International
IOR Rectifier

APPLICATION NOTE

アプリケーション・ノート：AN-1140

International Rectifierの大型半導体パッケージの連続DC定格電流

K. Teasdale著
主任エンジニア
International Rectifier社
2009年5月1日

目次

ページ
第1章：従来のパワー半導体の定格電流 ····· 2
第2章：定格電流 - 接合部の温度 ····· 3
第3章：定格電流 - ボンディング・ワイヤの温度 ····· 3
第4章：定格電流 - リード接続部の温度 ····· 5
第5章：実装方法の影響 ····· 6
第6章：定格電流要因に関する4つの研究 ····· 7
第7章：「究極」電流の評価 ····· 13
第8章：パワーMOSFETに流せる電流値は？ ····· 15
第9章：まとめ ····· 18

第1章：従来のパワー半導体の定格電流：

最近のディスクリート・パワー半導体業界では、低オン抵抗デバイスのDC定格電流をこれまでにないレベルまで引き上げる傾向にあります。パワー・トランジスタ・メーカーがより高電流／低耐圧の設計を導入するにつれ、この傾向は加速してきました。当初数十年前は、約10アンペアのDC電流向けであったJEDECパッケージ設計が、現在100アンペアを実現できる設計として浮上しつつあります。これは、パッケージ材料/設計が大幅に改善されたためでしょうか、それとも売り込みのトリック的手法でしょうか。どちらも完全とは言えませんが、正解です。

どのようなパッケージの通電性能も、最終的には温度という要因に依存します。また、不動産と同様に、この要因は場所によって異なります。ここで対象とする温度は、実際はパッケージ上の3つの異なる場所での温度です。これらの中で最も重要な場所は接合部です。連続定格電流の場合、デバイスのオン抵抗による、I^2Rジュール熱により接合部の温度が決まります。シリコン・ダイのオン抵抗は、ベンチマークでは、1ミリオーム未満になりました。抵抗を低くするということは、より多くの電流が流せ、伝導損失による発熱が減らせることを意味します。この改善により、並列で使用するデバイス数を削減できます。デバイスが以前の世代よりも多くの電流を流すことができれば、コンポーネント・コスト、アセンブリ・コスト、およびヒートシンク・コストの削減、およびPCBの有効利用ができるようになります。IRアプリケーション・ノート：AN-949[1] で説明したように、これまで接合部の温度は電流制限を設定する際の基準となっていました。しかしながら、低抵抗シリコン設計と製造技術への移行に伴って、パッケージ上の他の2つの場所を考慮する必要がでてきました。

デバイスにおいて高電流が流れる場合の他の2つの場所とは、温度制約にとって重要なものとして、内部のボンディング・ワイヤ、およびパッケージ・リードと基板（通常はプリント基板）の接続部です。これらの場所の温度を無視すると、アプリケーションにおいて長期信頼性を損なうことがあります。

IR社は、ディスクリート製品のパワー・パッケージで「究極電流」と呼ばれるものを定義します。この究極電流とは、「特定のパッケージにおいて放熱がほぼ理想的な状態で耐えうる最大電流」です。IR社での究極電流の測定で使用した方法は、核沸騰不活性液体への部品の完全浸漬です。核沸騰は、熱い物体から熱を取り除くのに大変効果的な手段です。実際には、より効果的な熱除去の方法[2] がありますが、ここで採用した方法は、新しいシリコン・プラットフォームの能力を示すためにより適しています。実際に当社の製品を、究極電流レベルの電流をターゲットとしたアプリケーションで利用することは、コストが高く、実用的でない可能性があります。核沸騰は、高価で手間のかかる方法です。ただし、この概念を使用する目的は、パッケージの電流性能の上限値を提示、実用的な制限値を提案、そしてユーザーが独自の最大電流を評価する方法を

提供することです。形状、配線、および熱管理は、パワー・エレクトロニクスでコストを削減して効率を向上させるという戦いの主な要因ですが、中でも温度管理への注意が極めて重要です。

第2章 定格電流 - 接合部の温度

接合部の最高温度$T_{J\,max}$によって制限されるデバイスの最大定格電流の従来の計算式は、ヒートシンクが25ºCに完全に保たれた状態でのものです。したがって、パワーMOSFETの定格電流Id（連続）は、以下のようになります。

$$I_{D\,max} = \sqrt{\frac{T_{J\,max} - T_C}{R_{DS(on)} R_{\theta(JC)}}} \qquad \text{式1}$$

ここで、$R_{DS(on)}$ は、定格$T_{J\,max}$ でのオン抵抗の値、T_Cは、25ºCに設定されたケース温度、$R_{\theta JC}$は、ダイの上部（接合部）と裏面（ヒートシンク中央）間の熱抵抗の最大値です。この方法によるI_{Dmax} の設定は、パワーMOSFETに限り有効でした。ケース温度を25ºCに保持するために必要な水冷ヒートシンクを使用して、この最大電流を流そうとするユーザーはほとんどいません。また、接合部の温度を$T_{J\,max}$で使用とするユーザーもほとんどいません。熱抵抗$R_{\theta ha}$ の典型的なフィン付き空冷ヒートシンクを使用し、特定のアプリケーションで設計者が独自のディレーティングしたI_{Dmax}（I_{Dgb} と呼ぶ）を求める、より実用的な方法は、以下のとおりです。

$$I_{Dgb} = \sqrt{\frac{T_{Jgb} - T_A}{R_{DS(on)}\left(R_{\theta(JC)} + R_{\theta(CS)} + R_{\theta(ha)}\right)}} \qquad \text{式2}$$

ここで、T_{Jgb} は、ディレーティング時の最大温度（50～75% $T_{J\,max}$）、$R_{\theta(CS)}$ は、ケースとヒートシンクの間の熱抵抗です。

第3章 定格電流 – ボンディング・ワイヤの温度

IR社の一部のTO-220パッケージパワーMOSFETでは、オン抵抗の30%がボンディング・ワイヤの抵抗によるものです。この割合は、新しいシリコン設計によりオン抵抗が低下するにつれて増えてきます。これらのデバイスがダイ内の電力損失により消費電力の限界に達するのであれば、ボンディング・ワイヤとリードでの新しい熱管理の方法を説明しなければなりません。複数個所での電力消費により、これまで簡単なパッケージであったものが複雑になります。

