

MOSFETのシリコン・チップ温度を測る

本田 潤/ホルヘ・セレソ

Jun Honda/Jorge Cerezo

シミュレーション上の回路は、あくまで仮想的なものですから、消費電力を考慮しなくても、配線などに間違いがなければ動きます。しかし、現実の回路は電力を消費しますから、試作器の電源を入れたとたんにパワー素子が燃え出す...などというトラブルが往々にして起こりえます。トラブルは、電源ON後3分で発生することもあります。1年後に起きることもあります。信頼性の高い装置を作るためには、正しい熱設計が欠かせません。

最近のパワー素子は、オン抵抗が低くなり、動作も速くなりました。その結果、損失が小さく、発熱しにくくなっています。パッケージ技術も進化しており、小形で放熱性のよいものが出てきています。

しかし一方で、最近のチップ・サイズの小さいパワー素子は比熱(熱容量)が小さいため、熱しやす

く冷めやすいという性質があります。その結果、ピーク消費電力に弱くなっています。

本稿では、熱設計の基本である、定常状態におけるMOSFET内部のチップ温度の測定法と計算法を紹介し、さらに過渡的に変化するチップ温度の算出方法を提案します。

熱設計の基礎

● 二つの基本

▶ その1...パワー素子の温度を低くする

温度の高い環境は、装置の長期的な信頼性を確保するには不利な条件です。高い温度はあらゆる化学反応を加速させて素子の劣化を早めるからです。空気の温度が高いほど、含まれる湿気が多くなり、パワー素子内部の化学反応を促進します。

図1は、TO-220パッケージの

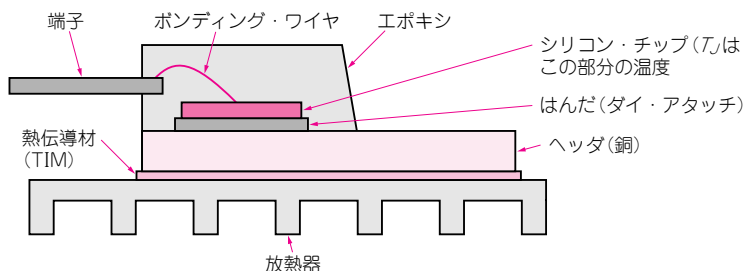
MOSFETの構造です。ごく一般的なパッケージです。

一般に、パワー素子の信頼性は、 T_j が10℃下がるごとに2倍になるため、可能な限り、内部のチップ温度を低く維持することが大切です。

表面実装デバイスを採用しているシステムではプリント基板の定格温度(材料FR-4のプリント回路基板では約120℃)などの条件からも接合部温度 T_j (Temperature of Junction)を低く抑えることが望ましいと言えます。このため、放熱設計が意図したとおりの特性になっているかをきちんと確認しておかなければなりません。

▶ その2...温度の上昇/下降の繰り返しを少なくする

熱サイクリングは材料の疲労を加速します。パワー素子の温度変



(a) 内部構造



(b) パッケージの外観

図1 放熱器に取り付けたTO-220パッケージのパワー素子と外観

化を小さく保つと、材料の疲労を防止して、システムの信頼性を向上させます。テレビ受像器でもっとも多い故障原因の一つは、温度変化が一番大きいパワー素子の温度サイクルから発生するはんだ付け不良です。

● **絶対電力定格は実際には許容できない**

パワー素子のデータシートに規定される絶対最大消費電力 P_D [W] の定義は、パッケージ温度 T_C [°C] を 25°C に保ったときにチップの T_J を最大許容値まで上昇させるのに必要な消費電力です。

つまり、次式で定義されます。

$$P_D = \frac{T_J - T_C}{R_{thJC}}$$

ここで、MOSFET デバイスの最大動作温度 T_J の仕様は、通常、**150°C または 175°C** です。この仕様は、パラメータ「動作接合部温度範囲」としてデータシートに記載されています。 R_{thJC} は、パワー素子の接合部-パッケージ(ケース)間の熱抵抗であり、これもデータ

シートに記載されています。絶対最大消費電力 (P_D) を求めるために、すべての動作条件で T_C を 25°C に保つためには、無限大の放熱器が必要ですから事実上不可能です。

熱設計の目標は、最小の大きさの放熱器を使って、パワー素子の T_J を目標仕様(一般的には使用条件下での最大定格)以下にすることです。

● **コスト/サイズと信頼性のトレードオフ**

前述のように、パワー素子は、温度が低いほど信頼性が上がりますが、低い温度まで冷却するには大きな放熱器が必要ですから、サイズとコストのトレードオフを考慮しなければなりません。熱設計をするときは、明確な目標を持っている必要があります。例えば産業機器は高信頼性が要求されますから、 T_J の目標値は民生機器よりも低くする必要があります。

● **「定常」と「過渡」の二つの状態を考える**

放熱設計をするときは、定常状

態と過渡状態の二つの状態を考慮する必要があります(図2)。定常状態とは、時間が経過して温度変化がなくなる熱平衡状態のことです。

過渡熱状態は短時間に温度が変化する状態です。例えば、負荷短絡時などの突然の電力パルス発生によってこの状態が発生します。

● **熱の流れは電子回路で表現できる**

熱パラメータと電気パラメータの間には類似性があります。

このため、パワー素子の熱システムを電気回路に置き換えて表現できます。熱パラメータと電気パラメータとの間の類似性を表1に示します。

TO-220 パッケージの MOSFET と放熱器を組み合わせたシステム(図1)の熱等価回路は図3のように表現できます。**エポキシの熱抵抗は大きい**ため、チップで発生した熱はその大部分が下側を伝わります。

熱の伝わり方

● **T_J に影響する要素**

すべてのパワー素子は、動作時に必ず電力を消費します。消費された電力は熱に変わり、パワー素子の温度を上昇させます。パワー素子が消費する電力によって発生する熱は、パッケージのさまざまな材料や接点を經由して周囲(一般には空気)に伝わるため、 T_J は、パッケージの構造や材料などの熱伝導特性によって変わります⁽¹⁾。

● **パッケージの構造**

パワー素子が許容できる消費電力 (P_D) は、パッケージの材料や寸法によって決まります。優れた熱伝導特性をもつパワー素子ほど大

表1 熱パラメータは電気パラメータに置き換えて考えることができる

熱パラメータ			電気パラメータ		
項目	記号	単位	項目	記号	単位
電力	P	W	電流	I	A
温度	T	°C	電圧	V	V
熱抵抗	R_{th}	°C/W	抵抗	R	Ω
熱容量	C_{th}	Ws/°C	容量	C	F

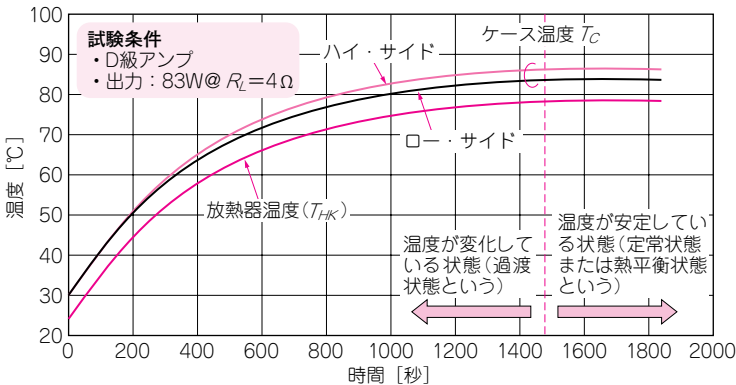


図2 温度の定常状態と過渡状態