

半導体パッケージの熱変形検査技術

■ 石原 満宏
Mitsuhiro Ishihara

■ 井上 征利
Masatoshi Inoue

1 はじめに

これまで半導体製品の性能向上を牽引してきた LSI 製造プロセスの微細化は限界が近づいてきており、今後は複数の LSI チップを一つのパッケージにまとめる、MCM (Multi Chip Module) 技術がその役を担うことになる。TSV (Through Silicon Via) を用いて複数の LSI チップを垂直に積層する 3D 実装や、水平に統合する 2.5D 実装などの新しい MCM がすでに実用化されてきており、パッケージ構造の複雑化が進んでいる。

パッケージ構造が複雑になると構成材料それぞれの熱膨張率の違いから変形や残留応力が発生し、機械的信頼性不良の問題を引き起こす可能性が高くなっていく。このような背景から、半導体パッケージの熱に対する変形特性を正しく評価できる装置 (以下、熱変形検査装置) の需要は年々高まっている。

このような需要に応じて JEDEC^{注1)} では、熱によるパッケージの変形評価のための規格 JESD22-B112A⁽¹⁾ をまとめている。そこには変形を評価するための四つの計測手法が列挙されている。図 1 に各手法の計測原理の模式図を示す。

共焦点法以外の手法はいわゆる三角法 (三角測量法) とよばれる計測手法である。サンプル表面が拡散反射面である必要があり、さらに DIC 法においては表面に模様が必要となる。そのため拡散反射や模様が不十分であるパッケージ基板においては通常サンプルへの塗装を必要とする。また、これらの手法を用いた市販装置は 1 回の計測 (1 視野計測) でサンプル全体を計測することを前提としているため分解能が低く、バンプ^{注2)} などの基板の微小な部品を適切に処理できない。そのため通常これらの部品は物理的に取り除いておく必要がある。塗装

や部品の除去は手作業で行われ基板変形計測値に少なからぬ影響を与えることは必定である。

東光高岳は、共焦点法を用いたインラインバンプ高さ検査装置で多くの実績を重ねてきた⁽²⁾。バンプ高さ検査装置ではバンプの高さ・コプラナリティ検査に加え、基板の変形も同時に検査しており、塗装もバンプの除去も必要がない。この技術を用いることで他手法のもつ上記のような課題を免れた新しい熱変形検査装置を製品化⁽³⁾したので報告する。

