



Title	Studies on Miniaturization of Power Converters Using Gallium Compound Semiconductor Power Devices
Author(s)	關, 翔太
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/98761">https://doi.org/10.18910/98761</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名（關 翔太）	
論文題名	Studies on Miniaturization of Power Converters Using Gallium Compound Semiconductor Power Devices (ガリウム化合物パワー半導体デバイスを用いた電力変換回路の小型化に関する研究)
論文内容の要旨	
<p>ワイドバンドギャップパワー半導体デバイスの開発により、電力変換回路の小型化が進んでいる。特に、GaNパワー半導体デバイスの実用化によって電力変換回路の動作周波数の大幅な向上が可能となった。GaN HEMTは2次元電子ガスを利用して高い電子移動度を実現し、高速スイッチングが可能な半導体素子である。しかし、SiやSiCなどの基板にGaN結晶を形成する現在の製造技術では良好な特性を有する GaN SBD の作製は困難である。GaNに代わる高速なスイッチングダイオードの材料としてGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が期待されている。ガリウム化合物パワー半導体であるGaNやGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を適用することで、従来よりも小型で高効率な電力変換回路の実現が期待されている。</p> <p>本研究の目的は、ガリウム化合物パワー半導体を用いた電力変換回路の小型化技術を開発することである。ガリウム化合物パワー半導体を用いた電力変換回路は10MHz以上の周波数で動作可能である。本論文ではガリウム化合物パワー半導体を用いた10MHz以上の動作周波数の電力変換回路に必要な要素について検討を行った。</p> <p>電力変換回路において磁気部品は不可欠な要素であり、高周波電力変換回路の動作に大きな影響を与える。本論文ではB-Hアナライザなどの従来手法では評価の困難であった、10MHz以上の周波数領域で磁気部品の特性を評価する方法を開発した。提案した等価回路を基にE級アンプを設計し、シミュレーションと実回路で検証を行った。</p> <p>また、ガリウム化合物パワー半導体の熱伝導率はSiよりも低く、放熱性能の向上が必要である。特にGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の熱伝導率はSiや他のワイドバンドギャップ半導体と比較して低い。しかし、パワー半導体デバイスの熱特性を評価には、ダイオードの順方向電流特性を用いる。しかし、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスの順方向特性は特性の担保が不十分であった。本論文ではGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDを対象としてショットキージャンクションの温度特性を順方向電流特性から評価し、過渡熱特性の評価を行った。また、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の放熱性能向上のため、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDの基板層の薄化による熱抵抗の低減手法に関して検討を行った。</p> <p>ガリウム半導体素子の中でもGaNは横型デバイスの開発が盛んに行われている。GaNの横型構造のFETは様々な回路に応用されている。しかし、スイッチング特性に影響する横型構造のFETの寄生容量の電圧依存性は従来の縦型構造のMOSFETとは異なっている。本論文ではGaN HEMTを対象に寄生容量の電圧依存性のモデル化を行った。静電容量の電圧依存性のモデルをE級アンプの回路解析を行い、シミュレーションと実回路による実験で回路解析の検証を行った。</p> <p>本論文はガリウム化合物パワー半導体デバイスを用いた電力変換回路の小型化技術についてまとめたものであり、以下の6章で構成されている。</p> <p>第1章は序論である。第1章では、本研究の背景と目的を紹介する。本章では、ガリウム化合物パワー半導体を用いた電力変換回路の小型化を阻む問題点について述べる。</p> <p>第2章では、ガリウム化合物パワー半導体の物性について述べる。また、その応用であるGaN HEMTの構造や物性、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDの構造について述べる。</p> <p>第3章では、GaN HEMTを用いたE級アンプに適用される磁気成分の評価について述べる。本論文では2ポート回路モデルとベクトルネットワークアナライザを用いた磁気特性の評価方法を開発し、2ポート回路モデルに基づいてインダクタの等価回路モデルを提案した。このモデルは回路シミュレーションとE級アンプの実験による検証を行った。</p> <p>第4章では、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDの過渡熱特性を評価について述べる。静的特性によるGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキー接合の品質評価手法と、その結果に基づいたGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SBDの過渡熱特性の評価方法を示した。さらに、SBDの基板層を研磨することにより過渡熱抵抗を低減する方法について検討した。</p> <p>第5章では、シグモイド関数を用いてGaN HEMTの寄生容量の電圧依存性をモデル化した。本章ではシグモイド関数モデルを用いたE級アンプの回路解析と、ソフトスイッチング条件について述べる。導出したソフトスイッチング条件は、回路シミュレーションと実回路での実験により検証を行った。</p> <p>第6章では、本論文の結論を述べている。また、本章では、本研究の産業界への影響と今後の展望について述べる。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (關 翔太)		氏名	
論文審査担当者	主査	(職) 教授	舟木 剛
	副査	教授	高井 重昌
	副査	教授	牛尾 知雄
	副査	教授	北條 昌秀(徳島大学)

