International
IOR Rectifier

APPLICATION NOTE

アプリケーション・ノート：AN-1059

DirectFET® 技術 熱モデルと定格計算ツール

目　次

ページ

はじめに…… 2
等価回路…… 3
　熱抵抗値…… 3
　分析…… 3
定格計算ツール…… 5
　使用上の注意…… 5
　定格計算ツールの入力…… 5
　定格計算ツールの出力…… 5
　冷却のタイプ…… 6
結果の検証…… 6
　モデル…… 6
　値…… 7
熱抵抗値…… 8
　シャーシまたはケース冷却を使用する場合…… 8
　追加DirectFET缶冷却を使用しない場合…… 8
　定格計算ツールの使用例…… 9
まとめ…… 9
付録A…… 10
　式1…… 10
　式2a…… 10
　式2b…… 10
付録B…… 10
付録C…… 11
付録D…… 11

DirectFETの熱的性質は、基本的に業界標準の封止型電力半導体とは異なります。その構造は、ダイからの逆方向の熱放散を促進し、基板パッド接続（ソースとゲート）とデバイス上部の金属缶の両方を通じて冷却します。缶 - 周囲（アンビエント）間の熱伝導は、ヒート・シンクの取り付けにより最大化されます。

© インターナショナル・レクティファイアー・ジャパン

この文献の無断複製・転載を禁じます。

はじめに

TO-220やD-Pakなどのパッケージに封止した電力半導体は、熱モデル化が非常に簡単で、熱パラメータを1つしか使用しません。シリコン・チップ内で発生する熱の大部分は、一方向に移動すると仮定します。シリコン・チップは、外部への主な冷却パスとなるリードフレームにはんだ付け(またはエポキシ樹脂接着)されるため、この仮定は妥当です。ダイは封止材の「プラスチック」で絶縁されるため、逆方向の熱の流れは制限されます。リードフレームから外部への放熱は通常、ヒート・シンクの装着により強化されます。

DirectFET® は、これとは基本的に異なります。その構造は、ダイからの逆方向の熱放散を促進し、基板パッド接続(ソースとゲート)とデバイス上部の金属缶の両方を通じて冷却します。缶 - 周囲間の熱伝導は、ヒート・シンクの取り付けにより最大化されます。缶の設計も、缶から基板までの並列または分流の熱経路になります。

図1は、DirectFETデバイスからの熱の流れの方向と、このデバイスを使用する場合のおおよその熱等価回路です。

DirectFETデバイスの熱抵抗の測定は、必然的に、シリコンによって消費された合計電力を使用し、接合部、缶、基板で測定される温度を複合した結果になります。これは、特定の冷却条件下で有効な熱抵抗であり、他の条件下で当てはまる値ではありません。

両面冷却条件の値を決定する場合に最も重要な要素は、ヒート・シンクと基板の熱抵抗です。これらを正確に評価するには、各パスを通過する電力フローを知る必要があります。これには、パスを通過する電力フローの割合を予測する方法が必要です。缶と基板の温度は、缶と基板をさまざまなレベルで冷却することにより変化します。実際、それがDirectFET構造の特長であり(シリコン・ダイの両面から冷却可能)、特別な利点となっています。

このアプリケーション・ノートでは、DirectFETデバイスの各面からの電力フローの割合を評価する簡単な方法を説明します。これにより、適切な熱抵抗の値を使用し、正しい定格を正確に決定できるようになります。

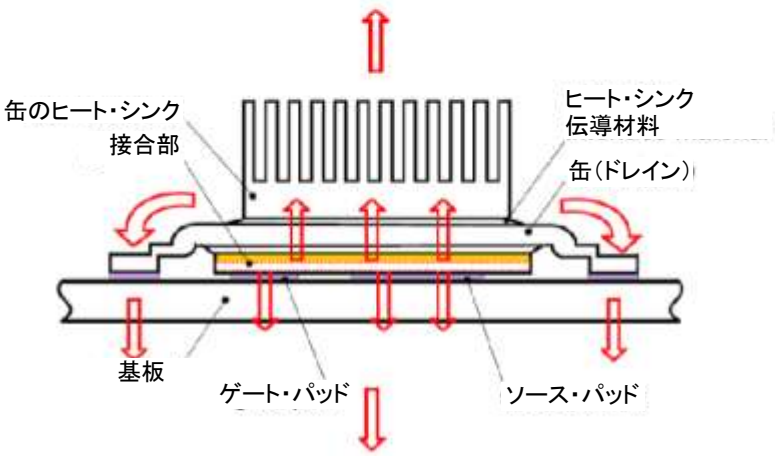


図1a:熱の流れる方向(赤の矢印)