以下では、装置全体の構造・動作について概説し、その後本装置の大きな特長である加熱炉と計測機構について詳説する。

2 装置概要

2.1 装置仕様・構造

図 2 に装置の外観を、表 1 に装置の主な仕様を示す。図 3 は装置の構造を示す模式図である。主要な構成要素は、サンプルの表面形状を計測する計測機構部分とサ



図 2 装置 (HVI-8000-RC) 外観

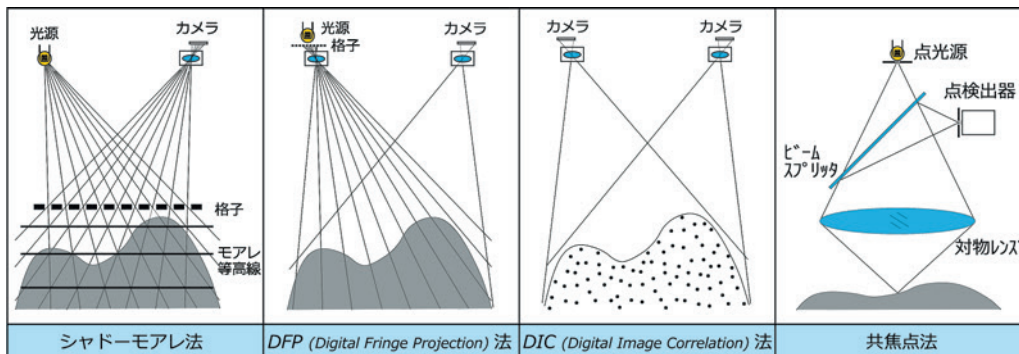


図 1 各種の変形計測法

ンプルを加熱する加熱炉であり、これらについては次章以降で詳述する。加熱中は、サンプルだけでなく加熱炉自体も高温になることから、安全に配慮して装置全体が

筐体で覆われており加熱中は扉がロックされている。それによる筐体内部の温度上昇を防ぐためにエアコンディショナを備えている。

表 1 HVI-8000-RC 仕様

装置型式	HVI-8000-RC
測定原理	非走査共焦点方式
視野サイズ	13 × 13 mm
XY 分解能	8 μm
Z 計測範囲	最大 4 mm
Z 軸計測分解能	0.1 μm
加熱方式	対流加熱
加熱温度	R.T. ~300°C
加熱速度	最大 2.0°C / 秒
計測時間	< 約 1.0 秒 / 視野

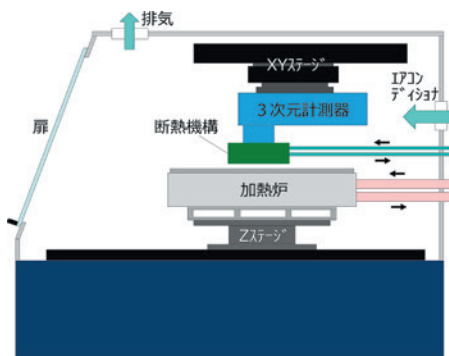


図 3 装置構造

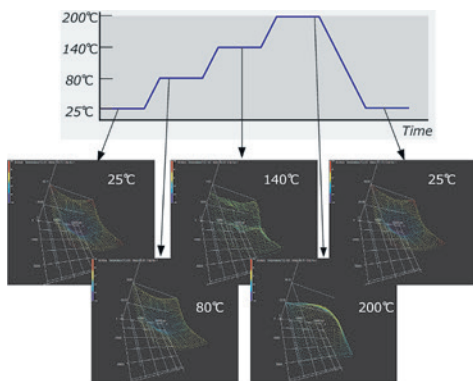


図 4 温度プロフィールと計測結果の例

2.2 動作概要

加熱炉にサンプルをセットしスタートボタンを押すと、事前に設定された温度プロファイルにもとづきサンプルが加熱される。温度プロファイルには最大 32 点の計測温度を設定できる。計測温度まで加熱されると、そこで温度が一定に維持され計測動作が開始される。計測が完了すると次の設定温度まで加熱され、また計測が実施される。後は同様にすべての設定温度で加熱・計測がなされ、最後に室温（安全温度）に戻って一回の計測シーケンスが完了する。温度プロファイルとその計測結果の例を図 4 に示す。

2.3 データ解析

データ解析として、三次元計測器で計測された表面形状点群データをサンプルの変形量（反り量）に変換する（特徴抽出する）作業が必要である。本装置では上記の計測シーケンス中にリアルタイムで解析が実施され、計測シーケンスが完了した時点で解析もすべて完了する。図 5 にデータ解析のようすを示す。2,000 万点を超える表面形状点群データから不要なバンプ部分を除去し、バンプ周辺の基板高さを抽出して変形を評価している。これを実現するためには、評価ウインドウ位置座標群を事前に設定しておく必要がある（図 5 ではバンプ座標に相当）。評価ウインドウ位置座標群は、サンプルの特徴的な形状（例えば基板姿勢認識用マーク）を基準にして設定され、計測時にはその形状をリアルタイムで画像探索し、その位置を基準に評価ウインドウ位置座標群がアライメントされ特徴抽出処理が実行される。

