

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「ナノワイヤ半導体を用いた  
環境電波発電デバイスの研究開発」

## 研究終了報告書

研究期間 2016年10月～2020年3月

研究代表者：河口 研一  
(富士通(株)モバイルシステム事業本部  
事業部長付)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

我々は、微小な半導体ナノワイヤを用いた高感度なバックワードダイオード(BWD)を開発し、それに適したアンテナ・整合回路を融合することで環境電波発電の原理実証を目指してきた。IoT センサのバッテリーレス化に寄与することを想定し、小型でありながら  $\mu\text{W}$  レベル以下の微弱なマイクロ波を高効率で変換するデバイス実現に向けた取り組みを行った。研究開発は、4 つの要素技術(結晶成長技術、デバイス・プロセス技術、デバイスモデリング、アンテナ・回路設計)を富士通と首都大が連携して進め、以下の成果が得られた。

結晶成長においては、位置決め成長の Vapor-Liquid-Solid(VLS)成長法を用い BWD 形成に必要な p-GaAsSb/n-InAs ヘテロナノワイヤを形成する技術を獲得した。トンネル接合形成に必要なドーピング濃度の制御、Sb 組成の制御手法を獲得し、さらに位置決め成長マスクやナノワイヤ成長初期層の改善を行うことで、均一性の高いヘテロナノワイヤを安定に形成する技術を進展させた。

デバイス・プロセスにおいては、ナノワイヤ BWD の試作を繰り返しながら、課題を抽出し、特性改善を進めた。ナノワイヤデバイスにおいて、BWD ならではのゼロバイアス整流動作の発現に成功した後、マイクロ波帯の RF 信号を DC 変換するナノワイヤ BWD の形成に初めて成功した。さらには、特性改善を進めた結果、従来のショットキーバリアダイオードの感度を 10 倍以上超える  $700\text{ kV/W}$  の高感度ナノワイヤ BWD の形成に成功した(図 1)。

デバイスモデリングにおいては、ナノワイヤ BWD、メサ型 BWD のインピーダンス周波数特性の実測結果を解析し、とりわけゼロバイアス近傍のバイアスに依存した非線形等価回路モデルとして構築することに成功した。さらには BWD と集積するアンテナおよび整流回路で構成するレクテナ全体のモデルの構築にも成功した。なお本モデルの確度は、試作した多様なレクテナの整流特性の様々な実験結果が、本モデルに立脚した理論解析で十分な精度で検証できることによって示した。

アンテナ・回路設計においては、スパイラルアンテナの形状自由度を用いることでアンテナと BWD を直接接続でインピーダンス整合させる設計手法を確立した。メサ型 BWD を複数組み合わせさせた整流回路(チャージポンプ BWD 回路)によって、サブ mW の高周波(RF)入力から 1 V 以上の DC 電圧生成を可能にした。さらに、このチャージポンプ BWD 回路をスパイラルアンテナに搭載した電波発電素子(レクテナ)を形成し、マイクロ波帯の照射電波をもとに市販の昇圧 DC/DC コンバータおよびそれに接続された IoT 機器(BLE ビーコンモジュール)の駆動に成功した。さらには、ナノワイヤ BWD を搭載したレクテナによって空間を伝搬するマイクロ波の電力変換にも成功した(図 2)。

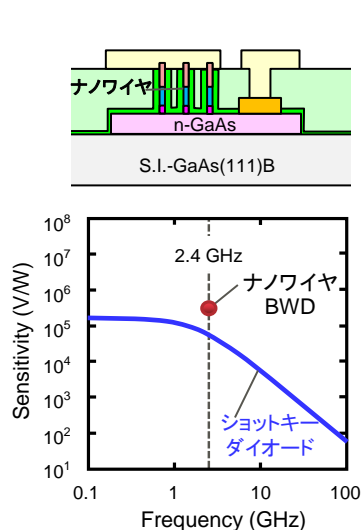


図1 試作ナノワイヤBWDの構造と感度

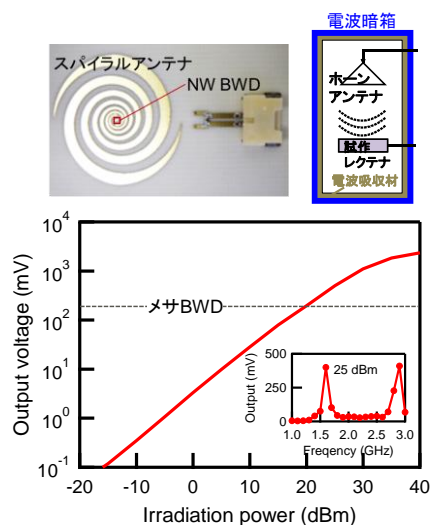


図2 ナノワイヤBWDを搭載したレクテナによるマイクロ波電力変換

## (2) 顕著な成果

### <優れた基礎研究としての成果>

1.

