験を通じて、 E_{AS} 定格デバイスのパワーMOSFET 設計の堅牢性を検証するために設計および製造分野を進化させてきました。現在、設計プロセスでは次の 3 段階のアプローチが使用されています。

1. 設計段階において統計的に有意なサンプルを、温度と電流ストレスの極限に達するように選択されたテスト条件下で破壊されるまでテストされます。DOE 要素の代表的な部品は、重要なプロセスステップの予想される変動にわたって均一なアバランシェ破壊を保证するためにテストされます。

2 アバランシェ故障モード

2. 各設計は、温度とインダクタ(=アバランシェ時間)を全体にわたって故障をテストし、 T_{JMAX} をはるかに超える温度で故障がゼロになることを確認します。(以下の故障時の I_{AS} と T_{START} の関係を示す Figure 9 の例を参照してください。
3. 最終設計部品のサンプルには、ジャンクション温度 T_{JMAX} を上昇させる値を持つ繰り返しアバランシェパルスでストレスをかけます。

この3段階のソリューションにより、設計が堅牢で、アバランシェ定格に対応できるようになります。要約すると、次の要因が堅牢なアバランシェ MOSFET を提供します。

- デバイス設計の改善
 - R_b を減らし寄生 BJT を弱める
 - レイアウトの特定の位置(デバイス終端、ゲートバスなどのセル)の弱いセルの影響を排除する
- 製造プロセスの改善
 - より均一なセルを保証する
 - 不完全または奇形のセルの発生を減らす
- デバイス特性の改善
 - 広範囲の I_b 値および温度値にわたってデバイスが均一に故障するようにする
 - デバイスが非常に高い(推定値)温度で故障するようにする
 - デバイスが熱限界で複数のアバランシェサイクルに耐えられるようにする
- 製造現場での 100%アバランシェストレステストを実施

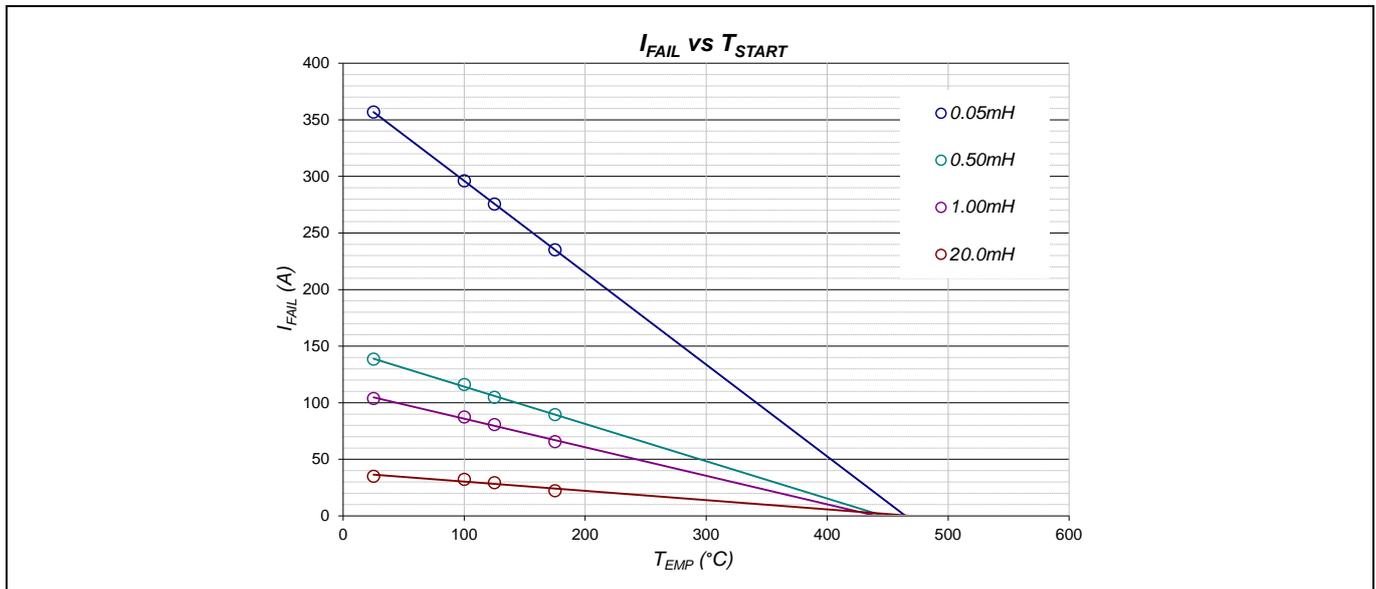


Figure 9 さまざまなインダクタンスでの故障時の I_{AS} と T_{START} のプロット例

3 アバランシェテストの詳細

3 アバランシェテストの詳細

3.1 概要

インフィニオンは、パワー半導体デバイスに対してアバランシェストレステストを実施し、新しい設計がアバランシェ定格に準拠していることを確認し、製品の堅牢性を検証し、脆弱なデバイスをスクリーニングしています。

3.2 クランプ無しのシングルパルス インダクティブ スイッチング

1980年代半ば、International Rectifier は当初、Figure 10(左)に示すように、アバランシェ試験にシングルパルスのクランプなし誘導スイッチング試験回路を使用しました。この回路は、古い「レガシー」製品データシートで参照されていました。

