

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04267

研究課題名(和文)電磁波エネルギーハーベスティングに向けた新しい電波整流器技術の研究

研究課題名(英文)Study of Novel RF Rectifiers for RF Energy Harvesting

研究代表者

田中 慎一 (Tanaka, Shinichi)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：00556243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：RFエネルギーハーベスティングの実現に向けて、微弱な環境電波に対応できる新しい整流回路を検討した。微弱電波の整流を阻害する要因の一つは、ダイオードの有限の閾値電圧をもつことである。本研究では、ダイオードがもつ寄生容量を逆手にとって、ダイオードと直列接続した外部コイルを寄生容量と共振させることで、コイルの誘導起電力の効果により閾値電圧を実質的に低減させ、コイルを使わない場合と比較して20dB以上入力感度を改善できることが実証した。さらに、一般に共振を利用すると回路特性が狭帯域化する課題に対して、複数共振モードを用いることで国内地上デジタルTV放送の電波帯をカバーすることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低炭素化社会の実現に向けて、再生エネルギーのほか環境エネルギーを利用する技術(エネルギーハーベスティング)が注目されている。本研究は、通信放送用の電波からエネルギーを回収する整流器の研究に取り組んだ。克服すべき課題の一つは、整流動作を担うダイオードの閾値電圧(動作のための最小電圧)がゼロではないため、ダイオードが微弱電波に対して反応しないことである。本研究では一般に性能の阻害要因でしかないダイオードの寄生容量を逆手にとって、寄生容量とコイルを共振させることで課題を解決した。これは汎用ダイオードを使うことを意味し、本成果はエネルギーハーベスティングの実用化に向けて大きな一歩になると期待される。

研究成果の概要(英文)：To realize RF energy harvesting rectifier, novel rectifiers operating with high sensitivity for very weak ambient RF power was studied. The major factor limiting the rectifier sensitivity is the finite threshold voltage of the diode. In this project, we proposed to use external coil series-connected to the diode, which resonate with the parasitic capacitance of the diode. As a result, it was demonstrated that the input RF power sensitivity of the rectifier can be improved by more than 20 dB. While utilizing resonance generally results in narrow bandwidth, we proposed to use multi resonance-poles. The result was a wideband high-sensitivity rectifier covering the Japanese domestic terrestrial digital TV broadcasting system.

研究分野：マイクロ波回路

キーワード：整流器 ダイオード 共振 マイクロ波 環境エネルギー エネルギーハーベスティング

### 1. 研究開始当初の背景

IoT時代においては、無数の低電力デバイス（センサー等）が社会の隅々に配置されると予想される。これらの低電力デバイスは、バッテリー等で電源を供給するのは現実的でなく、各々が自律的にエネルギーを調達できる手段を確保することが求められる。そこで、都市部においては環境電波を回収する技術（電磁波エネルギーハーベスティング、以下電磁波 EH と省略）が有望視されており、その実現の鍵を握るのが電波（RF）を直流（DC）に変換する電波整流器である。

電磁波 EH に対応する整流器は、 $\mu\text{W}$ 級の微弱電波に対しても実用レベルの整流効率を実現する必要がある。研究開始当初の状況としては、平成 24-25 年の総務省プロジェクト(PJ)において、電磁波 EH の目安となる  $10\mu\text{W}$  の電波に対して 45% の整流効率が達成されていた。この成果は電磁波 EH の実用化に向けて大きな進展であったが、システム全体の性能安定性と経済合理性を高いレベルで担保するためには、整流器の(1)高感度化と(2)低コスト化を更に押し進める必要があった。(1)に関しては、一般に  $1\mu\text{W}$ 級の超微弱電波では入力電圧振幅がショットキー障壁ダイオード (SBD) の閾値電圧を超えられないことがダイオードを用いる整流器全般の課題であった。また、(2)に関しては、総務省 PJ では汎用個別部品の SBD はその寄生容量が性能劣化に繋がるとして、専用 IC を開発している。しかし、安価な汎用個別部品を用いて高感度な整流器を実現することができれば、用途に応じて回路設計を柔軟に変更できるようになり、結果的に低コストになり得るという可能性があった。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本提案は電磁波 EH に適合すべく  $1\mu\text{W}$ 級の超微弱電波向けの整流器として従来よりも一桁高い超高感度を実現するための基礎技術を確認することを目的として研究を進めた。またその目標を達成するにあたっては、実用化段階で事業化を円滑に進められるように、能動素子として汎用部品を使い回路的な工夫で実現可能な技術に主眼を置くこととした。

