

# EPCのeGaN® FETの熱特性



John Worman, Yanping Ma, Efficient Power Conversion Corporation

熱抵抗は、ディスクリート・パワー・デバイスの能力を判断する主要な要素です。デバイスの熱特性から、ユーザーのアプリケーション向けに、最大消費電力と最大電流の両方を導き出すことができます。従来のシリコンMOSFETの熱特性はよく理解されていますが、eGaN® FETの熱特性を測定するには、さらなる説明が必要になります。このアプリケーション・ノートでは、eGaN FETの熱抵抗測定の方法と結果について説明します。

## 熱の測定法

EPCのeGaN FETは、窒化ガリウム・ベースのエンハンスメント・モード高電子移動度トランジスタ (HEMT: high electron mobility transistor) です。これらは、シリコン・パワーMOSFETと同様に動作します。ソースに対してゲートに正のバイアスをかけると、電界効果が発生し、ドレインとソースの間の双方向チャンネルを完成させる電子を引き付けます。ゲートからバイアスが取り除かれると、その下の電子がGaNに拡散され、空乏領域が再現され、再び、電圧をブロックする機能が与えられます。表1に、EPCのeGaN FET特性の概要を示します。

従来のシリコンMOSFETのユーザーは、デバイスの接合部温度 $T_j$ の指標として採用されている温度に敏感なパラメータが3つあることを知っています。ただし、eGaN FETにはいくつかの制限があります。最初の制限は、接合部温度の評価に使える固有のボディ・ダイオードがないことです。EPCのeGaN FETには、シリコンMOSFETに共通する寄生のバイポーラ接合がないので、eGaN FETの逆導通はメカニズムが異なります。ゲートからソースへの電圧が0 Vのとき、逆導通が発生しますが、ソース-ドレイン間電圧は実質的に温度によって変化しません。2つ目の制限は、ゲートの

しきい電圧 $V_{GS(TH)}$ が非常に低く、温度に対する $V_{GS(TH)}$ の傾きがシリコンMOSFETと比べてかなり平坦であることです。これは、実際の計測器の制限があるので、 $V_{GS(TH)}$ を簡単に使えないことを意味します。温度に敏感な最後のパラメータは、デバイスのオン抵抗 $R_{DS(on)}$ で、接合部温度の測定に最適なパラメータです。

$R_{DS(on)}$ は、接合部温度の優れた指標です： $T_j$ の関数として $R_{DS(on)}$ で較正する欠点は、手順に時間がかかることであり、優れた計測技術が必要になることです。ただし、温度に敏感なパラメータとして $R_{DS(on)}$ を使う主な利点は、熱が発生している正確な物理的な場所での熱の上昇を実際に測定していることです；これは、ボディ・ダイオード $V_{SD}$ または $V_{GS(TH)}$ テストのいずれにも当てはまりません。

温度に敏感なパラメータ $R_{DS(on)}$ を較正するには、2つのステップがあります。最初のステップでは、高いゲート電圧で被測定デバイス (DUT) を「オン」し、デバイスを飽和させ、温度の関数として見かけの $R_{DS(on)}$ を計算します。評価対象のeGaN FETの場合、ゲート-ソース間電圧 $V_{GS}$ は+5Vです。次に、チップ・サイズとそれ関連する $R_{DS(on)}$ に応じて、ドレインからソースに低電流 (通常0.3~1 A) でバイアスします。この較正電流は、接合部を同時に大幅に加熱することなく、良好な $V_{DS}$ 分解能を得るために十分な大きさでなければなりません。これらのバイアス条件を設定すると、DUTは、適切な電流観測抵抗 (通常0.01Ω) と共に、ドレインとソースへのケルビン接続を備えた環境チャンバに配置されます。この環境チャンバでは、+25°Cから+125°Cの間で約+25°C刻みで温度を上げて、データを取得し、表2のような表を作成しました。見かけの $R_{DS(on)}$ は、 $V_{DS}/I_D$ から計算します。

