

パワーデバイスの組立てと評価

東条 三秋^{1*}

Power Device Assembly and Evaluation

Mitsuaki TOJO^{1*}

¹ シーマ電子株式会社 設計・試作・評価センター (〒407-0033 山梨県韭崎市龍岡町下条南割 995 番 440)

¹ Design Trial-production Evaluation Center, SHIIMA Electronics Inc. (995-440 Shimojou-minamiwari, Tatsuoka-cho, Nirasaki-shi, Yamanashi 407-0033)

1. はじめに

近年のパワーエレクトロニクス業界は元気である。

ワイドバンドギャップ(WBG)半導体の台頭でパッケージ材料の高耐熱化の要求が強くなり、また、高放熱構造の要求も強くなり、これらの要求を満たす策は、通説が通用しないことが多くなっている。いわゆる技術や市場の変革期であり、新規参入のチャンスが今訪れている。また、パワーエレクトロニクス市場のロードマップを見ても魅力的な数字が並んでいる。

さらにカーボンニュートラルの実現のため、国からの予算も年々多くなり、ますます研究開発が進み、パワーエレクトロニクス業界が拡大することは疑う余地はない。

WBG半導体の性能を100%活かすには実装技術に無数の課題がある。この課題を一つずつ解決し、WBG半導体の性能を活かす割合を高めているのが現状である。

今まで通りの解決手法では、なかなか到達できないために新しい手法が現れてきた。言葉は適切ではないかもしれないが、トリッキーな材料、トリッキーな構造、そしてトリッキーな工程である。このトリッキーを工夫して量産性にするのが新しい技術であるが、基本を知らないと新しい技術までたどり着くのに時間がかかる、もしくはたどり着けない。

そこで本稿ではパワーデバイスを中心に、実装技術の基本概要を組み立てと評価に分けて説明する。

2. パッケージの組み立て

パッケージの組み立てには、さまざまな工程があるが、その中のパワーデバイスで重要な工程の概要を説明する。

2.1 ダイアタッチ

チップを基板やリードフレームなどに搭載し、接合させ

る。パワーデバイスでの接合材は主にはんだを使い、接合後のはんだ内のボイドをいかに低減できるかがパワーデバイスの性能に関わってくる。図1にボイド有り無しを示す。チップから出た熱ははんだを介して基板へ放熱するが、ボイドがある事で放熱経路が狭くなり、十分な放熱がされず、チップの温度が高くなってしまふ。チップの温度が高くなるとチップの電気特性の悪化や、チップの周辺材料の劣化が早まり製品の故障につながるため、はんだ内のボイドを少なくすることが重要となる。

このボイドの発生状況はリフローの方式で変わってくる。ギ酸還元減圧リフローと窒素還元大気圧リフローで比較した。先ず、両リフローの特徴を表1に示す。また、図2は両リフローで接合した際のボイドの状態をX線で観察

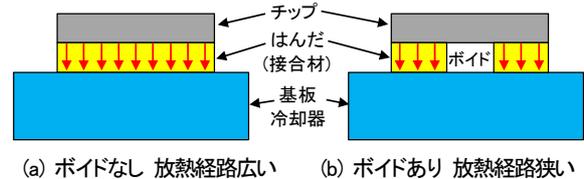


図1. ボイド有無での放熱

表1. リフローの特徴

	気圧	酸化防止	フラックス	ボイド
ギ酸リフロー	減圧	ギ酸雰囲気	不要	低減
窒素リフロー	大気圧	フラックス	必要	発生

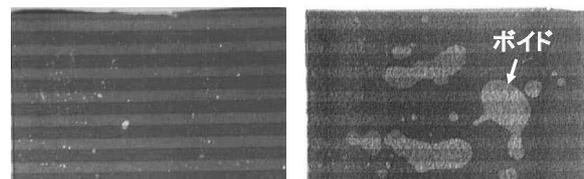


図2. リフローにおけるボイドの様子

*: Corresponding author
E-mail: tohjih@shiima.co.jp

表 2. ダイアタッチ材比較表

比較項目	高温鉛はんだ	シタリング材
接合プロセス	加熱のみで容易	加熱、乾燥、加圧があり工程複雑
厚さ違いチップの同時接合	可能	均一に荷重をかけることが重要
装置	汎用品あり	開発途上
熱伝導率	低い	高い
耐熱性	低い	高い
鉛フリー化	不適合	適合
価格	安価	高価

