

パワーサイクル試験装置を用いた強制劣化モジュールの作製

中野, 智
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/6794441>

出版情報：九州大学応用力学研究所技術室 技術室報告. 5, pp.1-6, 2023-07. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン：

権利関係：



パワーサイクル試験装置を用いた強制劣化モジュールの作製

中野 智

要 旨

省エネ、省電力、脱炭素の動きが世界的に今後も進んでいく中、新世代パワー半導体として高度な自己制御機能（自己最適化、故障予知など）を持つパワー半導体の開発が必要となっている。パワーサイクル故障を検出するセンシング技術の開発にあたり、新規導入したパワーサイクル試験装置を用いて強制的に劣化させたモジュールを作製する実験を行った。本稿ではこの実験過程について報告する。

キーワード

パワー半導体 応力 熱抵抗 パワーサイクル試験

1. はじめに

近年、産業の電動化が進展しており、半導体関連技術の重要性が高まっている。そのような中、省エネ化、省電力化、脱炭素化に重要なエレクトロニクス製品開発の取り組みが世界的にも強化されており、自動車、電装分野をはじめ、産業分野、エネルギー分野などに対する半導体市場も益々拡大している。エネルギー変換工学分野が関与している NEDO プロジェクトでは、新世代パワー半導体の高度化に向けた技術開発を進めており、自己最適化や故障予知など、高度な自己制御機能を持つインテリジェント・パワー半導体の開発に向けた取り組みが行われている。

図 1 に簡略化したパワーモジュールの模式図を示す。パワーモジュールの実際の動作として断続的な通電が行われているが、通電に伴う発熱は異種材料接合部に応力を発生させる。図 1 に示すように基板・Si チップ接合には半田が用いられており、Al ワイヤと Si チップも熱膨張率が異なるため、繰り返しかかる応力によって半田部分に亀裂が発生・進行して半田クラック（図 2）となり、ボンディングワイヤの剥離も引き起こされる。これらは電気抵抗や熱抵抗の増加を引き起こし、損失の増大や発熱による故障の要因となっている。

今回我々は、パワーサイクル故障を検出することが可能なセンシング技術の開発を目的としている。このため、強制的に劣化させた故障サンプ

ルを作製し、故障検出の実験実証を行う必要がある。そこで、パワーサイクル試験装置（図 3）を導入し、この装置を用いて断続的な強制通電を行うことで周期的な発熱・ストレスを発生させ、モジュールを強制的に劣化させる実験を行ったので、その実験内容と結果の一部について報告する。

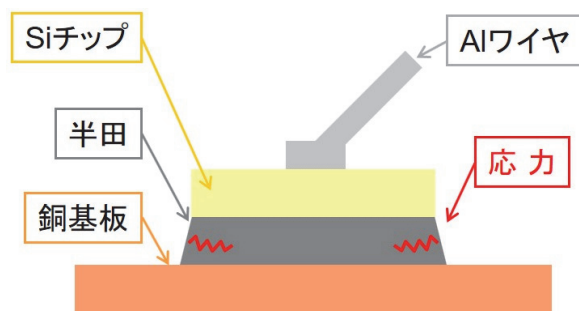


図 1 パワーモジュールの模式図

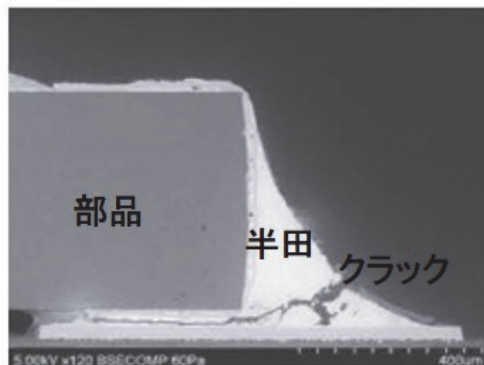


図 2 半田クラック^[1]



