

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420323

研究課題名(和文) 高効率増幅・整流デバイス開発のための高調波インピーダンス自動最適化システム開発

研究課題名(英文) Development of multi-harmonic impedance optimization system for ultra-high-efficiency microwave power amplifier and rectifier

研究代表者

石川 亮 (Ishikawa, Ryo)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：30333892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年の高度無線通信システムあるいは無線電力伝送システムに使用されるマイクロ波電力増幅器(DC-RF変換)および整流器(RF-DC変換)の実用的な超高効率設計技術実現のため、提案するトランジスタ素子真性部最適負荷インピーダンス導出システムの高性能化・高出力デバイス対応化を実施し、また、トランジスタ寄生素子の非線形特性を考慮した回路設計手順を考案し、マイクロ波高効率増幅器・整流器の設計手法を確立した。実証結果として、GaAs pHEMTおよび高出力GaN HEMT素子を用いて種々の帯域のマイクロ波増幅器・整流器を試作・評価し、各々70～80%程度の高い効率が達成された。

研究成果の概要(英文)：A practical design method of ultra-high-efficiency microwave power amplifier (DC-to-RF converter) and rectifier (RF-to-DC converter) has been established for recent wireless communication or wireless power transfer systems. First, an optimal impedance (terminal condition) estimation system for the intrinsic part of a transistor was reconstructed to improve accuracy and to apply to high-power devices. Then, a circuit design procedure considering nonlinear parasitic elements in the transistor was contrived to estimate an optimal impedance condition for a load circuit. As verifications, GaAs pHEMT and GaN HEMT microwave power amplifiers and rectifiers were fabricated based on the proposed design method at several operation frequencies, which exhibited high-efficiency performances of from 70 to 80%.

研究分野：マイクロ波工学

キーワード：高周波 マイクロ波 無線通信 無線電力電送 電力増幅器 整流器 高効率

1. 研究開発当初の背景

近年のエネルギー問題において、災害時のエネルギー供給、宇宙空間等の有線でのエネルギー伝送が困難な状況、等々に対し、マイクロ波等を用いた無線電力伝送が注目されている。このシステムにおいて、よりエネルギーを効率よく伝送させるためには、DC-RF（直流-高周波）およびRF-DC変換効率の向上が必要不可欠である。従って、DC-RF変換として用いられるトランジスタ電力増幅器、およびRF-DC変換として用いられるトランジスタ整流器に対し、高精度かつより実用的な高効率化設計技術が求められている。しかしながら、従来の設計手法では、シミュレーション設計で用いるトランジスタモデルの精度限界、あるいは実験的最適化において非常に高価（数千万円）で複雑な実験設備が必要であり、それでも設計精度が不十分である、等々の限界があった。

2. 研究の目的

上記課題に対し、トランジスタの真性部（非線形電流源として表現可能な部分）がほぼ周波数に依存しないこと、および、高周波用トランジスタの寄生容量値が小さいため低い周波数で無視できることに着目し、低い周波数で真性部の最適負荷インピーダンス（高調波込み）を実験的に得て、増幅器設計周波数で寄生容量等を考慮して、接続する負荷回路に求められるインピーダンス特性を導出する、という手法を新たに考案している。また、低周波で安価（数百万円）・簡易に構成でき、高次高調波も考慮可能な真性部最適負荷インピーダンス計測システムも考案し、試験的にその動作を確認している。これらを基にした実用システム確立および設計理論の構築が本研究の目的である。

3. 研究の方法

上記目的の実現に向けて、真性部最適負荷インピーダンス計測システムの精度向上化および高出力化、そして、設計精度に係わる設計手順の改善、等々、装置・設計手法に関する課題を実行した。その過程で、実際に種々の高効率増幅器・整流器の設計・試作を行い、その実用性・有用性を確認した。

