パワーデバイスと実装の故障解析への ロックインサーモグラフィの応用

吉井 一郎*

Applications of IR Lock-in Thermography to Failure Analysis for Power Device and Assembly

Ichiro YOSHII*

*DCG システムズ合同会社 (〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 3-8-8 日総第 16 ビル)

*DCG Systems G.K. (Nisso 16 Bldg, 3-8-8, Shinyokohama, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 222-0033)

1. はじめに

信頼性、スイッチング損失、高速スイッチング特性に優れた MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などのパワーデバイスは、パワーエレクトロニクスを支える基幹部品として近年急速にその応用範囲を拡大している。中でも自動車や電車といった交通手段、プラントなどの高い信頼性が要求される分野に用いられる大電力パワーデバイスでは、設計段階での品質・性能確保だけでなく、故障発生時の迅速な原因特定とその対策実施が要求されている。このとき重要となるのが故障解析技術である。

トレンチゲート IGBT やスーパージャンクション MOSFET など先端パワーデバイスは、その性能を最大限に引き出すために非常に複雑な 3 次元構造を持つものに進化してきている¹⁾。このため、デバイスのあらゆる部位において致命的な故障が発生する可能性を持っており、故障解析としてデバイスを分解することは常にその故障原因を喪失するリスクを伴う。したがって、パワーデバイスでは、サンプルを分解せずに非破壊で行う故障解析手法が強く望まれている。一般にデバイスの故障はほとんどの場合発熱を伴うが、ロックインサーモグラフィ (Lock-In Thermography, LIT) は、デバイス内部の欠陥で発生しデバイスの表面に伝搬してきた熱を、サンプルを分解・加工することなくそのままの状態を高感度に検出することのできる手法である。ロックインサーモグラフィは非破壊検査の一つであり、パワーデバイスに対する非常に有効な故障解析手法として近年注目を集めている²⁾。

本稿では、ロックインサーモグラフィの概要と、それをパワーデバイスの故障解析に応用した事例をいくつか紹介し、この非破壊検査手法が新しいパワーデバイス開発や市場故障品の迅速な解析に対して非常に有望であることを示す。

2. パワーデバイスにおける非破壊検査の重要性

半導体デバイスの故障解析では従来から赤外線を利用した手法が広く用いられている。内部の故障箇所が発生する発光を赤外線顕微鏡で観測するフォトンエミッション顕微鏡 (Photon Emission Microscope, PEM)³⁾ や、外部からのレーザー加熱によりショート箇所抵抗が変化することを利用するレーザービーム加熱抵抗変動法 (Optical Beam Induced Resistance Change, OBIRCH)³⁾ などである。しかしこれらの手法では、赤外線を遮断する物質、例えば樹脂や金属で半導体が覆われている場合には、内部の発光を外部に取り出したり、外部から照射するレーザーを必要な深さまで到達させたりすることができないため、有効な手段とはならない。

このような事情から、チップ表面および裏面が厚い配線用のメタルで全面的に覆われているパワーデバイスに対して PEM や OBIRCH を用いる場合には、赤外線が十分に透過する厚さまで金属や Si 基板などを除去・裏面研磨する必要がある。しかしながら、そのサンプル加工プロセスによる特性変動あるいは不具合消失のリスクをゼロにすることはできない。

さらに、ロジックやメモリなどの半導体表面にデバイスが作りこまれる LSI とは異なり、パワーデバイスは表面から裏面への縦方向に電流を流すという特殊な構造を持つため、チップ表面や裏面における外部端子への接続面の剥離やボイドといった実装技術に関する欠陥も大きな問題となってきている。このような欠陥に関しては、従来 X 線透視検査や超音波探傷検査が用いられてきているが、実装材料や構造の進化とともに X 線検査では欠陥を見つけるのに十分なコントラストが得られない、超音波探傷検査ではサンプルを水没させる必要がありサンプルへの水分吸収などの影響がある、などといった課題がある。