図3 パワーサイクル試験機

2. 実験方法

強制劣化に用いるサンプルモジュールを図4に示す。Infineon 製 FS75R12KT4_B15 で、1相ずつパワーサイクル試験（断続通電試験）に使用する。次に、パワーサイクル試験に用いる試験プロファイルの模式図を図5に示す。パワーサイクル試験時における電流のオンオフの時間をそれぞれ t_{on} 、 t_{off} とし、これを断続的に繰り返して周期的な発熱・ストレスを発生させている。この間のチップ接合部温度差 ΔT_j も含めて設定パラメータとしている。

パワーサイクル試験を用いた強制劣化の指標の1つとして熱抵抗（単位： $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ）がある。熱抵抗は、熱・温度の伝わりにくさを表す値であり、パワー半導体にとって大変重要な特性の1つである。パワー半導体の故障の原因の多くは過熱（オーバーヒート）であり、動作中のチップ接合部温度 T_j が製品仕様限界温度に達することもある。加熱と冷却が繰り返されることによって、熱抵抗は増大し、パッケージ内の接合境界部分に応力が

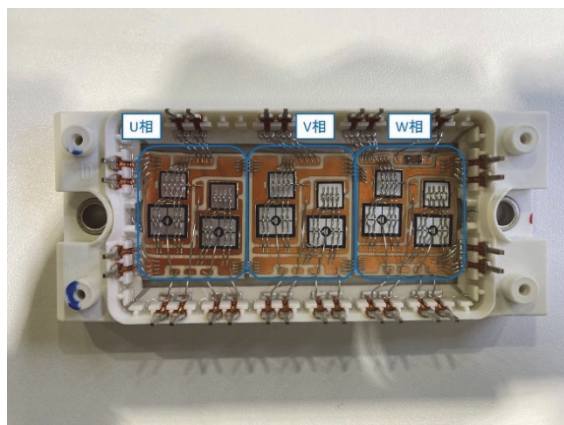


図4 パワーサイクル試験に用いたモジュール

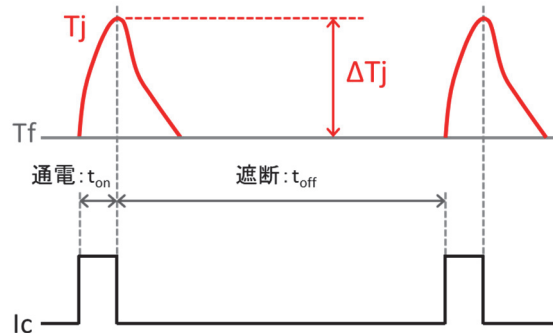


図5 パワーサイクル試験プロファイルの模式図

生じることが、剥離やせん断発生 of 的要因となる。今回の実験では、この熱抵抗を劣化の度合いの指標として用いている。設定したサイクル間隔ごとに熱抵抗を測定し、都度モジュールの劣化の度合いを確認する。

熱電対を用いて温度を測定し、測定した温度を用いて熱抵抗を算出する方法もあるが、サンプルとの接触熱抵抗や熱電対からの熱漏れ、パッケージ内部の温度が測定できない、測定再現性が良くないなどの問題があるため、高精度な熱測定には向いていない。このため、本実験では測定素子自体の温度特性を用いて温度の時間変化を高速で計測し、パッケージ各部の熱抵抗・熱容量を求めてグラフ化した構造関数を導き出している。構造関数は、パッケージ内部やヒートシンクなど実装構造ごとの熱特性（熱抵抗・熱容量）を分離・解析可能とするものである。また、パワーサイクル試験によるパッケージ内部の材料ごとの劣化具合の経時変化を分析できるという大きな利点もある。構造関数の求め方を以下に示す。

- PN 接合ダイオードの順電圧 V_F 、または IGBT の閾値電圧等と温度の相関パラメータ（K ファクタ）を測定・取得。
- PN 接合ダイオードに電流を流し、素子を加熱。
- 測定用の低電流に切り替え、冷却時の過渡的な V_F 値変化をモニタリングし、温度変化に変換。
- 構造材ごとに熱の伝わり易さが異なるため、ダイオードの温度変化から素子の内部構造の情報を取得。
- 取得したデータを構造関数に変換。