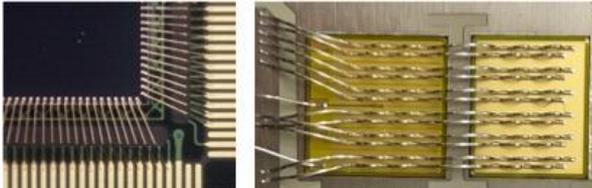
(a) ボールボンド Au φ20 μ m (b) ウェッジボンド Al φ300 μ m

図 3. ボンディング後のワイヤー

した結果である。窒素リフローは大きなボイドが有るのに対し、ギ酸リフローはボイドが低減されている。この違いは2つの要因にある。

- ①窒素リフローは大気圧での処理に対し、ギ酸リフローは減圧で処理するので、ボイドが抜けやすくなる。
- ②窒素リフローは酸化防止のためにフラックスを使用しなければならず、このフラックスから発生するガスがはんだ内から抜けきらずボイドとなる。ギ酸リフローは還元力が強いので、フラックスは不要でありフラックスのガスによるボイド発生はない。

現在では鉛の入った高温はんだが使用されているが、次世代パワーデバイス向けの接合材にはAgやCuナノペーストでシタリング接合するプロセスが期待されており、一部の製品では使用が始まっている。

表2に鉛はんだとシタリング材の比較を示すが、シタリングのプロセスと材料は開発途上にあるため、これからの動向が注目されている。

2.2 ワイヤーボンディング

チップから電気信号を取り出すために金属のワイヤーでチップと基板やリードフレーム間を結線する。2種類の方式があり、ボールボンディングとウェッジボンディングであり、図3がボンディング後のワイヤーである。

2.2.1 ボールボンディング

汎用デバイスで行われる事が多く、ワイヤーの種類にはAu, Ag, Cuなどがあり、線径は15~120 μ m程度となる。

2.2.2 ウェッジボンディング

パワーデバイスで行われる事が多く、ワイヤーの種類にはAlやCuなどがあり、線径は18~500 μ m程度となる。パワーデバイスの一般的なワイヤーの種類はAlであり、大電流を流すところの線径は300~500 μ m、小電流部は100

μ m前後が使用されている。次世代パワーデバイスではチップとAlワイヤーの接合不良が熱疲労により発生しているが対策としてCuワイヤーが検討されている。しかし、CuはAlに比べ硬いため、チップのパッドが壊れるケースが多い。そこでチップのパッドを保護する目的で、チップのパッドにNiを成膜したり、Cuを成膜もしくは接合したりと対策が検討されている。

2.3 樹脂封止

チップやワイヤーなどを水や光、物理的衝撃から保護するために樹脂で封止（成形）している。成形方法は3種類あり、トランスファー成形、コンプレッション成形、ポッティング成形がある。樹脂は主に2種類ありエポキシ系樹脂（ハード）とシリコン系樹脂（ソフト）がある。これらはパッケージの種類によって使い分けている。

2.3.1 トランスファー成形

エポキシ系の樹脂を使い、比較的小さいパッケージを成形する。大きいサイズの場合、成形後の常温に戻した際の温度差による収縮量が大きいため樹脂にクラックが入ってしまう。次世代パワーデバイスでは高耐熱材（高Tg）が求められており、そのような樹脂の場合、アフターキュア温度が高くなり、収縮量も大きくなってしまふ。よって大型モジュールでは使いにくい方式だが、半導体パッケージでは一番使われている成形方法である。

2.3.2 コンプレッション成形

トランスファー成形と同様にエポキシ系の樹脂を使い、成形は基板の片面のみで、成形厚は薄く、広い範囲を成形できる。厚く成形すると基板と樹脂の線膨張係数の違いから反りが発生してしまう（片面のみのため）。大量に安価で生産されるQFNパッケージや、広い範囲への成形を活かしFOPLP (Fan Out Panel Level Packaging) に用いられている成形方法である。

