

# JEDEC に準拠した熱過渡特性解析法による熱抵抗評価

## Thermal resistance evaluation by thermal transient characterization methodology in accordance with JEDEC

沖エンジニアリング株式会社

清水互，中村隆治，隅田淳，久保田英久，村原大介，服部民子，味岡恒夫，矢部一博

The thermo-couple and/or the K factor of the PN junction has been used as a method of measuring the thermal resistance of the semiconductor device and the printed board. As for the thermal transient characterization methodology, the measurement precision is more excellent than thermo-couple. The measuring method of thermal resistance that used this method was standardized by JEDEC. We tried the thermal resistance measurement in accordance with JEDEC, and some problems were found. We established as one of the solutions, the thermal transient characteristics analysis method under the decompression condition.

### 1. はじめに

小型化やハイパワー化が進んだ電子部品やユニットにおいては信頼性の観点から，これまで以上に熱の問題が注視されている．一般に広く知られていることであるが，半導体素子では接合温度 ( $T_j$ ) の増加に伴い，短寿命化・故障率の増加（信頼性の低下）が顕著な問題となって現れてくる．これら熱問題に影響する重要なパラメータの一つが熱抵抗であるが，従来は半導体素子や実装基板等の熱抵抗測定を行う場合，主に熱電対と PN 接合部の温度パラメータを併用する評価が用いられてきた．

この熱電対と PN 接合部の温度パラメータを併用する評価手法<sup>[1],[2]</sup>では，熱電対の埋め込み再現性等に起因する測定精度の問題が無視できない状況となってきている．

さらに配置した温度センサ（熱電対や PN 接合部）部の飽和温度から熱抵抗を算出しているため，温度センサを配置できない箇所の熱抵抗を評価することが不可能であった．

最近ではこれらの手法に比べて，測定精度がより優れた熱過渡特性解析法が注目され，JEDEC<sup>[3]</sup>においてこの手法を用いた熱抵抗測定の標準化がなされた．

この方法は発熱源である半導体デバイスからパッケージ，ヒートシンクまでの熱経路に存在する各材料の熱抵抗と熱容量をデバイスの VF 値を元に測定することができる．われわれは，以前より独自に本方法による評価手法の確立に取り組んできたが，今回，JEDEC に準拠した熱抵抗測定を試みた．その結果，いくつかの留意点や課題が見つかり，その一つの解決策として減圧条件下での熱過渡特性解析法を確立した．

### 2. JEDEC での熱過渡特性解析

2010 年 11 月に制定された JEDEC ( Joint Electron Device Engineering Council ) によるスタンダード ( JESD51-14 ; 次元放熱経路を持つパッケージの  $R_{thjc}$  測定法 ) では，

---

沖エンジニアリング株式会社 信頼性技術事業部 構造解析グループ

〒179-0084 東京都練馬区氷川台 3-20-16

e-mail : [shimizu378@oki.com](mailto:shimizu378@oki.com)

【キーワード：熱過渡特性解析，熱抵抗，構造関数，JEDEC，減圧】

$Z_{jc}$  (熱過渡測定法により得られる熱抵抗) を取得する際に幾つかの規定事項が設けられている。以下に代表的な規定を幾つか示す。

- ・ヒートシンク(コールドプレート等)にマウントして測定すること。
- ・必ず冷却過程での過渡熱を測定すること
- ・測定時の初期ノイズは時間軸を square root として Cut すること。

また、測定時の推奨環境としては、

- ・コールドプレートの材質は銅を使用する。
- ・冷却水パイプとサンプル取り付け表面の距離は 2mm 以下とする。
- ・冷却水の温度はチラー等の他装置で固定する。
- ・冷却水の温度とコールドプレートの温度を記録・記載する。
- ・適切な圧力(約 10N/cm<sup>2</sup>)をサンプル上面より印加する。

といった条件が記載されている。

しかし、近年注目度の大きいパワー系デバイス(大電力 IGBT 素子や、照明用パワー LED 等)の評価を実施していく上で、これら規定や推奨事項に幾つかの留意すべき点があることがわかってきた。例えば(1)デバイスの熱飽和時間の問題、(2)冷却系の容量の問題、(3)測定(外部)環境の問題、(4)実デバイスの熱流路の問題、等である。

