

氏 名	山下 侑佑
学 位 の 種 類	博 士 ( 工 学 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 8774 号
学位授与年月日	平成 30年 5月 31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	電力用 pin ダイオードの構造最適化に関する研究
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) 末益崇
副 査	筑波大学教授 博士(工学) 岩室憲幸
副 査	産業技術総合研究所総括研究主幹 博士(工学) 田中保宜

## 論 文 の 要 旨

本論文は、電力変換回路の重要な構成要素の一つであり低損失化が常に求められている電力用 pin ダイオードの構造最適化手法に関する研究成果である。

電力用 pin ダイオードでは、導通損失、スイッチング損失等の損失が発生し、これら損失の見積もりはダイオードの使用条件に合わせて評価解析する必要がある。通常デバイスシミュレーション技術を用いその電気的特性を予測することが行われているが、この手法では用いた構造パラメータでの特性のみの解であり(離散的な解)、最適化のための構造設計の方向性は示されない。この問題を解決するため、本論文では pin ダイオードの動作原理の基づく理論的な数式モデルを構築提案している。

第 1 章では、これまでの数式モデル研究例を述べ、実際の電力変換回路での損失やサージ電圧の解析に対し、従来モデルでは逆回復現象を表すモデルが不十分であること、現状の電力用 pin ダイオードの使用条件による影響が反映されていないことを報告し、本研究では、これらの課題に対応するダイオードモデル開発を行ったことを述べている。

第 2 章では、具体的なダイオードのモデル化手法に関し報告している。ここでは、ダイオード内のキャリア分布とその時間変化を原理に基づき詳細に解析することで、数式モデルを構築する方法を述べている。特に、実際の電力変換回路で必須となる評価項目のサージ電圧をその解析項目に入れており、これまでにない新しいダイオードモデルが提案できている。また、これまで正確なモデルが無かった逆回復現象のモデル化を、実際の動作波形の解析から導き出し、数式モデルとしての構築に成功している。構築されたモデルは、従来のデバイスシミュレーション結果と比較されており、十分精度の高い解が得られる

数式モデルとなっていることを実証している。

第3章では、開発した数式モデルを用いて最適化計算への応用を実施している。最適化を行うための評価関数を設定し、その評価関数を用いた最適化のためのアルゴリズムの検討を行っている。最適化の例として、スイッチング周波数依存性、電流変化率依存性、の結果を示し、ダイオードの構造設計のための指針が得られることが示されている。さらに多変数を解析可能である優位性を示し、多くのパラメータを調整する必要があるデバイスの構造最適化においては、これまでのデバイスシミュレーションを用いた手法よりさらに最適な解が得られる可能性に言及している。

第4章では、最適化計算で得られた解の物理的な意味の解析を行っている。例として、キャリアライフタイムによる影響の解析、トラップのエネルギー準位による解析を示し、それらの持つ物理的な意味(現象解析への展開)が述べられている。また、多変数での解析が容易なことから、マップを用いた多次元解析の例を報告し、例えば順方向電圧と不純物添加量及びキャリアライフタイムの関係を示し、どのような状態でどこに最適解があるかの解析が可能であることが示された。また、システム応用に際し重要なサージ電圧と不純物添加量及びキャリアライフタイムの関係の解析では、ある領域に最適点が存在する場合があることを示し、これまでのシミュレーション解析では得られない数式モデルを用いた解析の重要性を明らかにしている。特に、サージ電圧の許容値によっては、pin ダイオードの最適構造パラメータが異なることが示されている。第5章では、本論文のまとめを行い、電力用 pin ダイオードの構造最適化の手法として有用な研究成果が得られたと結論付けている。

## 審 査 の 要 旨

〔批評〕

電力用 pin ダイオードは、電力変換回路には多くの場合必ず用いられる重要な半導体デバイスであり、電力変換装置の効率等を左右する部品の一つである。近年の電力変換装置の高性能化に伴い、高性能化を実現するための pin ダイオードの詳細な構造設計が必要とされ、このために通常デバイスシミュレーションによる構造設計が行われている、しかし、このシミュレーションによる構造設計では、用いた構造パラメータでの解が得られるのみで、設計の方向性を検討する上では不十分となる場合があった。

本論文では、電力用 pin ダイオードの構造設計を、使用する回路の特性も併せて解析可能とするデバイスの動作原理に基づく動作の数式モデルを構築することにより、複雑に入り組んだ最適構造を見出す手法を開発し、その有用性に関しまとめている。開発した数式モデルは、これまでの数式モデルには無い高速電力変換システムの状況を反映したモデルであり、応用展開上有用なモデルとなっている。特に、これまで十分なモデル化がなされていなかった逆回復過程をモデル化したこと、高速駆動によるサージ電圧の発生をモデルに組み入れたことは、本研究の特筆すべき成果と考えられる。例として述べられているサージ電圧に関しては、その規定値によっては、pin ダイオードの最適構造が異なることが示され、これは実際のデバイス設計に重要な情報であり、これまで用いられてきたデバイスシミュレーションを用いた解析では得ることが難しい結果である。学位論文審査委員会では、本論文中で述べられているデバイス中のキャリア密度分布が、動作条件によってはこれまでと多少異なる分布が最適となること、またその考え方が報告され、この手法による解析の有用性が示された。

また本論文では、単に数式モデル構築に留まらず、その有効性を一般的なデバイスシミュレーション技術と比較するとともに、数式モデルを用いることでの多構造変数での解析が可能であること、またそれによって隠れていた最適点を見出すことができることを示した。さらに、解析結果の物理的な意味を検討し、キャリアライフタイムや再結合エネルギー準位等、半導体物性としての物理的な構造設計への展開にまで言及している。審査委員会では、他の材料に適用可能かとの質問があり、材料物性が把握できれば他の材料、例えば SiC パワーダイオードへの適用も可能との回答で、今後の広い材料系への展開が期待できる成果との認識が得られた。

以上の様に、本論文は電力変換装置の広く用いられる電力用 pin ダイオードの動作原理に基づく電氣的な振る舞いをモデル化した学術的な成果と共に、ダイオードの構造最適化手法として、電力変換装置の高性能化のためのデバイスの高速駆動化が進められているシステム最適を実現する構造を持ったダイオード開発へ応用展開が可能な実用的な成果を含み、学位論文として価値のある論文であると結論付けられた。

#### 〔最終試験結果〕

平成 30 年 4 月 13 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。