2.3.3 ポッティング成形

シリコン系の樹脂を使い、囲まれたケース内に流し込み、樹脂内のボイドを除去するために真空脱泡する。樹脂は成形後も柔らかいため応力は発生せず、大型のモジュールでも成形できる。しかし、以下の理由から大型モジュールをエポキシ樹脂でトランスファー成形する開発が始まっている。

- ・樹脂が柔らかいため物理的な衝撃からチップやワイヤーを保護できないので蓋などが必要。
- ・樹脂が柔らかいため振動でワイヤーが断線してしまう。
- ・樹脂が柔らかいためチップやワイヤーを押さえつけられず、チップやワイヤーの接合信頼性が下がる。
- ・樹脂が水分を通しやすく耐絶縁性の劣化もあるため、使用される環境によっては蓋の気密性が求められる。
- ・部品点数が多い。（ケースや蓋、ベース板、接着剤など）

3. パッケージの評価／観察／試験

パッケージの構造や組み立てに問題がないかや、信頼性(寿命)はどのくらいあるかを確認するために評価／観察／試験を実施する。パッケージは複数の材料で構成されているが、評価／観察／試験の対象はパッケージ全体(全ての材料)もあれば、一部の材料を対象とする場合もある。また、評価／観察／試験の種類は無数にあるが、全て実施する必要はなく、パッケージの使用される目的や使用環境、使用条件により評価／観察／試験の種類が選定される。

その中のパワーデバイスで重要な工程の概要を説明する。

3.1 熱抵抗測定

半導体パッケージを動作させると消費した電力分の熱が発生する。発熱源はチップであり、このチップの温度を許容範囲内にする必要がある。もし許容範囲を超えてしまうと誤動作したり、パッケージの寿命低下(製品の寿命低下)につながってしまう。よって、放熱が重要なパラメータとなり、この放熱を数値化したものが熱抵抗であり、熱が伝わるのを阻止する抵抗である。熱が伝わりやすければ熱抵抗値は小さくなり(放熱特性が良い)、伝わりにくければ熱抵抗値は大きくなる(放熱特性が悪い)。この熱抵抗の値はチップの温度を確認するために使用される数値である。図4は熱抵抗の図示である。

θ_{Ja} はチップから周囲温度までの熱抵抗であり、 θ_{Jc} はパッケージに冷却器を取り付けた際のチップからパッケージ表面までの熱抵抗である。

熱抵抗は以下の式で計算される。

$$\theta_{Ja}[\text{°C/W}] = (T_j - T_a) / \text{消費電力}$$

$$\theta_{Jc}[\text{°C/W}] = (T_j - T_c) / \text{消費電力}$$

熱抵抗を計算するためのパラメータ T_a と T_c は熱電対や温度計があれば簡単に測定できる。消費電力は測定中の電流値と電圧値から計算できる。問題は T_j (チップ温度) であり、通常のパッケージのチップは露出していないので直接温度を測定できない。そこでチップの温度とチップの電圧の関係(Kファクター)をあらかじめ測定しておき、熱抵抗測定時にチップの電圧からチップの温度を計算する。

θ_{Ja} は主にパッケージの熱設計をする際に使われる値で

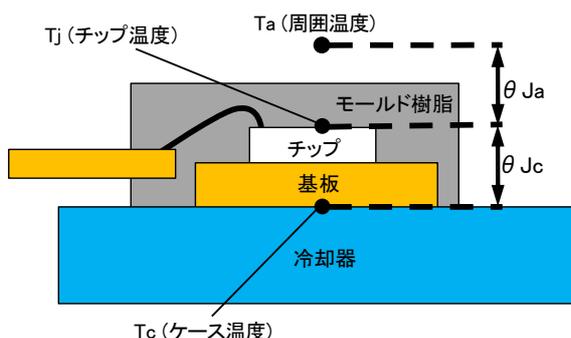


図4. 熱抵抗の図示

ある。 θ_{Ja} の値が判ればチップの温度を許容範囲内にするためには何ワットまで電力を与えられ、使用環境温度は何 $^{\circ}\text{C}$ に設定する必要があるなどの条件が決められるパラメータである。

θ_{Jc} は実機で動作させた際のパッケージの表面温度を測定することでチップの温度が何 $^{\circ}\text{C}$ になっているかを確認できるパラメータである。

