

論文内容要旨 (和文)

2021年度入学 大学院博士後期課程

有機材料システム専攻

氏 名 山田 将也



論文題目

Printed Organic Schottky Diodes and Organic Transistors for

Wireless Communication Circuit

(印刷有機ショットキーダイオードと有機トランジスタの無線通信回路応用)

有機材料を用いた電子デバイスは軽量・フレキシブルで高い生体適合性を有しているという特徴に加え、溶媒に可溶であることから、インクジェット印刷やスクリーン印刷などの印刷法による低温・低コストで作製可能である。上記の特徴を活かして、フレキシブルな基板上にセンサや集積回路など多様性に富んだデバイスが開発されてきた。これらのデバイスは我々の身の回りの生活に溶け込み、次世代 IoT 社会を支える技術として期待される。

これらのセンサや回路を活かす技術の一つが無線通信技術である。この無線通信技術とセンサを融合させることによりリアルタイムで物流管理可能なデバイスや、パーソナルヘルスケアや遠隔医療を可能にするデバイスの実現など、物流や医療など幅広い分野での波及効果が期待される。有機材料を用いて印刷法で無線通信回路を作製することで大量のデバイスを環境にやさしく低コストで作製できるため、有機材料を用いた印刷法による無線通信回路の実現は非常に意義がある。この無線通信技術を支える重要なデバイスの一つがトランジスタであり、無線通信回路において、整流回路や信号処理回路、負荷変調回路に用いられている。近年では材料化学やプロセス技術の発展により、アモルファスシリコンを超える高移動度有機半導体薄膜の形成が可能になり、フォトリソグラフィ技術と組み合わせることで高速動作可能な有機トランジスタが実現され、無線通信回路に応用されてきた。しかし印刷技術を用いた有機トランジスタでは、キャリア移動度や印刷解像度の観点から印刷法による有機トランジスタの高速動作化および無線通信回路応用は非常に困難である。また、電池を持たない無線給電では供給できる電力は限られているため、信号処理などに使用する集積回路の消費電力を下げる必要がある。

本論文では、有機材料のフレキシブルで高い生体適合性を活かした印刷有機無線通信回路の開発を目的とした。従来の有機トランジスタベースの無線通信回路では印刷解像度の観点から 13.56MHz の高速動作化が困難である。本研究では縦型有機ショットキーダイオードと有機トランジスタによる無線通信回路の実現を目的とする。以下に概要を記載した。

1 章では、有機材料を用いた電子デバイスまた有機材料の溶媒への可溶性を活かした印刷法による有機電子デバイスやセンサに関する研究例を示し、これらのデバイスを活かす技術として、無線 IC タグやウェアラブル健康管理デバイスへの応用に重要な無線通信回路応用の重要性や先行研究、現状の課題、印刷法で無線通信回路を作製する意義に関して説明した。

2 章では、印刷有機ショットキーダイオードを整流回路に関して、印刷法における課題や本研究で使用した材料、作製方法に関して包括的に述べた。印刷法では使用可能な電極は銀が主流であり良好な整流特性を示すショットキーダイオードの作製が困難であるため、両波倍電圧整流回路による昇圧が必要であった。また半波整流回路では整流電圧の平滑化のために大面積キャパシタが必要であり、印刷法では歩留まりや集積化に関する懸念点があり、整流回路の構成に関しても考慮する必要がある。そこで本研究では、仕事関数制御可能な自己組織化単分子膜を導入し、 1 A cm^{-2} の高順方向電流密度と 10^6 の高整流比を両立した、印刷有機ショットキーダイオードを作製し、整流回路に応用することで $5\text{ V}\sim 6.5\text{ V}$ の直流電圧の出力に成功した。

3 章では無線通信回路における信号処理回路に使用される、印刷有機トランジスタの低電圧・低消費電力化に関して、現状の印刷法による有機トランジスタ回路に関して言及したうえで、材料や作製方法、回路応用に向けた低消費電力化に関するアプローチまで包括的に述べた。 n 型と p 型トランジスタで構成させる相補型 (CMOS 型) 回路が低消費電力な回路構成であるが、低消費電力相補型回路の実現において、閾値電圧の制御は重要であり、本研究では閾値電圧制御として n 型トランジスタに対してはデュアルゲートによる閾値電圧制御、 p 型トランジスタにはゲート電極の仕事関数変化による仕事関数制御手法を導入し、相補型集積回路の 200 mV の低電圧動作や 30 pW の低消費電力化に成功した。

総括として、印刷有機ショットキーダイオードによる印刷有機整流回路と印刷有機トランジスタによる超低消費電力有機 CMOS 集積回路を用いた無線通信システムに関して説明し。今後の課題や将来展望に関して言及した。本研究では従来のトランジスタに依存しない無線通信回路構成により、印刷法による無線通信回路の実現に向けた代替アプローチの 1 つとして期待される。本成果による無線通信デバイスに関する研究が、トリリオンセンサネットワークなど次世代 IoT 社会を実現する研究開発の加速及び実現につながることを期待する。

