

論文審査報告書

氏名	ラアヒ 羅亜非
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博機第41号
学位授与日	平成30年3月17日
論文題目	過渡熱測定と構造関数による等温面抵抗の定義と その応用に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 教授 中川 慎二 教授 坂村 芳孝 教授 真田 和昭 講師 畠山 友行 富山大学 教授 平澤 良男

内容の要旨

本論文は、今日の工業製品には必要不可欠な電子デバイスおよび電子機器を対象とし、過渡熱測定により得た非定常温度履歴から算出した1次元の構造関数と3次元熱流体シミュレーションにより得た等温面との関係を明らかにすることで等温面熱抵抗を定義している。さらに、等温面熱抵抗を利用して電子デバイスおよび電子機器内での放熱経路を明確に記述し、従来では測定が困難であったデバイス内部での熱物性値の推定と高精度熱シミュレーションモデルの構築を可能にする手法を確立することを目的としている。

電子製品の高性能と小型化に伴い、半導体部品の消費電力が増え、発熱密度が急増してきた。このような過酷な状況の中においても接合部温度(ジャンクション温度)を製品の正常動作を保証する許容値以下に抑えることは、製品の品質や寿命を保つための最も重要な設計目標である。温度を推定するために必要となる熱抵抗の測定、予測、評価などはあらゆる電子製品の熱設計の課題となっている。電子製品の熱解析および熱設計では、半導体部品がある一定発熱量で動作する場合の温度測定または放熱シミュレーションを実施し、製品各部の温度(特にジャンクション温度)、熱流密度分布、支配的な放熱経路などの情報を把握することが必要となる。

温度測定として最も一般的な方法は熱電対を用いて表面温度を測るものであるが、測定対象物との接触熱抵抗や熱電対からの熱漏れに起因する精度の低下や、パッケージ内部温度が測れないという課題が存在する。電子部品の場合、端子から電気的な手法でジャンクション温度を直接的かつ高精度に測れる

が、ジャンクション温度が測定環境の放熱経路に強く依存するため、部品内部構造を含む放熱経路およびその経路での熱物性を把握する必要がある。部品の内部構造や実装に依存する熱物性変化などを正確に知ることが難しい開発現場では、高精度な温度測定結果が存在しても熱設計としての信頼性は低くなる可能性が高い。正確なジャンクション温度の測定結果から、未知の物性を含めた放熱構造を推定する手段を確立することの意義は大きい。

熱設計を補助する手段として、3次元熱流体シミュレーションの活用が進められており、計算機性能の飛躍的な向上にともないその普及が進んでいる。しかし、電子デバイスや機器のシミュレーション結果は必ずしも実験を再現するわけではない。これは基礎理論の問題ではなく、モデル作成時の入力情報としての熱物性（材質の熱伝導率、比熱、界面接触熱抵抗など）が未知であることに起因する場合が多い。これらの情報を非破壊的かつ簡便に推定し、再現精度の高いシミュレーションモデルを構築する方法が求められている。

本論文は、ジャンクション温度の高精度な測定と数値シミュレーションを組み合わせることにより、前述した問題を解決する手段を提案するものである。本論文は7つの章で構成され、第1章では本研究の背景および目的、第2章では過渡熱測定の基本理論ならびに実用上重要となる注意点、第3章では構造関数の導出ならびに物理的な解釈、第4章では3次元数値シミュレーション結果を利用した3次元等温面熱抵抗の定義と検証、第5章では過渡熱測定と等温面熱抵抗を組み合わせることによる高精度熱シミュレーションモデルの構築手法、第6章では高精度熱シミュレーションモデルを実際の電子デバイスへ適用した事例、第7章ではすべての章の総括について述べている。

第1章では、電子機器の熱設計および熱評価に関する現況を概観し、課題とその要因を指摘している。過渡熱測定と構造関数の利用について歴史的経緯を振り返り、従来の研究だけでは実用的な応用が進まなかった理由を述べている。これらの状況を踏まえ、近年急速に発展してきた3次元熱流体シミュレーションを援用することで、過渡熱測定と構造関数から適切な物理的解釈を得るとともに熱流体シミュレーションモデルの高精度化が実現可能なことを指摘している。

第2章では、過渡熱測定の基本理論について説明するとともに、高い精度での測定を実現するために必要な条件について検討している。本章で説明された過渡熱過程の過渡熱レスポンスは、次章における構造関数の算出の基礎となるものである。産業界で熱設計に携わる技術者が誤解しやすい熱抵抗の概念についても詳細に説明されている。一般的なダイオードの運転条件や電流-電圧特性、さらに温度変化の時定数などを考慮することで、加熱過程よりも冷却過程を採用すべきであることを指摘している。