型番	LGA パッケージ (mm)	モード、 チャンネル	$V_{DS}$	$V_{GS}$	最大 $R_{DS(on)}$ (mΩ) @5V	$Q_G$ @ 5 V	$Q_{GS}$ 標準値	$Q_{GD}$ 標準値	Vth 標準値	$Q_R$	$I_D$
EPC1014	1.7 x 1.1	EN	40	6	16.0	3.0	1.0	0.6	1.4	0	10
EPC1015	4.1 x 1.6	EN	40	6	4.0	11.6	3.8	2.2	1.4	0	33
EPC1009	1.7 x 1.1	EN	60	6	30.0	2.4	0.8	0.6	1.4	0	6
EPC1005	4.1 x 1.6	EN	60	6	7.0	10.0	3.0	2.5	1.4	0	25
EPC1007	1.7 x 1.1	EN	100	6	30.0	2.7	0.8	1.0	1.4	0	6
EPC1001	4.1 x 1.6	EN	100	6	7.0	10.5	3.0	3.3	1.4	0	25
EPC1013	1.7 x 0.9	EN	150	6	100.0	1.7	0.4	0.7	1.4	0	3
EPC1011	3.6 x 1.6	EN	150	6	25.0	6.7	1.5	2.8	1.4	0	12
EPC1012	1.7 x 0.9	EN	200	6	100.0	1.9	0.4	0.9	1.4	0	3
EPC1010	3.6 x 1.6	EN	200	6	25.0	7.5	1.5	3.5	1.4	0	12

表1: eGaN FETの電気的特性のまとめ

表のデータは変更されることがあります。 [www.epc-co.com/epc/jp/製品/eGaNfETとIC.aspx](http://www.epc-co.com/epc/jp/製品/eGaNfETとIC.aspx) でご確認ください。

表2から、ソフトウェア「Table Curve®」を使って、そのデータを評価し、以下の数学関数を作成します:

$$y = \exp(a + bx) \tag{1}$$

ここで、x=温度、y = R<sub>DS(on)</sub>

2番目のステップは、R<sub>DS(on)</sub>もドレイン電流I<sub>D</sub>によって変調されるため、+25°CでのI<sub>D</sub>の関数としてR<sub>DS(on)</sub>を評価することです。この作業には、カーブ・トレーサを使えます。ただし、著者の経験では、カーブ・トレーサのパルス時間が長すぎて、より大きな電流でDUT内に熱が生じる可能性があります。したがって、R<sub>DS(on)</sub>のデータを数10 μsで取得できる特別なR<sub>DS(on)</sub>対I<sub>D</sub>のテスト装置を構築しました。通常、このテストは、データシートで定義されているDUTのパルス電流定格で実施されるシングル・ポイントのテストです;これによって、DUTが出力特性曲線の飽和領域内に留まることが保証されます。

次に、+25°Cでの大電流値と低電流値との間で、一般的な式y=mx+cを使って直線近似を行います。表3は、この関数の出力例です(ここでx=I<sub>D</sub>)。

2組のデータ・セットから導き出された式を使って、(I<sub>D</sub>の関数としてのR<sub>DS(on)</sub>)を(T<sub>J</sub>の関数としての見かけのR<sub>DS(on)</sub>)から差し引くと、T<sub>J</sub>の関数としての真のR<sub>DS(on)</sub>が得られます。ただし、25°CでのT<sub>J</sub>の関数としてのR<sub>DS(on)</sub>から25°CでのI<sub>D</sub>の関数としてのR<sub>DS(on)</sub>を引いた値は、ゼロに等しいことに注意してください。したがって、このオフセットを補正するには、T<sub>J</sub>のすべての値を満たすために、+25°CでのR<sub>DS(on)</sub>を式に追加しなければなりません。

$$R_{DS(on)} = (R_{DS(on)} @ T_J) - (R_{DS(on)} @ I_D) + (R_{DS(on)} @ 25^\circ C) \tag{2}$$

