

氏 名 岸川 諒子

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 2029 号

学位授与の日付 平成 30 年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 オールワイヤレス衛星のための GaN ダイオードを  
用いた RF エネルギーハーベスタの研究

論文審査委員 主 査 教授 西川 健二郎  
鹿児島大学工学部  
教授 川崎 繁男  
教授 山本 善一  
教授 松原 英雄  
教授 中岡 俊裕  
上智大学理工学部

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏 名 岸川 諒子

論文題目 オールワイヤレス衛星のための GaN ダイオードを用いた RF エネルギーハーベスタの研究

Recently the number and weight of equipment loaded into space satellites have increased owing to the complexity of space missions. The increasing number and weight are serious issues in terms of space and costs, respectively. On the other hand, there are a lot of equipment which is necessary for safe and reliable space missions. Thus, new technologies are strongly required to address this issue. Since environmental monitoring sensors, such as temperature, vibration, and fuel leakage, are fixed at several locations into space satellites, the wires are long and contribute to the heavy weight of space satellites. Thus, the integration of all-wireless sensor network systems will effectively reduce the weight and free up space.

Radio frequency (RF) energy harvesting technology is available for supplying the driving power to the wireless sensors. The RF energy harvesting is a green-eco technology that can be used to extract some of the electromagnetic power for wireless communications and convert the power to direct current (dc). As wireless communication systems have already been developed and loaded into space satellites, the all-wireless sensor network systems will be realized only by adding RF harvesters. One of the important circuits for the RF energy harvesting technology is a rectifier that converts the electromagnetic power to dc power. In summary there is a need to develop light-weight and high-performance rectifiers for space applications.

In this work, a small-size, light-weight, and high-performance rectifier at C band was developed as a RF energy harvester for all-wireless space satellites. The rectifier converts 100 mW class dc power that can drive eight temperature sensors. Thus, using the rectifier, a RF energy harvester, whose output power is used to drive low power consumption sensors in space satellites, is available.

A newly proposed hybrid semiconductor integrated circuit (HySIC) technology was adopted. A HySIC rectifier is an integrated circuit using gallium nitride (GaN) for power rectification from electromagnetic power to dc and silicon (Si) for power propagation. While GaN is a new semiconductor with high resistivity to cosmic rays and high-speed operation, Si is well known for the advanced circuit integration technique and low cost. The purpose of this research is to realize a light-weight, high-performance, and low-cost HySIC rectifier by combining the advantages of the two semiconductors.

The research was conducted in five steps. In all the steps, electromagnetic

measurements are the common factors. I have focused on performing precise measurements and realized a HySIC rectifier using the results. The five steps are as follows;

- 1) Selection of measurement method for GaN diodes.
- 2) Measurements and modeling of GaN diodes.
- 3) Fabrication and characterization of HySIC rectifier.
- 4) Improvement and feedback of HySIC rectifier based on experimental results.
- 5) RF energy harvesting experiments using HySIC rectifier.

First, a measurement method for the GaN diodes at C band was selected. I fabricated some devices for calibration using printed circuit boards and measured them. The results shown that the coplanar line for measurement jigs and OSL calibration were suitable at C band. In this work, a process of selecting a measurement method from the perspective of devices under measurement and operating frequency was proposed.

Next, I fabricated a connection jig between the GaN diode and a measurement instrument and the devices for the OSL calibration using the coplanar lines, and measured the GaN diodes from dc to C band. By correcting the effects of the connector, coplanar line, and bonding wires step by step on the complex plane, the characteristics of the GaN diodes were obtained. Based on the measurement results, a nonlinear equivalent circuit model of the GaN diode was developed. By performing precise measurements, the diode model was precisely constructed.

In the following step, a Si matching circuit was designed using the GaN diode nonlinear equivalent circuit model and a HySIC rectifier was fabricated with the GaN diode and Si circuit. The size of the developed HySIC rectifier was 3.9 mm × 9.5 mm. The RF to dc conversion efficiency and output dc power were 10.3 % and 1825 mW, respectively. This is the first time that a HySIC rectifier has been developed. The object of this research has been achieved. In addition, a power harvesting experiment was performed using the HySIC rectifier in a far-field system.