### 3. 研究の方法

既存の SBD 整流器の「閾値電圧の壁」の克服するため、具体的には以下の 3 つの方法に沿って研究を進めた。

#### (1) 閾値電圧を回路的なアプローチで実質的に低減する方法

SBD の閾値電圧そのものを低減するのではなく、外部インダクタを用いてその誘導起電力により微弱な入力電圧を昇圧することで、SBD の閾値電圧が下がったのと同じ効果を得ることを狙った。単にインダクタを接続するだけでは十分な誘導起電力が得られないが、研究の初期段階で外付けインダクタと SBD の接合容量 ( $C_j$ ) やパッケージ寄生容量 ( $C_p$ ) との共振により電流時間変化率が增大し、大きな誘導起電力が発生することが判明したため、このアプローチで整流器を高感度化することを目指した。

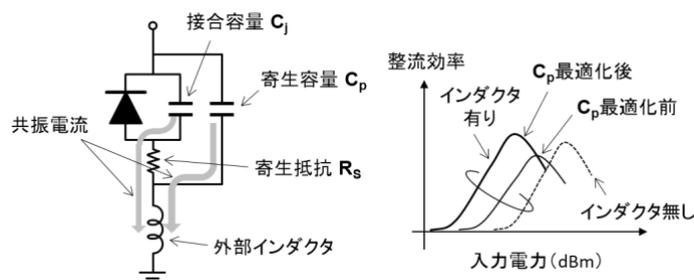


図1 共振によるコイル誘導起電力効果でダイオードを動作させる方法

(2) ダイオードを用いる従来の整流器に対して、時間反転双対原理に基づいて FET 増幅器に類似の回路を用いて FET 整流器を実現する方法が注目されている。この種の FET 整流器は報告例が少なく、とくにゲート回路の設計方法が確立されていない。そこで研究代表者がこれまで増幅器のドレイン回路に適用してきた右手/左手系複合線路 (CRLH 線路) 技術をゲート回路に適用し、FET 整流器の新しい設計方法の検討を行った。

#### (3) FET を用いてゼロ閾値電圧のダイオードを実現する方法

FET のゲートとドレインを短絡することで、Gated-Anode Diode (GAD) と呼ばれるダイオードが得られることが報告されている。GAD の閾値電圧の値は有限だが、FET は本来 3 端子素子であるため、工夫をすれば閾値電圧を制御できる可能性がある。用途を整流器に限定すれば、閾値電圧は必ずしも直流でゼロである必要はなく、交流動作において実質的にゼロであれば良いので、FET を用いてゼロ閾値電圧の擬似ダイオードを実現を目指してシミュレーション検討を行った。

#### 4. 研究成果

上記の (1) ~ (3) の方法に沿って研究を進めた結果、以下の各々の研究成果が得られた。

(1) 直列インダクタとダイオードの寄生容量を共振させることで、ダイオードの閾値電圧を実効的に下げるだけでなく無反射を実現できることを示した。閾値電圧が下がるのは直列インダクタの誘導起電力の効果だが、ダイオードの ON・OFF 切替タイミングで変化する共振電流の振幅が増し、有効な誘導起電力に繋がる。また、動作周波数に応じてダイオードに補助容量 ( $C_{aux}$ ) を装荷することで共振時のダイオードインピーダンスを制御できることを見出し、広い周波数範囲で提案した回路が適用できることを確認した。一例として、汎用ミキサダイオードを用いる実証実験において、700MHz 帯にて -20dBm/-30dBm の RF 入力電力に対して 38%、15% という最高レベルの RF-DC 電力変換効率を実現した。さらに、提案した整流器を 1 つの回路で広い周波数帯域にわたって動作させる検討を行った。その結果、複数の共振モードを用いることで、共振によるダイオード閾値電圧の低減効果とインピーダンス整合の効果を広帯域にわたって維持させることに成功した。実証例として、国内地上デジタルテレビ放送の電波帯 (470-700MHz) をカバーする高感度整流器を実現した。