3.2 反り測定

パッケージや基板、チップなどの薄型化に伴い温度変化による反りやネジレが発生しやすくなった。この反りにより組み立て不良や、組み立て後の信頼性低下が問題視されている。

パッケージや基板、チップなどは複数の材料が積層されてできている。複数の材料はそれぞれ線膨張係数が違うため、温度変化により収縮／膨張量が異なり、反り発生→応力発生→破壊となっている。特にパワーデバイスは組立工程の中でより高い温度にさらされる事があり、また動作時も高温になるので、温度による反りの問題が顕著になる。

図5はパッケージの反り測定結果である。

重要なのは温度をかけながら反りを測定することである。温度によって反りの量が異なり、また、谷反り／山反りかを把握することも重要である。

例えば二つの材料を加熱して接合する場合、加熱温度が最大の時に反りが大きくても、冷却工程で接合材が固まる時と常温時の反りが同じくらいであれば残留応力がなく接合信頼性が高いと言える。

3.3 静特性測定

パワーデバイスの静特性(DC電気特性)を測定する。

表3はMOS-FETとダイオードの主な測定項目であり、温度をかけながら測定することも重要である。

目的を以下に示す。

- ・組み立て後の測定→組み立てでチップに反りが発生し、応力により電気特性が変わっていないかを確認する。
- ・温度をかけながらの測定→温度をかける事でパッケージが反り、応力により電気特性が変わっていないかを

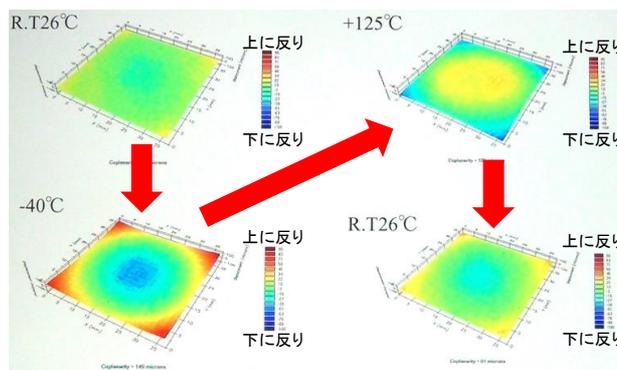


図5. 反り測定結果例

表 3. 測定項目

MOS-FET	ダイオード
IDSS (遮断電流)	IR (遮断電流)
IGSS (遮断電流)	VR (降伏電圧)
VDSS (降伏電圧)	VF (順方向電圧)
VFDS (順方向電圧)	
VTH (しきい値)	
VDSON (on 抵抗)	

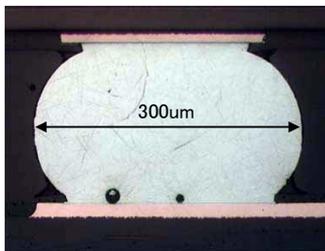


図 6. 光学顕微鏡観察 (はんだボール接続部)

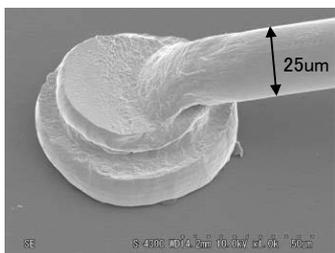


図 7. 電子顕微鏡観察 (ボンディングワイヤー接続部)

確認する。

- ・各種試験前後の測定→試験によりパッケージにダメージが入り、電気特性が変わっていないかを確認する。

3.4 各種観察

観察と言っても複数の方法がある。見たい物のサイズや、見たい物がどこにあるか、見たい物の材質などで方法が違ふ。よって最適な方法を選択することで見たい物が鮮明に見え、逆に誤った方法を選択すると見たい物が見えない。

3.4.1 光学顕微鏡観察

簡易的な方法で見たい物を拡大して観察できる。

図 6 は BGA パッケージのはんだボール接続部の観察写真である。

3.4.2 電子顕微鏡観察 (SEM)

光学顕微鏡に比べ高倍率で観察できる。可視光線の代わりに電子線を使うので高分解能な画像が得られる。高分解能ゆえに高倍率で表示できる。また、焦点深度が深いため立体的な画像が得られる。図 7 はボンディングワイヤー接続部の観察写真である。