このように、パワーデバイスではサンプルを分解・加工することなく故障解析を精度よくかつ迅速に行う非破壊検査手法の適用が強く要求されている。

3. ロックインサーモグラフィの概要

3.1 赤外線サーモグラフィの基礎

電磁波が物体に入射したとき、物体の表面での反射、物体内部への吸収、物体外への透過という3つのプロセスが起こる。電磁波を反射あるいは透過せず、すべてを吸収する理想的な物質を黒体と呼ぶ。外部の電磁波と熱平衡状態にあり、内部が一定の有限温度に保たれた黒体は、外部から吸収する電磁波のエネルギーと同じ量のエネルギーを電磁波として放出している。黒体の表面から単位面積、単位時間当たり放射される λ と $\lambda+d\lambda$ の間にある波長を持つ電磁波のエネルギーを $u(\lambda, T)d\lambda$ とすると、 $u(\lambda, T)$ は次のプランクの公式で記述される：

$$u(\lambda, T) = 8\pi hc \lambda^{-5} \left(\exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

一般の物体では表面での反射や透過があるため、その放射エネルギー密度分布は上記のプランクの法則からずれてくる。図1に300 Kから600 Kまでの放出エネルギー密度分布を示す。この温度範囲では、観測するのに十分な強さを持つ放出電磁波の波長は $1.5 \mu\text{m}$ 以上の赤外領域で顕著であり、 $5 \mu\text{m}$ から $10 \mu\text{m}$ で最大となっている。

赤外線サーモグラフィは大気中におかれた赤外線カメラを用いて物体から放射される赤外線を検出し、温度として物体の画像に重ね合わせて可視化するための手法である。一般に大気中では水分や二酸化炭素により赤外線の吸収が起こり、このため大気を通した赤外線観測による温度測定には大きな誤差が発生する。この誤差を小さくするため、赤外線カメラは主要な吸収波長帯を避けるように感度設計されている。図2に大気中の赤外線透過係数の波長依存性を示す⁴⁾。3 μm から5 μm および8 μm から14 μm の間は非常に透過率が高い領域で、赤外線サーモグラフィでは通常これらどちらかの波長域に感度を最適化した赤外線カメラが用いられている。

3.2 ロックインサーモグラフィを用いた故障箇所特定の原理

ロックインは、雑音に埋もれた特定の周波数を持つ微小信号を高感度に取り出すために広く使われている手法であ

図1. 黒体から放射される電磁波のエネルギー密度分布

る。ロックインサーモグラフィは、その名が示す通りサーモグラフィにロックイン手法を取り入れたものである。基準となるロックイン信号に同期した電圧をサンプルに印加し、それにより周期的に発生した熱を高感度赤外線カメラでサンプル表面イメージの各画素の温度情報として捕らえ、それを温度分布として可視化する。

図3にLSIのショート不良を例にとりて、ロックインサーモグラフィを用いた不良箇所特定方法の概念を説明する。ロックイン基準信号に同期した電圧 V を、LSIテスターによりあらかじめショートしていることが分かっている2つのピン間に印加する。ショート箇所はロックイン信号と同じ周波数で周期的に発熱し、デバイス内部を熱波動として伝播し表面に到達する。表面の温度もちろん同じ周波数で振動し、プランクの公式にしたがってその温度に応じた波長の赤外線が外部に放射される。それをデバイス直上に設置された赤外線カメラの各ピクセルで取り込み、その中で強度がロックイン周波数と同じ周期で振動する成分を取り出してデバイス表面の形状イメージ上に重ね合わせるにより、発熱源を可視化することができる。

図4に示すように、ロックインサーモグラフィでは、観測しているXY平面上の各ピクセルにおける赤外線強度とともに、その位置での基準ロックイン信号からの位相のずれという2種類のデータを取得することができる。熱は拡散方程式にしたがって表面に伝播してくるため、伝播する

図2. 0.2 から 14 μm の波長領域の赤外線に対する大気中の透過率⁴⁾

図3. ロックインサーモグラフィを用いた故障箇所特定の原理

図4. ロックインサーモグラフィで得られる赤外線強度と位相データ

距離に応じて表面に伝わるまでに要する時間が異なり、その結果表面温度は基準ロックイン信号に対して位相がずれる。この位相データからは発熱源の深さ位置（Z軸座標）を知ることができる。以下で熱拡散方程式の解を用いてもう少し定量的に説明する。

