

|        |  |
|--------|--|
| 氏名     | きぶし りさこ<br>木伏 理沙子  |
| 学位の種類  | 博士 (工学)  |
| 学位記番号  | 博機 38 号  |
| 学位授与日  | 平成 28 年 3 月 20 日   |
| 論文題目   | 熱・電気連成解析を用いたパワーSi MOSFET 内部の<br>温度分布予測に関する研究   |
| 論文審査委員 | (主査) 富山県立大学 准教授 中川 慎二<br>教授 坂村 芳孝<br>教授 川上 崇<br>教授 森 孝男<br>講師 畠山 友行<br>山口東京理科大学 教授 結城 和久 |

## 内容の要旨

本研究では、パワー半導体デバイスの中でも広く用いられているパワーSi MOSFET の正確な熱設計の基礎となる知見の獲得を目的とし、パワーSi MOSFET の発熱特性ならびに温度分布などの熱特性の詳細を熱・電気連成解析によって検証するとともに、局所的高温部（ホットスポット）温度予測手法を提案する。

近年、パワーSi MOSFET は自動車、産業機器、社会インフラ、家電製品や特殊電源などに広く用いられている。パワーSi MOSFET を含むパワー半導体デバイスを用いた電子機器を総称して、パワーエレクトロニクスと呼び、その中でも自動車分野に特化したものをカーエレクトロニクスと呼ぶ。パワーエレクトロニクス機器は、小型化が求められている。カーエレクトロニクス分野を例にとると、地球温暖化防止を目的とした、CO<sub>2</sub> 排出削減のための省エネルギー化、つまり燃費の向上が重要となっている。自動車の燃費を向上させるためには、搭載されるパワーモジュール（パワー半導体デバイスと周辺機器の集合体）の軽量化と小型化が求められている。パワーモジュールの小型化に伴い、電力密度が上昇する。電力密度の上昇は、発熱密度の上昇を意味し、パワーモジュールの熱環境が厳しくなっている。さらに、パワーモジュールは、エンジンルーム付近など的高温下で使用される場合もあり、製品の長寿命化・信頼性の向上のためには、正確な熱設計が重要となる。

パワーSi MOSFET は、保護のために樹脂などによりモールドされている。以降、モールドも含めたデバイス全体を半導体チップ、ダイ内部に作製されているパワーSi MOSFET 単体をパワートランジスタと呼ぶ。

従来から、パワーモジュールの熱設計には、CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析などの数値解析手法が広く用いられてきた。CFD 解析を用いた熱設計では、半導体チップから均一な発熱が起こると仮定される場合が多く、半導体チップの平均温度を基準として設計が行われる。しかし、実際には半導体チップは温度分布を有している。そのため、通常の熱設計においては、高温部での熱暴走・熱破壊を防ぐために熱設計マージンを大きく取ることで、電子機器の信頼性が確保されてきた。しかし、前述の通り、近年はモジュールの小型化が求められており、大規模な冷却システムを搭載することが困難となっている。冷却システムを小型化するためには、熱設計マージンを極力小さくして半導体チップの信頼性を確保する必要があり、半導体チップの温度分布を考慮した熱設計が求められる。温度分布を考慮した熱設計を行うために、トランジスタの詳細な熱特性を把握する必要がある。しかし、現在、パワートランジスタの熱特性は完全には明らかになっていない。そこで本研究では、パワートランジスタの中でも広く用いられているパワーSi MOSFET を対象として熱・電気連成解析技術を確認し、半導体内の不純物濃度の影響を含む発熱特性を明らかにするとともに、パワーSi MOSFET 内部の温度分布を予測し、冷却条件とホットスポット温度との関係性についても調査する。

本研究で対象とするパワーSi MOSFET は、印加電圧が大きいため、大きな電界が発生している。このような状況下では、デバイス内の電子エネルギーが非常に大きくなり、格子エネルギーと非平衡となる。そのため、パワーSi MOSFET の正確な熱特性の把握には、電子エネルギーと格子エネルギーの非平衡状態を考慮する必要がある。そこで、本研究では、電子・格子エネルギーの非平衡状態が考慮可能である、熱・電気連成解析を用いて、パワーSi MOSFET の熱特性を検証し、デバイス内に発生するホットスポット温度を正確に予測する方法について議論する。

第1章では、研究の背景について記述した。

第2章では、解析対象及び解析手法の詳細について記述した。

第3章では、熱・電気連成解析において重要なパラメータであるエネルギー緩和時間について議論した。エネルギー緩和時間は、熱・電気連成解析において、電子エネルギー及び格子エネルギーを求める上で非常に重要なパラメータである。しかし、古典物理理論から導出することはできず、実験で特定することも難しいため一般的に一定値と仮定して用いられる。本研究では、従来一定値と仮定して用いられてきたエネルギー緩和時間の妥当性を検証するため、モンテカルロシミュレーションを用いて、様々な電界におけるSi内部の電子・格子間のエネルギー緩和時間を算出した。さらに、求めたエネルギー緩和時間を電子エネルギーの関数とすることで、条件によって変動するエネルギー緩和時間変化を考慮した熱・電気連成解析を行った。さらに、エネルギー緩和時間を一定値として仮定した場合の結果を比較し、エネルギー緩和時間の適切な値を議論した。その結果、エネルギー緩和時間として0.3 psの一定値を用いることで精度の高い解析が可能であることを示した。