3.4.3 超音波顕微鏡観察 (C-SAM, SAT)

半導体分野では主にパッケージの内部を非破壊で観察できる。医療分野でのエコーと同じ原理であり、超音波をサ

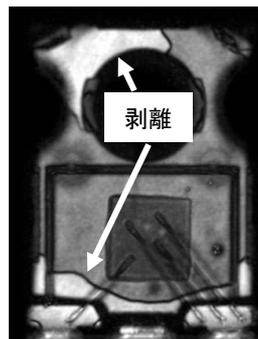
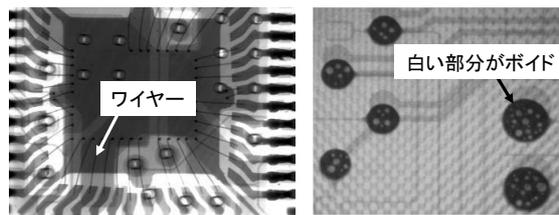


図 8. TO パッケージの剥離観察



(a) ボンディングワイヤー観察 (b) はんだ内ボイド観察

図 9. X線観察

ンプルに透過させ反射波を捉え、サンプル内部の状態を画像にする。空気層は反射波が大きく、画像に現しやすいことから主にボイドや剥離、クラックの検査手法として使われている。

超音波の周波数には幅があり、高い周波数ほど分解能は高くなるが、透過力が弱くなるため、透過しにくいサンプルや、厚いサンプルには低い周波数を使用する。このように、最適な周波数を選定することが重要なポイントとなる。

図 8 は TO パッケージのリードフレーム/モールド樹脂間の剥離の観察写真である。

3.4.4 X線観察

半導体分野では主にパッケージの内部を非破壊で観察できる。医療分野でのレントゲンと同じ原理であり、X線をサンプルへ透過させ、透過像を観察する。密度の高い物質は透過せず影のように黒く表示され、この影を観察する。密度が高いとは、原子量が多い物質となるので、金属が対象となり、密度の低い有機系の物質は透過するので、白く表示され何も見えない。また、金属の中でも密度の低いアルミなどは透過量が多いため観察しにくい物質である。主な検査の対象は樹脂封止後のボンディングワイヤーの形状や、はんだ/シンター接合部内のボイド観察になる。図 9 はボンディングワイヤーとはんだ内のボイドの観察写真である。

3.4.5 プル/シエア試験

接合された材料を引っ張ったり (プル)、ずらしたり (シエア) して破壊強度を測定する試験である。

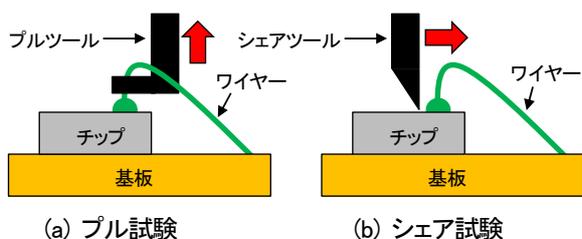


図 10. プル/シヤ試験



図 11. プリンカップ試験

3.4.5.1 ワイヤーボンドのプル/シヤ試験

ワイヤーの接合強度を測定する。ワイヤーの1stボンディング側と、2ndボンディング側の両方を測定する。ワイヤー径は15~500 μm と幅があるので、ツールのサイズも複数必要となる。図10は概略である。

3.4.5.2 チップ接合材のシヤ試験

チップの接合強度を測定する。パッケージが動作した際には高温になるので、温度をかけながらの測定も重要である(特に次世代パワーデバイス)。

3.4.6 プリンカップ試験

モールド樹脂を基板に成形した際の接着力を測定する。モールド樹脂はチップやリードフレームなど、さまざまな材料と接着させるので基板の材質もさまざまになり、CuやSi、Alなどがある。また、表面のめっきもCuやNi、Agなどがある。さらに表面の粗さを振る場合もある。パッケージが動作した際には高温になるので、温度をかけながらの測定も重要である。(特に次世代パワーデバイス)

図11は樹脂成形後のサンプルと概要である。

3.5 温度サイクル試験(サーマルサイクル試験, TCT)