パッケージ内部のアルミニウム・ソース・ボンディング・ワイヤによって発生する熱は、ワイヤの両端から軸方向およびエポキシ樹脂から放射状方向の3方向に流れます。効率よく放熱されない場合は、ボンディング・ワイヤ内の温度が高くなります。ボンディング・ワイヤの温度が上限のアルミニウムの融点（660ºC）に達すると、溶断し電流の流れが止まり、部品が機能しなくなります。

当社の既存のパッケージで使用されているエポキシ樹脂は、ボンディング・ワイヤから周囲に放射状に放熱することで、ボンディング・ワイヤが流せる最大電流と最大パワーを大きくします。これは、ボンディング・ワイヤが大気中に露出している場合を上回ります。この効果は、溶断電流性能に反映されます。図1は、1996年以来のIR社の3種のパッケージの溶断電流に関するデータで、大気中またはエポキシ樹脂で囲まれたさまざまな直径のワイヤを比較しています。

さまざまな直径のアルミニウム・ボンディング・ワイヤの溶断電流
実線は、Preece 式への適合を表す（3／2 乗）

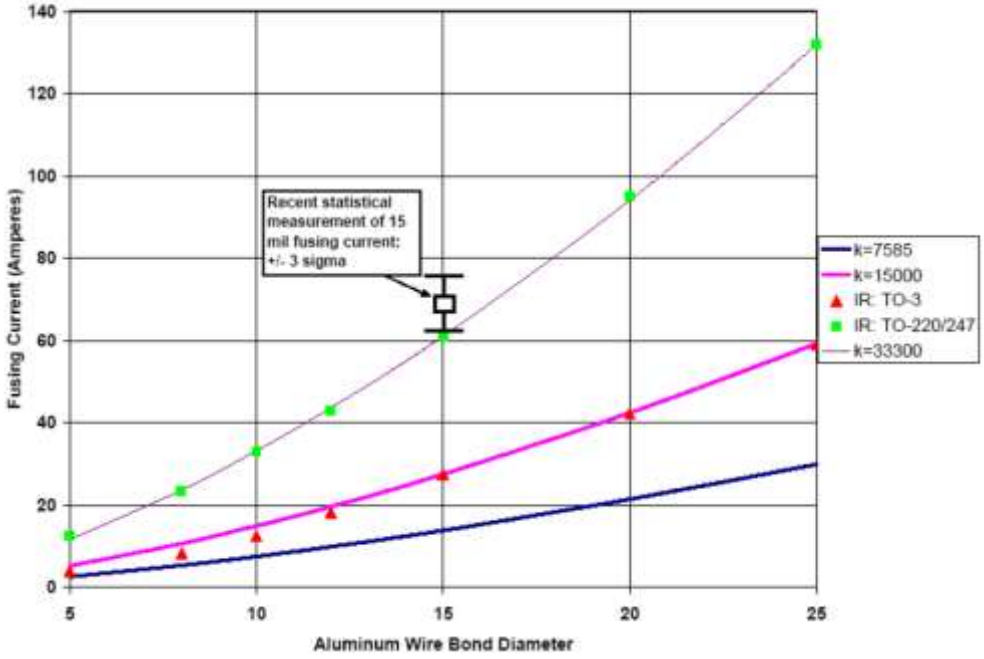


図 1. 大気中およびエポキシ樹脂内のアルミニウム・ワイヤの溶断電流

下の2つの実線は、アルミニウムに対して2つのk定数を使用したべき乗則[3] [$If = k \times D^{3/2}$]による値を示します。中央のマゼンタ色の曲線は、当社のTO-3ハーメチックパッケージの溶断電流性能と良く一致します（赤色の三角形）。ただし、エポキシ樹脂で同じボンディング・ワイヤを封止する場合、溶断電流定数は2倍を超えます（緑色の正方形）。統計的な幅を持った中央の単一のデータ点は、最近の実験から得られたもので、溶断電流の法則が今でも有効であることが確認されました。

図1で引用した同じ研究に基づくIR社の信頼性調査により、別の重要な結果が明らかになりました。それは、ボンディング・ワイヤでの発熱によりボンディング・ワイヤに接触しているモールド樹脂が、ガラス転移温度を超え続ける場合、ボンディング・ワイヤとエポキシ樹脂の界面で、時間と温度によってエポキシ樹脂の化学的結合が劣化するということです。この変化により、次

の2つの現象が発生します。最初に、ボンディング・ワイヤから放出される放射状の熱の流れを決定するエポキシ樹脂の熱抵抗が悪くなります。次に、この化学的プロセスは、通常堅牢なエポキシ樹脂の結合力を弱め､パッケージ内に水分とイオン性汚染物質が侵入しやすい状態にする可能性があります。これらの変化はどちらもよいものではありません。

このような理由により、IR社では、パッケージで、ボンディング・ワイヤの温度がモールド樹脂のガラス転移温度を超えることがないことを保証するようになりました。例えば、3本の直径0.38mm（15 ミル）ソース・ボンディング・ワイヤを使用したIRF3205 TO-220パッケージは120アンペア（ワイヤあたり40アンペア）を流すことができますが、パッケージ全体の制限として、控えめに75アンペアという制限が設定されました。

第4章 定格電流 - リード接続部の温度

半導体パッケージの熱性能がどれほど優れていたとしても､必ず外部に接続されているはずです。パッケージのリードと接続し、大きい電流を流す導体は、はんだ接続部で熱が発生する可能性があります。はんだ量と組成がはんだ接続部温度T_b に影響を与えることがあります。通常、金属導体間は、有機ベースの絶縁体で分離されています。そして、これらの絶縁体は、独自の温度制限があります。導体を機械的に支持する絶縁体が重要である場合は、導体によって発生する熱が絶縁体を軟化させてはいけません。この軟化は、通常、有機系材料のガラス転移温度（T_G）と相関があります。FR-4基板材料の場合、この範囲は110～130ºC です。ただし、220ºCを超える温度を許容する基板材料もあります。どのようなアプリケーションでも、リード／基板界面で使用される材料の中で最も低い定格温度により、ピーク温度が決まります。

1956年に元National Bureau of Standards（米国規格基準局）は、FR-4プリント基板の電流フローに関するガイドライン（IPC-2221/MIL-STD-275）を定めました。これらの数値（10～15 A/mm^2、内部レイヤ最大50% ディレーティング、および 5～10 A/via のビア・ホール）[4] は、1オンス銅の配線とPCBの裏面の1オンス銅に基づいて決定されています。これらの上限値は、FR-4のT_G に対応するはずでした。今日のパワー・エレクトロニクス業界は、温度を低く抑えたり、電流密度を上げる手段として、より多くの量の銅を追加しています。銅の量を多くしたり、複数または厚い銅層で構成することで、デバイスのリードの放熱量は多くなります。次の章で説明するように、この放熱により、高電流導体の接続部の温度は低くなります。