4. 研究の成果

(1) 2.45 GHz帯および5.8 GHz帯において高効率GaAs pHEMT増幅器ならびに整流器を提案設計手法に基づいて設計・試作・評価した。その結果、各々増幅器は、最大ドレイン効率78%@2.45 GHz、71%@5.8 GHzが得られ、また、各々整流器は、最大RF-DC変換効率77%@2.45 GHz、67%@5.8 GHzが得られた。試作した各増幅器ならびに整流器、そし

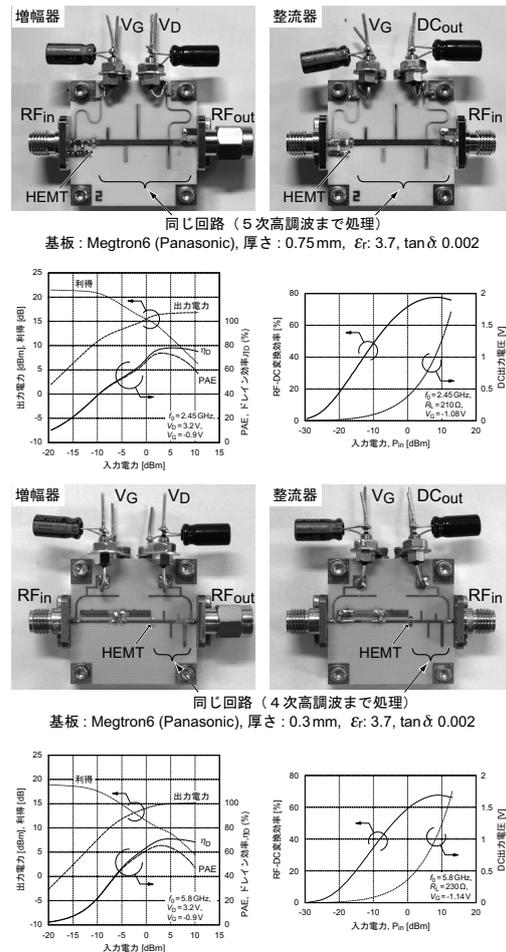


図1 2.45 GHz帯 GaAs pHEMT増幅器・整流器の写真と各効率特性（上）および5.8 GHz帯 GaAs pHEMT増幅器・整流器の写真と各効率特性（下）

て、それらの効率特性を図1に示す。以上の結果より、異なる周波数に対しても本設計手法が有効であり、提案設計手法の有用性が実証された。

(2) 真性部最適負荷インピーダンス計測システムの精度向上化を図るために、先ず12 bit高分解能のデジタルオシロスコープを新たに導入した。また、電圧計測の際に用いるチップ抵抗素子も精度1%以下の高精度のものを使用した。また、高出力素子（GaN HEMT）対応のため、100 W高出力前置増幅器を組み込んだ。図2に計測システムを示す。

(3) (2)で構築した高出力対応システムを用いて5.8 GHz帯 GaN HEMT増幅器の設計・試作・評価を行った。その際、先ずトランジスタ寄生成分換算に関しては、(1)と同様に線形近似とした簡易的な方法で行った。その結果、最大ドレイン効率80%@5.53 GHzが得られた。図3に試作したGaN HEMT増幅器およびその特性を示す。しかしながら、バイアス電圧等が設計値からずれており、電圧振幅が大きいことから、GaN HEMT素子内部の寄

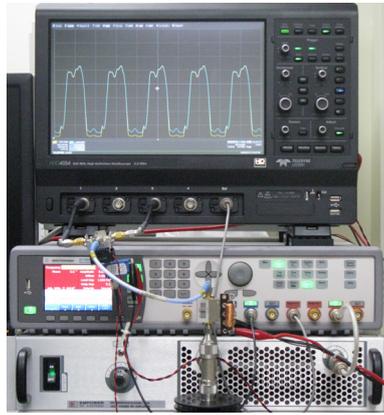
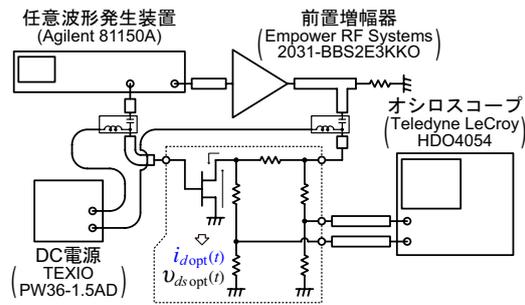
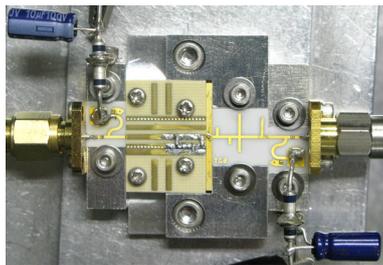


