

高温時の安定動作を科学する： 高温・逆バイアス時の性能を最適化

in Nima Lotfi (プロダクト・アプリケーション・エンジニア, Nexperia)

in Surabhi Hlremath (プロダクト・アプリケーション・エンジニア, Nexperia)

ダイオードは電力変換や逆流保護など、逆バイアスでの耐圧が重要視されるアプリケーションで使用されます。ダイオードに逆バイアス電圧が印可された際、発生するリーク電流によって引き起こされる自己発熱は、システムの安全性を脅かします。ダイオードが安全に動作する条件は「安全動作領域 (SOA)」と呼ばれています。ダイオードを使用する際、堅牢で信頼性の高い動作を保証するために、十分な安全マージンを確保してSOA内で使用する必要があります。

車載アプリケーションなど、高い電力密度 (高温となります) かつ人体への安全性が最優先事項となるアプリケーションでは特に重要です。このホワイトペーパーでは高温・逆バイアス時におけるダイオードの性能を検証し、熱暴走がどのようなものかを紹介します。さらに、ダイオードのSOAを計算する方法をご紹介した後、デバイスの発熱に影響を与える要因 (ウェハのテクノロジー、パッケージの種類など) について議論を展開します。

熱システムとしてのダイオード

ーク電流による自己発熱の前に、放熱能力について説明します。逆バイアスにおけるダイオードの高温時の安定動作は、熱抵抗を介した放熱能力に依存します。システムが熱平衡状態にあり、周囲温度 T_a が一定であれば、これを熱的な「グラウンド」と見なし、デバイスのジャンクション温度 T_j は以下の式で記述できます。

$$T_j = R_{th(j-a)} \times P_{dissipated} + T_a$$

ここで、 $R_{th(j-a)}$ は接合部と周囲環境間の熱抵抗、 $P_{dissipated}$ はデバイスでの損失電力を表します。図1に示すように、定常状態では以下のとおり発熱と放熱の相反する特性に依存します。

1. 熱抵抗を介した放熱能力 (青緑色の線)
2. リーク電流 (スイッチングする場合はスイッチング損失も加算) によるデバイスの自己発熱 (オレンジ色の線)。リーク電流はジャンクション温度上昇に伴って増加

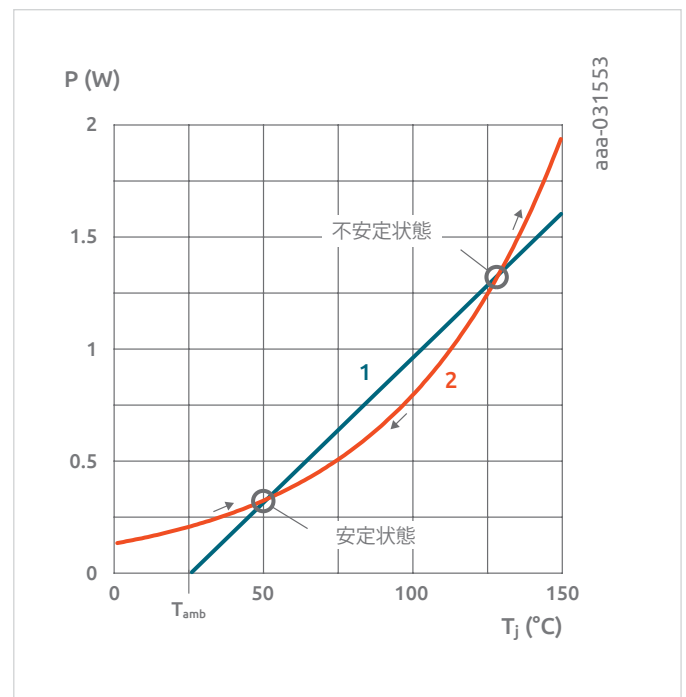


図1: 熱平衡状態と定常動作の条件

緑色の線（放出される熱を電力として表す）はジャンクション温度 T_j が周囲温度 T_a であるところからスタートします。スタートを0として T_a の温度でx軸と交差し、その後システムの熱コンダクタンス ($1/R_{th}$) に比例し、 T_j に伴って上昇します。

