

論文の内容の要旨

論文題目	熱と電気の連成シミュレーションによるGaN HEMT高周波パワーアンプの高性能化に関する研究
学 位 申 請 者	日 浦 滋

近年、高速スイッチング電源や無線通信用送信機等の高周波デバイスとしてGaN（窒化ガリウム：Gallium Nitride）HEMT（高電子移動度トランジスタ：High Electron Mobility Transistor）が多用されている。GaN HEMTを用いた高周波パワーアンプでは、自己発熱のためにデバイスおよびパッケージ内での過渡的な温度変動が生じる。本論文では、温度変動が電気的特性に与える影響を明らかにするため、実際の信号形態に応じた熱と電気の連成シミュレーションによる解析手法を提案する。高速スイッチング電源においては、発熱が極めて短い時間に集中して発生する過渡熱応答に連成解析を適用し、動作周波数の上限や温度変動を求めて、高いスイッチング周波数の動作解析に有効であることを示した。無線通信用送信機においては、無線変調波のエンベロープに応じて発熱量が変化することによって発生する過渡熱応答が温度変化のヒステリシスを引き起こし、線形性能を劣化させることを示した。さらに実測により解析結果の検証を行った。各章の内容は以下の通りである。

第1章は、研究の背景を基にして熱電気連成シミュレーションの実現のための課題を設定し、本論文で述べる課題解決の方法について説明している。無線通信システムにおいては送信側の高周波パワーアンプの低歪化が必要とされている。そのため、GaN HEMTパワーアンプの実使用状態での動作をシミュレーションで明らかにすることを目的として、「MHzオーダーの高速動作における熱と電気の連成シミュレーション環境を構築すること」を課題とした。熱と電気を連成するシミュレーションの基本的な流れはこれまでの研究を踏まえ、熱変動の特性を等価熱抵抗と熱容量の並列多段熱等価回路として過渡応答を再現して回路シミュレータに組み込むことにより、過渡熱応答を精密に反映した電気特性をシミュレータ上で解析する方法とした。本論文においては、様々な動作の高周波パワーアンプ全般に適用できる熱電気連成シミュレーション環境を構築するために、電気モデルの高周波特性精度を向上すること、高周波パワーアンプへ与える高周波信号や直流電圧の時間波形を実使用状態に合わせてシミュレータ回路を盛り込むこと、シミュレーションで得られたデータを数値処理して高

周波特性に換算することを行った。

第2章では、高周波電源の高速スイッチング部に用いたスイッチモードRFパワーアンプに熱電気連成シミュレーションを適用した。高周波電源では、大電力動作により大きな自己発熱が生じ、スイッチング動作に応じて温度が変動する。スイッチング周波数が高くなると、自己発熱の要因として、オンとオフが切り替わる短い時間に発生するスイッチング損失の占める割合が増すため、高周波領域でのGaN HEMT動作を精度よく表現することが重要である。本章では最初に、熱電気連成シミュレーションで使用する熱モデルと電気モデルを説明した。GaN HEMTの電気モデルとしてAngelovモデルを採用し、パラメータの温度依存性と電圧依存性を設定することにより、様々な動作状態での精度向上を図った。その後、GaN HEMTを直列接続したハーフブリッジ電圧型のスイッチモードRFパワーアンプの熱電気連成シミュレーションを行い、パワーアンプが高い電力効率を示すスイッチング周波数として100MHzを得た。さらに、ハーフブリッジPWMインバータ動作に対して解析を行った。出力電圧がMHzオーダーで変化する場合においては、理論解析では温度変動を十分に表現できず、本手法が有効であることが確認された。

第3章では、無線通信用RFパワーアンプに熱電気連成シミュレーションを適用した。電力効率を向上することが可能なエンベロップトラッキング技術では、入力電力のエンベロップに比例した直流印加電圧の変化に温度が追従することが知られている。まず、温度変化を理論計算で算出し、エンベロップの変化に応じて高周波パワーアンプの利得変動と位相変動が発生すること、またその変動はエンベロップの上昇時と下降時でヒステリシスが発生することを予想した。その後、実施した熱電気連成シミュレーションにおいては、シミュレーション結果から利得と位相を算出し、過渡熱応答に起因するヒステリシス現象の詳細な解析に成功した。

第4章では、GaN HEMTを用いた高周波パワーアンプへの入力電力を振幅変調して高周波特性を測定した。実測結果に含まれる誤差要因を分析して必要なデータを抽出した。実測とシミュレーション結果から、第2章で定めた電気モデルの精度を検証し、第3章で予測した過渡熱応答による位相変化のヒステリシス現象を確認した。これにより、本論文で構築した熱電気連成シミュレーション手法がMHzオーダーの高速動作を解析できることを実験的に示した。

