

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「微小エネルギーを利用した
革新的な環境発電技術の創出」
研究課題「Super Steep トランジスタ と
Meta Material アンテナ による nW 級
環境 RF 発電技術の創出」

研究終了報告書

研究期間 2016年 10月～2020年 3月

研究代表者：石橋 孝一郎
(電気通信大学大学院
情報理工学研究科 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究は、低エネルギーで変換効率が極端に低下すると言われていた RF エネルギーハーベスティング技術で、-30dBm 以下の低エネルギー領域での変換効率を 80%以上と飛躍的に向上させることによって、そのエネルギーを活用できる範囲(場所)を広げることを目指した。これにより、センサネットワークの広範囲での活用や、電波による非常時の電源供給といった応用に対応できる。

このため、本研究では(A-1)(A-2)(B-1)(B-2)(C-1)(C-2)の 6 つの要素技術を開発した。(A-1)整流素子として従来より 3 桁以上急峻な立ち上がりの新原理 Super Steep トランジスタを開発し、低電界領域での飛躍的な整流効率の向上を目指すとともに、(A-2)新構造 Meta Material を用いた小型アンテナを開発し、金属や土の上など導電性のものには置けないアンテナをどこでもおけるようにすることを目指した。さらに、アンテナ、マッチング回路、整流回路からなる RFEH のためのレクテナ(Rectify Antenna)システムで電力変換効率(Power Conversion Efficiency)を向上させるために、設計に必要なデバイスのモデリング技術を開発するなど、SSFET 以外のバックアップデバイスを用いて設計技術を磨いた。(B-1)では、Schottky Barrier Diode (SBD)や 40nmSOI デバイスとマイクロループアンテナやメタマテリアルアンテナを組み合わせたレクテナの設計を行った。(B-2)では、pHEMT デバイスを整流素子としたトランジスタ整流回路によるレクテナの設計技術を磨いた。さらに実用性を高めるために(C-1)レクテナで得られた低電圧をシステムで使用することができる高電圧に昇圧する DCDC コンバータを開発し、(C-2)微小 RF エネルギーで通信できる微小電力通信技術の理論の開発を目指した。

本研究の最終年度 2019 年度には、これらの要素技術開発の上に、実証実験を実施し、これらのシステムの動作有効性を確認した。

以下に研究の成果について、より詳細に述べる。

(A-1)の Super Steep トランジスタの開発では、SOI MOSFET のチャネルにサイリスタ構造を用いてキャリアを注入し、Super Steep トランジスタの性能を得る PN-Body Tied SOI FET (以下 SSFET と略す)を開発した。N 型、P 型の SSFET を開発し、それぞれ 33uV/Dec と、通常の MOSFET よりも 3 桁小さい Steep 特性が得られた。これはすでに報告されているあらゆる種類の Super Steep Transistor では最小(最高)の Steep 特性である。また、RFEH で必要な高周波における整流特性では、10mV の振幅で 30MHz 以上のパルス波において、整流特性を示した。

(A-2)のメタマテリアルの開発では、2.4GHz 帯で体積 5.16cc インピーダンス 2k Ω 超のメタマテリアルアンテナを開発した。金属上でも良好な感度を維持し、RFEH で必要な土の上におけるなど、どこにでも置ける特性を確認した。

(B-1)(B-2)の微小 RF エネルギーの整流回路の設計技術開発開発では、SSFET 以外の従来デバイスを用いて、整流回路技術開発を行った。

(B-1)では、整流素子として SBD を用い、高インピーダンス特性を持つ Loop Antenna を用いることにより、-30dBm の低入力電力時に従来ない 25%以上の変換効率を実現した。

(B-2)では、整流素子として E-mode GaAs HEMT を用い、開発したトランジスタ整流回路により-30dBm の低入力電力時に従来まで報告にない 24%以上の変換効率を実現した。

(C-1)の昇圧回路の実験においては、内部抵抗の高いエネルギーハーベスタから取得できる 150mV の低電圧を 250mV まで昇圧できる DCDC コンバータの動作をシミュレーションにより確認した。

(C-2)の低消費電力通信に関する理論解析においては、環境信号を利用したバックスキップ通信方式を提案し、RFEH で得られる電力が極小な環境下でも通信が可能であることを数値計算により明示した。

以上の要素技術の開発の上、RFEH のために以下の実証実験を実施し、それぞれ以下の所定の成果が得られた。

実証実験(A-1)

- SSFET の 10mV、30MHz のパルス整流動作を実証した。

実証実験(A-2)

- 誘導性インピーダンス特性を持つ高インピーダンス・メタマテリアルアンテナと 40nm SOI-CMOS 整流器 IC により 2.4GHz 帯および 920MHz 帯レクテナを開発した。レクテナの高効率特性を確認し、金属板上でそれぞれ 78%と 72%高効率動作も実証した。

実証実験(B-1)

- 共振インピーダンス 330k Ω のループアンテナと SOI-CMOS 整流 IC を用いた AM ラジオ放送波から発電。関東(NHK, 500kW)での平野部全域での動作に相当。