絶縁金属基板（IMS）などの他の新技術により、温度制約の多くは半導体パッケージ自体の問題となってきました。これらの回路基板導体部は電力を効率よく流すので、制限は再びパッケージ内の消費電力になります。

第5章 実装方法の影響

IR社におけるオリジナルのパッケージ定格電流の設定基準は非常に保守的でした。線をドレインとソース・リードの一端にはんだ付けし、ケースはヒートシンクなしです。当社の部品をこのように状態で使用するユーザーはほとんどいないでしょうが、このように取り付けることでも、信頼できる性能が保証されました。この分析は、露出されたボンディング・ワイヤの温度を、赤外線カメラで測定することに基づきます。ソース・ボンディング・ワイヤ付近のエポキシ樹脂をエッチングにより開孔することで、赤外線による温度測定が可能になりましたが、この方法では、観測された温度が逆に歪められた可能性があります（図1参照）。

最近、ボンディング・ワイヤの温度の測定について改良実験が試みられました。ボンディング・ワイヤの温度測定では、優れた熱電対をモールド樹脂の小さい穴に挿入し、ボンディング・ワイヤにバネ荷重を加えました。この熱電対は、2つの直径3ミルの熱電対線で構成されています。この穴は、ボンディング・ワイヤ表面から空気を除去するため、シリコン化合物で埋められました。この熱電対／シリコン構造の熱抵抗は、除去されたエポキシ樹脂の熱抵抗と同じでした。優れた熱電対を使用した装置を図2に示します。

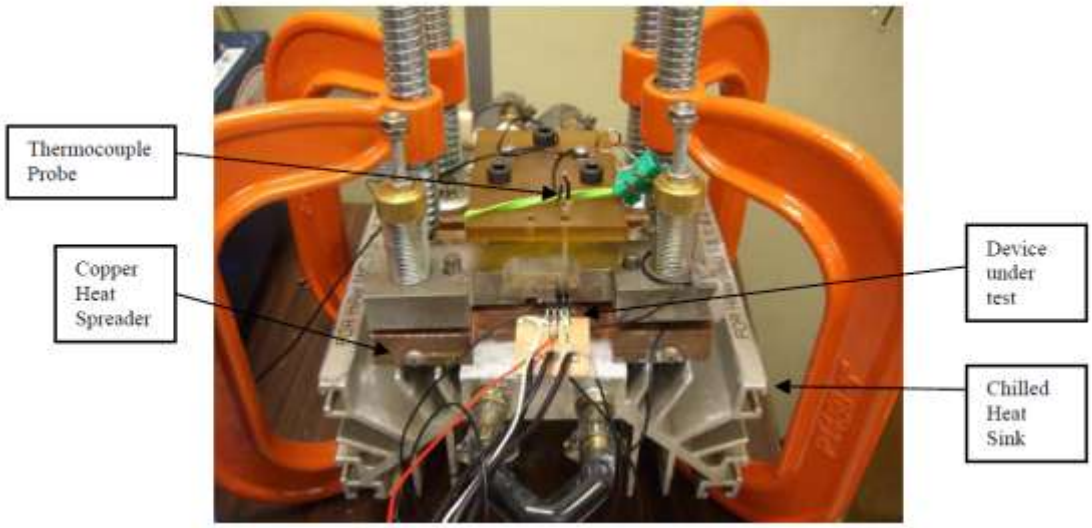


図 2. ボンディング・ワイヤ温度測定の実験装置

D^2Pakパッケージ内の2mΩのダイに接続するために、1本の直径15ミルのアルミニウム・ワイヤを使用しました。デバイスへは、2つの接続方法を使用して電流を流しました。パッケージのリードに太い線をはんだ付けするか、または2オンス銅の両面FR-4 PCB（上記参照）にリードをはんだ付けしました。

以下の図3に示すように、この研究では、温度プロファイル特性は、最大温度がボンディング・

ワイヤ部自体ではなく、リード部で発生していることを示しています。

図に示す5つの場所における温度測定

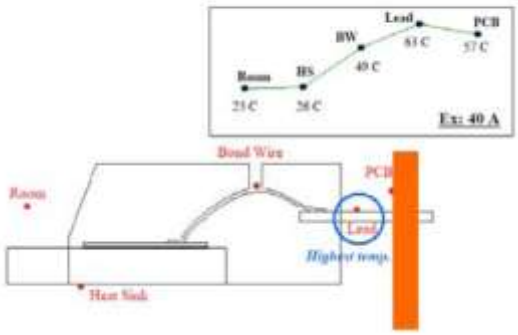


図 3. ワイヤの標準的な温度プロファイル

観測された温度プロファイルは、PCBスルー・ホール実装と表面実装の両方で、主要な熱源がリード、ボンディング・ワイヤ、および銅配線でのジュール熱であることを示しています。熱は、リードからPCBとダイの両方に伝わります。リードから大気への熱抵抗はおよそ10ºC／Wですが、リードからダイへのボンディング・ワイヤの熱抵抗は300ºC／W です。したがって、PCBで生成された熱は大部分がPCBから大気中に放出され、ボンディング・ワイヤを介してデバイスに伝わることはほとんどありません。この形状では、ボンディング・ワイヤが一本あるいは複数あるどちらでも、FR-4基板実装の温度にはほとんど影響しません。リードで発生した熱のほとんどは、リードおよびPCBから周囲に直接放出される必要があります。

第6章 定格電流要因に関する4つの研究

アプリケーションにおいて、パッケージに流れ込む最大直流電流は、部品の3か所（図4参照）の温度によって決まります。ユーザーは、パッケージが扱うことのできる電流容量をどのようにして事前に決定することができるのでしょうか。最も重要な温度である接合部温度T_Jは、ユーザーが温度上昇に影響する要因がわかっていれば式2で明確に定義できます。部品から回路基板への接触抵抗によって生じる、最も明確に定義できない温度T_b（はんだ接続部温度）は、完全にユーザーに委ねられており、ユーザーが定義します。この温度は、はんだの組成とはんだ量の影響を受ける可能性があります。3番目の、パッケージのリードの温度T_L は、パッケージごとに決定できます。次の章では、TO-220、TO-247、D^2Pak、およびTO-262パッケージの場合のこの温度を示します。この部分の温度は、接合部温度と無関係であることが分かっています。代わりに、この温度は、パッケージに流れ込む電流I_d とリード周辺の環境温度によって決まります。この結論は、一見直感に反しているように見えますが、以下に示す最近の4つの研究によるデータは、この見解を裏付けています。

