

| | |
|-----------|--------------|
| 氏名 | 梅上 大勝 |
| 学位の種類 | 博士（工学） |
| 学位記番号 | 総博甲第109号 |
| 学位授与年月日 | 平成28年3月25日 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項 |
| 文部科学省報告番号 | 甲第574号 |
| 専攻名 | 電子機能システム工学専攻 |

学位論文題目 次世代パワー半導体デバイス GaN HEMT の応用に向けた基礎研究
(A Fundamental Study on the Next Generation Power Semiconductor Device "GaN HEMT" for Applications)

| | | | |
|--------|----|---------|-------|
| 論文審査委員 | 主査 | 島根大学准教授 | 山本 真義 |
| | | 島根大学教授 | 増田 浩次 |
| | | 島根大学教授 | 矢野 澄男 |
| | | 島根大学教授 | 伊藤 文彦 |

論文内容の要旨

シリコンを使用したパワー半導体デバイスは様々な構造のデバイスが考案され、広く普及している。これらのデバイスは電力変換回路の発展を支え、産業用などのモータを駆動するためのインバータ回路や直流で動作する電子機器製品の電源回路など様々なアプリケーションへと適用されている。しかし、シリコンの材料面での性能限界が指摘されはじめ、新しい半導体デバイスへの転換が行われようとしている。その中でも注目を集めているのが、SiCやGaN、Ga₂O₃などの禁制帯幅が大きいワイドバンドギャップ半導体である。これらの半導体材料は次世代半導体デバイスとして位置づけられている。次世代半導体デバイスは耐電圧、耐熱性、高速動作などの特徴をもつが、その特性故にスイッチングサージ大きくなりやすいことや閾値が低いことによる誤動作など、活用していく上での技術的な課題が存在する。

本研究では、次世代半導体デバイスの中でもGaNデバイスに関して、電力変換回路などに応用していく上での基本的な技術課題に対してアプローチする。特に、GaNデバイス特有の特性に応じたゲート駆動回路の提案とその有用性の検証、そして、誤点弧の発生メカニズムに着目し、理論解析を行うことを目的とする。

第1章では、シリコンのパワー半導体デバイスをその制御性を元に分類を行った。また、シリコンの物性限界からシリコンに代わる新たな次世代パワー半導体デバイスの材料の1つとしてGaNを取り上げ、Si MOSFETとGaN HEMTのデバイス面での差異について言及する。そして、研究目的とその概要を示す。

第2章では、GaNデバイスの特徴について述べる。GaNデバイスはGaNとAlGaNとのヘテロ接合を利用しており、二次元電子ガスと呼ばれる高濃度の電子層を生成させている。この状態ではノーマリオン状態であるが、そのノーマリオン化の手法について紹介する。また、伝導ノイ

ズによる影響で誤点弧しやすい理由についても言及する。

第3章では、GaN デバイスに適用できるゲート駆動回路として、キャパシタ分圧型ゲート駆動回路とアクティブ放電型ゲート駆動回路について述べる。キャパシタ分圧型は GaN デバイスを高速に駆動することを可能である。また、高速な駆動には、回路上の寄生回路成分によって生じる電圧振動が伴う。この電圧振動により GaN デバイスが誤点弧することを防止する機能をも併せもつゲート駆動回路である。アクティブ放電型ゲート駆動回路は、GaN デバイスの逆導通損失を低減することができるゲート駆動回路である。GaN デバイスは Si MOSFET のようにボディダイオードを持たないが、逆阻止デバイスではなく逆導通デバイスである。逆導通時にはゲート電圧に依存して損失が増大してしまう特性をもつ。アクティブ放電型ゲート駆動回路はこの課題を解決する。これら2種類のゲート駆動回路についてゲート駆動損失解析を行う。また、逆導通モードをもつ電力変換回路である LLC 共振コンバータに実装することで、ゲート駆動回路の有用性を確認する。