By measuring the RF and dc power flow of the HySIC rectifier, it was found that the propagation loss was the most serious factor. Hence, miniaturization of a Si matching circuit is effective to improve the HySIC rectifier. Based on the analysis, I resigned a Si matching circuit whose input port was shortened and the RF-dc conversion efficiency of 21.7 % was developed. Moreover, by using capacitors and mounting a connector directly to a Si substrate, the RF-dc conversion efficiency of approximately 45 % will be realized. These efficiencies are beyond that of general solar power generation systems. This result indicated that the HySIC rectifier was promising as a RF energy harvester.

A simulation method for HySIC rectifiers was proposed by analyzing the fabricated rectifier. While simulation of a Si matching circuit is conducted using components installed in a simulator, simulation of a input port, output port, characteristics of a Si substrate, manufacturing precision, and wire bondings, which are difficult to simulate,

must be conducted using measurement data. The difference between measured and simulated RF-dc conversion efficiency is approximately 2.5 % with the simulation method. Moreover, by adding a linear resistor of 0.9  $\Omega$  in simulation, the difference between measurement and simulation is approximately 1 %. Although I independently analyzed the effects of the effects of the ports, Si circuit, manufacturing precision, and bonding wires, it is important to consider the effects of the connections on each other when simulating the HySIC rectifier in its entirety.

The significant outcomes of this research include the development of the world's first HySIC rectifier with a GaN diode and Si matching circuit, and the precise RF measurements that are necessary for the HySIC rectifier. Based on this research, all-wireless space satellites will be realized in the future.

(備考)

- 1 用紙の大きさは、日本工業規格（JIS）A 4 縦型とする。
- 2 和文で作成する場合は 2,000 字～3,000 字、英文で作成する場合は 700 語～2,000 語程度とする。  
ただし、生命科学研究所に出願（申請）する場合は、英文 700 語程度で作成すること。
- 3 1 行あたり 40 文字（英文の場合は 80 文字）、1 ページあたり 40 行で作成する。
- 4 上マージン、下マージン、右マージンは 2 cm、左マージンは 2.5 cm とする。
- 5 タイトルと本文の間は、1 行空ける。
- 6 片面印刷とし、ホチキス止めをしないこと。
- 7 別紙の添付は不可。
- 8 ページ番号は入れないこと、また改行を行わないこと。
- 9 図表を挿入する際は、白黒印刷でも判別できるように配慮すること。
- 10 論文審査に合格し、博士号が授与された場合は、本要旨を総合研究大学院大学リポジトリにおいて、インターネット公開する。

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 岸川 諒子

Title  
論文題目 オールワイヤレス衛星のための GaN ダイオードを用いた RF エネルギーハーベスタの研究

出願者は、衛星内センサネットワークシステムのオールワイヤレス化に向けた RF エネルギーハーベスタとして、小型軽量で高性能な C 帯の整流回路の研究開発を行っている。本研究では、複数個のセンサを同時駆動できる 100 mW クラスから 1000 mW クラスの直流パワーの整流を実現する回路の開発を目標としている。この整流回路を実現するために、次世代回路集積技術として注目されている異種半導体混成集積回路 (HySIC) 技術を採用した。HySIC 整流回路では、電磁波から直流パワーに整流するダイオードには宇宙線耐性が強く、高周波動作が可能な窒化ガリウム (GaN) を用い、電磁波と直流電流を小さな損失で伝播させる周辺の整合回路には、集積技術に優れ低コストのシリコン (Si) を用いた。両者のメリットを混成させて一つの回路を実現することで、小型かつ軽量、高性能、低価格な宇宙用の整流回路を実現したことが本論文の独自性である。

本研究の HySIC 整流回路の開発と HySIC 整流回路を用いた RF エネルギーハーベスタの実験は、5 段階に分類できる。全ての段階において共通する要素は電磁波の測定で、精密な測定に基づいて世界初の HySIC 整流回路を開発することを本研究では重視した。

- ① GaN ダイオードの構造に適した高周波測定方法の選定
- ② GaN ダイオード測定とモデル化
- ③ HySIC 整流回路の開発と特性評価
- ④ HySIC 整流回路の評価による改善点の解析
- ⑤ HySIC 整流回路を用いた RF エネルギーハーベスタの実験

はじめに、GaN ダイオードの測定方法を選定した。プリント基板でキャリブレーション用デバイスを試作したところ、C 帯を含む 1 GHz から 6 GHz では、コプレーナ線路を用いた OSL キャリブレーションが適していることを実験的に確かめた。本研究では、多数存在する伝送線路やキャリブレーション方法から、被測定物と周波数に対して適した組み合わせを選択する方法を示した。