実証実験(B-2)

- pHEMT を用いたトランジスタ整流回路により、-30dBm で Power Conversion Efficiency (PCE) 24%を Blue Tooth 2.4GHz からの整流にて実証した。

実証実験(C-1)

- 65nm SOTB DT MOS CCR with Floating sub-circuit を整流素子として用いたレクテナで、950MHz ケータイ向け電波からの環境発電を実証した。

実証実験(C-2)

- 環境電波をキャリアとして用いるボックスキャッチ通信方式の動作確認を行った。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. PN-Body Tied SOI FET (Super Steep FET)の開発

PN-Body Tied SOI FET (PNBT)構造により、Subthreshold Slope(SS)が 33uV/dec と従来よりも 3 桁以下の電圧でスイッチングが可能な Super Steep FET を実現した。この特性を N-channel, P-channel 共に実現し、RF 信号の整流に好適なばかりでなく、極低電源電圧(0.1V レベル)集積回路の基本デバイスの候補になりうることを示した。

2. Super Steep FET による極低電圧整流動作

PN-Body Tied SOI FET (Super Steep FET)を Diode 接続し、初めて、極低電圧整流実験に成功した。10mV の極低電圧振幅の正弦波を入力し、少なくとも 30MHz の高周波パルスまで半波整流波形が出ることを確認した。これにより、Super Steep FET が RF エネルギー・ハーベスティングに有望なデバイスであることを示した。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. メタマテリアルアンテナの開発

金属や土の上に設置しても電力収集特性の変化しない小型アンテナとして、MACKEY 構造のメタマテリアルアンテナを開発した。2.4GHz 帯のメタマテリアルアンテナは、体積 5.16cc インピーダンス 2Kohm 超で、金属基板上においても空中と特性の変化がないことを確認した。MACKEY 構造のアンテナの基本特許を 2 件出願した。

2. 環境 RF 信号からの発電

- SBD 整流器により、-30dBm 以下の微弱強度の AM ラジオ波からの発電を確認した。
- SOTB(Silicon on Thin Buried Oxide) MOS による CCR DT MOS with Floating 整流回路により、ケータイ 950MHz 帯の環境 RF 信号から平均 2.77uW の発電を確認した。pHEMT を用いたトランジスタ整流回路により、-30dBm の入力電力で、24%の発電効率を確認した。

3. 低電力通信方式

発電電力が極小な環境下において通信を行うため、空間中の OFDM 変調された電波を反射/吸収するボックスキャッタ通信技術を提案し、理論検討による 6dB の受信感度の向上と、原理実験による基本動作を確認した。

< 代表的な論文 >

1. T. Mori, J. Ida, “P-Channel and N-Channel Super-Steep Subthreshold Slope PN-Body Tied SOI-FET for Ultralow Power CMOS” IEEE J. Electron Devices Soc., vol. 6, pp. 1213-1219, 2018 [IEEE EDTM2018 にて Selected Paper となり J.EDS 投稿推薦、査読&採択された]
2. T. L. Nguyen, Y. Sato, K. Ishibashi, “A 2.77 uW Ambient RF Energy Harvesting UsingDTMOS Cross-Coupled Rectifier on 65 nm SOTB and Wide Bandwidth System Design” MDPI Open Access Journal Electronics, Electronics 2019, 8(10), 1173;
<https://doi.org/10.3390/electronics8101173>
3. V. V. Mai, W.-Y. Shin, and Koji. Ishibashi, “Wireless Power Transfer for Distributed Estimation in Sensor Networks,” IEEE J. Select. Topics Sig. Process - Special Issue on Cooperative Signal Processing for Heterogeneous and Multi-Task Wireless Sensor Networks, vol. 11, no. 3, pp. 1-14, Apr. 2017

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 電気通信大学グループ

研究代表者: 石橋 孝一郎 (電気通信大学大学院情報理工学研究科 教授)

主たる共同研究者: 石川 亮 (同 准教授)、石橋 功至 (電気通信大学先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター 准教授)

研究項目

- ・(B-2) トランジスタ整流回路の開発 (石川 亮)
- ・(C-1) 高入力インピーダンス電源回路 (石橋 孝一郎)
- ・(C-2) RF エネルギー通信理論と解析 (石橋 功至)

② 金沢工業大学グループ

主たる共同研究者: 井田 次郎 (金沢工業大学工学部電気電子工学科 教授)

牧野 滋 (同 教授)、伊東 健治 (同 教授)

研究項目

- ・(A-1) Super Steep FET の開発 (井田 次郎)
- ・(A-2) メタマテリアルアンテナの開発 (牧野 滋)
- ・(C-1) 高インピーダンス整流回路の開発 (伊東 健次)

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

- 1) さきがけ研究者である早稲田大学の柳谷隆彦准教授と連携し、RF エネルギーハーベスティング技術と圧電トランスの組み合わせによる新しい応用システムの検討ができた。
- 2) ベトナムレキドン工科大学の Dr. Luong Duy Manh 氏と連携し、Super Steep FET のモデリングについて検討し、共同招待講演を行った。