### 論文審査の結果の要旨

本論文ではワイドバンドギャップ半導体であるガリウム化合物パワー半導体デバイスを用いた電力変換回路の小型化に向けた回路構成要素の電磁気特性の評価と設計に関する研究を行っている。

第1章では本研究の背景と目的として、ガリウム化合物パワー半導体を用いた電力変換回路の現状と、小型化を阻む技術的な問題点について述べている。

第2章では、半導体物性からワイドバンドギャップパワー半導体の優位性について述べている。ガリウム化合物半導体材料としてGaNとGa203を対象とし、GaN HEMTとGa203 SBDの基本構造を示し、ガリウム化合物パワー半導体デバイスの物性を活かすためのデバイス技術について述べている。

第3章では、GaN HEMTを用いたE級アンプに適用される磁気部品の評価を行っている。2ポート回路モデルとベクトルネットワークアナライザを用いた磁気特性の評価方法を開発している。2ポート等価回路モデルの等価変換によって、Zパラメータから磁気部品の等価回路パラメータを抽出する手法を提案し、2種類の鉄粉系磁性材料を用いたトロイダルコアの磁気特性を評価している。また、2ポート回路モデルに基づいてインダクタの等価回路モデルを作成し、インダクタの等価回路モデルはSPICEによる回路シミュレーションに適用した結果は実回路による実験とよく一致し、等価回路モデルの実用性を示している。

第4章では、Ga203 SBDの過渡熱特性について述べている。Ga203は熱伝導率が低く、放熱性の向上が課題である。本論文ではGa203の順方向通流特性の温度依存性から理想係数などの抽出を行い、SBDのGa203 SBDの過渡熱特性を評価している。さらに、過渡熱抵抗低減のため、SBD基板層の薄化によって過渡熱抵抗を低減可能であることを示している。

第5章では、GaN HEMTの出力容量のモデル化を行っている。GaN HEMTは横型デバイスであり、縦型MOSFETのモデルを適用できないため、シグモイド関数を用いてGaN HEMTの寄生容量の電圧依存性をモデル化している。本章ではシグモイド関数を適用したモデル用いたE級アンプの回路解析を行い、ソフトスイッチング条件と回路パラメータの導出方法を示している。導出したソフトスイッチング条件は、SPICEによる回路シミュレーションと実回路での実験により検証を行っている。シミュレーション及び作製したE級アンプはソフトスイッチング条件を満たしており、回路解析の計算結果とよく一致することを示している。

第6章では、本論文をまとめ、本研究の産業界への影響と今後の展望について論じている。本論文はガリウム化合物パワー半導体デバイスを適用した電力変換回路の小型化のための要素技術の研究であり、10MHz以上の電力変換回路とその小型化に必要な磁気部品の低損失化とその損失評価技術、および半導体の熱特性と電気特性の評価技術をまとめたものである。本研究で示したモデルを適用することによって、回路シミュレーションによるフロントローディングを促進する事が期待される。また、開発したモデル化手法や評価手法はE級アンプ以外の電力変換回路に対しても応用可能であり、応用先の拡大が期待される。

以上のように本論文はガリウム化合物半導体デバイスを用いた電力変換回路の小型化に貢献し、今後の電力変換技術への応用可能とする技術を開発している。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。