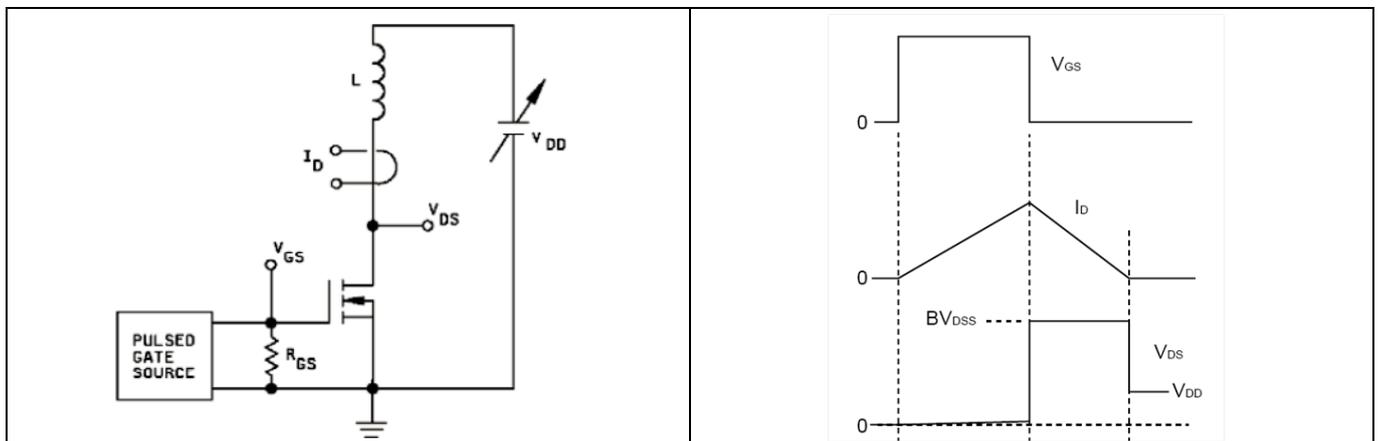


Figure 10 クランプ無しのシングルパルス インダクティブ スイッチングテスト回路 (左) と出力波形 (右)

Figure 10 (右) の出力波形からシングルパルス アバランシェエネルギー (E_{AS}) は次のように計算できます。

$$E_{AS} = \frac{L \cdot I_{AS}^2}{2} \cdot \frac{V_{DS}}{V_{DS} - V_{DD}} \quad (1)$$

測定されたエネルギー値はアバランシェ降伏電圧に依存し、アバランシェ降伏電圧は温度上昇により放電期間中に変化する傾向があります。また、低電圧デバイスでは $V_{DS} - V_{DD}$ が非常に小さくなる可能性があり、高レベルの測定誤差が発生するため、この回路の使用が制限されることにも注意してください。

3.3 デカップリングされた VDD 電圧源

クランプ無しのシングルパルス インダクティブ スイッチングテスト回路の限界を克服するために、1980年代後半から Figure 11 に示すようにデカップリングされた V_{DD} 電圧源が実装されました。

3 アバランシェテストの詳細

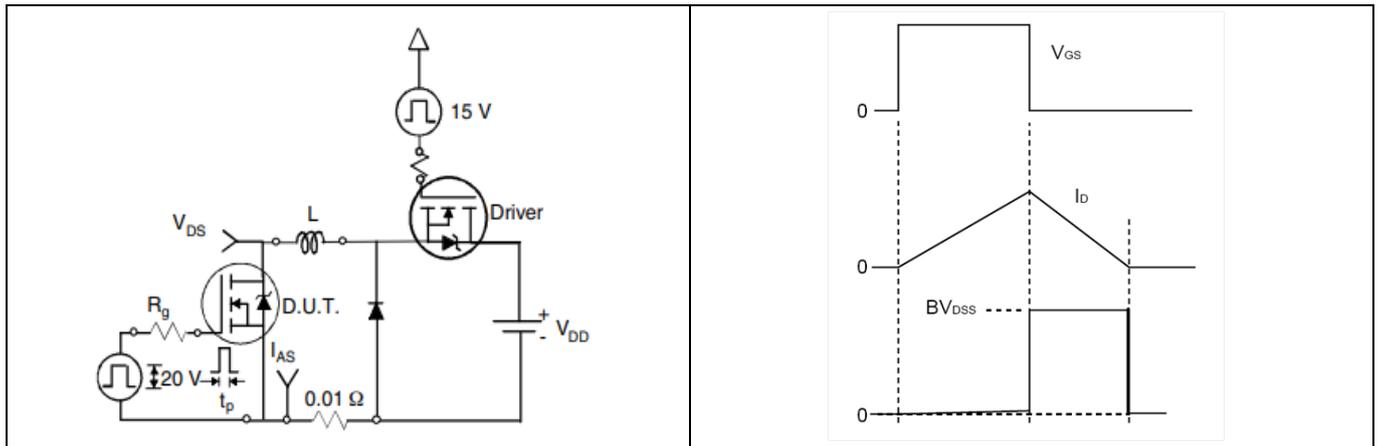


Figure 11 V_{DD} 電圧源 UIS テスト回路 (左) と図解出力波形 (右) を分離

ここでは、ドライバーと還流ダイオードが追加され、アバランシェ時のインダクタ両端の電圧降下がアバランシェ電圧と等しくなります。この回路 (インダクタの通常の ESR を無視) では、エネルギーは次のように簡単に計算できます。