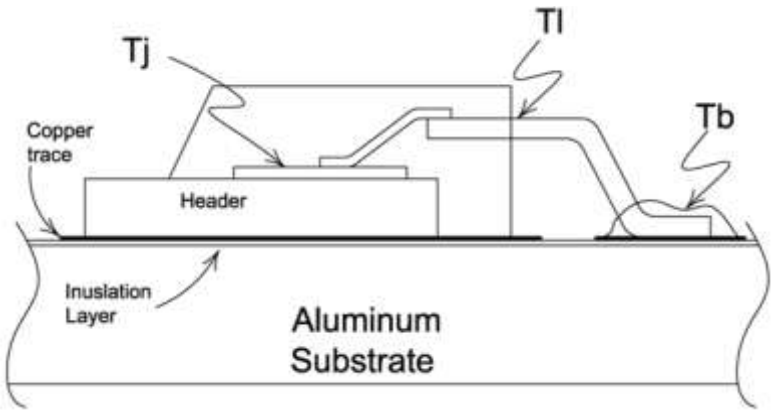


図 4. IMS 基板に実装した D²Pak の断面図

研究 1：ID 対 温度：大気／核沸騰

IRFS3006PbFをIMSアルミ基板にはんだ付けしました。これらのデバイスについて、静止大気中および核沸騰不活性液体中の2方法で、T_L 対I_D を測定しました。接合部温度は、I_D に応じたV_{DS} を記録した後、オン抵抗（V_{DS}／I_D）の増加をT_J^5 の増加と相関させました。リード温度は、エポキシ樹脂に接するリード部にはんだ付けされたT型細線熱電対を使用した8チャンネルUSB熱電対モニタを用いて監視しました。T_L 対I_D^2 およびT_J 対I_D^2 の結果を図5および6に示します。

T_L 対 ID^2
0.062インチAl IMS基板に取り付けたIRFS3006PbF

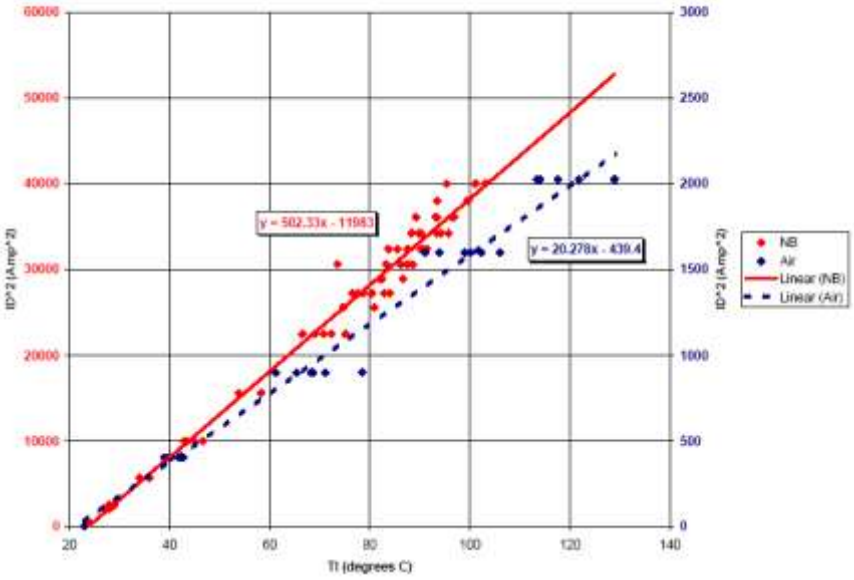


図5. IMS基板に実装したIRFS3006PbFデバイスのT_L 対 I_D^2

Tj 対 ID^2
0.062 インチ Al IMS 基板に取り付けた IRFS3006PbF

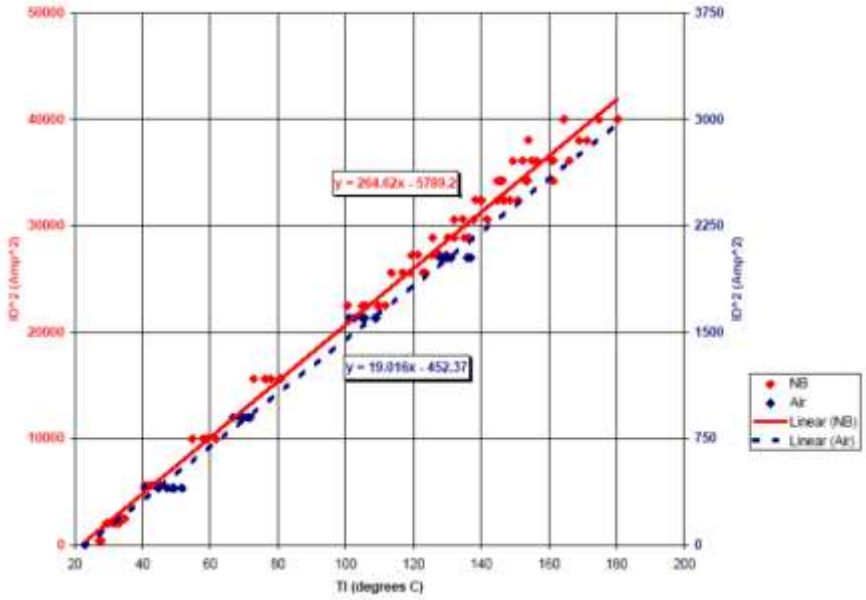


図 6. IMS 基板に実装した IRFS3006PbF デバイスの T_J 対 I_D^2

図は、温度対I_D^2 のプロットを線形LSF（予測式）とともに示しています。左右の目盛りが1桁以上異なっていることに注意してください。データの直線性は、温度がジュール熱による結果であることを示唆しています（$I^2 \times R_{DSON} \times Rth$）。赤色のデータ（23ºCの不活性液体槽にIMSを浸漬し核沸騰によって熱が除去される）とは対照的に、青色のデータ（静止大気）は、比較的低い電流（青色で示した右側の目盛り）でかなりの高温に達しています。

