

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04594

研究課題名(和文) 災害時フレキシブル無線電力伝送用受電デバイスの研究開発

研究課題名(英文) Microwave rectifiers for flexible wireless power transfer system in emergency

研究代表者

石川 亮 (Ishikawa, Ryo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：30333892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロ波電力を直流電力に変換するために用いられる整流器の共通課題である電力変換効率の入力電力変動による大幅な効率低下を解決すべく、電力供給量に応じて能動的に変換効率の最適化を行う新たな構成を有する高効率整流器デバイス開発を実施した。その成果の一つとして、提案手法に基づき設計・試作した整流器において、2.27 GHzにおいて、入力電力レベルが0 dBmから25 dBmの範囲(300倍の違い)で高周波-直流電力変換効率60%以上、9 dBmから24 dBmの範囲で70%以上という良好な広ダイナミックレンジ高効率性能が達成された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化による自然災害の規模拡大に伴い、電力供給の寸断が大きな問題となっており、臨時の電力供給手段の確保が重要な課題であり、これを解決することに社会的意義がある。この解決手段の一つがマイクロ波無線電力伝送であり、それを成すマイクロ波電力を直流電力に変換する高効率整流器である。本課題では、整流器の共通課題である電力変換効率の入力電力変動による大幅な低下を解決すべく、提案高効率トランジスタ整流器構成に、電力供給量に応じて能動的に変換効率の最適化を行う新たな構成を付加し、いかなる場所に設置されたとしても最大限の変換効率を維持して安定した電力供給を実現するデバイスを開発した点に学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this research, a high-efficiency rectifier device with a new structure that optimizes efficiency has been developed. In order to solve the common problem of rectifiers used to convert microwave power to DC power, which is a significant decrease in power conversion efficiency due to input power fluctuations, the operation condition of the proposed rectifier device can be adaptively optimized according to the amount of power supply. As one of the results, a rectifier designed and fabricated based on the proposed method has a high-frequency-to-DC power conversion efficiency of more than 60% at an input power range of 0 dBm to 25 dBm (about 300 times) and of more than 70% at the input power range of 9 dBm to 24 dBm at 2.27 GHz, which was a good wide-dynamic-range high-efficiency performance.

研究分野：電気電子工学

キーワード：高周波 マイクロ波 無線電力伝送 整流器 広ダイナミックレンジ トランジスタ大信号モデル

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化が近々の脅威として危惧されている昨今、地球環境への悪影響が少ないクリーンなエネルギー源の研究開発が世界的に急務となっている。特に、地震、台風などの自然災害が多発する日本において、これまでのエネルギー政策を転換するために、より現実的な解となるエネルギー源の確保が非常に重要である。そのような背景を元に、マイクロ波無線電力伝送を用いた宇宙太陽光発電システムなどが京都大学等により提案されており、その実現に向けた様々な研究開発が進められている。一方で、無線電力伝送は有線電力網断線時の補助給電システムとしての応用も考えられており、自然災害などで有線での電力供給が寸断された際に非常に有益なものとなる。この無線電力伝送で最も重要なコンポーネントの一つがマイクロ波電力を直流電力に変換する高効率整流器である。そしてその大きな問題点として、効率最大点から入力電力値がズレにより効率が大幅に低下してしまう。このことにより受電位置の違いや送電電力変動により効率が低下することになる。

2. 研究の目的

本課題では、整流器の共通課題である電力変換効率の入力電力変動による大幅な効率低下を解決すべく、これまでに提案してきている高効率トランジスタ整流器構成に、電力供給量に応じて能動的に変換効率の最適化を行う新たな構成を付加し、いかなる場所に設置されたとしても最大限の変換効率を維持して安定した電力供給を実現するデバイスを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、過去の低電力高効率トランジスタ整流器開発において得られた特性において、直流ゲートバイアス電圧を制御することのみで高効率動作となる高周波入力電力レベルが調整できる点に着目し、以下の項目を実施した。

- (1) ゲートバイアス調整での効率シフト特性を有する整流器の高効率化
- (2) 能動ゲートバイアス制御用負の直流電圧を出力する整流器の開発
- (3) 上記2つを組み合わせた能動制御型高効率・広ダイナミックレンジ整流器の開発
- (4) 上記内容と並行して提案する非線形動作整流回路の設計モデルを確立

