

学位論文題名

ブロードバッファ構造による還流ダイオードの高性能化に関する研究

学位論文内容の要旨

現代社会において、電力は様々な局面において利用されており、社会の発展には不可欠なものとなっている。この電力を利用しやすい形態に変換する技術がパワーエレクトロニクスである。この技術においては、省電力のため、変換の際に発生する熱損失を十分低く抑えることが強く要求される。インバータは、低損失型の代表的な電力変換装置であり、電鉄、電気自動車、家電、産業などに現在広く用いられている。このインバータの電気的特性を決めるのが、インバータに組み込まれる電力用半導体スイッチであり、その代表が絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ (Insulated Gate Bipolar Transistor, 以下 IGBT) である。一方、インバータに接続される誘導負荷に起因する還流電流から IGBT を保護するために欠かせない役割を担うのが、半導体の還流ダイオードである。インバータの省電力化には、IGBT と還流ダイオード双方の低損失化が必要不可欠である。特に、還流ダイオードにおいては、還流電流を阻止する際に逆方向に大量に流れる逆回復電流が発生し、それが逆回復時の電氣的損失である逆回復損失の増加につながる。近年の IGBT の飛躍的な高速化にともない、インバータの全電力損失における還流ダイオードの損失の割合は増加する傾向にあり、インバータ損失の低減のためには還流ダイオードの導通時の損失と逆回復損失の低減が不可欠となっている。しかし、逆回復損失の低減を図ると、逆回復時におけるダイオードの発振現象が顕在化することが明らかになっている。この逆回復発振は、変換機から発生する電磁ノイズの原因となるため、環境問題への配慮から、これを抑えることが不可避な課題となっている。しかしながら、これまでダイオードの損失低減と逆回復発振の抑制を両立できるダイオードの特性改善方法が無く、この課題を解決する新しい方法の確立が急務である。

本研究は、還流ダイオードにおける逆回復発振現象を実験、ディバス・シミュレーション、および数値解析によって系統的に調べ、その原因を解明し、さらにはこの問題を解決する方法を提案することを目的とする。研究の結果、逆回復時のキャリアの枯渇が発振の直接的な原因であることが明らかになった。またこれらの解析から、ダイオードの逆回復損失低減と発振抑制を両立するには、空乏層の空間的広がりを抑えることによって逆回復時のキャリアの枯渇を防ぐ方法が有効であることを示した。さらに、これらの知見を基に、p-i-n 型ダイオードの i 層 (ドリフト層) に山型のドーピング濃度分布を持たせたブロードバッファ (BB) ダイオードを新たに提案した。この BB ダイオードを用いることによって、逆回復時の電氣的損失の低減と発振抑制を初めて両立させることに成功した。また、実際に BB ダイオードを試作・評価することによって、BB ダイオードの有効性を実証した。これにより、電力変換技術に不可欠なパワー半導体デバイスの新しい方向性が拓かれたことになる。各章の概要は、以下の通りである。

第 1 章は序論であり、本論文の主題であるブロードバッファ構造による還流ダイオードの高性能化に関する研究の背景と還流ダイオードの抱える課題について概説し、本研究の目的を述べる。

第 2 章では、第 1 章で述べた研究の背景である電力変換装置、特にインバータの動作、インバー

タの基本要素となる半導体スイッチとしての IGBT、および還流ダイオードの役割や要求特性を詳しく解説する。さらに、還流ダイオードの低損失化に伴う課題、すなわち逆回復時に発生する振動現象について概説する。

第3章では、ダイオードの逆回復発振現象の原因について考察する。逆回復振動現象は、ある発振開始閾値電圧以上の電源電圧において発生することを明らかにし、逆回復発振現象の起き易さがこの発振開始閾値によって特徴づけられることを示した。また、発振開始閾値が逆回復開始時の初期電流の減少に伴って低下することを明らかにした。このことは、これまで知られていた低電流の逆回復で発振が顕著に生じやすいという経験則を初めて定量的に示したことになる。また、デバイス・シミュレーションにより、逆回復発振現象発生時のダイオードの内部状態を解析し、逆回復時のキャリアの枯渇が発振の直接的な原因となっていることを明らかにした。さらに、キャリアの枯渇が何故発振を引き起こすかについての物理的理由を解明し、理論的・数値的なアプローチにより発振開始閾値の初期電流依存性を定量的に説明した。これらの解析から、還流ダイオードの逆回復損失低減と発振抑制の両立には、逆回復時のキャリアの枯渇を防ぐこと、すなわち空乏層の広がりを抑えることが重要であることを明らかにした。

第4章では、第3章の解析で得られた知見を基に、逆回復振動現象の抑制と低損失化を両立できる新しい構造のダイオードであるブロードバッファ (BB) ダイオードを提案する。BB ダイオードは、p-i-n 構造の i 層 (ドリフト層) の広い領域において山型のドーピング濃度分布を有する構造を取っている。逆回復時には山型ドーピングの山頂の位置で空乏層の広がりが抑えられるため、逆回復中のキャリアの枯渇を遅らせることができ、その結果発振開始閾値が増加する。また、従来型ダイオードに対する BB ダイオードの優位性を検証するために、導通損失、逆回復損失、および発振開始閾値に基づいた新たな指標を導入することによって、還流ダイオードの総合特性を比較評価する方法を考案した。様々なパラメータの値を設定した多数のサンプルのダイオードに対し、デバイス・シミュレーションによりこの指標を評価した結果、BB ダイオードが発振抑制という観点において優れた特性を示す新たなカテゴリに属するダイオードであることが判明した。