図6に半導体パッケージの模式図を、図7に図6で示した構造を持つ半導体パッケージの構造関

数の模式図を示す。図 7 のような構造関数を得ることで、デバイス内部の材料ごとの熱抵抗・熱容量を読み取ることが可能になる。図 7 より、Si チップやダイパッドは熱抵抗が小さく、熱容量が大きいことがわかる。また、ヒートシンクは放熱板なので、熱容量はほぼ無限大であり、熱抵抗は小さい。これに対して、半田やグリースといった接合部分は、熱抵抗が大きく熱容量が小さい。つまり、加熱と冷却が繰り返されることで、熱抵抗が大きい半田部分では温度が上昇して応力が生じるため、剥離やせん断が発生しやすくなると考えられる。図 8 にパワーサイクル試験前後の構造関数の変化の模式図を示す。同図より、半田層部分の熱抵抗がシフトしていることがわかる。このことは熱抵抗が上昇し、半田層に劣化・亀裂が生じる可能性が高まっていることを示している。

このように熱過渡特性解析から構造関数を算出・確認することで、構成材料ごとの熱抵抗と熱容量（内部構造情報）を取得することができるため、構造関数からデバイス内部の劣化場所・劣化具合を非破壊で読み取ることが可能となる。

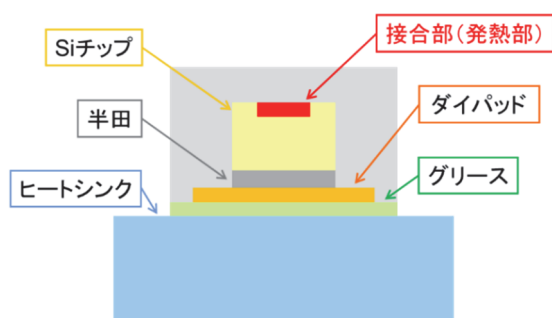


図 6 半導体パッケージの模式図

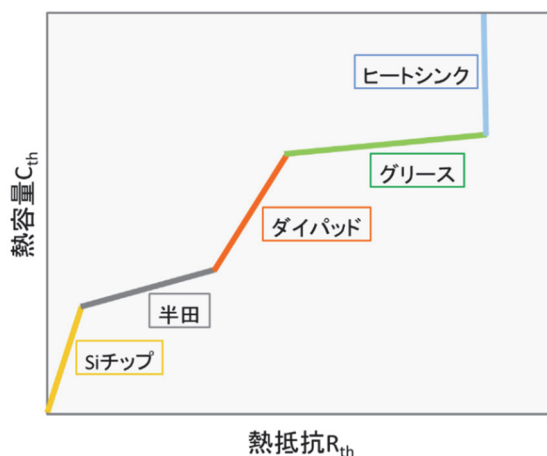


図 7 構造関数の模式図

ある条件を用いて、パワーサイクル試験を実施した場合の構造関数のグラフを図 9 に示す。また、図 10 に図 9 の半田層部分（赤丸部分）を拡大したグラフを示す。既述のように、パワーサイクル試験のサイクル数の増加に従って、半田層部分の熱抵抗がシフトしていることが図よりわかる。