$$E_{AS} = \frac{1}{2} L \cdot (I_{AS})^2 \quad (2)$$

アバランシェエネルギーのより適切で正確な読み出しは、デバイス内の瞬間的な電圧と電流を測定し、次の式で説明するようにそれらを積分することによって取得できます。

$$E_{AS} = \int_{t_1}^{t_2} v_{(AV)DSS}(t) \cdot i_{AS}(t) \cdot dt \quad (3)$$

参考までに、Figure 12 にそれぞれ理想的なアバランシェ波形と実際のアバランシェ波形を示します。

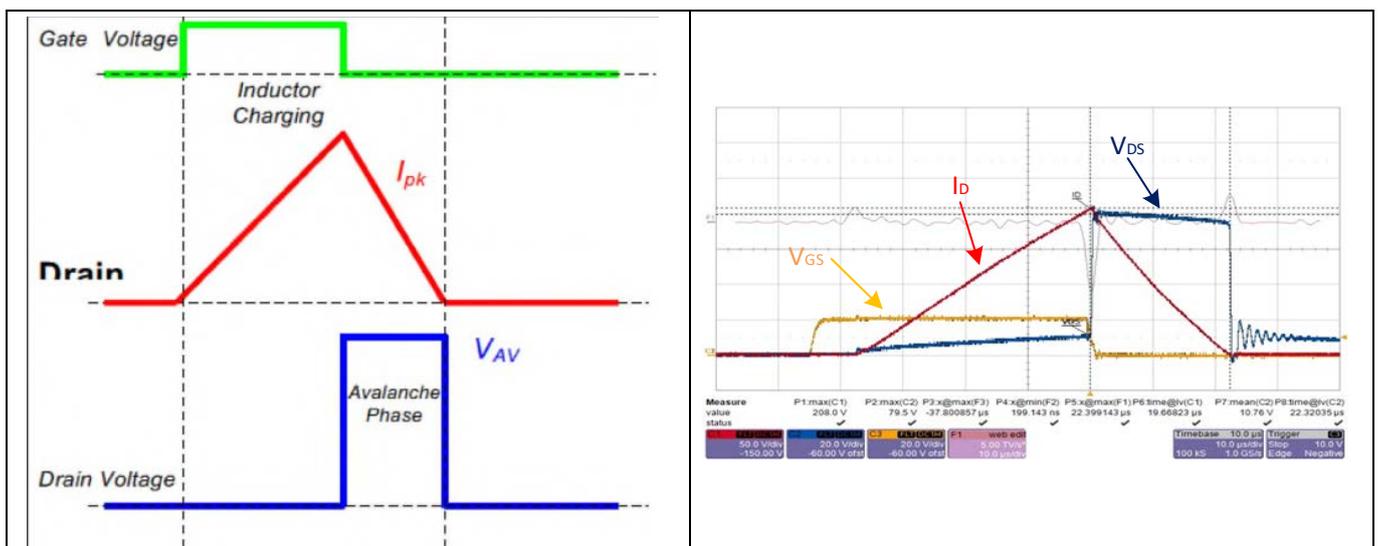


Figure 12 理想的なアバランシェ波形 (左) と実波形例 (右)

4 アバランシェ定格

4 アバランシェ定格

4.1 概要

一般に、アバランシェ定格デバイスには3つのアプローチがあります。

1. 熱制限アプローチ: デバイスは、最大 T_{JMAX} まで接合部温度を上昇させるエネルギー値 (E_{AS}) に定格されます。インフィニオンテクノロジーズが提供する E_{AS} アバランシェ定格 MOSFET は、International Rectifier を含め、この方法で評価されています。
2. 統計的アプローチ: デバイスは故障点までテストされます。評価は、故障分布に適用される統計ツール (例: 平均 (E_{AS}) - 6σ) を使用して与えられます。一部の IR MOSFET™ はこのように評価されており、一般的に熱制限された定格に加えて、 $E_{AS(tested)}$ と示されています。ただし、一部の MOSFET サプライヤは、データシートにこの定格のみを提供しています。
3. 定格なし

最初の2つのアプローチはアバランシェ エネルギーの価値を提供しますが、設計者は以下に概説する重要な違いを確実に理解する必要があります。

4.2 E_{AS} 熱制限アプローチ

4.2.1 シングルパルス

シングルパルス アバランシェ定格 (E_{AS}) は、デバイスが最大許容接合部温度を超えないことを条件として、幅広い条件下でアバランシェ動作に耐えられる堅牢性を前提としています。通常、データシートのアバランシェ定格は、ケース温度を $25^{\circ}C$ で一定であると仮定し、指定された I_D 値を仮定した場合に、接合部温度を $25^{\circ}C$ から T_{JMAX} まで上昇させるエネルギーの値です。

例えば、Figure 13 のデータシート[4]から抜粋したインフィニオンテクノロジーズの IRF7749L1TRPbF について考えてみます。

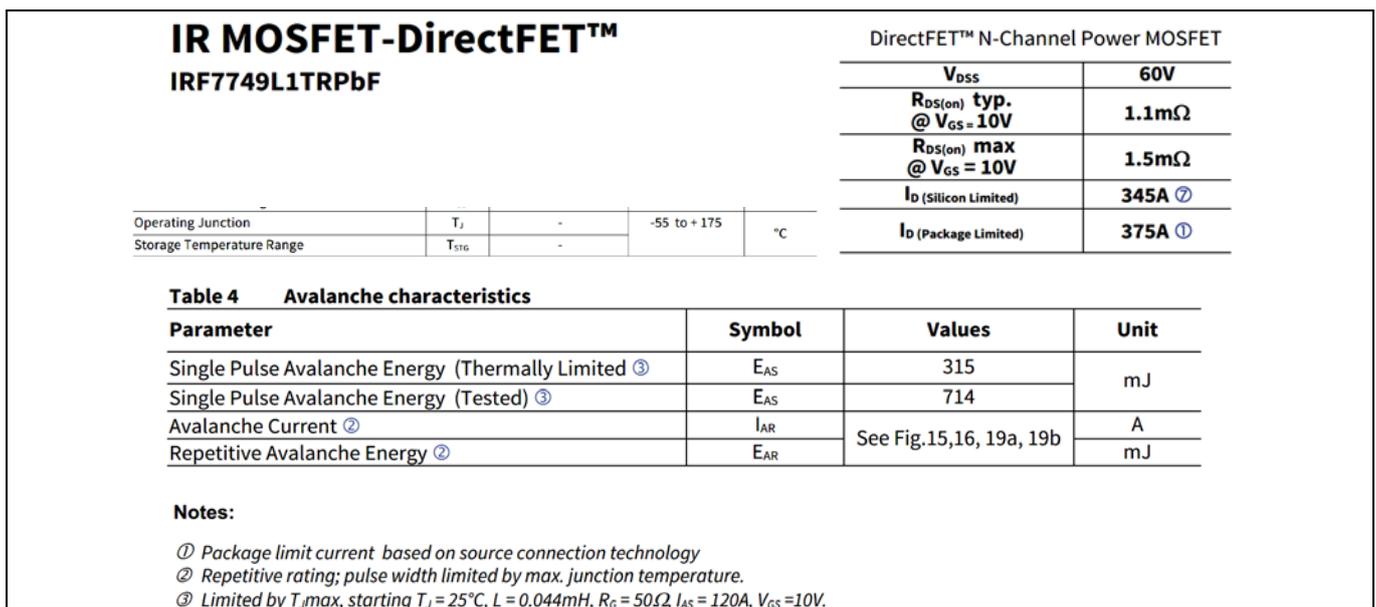


Figure 13 デバイスの概要、アバランシェ特性、および IRF7749L1TRPbF データシートの脚注

脚注で説明されているように、次の初期条件を使用します。

4 アバランシェ定格

- シングルパルス アバランシェ電流: $I_{AS} = 120\text{ A}$
- 開始温度: $T_{START} = 25^\circ\text{C}$
- インダクタ値: $L = 44\ \mu\text{H}$