一様な物質中での温度 T に対する3次元熱伝導方程式は、物質の密度を ρ 、熱容量を c_p 、熱伝導率を k 、発熱源のパワーを p とすると

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = k \Delta T + p \quad (2)$$

と表される。 p が原点においてロックイン信号と同期して周波数 $f_{lock-in} = \omega / 2\pi$ で $p = p_0 e^{i\omega t}$ で振動する点状の発熱源とすると、無限遠でゼロとなる拡散方程式の解で、原点で熱流束に対する境界条件を満たすものは

$$T(r, t) = \frac{P_0}{4\pi k r} e^{-r/\Lambda} e^{i(\omega t - r/\Lambda)} \quad (3)$$

と表される⁴⁾。ここで

$$\Lambda = \sqrt{2k / (\rho c_p \omega)} \quad (4)$$

は長さの次元を持つ量で、熱拡散長と呼ばれる。式(3)より、温度は発熱源からの距離とともに減衰して伝わるのが分かる。発熱源の位置が Λ よりも十分深い場合、ロックイン信号と同じ周波数を持つ熱波動は表面まで到達することができない。 Λ はまた物質の拡散定数 $\alpha = k / (\rho c_p)$ と $f_{lock-in}$ を用いて $\Lambda = \sqrt{\alpha / \pi f_{lock-in}}$ と書くことができる。

Λ の $f_{lock-in}$ 依存性から、ロックイン周波数が高ければ高いほど Λ が小さくなるため、表面から深い位置にある発熱源は観測しにくくなる。また表面に到達した熱による表面温度変化の位相は基準ロックイン信号から r/Λ だけずれることがわかる。このことを利用して、基準ロックイン信号からの位相のずれを測定することにより、発熱源のZ方向の深さ位置を知ることができる。

3.3 ロックインサーモグラフィの感度と故障箇所の絞り込み精度

ロックインサーモグラフィでは、ロックイン手法のおかげで通常のサーモグラフィに比べて非常に感度良く発熱箇

図5. 通常のサーモグラフィとロックインサーモグラフィでの発熱部位特定感度の差異

図6. 赤外線強度像のロックイン周波数依存性²⁾

所を絞り込むことができる。図5は正常動作している回路基板を用いて、通常のサーモグラフィとロックインサーモグラフィで発熱部位の特定感度を比較したものである。DC電源を印加した通常のサーモグラフィ(a)では温度の高いパワー素子からの発熱は観測されるが、2つのLSI内部での発熱は観測されない。一方、ロックイン信号に同期した電源を印加したロックインサーモグラフィ(b)ではLSI内部のチップレベルの発熱箇所を明確に特定することができる。

さらに発熱位置特定の精度を上げる方法として、ロックイン周波数を上げることが考えられる。表面から深さ D にある欠陥からの発熱が表面まで伝わったときの表面での広がり半径 R は、熱拡散長 Λ を用いて、 $R = \sqrt{\Lambda^2 - D^2}$ と近似的に表すことができる。前節で示したように Λ はロックイン周波数の平方根に反比例することから、ロックイン周波数を上げることにより表面での発熱箇所の広がりを小さくし、より正確に発熱部位の特定が可能となる。図6はロックインサーモグラフィで観測した正常なICの赤外線強度像とロックイン周波数の関係を示しているが²⁾、ロックイン周波数が高くなることにより発熱箇所がより局在化されていくことが分かる。

4. パワーデバイスへの適用事例

以下ではロックインサーモグラフィをパワーデバイスの

故障解析に用いた事例をいくつか紹介し、ロックインサーモグラフィの有用性を示す。なお、以下で紹介する事例はすべて DCG システムズ社の赤外線ロックインサーモグラフィ装置である ELITE™ およびその派生装置⁵⁾を用いて行ったものである。