第3章では、過渡熱測定の結果として得られた温度履歴から時定数スペクトラムが導出される過程、さらに、時定数スペクトラムを物理空間に存在する電子部品内部の熱抵抗および熱容量と結び付け解釈する概念について述べている。対象となるシステムを熱抵抗 R と熱容量 C を組み合わせたモデルで表現し、伝熱経路に沿って複数の熱抵抗および熱容量の組みを並べた1次元の多段 RC モデルを基礎としている。各段における熱抵抗と熱容量の積は、その段を構成する部分の熱時定数を表すものとなる。熱源温度と周囲雰囲気温度との差が各段で生じる温度差の和として表現できること、ならびに、この温度差が第2章で解説された過渡熱レスポンスとして表現できることから、温度履歴と時定数との関係式が導出される。この式をさらに変形した後に逆たみ込み演算を適用することで、測定された熱源温度履歴から時定数スペクトルが算出される。時定数スペクトルから **Cauer** 型 RC モデルを計算することで、横軸を熱抵抗、縦軸を熱容量とした積分構造関数が求められた。

実際のパワーLED に対して構造関数を求め、LED を構成するダイ、シリコンサブマウント、ヒートシンク、アルミ基板、外部ヒートシンクといった構造部材と構造関数との関係を説明している。このことから、通常の温度測定では不可能な固体内部の熱構造解析が可能であることを明示している。

第4章では、前章で有効性を示した構造関数の物理的意味を明確化し、産業界で有効に活用できる手法へと発展させるために必要な等温面熱抵抗について述べている。電気抵抗と熱抵抗に対応する電気伝導率と熱伝導率の比較によって、熱的 RC モデルを基礎とする構造関数の物理的解釈に誤解が生じる原因が説明されている。この誤解を防ぎ、構造関数が表す電子部品の内部構造を正しく理解するために等温面熱抵抗を定義している。等温面熱抵抗は、3次元空間上の等温面を考え、その等温面間に各段の RC モデルを設定するものであり、3次元熱流体シミュレーションを活用することでこの概念を明確に説明している。提案した等温面熱抵抗に基づき、実測した構造関数と3次元熱流体シミュレーションとの結果を比較検証することで、これまでは正確に決定することが困難であった実製品の熱物性値を校正する手法が説明された。この手法の有効性が実証実験によって示されている。

第5章では、前章の実証実験で確認された構造関数と熱流体シミュレーションとを組み合わせた高精度シミュレーションモデル構築手法を、市販の IGBT を対象として詳細に説明している。部品の断面検査で得られた内部構造を基準として数値シミュレーションモデルを構築し、シミュレーションによる得た温度情報から構造関数を算出している。実測およびシミュレーションによる構造関数を比較することで、実測が困難な内部構造材料の熱物性値（ダイアタッチ、ハンダ、絶縁体の熱伝導率）が推定可能であることを述べている。

第6章では、等温面熱抵抗の考えが広く応用できることを検証するため、基板に実装した実製品（HSOP-6J、HSOP-8E、および、TO252 の3つの小型 IC パッケージ）を対象として、前章と同様の手法を適用し、その有効性が報告されている。放熱パッドへのハンダ塗布量を0%から100%まで変化させたサンプルを用い、ハンダ塗布量による構造関数の変化について議論されている。実装状態や経年劣化で変化する内部構造の変化を把握できる可能性を示している。

最後に、第7章では結論を述べている。

審査の結果の要旨

本論文は、電子デバイスおよび電子機器を対象とし、ジャンクション温度を高精度に測定する過渡熱測定と構造関数の算出に3次元熱流体シミュレーションを組み合わせることにより、3次元空間内に存在する等温面間の熱抵抗を定義し、構造関数に対する物理空間上での適切な解釈を与えるとともに高精度なシミュレーションモデルを構築する手法を検討したものである。本論文は7つの章で構成されている。

第1章では、電子機器の熱設計および熱評価に関する現況を概観し、課題とその要因を指摘している。過渡熱測定と構造関数の利用について歴史的経緯を振り返り、従来の研究だけでは実用的な応用が進まなかった理由を述べている。これらの状況を踏まえ、近年急速に発展してきた3次元熱流体シミュレーションを援用することで、過渡熱測定と構造関数から適切な物理的解釈を得るとともに熱流体シミュレーションモデルの高精度化が実現可能なことを指摘している。