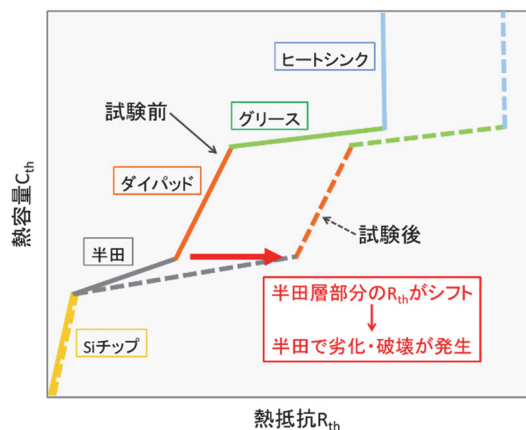


図 8 パワーサイクル試験前後の構造関数の変化

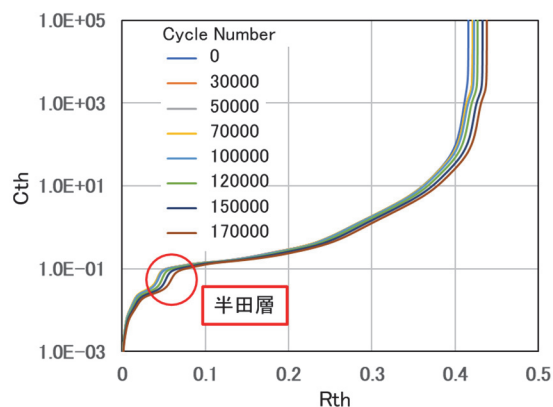


図 9 パワーサイクル試験時における構造関数の変化

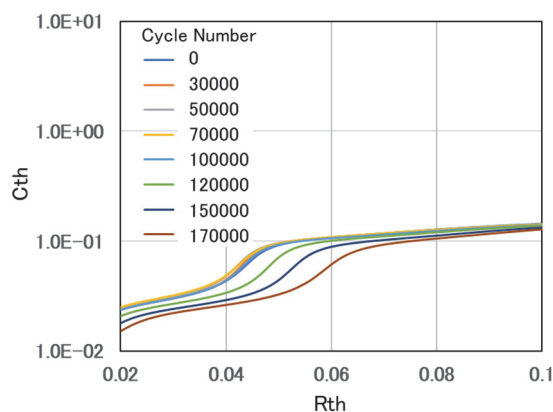


図 10 拡大した半田層部分の構造関数の変化

3. 実験条件の検討

パワーサイクル試験を実施するにあたって、まずワイヤリフトの剥離が発生する場合と半田部分のクラックが発生する場合の条件出しを試みた。このため、ワイヤリフトと半田クラックの寿命差をつける条件について検討した。アプリケーションノートより得られたデータを図 11 に示す。図より、ワイヤ、半田ともに ΔT_j 、 T_{jmax} （チップ接合部最大温度）が大きいほど寿命が短いことがわかる。また、半田はサイクル時間が長いほど寿命が短くなっている。つまり、 T_{jmax} が大きく、サイクル時間が長いと半田クラックが主に引き起こされるのではないかと予想した。ただサイクル時間を長くすればするほど、パワーサイクル試験にかかる時間も長くなる。パワーサイクル試験にかかる期間を 1~2 か月と想定した結果、サイクル時間は最大 30 秒、 T_{jmax} :150°C、 ΔT_j :80°C が妥当ではないかということで実験を進めていった。半田層の劣化度合を示す熱抵抗の変化 ΔR_{th} を指標とし、 ΔR_{th} =20%以上を目標に実験を行った。

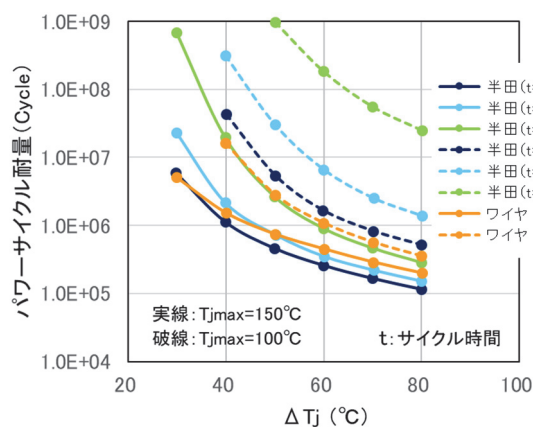


図 11 ワイヤリフト、および半田クラックの発生条件

4. 実験結果・考察

図 12、13 にパワーサイクル試験時における電流のオンオフ時間 t_{on} 、 t_{off} と T_{jmax} との関係を示す。図 12、13 より、 t_{on} が長く、 t_{off} が短いほど T_{jmax} が高くなることがわかった。

次に t_{on} =5.0[sec]、 t_{off} =5.0[sec]、 T_{jmax} :150°C、 ΔT_j :80°C という条件でパワーサイクル試験を実施した。その結果、サイクル数が累計約 114,000 回 (ΔR_{th} =約 8%) で、コレクタ-エミッタ間の電