これらの問題点のうち、(1)から(3)は測定条件や環境の問題であるため、これら環境を整えることができれば回避可能である。

例えば(1)については、評価時にデバイスが熱的に飽和するまでの時間の選定に関してである。JEDEC では、熱的な飽和には十分に長い時間をかけること(一般にデバイスの冷却には水冷を用いるため 100 秒程度で充分である)といった旨の記載がなされているのみである。ただし一般のデバイスは熱容量の小さい微小なサイズのものから、パワーデバイスのように巨大な熱容量を有しているものまで多岐にわたっている。これらの

熱的な飽和に要する時間は長短様々であり、一律の尺度で必要充分な加熱時間を設定するのは困難である。そこで我々はその解決策として、加熱時間に水準を設定し、加熱時間に対する総熱抵抗の変化を取得することで、その飽和傾向から必要な加熱時間を設定する手法を考案し対策としている。

(2)の冷却系容量の問題に関しては、特にパワーデバイスのように大電力を要する評価で重要となってくる。例えば 3000[W] の電力消費を要するデバイス进行评估する際に、水冷ヒートシンクの冷却水温をコントロールするチラーの冷却能力が 2000[W]では、充分な冷却ができずに、ヒートシンクの温度上昇を招く。また、チラーの冷却能力が十分であっても水冷ヒートシンクの冷却容量が不足した場合も同様な結果となる。JEDEC では冷却水温とコールドプレート温度のモニタを推奨しているが、これらの温度に対する規定は設けられていないのが実状である。熱過渡特性解析法は高精度に熱特性を取得できるため、外部の環境温度変化の影響を顕著に受けてしまう。そこで我々は冷却系熱容量の過不足を適正に判定するため、ヒートシンクイン側およびアウト側の水温、ヒートシンク表面温度をモニターし、測定デバイスの温度上昇分に対して許容されるアウト側水温変化量を規定することで、冷却系容量を適切に設定する手法を考案し対策としている。

(3)の測定環境の問題は、主に測定を行っている室温の温度変化の影響に関してである。JEDEC では一辺約 30cm の立方体チャンバーを評価装置として規定している。用いられる素材は低熱伝導な材質(樹脂等)を要することを示しているが、実際の熱遮断効果までは言及されていない。大電力パワーデバイスでは熱容量の大きいデバイスが多々見受けられるが、これらのデバイスの熱特性評価は冷却(測定)に要する時間が加熱のおおよそ 2 ~ 3 倍程度必要とされている。このように大電力でデバイスを熱飽和させ、さらに長

時間かけて冷却（測定）を行う間に、チャンバーが設置されている室温の変動（エアコンによる室温変動や昼夜の温度差）が測定チャンパー内に影響することが確認されている。これら温度変化は評価結果に少なからず影響を与えるため、チャンパー材の選定や厚さ設定等、断熱効果に与える影響を熟考する必要がある。我々はアクリル樹脂製ケースに発泡材の断熱部材を取り付け、対策としている。

（４）に関しては、JEDEC に準じた熱抵抗評価が一方向への熱流路による測定モデルであるが、実際のデバイスでは主熱流路となるヒートシンク面以外へ放熱が無視できない場合があり、特にハイパワーのデバイスで顕著となり、そのままでは適用できない。熱過渡解析装置を用いた熱抵抗評価では総熱抵抗の取得以外にも熱流経路の構造関数から得られる値によりチップからパッケージ最表面、あるいは素子を実装している基板やヒートシンクまでの各部位毎の熱抵抗が得られる。この特徴を生かして、例えば半導体素子中のダイボンド材の不均一性と熱抵抗の関係評価や、チップ接合材の開発・評価への適用などが可能である。しかしながら、JEDEC に厳密に準拠した条件の場合には、実際に評価したい領域（例えばダイボンド材）の熱特性に、熱的に並列に接続されている他領域（例えばパッケージ表面からの熱放出）の熱特性の重なりが問題となり、ターゲットとする構造部の熱的構造が不明瞭となることが確認されている（図 2.1）。

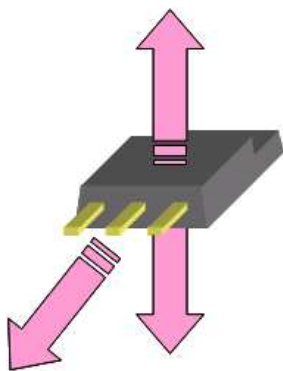


図 2.1 熱経路例

このような問題を回避するために JEDEC では、評価を行いたい熱流路に対し、できるだけ熱を流し易くするために熱容量の大きいヒートシンクを設ける等が実施されている。この方法で、比較的特定方向の熱評価が可能となるが（図 2.2）、この場合においても他経路からの熱放出を完全に除外することはできず、また、用いるヒートシンクの熱容量が大きいほど、熱過渡特性を測定するにあたり必要とされる温度の S/N 比が充分に得られない（素子温度の上昇が充分でない）という問題が生じる。