上記の数学的に生成された曲線から、熱抵抗R<sub>θ</sub>の計算は簡単です。熱抵抗は一般的な方程式で与えられます:

$$R_{\theta} = \frac{\Delta T_J}{P_D} \tag{3}$$

接合部温度の変化(ΔT<sub>J</sub>)は、パワー・パルスの終わりでのFETの接合部温度から開始時の接合部温度を引いたものです。

$$\Delta T_J = T_{Power-Pulse} - T_{Ambient} \tag{4}$$

接合部温度の変化ΔT<sub>J</sub>は、パワー・パルスP<sub>D</sub>の終わりでのR<sub>DS(on)</sub>から計算されます。式1で導き出されたaとbの値を使います:

$$\Delta T_J = \left( \frac{\ln(R_{DS(on)}) - a}{b} \right) - T_{Ambient} \tag{5}$$

熱抵抗は、すべての接合部温度で一定ではないことが実証されています;通常、これらの値は接合部温度が低いほど減少します。したがって、実際のアプリケーションを近似するために、メーカーはデータシートのT<sub>J(MAX)</sub>値、またはそれに近い値で熱抵抗値を規定しています。EPCのGaN FETの場合、T<sub>Power-Pulse</sub>温度は通常+125°C±5°Cです。

R<sub>θ</sub>、および、それに関連する熱インピーダンスZ<sub>θ</sub>のテスト手順がいったん確立されたら、EPCのeGaN FETの熱特性を評価する方法がいくつかあります。次のセクションでは、これらのデバイスに使われる3つの熱仕様について説明します。

温度 °C	ドレイン・ソース間電圧 mV	見かけのR <sub>DS(on)</sub> の計算値Ω
24.9	14.4	0.0180
54.5	17.2	0.0215
79	19.6	0.0245
102	22.08	0.0276
130.2	25.68	0.0321

表2: EPC1010のR<sub>DS(on)</sub>と温度のデータの例

R <sub>DS(on)</sub> 対I <sub>D</sub> 曲線の適合	
c =	0.01803
m =	0.000298
I <sub>D</sub>	R <sub>DS(on)</sub>
1	0.01833
2	0.01863
5	0.01953
10	0.02101
20	0.02399
40	0.02995

表3: EPC1010のR<sub>DS(on)</sub>とI<sub>D</sub>のデータの例

### 著者について

**Yanping Ma**は現在、EPCの品質と信頼性の責任者です。彼女は1996年に米カリフォルニア大学バークレー校で材料科学と工学の博士号を取得しました。2009年にEPCに入社する前は、1996年から2008年までインターナショナル・レクティブファイアーでシリコンR&Dのさまざまな工学の職種を歴任し、シリコン・パワーMOSFETの設計と製品開発の幅広い分野に従事していました。

**John Worman**は、1986年以来、パワー半導体業界でアプリケーション・エンジニアとキャラクタライゼーション・エンジニアの両方に従事していました。米ノーザン・アリゾナ大学で学位を取得した後、MOSFETの熱抵抗、安全動作領域、クランプされていない誘導性スイッチングを専門とする22の技術出版物を執筆しています。

**$R_{\theta JB}$ : 熱抵抗: 接合部からはんだバンプへ**

$R_{\theta JB}$ は、ほとんどのアプリケーションで使われるため、おそらく最も重要な熱の仕様です。図1に示すように、 $R_{\theta JB}$ は、実装する回路基板の種類や大きさを考慮せずに、デバイスの接合部からはんだバンプの底面までの熱抵抗です。したがって、エンド・ユーザーがアプリケーションの熱特性と環境を知っている場合、システム全体の熱抵抗の合計を得るために、すべてのサブ部品の熱抵抗を代数的に加算できます。