4. 研究成果

- (1) ゲートバイアス調整での効率シフト特性を有する整流器の高効率化

本課題以前に実施してきた極低電力設計高効率トランジスタ整流器の設計において、トランジスタ内の寄生容量と外付けのインダクタンスとの共振を利用して電圧振幅を上昇させ、さらに整合条件を整える、という回路構成を提案しているが、その際に、高周波入力電力の増加に伴いゲートバイアス電圧を低下させることでインピーダンス整合条件が維持され、高効率動作が広い入力電力範囲で維持される現象が発見されている。そこで、この設計方針に基づき、先ず、しきい値電圧がゼロボルト付近に調整された化合物半導体の GaAs HEMT 素子を用いてゲート側を2次高調波まで、そして、ドレイン側を3次高調波まで処理した高効率トランジスタ整流器を設計・試作した(図1)。試作した整流器は2.27 GHzにおいて、ゲート電圧を0 Vから-0.4 Vの範囲で調整することにより、0 dBm から 23 dBm までの広い入力電力範囲で高周波(RF)電力から直流(DC)電力への変換効率が60%以上という、高効率性能が得られることが確認された。

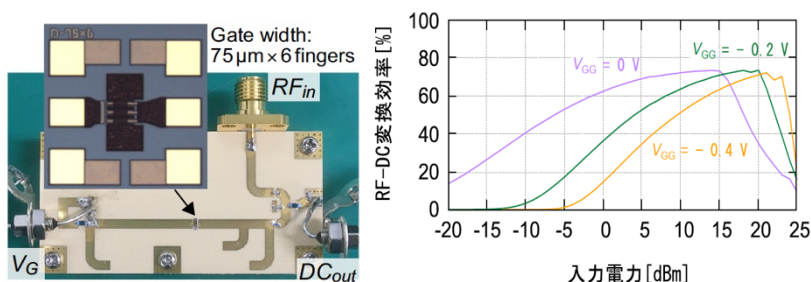


図1 試作した GaAs HEMT 高効率整流器および効率性能の測定結果

次に、高出力化を見込み、高耐圧 GaN HEMT 素子を用いて高効率トランジスタを設計・試作した(図2)。なお、その際に(4)で実施した設計モデルを使用して設計を行っており、ゲート側ドレイン側ともに2次高調波まで処理して高効率化を図っている。試作した整流器は2.35 GHzにおいて、ゲート電圧を-2.5 Vから-3.5 Vの範囲で調整することにより、7 dBm から 30 dBm までの広い入力電力範囲で RF-DC 変換効率が60%以上という、高効率性能が得られることが確認された。

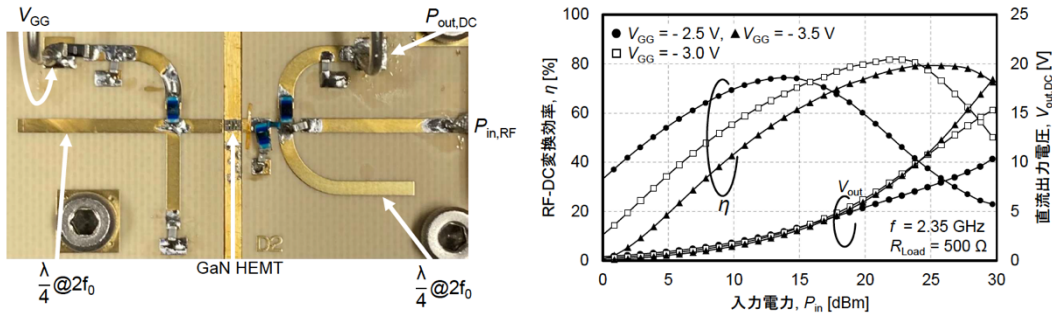


図2 試作した GaN HEMT 高効率整流器および効率性能の測定結果

(2) 能動ゲートバイアス制御用負の直流電圧を出力する整流器の開発

(1) で開発したゲートバイアス調整による最適 RF 入力レベル型の高効率トランジスタ整流器に対して、最適なゲートバイアスを生成する整流器を各々設計・試作した。先ず、図1の GaAs HEMT 整流器に対しては、同じ型でサイズの異なるゼロしきい値 GaAs HEMT 素子を用いて設計・試作を行った(図3)。試作した整流器は同様に2.27 GHzにおいて、-20 dBm から 5 dBm までの入力電力範囲に対して 0 V から -0.4 V 近くまでの負の DC 電圧を生成している。この結果より、高効率整流器に対して 16 dB 入力電力を下げたことにより、高効率整流器が高効率を保つための適切なゲートバイアス電圧をアダプティブに生成できることが確認された。

