

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	GaN-HEMTにおけるモデリング及び高周波増幅器に関する研究
Title(English)	Research on Modeling and High-Frequency Amplifiers in GaN-HEMT
著者(和文)	山口 裕太郎
Author(English)	Yutaro Yamaguchi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第12号, 授与年月日:2024年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:鈴木 左文,宮本 恭幸,岡田 健一,角嶋 邦之,白根 篤史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第12号, Conferred date:2024/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	山口裕太郎		審査員主査： Chief Examiner	鈴木左文教授	

要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

安全安心な社会の実現に向けてレーダはキーテクノロジーの一つであり、レーダシステムではマイクロ波の送受信、探知距離拡大、想定外の過入力に対する耐性等が求められる。それらの要求に応えるためにレーダ用モジュールにおける高出力増幅器 (HPA) 及び低雑音増幅器 (LNA) の半導体材料として高周波動作可能で高出力・高耐電力な特性を有する Gallium Nitride (GaN) が有望である。GaN 増幅器は GaN-HEMT (High Electron Mobility Transistor) と回路で構成されており、GaN 増幅器の開発はトランジスタ開発、モデル開発、回路開発の流れで進められる。本論文はモデル開発と回路開発を研究対象としており、トラップの影響のモデリング、基板材料の影響のモデリング、トラップによる過渡的出力電力低下の補償、出力電力選択可能な増幅器の実現の4つの技術課題に関する研究を行った。

本論文ではまずトラップの非線形容量への影響を考慮した GaN-HEMT 大信号トランジスタモデルを提案した。このモデル中のトラップモデルのモデルパラメータはドレイン電流及びSパラメータ過渡応答測定から抽出した。トラップの非線形容量への影響を考慮することで提案モデルは 28 GHz において AM-AM 特性だけでなく AM-PM 特性についても実測とよく一致し、本モデルの有効性を確認した。

次にトラップの影響を考慮したトランジスタモデルを GaN-on-Si 向けに拡張して Si 基板中の容量結合電流の温度依存性を半物理的に考慮した大信号トランジスタモデルを提案した。大信号特性における容量結合電流の影響をモデル化するために、ドレイン端子とソース端子の間に C-R-C 回路を追加した。この C-R-C 回路内の抵抗と容量は電子およびホール濃度、移動度、電極幅などの物理的パラメータを用いて表現した。モデルと実測値を比較した結果、高温で劣化するパワースイープ特性の温度特性に関して、提案モデルは測定結果を高精度に再現した。さらに、大信号特性のドレイン電極幅依存性についても提案モデルは測定結果と概ね一致した。提案モデルは温度特性を含めたトランジスタ構造や増幅器の設計に有用なモデルであることを確認した。

さらに GaN LNA 向けにトラップによる過入力直後の過渡的出力電力低下(リカバリ特性)を補償する回路 (TECC) を提案した。TECC は LNA 内の補償対象となるトランジスタと同じトラップを有するトランジスタを有するゲートバイアス回路であり、トラップの特性を利用して過入力直後のゲートバイアスを適応的に変化させることができる。TECC の動作原理について解析式を用いて説明し、トラップの影響を考慮したトランジスタモデルを用いて TECC を設計した。設計した TECC のシミュレーションの結果、TECC が GaN-HEMT のリカバリ特性を補償することを確認した。さらに、TECC を装荷した GaN-HEMT を製作し、そのリカバリ特性を測定した。測定の結果、TECC 適用によって環境温度 T_{amb} が 300 K のとき過渡的出力電力変化量 ΔP_{out} が 2.4 dB から 0.2 dB に低減し、 T_{amb} が 350 K のとき ΔP_{out} が 1.9 dB から 0.2 dB に低減することを確認した。TECC がトラップの影響によるリカバリ特性を室温だけでなく高温でも補償できることを確認した。提案した TECC は、GaAs LNA の GaN LNA への置き換えを可能にし、レーダ受信機の性能向上に貢献できるものと考えられる。

最後に効率的な多品種展開に向けてセミカスタム HPA を提案した。セミカスタム HPA は出力電力の仕様変更に応じてゲート幅を変更したとしても、新規で回路基板を設計・製造することなく、ワイヤ等の調整のみで所望の出力電力を得ることができる HPA である。セミカスタム HPA ではゲート幅変更によるミスマッチによるロスを補償するために、ワイヤチューニングによって簡単に調整可能な出力整合回路を適用した。回路の調整パラメータを決定するための設計式を導出し、この設計式とトラップの影響を考慮したトランジスタモデルを用いて S 帯セミカスタム HPA を設計した。試作及び評価した結果、3.1GHz においてゲート幅変更前の標準 HPA において出力電力 240 W 及び PAE 54.4%を確認し、ゲート幅変更後のセミカスタム HPA において出力電力 158 W 及び PAE 52.0 %を確認した。いずれもトップレベルの性能でありセミカスタム HPA の有効性を確認した。

本研究の成果は、GaN の開発効率向上および実用化の一助となり得るものであり、ひいては安全安心な社会の実現に向けた一端を担うことが期待される。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	山口裕太郎		審査員主査： Chief Examiner	鈴木左文 教授	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

Gallium Nitride (GaN) is a key semiconductor for high-frequency amplifiers because of its high-frequency operation capabilities, high output power, and excellent power handling characteristics. This thesis focuses on the modeling and high-frequency amplifier of GaN-High Electron Mobility Transistors (HEMTs).

Firstly, a large-signal GaN-HEMT model was developed, incorporating the effects of traps on nonlinear capacitance. The model parameters were extracted from transient S-parameter measurements, as well as transient drain current measurements. By considering the trapping effects on nonlinear capacitance, the proposed model achieved good agreement with measured data at 28 GHz, accurately reproducing both AM-AM and AM-PM characteristics.

Secondly, the model was extended to GaN-HEMTs on silicon (Si) substrates, incorporating the temperature-dependent behavior of capacitive coupling currents within the Si substrate. Comparison between measurements and the proposed model showed good agreement with the measured large-signal characteristics at high temperatures, as well as with the drain electrode width dependence of large-signal characteristics.

Thirdly, a trapping effects compensation circuit (TECC) for GaN low-noise amplifiers (LNAs) was proposed to compensate for recovery characteristics after input overdrive caused by traps. The TECC is a gate bias circuit that includes a transistor with the same type of traps as the target transistor in the LNA, allowing for adaptive adjustment of the gate bias immediately after input overdrive by utilizing the properties of the traps. Measurement results showed that the TECC reduced the transient change in output power from 2.4 dB to 0.2 dB at 300 K, and from 1.9 dB to 0.2 dB at 350 K, demonstrating effective compensation for trap-induced recovery characteristics across different temperatures.

Finally, a semi-custom GaN high-power amplifier (HPA) was proposed, which allows output power selection through wire tuning without the need for circuit layout redesign. The semi-custom HPA achieved 158 W output power and 52.0% power-added efficiency (PAE) through wire tuning after gate width modifications, demonstrating its performance.

The results of this research contribute to improving the development efficiency and practical application of GaN-HEMTs.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).