3 加熱炉

本装置は、JEDEC 規格サイズのトレイを取めること

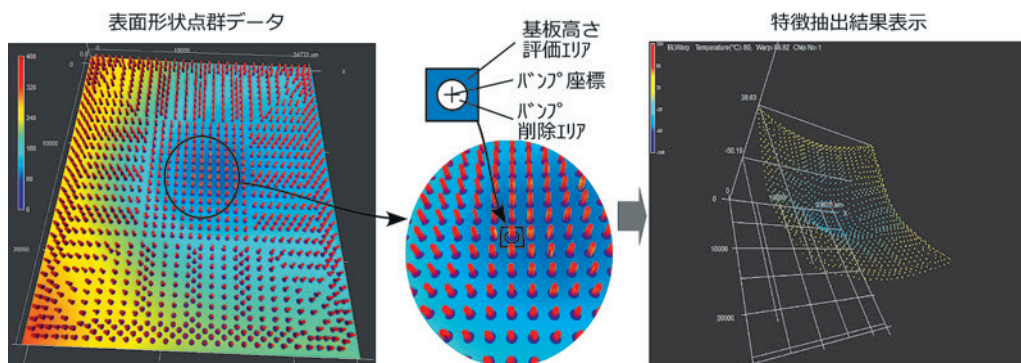


図 5 データ解析処理



図6 加熱炉構造

ができる大型の対流方式加熱炉を備えている。加熱炉の構造を図6に示す。伝熱工学によれば、熱が伝わる形態として以下の三態がある。

- ①熱伝導 (Conduction)
- ②対流熱伝達 (Convection)
- ③熱放射 (Radiation)

熱伝導による加熱は、ホットプレートの上にサンプルを載せる方式が代表的なものである。対流(熱伝達)方式による加熱はサンプルに熱風を吹き付けるもので、はんだのリフロー炉^{注3)}はこの方式である。熱放射による加熱は、赤外線ランプを使った電磁波(光線)加熱である。

市販の熱変形検査装置のほとんどは近赤外線ランプによる熱放射加熱であり、東光高岳においても従来は近赤外線ランプを使用していた。しかし光線は指向性が強く、さまざまな形状・サイズのサンプルを全周から均一に加熱することは困難で、表裏を含むサンプル内部の温度差あるいはトレイ上の場所による温度差の発生を避けることは難しかった。一方、対流方式の加熱は、サンプルの周囲温度を上げて全周から加熱することになるので高い均一性を実現できる。また半導体パッケージは、実装時に対流方式のリフロー炉で加熱されるので、リフロー炉と同一条件での加熱がユーザより強く望まれていた。そのほかにも対流加熱方式の実用上のメリットとして以下が挙げられる。

(1) 材料の違いによる影響が少ない

熱放射加熱は、サンプル表層材料の赤外線吸収率により加熱の容易さが大きく変わる。例えば金属は表層で光線を反射してしまうので表面処理なしでは加熱できない。対流加熱は空気分子を衝突させることによる直接的な加熱なので材料の違いによる影響が少ない。

(2) サンプル放出ガスによる汚損が少ない

半導体パッケージは高温になるとはんだフラックスの酸化などによるガスが発生し、炉の窓ガラスが汚損され計測に影響する。対流加熱においては発生したガスが加熱の対流とともに外部に排出されることから汚損の発生はきわめて少ない。

(3) サンプルへの熱電対貼付が不要

サンプルの正確な温度制御のためにはサンプルの温度モニタリングが必要となるが、熱放射加熱においてはサンプルそのもの、もしくは同じ材質のものでサンプル温度をモニタリングしなければならない。そのためサンプル

への熱電対貼付は必須である。サンプルへの熱電対貼付は手間がかかり、ダミーサンプルが必要であり、小さいサンプルなどでは貼付が困難であったりする。対流加熱では、事前のテスト加熱により炉内の気温からサンプル温度を推測できるので制御のための熱電対貼付は不要である。

(4) 同一方式で冷却が可能
車載半導体においては信頼性試験のために氷点下の温度が必要とされる。対流方式においては加熱だけでなく冷却も同一方式で可能でありシームレスな制御が可能である。熱放射方式での冷却は不可能である。

4 計測機構

計測機構部分は、共焦点方式の三次元計測器およびそれを移動させるXYステージ、加えて加熱炉から三次元計測器への熱の伝達を遮る断熱機構より構成される。

4.1 三次元計測器

本装置の最大の特長は共焦点方式の三次元計測器にある。東光高岳の三次元計測器は、計測原理に共焦点方式を採用し共焦点方式の欠点である計測速度を独自の光学系により大幅に向上させている。以下に原理を解説する。