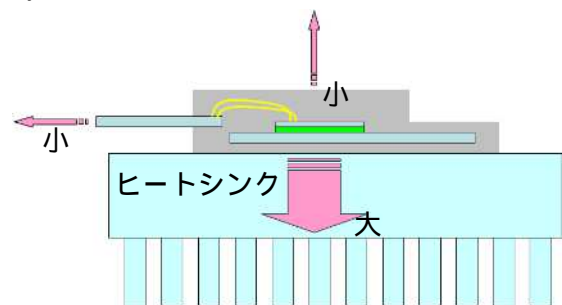


図 2.2 ヒートシンクを用いた場合の熱経路例

### 3. 減圧条件下での熱過渡特性解析

そこで、減圧条件下で測定することを調査した。減圧条件下では他の熱経路を完全に遮断することができ、熱容量の大きいヒートシンクに繋がる熱流路のみの熱特性が得られることが期待できる。

#### 3.1 評価内容

まず、先行評価に際して用いた素子は TO-220 タイプパッケージのパワー MOSFET で、これを、熱伝導性グリスを介してヒートシンクに接続し、ボルトにより固定することで熱結合性を確保した。このサンプルを真空チャンバー中に設置し、減圧条件（真空度）と熱抵抗の関係、ならびに構造関数の傾向変化を見るために、常圧（ $10^{+3}$ ）、 $10^{-1}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-5}$  [Torr] 近辺での評価を行った。