高温環境と低温環境に繰り返しさらし、この温度変化に対する加速耐久試験が温度サイクル試験である。温度変化とは1日の中でも最高気温/最低気温という変化があり、また、パッケージは動作/停止でも自己発熱や隣の部品から熱をもらうなどの温度変化もある。パッケージは複数の材料で構成されており、それぞれ線膨張係数が違うので、この温度変化により材料間の界面もしくは、材料そのものに応力がかかる。

応力が繰り返しかかる事で熱疲労による材料間の剥離や材料のクラックなどが発生し破壊となる。この状況を加速的に試験する。加速とは市場での温度よりも厳しい条件で試験し、さらに試験サイクル時間を短くすることで、例え

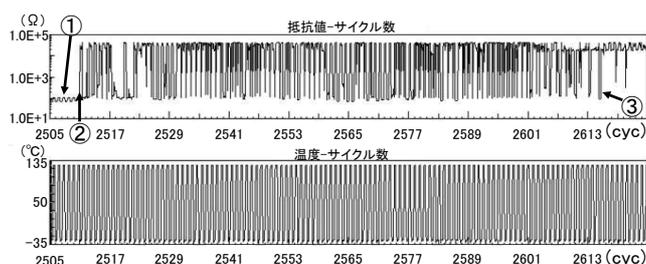


図 12. 抵抗常時モニタ結果

ば1日試験することで市場での1年分に相当させる事ができる。

また、破壊サイクル数の確認は試験機から定期的に取り出して良否を確認する方法と、試験中にサンプルの電気抵抗を常時確認する常時モニタ法がある。定期的に取り出して良否を確認する方法は正確な破壊サイクル数はわからない。例えば100サイクル毎に試験槽から取り出し良否を確認し、500サイクルで破壊が確認された場合は401~500サイクルの間で破壊されたという大体の数値しかわからない。しかし、常時モニタ法ではデータロガーなどに電気抵抗の測定結果を収録しておけば破壊サイクル数が正確にわかる。さらに装置内の温度も同時に測定しておけば、破壊した環境(低温時/高温時/降温時/昇温時)もわかり、その後の対策立案にも役に立つ。

図12は常時モニタでの導体抵抗の測定結果である。

図12の上のグラフは測定した抵抗値とサイクル数、下のグラフは温度とサイクル数を表している。グラフ中の①の部分はまだ良品であり、②の部分で抵抗値が上がり不良となっている。ただし、低温時のみ不良であり、常温や高温時の抵抗値は元に戻っている。とすることは不良になって数サイクル後に装置から取り出し、常温環境下で抵抗値を確認しても良品という、誤った判定をしてしまう。図12の事例ではこのような現象が③まで続いており、時には数百サイクル続く事もあるので、常時モニタできるサンプルは常時モニタを推奨する。

この現象は配線経路のどこかでクラックが発生し低温時には配線間が離れて抵抗値が高くなるが、常温や高温時には配線間が接触して抵抗値が元に戻っている。パッケージの反りによりこのような現象が発生する。

3.6 パワーサイクル試験

温度サイクル試験はサンプルの周囲温度を上下させるのでサンプル全体が加熱/冷却され、1サイクルの時間は20分~60分程度である(サンプル全体を同じ温度にさせるため、1サイクル時間は長い)。よって、温度変化による試験の対象部位はパッケージ全体となる。それに対しパワーサイクル試験はパッケージに電力を印加し(動作させる)、自己発熱による加熱となり、冷却は電力印加を止め冷却させる。電力の印加時間(加熱)は短く数秒程度のためチップ周辺は高温となるが、チップから離れた部分ほど温度は上