アバランシェ電力損失による温度上昇を計算するためには、オームの法則と同等の熱モデルを利用します。結果の式は次のとおりです。

$$\Delta T_J = Z_{TH} \cdot P_{AV} \quad (4)$$

アバランシェ中に損失する平均電力は、次のように計算できます。

$$P_{AV} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{AV} \cdot I_{AS} \cdot t_{AV}}{t_{AV}} = 0.5 \cdot 78\text{ V} \cdot 120\text{ A} = 4680\text{ W} \quad (5)$$

アバランシェ電圧は次のように推定できます。

$$V_{AV} \cong 1.3 \cdot BV_{DSS} = 1.3 \cdot 60\text{ V} = 78\text{ V} \quad (6)$$

式(2)から、次のことを計算できます。

$$E_{AS} = \frac{1}{2} L \cdot (I_{AS})^2 = 0.5 \cdot 44\ \mu\text{H} \cdot (120\text{ A})^2 = 316.8\text{ mJ} \quad (7)$$

これは、最下位桁を四捨五入した範囲でデータシートの値と一致します。

アバランシェ電力パルスの持続時間は、インダクタに一定の電圧を印加して放電すると仮定して、次のように計算できます。

$$t_{AV} \cong L \cdot \frac{I_{pk}}{V_{AV}} = 44\ \mu\text{H} \cdot \frac{120\text{ A}}{78\text{ V}} \cong 67\ \mu\text{s} \quad (8)$$

このパルス幅の熱インピーダンス(Z_{TH})は、Figure 14 に示すように、データシートに付属の過渡熱インピーダンスプロットから読み出すことができます。

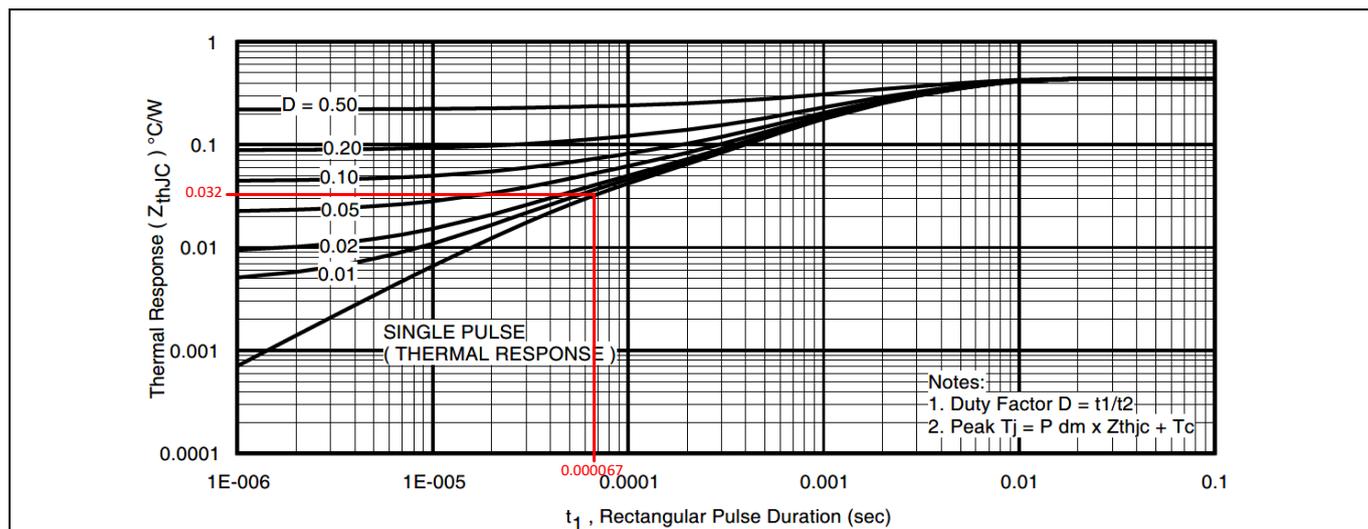


Figure 14 最大実効過渡熱インピーダンス、接合部-ケース間 (IRF7749L1TRPbF データシートより)

したがって、アバランシェによる温度上昇と最終的な接合部温度は、式(4)を使用して計算できます。

$$\Delta T = Z_{TH} \cdot P_{AV} = 0.032 \cdot 4680\text{ W} = 149.8^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$T_J = T_{start} + \Delta T_J = 25^\circ\text{C} + 149.8^\circ\text{C} = 174.8^\circ\text{C} \leq T_{JMAX} = 175^\circ\text{C} \quad (10)$$

4 アバランシェ定格

データシートの定格が、Figure 14 の Z_{TH} 読み出し値で計算された T_{JMAX} がその誤差範囲内である事がわかります。

Figure 15 は、 E_{AS} 定格部品のデータシートに含まれており、さまざまな開始 T_J および I_D に対する E_{AS} の多くの値を示しています。示された曲線に沿った各点は、温度を T_{JMAX} まで上昇させるのに必要なエネルギーを表します。

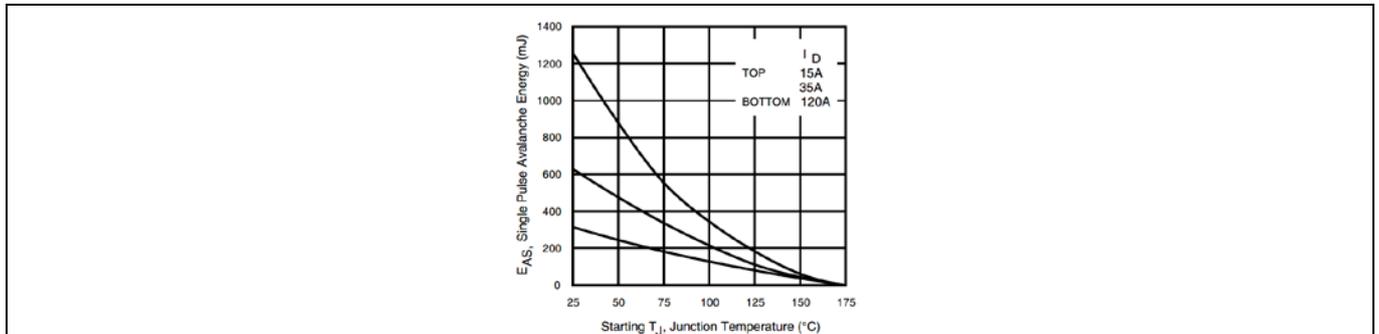


Figure 15 IRF7749L1TRPbF データシートのさまざまな I_D 値に対する最大アバランシェエネルギー対温度

この曲線は、データシート表の E_{AS} 値を比較しようとする通説に反していることに注意してください。電流や温度を変化させることで、 E_{AS} 値が大幅に変化する可能性があります。より低い I_D 値で E_{AS} を指定すると、デバイスのストレス (T_J) が同じであっても、 E_{AS} は高くなります。