4.1 IGBT の Al スパイクによる接合リーク電流解析²⁾

最初の事例はエミッタコンタクトへの Al スパイクによりリーク電流異常となった IGBT への適用である。まず表面から OBIRCH, PEM 解析を行うため、表面の Al 配線をその下部にあるバリアメタルを残した状態で除去したが、サンプル加工後にリーク電流が消失し、故障箇所を特定することができなくなった。そこで次に、裏面からの OBIRCH, PEM で故障箇所の特特定を試みるため、裏面メタル層の除去および裏面 Si の加工を行った。しかしこの場合も同様にリーク電流がなくなり、解析不能となった。

そこで、ロックインサーモグラフィによりサンプルを加工せずにチップ表面から観察を行ったところ、図 7 に示すようにチップ端のソースコンタクトエッジ部分に複数の発熱箇所を特定することができた。

ロックインサーモグラフィで発熱が確認された部位の Al 配線除去後の表面観察結果および Al 配線を除去しない状態での断面観察結果（図 8）から、ソースコンタクト側壁のバリアメタル膜厚不足により、Al スパッタ後の熱処理工程でソース拡散層への Al スパイクが発生し、異常接合リーク電流が流れていることが明らかとなった。またこのことから、OBIRCH および PEM での表面 Al 除去加工後にリーク電流が消失した理由が、加工によりソース拡散層の Al スパイクもエッチング除去されたためであることも明らかとなった。

この事例は、故障箇所特定のためのサンプル加工が故障箇所に直接影響を及ぼし、その特定を不可能にするケースである。

4.2 IGBT アバランシェ降伏箇所の予測⁶⁾

パワーデバイスは動作時に非常に高い電力を消費するため、動作中デバイスにアバランシェ降伏により破壊が起こると、その原因となった欠陥だけではなく周囲の広い範囲に壊滅的なダメージを与える。このようになってしまえば、破壊後に真の故障原因を特定することはほぼ不可能である。したがって故障の要因となる欠陥でアバランシェ降伏が起ころは始める前に、その前兆をとらえることができれば破壊の物理的要因特定の可能性が高くなる。

パワーデバイスのアバランシェ降伏による破壊はアバランシェ降伏が起こる pn 接合でのリーク電流による耐圧劣化が原因となっている場合が多いことから、ロックインサーモグラフィにより、デバイスがアバランシェ破壊しない条件下で耐圧劣化部位を特定できるかどうかを検討した。図 9 に示すように、アバランシェ耐圧を劣化させてデバイスを破壊しやすくするために、あらかじめ内部に欠陥を作りこ

図 7. ウエーハ上の故障した IGBT を表面の Al 電極越しに観測したときのロックインサーモグラフィ像²⁾

図 8. 欠陥の SEM イメージ²⁾

図 9. 欠陥を作りこんだ IGBT の低電圧動作でのロックインサーモグラフィ結果⁶⁾

んだ 2 種類のサンプルを用意した。このデバイスをアバランシェ降伏に至らない低いパワーで短時間動作させ（9 mW で 3 分間）、ロックインサーモグラフィ観測を行った。その結果、図 9 の各図中央部に示されるように、各々作りこんだ欠陥位置に微小リーク電流による発熱を観測することができた（右図 (b) に見える矩形部は画像フィルター処理の結果であり、サンプル起因ではないことに注意）。また実際この欠陥により破壊耐圧が低くなっていることも確かめられた。

この結果から、ロックインサーモグラフィにより、デバイスの破壊を引き起こす欠陥を壊滅的な破壊に至らない低パワー動作状態において特定することができることが示された。

4.3 実装されたパワーモジュールのチップ接合状態の検査

SiC などのワイドバンドギャップ材料を用いたパワーデバイスは、Si ベースの従来のデバイスに比べて大幅にエネ

ルギ損失が改善され、また高温での動作が可能となるため、次世代の自動車や電鉄車両への採用に向けて開発が進んでいる。しかしながらこのデバイス実現のためには、チップ開発のみならず、高温環境下で耐熱性、放熱性、機械的強度が劣化しないチップと放熱基板との接合技術の開発も同時に求められている。現在これを実現するものとして銀ナノ粒子を用いた焼結接合技術が盛んに検討されている⁷⁾。