**$R_{\theta JC}$ : 熱抵抗: 接合部からパッケージへ**

$R_{\theta JC}$ は、エンド・ユーザーがeGaN FETの表面にヒートシンクを追加したい状況で使われます。図2は、 $R_{\theta JC}$ を測定するための一般的なテスト設定です。

図2の水冷ヒートシンクは、+25°Cが常に維持されるように、再循環熱チャラー（冷却水循環装置）によって温度が安定化されています。「QFN基板」は、DUTへの電気的な接続を可能にする非常に小型でシンプルなテスト回路基板です。デバイスの傾きや位置合わせの問題を防ぐために、熱的に非導通性の「シム・スペーサ」を非常に小型のデバイスに追加しました。DUTとテスト回路との間のリード線の長さが約0.3 mなので、ゲート発振の可能性を防ぐために10 Ωの抵抗を追加しました。電力リード線のI×R降下を排除するために、すべての電力リード線は、計装に戻すときのケルビン接続を備えています。DUTと水冷ヒートシンクとの間の熱伝導材料は、表面の濡れ性を高めるために少量の界面活性剤を添加した水です。DUTシステムは、空気圧によって所定の位置

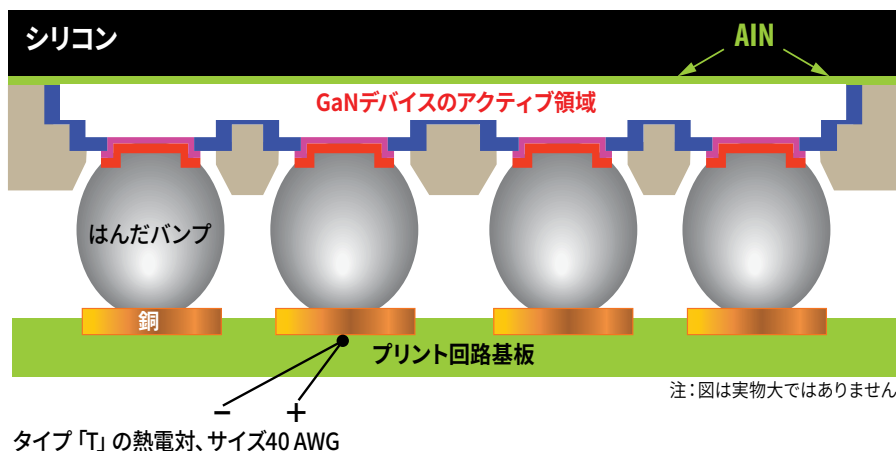


図1:  $R_{\theta JB}$ は、実装する回路基板の種類や大きさを考慮しないときのデバイスの接合部からはんだバンプの底面までの熱抵抗です。

に保持されます。熱電対は、水冷ヒートシンクによって除去される熱のみを評価するために、はんだバンプと回路基板を介して放散される熱をモニターし、真の $R_{\theta JC}$ を計算します。

1/2平方インチはソースに接続され、1/2平方インチはデバイスのはんだバーを介してドレインに接続されています。

**$R_{\theta JA}$ : 熱抵抗: 接合部から周囲へ**

$R_{\theta JA}$  (接合部から周囲への熱抵抗) は、デバイスが1平方インチ (645.16 mm<sup>2</sup>) の回路基板に実装されたときの熱抵抗を指定する1つの方法です。図3は、熱抵抗測定に使われる回路基板のレイアウトです。DUTは、面積が1平方インチで片面2オンスのFR-4回路基板に取り付けられていま

$R_{\theta JA}$ は、エンド・ユーザーがヒートシンクを追加せずにeGaN FETをアプリケーションの回路基板に実装したい場合に最も役立ちます。デバイスの特性評価中、DUTは、25°Cの開始温度で、1立方フィート (0.02832 m<sup>3</sup>) の閉じた箱、すなわち静止空気の中に、中央に吊り下げます。DUTは、+125°Cの接合部温度で1000秒間、「オン」にバイアスされます。次に、式3に従って $R_{\theta JA}$ を計算します。