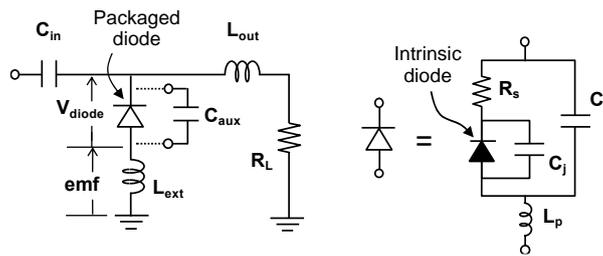


図2 提案整流器の回路構成

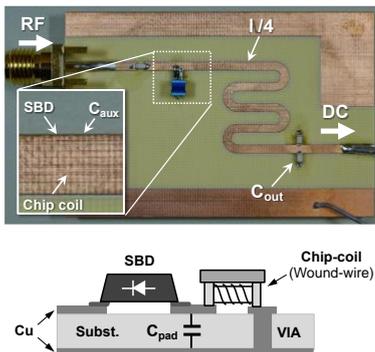


図3 試作した 700MHz 整流器

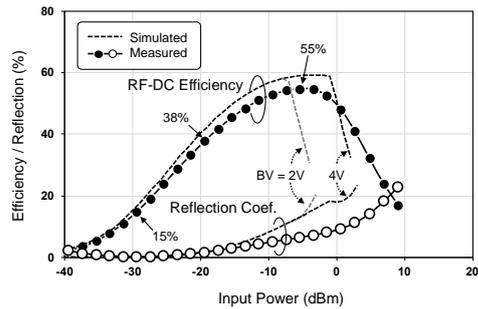


図4 700MHz 整流器の実験結果

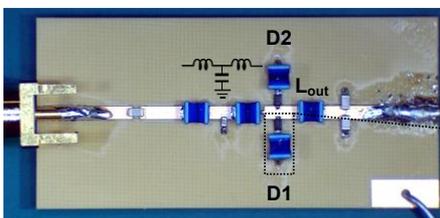


図5 試作した 470-700MHz帯整流器

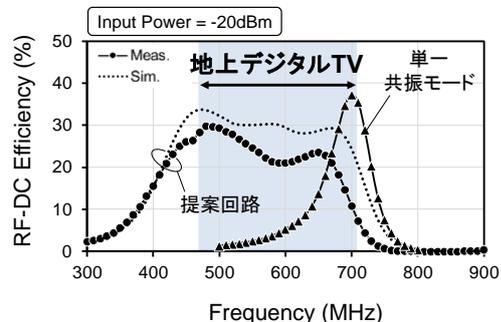


図6 470-700MHz帯整流器の実験結果

(2) 時間反転双対原理に基づく FET 整流器は、ゲート制御のためのゲート回路の適切な設計が求められる。しかし、FET の非線形動作を考慮するとゲート回路は高調波処理も必要となり、マイクロストリップ線路 (MS 線路) を用いる従来の回路設計手法では回路面積が増えることが懸念される。そこで MS 線路を一切用いず、右手/左手系複合線路 (CRLH 線路) のみからなるゲート回路を検討した。その結果、回路サイズを大幅に削減しつつ、MS 線路を用いる従来の FET 整流器と同等以上の整流器性能を確認することができた。本検討では、整流器は微弱電波