図7(a)は共焦点方式三次元計測の原理図である。ピンホールを照明し対物レンズによりピンホールの像を物体に投影する。物体上で反射した光を同じピンホールで受け、ピンホールを通過した光量を検出する光学系となっている。物体表面がピンホールの結像位置にある場合、対物レンズにより反射光は再びピンホール上で結像しほとんどの光がピンホールを通過して強い検出器出力が得られる。一方、物体表面がピンホール結像位置以外にある場合は反射光がピンホール上に結像することなく広がり、ピンホールを抜ける光は少なく弱い検出器出力しか得られない。物体を光軸方向(Z方向)に移動させて検出器出力が最大値となるZ位置を探索すれば物体表面のZ位置が同定される。光学系をXY方向に動かして同様の計測をすることで物体表面の三次元形状を得ることができる。これが共焦点方式の計測原理である。図7からわかるように共焦点方式は物体からの正反射光を利用しており、一般的な三角測量方式のように物体面上での散乱反射を前提としていないため平滑面であっても塗装をする必要がない。

共焦点方式の問題は計測速度である。XYZ三軸の走査が必要であり著しく時間を消費してしまう。そこで図7(b)に示すようにピンホールを二次元方向に多数配列しかつ二次元検出器(すなわちカメラ)を用いて、XY走査することなく計測が可能な非走査三次元計測方式を実現した。Z方向の走査はZ移動ステージにより

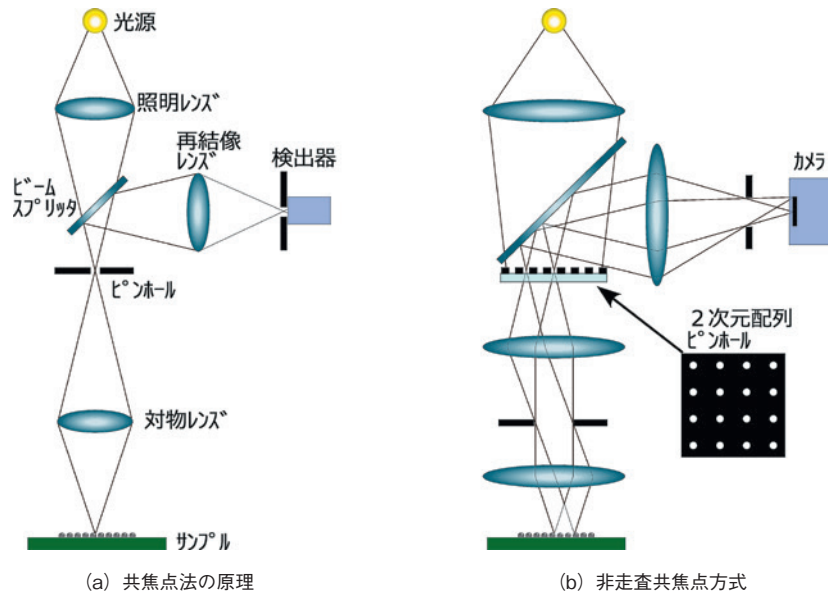


図7 三次元計測器の計測原理

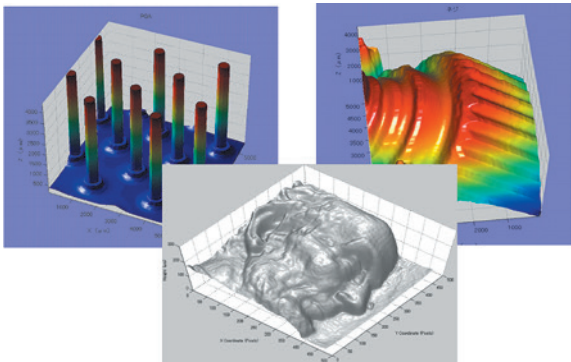


図8 計測例 (左からピングリッドアレイ, 1セントコイン, スクリュー)