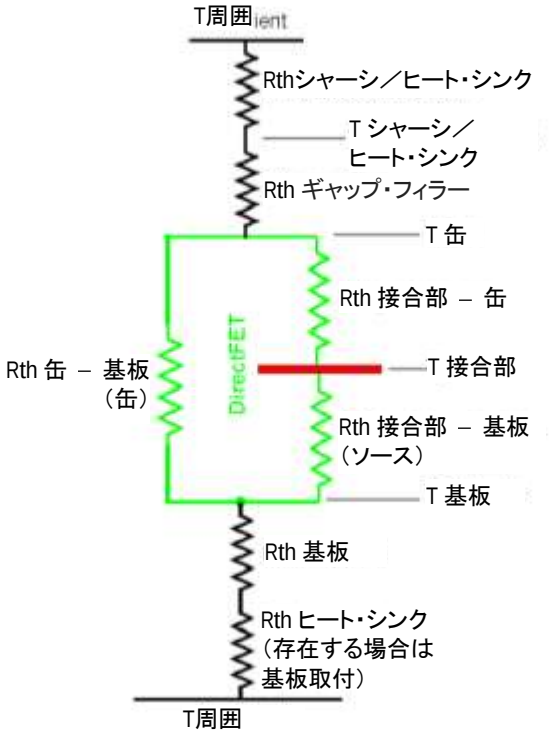


図1b:熱等価回路の概略図

等価回路

熱抵抗値

現在使用できる熱モデリング・ソフトウェアでは、冷却システム全体のあらゆるポイントの温度を予測することが可能です。しかし、多くの回路設計者はそうしたソフトウェアを利用できず、また考えられる冷却のそれぞれについて、膨大な計算に時間を費やすわけにもいきません。

こうしたことがらを念頭に置き、インターナショナル・レクティファイアー社は、DirectFETデバイスの等価熱抵抗値を提供しています。これらをオンラインの定格計算ツールに入力すると、あらゆる組み合わせの基板と缶の冷却条件において、デバイスで消費できる最大許容電力がすばやく表示されます。

図2は、3つのパラメータ(R1、R2、R3)とDirectFETデバイスの物理構造との関係を示しています。それらの値は、デバイス構成に使用される材料の寸法と伝導率の組み合わせから導かれます。

右の表は、DirectFETデバイス(鉛および鉛フリー変形の両方)の電流範囲に対するこれらの等価熱抵抗値を示しています。

分析

DirectFETデバイスの等価熱回路(図3の緑の回路)を分析します。分析は、缶と基板への追加冷却抵抗パスも含みます(図3の上下の黒い回路)。

熱抵抗R_C は、缶の表面から周囲冷却媒体に至るパスの熱抵抗の合計値です。この値は、このパスに取り付けられた絶縁または装着材料に起因するすべての界面抵抗を含む必要があります。

熱抵抗R_S は、DirectFETデバイスの裏側から基板を経由するパスの熱抵抗の合計値です。この値は、基板のヒート・シンクを含むことができます。

図3の情報を使用して、インターナショナル・レクティファイアー社は、すべての電力フローの制約を満たす式を作成しました。これが、付録Aの式1です。要約すると以下のようになります。

$T_J = fn(W, TA, \alpha, \beta, \delta, \gamma, \varsigma, \Phi)$

アウトライン	缶のサイズ	R1	R2	R3
非PbFデバイス				
SH	小	1.39	3.47	0.98
SQ	小	1.14	3.47	0.98
ST	小	1.08	2.58	0.98
MN	中	0.43	0.97	0.80
MQ	中	0.99	2.60	1.10
MT	中	0.33	0.97	0.80
MX	中	0.50	1.50	0.80
PbFデバイス				
SH	小	2.96	3.48	0.98
SJ	小	2.05	2.22	0.98
SQ	小	2.43	3.48	0.98
ST	小	2.36	2.58	0.98
MN	中	0.91	0.97	0.80
MP	中	2.26	2.58	1.54
MQ	中	2.07	2.58	1.54
MT	中	0.71	0.97	0.80
MU	中	1.91	2.58	1.54
MX	中	1.04	1.18	0.98
MZ	中	1.62	0.97	0.80
S1	小	4.18	3.43	1.53
S2	小	2.35	4.55	1.60
SB	小	2.68	2.47	1.05
M2	中	2.09	1.03	1.33
M4	中	1.27	0.68	0.80
L4	大	1.06	0.56	1.06
L6	大	0.80	0.44	0.56
L8	大	0.65	0.25	0.49

評価には次の2つのオプションが使用できます。

- 伝導損失とスイッチング損失の双方が大きいアプリケーション(DC/DCバック回路やその他の高周波回路など)では、最大許容定格電力を与えるように式を調整することができます。付録Aの式2aを参照してください。
- 低周波アプリケーション(30～50 kHz未満)では、伝導損失のみ考慮する必要があり、最大許容定格電力を与えるように式を調整することができます。付録Aの式2bを参照してください。

注:スイッチング電力損失の詳細情報は、インターナショナル・レクティファイアー社のデータ・シートに記載されています。たとえばIRF6607 DirectFET(PD-94574A)の情報は次のサイトをご覧ください:
www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf6607.pdf