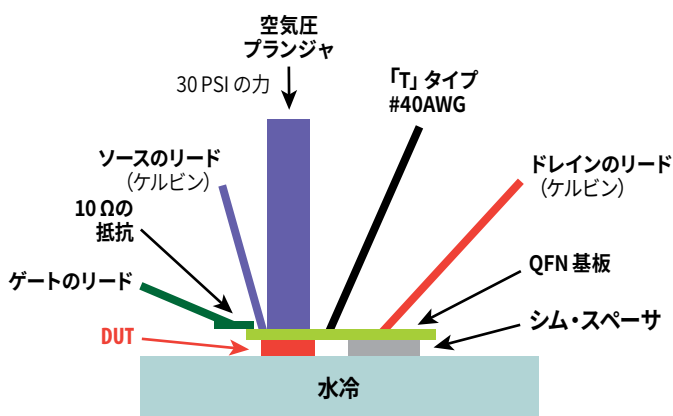


図2:  $R_{\theta JC}$ を測定するための標準的なテスト設定。

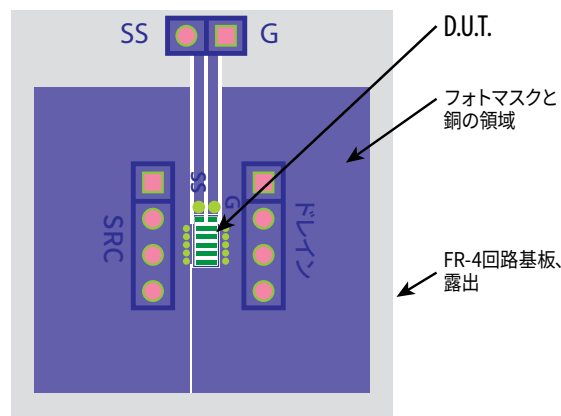


図3: 銅の面積1平方インチの $R_{\theta JA}$ 測定の回路基板レイアウト。銅の半分はソースに接続され、残りの半分はドレインに接続されています。

基板の銅面積に対する接合部から周囲への正規化された熱抵抗乗数

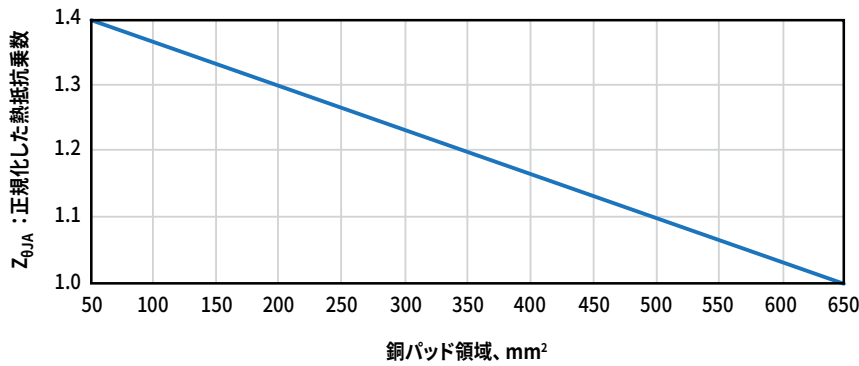


図4: 銅パッド面積の減少を関数としたときの熱抵抗、645.16 mm²に正規化。

アプリケーションは、必ずしも完璧な1平方インチ (645.16 mm²) くらいの回路基板で設計されているわけではないため、図4は、645.16 mm² (1平方インチ) に正規化された銅パッド面積の減少の関数として、熱抵抗の増加を示しています。

測定結果

表4は、デバイスの部品番号に関連するさまざまな熱抵抗 $R_{\theta JC}$ 、 $R_{\theta JB}$ 、および $R_{\theta JA}$ です。EPC1010とEPC1012の熱抵抗値を測定し、他の部品番号の熱抵抗値は近似値としてスケーリングしました。図5は、EPCの製品ラインに対して正規化された $Z_{\theta JB}$ 曲線です。デバイスの特性評価中に、正規化された熱インピーダンス曲線 ( $Z_{\theta JB}$ ) がEPC1010とEPC1012の両方でほぼ同じであることが分かりました。