第5章では、BB ダイオードを作成する方法を検討し、実際に試作・評価した結果を解説する。LSI やメモリの形成プロセスに用いられる通常のドーピング方法では、ドリフト層の深部に山型のドーピング濃度分布を形成することはできない。本研究では、二つの方法でこのようなドーピング構造が実現できることを実証した。一つはガス流を制御しながらエピタキシャル層を $100\text{ }\mu\text{m}$ 以上成長させる方法であり、もう一つは水素イオンを高加速エネルギーで注入して水素関連ドナーを形成する方法である。本研究ではこれら二つの形成方法を実際に試し、BB ダイオードを作成した。作成された BB ダイオードの性能を評価した結果、実際の BB ダイオードにおいても高い発振抑制効果が現れ、インバータ損失の低減に大きく寄与することを明らかにした。

第6章は結言であり、逆回復発振現象の解析とその原因の究明、逆回復発振現象を抑える新たな BB ダイオードの提案、動作原理およびその解析、さらに実際の BB ダイオードの試作評価結果についてまとめるとともに、今後のパワー半導体デバイスの課題について述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 矢久保 考 介

副 査 教 授 武 藤 俊 一

副 査 教 授 小笠原 悟 司 (情報科学研究科)

学 位 論 文 題 名

ブロードバッファ構造による還流ダイオードの高性能化に関する研究

現代社会において、電力は様々な局面において利用されており、社会の発展には不可欠なものとなっている。この電力を利用しやすい形態に変換する技術がパワーエレクトロニクスである。この技術においては、省電力のため、変換の際に発生する熱損失を十分低く抑えることが強く要求される。インバータは、低損失型の代表的な電力変換装置であり、電鉄、電気自動車、家電、産業などに現在広く用いられている。インバータの省電力化には、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ (IGBT) と還流ダイオード双方の低損失化が必要不可欠である。特に、還流ダイオードにおいては、還流電流を阻止する際に逆方向に大量に流れる逆回復電流が発生し、それが逆回復時の電氣的損失である逆回復損失の増加につながる。逆回復損失の低減を図ると、逆回復時におけるダイオードの発振現象が顕在化することが明らかになっている。この逆回復発振は、変換機から発生する電磁ノイズの原因となるため、環境問題への配慮からも、ダイオードの損失低減と逆回復発振の抑制を両立できるダイオードの特性改善が急務の課題となっている。

本研究は、還流ダイオードにおける逆回復発振現象を実験、デイバス・シミュレーション、および数値解析によって系統的に調べ、その原因を解明し、さらにはこの問題を解決する方法を提案している。研究の結果、(1) 逆回復時のキャリアの枯渇が発振の直接的な原因であることが明らかになった。(2) 空乏層の空間的広がりを抑えることによって逆回復時のキャリアの枯渇を防ぐ方法が有効であることを示した。(3) これらの知見を基に、 $p-i-n$ 型ダイオードの i 層 (ドリフト層) に山型のドーピング濃度分布を持たせたブロードバッファ (BB) ダイオードを新たに提案した。(4) 実際に BB ダイオードを試作し、逆回復時の電氣的損失の低減と発振抑制を初めて両立させることに成功し、BB ダイオードの有効性を実証した。

本論文は以下のように構成されている。第 1 章は序論であり、ブロードバッファ構造による還流ダイオードの高性能化に関する研究の背景と還流ダイオードの抱える課題について概説し、本研究の目的を述べている。第 2 章では、第 1 章で述べた研究の背景である電力変換装置、特にインバータの動作、インバータの基本要素となる半導体スイッチとしての IGBT、および還流ダイオードの役割や要求特性を解説している。第 3 章では、ダイオードの逆回復発振現象の原因について考察している。逆回復振動現象は、ある発振開始閾値電圧以上の電源電圧において発生することを明らかにし、発振開始閾値が逆回復開始時の初期電流の減少に伴って低下することを明らかにした。さらに、発振現象の物理的起源についても議論している。第 4 章では、第 3 章の解析で得られた知見を基に、逆回復振動現象の抑制と低損失化を両立できる新しい構造のダイオードであるブロードバッ

ファ(BB)ダイオードを提案している。BBダイオードは、p-i-n構造のi層(ドリフト層)の広い領域において山型のドーピング濃度分布を有する構造を取っている。また、従来型ダイオードに対するBBダイオードの優位性を検証するために、導通損失、逆回復損失、および発振開始閾値に基づいた新たな指標を導入することによって、還流ダイオードの総合特性を比較評価する方法を考案している。第5章では、BBダイオードを作成する方法を検討し、実際に試作・評価した結果を解説している。LSIやメモリの形成プロセスに用いられる通常のドーピング方法では、ドリフト層の深部に山型のドーピング濃度分布を形成することはできない。本研究では、このようなドーピング構造を実現するための二つの方法を提案し、実際にこれら方法を用いてBBダイオードを試作している。また、その性能を評価することでBBダイオードの有効性を実証している。第6章は結言であり、逆回復発振現象の解析とその原因の究明、逆回復発振現象を抑える新たなBBダイオードの提案、動作原理およびその解析、さらに実際のBBダイオードの試作評価結果についてまとめるとともに、今後のパワー半導体デバイスの課題について述べている。

これを要するに著者は、電力変換技術の主要な役割を果たすインバーターの省電力化において障害となっている還流ダイオードの逆回復発振現象の物理的起源を解明し、ブロードバッファ・ダイオードという特殊なドーピング構造を持つ新規還流ダイオードの有効性を実証することにより、新しいカテゴリーに属するインバーターを提案している。これらの研究成果は、電力変換技術に対する深い理解と新たな知見を与えることでパワー半導体デバイスの新たな方向性を示しており、パワーエレクトロニクスおよび応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。