### 3.2 評価結果

図3.1, 図3.2に得られた構造関数を,  
図3.3に構造関数の微分化グラフを示す。

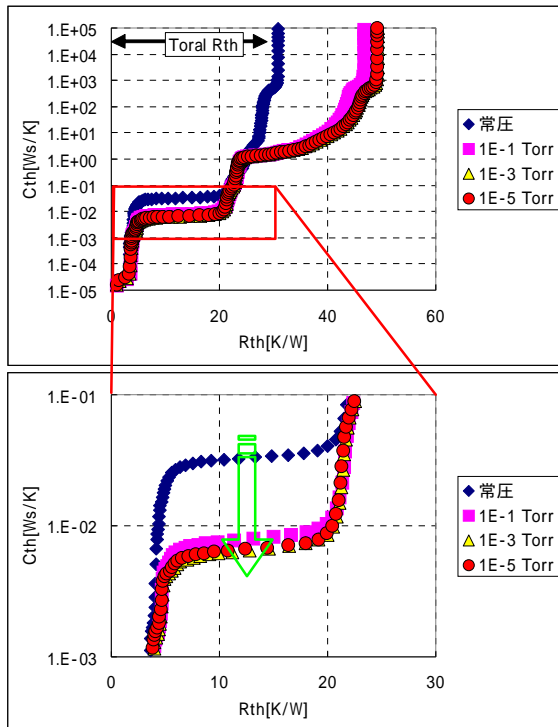


図3.1 構造関数の気圧による変化1

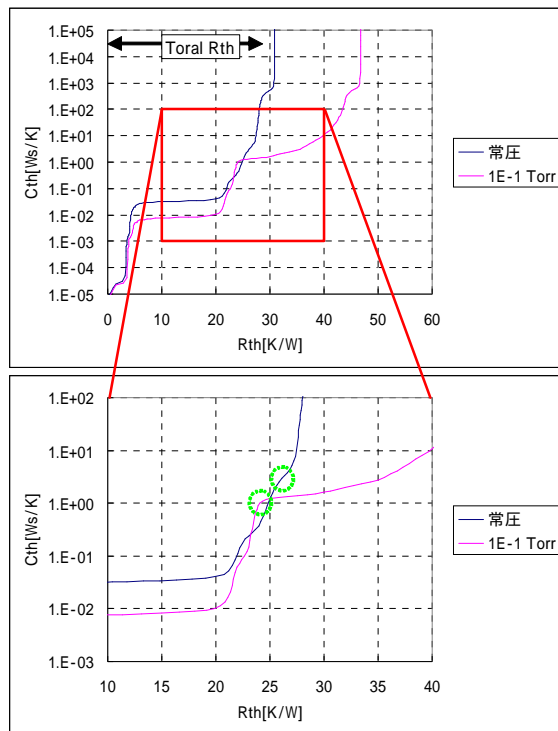


図3.2 構造関数の気圧による変化2

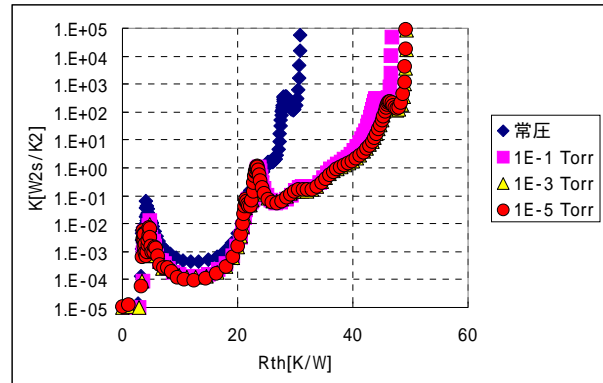


図3.3 構造関数の気圧による変化(微分)

熱過渡特性解析の結果, 気圧による構造関数の変化は大きく二点に現れていることが確認された。

一点目は総熱抵抗 (Total Rth) であり, 気圧の低下に伴い熱抵抗が増加していく傾向が確認される。図3.4に, 図3.1の結果から得られた気圧に対する総熱抵抗の変化を示す。

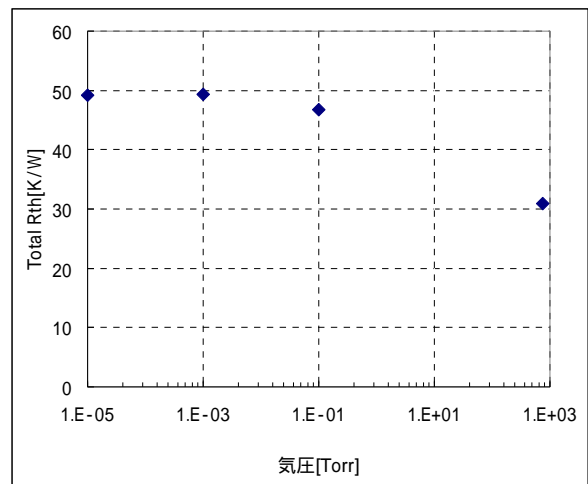


図3.4 気圧に対する熱抵抗の変化

常圧に対し, 減圧することで総熱抵抗の増加が確認される。またその傾向は, おおよそ  $10^{-3}$  [Torr] ~  $10^{-5}$  [Torr] 近辺で飽和傾向を示している。常圧での総熱抵抗値 (30.89[K/W]) に対して, 熱抵抗変化がおおよそ飽和していると思われる  $10^{-5}$  [Torr] (49.23[K/W]) では, 約 59% 程度 (18.33[K/W]) の増加率となる。この総熱抵抗の増加を引き起こしている主

な領域は構造関数の最右端であることから、サンプルの最外端における熱抵抗の増加、即ちヒートシンクから周囲環境に至る箇所の熱抵抗に相当する。サンプル周辺の熱伝達物質である大気が希薄になる（減圧される）に従い、ヒートシンクから周囲環境への熱伝達が制限され熱抵抗が増加するという、想定された結果を数値的に得ることができた。

二点目は、構造関数の  $4 \sim 21$  [K/W] 近辺での熱容量変化がみてとれる点である（図 3.1 下 拡大図）。この領域では各減圧条件下での熱抵抗の変化傾向はほとんど同様であるにもかかわらず、熱容量のみ減圧による低下が見られる。詳細な検討の結果から、該領域はトランジスタ素子外周のモールド樹脂領域と推定される。

ただし、モールド樹脂自体の熱容量が気圧により増減することは考えられない。減圧条件下では大気対流による放熱が発生しないため、モールド樹脂表面からの放熱は微小な輻射成分を除いて発生し得ない。そのため、常圧の大気中では対流によりモールド樹脂から放熱されていた熱のほとんどは、真空下ではヒートシンクへと伝達されることになる。熱の流れがほとんどヒートシンク方向となり、トランジスタ表面側のモールド樹脂部分への熱流入が減ることでモールド樹脂部分の熱容量へ寄与する率が見かけ上減少し、結果として構造関数に熱容量の減少として現れたものと示唆される。