結論

eGaN FETなどの表面実装トランジスタは、いくつかの方法で物理的に実装できます。ユーザーのアプリケーションに応じて、デバイスの実装方法は、電力消費と最大電流能力に大きな影響を与えます。これらすべてのデバイス・パラメータの制限要因に対しては、ディスクリート・デバイスの最大接合部温度を制御することです。eGaN FETの接合部温度を測定するための最もよく知られている方法は、 $R_{DS(on)}$ の変化を特徴付けて測定することです。このアプリケーション・ノートでは、さまざまなデバイスの許容可能な測定方法と、その結果としての熱抵抗の測定結果を示しました。

型番	長さ1 mm	長さ2 mm	チップ面積 mm²	$R_{\theta JC}$ °C/W	$R_{\theta JB}$ °C/W	$R_{\theta JA}$ °C/W
EPC1001	1.6	4.1	6.56	1.56	15	54
EPC1007	1.1	1.7	1.87	6.5	32	80
EPC1010	1.6	3.6	5.76	1.8	16	56
EPC1012	0.9	1.7	1.53	8.2	36	85
EPC1014	1.1	1.7	1.87	6.5	32	80
EPC1015	1.6	4.1	6.56	1.56	15	54

表4: 熱抵抗のまとめ

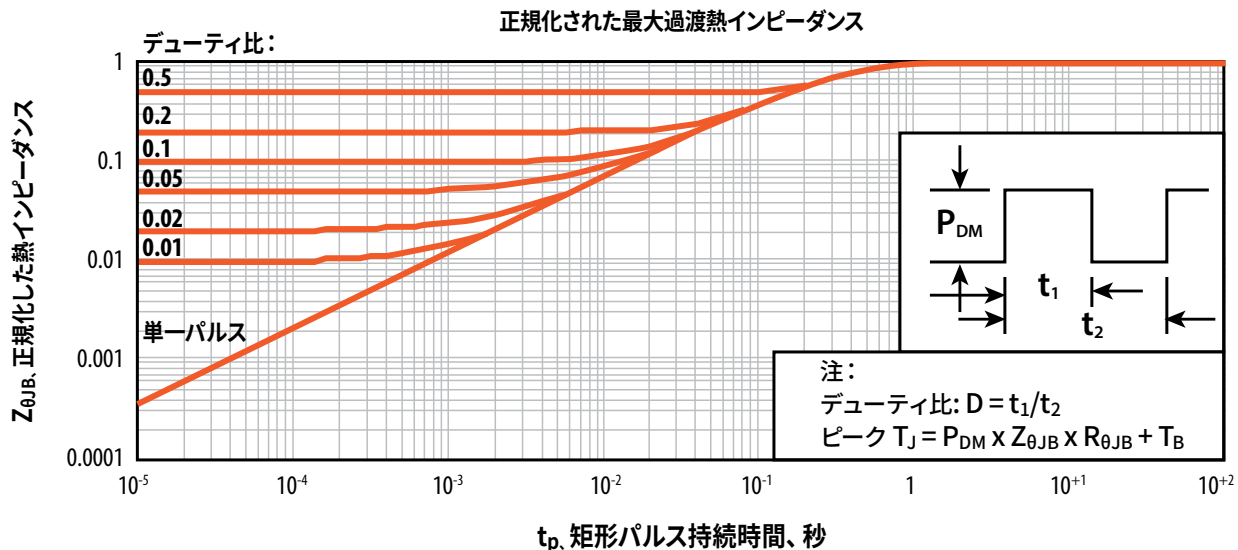


図5: EPCの製品ラインに対して正規化した $Z_{\theta JB}$ 曲線。