4.2.2 繰り返しパルス

歴史的に、International Rectifier は、繰り返しパルス アバランシェエネルギー (E_{AR}) がデータシートに導入されたとき、 E_{AR} を $25^\circ C$ での P_D の $1/10000$ と評価しました。その後、この慣行は、 T_{JMAX} 条件までのアバランシェ動作の明示的な評価に取って代わられました。この評価方法を利用する一部の IR MOSFET™ のデータシートには、次のものも含まれています。

- E_{AS} : シングルパルス定格
- Z_{TH} グラフ: さまざまなデューティサイクルにおける Z_{TH} 対時間 (Figure 14) の例とそれに続く説明)
- E_{AS} グラフ: さまざまな I_D 値に対する E_{AS} 対 T_{START} (Figure 15) の例とそれに続く説明)
- E_{AR} グラフ: さまざまなデューティサイクル、シングル I_D の E_{AR} 対 T_{START} (例と説明は後述)
- I_{AR} グラフ: さまざまなデューティサイクルにおける典型的なアバランシェ電流対パルス幅 (例と説明は後述)

E_{AR} グラフは、所定の電流で、さまざまなデューティサイクルでジャンクション温度を開始温度から T_{JMAX} まで上昇させるのに必要なアバランシェエネルギーを示しています。 E_{AR} グラフの例を Figure 16 に示します。上の曲線は $5.1A$ でのシングルパルス動作を表し、下の曲線は 10% のデューティサイクルでの I_D レベルでの繰り返しパルス動作を表しています。繰り返しパルス動作では、接合部温度は周囲レベルに戻るのに十分なパルス間隔がありません。デューティサイクルが大きいほど、次のパルスが到着したときの接合部温度が高くなります。したがって、デューティサイクルが増加すると、接合部温度を T_{JMAX} まで上げるために必要なアバランシェエネルギーは低くなります。

4 アバランシェ定格

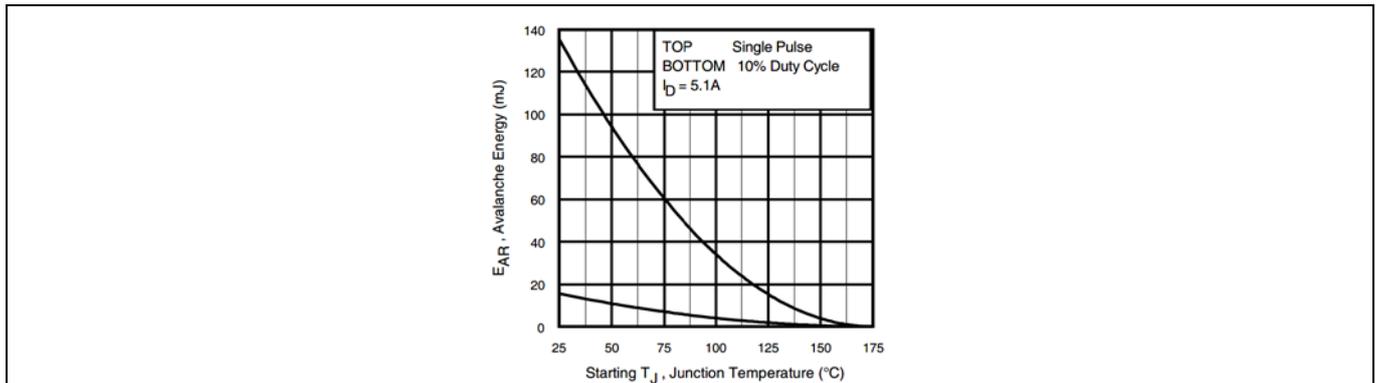


Figure 16 IRF7341GTRPbF データシートのシングル I_D で、さまざまなデューティサイクルで最大 E_{AR} 対 T_{START} を実現

I_{AR} グラフ (Figure 17 参照) は、アバランシェ損失による接合部温度の上昇を考慮し、 $\Delta T_J = 25^\circ C$ において、アバランシェ電流がさまざまなデューティサイクルのアバランシェパルス幅によってどのように変化するかを示します。 E_{AR} グラフと同様の効果が発生します。繰り返しパルス動作では、パルス間の接合部温度が周囲温度まで低下するのに十分な時間はありません。その結果、後続のパルスの開始温度は周囲温度よりも高くなります。したがって、アバランシェエネルギーが小さくなると、アバランシェ電流が小さくなり、その後のパルスの接合部温度が T_{JMAX} まで上昇します。したがって、デューティサイクルが増加すると、接合部温度を $25^\circ C$ 上昇させるのに必要なアバランシェ電流は減少します。