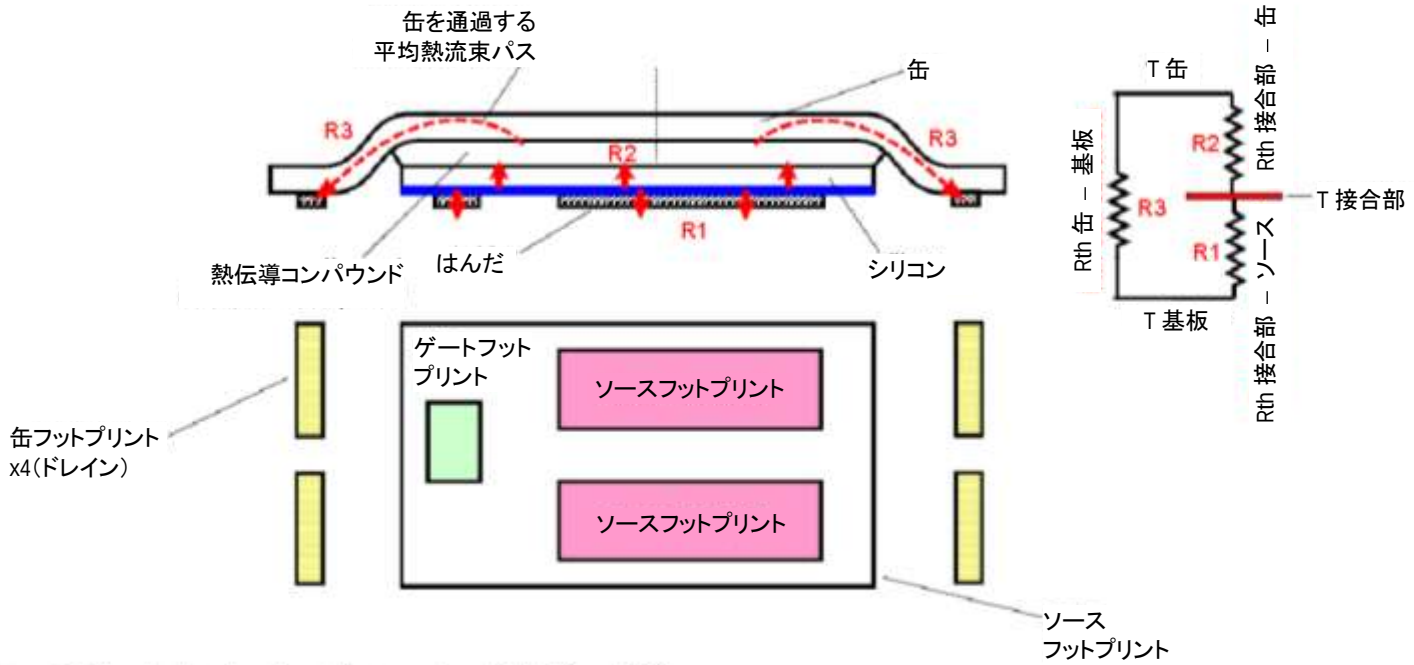


図 2: パラメータ R1、R2、R3 の物理構造

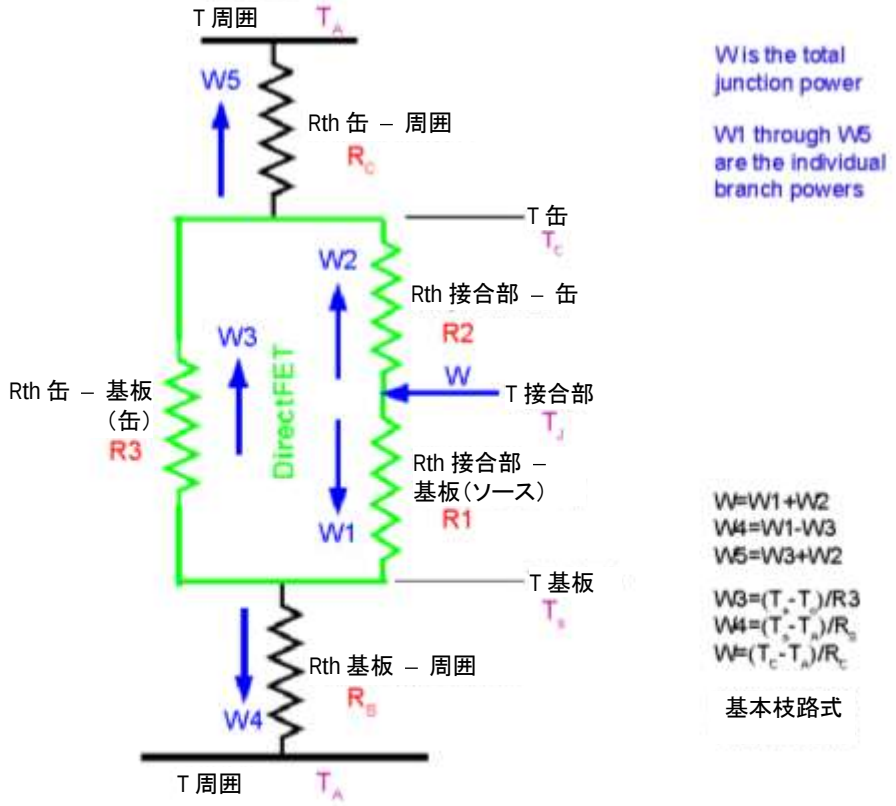


図 3: 基本的な熱等価回路

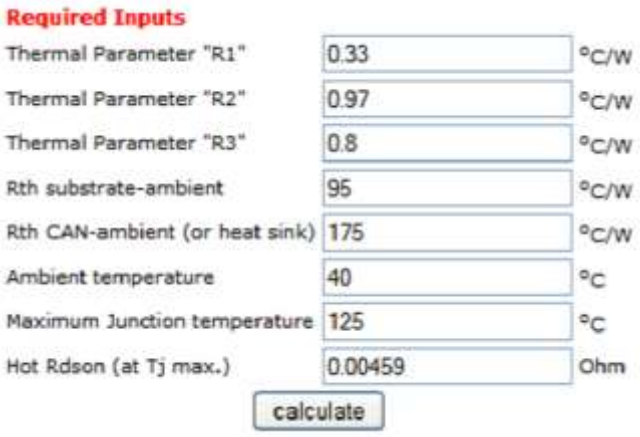
定格計算ツール

DirectFET定格計算ツールは次のサイトで利用できます。
www.irf.com/product-info/hexfet/thermalcalc.html
定格計算ツールは、付録Aの式を適用します。このツールは簡単なな表入力形式を使用し、迅速かつ正確な計算に役立ちます。

使用上の注意

- 高周波アプリケーションでは、**最大許容電力**に返される値を使用します。
- 低周波アプリケーションでは（スイッチング損失が大きくない場合）、$R_{DS(on)}$ の最大値を入力して、**最大許容電流**に返される値を使用します。
- 製造元の材料データから基板の熱抵抗の値を取得し、デバイスのフットプリント、ボードの厚さ、定格電力に対して適切であることを確認します。
- 製造元の曲線からヒート・シンクの熱抵抗の値を取得します（必要に応じてヒート・シンク接触部を含めます）。
- 付録Bは、シャーシまたはケースを通じて缶を冷却するアプリケーションのガイダンスを示します。
- 付録Cは、ヒート・シンクを追加しない小または中サイズの缶のガイダンスを示します。
- ファンまたは強制冷却を使用する場合、熱抵抗は電力によっては変化しない傾向にあります。これにより、定格計算ツールが使用しやすくなります。