ジャンクション温度 T_j の上昇に伴い、ダイオードのリーク電流による発生電力（オレンジ色の線）は指数関数的に上昇します。熱平衡状態は2つの曲線の交点の座標によって決まります。最初の交点はシステムの熱平衡で安定した状態を示します。デバイスの自己発熱に伴って発生する電力が放出される電力よりも低い場合、ジャンクション温度 T_j 温度は低下し、熱的に安定した動作条件に収束します。一方、発生する電力が放出される電力よりも大きい場合（グラフの交点は不安定な状態を示します）、デバイスのジャンクション温度 T_j 温度は上昇し続け、やがて「熱暴走」と呼ばれる熱的に不安定なプロセスに入ります。その結果、デバイスのリーク電流、は増加し、最終的に発熱によって故障します。図2は熱暴走によって故障したデバイスのX線写真です。

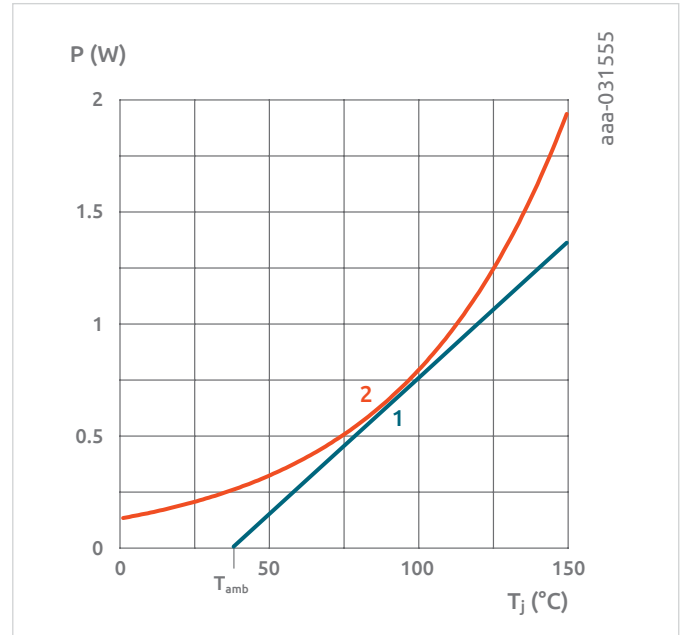


図3: 周囲温度が上昇し続け熱安全マージンが低下する例

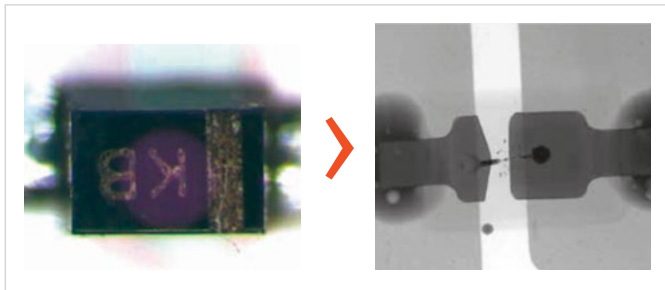


図2: 熱暴走で故障したデバイス

この写真のケースでは、直接の破損原因はボンディングワイヤの溶断です。クリップボンダパッケージデバイスの場合、ワイヤーは使用していないので発熱により半導体のダイを損傷してしまいます。エポキシ樹脂化合物が明らかに変色していることから、非常に強い熱が加えられたことがわかります。

安定状態の温度と不安定状態の温度の差分をシステムの安全マージンとします。周囲温度が高いと安全マージンは縮小し、安定平衡状態と不安定平衡状態が1つの点に収束していきます。ここで、熱暴走が発生します（図3）を参照。

$$\frac{dP_{generated}}{dT} = \frac{1}{R_{th}}$$

逆バイアス時、ダイオードの安全動作領域は熱暴走状態の限界値によって決まります。ジャンクション温度 T_j において、逆バイアスの電圧 V_R' に対応するリーク電流 I_R を測定します。

$$\frac{dP_{generated}}{dT} \times R_{th} \geq 1 \text{ (with } P_{generated} = V_R \times I_R \text{)}$$

上式から、任意の熱抵抗 (R_{th})、逆バイアスにおける熱暴走の限界温度を求めることができます。それをグラフにしたのが図4で、ダイオードのジャンクション温度 T_j に基づいて、熱的に安定な逆電圧の最大値が示されています。

