

ウスイ マサノリ

氏名	臼井 正則
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1118号
学位授与の日付	平成30年3月26日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	車載パワーモジュールへの電気・機械・熱ストレスの影響解析 (Effect analysis of electrical, mechanical and thermal stresses on power modules for automobiles)

論文審査委員	主査	准教授	加藤 正史
		教授	水野 幸男
		教授	三好 実人

## 論文内容の要旨

二酸化炭素排出量抑制に向けて自動車に関しては、従来の内燃機関から電動化への移行が有効と考えられる。この電動化車両において、パワーモジュールは電力エネルギーの分配を制御する重要な役割を果たす。車載パワーモジュールでは、搭載スペースの制約とコスト低減の面より高電力密度化が求められている。本論文では、パワーモジュールの高電力密度化を進める際の信頼性上の課題に関し、電気ストレス、機械ストレス、熱ストレスがパワーモジュール、もしくはパワーデバイスに与える影響とその支配要因を明らかにした。

第1章では、研究の背景と概要を述べた。

第2章では、パワーデバイスの低損失化に有効なトレンチゲート構造に関して、電気ストレスがゲート酸化膜に与える影響をエミッション顕微鏡の使用により評価した。ゲートを相互接続するトレンチ端部の上部コーナにおいて、ストレス印加初期に局所的な電子注入が発生することが観察された。酸化膜の厚さと曲率半径に起因した上部コーナにおける電界集中が、デバイスシミュレーションにより説明できることがわかった。したがって、酸化膜形状がトレンチゲートの信頼性を支配することが確認された。

第3章では、縦型パワーデバイスにおいて、機械的応力が電気特性に与える影響を評価した。デバイスに対する機械的応力のみ影響を抽出するために、一軸性応力を印加した状態で評価可能な計測方法を開発した。本手法を用いて、オン状態の応力による特性変動を測定し、この測定結果はデバイスシミュレーションにより再現された。また、オン特性の応力依存性は、主に、キャリア移動度の応力依存性が支配していることを確認した。

第4章では、Cu ナノ粒子焼結層に関して、Si チップと実装基板に対して接合した試料において温度サイクル試験を実施した。その劣化過程は、放射光ラミノグラフィを使用して観測された。屈曲しながら進展する Cu ナノ粒子接合のクラックは、高密度焼結部を避けるように、実装基板側から Si チップ側に向かっていった。また、接合層の金属組織の分析により、クラックは結晶粒界に依存しないことがわかった。以上より、Cu ナノ粒子焼結層のクラック進展は、その焼結密度分布に依存し、Cu ナノ粒子焼結層の微細組織が、信頼性に与える影響が大きいことがわかった。

第5章では、第4章において Cu ナノ粒子焼結層における課題として抽出した焼結分布の存在に対して、Cu ナノ粒子に Bi-Sn 合金粒子を添加したハイブリッド接合による改善効果の評価した。従来の Cu ナノ粒子接合の接合強度は高温保持により大きく低下するが、ハイブリッド接合では、高温保持による影響が確認されなかった。放射光ラミノグラフィにより、Cu ナノ粒子のみの接合層では、多くのクラックの存在が確認され、これらが酸化の要因となることがわかった。一方、ハイブリッド接合では液相の Bi と Sn の効果で、緻密な焼結層が得られ、クラックの発生・進展と酸化を抑制できた。このようにして、Bi-Sn 粒子の添加により、高温安定性が向上することが確認された。

6章では、結論として、得られた知見の効果をまとめた。2章で示した通り、トレンチゲート構造に対してエミッション顕微鏡により、電気ストレスに対する弱点部位が抽出可能であり、この結果をデバイス/プロセス設計に活用することにより、小型/低損失なトレンチ IGBT の高信頼化に貢献できる。3章では、デバイス電気特性の機械ストレス依存性が、デバイスシミュレーションで再現可能であることを示した。これは、多軸応力や熱が加わった状況にも展開できる。したがって、モジュールの構造設計の際に、デバイスの特性変化を織り込むことが可能となり精度の高い熱応力設計に寄与できる。4、5章では、耐熱接合材の候補である Cu ナノ粒子系接合材に対して、放射光ラミノグラフィを使用した非破壊観察により、熱ストレスの影響を評価し、材料として高いポテンシャルを確認した。したがって、本接合技術は SiC パワーモジュールの高温動作化への貢献が期待される。以上のように、本研究により得られた電気、機械、熱ストレスに関する信頼性上の知見は、車載パワーモジュールのさらなる高電力密度化に向けて有益であると考えられる。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、車載用パワーモジュールの高電力密度化を進める際の信頼性上の課題に関し、電気ストレス、機械ストレス、熱ストレスがパワーモジュール、もしくはパワーデバイスに与える影響とその支配要因を明らかにしたものである。以下に論文内容の要旨と審査結果を述べる。

第1章では、研究の背景と概要が述べられている。

第2章は、パワーデバイスの低損失化に有効なトレンチゲート構造に関して、電気ストレスがゲート酸化膜に与える影響をエミッション顕微鏡の使用により評価した結果についてのものである。ゲートを相互接続するトレンチ端部の上部コーナにおいて、ストレス印加初期に局所的な電子注入が発生することを観測した。この結果、酸化膜形状がトレンチゲートの信頼性を支配することが明らかになった。

第3章は、縦型パワーデバイスにおいて、機械的応力が電気特性に与える影響を評価した結果についてのものである。デバイスに対する機械的応力のみの影響を抽出するために、一軸性応力を印加した状態で評価可能な計測方法を開発し、オン状態の応力による特性変動を測定した。その結果により、オン特性の応力依存性は、主に、キャリア移動度の応力依存性が支配していることが明らかになった。

第4章は、Cuナノ粒子焼結層に関して、Siチップと実装基板に対して接合した試料において温度サイクル試験を実施した内容についてのものである。その劣化過程は、放射光ラミノグラフィを使用して観測された。屈曲しながら進展するCuナノ粒子接合のクラックは、高密度焼結部を避けるように、実装基板側からSiチップ側に向かっていった。また、接合層の金属組織の分析により、クラックは結晶粒界に依存しないことがわかった。これらの結果により、Cuナノ粒子焼結層のクラック進展は、その焼結密度分布に依存し、Cuナノ粒子焼結層の微細組織が、信頼性に与える影響が大きいことが示された。

第5章は、第4章においてCuナノ粒子焼結層における課題として抽出した焼結分布の存在に対して、Cuナノ粒子にBi-Sn合金粒子を添加したハイブリッド接合による改善効果を評価した結果についてのものである。従来のCuナノ粒子接合の接合強度は高温保持により大きく低下するが、ハイブリッド接合では、高温保持による影響が確認されなかった。放射光ラミノグラフィにより、Cuナノ粒子のみの接合層では、多くのクラックの存在が確認され、これらが酸化の要因となることがわかった。一方、ハイブリッド接合では液相のBiとSnの効果で、緻密な焼結層が得られ、クラックの発生・進展と酸化を抑制できた。以上の結果により、Cu名の粒子焼結層に対してBi-Sn粒子を添加することにより、高温安定性が向上することを示した。

第6章は結論として、得られた知見の効果をまとめたものである。

上記の論文要旨で示されたパワーデバイス・パワーモジュールに対する電気、機械、熱ストレスに関する信頼性上の知見は、車載パワーモジュールのさらなる高電力密度化に向けて有益であると考えられる。したがって、本論文は博士論文として認めるのに相応しいものであると考える。