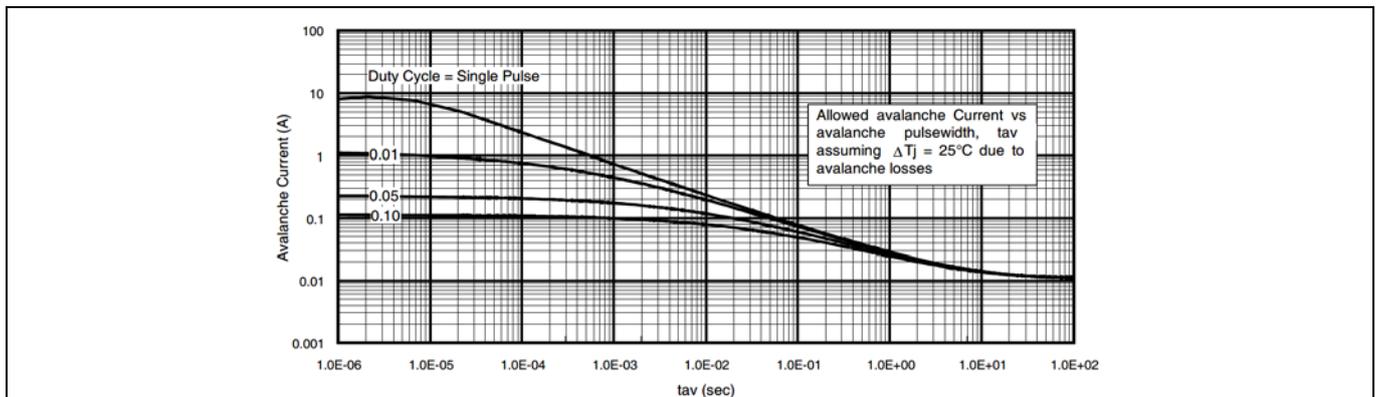


Figure 17 IRF7341GTRPbF データシートからのさまざまなデューティサイクルの代表的な I_{AR} 対 t_{AV}

以下では、繰り返しアバランシェ動作を設計する方法を説明するために、詳細な具体例を紹介します。この例では、Figure 4 で示した車載用燃料噴射コイル回路と、55 V 5.1 A IRF7341GTRPbF MOSFET を使用します。IRF7341GTRPbF のデータは、Figure 18 のデータシート [5] から抜粋したものです。

Absolute Maximum Ratings			
Parameter	Parameter	Max.	Units
V_{DS}	Drain-Source Voltage	55	V
$I_D @ T_A = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	5.1	A
$I_D @ T_A = 70^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	4.2	
I_{CM}	Pulsed Drain Current ^①	42	
T_J, T_{STG}	Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	$^\circ C$

Thermal Resistance			
Parameter	Parameter	Max.	Units
$R_{\theta JA}$	Maximum Junction-to-Ambient ^②	62.5	$^\circ C/W$

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ C$ (unless otherwise specified)					
Parameter	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
V_{BRIDSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V
$\Delta V_{BRIDSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.052	—	$V/^\circ C$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	0.043	0.050	Ω
		—	0.056	0.065	

Conditions:
 $V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
 Reference to $25^\circ C, I_D = 1mA$
 $V_{GS} = 10V, I_D = 5.1A \text{ } \textcircled{D}$
 $V_{GS} = 4.5V, I_D = 4.42A \text{ } \textcircled{E}$

Figure 18 IRF7341GTRPbF データシートの絶対最大定格と電気的特性

4 アバランシェ定格

アプリケーションの初期条件は次のとおりです。

- 周囲温度 $T_a = 120^\circ\text{C}$
- ソレノイドインダクタンス $L = 5\text{ mH}$
- ソレノイド抵抗 $R_L = 15\ \Omega$
- パルス周波数 $f = 125\text{ Hz}$
- 電源電圧 $V_{DD} = 14.5\text{ V}$

キルヒホッフの法則を燃料噴射コイル回路に適用すると、次のようになります。

$$V_{DD} = L \frac{di(t)}{dt} + R_L i(t) + V_{AV} \quad (11)$$

$t=0$ および $i(t)=IL=I_{AR}$ における境界条件を使用すると、時間領域における一般解が得られます。

$$i(t) = I_{AR} e^{\left(-\frac{R_L}{L}t\right)} + L \frac{V_{AV} - V_{DD}}{R_L} \left[e^{\left(-\frac{R_L}{L}t\right)} - 1 \right] \quad (12)$$

$i(t_{AV})=0$ と仮定してアバランシェパルス幅 (t_{AV}) を解くと、次のようになります。

$$t_{AV} = \frac{L}{R_L} \ln \left(1 + \frac{I_{AR} \cdot R_L}{V_{AV} - V_{DD}} \right) = \frac{5\text{ mH}}{15\ \Omega} \ln \left(1 + \frac{0.962\text{ A} \cdot 15\ \Omega}{71.5\text{ V} - 14.5\text{ V}} \right) = 75\ \mu\text{s} \quad (13)$$

アバランシェ電圧は、理想的には測定から得ることができますが、そうでない場合は、式(6)を使用し IRF7484 データシートから次のように推定します。

$$V_{AV} \cong 1.3 \cdot BV_{DSS} = 1.3 \cdot 55\text{ V} = 71.5\text{ V} \quad (14)$$

また、アバランシェ電流は次のように計算できます。

$$I_L = I_{AR} = \frac{V_{DD}}{R_L + R_{DS(on)}} = \frac{14.5\text{ V}}{15\ \Omega + 1.6 \cdot 50\text{ m}\Omega} = 0.962\text{ A} \quad (15)$$

繰り返しアバランシェエネルギーは、次のように計算できます。

$$E_{AR} = \frac{V_{AV} \cdot I_{AR} \cdot t_{AV}}{2} = \frac{71.5\text{ V} \cdot 0.962\text{ A} \cdot 75\ \mu\text{s}}{2} = 2.58\text{ mJ} \quad (16)$$

アバランシェ中の平均電力損失と導通損失は、次のように計算できます。

$$P_{AV} = \frac{E_{AR}}{t_{AV}} = \frac{2.58\text{ mJ}}{75\ \mu\text{s}} = 34.4\text{ W} \quad (17)$$

$$P_{ave} = E_{AR} \cdot f = 2.58\text{ mJ} \cdot 125\text{ Hz} = 323\text{ mW} \quad (18)$$

$$P_{cond} = I_L^2 \cdot (\text{temperature coeff.}) \cdot R_{DS(on)} = (0.962\text{ A})^2 \cdot 1.6 \cdot 50\text{ m}\Omega = 74\text{ mW} \quad (19)$$

アバランシェのデューティサイクルは次のように計算できるため、次のようになります。

$$D = t_{AV} \cdot f = 75\ \mu\text{s} \cdot 125\text{ Hz} = 0.0094 \quad (20)$$

定常状態における平均接合部温度は、次式で計算できます。

$$T_{SS} = (P_{ave} + P_{cond})R_{\theta JA} + T_a = (323\text{ mW} + 74\text{ mW}) \cdot 62.5^\circ\text{C/W} + 120^\circ\text{C} = 144.8^\circ\text{C} \quad (21)$$