- 熱抵抗が電力によって大幅に変化する場合は、缶と基板を通過する相対電力フローを評価します。定格計算ツールを実行して、その結果から結果電力フローを評価し、熱抵抗値がそれらの電力レベルでもまだ適切かどうかを確認します。適切でない場合は、入力を調整し、計算を繰り返して電力フローを再度確認します。基板とヒート・シンクを通過する電力フローが、それらのフローの熱抵抗に調整されるまで、これを繰り返します。付録Dはこの手順を示しています。

定格計算ツールの入力



入力:

- P3の表の該当するDirectFETデバイスのR1、R2、R3。
- 該当する冷却条件と電力に対する基板 – 周囲間熱抵抗（最初の反復でこのパスを通過する電力フローを推定）。
- ヒート・シンク抵抗（使用する場合）。冷却条件と電力フローを考慮します（最初の反復でこのパスを通過する電力フローを推定）。ヒート・シンクを缶に装着しない場合は、付録Cの缶 – 周囲間熱抵抗の数値を入力します。
- 環境の周囲温度。
- 最大許容接合部温度。
- デバイスの高温時$R_{DS(on)}$。低周波定格電流が必要な場合のみ入力します。

定格計算ツールの出力



定格計算ツールは、最大許容電流または最大許容電力を返します。基板 - 周囲間熱抵抗または缶 - 周囲間熱抵抗が電力によって大幅に変化する場合は、定格計算ツールによって返される実際の電力を反映するよう値を調整します。定格計算ツール使用上の注意の最後の部分（左）と付録Dを参照してください。

冷却のタイプ

前述のように、この計算を行うにあたっての主な障害のひとつに、パスの熱抵抗が、パスを通過する電力によって変化する点が挙げられます（図4）。これは、自然冷却システム（黒の曲線）で大きく影響し、強制空冷システム（青の曲線）では影響は小さくなります。

