

氏名	丹羽 章雅
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第 8038 号
学位授与年月日	平成 29 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	SiC MOSFET 内蔵ダイオード利用のための駆動回路技術に関する研究

主査	筑波大学 教授	工学博士	只野 博
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	岩室 憲幸
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	蓮沼 隆
副査	首都大学東京 准教授	博士(工学)	和田 圭二

論 文 の 要 旨

地球環境、エネルギー問題等に関連し、ハイブリッド自動車(HEV)や電気自動車(EV)の開発普及が進んでいる。これら電気駆動システム(PCU)を動力とした自動車の開発においては、HEV や EV といった環境対応車のさらなる普及に向け、PCU の小型高性能化が求められている。

本論文は、PCU の小型高性能化に向け開発されてきている新しいパワー半導体デバイスである SiC MOSFET の低オン電圧、高速スイッチング等の特性を生かした高性能 PCU を実現する為の駆動回路技術に関する研究である。SiC MOSFET は内蔵ダイオードを有することから、外付け還流ダイオードを必要とせず、デバイスの個数を少なくすることで PCU の低コスト化に対応することが検討されているが、内蔵ダイオードには損失増加や信頼性の懸念等、いくつかの課題が存在する。この課題を回路技術、具体的には SiC MOSFET の駆動技術によって解決または低減するための回路の研究を実施し、これまで PCU で使われていた部品を増加することなくこれら課題を解決する手法を提案し、実際の試作によりその効果を確認している。

第 1 章の序論に引き続き、第 2 章では SiC MOSFET を HEV の PCU へ適用するためにどのような課題があるかを検討し、特に、内蔵ダイオードを用いた PCU 構成では損失を低減するためにどのような駆動条件が必要かを具体的に導き出している。また、先行研究の解析から、内蔵ダイオード導通に伴う信頼性低下の課題や内部動作を含めた導通時間制御の必要性を述べている。

第 3 章では、SiC MOSFET 内蔵内オードの動作を、デバイスシミュレータを用いて具体的に解析し、上下デバイスが共にオフ状態で、電流が内蔵ダイオードを流れている期間(デッドタイム)での伝導電荷の振舞を解析し、デッドタイム制御すなわち駆動回路技術によってダイオードの振舞を制御できること

を具体的に示し、またその効果を実験によって確かめ、駆動回路技術による低損失化の可能性が示されている。

第4章では、SiC MOSFETの信頼性にとって重要な特性劣化の問題に関し、基礎実験を通してデッドタイム制御による信頼性向上に関し述べている。SiC MOSFETのボディダイオード利用に関しては、ダイオード導通に伴う特性劣化がこれまでに報告されている。本論文では、極短時間の導通においては特性劣化が起こりにくいのではとの仮定に基づき実験にて劣化状況の観察を行い、15nsecの短時間導通では劣化の進行が著しく低減可能であることを示している。このような短時間通電による劣化の具体的な解析は、これまで報告例がほとんどなく、SiC MOSFETをPCU等に利用する場合の重要な知見が得られている。

第5章では、これまでの結果をもとに、具体的な駆動技術の研究開発に関し述べている。現状の駆動回路と相性が良くSiC MOSFETの内蔵ダイオードを利用し、しかもHEVのPCUに要求される種々の条件を満たすと共に、ノイズ等の外乱に強い駆動回路を提案し、その解析を理論的に実施している。さらに、駆動回路を実際に試作することで、実回路において有益な回路技術であることを実証している。

さらに第6章では、第5章での試作結果を基に、さらに高精度な駆動回路制御技術の提案を行い、さらなる高性能化が期待できる駆動回路技術であることを報告している。

本学位論文は、将来のパワー半導体デバイスとしてHEV、EV用PCUへの応用展開が期待されているSiC MOSFETの応用上の問題点課題に関し、その現象の基礎的な解析を基に新しい駆動回路技術を提案し、この駆動回路を用いることで、SiC MOSFETを用いたPCUの高性能化を、高い信頼性を持って実現可能であることを示したものである。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

次世代パワー半導体デバイスとして期待されているSiC MOSFETは一部製品で実用化検証が始まってきたが、高い信頼性を要求されるHEVやEVへの応用には、高性能化と共に信頼性の確保が非常に重要な課題である。高性能化、低損失化に関しては、SiC MOSFET内蔵ダイオード通電の影響を、電力変換回路損失の立場から解析している。その結果、内蔵ダイオードを用いても駆動回路技術の高性能化によって、損失増加を抑えながら有効にSiC MOSFETをHEVやEVの電力変換システムに適用可能な駆動が実現できることを具体的な損失解析を基に示している。内蔵ダイオードを用いることは、これまでのシステムで必須であった外付けのダイオードを省略すること、すなわち低コスト化につながる有益な研究成果である。

また、信頼性の観点で問題となっている内蔵ダイオードの順方向動作に伴う劣化の課題に関し、新しく短時間通電という技術を提案し、この手法を用いることで劣化の進行を抑えることができることを示している。この劣化は、ダイオード導通に伴う電子と正孔の再結合によって引き起こされる現象であるが、従来の内蔵ダイオード導通制御技術では、高い信頼性でこの劣化を抑制することは困難であった。本研究においては、短時間導通における電子や正孔の分布を詳細に解析するとともに、実際の短時間通電によってその効果を検証し、仮説が正しいことを証明するとともに、それを実現可能な駆動回路技術を提案、実証している。この技術は今後安心してSiC MOSFETをパワー半導体デバイスとして用いる場合の重要な知

見であり、学問分野のみならず産業に与える貢献は大きい。

研究手法としては、問題点の把握と研究目標の設定に始まり、具体的な手法の提案とその効果の個別の確認を行い、提案技術を盛り込んだ駆動回路を具体的に製作しその効果を実証し、この技術が有用であることを証明している。さらにこの技術を発展させるための新制御技術にも言及し、SiC MOSFET の内蔵ダイオードを利用した電力変換技術における高性能高信頼な駆動回路技術に関する提案を行っており、研究論文として十分な価値が認められる。

〔最終試験結果〕

平成 29 年 2 月 21 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。