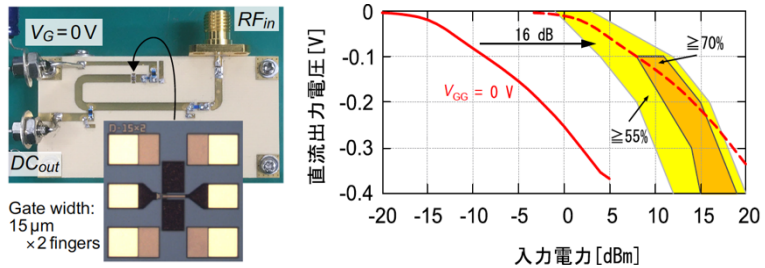


図3 高効率 GaAs HEMT 整流器用に試作したゲート制御電圧生成用 GaAs HEMT 整流器および出力直流電圧測定結果

高出力用高効率 GaN HEMT 整流器に対しては、電圧の絶対値が大きいことからダイオードを用いた倍電圧生成回路を採用して設計・試作を行った(図4)。ここで、従来の倍電圧回路では高入力時に電圧の絶対値が大きくなりすぎたため、直流出力部にツェナーダイオードを並列に繋ぐことにより抑制を図っている。試作した整流器は同様に2.35 GHzにおいて、-5 dBm から 20 dBm までの入力電力範囲に対して-1.7 V から -3.2 V までの負の DC 電圧を生成している。この結果より、高効率整流器に対して約 10 dB 入力電力を下げたことにより、高効率整流器が高効率を保つための適切なゲートバイアス電圧をアダプティブに生成できることが確認された。

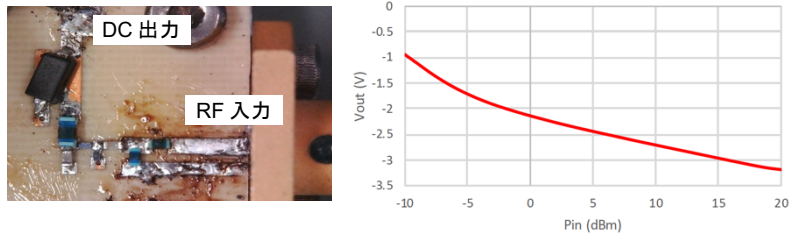


図4 高効率 GaN HEMT 整流器用に試作したゲート制御電圧生成用ダイオード倍電圧生成構成整流器および出力直流電圧測定結果

(3) (1) と (2) を組み合わせた能動制御型高効率・広ダイナミックレンジ整流器の開発

上記の高効率 GaAs HEMT 整流器、および、ゲート制御電圧生成用 GaAs HEMT 整流器を組み合わせて高効率・広ダイナミックレンジ整流器を試作した(図5)。各々の整流器を一枚の基板上に作製し、RF 入力電力を、同じ基板上に作製された結合線路の結合率を調整して 16-dB 電

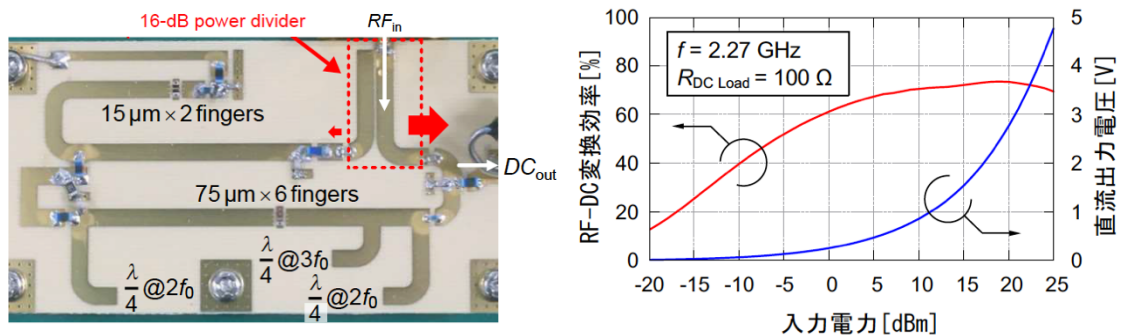


図5 試作した能動制御型高効率・広ダイナミックレンジ整流器およびその測定結果

力分配器を構成し、各々の整流器へ入力している。試作した整流器は、2.27 GHzにおいて、入力電力レベルが 0 dBm から 25 dBm の範囲で高周波-直流電力変換効率 60%以上、9 dBm から 24 dBm の範囲で 70%以上という良好な広ダイナミックレンジ高効率性能が達成された。

GaN HEMT 整流器について、組み合わせた実験は今後の予定であるが、各々の個別の整流器は実現されており、GaAs HEMT 整流器と同様に広ダイナミックレンジ性能が得られると考えている。