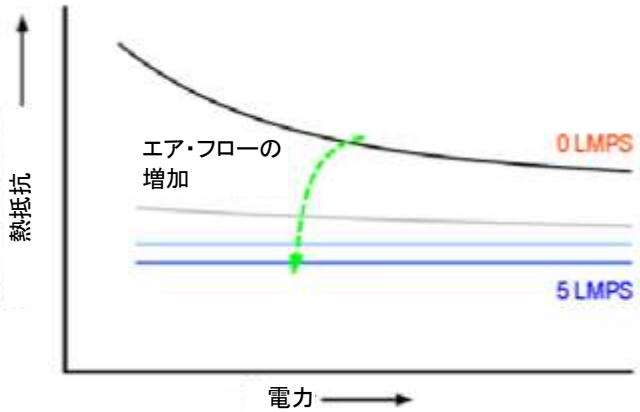


図4：一般的な熱抵抗特性

結果の検証

モデル

定格計算ツールに使用される式2aと式2b（付録A）の基本式は、SIMetrixを使用して数学的整合性を検証されています。SIMetrix Technologies社 （旧社名Catena Software Ltd）によって開発されたこの混合モードの回路シミュレーション・パッケージには、SPICEシミュレータが含まれます。

熱パラメータの表現には、アナログ電気パラメータが使用されています。

- 抵抗（Rth）
- 電圧（温度）
- 電流（電力）

このシミュレーションは、DirectFETデバイスの同一の電力フロー配分の説明に使用できます。図5はアナログ電気回路です。

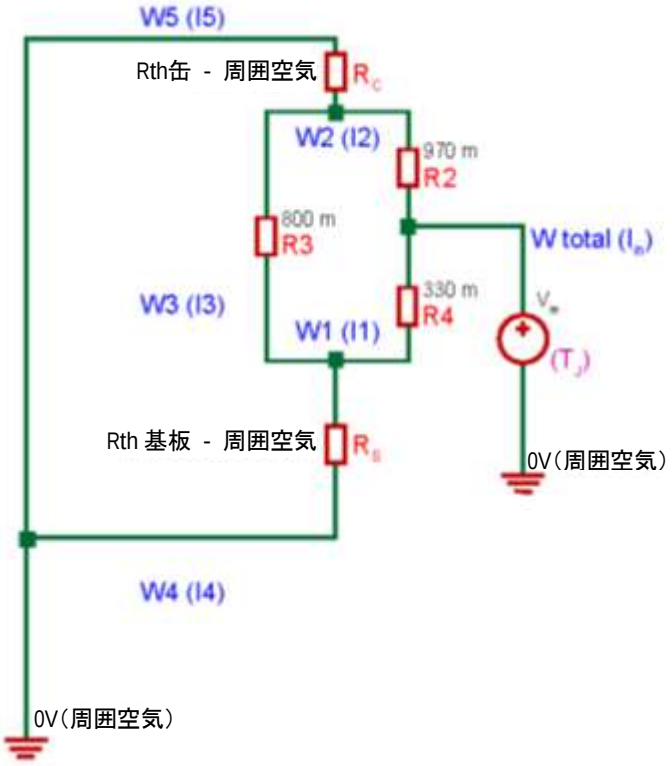


図5：アナログ電気回路

値

Mentor Graphics 社（旧社名：Flomerics Group）製のFloTHERM熱解析ソフトウェアを使用して、熱システム内の個々の要素を詳細に解析しました。

・ ヒート・シンク（界面コンパウンドを使用）



・ 基板+デバイス（デバイス側を絶縁。ただしここには表示されていません）



・ 基板+デバイス（ヒート・シンクを装着）



2 LMPSのフローでは、上記の要素の熱抵抗は以下のようになります。

・ ヒート・シンク：40° C/W
・ 基板+デバイス：95° C/W
・ 基板+デバイス+ヒート・シンク：30° C/W

DirectFETデバイスをトークン・ボードに取り付けて風洞に配置し、ヒート・シンクを使用する場合（図6）としない場合を補完的に測定しました。

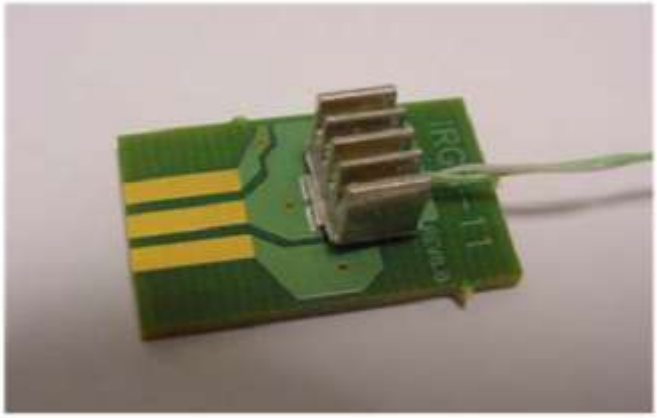


図6：トークン・ボード上のデバイスとヒート・シンク

規定の冷却条件下でデバイスにより発生した一定の電力量では、温度感受性パラメータとしてボディ・ダイオードを使用して、有効な接合部温度が測定されました。

以下の情報を定格計算ツールに転送することにより、実験の精度の限度内で、選択した条件に対する最大許容定格電流を確認できました。

・ 接合部温度
・ 周囲温度
・ ヒート・シンクの熱抵抗の予測値（ヒート・シンクを使用しない場合は、缶 - 周囲間抵抗）

この種の熱予測では、結果の精度は、取り付けた冷却装置に使用される熱抵抗の精度に依存します。すなわち、基板 - 周囲間熱抵抗およびヒート・シンク（ヒート・シンクを使用しない場合は、缶 - 周囲）熱抵抗の入力値に依存します。