図5のデータの直線性は、2つのメカニズムで説明することができます。第1に、リードの温度は、線形であることが予想される接合部温度にただ従っただけという可能性があります。図6の接合部温度は、ボンディング・ワイヤの一端の温度を上昇させ、リードの温度もそれに伴って上昇させたと予想できます。第2に、ボンディング・ワイヤとリードで発生した熱は周囲に直接放散されるため、リードの温度がジュール熱曲線に従って上昇した可能性があります。後者の可能性を評価するため、次の章では、高温のT_Jを使用したデータとT_Jなしのデータを比較します。

研究 2：ID 対 温度：ダイあり／ダイなし

ここでは、2組の独立したデータを比較します。第1は、図5で示したIRFS3006PbF D^2Pak-7ピンのデータ（赤色）です。第2は、ボンディング・ワイヤ溶断電流に関する以前の研究のデータで、3006と同じボンディング・ワイヤ配置で、ダイのないTO-247パッケージを使用しています。TO-247のリードは、太い線にはんだ付けし、研究1の3006デバイスの核沸騰設定で使用したのと同じ核沸騰液体に浸漬しました。また、ワイヤ溶断の開始に先立って、核沸騰状態下でのリードの温度を測定しました。以下の図7に、T_L 対I_D^2 のデータを示します。

T_L 対 ID^2
0.062 インチ Al IMS 基板に実装した IRFS3006PbF（NB 液中）と
TO-247 ダイなしパッケージ（NB 液中）

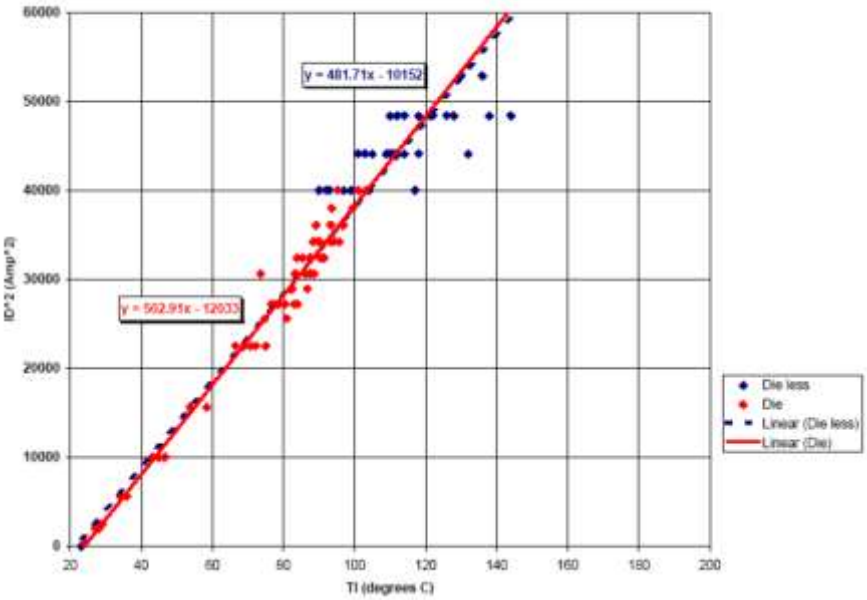


図 7. IMS 基板に実装した IRFS3006PbF デバイスの T_L 対 I_D^2（赤色のデータ）をダイなしの TO-247 パッケージ（青色のデータ）と比較。いずれも、不活性核沸騰液体に浸漬。

どちらのデータも、左側の縦軸の目盛りを参照しています。この図からは、データはどちらも同じ最小二乗法による直線上にあることが分かります。図7に示した2組のデータの主な違いは、パッケージ内のボンディング・ワイヤが高温のダイに接しているか（赤色のデータ点）、または冷えた銅のヘッダーに接しているか（青色のデータ点）です。

図7のTO-247ダイなしパッケージ内で消費される唯一の電力は、ボンディング・ワイヤ（最大0.25mOhm）とリードの抵抗によるものです。3006の電力消費は、主にダイ（最大1.0mOhm）によるもので、接合部で40～50ワットでした。どちらのヘッダーも背面の温度は、銅が液体の沸点に近い温度に保たれるため、80ºCを大きく上回ることはありません。しかし、ダイありのパッケージ内のボンディング・ワイヤの端は、ダイでの電力消費により20ºC高くなります。したがって、リードの温度T_L の上昇は、リード周辺の環境へのリードの熱放散の結果であり、ダイの接合部温度とは関係ないという結論が得られます。この結論は、極めて確固たるものです。特定のアプリケーション環境におけるI_D^2 対T_L の関係が分かれば、ユーザーは、モールド樹脂のT_G やPCBのT_{max} などの温度の上限値に基づいて、その使用時の最大電流を定めることができ、接合部温度は別に扱うことができます。

この説明はデバイスの物理的側面から考えて意味をなすものでしょうか。封止されたボンディング・ワイヤや接合部の温度を直接測定するのは困難な作業です。これには、適切な数値有限要素解析がある程度役に立つ場合がありますが、それが役に立たない場合は「第一原理」という定性的観点から状況を見ることができます。ボンディング・ワイヤ内で発生した熱は、中間点で最

高温度に達します。熱は、ダイとリードに向かって軸方向に流れるのだけでなく、外に向かって放射状にも流れます。長さが7mmの直径15ミル・アルミニウム・ワイヤの理論上の熱抵抗は、約300ºC／Wです。このようなボンディング・ワイヤ4本を使用した場合でも（「実際の」パッケージ改善策の1つ）、合計熱抵抗は75ºC／Wです。ダイの温度が上昇した場合、このボンディング・ワイヤに沿ってダイからリードへ流れる熱は、この大きな抵抗によって大きく妨げられます。リードの温度が、ボンディング・ワイヤに沿ってダイからリードに流れる熱に応じて大きく変化することはありません。しかし、リードの端近くのボンディング・ワイヤ内で発生した熱が、長さの短いボンディング・ワイヤを通じてリードに流れ出し、リードの温度を上げる原因になる可能性があります。ただ、リードの高温の主な源は、第5章で観察したように、リードのはんだ接続自体で発生する熱です。

研究 3：ID 対 温度：IMS／PCB（大気中）

2つの異なる実装方法について別の比較を行い、リードの対周囲間熱抵抗の寄与を調べることができます。図8では、2つの実装基板でI_D 対リード温度を比較しています。

T_L 対 ID^2
0.062 インチ Al IMS 基板に実装した IRFS3006PbF（静止大気中）と
FR-4 PCB に実装した IRF2804S（静止大気中）