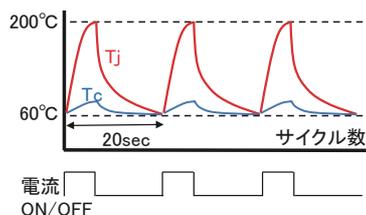


図 13. 短周期試験

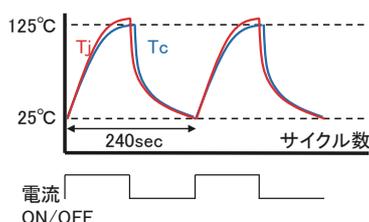


図 14. 長周期試験

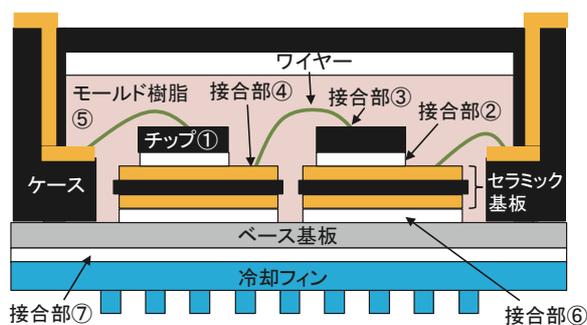


図 15. 評価部位

がらない。チップを含むチップ周辺の温度変化による信頼性試験となり、パワーデバイスの実動作を模擬した試験となる。よって主にパワーデバイスの試験であり、パワーデバイスではほぼ必須の試験である。図 13 は短周期試験の温度プロファイルである（サイクルの時間が短い）。熱源であるチップの温度 T_j は上昇しているが、パッケージの表面であるケース温度 T_c はほとんど変化がない。これは電流の印加時間（加熱時間）が短いためケースまで温度が到達しないことを表している。

これに対し、図 14 に示す長周期試験もある。長周期試験は短周期と比べ印加電力を小さくして発熱時間を長くすることでチップからある程度離れた部分も加熱できるので、チップから離れた材料を評価するのが目的となる。

次に主な評価部位を図 15 に示す。

- ・短周期試験対象部位：①～⑤
- ・長周期試験対象部位：④～⑦
- ①チップの電気特性
- ②ダイアタッチ部の接合部
- ③ボンディングワイヤーの接合部 1st 側
- ④ボンディングワイヤーの接合部 2nd 側

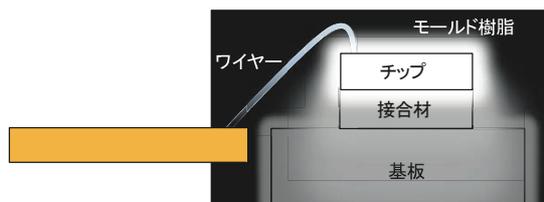


図 16. 発熱時の温度分布

- ⑤モールド樹脂の密着性
- ⑥セラミック基板の接合部
- ⑦ベース板と冷却フィン間（放熱シートやグリース）

再度、温度サイクル試験との比較になるが、温度サイクル試験はサンプル全体の温度を上下させるので、材料毎の線膨張係数の差が効いてくる。逆に言えば線膨張係数差を小さくすることで信頼性は上がる事になる。それに対してパワーサイクル試験はサンプル内で温度差がある。

図 16 ではパッケージ内の温度分布を表している。

- ・白色が濃い部分ほど温度上昇が大きく、材料の伸びは大きい。
- ・白色が薄い部分は温度上昇が少なく、材料の伸びは小さい。
- ・他の色の部分は温度上昇がほとんどなく、材料の伸びはほとんどない、もしくはない。

このようにパワーサイクル試験では各材料の線膨張係数差を小さくするだけでは簡単に試験に合格するわけではなく、構造や材料特性、放熱経路、熱分布などを考慮した構造設計が重要で、いろいろな要素が複雑に絡み合うので予め熱応力シミュレーションを十分に実施する必要がある。

4. おわりに

パワーデバイスを中心に半導体パッケージの組み立ておよび、評価／観察／試験の基本概要を紹介した。この基本概要を活かした上で応用に挑むことで、現在抱えている課題を解決するスピードが上がるのではと考える。

WBG 半導体の性能を 100% 活かすために、無数の課題を解決し、カーボンニュートラルの実現に、半導体業界として寄与できると期待する。

終わりなき課題解決は始まったばかりではあるが、半導体業界のエンジニアとして、やりがいはある。

(2022.4.21- 受理)

著者紹介



東条三秋（とうじょう みつあき）

1997 年シーマ電子に入社。半導体パッケージの熱を中心とした評価に従事。2005 年から半導体パッケージの組立て試作にも従事し、2010 年からはパワーデバイスの試作組立て／評価を開始した。電力半導体デバイス接合部の国際標準化研究委員会や、複合材料電子回路基板の放熱設計手法に関する国際標準化研究委員会にも参加している。