付録BとCは、シャーシ冷却を使用しヒート・シンクを追加しない小および中サイズ缶のDirectFETデバイスに対する熱抵抗を示しています。外付け冷却装置に対する数値は、通常は製造元のデータを参照します。

熱抵抗値

シャーシまたはケース冷却を使用する場合

FR-4、ポリイミド、IMSなどの一般的な基板材料では、製造元が熱的特性を提供しています。これらを使用して、特定デバイスのフットプリントや板厚の熱抵抗を推定します。

独自のギャップ・フィラー(パッドやコンパウンド)の多くは今日、窒化ホウ素などの物質で補強されています。これらは、数年前と比較しても熱伝導の点で著しく改善されています。Dow Corning社、Bergquist社、Thermagon社など、多数の製造業者が製造しています。

DirectFETデバイスに個別のヒート・シンクを取り付ける場合は、製造業者が熱抵抗値を提供します。 ただし多くの場合は、シャーシやケースを使用すると、効果的かつ経済的にデバイス両面を冷却できます。

シャーシまたはケースを使用した冷却では、缶から周囲までのパスの熱抵抗値はさらに推定が難しくなります。手引きとして、付録Bに、3 x 3配列での9つのDirectFETデバイス(IRF6603)の熱解析シミュレーションの結果を記載します。

デバイス上の缶もドレイン電極であるため、通常は冷却面から電気的に絶縁する必要があります(図6)。絶縁パッドやコンパウンドはギャップ・フィラーとしても機能し、接着面間の寸法の不整合を補正します。使用される材料の熱抵抗値は、カバーする領域と適用する厚さを考慮して、付録Bの数値に加える必要があります。

付録Bのシミュレーションは、中央に配置したデバイスの缶の温度が最も高くなると予測しています。これは、このデバイスが他の熱源から最大の相互熱効果を受けることから当然の結果です。

またこのシミュレーションは、シャーシ冷却やケース冷却にはスチールよりアルミニウムのほうが有効であることを示しています。これは、熱伝導性が高いことに起因します。

追加DirectFET缶冷却を使用しない場合

回路分析に仮定されるフロー(図3)は、缶の枝路熱抵抗(R3)を経由する基板から缶までの電力フローです。この図は、基板が缶より高温であることを示し、通常は追加冷却を行う場合(ヒート・シンク、シャーシ、ケースなどを使用)に当てはまります。

しかし、追加冷却を行わない場合、缶から周囲までのパスの有効な熱抵抗値は、通常は基板のそれよりもずっと大きくなります。その場合、缶は基板よりも高温になり、電力フローが逆転します。このモデルはこれを自動的に解決し、熱を缶から基板に移動します。

アプリケーションで回路を設計する場合は、こうした電力フロー方向の変化が持つ意味合いを理解しておくことが重要です。たとえば、DirectFETデバイスが大量の電力を消費する他のコンポーネントとともに基板に配置されている場合は、缶に追加の冷却を適用することで、電力消費の他のチャネルを提供し、基板に過度の負担がかかることを防ぎます。

付録Cは、これらの環境で考えられる熱抵抗値を予測しています。これらの値を定格計算ツールに入力します。例では、缶のヒート・シンクを使用しないシナリオを示しています。

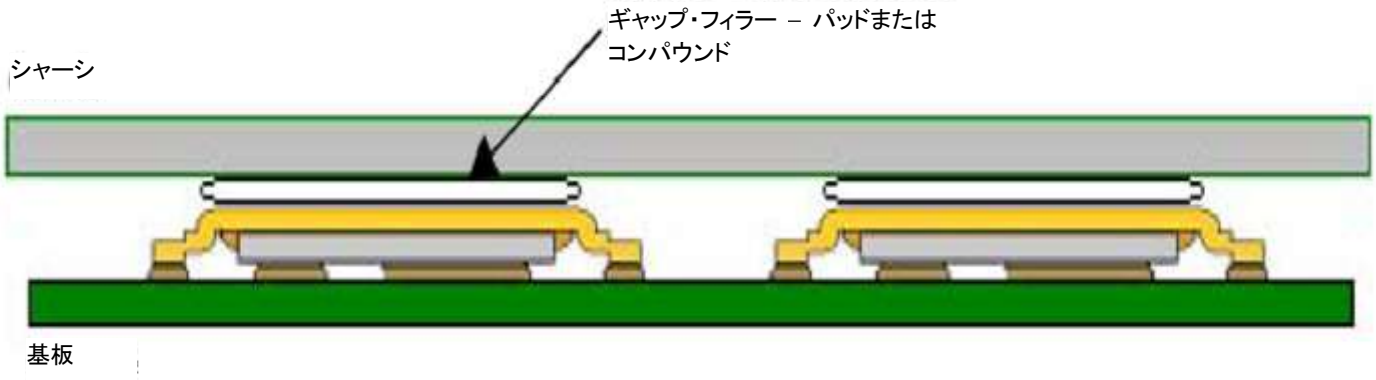


図6:ケースまたはシャーシで冷却されたDirectFETデバイス

定格計算ツールの使用例

ポリイミド・トークン・ボード上に装着したIRF6603 DirectFETデバイスに定格計算ツールを使用すると、以下の結果が得られます。ヒート・シンクを缶に取り付ける場合と取り付けない場合の、2つのシナリオを紹介します。