第4章では、パワー半導体デバイスを駆動する際に問題となる誤点弧について言及する。特に、パワー半導体デバイスが直列に2つ接続されたトーテムポールと呼ばれる構成において発生する誤点弧を取り扱う。トーテムポール回路構成はインバータや同期整流回路など多くの電力変換回路に適用される回路構成である。この構成上では、それぞれのパワー半導体デバイスは180度位相をずらして交互に駆動されるが、双方のパワー半導体デバイスが同時に点弧すると短絡回路を構成してしまうため、デッドタイムと呼ばれる双方のパワー半導体デバイスが消弧している時間を入れる。しかし、デッドタイム後に一方のパワー半導体デバイスが点弧した瞬間、消弧しているデバイスには急峻な電圧変動が発生する。この急峻な電圧変動はゲート部に伝導ノイズによる電圧振動が生じることで消弧していなければならないパワー半導体デバイスも点弧してしまう誤点弧が生じる。この誤点弧により短絡回路が構成され、異常発熱やパワー半導体デバイスの破壊につながる現象である。この誤点弧は、Si MOSFET のようなりカバリ現象が生じる場合と、GaN デバイスのようなりカバリ現象が生じない場合で発生メカニズムが異なる。双方の場合において等価回路モデルを考え解析を行う。

第5章では、本研究での成果をまとめる。

論文審査結果の要旨

これまで電力変換技術を担うパワー半導体は、ほとんどがシリコンを使用しており、各応用分野へ幅広く適用されている。しかし、シリコンの材料面での性能限界が指摘されはじめ、SiCやGaN、Ga₂O₃などの禁制帯幅が大きいワイドバンドギャップ半導体が注目を集めている。これらの次世代半導体デバイスは耐電圧、耐熱性、高速動作などの特徴をもつが、その特性故に閾値が低いことによる誤動作など、活用していく上での技術的な課題が存在する。今回はGaNパワー半導体であるGaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) に関して、従来広く使用されているシリコン FET の代表であるSi MOSFET との性能比較により議論を展開する。このGaN HEMT はSi MOSFET に対して、低損失性能、高周波駆動性能が可能というメリットが挙げられるが、その応用に際し以下の留意点がある。1) 逆導通時にはゲート電圧に依存して損失が増大してしまう特性をもつこと、2) その低い閾値電圧故にトータムポール回路構成応用への適用時にノイズによる誤点弧を発生しやすいこと、である。本論文では、これら2つの応用ハードルとなる視点に対し、それぞれ以下のアプローチによる解決を試みた。それぞれの解決法は、1) GaN HEMT の逆導通時におけるゲート印加電圧を抑制可能な新しいアクティブ放電型ゲート駆動回路の適用、2) GaN HEMT をトータムポール回路適用時の回路モデル化による解析を行い、モジュール化における配線インダクタンスの設計指針の提示、の2点である。

結果として、GaN HEMT における逆導通時のゲート電圧依存性に対する議論に係り以下の新しい知見を得た。1) 新提案のアクティブ放電型ゲート駆動回路がGaN HEMT の逆導通時における損失を低減できることを確認した。2) 提案したアクティブ放電型ゲート駆動回路が従来GaN HEMT 用に広く使用されているキャパシタ分圧型ゲート駆動回路に対して低損失であることを実証評価した。3) 電力変換器の代表的なLLCコンバータに対して、従来のキャパシタ分圧型ゲート駆動回路適用時と提案したアクティブ放電型ゲート駆動回路適用時における効率評価を行い、従来方式に対して提案方式は0.3%の効率改善を実現した。また、GaN HEMT のトータムポール回路適用時の誤点弧し易さに関する議論に係り以下の新しい知見を得た。1) 従来のSi MOSFET とGaN HEMT のトータムポール回路適用時における誤点弧の発生メカニズムが異なることを回路モデルより導出した。2) 配線インダクタンスを含めたトータムポール回路のモデル化を初めて実現した。3) トータムポール回路モデルをホイートストンブリッジ回路と見立てることで、誤点弧の電圧振動を積極的に抑制する各寄生成分のあり方を提案した。

以上のように、本論文では次世代パワー半導体の代表であるGaN HEMT の応用に際し技術ハードルとなる2つの問題を、新提案ゲート駆動回路の適用と応用回路の詳細なモデル化により解決を試みたものである。特にトータムポール回路の配線インダクタンスを含んだモデル化はパワー半導体モジュール設計の基本指針となり、半導体応用分野への技術貢献が極めて高いと評価されるものである。これらの成果の一部は、IEEE Transactions on Industry Applications へ1件、電気学会英文論文誌であるIEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering へ1件、電気学会部門誌C分冊へ1件掲載済みである。

以上より、学術的知見の開拓、ならびに本学の規定を満たす学術論文数等の活発な学術活動を鑑み、本論文は博士(工学)の学位授与のための論文として合格と判断した。