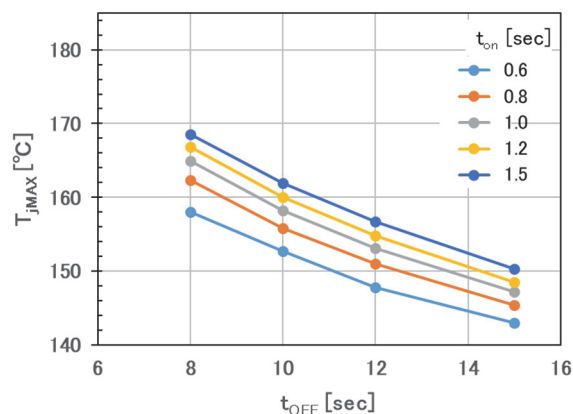


図 12 オフ時間が長い場合におけるオンオフ時間と T_{jmax} の関係

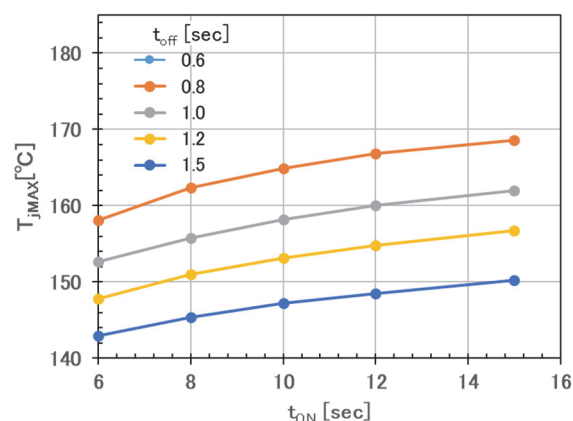


図 13 オン時間が長い場合におけるオンオフ時間と T_{jmax} の関係

気抵抗が急激に増加した。つまり、サイクル数が累計約 114,000 回でワイヤリフトが発生したと考えられる。このため、オンオフ時間 t_{on} 、 t_{off} の条件をいくつか変更してパワーサイクル試験を実施したが、概ね ΔR_{th} =8~10%でワイヤリフトが発生したため、そのたびに実験を中断し、実験条件について再度検討することを繰り返した。

いくつかの実験結果を踏まえ、オンオフ時間について再度検討した結果、今までのようにオンオフ時間を長くせず、短くしてはどうかということになった。また、サージによる実験装置の基盤の故障も数回発生したため、使用する電力はほぼ同じで、電流値のみ大幅に減少させることを試みることにした。そこで t_{on} =0.6[sec]、 t_{off} =1.5[sec]、 T_{jmax} :165°C、 ΔT_j :110°C、電流値を約 100A から約 20A に変更してパワーサイクル試験を実施した。図 14 にパラメータ、および電流値変更後

の熱抵抗の変化履歴を示す。図からわかるように、今回の実験条件の変更によって、 ΔR_{th} =約 40% という結果を得ることができた。これは、使用する電流値を大幅に減少させたことで、ワイヤにかかる応力を大きく低減させたことによって、ワイヤリフトよりも半田クラックの方が優勢になったのではないかと考えられる。また、今まではオフ時間を長くすることで半田クラックが進行する時間を確保する必要があるのではないかとということでオフ時間を長く設定していたが、図 6 の半導体パッケージの模式図からわかるように、ヒートシンクがあるモジュール底面から半導体パッケージは冷却されているため、オフ時間を短くすることで、ワイヤリフト部分の冷却作用が低減し、半田部分のみが加熱と冷却の影響を大きく受けるようになったのではないかと推測される。このような理由によって、ワイヤリフトと半田クラックの間に寿命差がついたのではないかと考えられる。