		缶ヒート・シンク	
設定条件	**単位**	**取り付ける**	**取り付けない**
最大周囲温度	°C	40	40
最大接合部温度	°C	125	125
エア・フロー速度	LMPS	2	2
パラメータR1	°C/W	0.33	0.33
パラメータR2	°C/W	0.97	0.97
パラメータR3	°C/W	0.8	0.8
基板 —周囲間熱抵抗@ 2 LMPS(事前に決定)	°C/W	95	95
ヒート・シンク熱抵抗(装着／取付コンパウンドの2°C/Wを含む)	°C/W	40	—
缶 – 周囲間熱抵抗 (付録C)	°C/W	—	175
IRF6603 の RDS(on) @ 125°C Vgs=10 V	Ω	$4.59e^{-3}$	$4.59e^{-3}$
最大許容電流	W	2.98	1.37
最大許容電流(低周波動作)	A	25.49	17.31
基板電力	W	0.89	0.89
ヒート・シンク電力	W	2.09	0.48

まとめ

DirectFETデバイスの熱性能は、R1、R2、R3の3つの内部熱抵抗値によって十分に表現されます。

これらのパラメータを、基板と缶を通過する熱パスのプロパティとともにオンライン定格計算ツールに入力すると、最大許容消費電力が算出されます。低周波アプリケーションでは、このツールで最大動作電流も計算できます。

定格計算ツールは、定格を迅速に評価し、DirectFETデバイス内の電力フローの洞察を提供します。基板や缶で必要な冷却を行うには、適切な熱抵抗値を持つ装置を取り付けることが重要です。さまざまなパスを通過する電力の割合を理解することは、缶や基板の冷却の最適な組み合わせを選択する上で不可欠です。

よって定格計算ツールは、DirectFETアプリケーションの熱管理の決定に役立ちます。

付録A

式1

$T_J = (\delta * W / (\alpha + \beta - (\delta (\gamma + \varsigma)) / \Phi)) + T_A$

ここで、

α = R3 / (R_S*R2)

β = R3 / (R2*R3+R_C*R3+R_C*R2)

γ = R3 / (R_S*R3+RS*R1+R1*R3)

ς = R3 / (R_C*R1)

δ = (α / γ) – (β * R_C*R1) / R3

Φ = (γ *R_S*R2)/R3 - (ς / β)

T_Jは最大接合部温度

Wは最大許容電力

T_Aは周囲温度

式2a

$W = ((T_J - T_A) * (\alpha + \beta - (\delta (\gamma + \varsigma)) / \Phi)) / (\delta)$

式2b

すべての損失は、伝導損と見なされます。

$I = \sqrt{[((T_J - T_A) * (\alpha + \beta - (\delta (\gamma + \varsigma)) / \Phi)) / (\delta * R_{DS(on)} (@ T_J max)]}$

ここで、

Iは低周波定格電流

$R_{DS(on)}$はT_J maxでの値

付録B

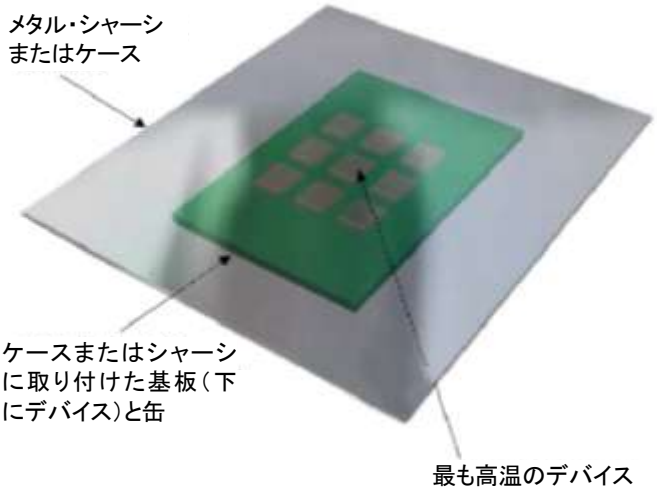
このシミュレーションは、ケースに装着したIRF6603中サイズ缶DirectFETデバイス（有効エア・フロー約0.5 LMPS）の3 x 3配列（図B.1）をベースにしています。