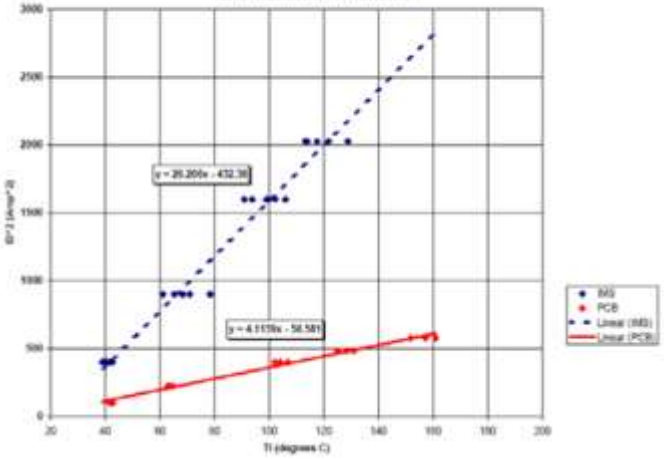


図 8. IMS 基板に実装した IRFS3006PbF デバイスの T_L 対 I_D^2 を FR-4 PCB に実装した IRF2804S と比較（静止大気中）

3006上のソース・リードはアルミIMS基板に熱的に接続されますが、2804上のリードは、小さい銅層に接続されるため、熱的には基本的に絶縁されています。2804S用に使用されるPCB配線は狭いため、相当量の熱がリードに対して発生した可能性があります。3ピン2804と7ピン3006ではソース・ピンに多少の違いがありますが、それぞれのパッケージの合計リード面積が、図8で明らかに分かる熱放散の400%もの改善の原因となっているとは考えられません。ここでは、IMS 搭載の高電流時の利点のほとんどは、リードから金属基板への熱放散にあるという結論が

得られます。

研究4：T_G制限の再検討（エージング品 対 未使用品）

この業界では、鉛フリーの部品に対する要請が高まり、ほとんどのメーカーはパッケージの変更を余儀なくされています。より高いはんだリフロー温度に対応するためのD^{2}Pakパッケージのモールド樹脂の変更は、今や別の懸念を生じています。これらのパッケージの新しいエポキシ樹脂のガラス転移温度は、デバイスのデータ・シートの$T_{J\,max}$ を下回っています。これらの製品は、鉛フリーはんだリフロー温度で堅牢であることが分かっており、すべてのAEC Q-101試験方式および他の信頼性試験の要件を満たしています。懸念されるのは、これらの新しいモールド樹脂の熱伝導率が、T_Gを超える温度にさらされたときに、時間の経過とともに変化するかどうかです。図9は、低いT_G の樹脂を、T_a = 175ºC 中に1000時間放置した後、電流ストレスを与えて、I_DとT_L を評価したものです。この結果は、新しいコンパウンドの熱伝導率は、T_Gを超える熱にさらされても低下しないことを示しており、90年代の元の観測結果と一見矛盾しているように見えます。データは、実際には、エージング品（T_a = 175ºC 中に1000時間放置）は未使用品のデバイスに比べて熱抵抗が低いことを示している可能性があります。

エージング品（A）対 未使用品（V）D^{2}Pak
核沸騰不活性液体に浸漬して測定した D^{2}Pak IRF2804L の
ダイとソース・リード間の温度差の依存性

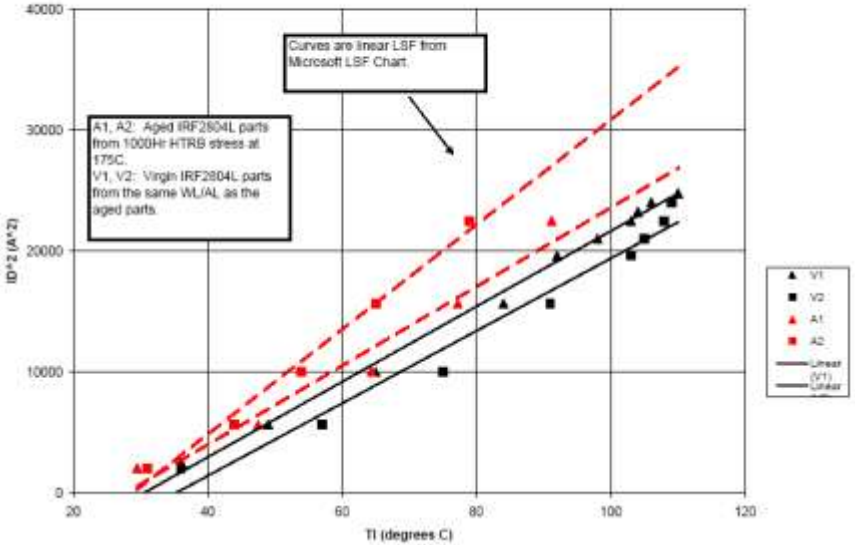


図 9. 175ºC の恒温槽に 1000 時間放置（エージング）した D^{2}Pak FET 2 個と同じロットの未使用品 2 個の比較研究。この目的は、エージング品では、I_D^2 に応じてリード温度が高くなるかどうかを調べることでした。エージング品のリード（赤色のデータ）は、同じ電流レベルで、未使用品のデバイスのリード（青色のデータ）と比べて低い温度を示しています。なお、パッケージはすべて同じ方法で取り付けました。

上記の研究は、エポキシ樹脂の熱伝導率の変化を定量的に示してはいませんが、異なる種類のモールド樹脂で以前行ったのT$_G$よりもさらに 40ºC高い温度中への1000時間の放置結果と逆のように見え、大きな違いです。熱伝導率の改善の可能性は、この温度では、モールド樹脂はボンディング・ワイヤ周辺で密度が高くなり、実際に放射状の熱の流れを改善していることを示している可能性があります。パッケージの定格電流に対する元のT$_G$の制限は、T$_G$が高温である素材、および＋200ºCを超える温度への放置によるものと思われます。したがって、接合部温度が依然としてパッケージの容量の上限となります。

第7章「究極」電流の評価

市場で公開されている驚くべきレベルの定格電流を示したデータ・シートがある中で、IR社のパッケージの究極の定格電流はどうあるべきかという問題が取り上げられました。IR社では、過剰な電流の量を決定する作業から調査を開始しました。調査方法は、複数パッケージで、ダイなしでさまざまなボンディング・ワイヤの配置を使用して組み立てるというものでした。次に、パッケージに損傷を与える電流の量を評価しました。