図2 構築した高出力素子対応トランジスタ真性部最適負荷インピーダンス計測システム



入力側：MEGTRON6 R-5775(N)、厚さ：0.4 mm
出力側：アルミナ、厚さ：0.5 mm

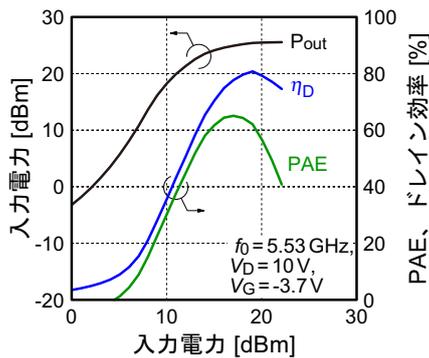


図3 試作した 5.8 GHz 帯 GaN HEMT 増幅器の写真 (上) および入出力・効率特性 (下)

生容量の非線形特性が設計精度に影響を与えている可能性があることも類推された。

(4) トランジスタ内の寄生容量の非線形性を考慮した新しい設計手法を考案した。図4にその提案設計手法の概念図を示す。従来方法では、真性部に対する最適終端インピーダンス

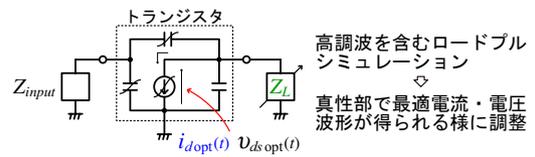


図4 トランジスタ内寄生容量非線形性が考慮可能な負荷回路最適インピーダンス導出手法の概念図

と線形近似した寄生成分から、線形理論回路計算により負荷回路最適インピーダンスを導出していた。その場合、電圧の振幅条件がないので、非線形特性の表現ができない。そこで、真性部に対する最適条件を電圧・電流の比を取ったインピーダンスの形ではなく、電圧・電流のままに計算に用いることにした。そして、図4に示される様にシミュレータの最適化機能を用いて最適電圧・電流波形が再現される負荷回路の負荷条件を導出している。

この提案手法に基づいて新たに 2.1 GHz 帯 GaN HEMT 増幅器の設計・試作・評価を行った。その結果、最大ドレイン効率 77% @ 2.13 GHz が得られた。図5に試作した GaN HEMT 増幅器およびその特性を示す。この試作の際、寄生容量を線形近似して設計した GaN HEMT 増幅器も別途試作しており、見積もられた3次高調波の負荷回路最適インピーダンスが異なることが確認されており、また、効率も 5% 程低下することが確認されている。以上から、本手法の有用性が実証された。

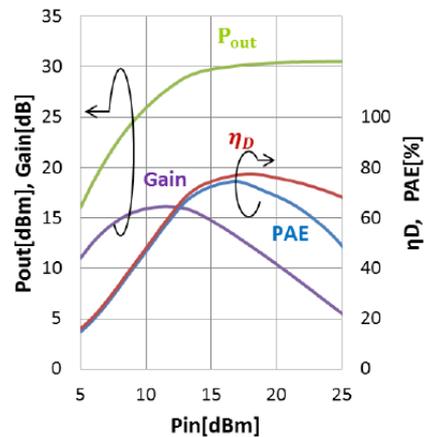
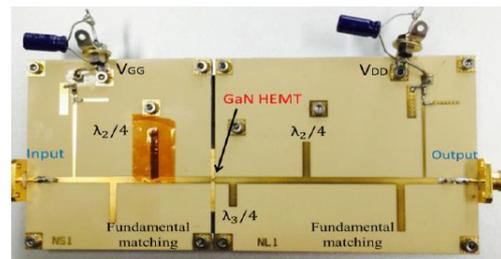