に対して最適化されていないが、本手法が電磁波 EH に向けた小型・低コストの整流器の実現に繋がる可能性が示された。

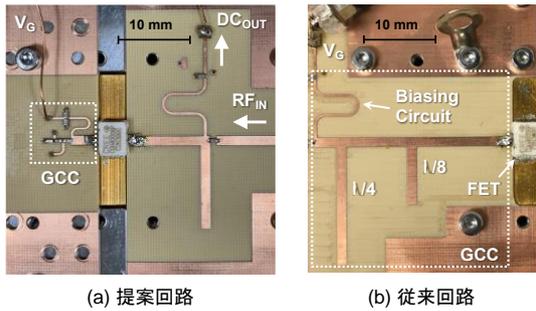


図7 試作した 2.45GHz 帯 FET 整流器

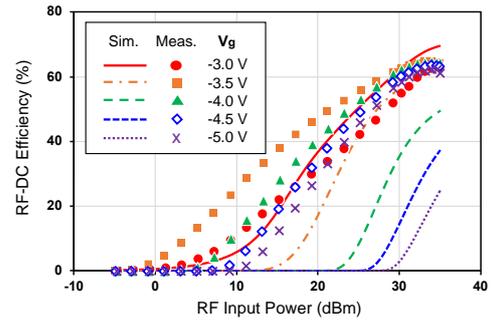


図8 試作した FET 整流器の実験結果

(3) FET を用いてゼロ閾値電圧のダイオード動作を実現する方法を検討した。エンハンスメントモード (E モード) FET のドレイン端子とゲート端子を短絡して実現した GAD と呼ばれるダイオードは、通常のダイオードと同様に閾値電圧が有限の値をもつ。これに対して、E モード FET のドレイン端子とゲート端子をコイルを介して接続したとき、FET は交流動作時において第 3 象限の I-V 特性 ( $V_{DS} < 0$ ,  $I_{DS} < 0$ ) を使った電流が流れることを見出した。FET の I-V 特性は  $V_{DS}$  に関しては閾値電圧がゼロであるため、これは閾値電圧ゼロのダイオード動作が得られることを意味する。このような動作が得られるためには、コイルが FET 寄生容量と共振することと、コイルの誘導効果によってゲート電圧の位相がドレイン電圧に対して 90 度ずれることが必要条件となる。この「誘導ゲート FET ダイオード (Inductively-Gated FET Diode)」を整流器に適用してシミュレーションを行った結果、2.45GHz において IGFD のゼロ閾値動作とそれに伴う RF 入力に対する感度の改善効果を確認することができた。

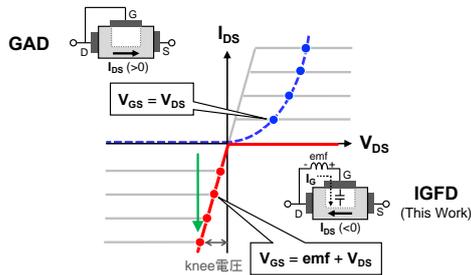


図9 IGFD の動作原理

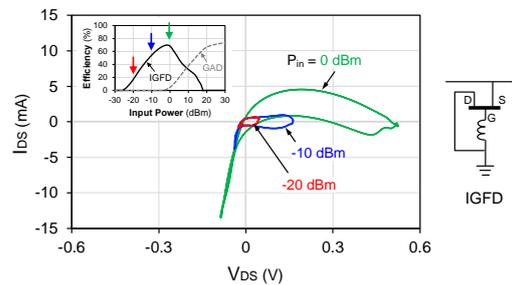


図10 ゼロ閾値電圧を有する IGFD の計算実証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 大野桂
2. 発表標題 直列共振コイル装荷による倍電圧整流器の高感度化の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野桂
2. 発表標題 複数の共振モードを用いる高感度・広帯域ダイオード整流器の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波研究会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大野桂
2. 発表標題 RF環境発電への応用に向けたマルチ共振モード広帯域高感度整流器
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中愼一
2. 発表標題 RF エネルギーハーベスティング整流器の共振アシスト高感度化手法
3. 学会等名 マイクロウェーブ展示会（MWE）2019ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯坂尚章, 田中愼一
2. 発表標題 時間反転双対原理に基づく FET 整流器の2つの動作タイプの比較
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野桂, 田中愼一
2. 発表標題 複数共振モードを用いる広帯域・高感度ダイオード整流器
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野桂, 田中愼一
2. 発表標題 外部インダクタと共振するダイオードを用いる RF エネルギーハーベスティング整流器
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 2019年

1. 発表者名 Shinichi Tanaka, Katsuyuki Tanaka
2. 発表標題 Highly-Sensitive Diode Rectifier with Self-Compensated Reflection Based on Novel Operation Principle
3. 学会等名 IEEE Wireless Power Transmission Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinichi Tanaka, Takanori Noguchi
2. 発表標題 A 2.45-GHz Self-Synchronous GaN FET Rectifier Using CRLH-TL-Based Gate Control Circuit
3. 学会等名 European Microwave Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大野桂、田中慎一
2. 発表標題 直列インダクタを装荷したUHF 帯高感度ダイオード整流器
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大野桂、田中慎一
2. 発表標題 直列インダクタを装荷したUHF 帯高感度ダイオード整流器 ( )
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野口敬則、田中慎一
2. 発表標題 1ポートCRLH 線路から成るゲート制御回路を用いたFET 整流器
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019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
---------	---------