第5章では、各章の結果をまとめ、今後の課題として本手法の応用への展開について述べた。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 日浦 滋

審査委員主査 石川 亮

委員 山尾 泰

委員 肖 鳳超

委員 和田 光司

委員 萱野 良樹

委員

委員

本論文は、DC/DC変換・AC/DC変換用電源装置および高周波無線通信用電力増幅器などに利用されるGaN HEMT（窒化ガリウム 高電子移動度トランジスタ）高出力スイッチング・増幅素子において、損失により生じる発熱現象で電気的特性が過渡的に変動し、その最適化設計の精度を低下させているという課題に対し、発熱現象を組み込んだ熱電気連成シミュレーションを利用する具体的な設計・最適化設計手法を提供し、各装置の高性能化に寄与することを目的に研究を行い、その結果をまとめたものであり、全五章からなる。

第一章は、上記の研究の背景を基にして熱電気連成シミュレーションの実現のための課題を設定し、本論文で述べる課題解決の方法について説明している。無線通信システムにおいては送信側の高周波パワーアンプの低歪化が必要とされている。そのため、GaN HEMTパワーアンプの実使用状態での動作をシミュレーションで明らかにすることを目的として、「MHzオーダーの高速動作における熱と電気の連成シミュレーション環境を構築すること」を課題としている。熱と電気を連成するシミュレーションの基本的な流れはこれまでの研究を踏まえ、熱変動の特性を等価熱抵抗と熱容量の並列多段熱等価回路として過渡応答を再現して回路シミュレータに組み込むことにより、過渡熱応答を精密に反映した電気特性をシミュレータ上で解析する方法としている。本論文においては、様々な動作の高周波パワーアンプ全般に適用できる熱電気連成シミュレーション環境を構築するために、電気モデルの高周波特性精度を向上すること、高周波パワーアンプへ与える高周波信号や直流電圧の時間波形を実使用状態に合わせてシミュレータ回路を盛り込むこと、シミュレーションで得られたデータを数値処理して高周波特性に換算することを行っている。

第二章では、高周波電源の高速スイッチング部に用いたスイッチモードRFパワーアンプに熱電気連成シミュレーションを適用している。高周波電源では、大電

力動作により大きな自己発熱が生じ、スイッチング動作に応じて温度が変動する。スイッチング周波数が高くなると、自己発熱の要因として、オンとオフが切り替わる短い時間に発生するスイッチング損失の占める割合が増すため、高周波領域でのGaN HEMT動作を精度よく表現することが重要である。本章では最初に、熱電気連成シミュレーションで使用する熱モデルと電気モデルを説明している。GaN HEMTの電気モデルとしてAngelovモデルを採用し、パラメータの温度依存性と電圧依存性を設定することにより、様々な動作状態での精度向上を図っている。その後、GaN HEMTを直列接続したハーフブリッジ電圧型のスイッチモードRFパワーアンプの熱電気連成シミュレーションを行い、パワーアンプが高い電力効率を示すスイッチング周波数として100MHzを得ている。さらに、ハーフブリッジPWMインバータ動作に対して解析を行っている。出力電圧がMHzオーダーで変化する場合においては、理論解析では温度変動を十分に表現できず、本手法が有効であることが確認されている。

第三章では、無線通信用RFパワーアンプに熱電気連成シミュレーションを適用している。電力効率を向上することが可能なエンベロープトラッキング技術では、入力電力のエンベロープに比例した直流印加電圧の変化に温度が追随することが知られている。まず、温度変化を理論計算で算出し、エンベロープの変化に応じて高周波パワーアンプの利得変動と位相変動が発生すること、またその変動はエンベロープの上昇時と下降時でヒステリシスが発生することを予想している。その後実施した熱電気連成シミュレーションにおいては、シミュレーション結果から利得と位相を算出し、過渡熱応答に起因するヒステリシス現象の詳細な解析に成功している。

第四章では、GaN HEMTを用いた高周波パワーアンプへの入力電力を振幅変調して高周波特性を測定している。実測結果に含まれる誤差要因を分析して必要なデータを抽出している。実測とシミュレーション結果から、第二章で定めた電気モデルの精度を検証し、第三章で予測した過渡熱応答による位相変化のヒステリシス現象を確認している。これにより、本論文で構築した熱電気連成シミュレーション手法がMHzオーダーの高速動作を解析できることを実験的に示している。

第五章では、各章の結果をまとめ、今後の課題として本手法の応用への展開について述べている。

本論文で得られた成果は、高出力スイッチング・増幅素子を用いる様々な装置の高精度設計に適用することが可能であり、それらの高性能化に大きく寄与するものである。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。