第4章では、第3章で決定したエネルギー緩和時間を用いてパワーSi MOSFET の印加電圧がホットスポット温度へ与える影響について議論した。従来、ロジック回路用サブミクロンSi MOSFET において局所的なホットスポットが発生することが指摘されていた。本研究では、パワーSi MOSFET においてもホットスポットが発生することを懸念し、印加電圧を変化させた場合のパワーSi MOSFET 内部の温度分布の詳細を検証した。その結果、パワーSi MOSFET においてもサブミクロンSi MOSFET と同様にホットスポットが発生していることが確認された。また、そのホットスポットは、いずれの電圧の場合でもn型半導体とp型半導体の間のpn接合に発生していることが確認された。また、ドレイン電圧の上昇に伴ってホットスポット温度と平均温度の差が大きくなり、従来の均一な発熱を仮定した熱設計の危険性が

高まることを示した。さらに、印加電圧によらずホットスポット発生位置は一定であるとみなすことができ、パワーSi MOSFET の電流-電圧特性からホットスポット温度を予測できる可能性を示した。

第5章では、パワーSi MOSFET を構成する p 型及び n 型半導体の不純物密度が、パワーSi MOSFET の熱特性へ与える影響について議論した。パワーSi MOSFET において、半導体の不純物密度がホットスポットに与える影響を議論している研究例がないため、その詳細を熱・電気連成解析を用いて検証した。その結果、 $n^+$ 型半導体と p 型半導体の不純物密度を変化させても、パワーSi MOSFET のホットスポットへ与える影響が小さいことを示した。一方で、n型半導体の不純物密度の変化はパワーSi MOSFET のホットスポット温度に与える影響が大きいことを明らかにし、その傾向について議論した。

第6章では、半導体チップ表面からの放熱性能がパワー Si MOSFET の熱特性へ与える影響について議論した。パワーSi MOSFET 底面には放熱のための銅板があり、パワーSi MOSFET から外部への主な放熱経路となっている。その他の面は熱伝導率の低い樹脂で覆われているため、効果的な放熱が期待できない。そこで、底面銅板に取り付ける放熱器の放熱性能がパワーSi MOSFET のホットスポット温度へ与える影響を、熱・電気連成解析を用いて検証した。その結果、パワーSi MOSFET の底面の温度とホットスポット温度が比例関係にあり、底面の温度からホットスポット温度が予測できる可能性を示した。

最後に第7章で、全ての章で議論した内容を総括し、マクロ的な CFD 解析結果から簡易的にホットスポット温度が予測できる可能性を示した。

## 審査の結果の要旨

本論文は、自動車、産業機器、社会インフラ、家電製品や特殊電源などに広く用いられているパワー Si MOSFET を対象として、熱・電気連成解析を用いて内部温度分布を予測する手法ならびに予測結果について論じており、全 7 章で構成されている。

第 1 章では、研究の背景と目的を述べている。パワー半導体デバイス、特にパワー MOSFET の近年の利用状況を踏まえた熱設計マージン削減への要請について説明している。

第 2 章では、熱・電気連成解析の詳細を説明している。電位に関するポアソン方程式、正孔および電子それぞれに対する連続の式・運動量保存式・エネルギー保存式、さらに熱伝導方程式を支配方程式とする。これらの方程式を、ゲート電極付近に形成される電子チャネルサイズに応じた不等間隔格子上で離散化し、連立方程式として解くことで、熱・電気連成解析が可能となる。本手法の妥当性を示す 1 つの根拠として、解析から得られた電流-電圧特性が解析対象モデル同等製品のデータシートに公開された特性と一致することを示している。

第 3 章では、エネルギー保存式および熱伝導方程式に現れ、発熱に関わる重要なパラメータであるエネルギー緩和時間について検討している。半導体内部の電子を粒子として扱い、その挙動を解析するモンテカルロシミュレーションを実施することで、電子エネルギーとエネルギー緩和時間との関係を明らかにした。さらに、デバイス内部でのエネルギー緩和時間は場所によって異なるが、pn 接合部付近での極小値を求め、その値を一定値として採用しても、予測される格子温度分布への影響は軽微であることを明らかにした。

第 4 章では、パワー Si MOSFET に生じる局所的高温部（ホットスポット）について議論している。熱・電気連成解析の結果から電子の流れを調べ、ソース電極から流入した電子がゲート酸化膜下に集中して流れることを明らかにし、この集中的な流れによってホットスポットが生じることを示した。印加電圧がホットスポットに与える影響を調べ、その位置は一定と見なせるが、その温度は印加電圧に依存することを説明した。さらに、ホットスポット温度の電圧依存性が電流-電圧特性と似た性質を持つことを示し、電流-電圧特性から簡易的にホットスポット温度を予測できる可能性を指摘している。

第 5 章では、不純物濃度とホットスポット温度の関係を検討している。n- 型半導体の不純物濃度の増加は、ゲート酸化膜直下に形成される電子チャネルの電子数密度が不十分となるピンチオフの発生を引き起こすため、ホットスポット温度の上昇に大きく寄与することを明らかにした。

第 6 章では、パワー Si MOSFET 外部冷却システムの放熱性能が、ホットスポット温度に与える影響について議論している。パワー Si MOSFET 上部のモールド樹脂側の放熱性能はホットスポット温度に影響しないことが確認された。また、ドレイン電極となる金属面の放熱性能をパラメータとしてホットスポット温度を予測し、熱伝達率の上昇に伴って金属面温度は低下するが、金属面とホットスポットとの温度差は大きくなることを示した。さらに底面温度とホットスポット温度との関係が線形性を示すことから、底面温度からホットスポット温度を推定する簡易モデルが構築可能であることを指摘し、電子機器の熱設計で多用されるマクロ的な CFD 解析結果からのホットスポット温度予測の可能性を指摘した。

第 7 章では、第 6 章までを総括し、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、パワー Si MOSFET 内部温度分布を予測し、そのホットスポットでの温度を考慮した熱設計技術へと繋がるものである。一般的な

パワーエレクトロニクス機器に適用可能なものであり、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。本論文に関連する発表論文は3編である。

平成28年2月3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し、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。