

| | |
|------------|---|
| 氏名 | 仲野 逸人 |
| 博士の専攻分野の名称 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 医工農博甲第107号 |
| 学位授与年月日 | 令和4年9月27日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 |
| 専攻名 | 工学専攻 エネルギー物質科学コース |
| 学位論文題目 | 逆導通 IGBT の熱抵抗予測と熱バランス改善に関する研究 |
| 論文審査委員 | 主査 教授 鍋谷 暢一 教授 佐藤 隆英 准教授 村中 司 准教授 小野島 紀夫 特任教授 松本 俊 准教授 白木 一郎 |

学位論文内容の要旨

本論では、最新のパワー半導体である逆導通型 IGBT(Reverse conductive Insulated Gate Bipolar Transistor)に着目し、パワーモジュールとのつなぎの技術に着目し、研究を行った。RC-IGBT は、従来の IGBT 構造に加えてダイオードの構造をワンチップに納めたデバイスであり、チップ大口径化による放熱性の改善や、ワンチップ化による省スペース化により主に車載分野で適用が進んでいる。パワー半導体ならびにパワーモジュール個別の技術革新が進む中、本論ではこれらをつなぐ技術を研究対象とした。RC-IGBT の特徴である高放熱性をパッケージ技術生かし改善することで、パワエレ機器の性能改善につなげることを目的とする。

しかしながら、このような技術に関する報告例は少ない。そのほとんどは電气的特性改善に係るものであり、RC-IGBT のオン抵抗、スイッチングロスの特長を改善する研究開発が進んでいる。RC-IGBT の研究開発の特徴は、先行開発された IGBT もしくは FWD(Free Wheel Diode)の構造を RC-IGBT に適用した場合でも、同様に性能向上を確認できるといった内容が多い。これは、IGBT と FWD の基本的な技術革新が RC-IGBT に展開可能である意味を含有する。RC-IGBT に関する報告例は、例えば IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)に登録されている論文において、「RC-IGBT」を含む論文は計 126 件で

あり(2022年6月時点)、下記に概説することが可能である。RC-IGBTの電熱的解析に関する報告では、RC-IGBTの動作周波数における熱抵抗への影響が示された。また、チップ大口径化によりデバイスの破壊耐量が向上することが示された。構造の再検証によってRC-IGBTの電気的特性改善に関する報告が示された。RC-IGBTのスイッチング特性や熱特性に関するシミュレーション結果に関する報告が示された。RC-IGBT特有の課題であるスナップバックに関する報告が示された。RC-IGBTのパッケージ構造への適用や高耐圧化に関する報告が示された。RC-IGBTをパワーエレ機器に組み込んだ場合に関する報告がなされた。

一方、本論文ではパワー半導体とパワーモジュールをつなぐ技術を対象とする。RC-IGBTを搭載するパワーモジュールの熱的改善に関する研究は、RC-IGBTの最大の特長であるにも関わらず報告例が少なく十分ではない。

具体的にはこれまで報告されていない下記の課題がある。

(1) RC-IGBTのチップ熱抵抗を推定する手段が無く、パワーエレ機器設計者はIGBTからRC-IGBTへ置き換えた場合に見込める性能改善を予測することが出来ない。また、RC-IGBT設計者はIGBTとFWDのセルピッチから決まるチップ熱抵抗を推定することができない。

(2) RC-IGBTはIGBT動作時とFWD動作時の二つの動作モードがあることから、熱的なアンバランスを生じる。熱的アンバランスは、設計者に本来不要である設計マージンを要求する。また、設計時にIGBT動作時とFWD動作時の両方を勘案する必要があり、設計的煩雑さを生んでいる。

これらの課題に対して研究を行った本論文の構成を下記に示す。

第1章は序論であり、社会におけるパワーエレクトロニクスの必要性ならびにパワー半導体に求められる性能を概説し、本論の研究対象である新しいIGBTの構造として誕生したRC-IGBTとの違いを述べた。また、本研究の目的と論文の構成を概説した。

第2章では、まず研究背景を述べている。通常のIGBTとRC-IGBTの比較を行い、構造、メリット、デメリットを整理することで、RC-IGBTの課題を具体的に浮かび上がらせ、本論における研究テーマとなる課題を述べた。

第3章では、第2章で述べた課題に対する解決策の効果を見積もるために実施したシミュレーションの方法を示した。本論ではシミュレーションソフトウェアにTCADを用いた。これは、RC-IGBTの発熱をデバイス構造から計算可能であり、且つ試算結果をSPICEなどの異なるソフトウェアと連携させることが可能であることが理由である。

第4章では、RC-IGBTのチップ熱抵抗推測方法について、RC-IGBT非動作領域による冷却効果を定義することでRC-IGBTのチップ熱抵抗を予測可能であることを示した。IGBT

および FWD のセルピッチにおける冷却効果を試算し、チップ熱抵抗を推定した結果、従来手法よりも 15%チップ熱抵抗精度が向上した。そのため、IGBT から RC-IGBT にパワー半導体を置き換えた場合、約 60%チップ熱抵抗が低減できることがわかった。また、本論で述べた冷却効果を最大化する IGBT と FWD のセルピッチが 0.26 対 1 であることを明らかにした。