この評価では、ダイなしのデバイスを太い線にはんだ付けし、不活性液体中に浸漬しました。直流電流をドレインとソース・リードに3分間流し、時間ごとに電流を5アンペアずつ段階的に増加させながら、デバイスが壊れるまで流しました。記録する電流故障点は、最後に成功した3分間と見なしました。リードに沿って発生した熱は、沸点が80ºCの核沸騰により取り除かれました。標準的なパッケージにストレスを与えたほか、一部の部品にはエポキシ樹脂封止に先立って故意に損傷を与えました。この損傷は、ボンディング・ワイヤの1つを切断する、ボンディング・ワイヤのヒールの1つに傷をつける、ボンディング・ワイヤのすべてのヒールに傷をつけるなどです。この意図は、こうした不具合を、高レベルのテスター電流を使用した最終試験で検出できるかどうかを判定することにありました。

究極電流評価の結果

統計的に余裕度をもった評価結果を表1に示します。TO-220とTO-247については、直径20ミルボンディング・ワイヤが明らかに最大の究極電流容量を提供します。また、いずれの配置でも、ボンディング・ワイヤが失われると、究極電流容量が大きく低下する可能性があることも明らかになりました。幸い、この潜在的な不具合は、R$_{dson}$がアセンブリ・ロットのR$_{dson}$基準分布を外れて大きくなるので、高電流での最終試験で検出することができます。この研究に基づいて、すべての既存パッケージについての統計に基づく究極電流の上限値が、新しい高電流部品に適用されています。

Package	Wire Bond Diam	No. of Bonds-matrl.	"Ultimate" Current
TO-220AB	15 mil	4 Al	160 A
TO-247	15 mil	4 Al	160 A
TO-262/3	15 mil	4 Al	160 A
TO-220AB	20 mil	3 Al	195 A
TO-247	20 mil	3 Al	195 A
TO-262/3	20 mil	3 Al	195 A
TO-262/3	20 mil	4 Al	240 A

表 1. さまざまなボンディング・ワイヤ構成を持つパッケージの究極電流。リードの温度管理にかかわらず、上記のパッケージすべての推奨電流 75A です。

究極電流制限とディレーティング

それでは、究極電流制限の概念は何の役に立つでしょうか。アプリケーションにおいて、核沸騰液体に部品を浸漬して、パッケージのリードからの効率的に熱の除去を行おうとするユーザーはごくわずかです。これは、使用時の接合部およびリードの温度を制御するための推奨の解決策ではありません。究極電流は、"可能な限り世界で最高のシナリオ"のもとでデバイスに安全に流し込むことができる電流値の上限を定めるものです。この大きな値を従来の熱管理の観点から決定された公称レベルと組み合わせることで、すべてのメーカーのデータ・シートから実際の使用条件において、どれくらいの電流を流すことができ、そしてこの性能パラメータが敏感なものであるかがわかります。

ある意味で、パッケージの究極電流制限は、業界の"スペクスマンシップ"の一例です。しかし、この概念には、これを補う利点があります。将来発売される非常に低いオン抵抗の新製品は、新しい究極電流制限に基づいた素晴らしい製品になるでしょう。多くの設計者は、電流処理能力で、メーカー同士を比較する手段として$I_{D\ max}$ を使用します。この意味で、このパラメータにより、ユーザーは、このキーとなる値に基づいてさまざまな部品を比較することができます。また、パッケージの制約により定格電流が低く設定されていることで効率性の高さや動作温度の低さなどの潜在的な優位性がある高度な製品に対して不当な評価をせずにすみます。パッケージの究極電流容量よりも低い電流でデバイスの最大接合部温度に達する場合、データ・シートの定格電流は、従来の方法（式1）で決まります。シリコン・ダイが、従来のパッケージ定格電流でも$T_{J\ max}$ を超えることがないような非常に優れた性能の場合、データ・シートには、優れた特性として高い「究極電流」の値が記載されることになります（このアプリケーション・ノートへの参照）。

第8章 パワーMOSFETに流せる電流値は？

従来のパワーMOSFET製品は、式1で説明した古い方法で定格値を決めていました。それらは、非常に保守的なエンジニアリング側に立ったものでした。拡大しているIR トレンチ製品のような新しい高度な製品には、新しい究極の電流上限値が規定されるようになります。そこで、究極電流を実現できない場合、お客様はアプリケーションで安全に流すことができる電流値をどのように決定できるでしょうか。

この答えは、デバイスの使用方法、およびパワー・デバイスからの熱の流れに影響するアプリケーションの環境によって大きく異なります。リードの温度は、主に電流の二乗に比例して変化します。デバイスでより大きなドレイン電流が要求される場合、その熱抵抗は、使用される実装方法で評価される必要があります。

以下の手順に従うと、ユーザーは、アプリケーションでIR FETに流すことができる最大電流を直接かつ段階的に決定できます。

1. アプリケーションでのリードの最高温度を決定します。既に説明したように、このリードまたはリード接続部の最高温度は、通常、PCB材料のガラス転移温度に制約されます。この推奨値については、ご使用の基板メーカーのデータが最も参考になります。基板材料の最高温度がデバイスの$T_{J\,max}$ よりも高い場合、リードの最高温度は、規定値としてデータ・シートの$T_{J\,max}$ になります。

2. アプリケーションの電流が最大になるように基板を設計します。より多くの電流が必要な場合は、代替の材料を検討し、より多くの銅重量、より薄い絶縁層、およびより厚い銅層の使用を検討します。これらはすべて、表面温度を下げたり、基板配線の電流容量を上げるための方法です。Adam[6] は、PCBの電流容量を最大化するためのさまざまな方法に関するいくつかの考察を提供しています。

3. ラボで実装したデバイスのリード温度を測定します。これには、以下の手順に従う必要があります。

   a. いくつかの評価サンプルを作成します。実際の回路基板上にあるデバイスに電力を供給する最もよい方法は、ゲート端子は基板配線から外して、nチャネル・デバイスのソースに対しては、＋15ボルトDC電源で直接ゲートを駆動します。太い線をソースおよびドレイン・配線にはんだ付けします（デバイスの近くに、しかし近すぎないように）。そうしないと、線の熱で測定が干渉を受ける可能性があります。回路基板上で評価対象のFET以外の他の部品は、それらが電流を流す可能性があるために取り除いておくと役立つことがあります。