図5 トランジスタ内寄生容量の非線形性を考慮して設計・試作した 2.1 GHz 帯 GaN HEMT 増幅器の写真 (上) および入出力・効率特性 (下)

(5) 負荷回路の高調波処理回路設計に関して設計の選択肢を増やす新しい回路構成に関する検討を行った。図6に考案した回路構成を採用して試作した4.5 GHz帯 GaN HEMT 増幅器およびその特性を示す。従来は、トランジスタと負荷を結ぶ主線路上に各高調波を短絡するスタブを適宜配置して高調波処理を行っていたが、次数が増えると主線路が長くなる、目的リアクタンス値に依って合わせ難い値が存在する、等々の設計困難性が生じていた。そこで、図6に示す様に、分岐スタブおよびステップインピーダンス主線路を導入し、主線路に対するスタブ接続数の削減、および、異なる方針でのリアクタンス値調整が可能となり、設計の幅を広げている。

試作した GaN HEMT 増幅器は、最大ドレイン効率 73%@4.47 GHz を示し、別途試作した従来回路構成での増幅器とほぼ同等の性能を示すことが確認されており、本回路構成の有用性が実証された。

(6) (4)において寄生容量の非線形性の考慮が可能となったが、専用回路シミュレータの最適化機能を使用する必要がある、信号源側のインピーダンスの最適化に曖昧さがある、などの課題が残されていた。そこで、それを解決するために、(2)の低周波評価システムにおいて、ゲート側の電圧波形も計測し、さらに、時間領域回路計算を行い、両課題の解決を試みている。時間領域回路計算は、キルヒホッフ則に従って、電圧・電流で回路計算を行うため、非線形性も考慮可能である。非線

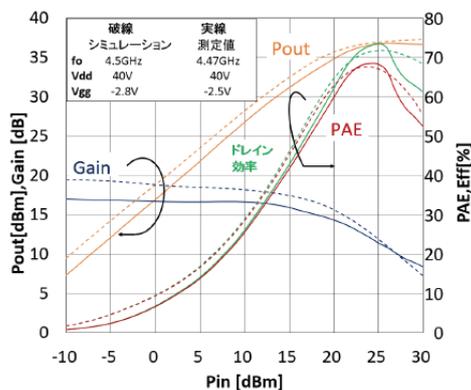
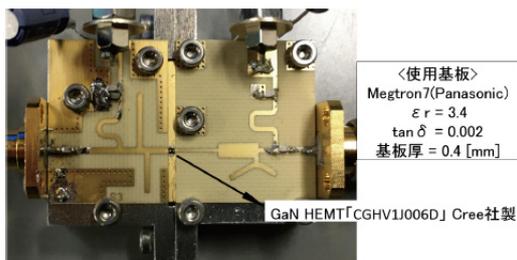


図6 新たに提案する高調波処理回路構成で設計・試作した4.5 GHz帯 GaN HEMT 増幅器の写真(上)および入出力・効率特性(下)

形容量に関しては、容量非線形特性の測定結果を関数近似化することで微分操作ができ、非線形容量での電圧・電流の関係の表現が可能となる。例えば、そこにひずみ波電圧が印可された場合に生じるひずみ波電流は、時間波形がダイレクトに計算され、フーリエ変換により各周波数成分に分解してひずみ波交流として関数の形で再現することができる。

実際にこの手法を GaN HEMT 素子に適用して最適入力回路インピーダンスおよび最適負荷回路インピーダンスを導出しているが、増幅器の試作は途中であり、継続課題となっている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

(条件付採録中1件、招待論文査読中1件)

[学会発表] (計12件)

①高木裕貴、石川亮、本城和彦、2高調波同時短絡スタブによるリアクティブ終端負荷回路を用いたGaN HEMT高効率電力増幅器、2016年電子情報通信学会総合大会、九州大学・伊都キャンパス(福岡県・福岡市)、C-2-7, 2016年3月.