これらの結果から、JEDEC に準拠してパワーデバイスの熱過渡特性解析をするにあたり、減圧条件下での評価が「一次元放熱経路を持つパッケージの  $R_{thjc}$  測定」に対してより有効な情報が得られると考える。

真空中での熱過渡特性評価のメリットとして宇宙用デバイスへの適用も考えられる。図 3.5 に接合温度の上昇と気圧の関係を示す。常圧での上昇温度（ $60.82$  [ ]）に対し、 $10^{-5}$  [Torr] 条件下では放熱に介在する大気の影響がほとんど無いため、接合温度の上昇分が  $92.15$  [ ] となり、 $31.33$  [ ]（約 52%）の上昇が見られた。

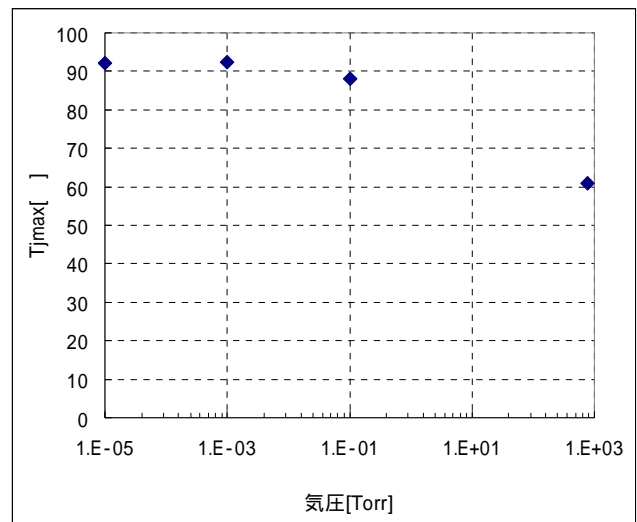


図 3.5 気圧に対する  $T_{jmax}$  の変化

通常、デバイスの熱抵抗（カタログ値）は大気中の値でありパッケージ表面部からの熱放出を含む値となる。宇宙用途等、大気が希薄な条件下での使用を考えた場合、ヒートシンク等の実装面からの熱伝導による放熱と真空中への熱放射が主体となりパッケージ表面部からの対流による熱放出が期待できなくなる。そのため、宇宙用途のデバイスでは真空中での熱過渡特性評価が有効となる。真空中では想定外のデバイス接合温度上昇に注意が必要で、熱設計に対してもより多くのマージンを確保する等の対策も必要となる。

表 3.1 に、減圧条件下での熱過渡特性解析で得られた結果をまとめて示す。

表3.1 減圧評価データ

	常圧	1E-1 Torr	1E-3 Torr	1E-5 Torr
Total Rth [K/W]	30.89	46.77	49.38	49.23
T <sub>jmax</sub> [ ]	60.82	88.19	92.46	92.15

#### 4. まとめ

従来より用いられてきている熱抵抗評価手法である、熱電対とPN接合の温度パラメータを併用する評価手法に比べ、より測定精度が優れた熱過渡特性解析法について、JEDECに準拠した熱抵抗測定を実施した。その結果、実デバイス評価の際に評価対象の熱流路以外の放熱が特性に重畳されることで生じる誤差が問題となることから、その回避策として減圧条件下での評価を実施した。評価の結果から、減圧条件下での評価がJEDECで示されている「一次元放熱経路」をより顕著に構築可能であり、これによって他経路からの放熱成分が構造関数に重畳されることを防ぐため、より正確な熱過渡特性評価が可能になると考えられる。

この方法を適用することにより、特に多方向から放熱が著しいハイパワーデバイスの熱抵抗評価が高精度に行えるものとする。

また、ここで述べた以外にも熱過渡特性解析を多くのデバイスに応用可能で、今後も新たな試みを試行し、各種評価手法の立案・開発を進めていく。

#### 参考文献

- [1] 国峰 尚樹：『エレクトロニクスのための熱設計完全入門』、日刊工業新聞社
- [2] 国峰 尚樹：『失敗しない熱設計の進め方と放熱部材の選定・活用技術、測定・評価』、技術情報協会
- [3] JEDEC STANDARD (JESD51-14) : 『Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Trough a Single Path』
- [4] Oliver Steffens et al. : 『Thermal Transient Characterization Methodology for Single-Chip and Stacked Structures』、21st IEEE SEMI-THERM Symposium