#### 概要:

当チームが初めて作製に成功したマイクロ波帯で動作するナノワイヤバックワードダイオードについて、マイクロ波帯の RF 入力に対する整流特性の評価および性能向上に向けたデバイス試作を進めた。結果として、従来型ショットキーバリアダイオードを上回る 700 kV/W の高感度ナノワイヤバックワードダイオードが得られた。半導体デバイスに関するヨーロッパ最高峰の国際会議である European Solid State Device Research Conference (ESSDERC2019)に Lecture presentation で採択された。

2.

#### 概要:

エネルギーハーベスト用ゼロバイアス高感度マイクロ波整流の実現に向けて、GaAsSb / InGaAs バックワードダイオード(BWD)について、 $\mu\text{m}$  オーダーの異なるメサ径の BWD デバイスを評価・解析した。BWD の等価回路を、周波数 67 GHz までの広い周波数領域に対して解析することにより明らかにした。BWD 整流器の電圧感度の周波数依存性を異なるサイズのメサ直径に関して明らかにし、整合電圧感度向上へのメササイズ縮小効果を定量的に示した。本成果は、論文誌 IEICE に掲載された。

3.

#### 概要:

半絶縁性 GaAs 基板上に p-GaAsSb/n-InAs ヘテロナノワイヤからなるバックワードダイオード(BWD)を作製し、ナノワイヤ BWD において、初めてマイクロ波 RF 信号を DC に変換することに成功した。得られた感度は、従来のショットキーバリアダイオードに匹敵する程度の、25 kV/W の感度が得られた。本成果は、論文誌 Applied Physics Express に掲載された。

### <科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1.

#### 概要:

メサ型 BWD を搭載したレクテナによってマイクロ波発電した電力で BLE ビーコンを駆動する IoT モジュールの作製に成功した。この成果を展示会 (ナノテク展、ワイヤレステクノロジーパーク)に出展し、マイクロ波発電の技術の将来性を広めることに貢献した。

2.

#### 概要:

従来のショットキーバリアダイオードの感度を大きく超えるナノワイヤバックワードダイオード形成に成功した成果について、プレスリリースを実施した。これにより、環境電波発電における高感度ダイオードの重要性、および高感度ダイオードを用いた電波発電デバイスによって将来もたらされる効果について、広く社会に発信した。

### <代表的な論文>

1. Tsuyoshi Takahashi, Kenichi Kawaguchi, Masaru Sato, Naoya Okamoto, and Michihiko Suhara, "Type-II p-GaAsSb/n-InAs multi-nanowire backward diodes for rectification of low power RF signals under a zero-bias condition", Applied Physics Express 12, 106502 (2019).  
DOI: 10.7567/1882-0786/ab3cc6
2. Shinpei YAMASHITA, Michihiko SUHARA, Kenichi KAWAGUCHI, Tsuyoshi TAKAHASHI, Masaru SATO, Naoya OKAMOTO, Kiyoto ASAKAWA, "Characterization and modeling of a GaAsSb/InGaAs backward diode on the basis of S-parameter measurement up to 67 GHz", IEICE Vol.E102-C, No.6, pp.462-465, Jun. 2019

3. Kenichi Kawaguchi, Tsuyoshi Takahashi, Naoya Okamoto, Masaru Sato, "Demonstration of GaAsSb/InAs nanowire backward diodes grown using position-controlled vapor-liquid-solid method", Applied Physics Express 11, 025001 (2018). DOI: 10.7567/APEX.11.025001

<その他成果>

1.

概要:

ナノワイヤバックワードダイオードにおいて、そのサイズ効果により耐圧が向上する新しいメカニズムを発見した。これにより、ナノワイヤバックワードダイオードが、高感度かつダイナミックレンジが広い整流素子としての新しい使い方ができる可能性を示した。本成果は、国際会議 International Conference on Solid State Physics (SSDM)にて発表した。

## § 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 「富士通」グループ

研究代表者: 河口 研一 (富士通(株) モバイルシステム事業本部 事業部長付)

研究項目

- ・ナノワイヤ結晶成長技術
- ・ナノワイヤデバイス・プロセス技術
- ・回路設計

② 「首都大」グループ

主たる共同研究者: 須原 理彦 (首都大学東京システムデザイン研究科 教授)

研究項目

- ・バックワードダイオードの特性解析
- ・アンテナ設計およびバックワードダイオードとの整合検討

(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  
該当なし