次に、コプレーナ線路による測定ジグおよび OSL キャリブレーション用デバイスを作製し、直流から C 帯までの周波数領域で GaN ダイオードの測定を行った。コネクタ、線路、ボンディングワイヤを段階的に複素数平面上で補正し、GaN ダイオードのみの特性を得た。5.8 GHz の場合、反射係数の絶対値および位相の補正值は 1.1 倍、613.9 度である。この測定結果をもとに、GaN ダイオードの等価回路モデルを構築した。本研究では、測定の精度を向上させることで、等価回路モデルの精度向上を目指した。

この GaN ダイオードモデルを用いて Si の整合回路を設計し、GaN ダイオードと Si 整合回路を混成させた宇宙用 HySIC 整流回路を開発した。設計した整流回路は、従来提案

されている F 級とは異なる回路構造で設計した。F 級整流回路は電磁波の位相の整合条件を考慮した高効率回路であるが、Si のような高損失材料の場合には、電磁波の位相の整合と伝播の損失のトレードオフで最終的な回路の効率が決定される。したがって、F 級を基本として少しずつ回路を変形して設計する手法を提案した。整合回路の寸法は 3.9 mm × 9.5 mm で、42.5 dBm の入力パワーにおいて 10.3% の変換効率、1800 mW の出力パワーという性能を達成し、目標とした数 100 mW レベルの出力パワーの整流に成功した。これは、HySIC 整流回路としての世界初の動作である。

さらに、作製した HySIC 整流回路の各パーツのパワーフローを測定により解析することで、パワー損失が大きい部分をつきとめた。その結果、今後の整流効率の改善には、伝播によるパワー損失を小さくするために電磁波を入力するためのポートを短くすること、回路面積を小さくしてチップコンデンサを用いることが効果的であることを提案した。さらに、解析に基づき、入力ポート部分の回路面積を削減することで、RF-dc 変換効率を 21.7 % へ改善することに成功した。さらに、キャパシタの利用とコネクタ実装方法の工夫により、今後は 45 % 程度の変換効率が期待できることがわかった。これは市販の太陽光発電を超える効率で、HySIC 整流回路が RF エネルギーハーベスタとして有望であることを示している。さらに、GaN ダイオードのオン状態を直接測定するソースプル測定を導入することで、ダイオードの構造と整合回路の構造の両方に対する改善の検討を行っている。

以上のように、本研究の成果は、衛星内センサネットワークシステムのオールワイアレス化に向けた GaN ダイオードと Si 整合回路による C 帯 HySIC 整流回路の世界初の動作成功と、その実現を支えた電磁波の精密測定技術の構築である。さらに、開発した HySIC 整流回路を用いて、遠方界条件での RF エネルギーハーベスティングの実験にも成功した。本研究の成果により、情報通信とエネルギー伝送の全てをワイアレスで行うオールワイアレス衛星が実現へ近づいたと考える。

本審査では、審査員 5 名出席のもと、論文内容に関するプレゼンテーションと質疑応答が実施され、本論文は上記内容に新規性を有し、質疑応答も適切であり、博士論文として十分な学術水準に達している事を確認した。また、原著論文 1 編、国際会議 4 編以上の論文を発表しており、英語力において全く問題ないと結論できる。以上の判断材料より、審査委員は全員一致で本論文が博士論文に相応しい優れたものであることを認め、合格であると判断する。

---

(備考)

1. 用紙の大きさは、日本工業規格 (JIS) A 4 縦型とする。
2. 1 行あたり 40 文字 (英文の場合は 80 文字)、1 ページあたり 40 行で作成する。
3. 上マージン、下マージン、右マージンは 2 cm、左マージンは 2.5 cm とする。
4. タイトルと本文の間は、1 行空ける。
5. ページ番号は入れない。
6. 出願者 (申請者) が論文審査に合格し、博士号が授与された場合は、本紙を総合研究大学院大学リポジトリにおいて、インターネット公開する。

Note:

1. The sheets must be Japanese Industrial Standard (JIS) A4 vertical.

2. Each line shall have approximately 40 characters in Japanese or 80 characters in English, and each page shall have 40 lines.
3. The top, bottom, and right margins must be 2 cm and the left one must be 2.5 cm.
4. Single spacing is required between the title and the text.
5. There must be no page numbers.
6. If the applicant is conferred a doctoral degree, this paper will be published on the SOKENDAI Repository.