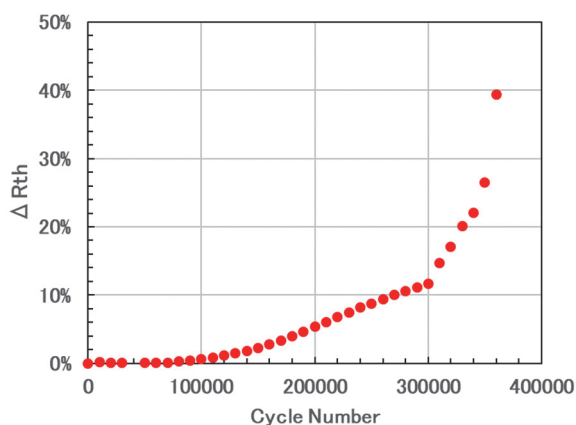


図 14 パラメータ、および電流値変更後の熱抵抗の変化履歴

次に、劣化速度を早める事を目的に、 ΔT_j =一定と I_c =一定時における熱抵抗の変化 ΔR_{th} の履歴の比較を行った。図 15、16 にそれぞれ ΔT_j =一定と I_c =一定時における ΔR_{th} と T_{jmax} のグラフを示す。図 15 より I_c =一定の方が、サイクル数が累計 300,000 回を超えたあたりから劣化速度が上昇しているのがわかる。図 16 のデータより、この要因について考察する。 ΔT_j =一定では、 R_{th} が大きくなると ΔT_j を一定にする為に I_c が減少するので、供給する熱量も減少する。これにより T_{jmax} が減少するため、 ΔR_{th} の増加速度も減少

すると考えられる。これに対して I_c =一定では、 R_{th} が増加しても I_c は一定なので、電力は増加する。このため T_{jmax} 、 ΔT_j は、熱抵抗が増加した分上昇するので、 ΔR_{th} の増加速度が減少しにくくなるのではないかと考えられる。

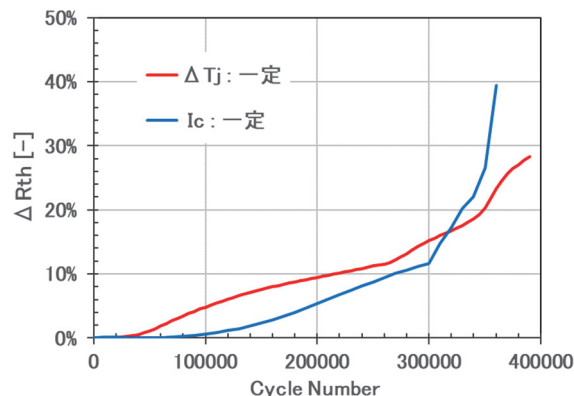


図 15 ΔT_j =一定、 I_c =一定時における熱抵抗変化の履歴

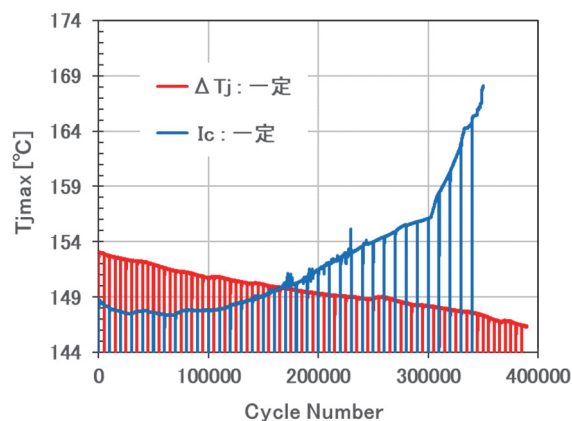


図 16 ΔT_j =一定、 I_c =一定時における T_{jmax} (チップ接合部最大温度) 履歴

5. まとめ

パワーサイクル故障を検出するセンシング技術の開発を目的として、パワーサイクル試験装置を用いて断続的な強制通電を行い、周期的な発熱・ストレスを発生させることでモジュールの強制劣化を行った。その結果、半田層の劣化度合を示す熱抵抗の変化 ΔR_{th} に対して、約 40% 近くまで熱抵抗を増加させることが可能な実験条件を抽出することができた。

今後は、所望の劣化度合のモジュールを得ることが可能な実験条件の抽出と制御技術の確立、モジュールの個体差と再現性の確認、サーモグラフ

ィを用いたパワーサイクル試験時のチップ部分の温度変化の測定などを実施予定である。

謝辞

本実験の実施に関して、日頃から御指導いただいている九州大学応用力学研究所 齋藤渉 教授、楠茂 学術研究員に、この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] https://www.risho.co.jp/rishonews/now/rn214_05/risho_now.html