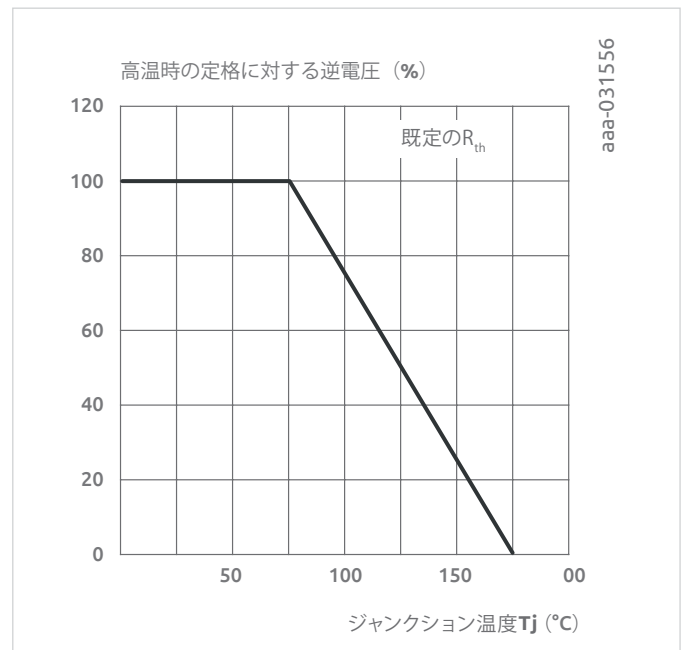


図4: ダイオードの最大電圧とジャンクション温度 T_j 温度の関係

SOAグラフの基本的な使い方は以下のとおりです。製品の $R_{th(j-a)}$ が既知である場合、任意のアプリケーションにおけるジャンクション温度 T_j の最大値は逆電圧の最大値によって決定されます。発生電力は任意の逆電圧とジャンクション温度 T_j (デバイスのデータシートに記載) におけるリーク電流から計算できます。許容可能な周囲温度の最大値は以下の式で簡単に求められます。

$$T_{amb_max} = T_{j_max} - P_{dissipated} \times R_{th(j-a)}$$

デバイスのテクノロジーがSOAに与える影響

ダイオードのSOAは以下の式に示されるように、熱抵抗に大きく影響されます。

$$\frac{dP_{generated}}{dT} = \frac{1}{R_{th}}$$

そのため、ジャンクションからPCB基板上のハンダ箇所への熱抵抗 $R_{th(j-sp)}$ が低いパッケージや、熱特性の優れたPCBや基板を使用することで、SOAを広げることができます (例: セラミックPCB)。逆方向リーク電流がバイアス点における熱を発生させる電力の原因となるため、ダイオード製造に使われる半導体技術もSOAに影響を与えます。各技術におけるリーク電流を比較する際は実際のリーク電流よりも電流密度を使用します。電流密度を使用することで、ダイのサイズの影響を排除し、各技術を同じ条件で比較できるからです。図5は以下のダイオード技術のリーク電流の電流密度とジャンクション温度 T_j の関係を示しています (逆電圧100Vを印加)

- ▶ 100V 低リーク電流プレーナー型ショットキー・ダイオード
- ▶ 100V 低 V_f プレーナー型ショットキー・ダイオード
- ▶ 200V 超高速ファストリカバリ・ダイオード
- ▶ 120V SiGe (シリコン・ゲルマニウム) ダイオード
- ▶ 100V トレンチ・ショットキーダイオード

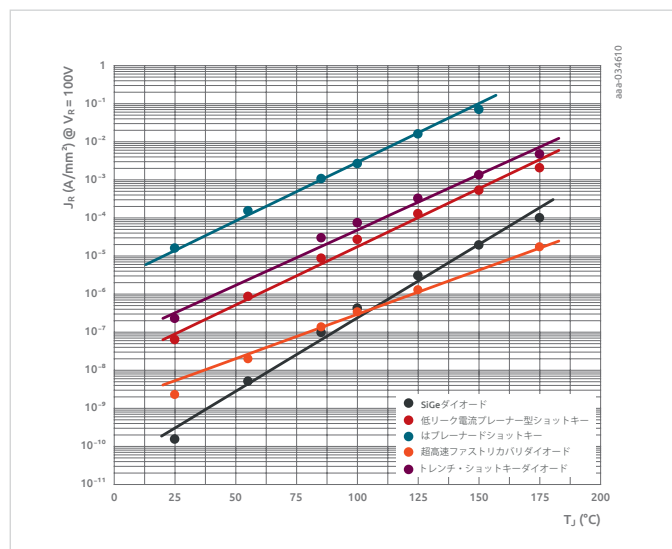


図5: 5種類の異なるテクノロジーのダイオードで比較したリーク電流の電流密度 (100V印加0時)

このグラフから、以下のことが分かります。:

- ▶ 低電圧 V_f ショットキー・ダイオードは (金属で構成されるため)、当然ながら、リーク電流が最も高くなる
- ▶ それとは対照的に、低リークのプレーナー型ショットキー・ダイオードはリーク電流密度が2桁低く、障壁の高さがリーク電流に指数関数的な影響を与えていることを示している
- ▶ 超高速ファストリカバリ・ダイオードも、リーク電流密度が低い
- ▶ 興味深い点として、新しいダイオード技術であるSiGeは超高速ファストリカバリ・ダイオードと同程度のリーク電流密度を持っている
- ▶ トレンチ・ショットキー技術は (トレンチ構造のため) 低リークのプレーナー型ショットキーよりも逆方向リーク電流密度が高い

逆バイアス印加時におけるダイオードの熱安定性を決定する要因は実際のリーク電流ではなく、温度上昇に対するリーク電流の増加率です。図6のグラフは図5のY軸にプロットされた電流密度を温度変化で微分したもので、温度上昇に対するリーク電流の増加率を表します。逆方向リーク電流密度は温度に対して指数関数的に増大するため、その変化率も指数関数的に増大します。したがって対数グラフでは直線になります。しかしダイオード技術間の順位は変わらず、熱安定性が最も高いのはSiGeと超高速リカバリ・ダイオード、最も低いのは低 V_f プレーナー型ショットキー・ダイオードです。

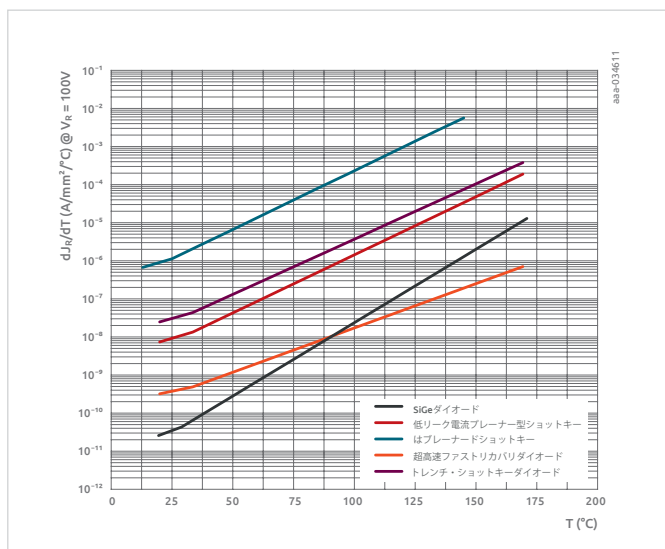


図6: 100V逆バイアス印加時のリーク電流の電流密度とジャンクション温度 T_j

パッケージの種類がSOAに与える影響

特定の技術で製造されたダイオードのパッケージ・タイプがSOAにどのような影響を及ぼすかを探るには、安定係数を用いて比較します。ここでもダイサイズの影響を排除するために電流密度を使用します。これは正規化された電流とも言い換えられます。これにあわせて、熱抵抗も正規化する必要があります。熱抵抗はパッケージのフットプリント面積で正規化されます（単位面積当たりの熱抵抗として計算に使用）。これらの数値を使用し、任意の逆バイアス電圧に対する安定係数は以下の式で求められます。

$$\frac{dJ_R}{dT} \times V_R \times R_T$$

この式で計算した結果、値が1未満ならシステムは熱的に安定していることになります。逆に1よりも大きいシステムはやがて熱的に不安定になります。SOT23パッケージにおける各技術の安定限界を示したのが図7です。比較のため、標準フットプリントと単層PCB上のSOT23の $R_{th(j-a)}$ はSOT23の推奨フットプリントで正規化しています。この動作条件において、100V逆バイアスを印加したプレーナー型低電圧VFショットキー・ダイオードは熱暴走しない最大ジャンクション温度 T_j が41°Cであることが分かります。一方、SiGeダイオードと超高速リカバリ・ダイオードはジャンクション温度 T_j 150°Cを超えても熱安定性を維持しています。