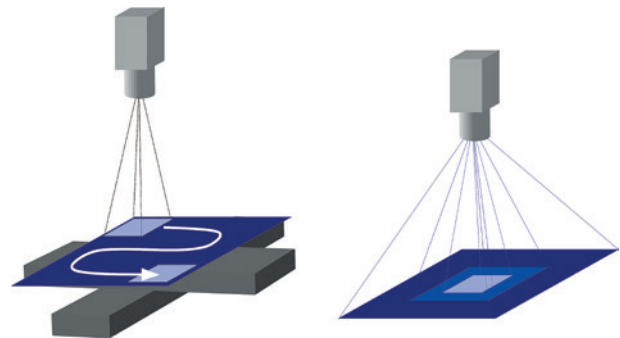


図9 視野サイズを超えるサンプルへの対応

行う必要があるが、非走査共焦点方式では停止することなく連続的にZ移動をしながらカメラのシャッター機能を使ってデータ取得することができるため高速である。Zステージに設けられたナノ分解能のリニアスケールによりシャッターのタイミングが制御されるので高速でありながらも正確なZ位置でデータが取得される。

これにより共焦点計測の高い精度を維持しながらも、バンプの全数検査が可能なレベルの高速性が実現されている。

図8に非走査共焦点方式三次元計測器の計測例を示す。汎用性の高い計測が可能である。

4.2 XYステージによる複数視野計測

非走査共焦点方式では対物レンズの視野内(13×13mm)のXY走査は不要である。しかし視野サイズを超える大きさのサンプル、あるいはトレイ上に多数のサンプルが並べられている場合にも対応するためにXY方向の移動手段が必要である。本三次元計測器は大型のXYステージに搭載されステップアンドリピートでの複数

視野計測ができるようになっている。一方、市販のほかの熱変形検査装置ではサンプルが視野サイズを超える場合にはレンズの倍率を変更して対応するのが一般的である。図9に模式図を示す。

レンズの倍率を変える方式は計測速度がサンプルのサイズに関わらず一定であるメリットはあるが、XY分解能が変化するため計測に影響を与える。例えば、バンプのような微細な凹凸をもつサンプルをトレイに並べて計測する場合、トレイ全体を1視野に収めようと解像度が落ちてバンプが認識できず、サンプルの変形とバンプによる凹凸の区別ができなくなってしまう。そのため事前にバンプの除去が必要とされる。しかし本装置では解像度が一定であるためサンプルサイズに関わりなく、本稿の2章「2.3 データ解析」で示したようにデジタル画像処理によりバンプ除去が可能であり、物理的な除去の必要がない。

XYステージを使った本装置の方式は、常に高解像度の計測ができるメリットがある、一方で、大きいサイズあるいは多数のサンプルの計測では点群データの量が膨

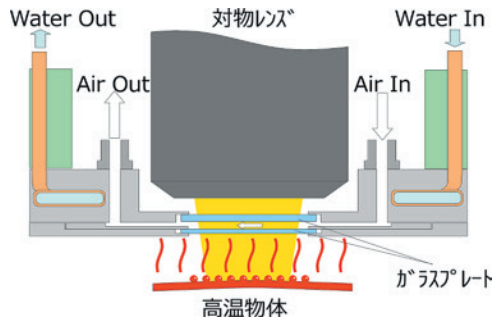


図 10 断熱機構構造

大となり、データの保存容量、解析にかかる時間が問題となってくる。しかしこれも2章「2.3 データ解析」で示したように本装置では計測中にリアルタイムに解析・特長抽出を行い結果のみを残すことが可能であり、点群データを残す必要がない。そのため、例えば大量のサンプルを試験するような場合でも、データの保存容量を気にする必要もなく、大量の計測データを後で解析することも不要であり効率的である。バンプ高さ検査機で培った自動検査機能の応用である。