第2章では、過渡熱測定の基本理論について説明し、高い精度での測定を実現するために必要な条件を検討している。産業界で熱設計に携わる技術者が誤解しやすい熱抵抗の概念について詳細に説明されている。一般的なダイオードの運転条件や電流-電圧特性、さらに温度変化の時定数などを考慮し、加熱過程よりも冷却過程を採用すべきであることを指摘している。

第3章では、過渡熱測定の結果として得られた温度履歴から時定数スペクトラムが導出される過程、さらに、時定数スペクトラムを物理空間に存在する電子部品内部の熱抵抗および熱容量に結び付けて解釈する概念について述べている。対象となるシステムを熱抵抗 R と熱容量 C を組み合わせたモデルで表現し、伝熱経路に沿って複数の熱抵抗および熱容量の組みを並べた1次元の多段 RC モデルを基礎としている。温度履歴と時定数との関係式に逆たみ込み演算等の数学的処理を適用し、測定された熱源温度履歴から時定数スペクトルが算出される。時定数スペクトルから $Cauer$ 型 RC モデルを計算することで、横軸を熱抵抗、縦軸を熱容量とした積分構造関数が求められた。この構造関数が物理空間で意味することを調べるため、実際のパワーLED に対して構造関数を求め、LED を構成するダイ、シリコンサブマウント、ヒートシンク、アルミ基板、外部ヒートシンクといった構造部材と構造関数との関係を説明している。このことから、通常の温度測定では不可能な固体内部の熱構造解析が可能であることを明示している。

第4章では、前章で有効性を示した構造関数の物理的意味を明確化し、産業界で有効に活用できる手法へと発展されるために必要な等温面熱抵抗について述べている。電気抵抗と熱抵抗のそれぞれに対応する電気伝導率と熱伝導率の比較によって、熱的 RC モデルを基礎とする構造関数の物理的解釈に誤解が生じる原因が説明されている。この誤解を防ぎ、構造関数と電子部品の内部構造を正しく理解するために等温面熱抵抗を定義している。提案した等温面熱抵抗に基づき、実測した構造関数と3次元熱流体シミュレーションとの結果を比較検証することで、これまでは正確に決定することが困難であった実製品の熱物性値を校正する手法が説明された。この手法の有効性が実証実験によって示されている。

第5章では、前章の実証実験で確認された構造関数と熱流体シミュレーションとを組み合わせた高精度シミュレーションモデル構築手法を、市販のIGBTを対象として詳細に説明している。部品の断面検査で得られた内部構造を基準として数値シミュレーションモデルを構築し、シミュレーションによって

得られた温度情報から構造関数を算出している。実測およびシミュレーションによる構造関数を比較することで、実測が困難な内部構造材料の熱物性値（ダイアタッチ、ハンダ、絶縁体の熱伝導率）が推定可能であることを述べている。

第 6 章では、等温面熱抵抗の考えが広く応用できることを検証している。基板に実装した実製品（HSOP-6J、HSOP-8E、および、TO252 の 3 つの小型 IC パッケージ）を対象とし、前章と同様の手法を適用することで、その有効性が示された。放熱パッドへのハンダ塗布量を 0% から 100% まで変化させたサンプルを用い、ハンダ塗布量による構造関数の変化について議論されている。本論文で提案する手法を用いることで、実装状態や経年劣化で変化する内部構造の変化を非破壊的に把握できる可能性を示している。

第 7 章では結論を述べている。

本論文は、研究の方法論・研究手法、得られた結果とその解釈が適切であり、的確な文章表現が与えられている。その研究の手法・結果には独創性が認められる。研究成果は、電子機器の過渡熱測定結果と数値シミュレーション手法から、測定が困難な内部構造を推定し、高い信頼性を持った熱設計技術へと繋がるものである。実用的な電子デバイスでの有用性も提示されており、工学的観点から重要な知見が得られていると評価できる。本論文に関連する研究成果は、申請者が筆頭著者の 3 件の論文として学術雑誌に掲載されている。

平成 30 年 2 月 9 日に博士論文の審査及び最終試験を実施し、申請者は当該分野および周辺分野に関して博士としての十分な全般的知識を持ち、学術研究にふさわしい討論ができ、独立して研究を遂行する能力を有するものと判定された。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格であると認められた。