各デバイスの熱抵抗 缶の間隔

（°C/W）

ケース組成	5 mm	10 mm	20 mm
マイルド・スチール（1 mm）	47	38	30
アルミニウム（1 mm）	20	17.5	14

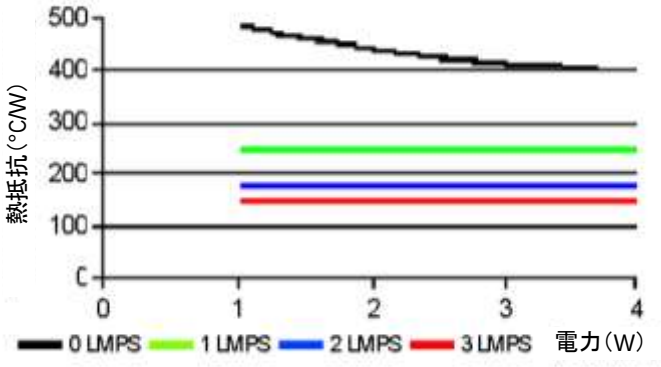
注：小サイズ缶のDirectFETデバイスでは、これらの結果に2を乗じて、接触面の減少を反映します。



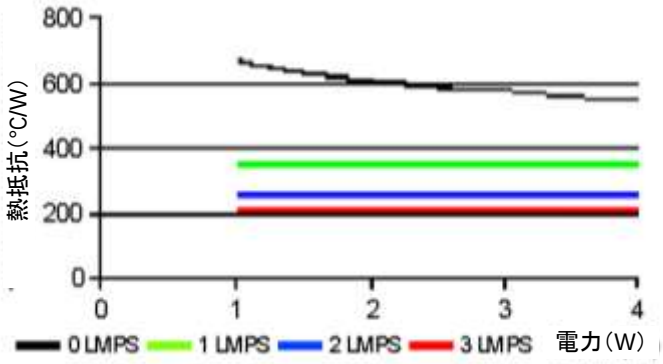
図B.1：ケースに取り付けたデバイス

付録C

図C.1とC.2は、中および小サイズ缶のDirectFETデバイス（追加ヒート・シンクなし）に対する缶 - 周囲間熱抵抗曲線です。これらは、熱フローが缶表面経由でのみ通過するデバイスをシミュレーションしたものです。これらの数値（定格計算ツールで使用）は、缶表面を経由する電力フローのみに対して有効な缶 - 周囲間熱抵抗を示します。



図C.1：缶 - 周囲間熱抵抗（中サイズ缶）



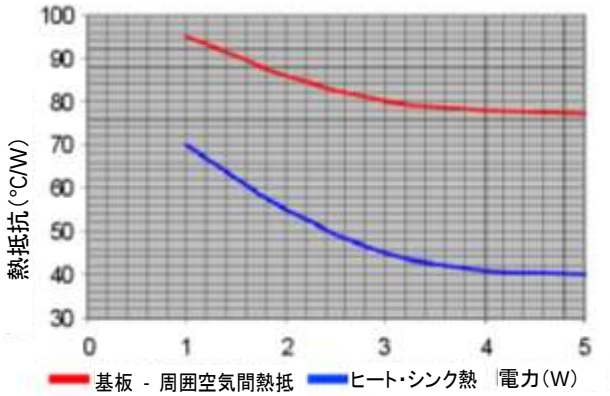
図C.2：缶 - 周囲間熱抵抗（小サイズ缶）

付録D

自然空冷を使用するアプリケーションでは、定格計算ツールで以下の反復手順を使用します。

基板に装着し、缶にヒート・シンクを取り付けたデバイスを検討してみましょう（図D.1のサンプル・データ）。

DirectFETデバイス： IRF6603
最高周囲温度： 40°C
最高接合部温度： 125°C
RDS(on) @ Tj最大値： 4.59 mΩ



図D.1：サンプル熱抵抗曲線

まず、基板を通過する電力を1W、ヒート・シンクを通過する電力をその倍の2Wと仮定します。

曲線からの読取値：
1Wでの基板 - 周囲間熱抵抗 = 95°C/W
2Wでのヒート・シンク熱抵抗 = 55°C/W

これらの値を入力して計算を実行すると、以下の値が返されます：
基板電力 = 0.89 W（曲線から96°C/W ）
ヒート・シンク電力 = 1.53 W（曲線から62°C/W）

曲線により近付くよう入力を調整します：
基板熱抵抗を95°C/Wのままにして
ヒート・シンク熱抵抗を57°C/Wまで増加

これらを入力して再計算すると、以下の値が返されます：
基板電力 = 0.89 W（曲線から96°C/W ）
ヒート・シンク電力 = 1.48 W（曲線から63°C/W）

再度入力を調整します：
基板熱抵抗を96°C/Wのままにし、
ヒート・シンク熱抵抗を65°C/Wまで増加

これらを入力して再計算すると、以下の値が返されます：
基板電力 = 0.88 W（曲線から96°C/W）
ヒート・シンク電力 = 1.3 W（曲線から63°C/W）

これで、熱抵抗に入力した値は、製造元の提供する値にかなり近付きました。