②Yao Tao, Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo, Optimum load impedance estimation for high-efficiency microwave power amplifier based on low-frequency active multi-harmonic load-pull measurement, Proc. of 2015 Asia Pacific Microwave Conference, 査読有, TU1G-4, Nanjing, China, Dec. 2015.

DOI: 10.1109/APMC.2015.7411814

③陶堯、石川亮、本城和彦、低周波アクティブ高調波ロード・プルを利用した高効率マイクロ波電力増幅器の最適負荷インピーダンス推定の高精度化、電子情報通信学会マイクロ波研究会(東京理科大学・葛飾キャンパス(東京都・葛飾区))信学技報、vol. 115, no. 372, MW2015-136, pp. 19-23, 2015年12月.

④石川亮、本城和彦、マイクロ波無線電力伝送用増幅・整流切替モジュールの試作・評価、電子情報通信学会マイクロ波研究会(琉球大学(沖縄県・西原町))信学技報、vol. 115, no. 314, MW2015-129, pp. 53-58, 2015年11月.

⑤Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo, High-efficiency DC-to-RF/RF-to-DC interconversion switching module at C-Band, Proc. of 45th European Microwave Conference, 査読有, pp. 295-298 (EuMC17-02), Paris, France, Sep. 2015.

DOI: 10.1109/EuMC.2015.7345758

⑥陶堯、石川亮、本城和彦、寄生非線型容量を考慮した低周波トランジスタ真性部特性抽出による高効率マイクロ波増幅器設計、2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会、東北大学・川内キャンパス(宮城県・仙台市)、C-2-14, 2015年9月.

⑦石川亮、本城和彦、マイクロ波無線電力伝送用増幅・整流器のパルス幅変調電力制御に関する実験的検証、電子情報通信学会マイクロ波研究会(機械振興会館(東京都・港区))信学技報、vol. 115, no. 4, MW2015-6, pp. 27-32, 2015年4月.

⑧Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo, Efficient supply power control by PWM technique for microwave wireless power transfer systems, Proc. of 2014 Asia Pacific Microwave Conference, 査読有, pp. 1101-1103 (FR03C-3), Sendai, Japan, Nov. 2014.

http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7067677&tag=1

⑨石川亮、本城和彦、GaN素子対応MHz帯高調波アクティブロードプルによる高効率増幅器設計、2014年電子情報通信学会ソサイエティ大会、徳島大学(徳島県・徳島市)、C-2-15, 2014年9月.

⑩Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo, Reversible high efficiency amplifier/rectifier circuit for wireless power transmission system, Proc. of 2013 Asia Pacific Microwave Conference, 査読有, pp. 74-76 (W1F-1), Seoul, Korea, Nov. 2013.
DOI: 0.1109/APMC.2013.6695195

⑪石川亮、本城和彦、マイクロ波無線電力伝送用高効率トランジスタRF-DC相互変換回路、電子情報通信学会マイクロ波研究会(東北大学・青葉山キャンパス(宮城県・仙台市))信学技報、vol. 113, no. 260, MW2013-120, pp. 119-124, 2013年10月.

⑫Ryo Ishikawa, and Kazuhiko Honjo, Microwave power transfer evaluation at 2.45 GHz using a high-efficiency GaAs HEMT amplifier and rectifier, Proc. of 2013 European Microwave Conference, 査読有, pp. 916-919 (EuMC49-4), Nuremberg, Germany, Oct. 2013.

http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6686807

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: 増幅・整流一体型装置および通信システム

発明者: 石川亮、本城和彦、高山洋一郎

権利者: 国立大学法人電気通信大学

種類: 特許

番号: 特許願 2013-126169 号

特許開 2015-002621 号

出願年月日: 平成 25 年 6 月 14 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 亮 (ISHIKAWA, Ryo)

電気通信大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 30333892