

石橋 孝一郎

電気通信大学 大学院情報理工学研究科
教授

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

§ 1. 研究成果の概要

本研究は、従来不可能であった nW 級の RF エネルギー(電波エネルギー)の高効率収集を、新原理デバイスであるスーパースティープトランジスタ(SSFET)と新構造のメタマテリアルアンテナにより実現しようとする研究である。最終目標は 10cc 以下の小型アンテナで 100n~1mW の RF エネルギーを 80%以上の効率で収集することにある。

2018 年度は、本研究の 3 年度目にあたり、(A-1)SSFET の高周波特性の確認、(A-2)小型メタマテリアルアンテナの実現、(B-1)(B-2)SBD,SOI,SOTB,HEMT 等のバックアップデバイスを用いた -30dBm で 10%以上の高効率レクテナ方式(構造と回路)の確認、(C-1)RF エネルギーから得られる微小直流電圧の昇圧回路の開発、及び(C-2)微小 RF エネルギーによるネットワーク理論の構築である。以下にそれぞれの項目の主要成果について述べる。

(A-1) DC 特性として、N 型 P 型双方で Super Steep 特性を持つ SSFET を実現した。AC 特性として、パルス印加実験を行い、装置限界の 30MHz までの整流動作を確認した[ref1](図 1)。また、単体 SSFET の RF 特性を測定し、 $f_t=278\text{MHz}$, $f_{\text{max}}=1.01\text{GHz}$ の高周波動作を確認した。

(A-2) 500MHz 帯におけるメタマテリアルアンテナは、3000cc の体積で 490MHz から 580MHz の広帯域にわたって感度がある 2Kohm のメタマテリアルアンテナを実現できた。50Ωでは当初目標の 50cc 以下の体積のメタマテリアルアンテナも実現した。RFEH で有利である 2.4GHz 帯と 5GHz 帯のマルチバンド対応のメタマテリアルの試作にも成功した。

(B-1) Cockcroft Walton (CCW)及び Cross Couple(CC)整流回路を用い、SOI-CMOS 整流器 IC との直接整合による 2.4GHz 帯高感度レクテナの設計、試作、評価を行い、トップレベルの整流効率 11.8%@-30dBm を得た[ref2]。さらに微小ループアンテナを用いる 920MHz 帯高感度レクテナの設計試作を行ない、入力電力-30dBm のときの効率はトップ性能の 25%を得ることができた。

(B-2) pHEMT デバイスを用いてトランジスタ整流器を設計、試作、評価を行い、2.45GHz、-

30dBm 入力で 19% の高効率変換を達成した。

いずれの整流回路方式でも 2019 年度の目標を上回る効率を達成しており(図 2)、nW 入力の RFEH に適したレクテナシステムの設計法が確立された。

さらに、環境中にある AM ラジオ波からのエネルギー収集実験では、スパイラル型アンテナと Cockcroft Walton (CCW) 及び Cross Couple(CC)整流回路とマッチング回路からなる 1MHz 用 RFEH システムを完成させた。実験室での効率は約 25% を達成し、石川県内でのフィールド実験においても広範囲でのエネルギー収集を観測した。

(C-1) RF エネルギーに好適な DCDC コンバータの開発では、シミュレーションで $1\text{K}\Omega$ の内部抵抗を持つ電源を用いても 0.15V から 0.25V まで昇圧できることを確認した。

SSFET のコールドスタート問題の解決に向けて、SSFET バイアス電圧発生用のレクテナを開発した。900MHz 帯のケータイプラチナバンドの電波が OFDM 変調されていることに着目して高効率化を図り、コールドスタートに必要な 0.6V を上回る 0.9V の出力電圧を得た。

(C-2) 複数周波数を用いた WPCS における 2 つの通信方式が達成するスループットの解析を行い、平均受信信号電力が著しく微弱な場合においても、後方散乱通信方式であれば通信可能であることを明らかにした。また、通信方式と通信周波数を適切に切り替えるプロトコルにより、WD は実際に適切な通信周波数及び通信方式を選択して通信できることを明らかにした。

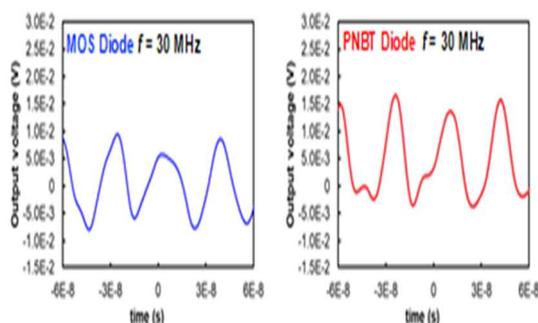


図 1 MOSとSSFETによる整流波形

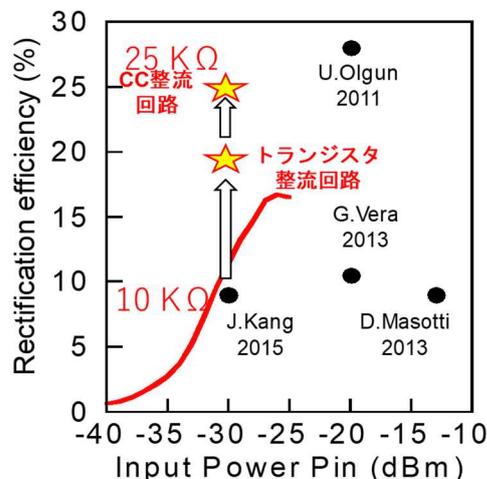


図 2 整流効率の向上 (右図)

【代表的な原著論文】

1. Shun Momose, Jiro Ida, Takuya Yamada, Takayuki Mori, Koichiro Ishibashi, and Yasuo Arai, "First Experimental Confirmation of Ultralow Voltage Rectification by Super Steep Subthreshold Slope "PN-Body Tied SOI-FET" for High Efficiency RF Energy Harvesting and Ultralow Voltage Sensing", IEEE SOI-3D-Subthreshold Microelectronics Technology Unified Conference (IEEE S3S) ,10.4, pp1-3, 2018.
2. Shunya Tsuchimoto, Kenji Itoh, Ichiro Somada, "SOI-CMOS high power rectifier IC with the cross coupled CMOS pair", Proc. Asia - Pacific Microwave Conference 2018, Nov. 2018, Kyoto Japan

§ 2. 研究実施体制

(1) 電気通信大学グループ

① 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)

② 研究項目:nW 級環境 RF 発電技術及び電源技術と nW 通信理論の研究

(B-2) 整流回路の開発; 石川亮 (電気通信大学 大学院情報理工学研究科 准教授)

(C-1) 高入力インピーダンス電源回路; 石橋孝一郎 (電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授)

(C-2) RFエネルギー通信理論と解析; 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)

(2) 金沢工業大学グループ

① 主たる共同研究者:井田 次郎 (金沢工業大学 工学部電気系、教授)

② 研究項目:Super Steep トランジスタ と Meta Material アンテナ による nW 級環境 RF 発電技術の研究

(A-1) SSFET の開発; 井田次郎 (金沢工業大学 工学部電気系、教授)

(A-2) メタマテリアルアンテナの開発; 牧野滋 (金沢工業大学 工学部電気系、教授)

(B-1) 整流回路の開発; 伊東健治 (金沢工業大学 工学部電気系、教授)