4.3 断熱機構

本装置の三次元計測器の光学系は顕微鏡レベルの分解能を有する精密光学系である。そのため大きなワーキングディスタンスをもつことができず、加熱炉と非常に近接した状態にならざるを得ない。300°Cレベルの高温加熱をする場合、加熱炉は内部だけでなく外部も100°Cレベルの高温になり得る。高精度計測器の光学系に熱が伝わると熱膨張により光学系の特性に変化が生じ計測に影響するため、断熱は必須である。

先に述べた伝熱の三態において、非接触計測である光計測では熱伝導を考慮する必要は通常なく、対流熱伝達と熱放射について検討が必要である。図10に開発した断熱機構の構造を示す。高温の加熱炉により加熱された空気は上昇し直接的に対物レンズを加熱する。それを防ぐために遮蔽物を設けている。遮蔽物は時間を経るといわずれ高温になることから、遮蔽物の内部に水路を設けチラーで水冷し、遮蔽物上部に伝導する熱を途中で奪い外部に排熱している。光路部分には不透明な遮蔽物を用いることができないため平行平面ガラスで熱対流を遮断する。ここでもガラスの上部に伝熱することを防ぐ必要があるため、ガラスを上下2枚に分け、ガラス間にエアを流して強制対流を作り熱が上部ガラスに届かないようにしている。図11に断熱性能試験結果の一例を示す。約250°Cに加熱されたサンプルに断熱機構付の対物レンズを15mmまで接近させ対物レンズの温度を測定している。温度変化は1°C以下であり、十分な断熱性能を有していることがわかる。

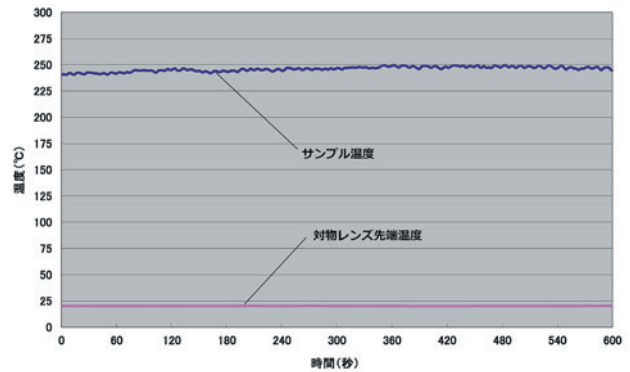


図 11 断熱性能試験結果

5 おわりに

塗装やバンプ除去などのサンプル前処理が不要で、リフロー炉と同じ対流型の加熱炉を有する新しい熱変形検査装置を紹介した。われわれと同様に、サンプルの前処理や熱放射加熱に疑問をおもちの方にご検討いただきたいと考えている。

今回紹介した装置は加熱のみの対応であるが、現在開発中の加熱炉は氷点下への冷却も可能である。氷点下を含む幅広い温度範囲での信頼性試験が必要な車載半導体分野でご利用いただくことを想定している。ご興味がある方はご連絡いただければ幸いです。

今後も、業界の発展に貢献できるような装置の開発を鋭意進めていきたい。

■参考文献

- (1) JEDEC: High Temperature Package Warpage Measurement Methodology, JESD22-B112A (2009)
- (2) 石原: 「バンプ高さ計測技術」, JIEP 官能検査システム化研究会 第6回公開研究会予稿集 (2016)
- (3) 井上, 石原, 日名子: 「温度可変基板反り検査装置」, 東光高岳技報, No.1, pp.71-74 (2014)

■語句説明

注1) JEDEC: Joint Electron Device Engineering Councilの略称で、半導体技術の標準化を行う団体。

注2) バンプ: 基板上に形成された突起状の微小電極。

注3) リフロー: 対流加熱によりはんだを融解させ基板と部品とを接合する方法。



石原 満宏

光応用検査機器事業本部
検査機器製造部 所属
三次元計測センサの開発に従事
博士(工学), 精密工学会会員



井上 征利

光応用検査機器事業本部
検査機器製造部 開発グループ 所属
三次元計測センサの開発に従事
エレクトロニクス実装学会会員