論文内容要旨 (英文)

2021年度入学 大学院博士後期課程

有機材料システム専攻

氏 名 Masaya Yamada



論 文 題 目 Printed Organic Schottky Diodes and Organic Transistors for
Wireless Communication Circuit

Electronic devices using organic materials are lightweight, flexible, and high biocompatibility. In addition, they are soluble in solvents, they can be fabricated in low-temperature, low-cost processes using printing methods such as inkjet printing and screen printing. Taking advantage of these characteristics, a wide variety of devices such as sensors and integrated circuits have been developed. Since wireless communication circuits can be produced by printing methods using organic materials, large quantities of devices can be produced environmentally friendly and at low cost. The realization of wireless communication circuits by printing methods using organic materials is very significant. However, it is very difficult to achieve high-speed operation of organic TFTs using printing technology and to apply them to wireless communication circuits using printing methods in terms of carrier mobility and printing resolution. This study aims to develop a wireless communication circuit by utilizing the flexibility and high biocompatibility of organic materials.

This thesis consists of the following parts:

Chapter 1 describes the introduction, purpose, and outline of the thesis.

Chapter 2 describes the development of printed organic Schottky diodes and rectifier with self-assembled monolayer for 13.56 MHz wireless communication.

Chapter 3 describes the demonstration of the printed OTFT and low-power integrated circuits.

Finally, wireless communication system using a printed organic rectifier circuit with a printed organic Schottky diode and an ultra-low-power organic CMOS integrated circuit with printed organic transistors is verified and summarized future prospects.

This research is expected to provide an alternative approach to realizing wireless communication circuits by printing method. This research on wireless communication devices based on this outcome will serve as a basic technology for accelerating research and development to realize a next-generation IoT society, such as trillion sensor networks.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

2025年 2月12日

有機材料システム研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 松井 弘之 印
副査 東原 知哉 印
副査 千葉 貴之 印
副査 横山 道央 印
副査 印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	有機材料システム専攻 氏名 山田 将也		
論文題目	Printed Organic Schottky Diodes and Organic Transistors for Wireless Communication Circuit (印刷有機ショットキーダイオードと有機トランジスタの無線通信回路応用)		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	2025年 2月 5日～ 2025年 2月12日
論文公聴会	2025年 2月12日	場 所	工学部11号館5階503会議室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	2025年 2月12日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

本学位論文は、印刷法によって作製した有機ショットキーダイオードと有機トランジスタの無線通信回路応用の研究をまとめたものである。有機半導体は常温・常圧下で塗布成膜可能であり柔軟性を持つことから、次世代エレクトロニクスへの応用が期待されている。しかしながら、従来の印刷法による有機半導体デバイスは無線通信に必要な高周波応答および低電圧動作の点において性能が不十分であった。この課題に対して山田氏は、高周波特性が期待される縦型素子の有機ショットキーダイオードの印刷法による作製、および世界最小の 200 mV で動作可能な印刷型有機 CMOS 回路を行った。

本論文の第2章では、印刷法で作製した有機ショットキーダイオードの整流回路応用について述べられた。自己組織化単分子膜を用いた電極の最適化により、 10^6 の高い整流比と 1 A cm^{-2} の高い電流密度を実現した。また、全波整流回路を試作し、13.56 MHz にて約 5 V の直流出力電圧を得ることに成功した。

第3章では、世界最小の 200 mV で動作可能な印刷相補型有機リングオシレータについて述べられた。低電圧動作のため、デュアルゲート構造の採用と自己組織化単分子膜による閾値電圧の精密制御が行われた。また、リングオシレータの消費電力は1段当たり 6 pW であり、優れた省電力性能が得られた。

第4章では、印刷法によってアンテナと有機整流回路を一体化したレクテナについて述べられた。設計したアンテナは無線通信に必要な 13.56 MHz 近傍での共振特性を有していることが確かめられた。また、アンテナと有機整流回路の集積化に成功した。

研究テーマには新規性・独自性があり、自ら研究を計画・遂行するための専門的知識を基に、研究背景・目的が正しく述べられていた。学位論文の構成は適切で、体裁も整っており、記述が論理的で、設定した研究テーマに沿った明確な結論が述べられていた。従って、本学位論文は審査基準を満たしているものと判断し、合格と判定した。

研究内容に関する研究倫理又は利益相反に係る手続き

研究内容に関する研究倫理又は利益相反に係る手続きについて確認します。手続きの有無について該当する項目の□にチェックの上、手続きを要した場合は、手続きの内容を記入してください。

☐ 本論文は、研究倫理又は利益相反に係る手続きを要する研究内容を含んでいます。

内容：

☒ 本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

学位論文を中心とし、関連のある科目について口頭により最終試験を行った結果、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断された。また、筆頭著者として査読付き国際論文2報を発表済みである。以上より、最終試験を合格と判定した。