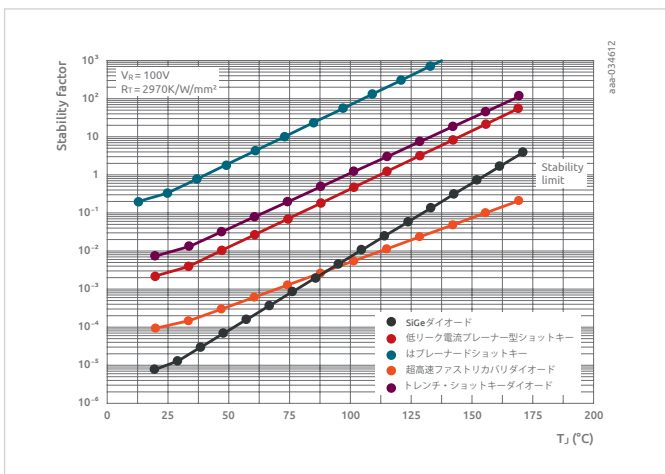


図7: SOT23パッケージ、逆電圧100Vにおける各テクノロジーの安定係数

図8はDFN1110D-3 (SOT8015) パッケージで同様の比較を行った結果を示しています。逆電圧100Vにおける低電圧 V_f プレーナー型ショットキーの安定限界は $T_j=62^\circ\text{C}$ に上昇しています。この結果はDFNパッケージの優れた熱挙動を示しています。DFNの $R_{th(j-a)}$ はSOT23パッケージより大きいですが、フットプリントがはるかに小さいことを考えると、非常に優れたPKGと言えます。

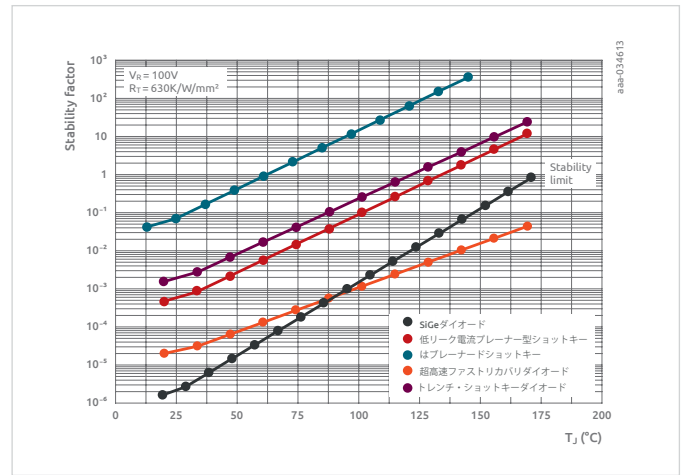


図8: DFN1110D-3 (SOT8015) パッケージ、100Vにおける各テクノロジーの安定係数

まとめ

一般的に、ダイオードは逆バイアスを伴う、温度に敏感なアプリケーションで使用します。ダイオードの動作をSOA内に収めるにはその熱に対する挙動を理解する必要があります。このホワイトペーパーでは高温・逆バイアス時の・ダイオードの性能を検証し、熱暴走の概念を紹介しました。さらに、ダイオードのSOAを計算する方法を示した後、デバイスの発熱に影響を与える要因（ウェハのテクノロジー、パッケージの種類など）について検討しました。SiGeテクノロジーはファストリカバリ・ダイオードとショットキー・ダイオードの欠点を補い、リーク電流 (SOA) と順方向電圧降下のトレードオフを改善します。SiGeダイオードは車載アプリケーションでのサージ電流に対して優れた堅牢性をもちます。

Nexperiaについて

オランダに本社を置くNexperiaはヨーロッパでの長い歴史を持ち、欧州、アジア、米国で15,000人以上の従業員を擁するグローバルな半導体企業です。エッセンシャルな半導体の開発・製造におけるエキスパートとして、自動車、産業からモバイル、コンシューマ向けアプリケーションまで、あらゆる電子機器の基本機能を実現する部品を提供しています。世界中のお客様に向けて製品、サービスを提供しており、製品の年間出荷個数は1,000億個以上に及びます。Nexperiaの半導体はプロセス、サイズ、消費電力、性能などにおいて高い評価を得ています。充実したIPポートフォリオ、製品ラインナップの拡充、IATF16949、ISO9001、ISO14001、ISO45001規格への準拠など、半導体メーカーとして必要な革新性、効率性、持続可能性、厳しい要求事項への対応に注力しつづけます。

お近くの営業拠点は[こちら](#)から。

© 2023 Nexperia B.V.

All rights reserved. 著作権所有者の書面による事前の同意なしに、全部または一部を複製することは禁止されています。本書に掲載の情報は正確で信頼できる内容ですが、いかなる見積書や契約書を構成するものではありません。また、予告なしに変更されることがあります。Nexperiaは本書の使用によって生じるいかなる結果に対しても一切の責任を負いません。本書の出版は特許権あるいはその他の産業または知的財産権に基づきいかなるライセンスも譲渡、またはそれを示唆するものでもありません。

nexperia.com

発行日

2023年6月