(4) 提案する非線形動作整流回路の設計モデルを確立

トランジスタの整流器動作大信号モデルに関しては、より大きな電圧振幅で動作して非線形性が大きく影響すると考えられる GaN HEMT 素子に関して行った。

過去の極低電力トランジスタ整流器開発で提案した図 6 に示す線形近似等価回路を基に、なるべくシンプルな構成の大信号モデルを構築し、大信号領域で最適なゲート側・ドレイン側回路条件および RF-DC 変換効率を導出することとした。整流動作は増幅器と異なり、RF 信号に対して正の非線形抵抗として動作するため、モデル中でも非線形抵抗で表現している。トランジスタ大信号モデルは一般的に増幅器用に最適化されており、IV 特性の第 1 象限のみでのフィッティング精度が重視されるが、整流動作では、第 1 象限と第 3 象限の両方で特性を再現する必要がある。また、低電力動作では原点近傍の精度が必要であるが、増幅器の動作点は通常原点から離れた位置となるため、原点近傍での精度が良くないという問題点があった。そこで、既存の高周波増幅器用のトランジスタ大信号モデルを参考にしつつ大信号回路シミュレーションの収束性への影響を抑えるために比較的簡単な関数を追加することで、フィッティング精度を向上させることに成功した。また、GaN HEMT 素子は高信号動作が可能であるために寄生容量の非線形性が回路の整合に影響を与えることが予想されており、整流動作の範囲内でフィッティングを行うことで、関数を複雑化せずに非線形特性を組み込むことに成功した。図 7 に提案モデルと測定結果との比較を示しており、(a) はゲート電極を流れる電流のモデル化、(b) は非線形入力容量のモデル化、(c) は IV 特性のモデル化の結果を示している。

(1) で示した GaN HEMT 整流器は、上記の通り、このモデルを使用して設計を行っている。

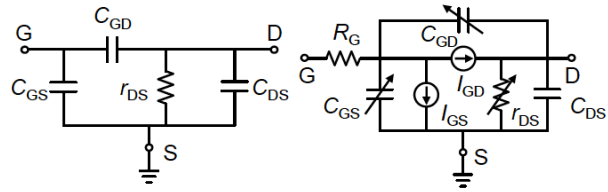


図 6 極低電力設計用線形等価回路およびそれに基づいた提案大信号モデル

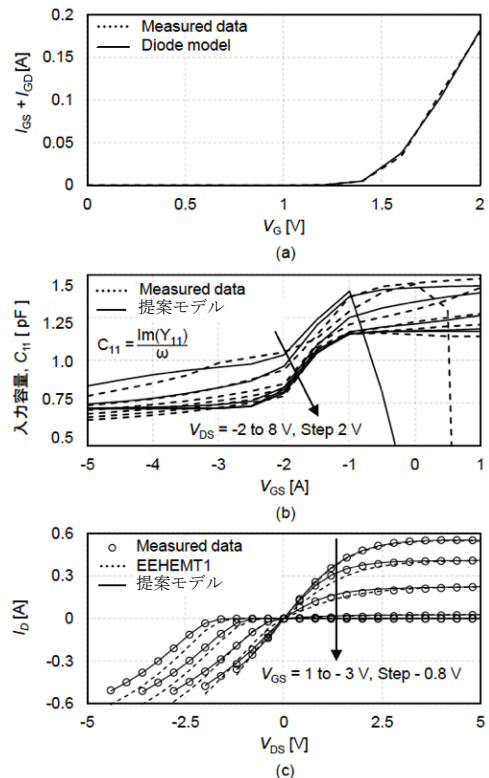


図 7 提案モデルと測定結果の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jun Yamazaki, Ryo Ishikawa, Kazuhiko Honjo	4. 巻 -
2. 論文標題 Input-Power-Synchronous Adaptively Biased Wide-Dynamic-Range High-Efficiency Rectifier with Zero-Threshold GaAs HEMTs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 50th European Microwave Conference	6. 最初と最後の頁 436-439
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/EuMC48046.2021.9338053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Taki Nagata, Kazuhiko Honjo, Ryo Ishikawa	4. 巻 -
2. 論文標題 DC-Feedback-Mode Transistor Rectifier/Voltage-Doubler Diode Rectifier for Negative Gate Biasing to Microwave Power Amplifiers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of 2022 Asia-Pacific Microwave Conference	6. 最初と最後の頁 446-448
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.23919/APMC55665.2022.9999972	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山崎純、本城和彦、石川亮
2. 発表標題 整流動作大信号等価回路モデルを用いた広ダイナミックレンジ動作向け高効率GaN HEMT整流器設計
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎純、石川亮、本城和彦
2. 発表標題 入力電力レベル適応自己ゲートバイアス調整型広ダイナミックレンジ高効率整流器
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長田多喜、本城和彦、石川亮
2. 発表標題 マイクロ波電力増幅器への負ゲートバイアス印加用直流帰還型ゼロ閾値GaAs HEMT整流器および倍電圧ダイオード整流器
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関