各アバランシェパルスによる接合部温度のピーク上昇は、次式で与えられます。

$$\Delta T = Z_{TH} \cdot P_{AV} = 0.85 \cdot 34.4\text{ W} = 29.2^\circ\text{C} \quad (22)$$

$$T_{J(pk)} = T_{SS} + \Delta T = 144.8^\circ\text{C} + 29.2^\circ\text{C} = 174^\circ\text{C} \leq T_{JMAX} \quad (23)$$

4 アバランシェ定格

ここで、熱インピーダンス (Z_{TH}) は、Figure 19 に示すように、データシートに提供されている過渡熱インピーダンス プロットから近似されています。

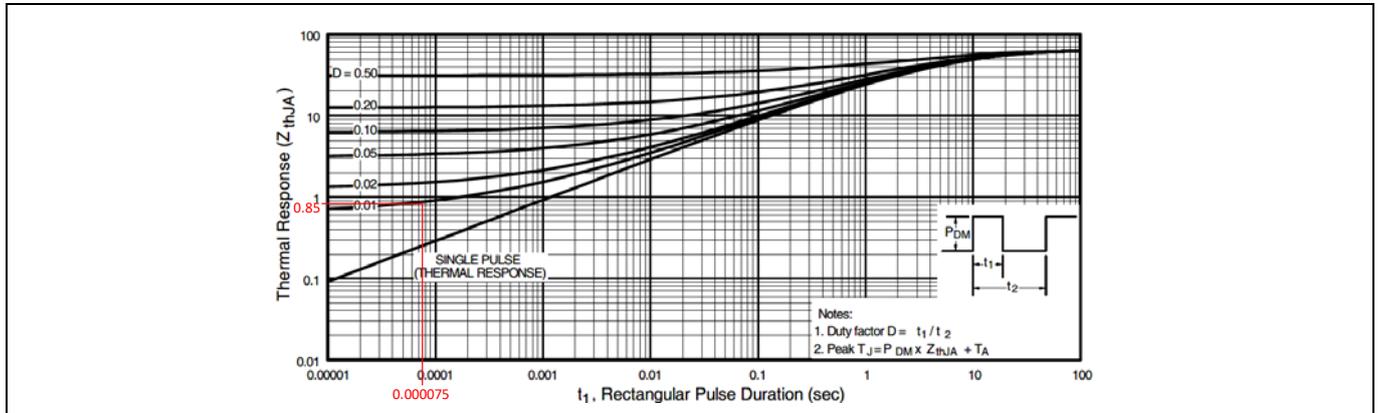


Figure 19 最大実効過渡熱インピーダンス (接合部-周囲間) (IRF7341GTRPbF データシートより)

4.3 統計的アプローチ

この場合、デバイスのサンプルは、最大ジャンクション温度を T_{JMAX} に制限せずに故障についてテストされます。このテストは、各デバイスが故障するまで、定義された I_{AS} の下でインダクタンス値を増やすことで構成されます。図 20 (左) に示すように、 I_{AS} 曲線下の面積として定義されるエネルギーは、負荷インダクタンス値に比例して増加します。L を固定し、故障が発生するまで I_{AS} を増やすと、同様の効果が得られます。図 20 (右) に示すように、各デバイスの故障エネルギーが記録され、故障分布と E_{AS} 値がわかるようにプロットされます。統計的に決定された E_{AS} 値は、実際のアバランシェ条件の設計には使用できないことに注意してください。これは、より多くの情報を提供しない限り、他の状況に適用できない単一の条件セットでの動作を表します。さらに、統計的に評価された E_{AS} 値が与えられる条件は、ほとんどの場合、製品が認定される通常の動作限界を超えています。

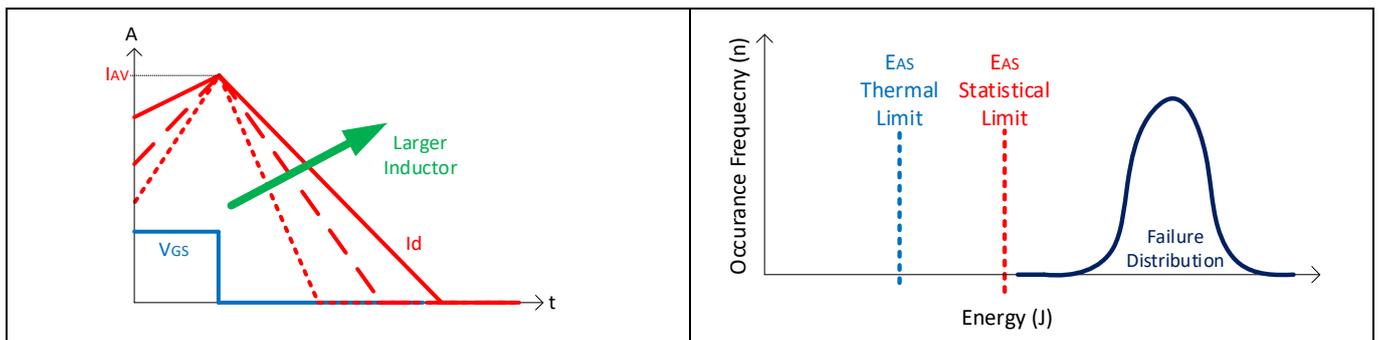


Figure 20 各種インダクタの $I_{AS(set)}$ 対 t_{AV} 波形 (左) と限界値付き故障エネルギー分布 (右) の図

インフィニオンテクノロジーズは、主に熱制限値と組み合わせて統計的に基づいた E_{AS} を提供し、一部の IR MOSFET™ の製品スクリーニング テスト数値を提供します。他のサプライヤは、統計的に基づいた値のみを提供する場合があります。

5 購入者のための注意

5 購入者のための注意

多くのサプライヤはパワーMOSFETのアバランシェ能力をデータシートの1つの数字のみで評価し、回路やテスト条件の詳細をすべて提供していません。このような場合、ユーザーは注意する必要があります。データシートの表に載っているアバランシェエネルギーの数値を比較するだけでは不十分です。次の例は、その理由を示すのに役立ちます。アバランシェエネルギーはインダクタの値と起動電流に依存するため、同じエネルギーで接合部温度が異なる2つのパルスを持つことができます。この現象は、Table 1 の次の例に示されています。