第 5 章では、RC-IGBT の熱的アンバランスを、シミュレーションを用い接合による温度均一化効果を定義することで、熱的アンバランスを解消できる構造を示した。FWD 領域に偏重した接合を行うことで、熱的アンバランスを解消できることを示した。この結果、従来構造では熱抵抗アンバランスが 14%であったが提案構造では 4%であり、74%改善した。また、接合下部温度差は従来構造では 6°Cであったところ、提案構造ではほぼゼロとなった。この結果、パワーサイクル耐量を 25%向上した。

第 6 章では、第 4 章ならびに第 5 章で新しく提案したチップ熱抵抗推定手法と接合による熱バランス改善手法が、異なる RC-IGBT の IGBT および FWD 領域の配置の場合において適用可能かどうか、考察を行った。本論で用いたストライプ状の IGBT および FWD 領域の配置が RC-IGBT の特性を引き出すうえで適していることを指摘した。

最後に、第 7 章では以上で得られた成果について総括した。

論文審査結果の要旨

低炭素社会の実現に向け国際社会は二酸化炭素削減目標を掲げており、もはやカーボンフリーの実現なくして産業の発展はあり得ない。世界の主な二酸化炭素排出量の原因は、発電、産業および運輸である。いずれの部門に対しても、各国は厳しい規制を設けており、その中で二酸化炭素排出量を抑える省エネルギー製品としてパワーエレクトロニクス分野が急伸している。パワーエレクトロニクスは、エネルギー変換を高効率で行うことから省エネ化が可能であり、そのため再生可能エネルギーの活用、産業部門における工場の省エネ化、ならびに電気自動車などの実現に活用されている。パワーエレクトロニクス機器は、パワー半導体を搭載したパワーモジュールから構成される。したがって、地球温暖化を抑制するためにはパワエレ機器のベースとなる、パワー半導体ならびパワーモジュールの技術革新が必要不可欠である。

本学位論文では、パワーエレクトロニクスを支えるパワー半導体の発熱や放熱の観点に注目し、シミュレーション技術を駆使してその高性能化に寄与する内容を含んでいる。以下に、各章で述べているせいかと意義を記述する。

第1章では、社会におけるパワーエレクトロニクスの必要性ならびにパワー半導体に求められる性能を概説し、本論の研究対象である新しいIGBTの構造として誕生したRC-IGBTとの違いを述べている。

第2章では、通常のIGBTとRC-IGBTの比較を行い、構造、メリット、デメリットを整理することで、RC-IGBTの課題を具体的に浮かび上がらせ、本論における研究テーマとなる課題を述べている。

第3章では、第2章で述べた課題に対する解決策の効果を見積もるために実施したシミュレーションの方法を示している。シミュレーションソフトウェアとしてTCADを用いている。これは、RC-IGBTの発熱をデバイス構造から計算可能であり、且つ試算結果をSPICEなどの異なるソフトウェアと連携させることが可能であることが理由である。このシミュレーションの方法は、第4章および第5章に定義した冷却効果および温度均一化効果の試算条件となった。

第4章では、第2章で課題となったRC-IGBTのチップ熱抵抗推測方法について、RC-IGBT非動作領域による冷却効果を定義することでRC-IGBTのチップ熱抵抗を予測可能であることを示した。IGBTおよびFWDのセルピッチにおける冷却効果を試算し、チップ熱抵抗を推定した結果、従来手法よりも15%チップ熱抵抗精度が向上した。そのため、IGBTからRC-IGBTにパワー半導体を置き換えた場合、約60%チップ熱抵抗が低減できることがわかった。また、本論で述べた冷却効果を最大化するIGBTとFWDのセルピッチが0.26対1であることを明らかにした。

第5章では、第2章で課題となったRC-IGBTの熱的アンバランスを、シミュレーションを用い接合による温度均一化効果を定義することで、熱的アンバランスを解消できる構造を示した。FWD領域に偏重した接合を行うことで、熱的アンバランスを解消できることを示した。この結果、従来構造では熱抵抗アンバランスが14%であったが提案構造では4%であり、74%改善した。また、接合下部温度差は従来構造では6°Cであったところ、提案構造ではほぼゼロとなった。この結果、提案構造は従来構造と比較し、パワーサイクル耐量を25%向上した。

第6章では、第4章ならびに第5章で新しく提案したチップ熱抵抗推定手法と接合による熱バランス改善手法が、異なるRC-IGBTのIGBTおよびFWD領域の配置の場合において適用可能かどうか、考察を行った。本論で用いたストライプ状のIGBTおよびFWD領域の配置がRC-IGBTの特性を引き出すうえで適していることを指摘した。

第7章では以上で得られた成果について総括した。

本研究の成果は、本論で定義した非動作領域の冷却効果によって、従来予測不可能であっ

た RC-IGBT のチップ熱抵抗を IGBT もしくは FWD のチップ熱抵抗から推定可能となったこと、また、本論で定義した接合による RC-IGBT 表面の温度均一化効果により、RC-IGBT の熱バランスを従来接合技術において最小化できる手法を示したことである。したがって、IGBT と FWD のセルピッチによる RC-IGBT の熱抵抗設計が可能となった。また RC-IGBT の熱バランスを改善するための接合手法の指針を示した。これらの手法は、従来 IGBT および FWD を RC-IGBT へと置き換えを促進し、さらなるパワエレ機器の高効率化につながると思われる。以上のことから、本論文は、博士論文の価値は十分にあるものと認められた。