従来、チップと放熱基板の接合状態の検査としてはX線検査装置、超音波探傷装置などが用いられてきたが、銀ナノ粒子焼結を用いた接合では、X線検査での画像コントラストが低く、欠陥検出感度に課題がある。また超音波探傷装置では、コントラストとしては十分であるが、検査のためにサンプルを水没させる必要があり、サンプルへの水分吸収を避けることができない。したがって検査後サンプルを製造ラインに戻す場合には、水分による製品への悪影響を取り除くプロセスが必要になるという欠点がある。

そこで完全に非破壊で検査できるロックインサーモグラフィの銀ナノ焼結接合部の検査への適用可能性を検討した。用いたサンプルはIGBTとダイオードを銀ナノ粒子で焼結結合したパワーモジュールで、図10にその断面模式図を示す。ダイオードおよびIGBTをロックイン電源に接続し、それに同期してオン・オフすることによる自己発熱したデバイスを、モジュールの上方からサーモグラフィで観測した。もしチップCu間の接合に不完全な部分があると、この部分ではチップ外部に熱が伝わりにくくなるため、結合が良好な部分に対して温度分布が偏っていることが推定される。結果を従来の手法と比較するため、同じサンプルをモジュール下面から超音波探傷装置でも観測を行った。

図10. 観測に用いたパワーモジュールの部分断面模式図

図11. ダイオード下面の正常結合部と異常結合部の観察結果比較

図11はパワーモジュールの中のダイオードのチップ下面とCu間の接合状態を超音波探傷およびロックインサーモグラフィでの観察結果を比較したものである。接合不足、正常接合の両方のサンプルにおいて、両検査方法による差がほとんどなく、同じ接合形状が観察されていることが分かる。この結果より、ロックインサーモグラフィは従来の超音波探傷と同程度の接合欠陥検出能力を持っていることが確認された。

5. まとめ

パワーデバイスの故障解析ではサンプルを加工せずに非破壊で行うことが非常に重要である。この点から、内部の欠陥で発生した発熱をデバイス表面において高感度で非破壊観測するロックインサーモグラフィは、故障解析手法として非常に大きな潜在能力を持っている。この手法は、チップ内部の故障だけではなく、パワーチップとパッケージの接合部のボイドや剥離評価といった実装技術評価への適用できることも明らかとなり、パワーデバイスの分野では今後ますます重要な検査手法の一つになっていくものと考えられる。

(2014.6.8- 受理)

文 献

- 1) B. J. Balliba: "The Future of Power Semiconductor Device Technology," Proc. IEEE, Vol. **89**, No. 6, pp. 822-832, 2001
- 2) 吉井一郎, 藤原健志, 遠藤幸一, 山崎由貴, 長友俊信, 藤巻 智: "ロックインサーモグラフィを用いた故障箇所特定技術のパワーデバイスへの適用検討," 第32回 LSI テスティングシンポジウム, pp. 51-56, 2012
- 3) LSI テスティング学会編: "LSI テスティングハンドブック," オーム社, 2008
- 4) O. Breitenstein, W. Warta, and M. Langenkamp: "Lock-in Thermography," 2nd Edition, Springer, 2010
- 5) <http://dcgsystems.com>
- 6) 長友俊信, 茂木 忍, 山崎信也, 後藤安則: "ロックインサーモグラフィによるアバランシェ耐量低下 IGBT の不良部位非破壊同定の検討," 第31回 LSI テスティングシンポジウム, pp. 281-284, 2011
- 7) V. R. Manikam and K. Y. Cheong: "Die Attach Materials for High Temperature Applications: A Review," IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., Vol. **1**, No. 4, pp. 457-478, 2011

著者紹介

吉井一郎 (よしい いちろう)
1980年京都大学理学部卒, 1985年名古屋大学大学院理学研究科博士課程単位取得後退学。同年株式会社東芝に入社し主に半導体デバイス技術開発および信頼性技術開発に従事。2013年より DCG システムズ合同会社技術責任者。博士 (工学)。