Table 1 IRF7749L1TRPbF 同じ E_{AS} を持つさまざまな I_{AS} 値のアバランシェ計算

パラメーター	例 1	例 2
I_{AS}	120 A	35 A
L	44 μ H	517 μ H
$E_{AS} = \frac{1}{2}L \cdot I_{AS}^2$	316 mJ	316 mJ
$t_{AV} = L \cdot \frac{I_{pk}}{V_{AV}}$	$\approx 67 \mu$ s	$\approx 232 \mu$ s
Z_{th}	0.032°C/W	0.07°C/W
ΔT_J	150°C	96°C
$T_J = T_{start} + \Delta T$	175°C	121°C

例1と例2はどちらも同じエネルギーを持っていますが、インダクタが変化するため、接合部温度も変化します。両方の接合部温度は T_{JMAX} 内にはありますが、等しくありません。インフィニオンテクノロジー社のパワーMOSFETは、 E_{AS} 定格で、一定の接合部温度のエネルギー値を示すグラフが含まれています。例えば、Figure 15を参照して、どのエネルギー値を他のサプライヤのMOSFETと比較する必要があるかを確認してください。もう1つの一般的な業界慣行は、ドレイン電流とのトレードオフとして、アバランシェの許容時間を示す曲線に基づいてアバランシェ能力を評価することです。Figure 9に示すように、このような曲線は、テストの故障データで裏付けられる場合があります。ただし、これらの曲線は、ジャンクション温度を明らかに考慮せずに、統計的に決定された制限に基づいている場合があります。その結果、定格許容条件の熱 T_J 計算 (Table 1を参照) では、この T_{JMAX} より高い条件では信頼性認定データなしで、 T_J が T_{JMAX} を超えていることが示される可能性があります。

6 結論

6 結論

インフィニオンテクノロジーは、長年の進化の経験により、アバランシェ状態でも堅牢で信頼性の高い動作を保証するパワーMOSFET を設計、特性評価および評価を行っています。アバランシェ定格には3つの異なるクラスが適用されます。

- 熱的アプローチでは、 $I_{D\text{MAX}}$ または定格 $T_{J\text{MAX}}$ を超えない限り、シングルパルスおよび (示されている場合は) 繰り返しパルスアバランシェ動作が可能です。アバランシェ動作によるエネルギー損失は、他の損失源として分析できます。このような熱定格部品は、定格が EAS で示され、IR MOSFET™ のデータシートに繰り返しアバランシェ SOA グラフが記載されています。例については、[Figure 16](#) と [Figure 17](#) を参照してください。
- 統計に基づくアバランシェの評価は、サンプルの故障統計に基づいて設定されます。インフィニオンテクノロジーでは、この定格は IR MOSFET™ の $E_{AS(\text{tested})}$ とラベル付けされており、製造テストのスクリーニング限界に対応しています。統計的アプローチは一般的により高いエネルギー値を提供しますが、データシートと異なる条件でアバランシェ能力を評価するための実用的な方法を提供しません。通常、回路設計者の条件は大きく異なるため、統計的アプローチでは、アバランシェの発生をどのように設計するかが明確ではありません。
- 一部の製品は、他のサプライヤによってアバランシェ評価なしで設計されています。データシートにアバランシェ定格が記載されていないデバイスは、動作モードを問わずアバランシェ状態が発生する回路では使用しないでください。

パワーMOSFET ユーザーは、さまざまなサプライヤ間のアバランシェ定格条件の違いを理解するように注意する必要があります。アバランシェに強くないデバイスは、予期せぬ、一見原因不明の回路障害を引き起こす可能性があります。一部のメーカーは、MOSFET のアバランシェをまったく評価していません。また、統計的評価のみを使用しているものもありますが、インフィニオンテクノロジーが E_{AS} 定格のデバイスに使用しているような、より完全な特性評価と評価によって提供される堅牢な動作に対する同じ保証は提供されません。この点で、詳細が重要です。データシートの表に表示されるアバランシェエネルギーの値を対比するだけでは、デバイスの堅牢性を正確に測定することはできません。

参考資料

参考資料

- [1] Infineon Technologies AG : Power MOSFET Avalanche Design Guideline
- [2] Infineon Technologies AG: Some key facts about avalanche; [オンラインで利用可能](#)
- [3] Infineon Technologies AG: Repetitive Avalanche of Automotive MOSFETs; [オンラインで利用可能](#)
- [4] Infineon Technologies AG: IRF7749L1TRPbF datasheet; [オンラインで利用可能](#)
- [5] Infineon Technologies AG: IRF7341GTRPbF datasheet; [オンラインで利用可能](#)

改訂履歴

改訂履歴

版数	発行日	変更内容
V1.1	2024-03-07	これは英語版 AN_2304_PL18_2305_004059 V1.1 について、Infineon DEVELOPER COMMUNITY の参画者によって日本語に翻訳されたドキュメントです。

Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2024-03-07

Published by

Infineon Technologies AG

81726 Munich, Germany

© 2024 Infineon Technologies AG.

All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference

AN_2304_PL18_2305_004059_JA

重要事項

本手引書に記載された本製品の使用に関する手引きとして提供されるものであり、いかなる場合も、本製品における特定の機能性能や品質について保証するものではありません。本製品の使用前に、当該手引書の受領者は実際の使用環境の下であらゆる本製品の機能及びその他本手引書に記載された一切の技術的情報について確認する義務が有ります。インフィニオンテクノロジーズはここに当該手引書内で記される情報につき、第三者の知的所有権の不侵害の保証を含むがこれに限らず、あらゆる種類の一切の保証および責任を否定いたします。

本文書に含まれるデータは、技術的訓練を受けた従業員のみを対象としています。本製品の対象用途への適合性、およびこれら用途に関連して本文書に記載された製品情報の完全性についての評価は、お客様の技術部門の責任にて実施してください。

警告事項

技術的要件に伴い、製品には危険物質が含まれる可能性があります。当該種別の詳細については、インフィニオンの最寄りの営業所までお問い合わせください。

インフィニオンの正式代表者が署名した書面を通じ、インフィニオンによる明示の承認が存在する場合を除き、インフィニオンの製品は、当該製品の障害またはその使用に関する一切の結果が、合理的に人的傷害を招く恐れのある一切の用途に使用することはできないこと予めご了承ください。