b. 熱電対を接続します。熱電対は、回路基板配線との接続部近くのソース・リード（T_b）とパッケージ本体近くのソース・リード（T_L）にはんだ付けします。熱電対によりリードから熱が取り除かれるのを最小限にするために、熱電対を選択するか、細線から作成します。T型熱電対は、対象温度範囲内で最もよい精度を提供します。熱電対には用心が必要です。2本のワイヤの最初の接触点がリードの位置ではんだによって覆われている必要があります。そうでない場合、接触点が基準の温度になります。空気にさらされている場合は、より低い値が示されます。放射率が上がるようにリードが「黒く塗られ」ており、焦点がリード上の小さい領域に設定され、システムが校正されている場合は、非接触方法も温度の測定に役立ちます。

c. DC電流を流します。アプリケーションが強制空冷の場合は、この冷却を最悪の条件で動作状態にします（最低のCFM、最悪の形状）。DC電圧でゲート回路にバイアスを与え、FETをオンにします。次に、可変出力定電流電源でドレイン電流を流します。電源は、アプリケーションでのターゲット電流を流すことができる必要があります。

d. T_L およびT_b 対電流を測定します。さまざまな電流でいくつかの測定を行います。電流、およびリードとはんだ接続部の温度を記録します。各電流レベルでシステムを少なくとも3分間そのままの状態にしておきます。はんだ付けされた熱電対が外れた場合、それは、電流が大きすぎるという分かりやすい指標です。ドレインへの別の接続がある場合は、ドレイン・ソース間電圧の記録が可能です。$R_{ds(on)}$ の変化を計算し、参照5で示したように、データ・シートに基づいてT_J との相互関係を明らかにします。このV_{ds} 測定値のソースケルビン基準点として、ソース・リードに接続されたT型熱電対の銅線を使用できます。

e. データをプロットします。スプレッドシートを使用して、図10（図5の複製）で練習用に示したように、データ点をプロットし、電流の二乗とT_L 測定値をプロットします（このアプリケーションではT_b はT_L とほぼ同じであることが判明した）。この例では、IMS基板でIRFS3006PbFを空冷としました。青色の点線は、当社のラボ・データでの最小二乗法による中央値です。TableCurve2D® のようなソフトウエア・パッケージを使用して、[median – 99.99%]を表すLSFを計算できます（マゼンタ色の実線を参照）。当社使用IMSのメーカーによると、IMS上の絶縁は、150ºCでのみ評価されました。リード温度の限界値としてこの温度を利用し（パッケージのエポキシは175ºCで評価）、緑色の縦の矢印で描画します。次に、緑色の矢印とマゼンタ色の線の交点から赤色の横矢印で描画してI_D^2 の統計的な限界値を示します。この値は、約2000です。これは、このアプリケーションの電流の限界値である45アンペア（2000の平方根）になります。このI_D は、部品270Aの定格をはるかに下回っていますが、データ・シートの定格電流は、シリコンの限界値に基

づいています。 表1から、この部品の究極電流は195Aです。明らかに、ソース・リードのジュール加熱を減らしたとしても、45Aを超える電流でこのデバイスを安全に使用するには程遠いものがあります。

T_L 対 ID^2

0.062 インチ Al IMS 基板に取り付けた IRFS3006PbF

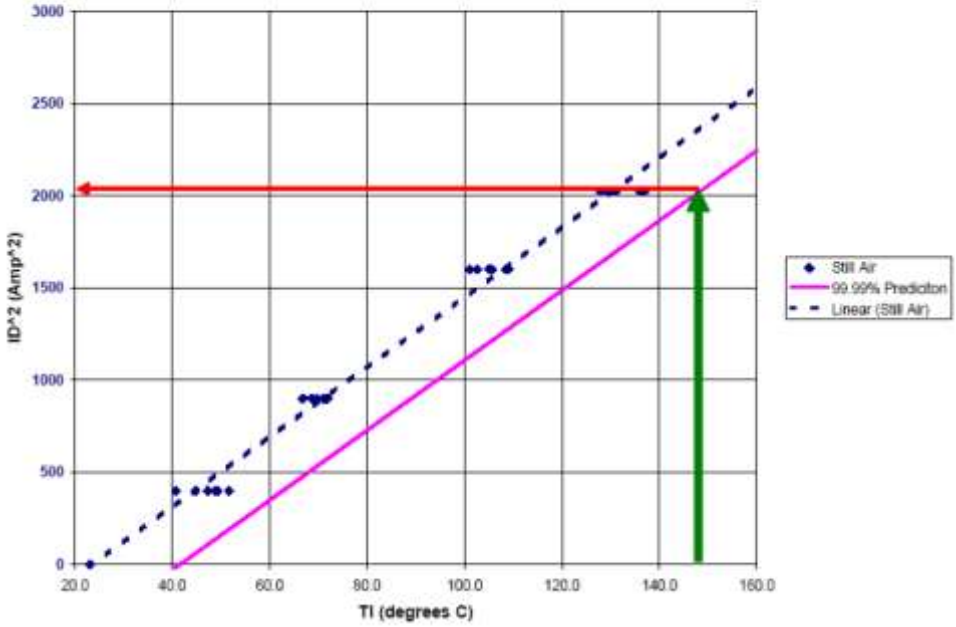


図 10. ソケットの最大 I_D 計算の例

まとめ

任意のメーカー提供のFETに流すことができる連続DC電流の最大値は、コンポーネント仕様の大見出しにある公称$I_{D\,max}$ であることはほとんどありません（特に、低電圧高電流デバイスの場合）。電流値に対する主な制約は、プリント基板へのソース接続による温度です。ユーザーは、PCB選択の際にどのような温度制約が存在するかを認識している必要があります。パッケージ性能と使用時の性能に影響を与える詳細について概説しました。特定のパッケージと実装方法の典型的なサンプルをいくつか提示しました。ソース・リードから周囲への熱抵抗を最終的に決定するには、特定の実装方法で直接測定する必要があります。この現場で実施する評価方法を提示しました。

---

1 Application Note 949, “Current Rating of Power Semiconductors”, available at http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-949.pdf.

2 Iversen, A.H., Whitaker, S., “Uniform temperature, ultrahigh flux heat sinks using curved surfacesubcoooled nucleate boiling,” 5th IEEE SEMI-THERM Symposium, 1989, Feb 1989, pp. 88-92.

3 C.f. various Engineering manuals, originally derived by Sir W. H. Preece, “On the heating effects of electric currents,” *Proc. Royal Society*, vol. 36, pp. 464, 1884.

4 Adam, J., “New Correlations Between Electrical Current and Temperature Rise in PCB Traces,” 20th IEEE SEMI-THERM Symposium, 2004, Mar 2004, pp. 292-299.

5 IRFS3006PbF data sheet, figure 4, “Normalized ON-Resistance vs. Temperature,” p.3.