

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360006

研究課題名(和文) 段差型高速有機トランジスタを用いたフレキシブル情報デバイス

研究課題名(英文) Flexible information devices using high-frequency step-edge organic transistors

研究代表者

工藤 一浩 (KUDO, Kazuhiro)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10195456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：ナノインプリント法と塗布技術で作製した段差構造縦型有機トランジスタ(SVC-OFET)において、2 MHz以上での高速動作素子が歩留まり良く作製可能であることを確認した。SVC-OFETを装荷したアクティブアンテナを設計し、SVC-OFETのON/OFFに対応した変調度10%以上の特性が見込まれ、作製したフレキシブル情報タにおいて5.6%の変調を確認した。また、開発した情報タグシステムの応用展開として、在宅医療用ウェアラブルセンサや生体装着型情報タグへの応用に向けた電磁波解析の検討を進めた。

研究成果の概要(英文)：In this study, step-edge vertical-channel field-effect transistors (SVC-OFETs) were fabricated by nanoimprinting and wet printing processes and SVC-OFETs showed high cutoff frequencies of approximately 2 MHz by optimizing the device structure. This high performance of SVC-OFET is suitable to the manufacture of radio-frequency identification (RFID) tags. We demonstrate new active antenna elements for RFID tags in RF (radio frequency 13.56 MHz) region. High modulation more than 10% was estimated by simulation and the fabricated RF-ID tags on a flexible substrate showed modulation factor of 5.6%. Furthermore, we demonstrate that the SVC-OFET has advantages for wearable sensors for the future application fields.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用物性・結晶工学

キーワード：有機トランジスタ 情報タグ 有機半導体 印刷プロセス ウェアラブルセンサ

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内外の研究動向

近年、印刷技術により低環境負荷、低コストでフレキシブル基板に電子回路を作製するプリンテッドエレクトロニクスが注目されている。また、国内外の研究機関から高いキャリア移動度と動作速度も 1 MHz を越える有機薄膜トランジスタ(TFT)が報告され、有機材料の特長をいかした電子情報機器応用が期待されている。しかし、Si 系 TFT 部分を有機系 TFT に置き換えただけでは動作速度、電力面で十分な特性を得ることは難しいのが現状である。

(2) 研究実施状況

当研究グループはこれまでに新規有機トランジスタの開発とその応用に関する研究を進めてきた。特に有機薄膜の電界効果は世界初の有機トランジスタに関する論文と位置づけられ、縦型有機トランジスタと発光トランジスタ、新型電荷移動錯体 TFT とナノワイヤトランジスタ、高速有機トランジスタは国内外からも高い評価を受けている。このような新機能有機デバイス開発には、本申請のような、分子機能の詳細な解明と実用化に適したデバイス設計技術が不足しており、基礎研究と応用研究を結びつける開発研究を推進する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、有機トランジスタ、アンテナの設計・シミュレーション、有機半導体物性評価、有機材料・印刷プロセスを専門とする研究者が協力して、実用的フレキシブル情報処理デバイス実現に向けた実証研究を行うことを目的とする。特に申請者らが開発した縦型有機トランジスタおよび積層型分子秩序構造膜の金属-絶縁体相転移現象に基づく新型有機トランジスタの高速動作と低オン抵抗を実現し、印刷技術で柔軟性を有するプラスチック基板上に作製したアクティブアンテナの送受信特性の検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 情報処理デバイスに必要な有機トランジスタ動作の高速化に必要な段差構造縦型有機トランジスタ、および分子積層構造 FET を作製し、動作速度を中心とした特性評価を行う。また、提案する新型有機 FET 構造の最適化とゲート絶縁膜表面化学修飾により、電荷移動状態を制御した新型素子の動作特性評価と動作メカニズムの検証を行う。

(2) 新型電界効果トランジスタとループアンテナを複合化したアクティブアンテナを作製し、電波変調特性等の基礎的な動作性能の検証を行う。

(3) 簡単プロセスで低価格化が望めるプリンタブル作製技術を適用し、塗布型有機トランジスタを用いたフレキシブル情報処理デバイスの実現を目指す。

(4) 次世代フレキシブル情報処理デバイスへの応用可能性としてウェアラブルセンサの基礎研究を進める。

4. 研究成果

本研究期間(平成 23 年度-25 年度)に以下の 4 項目について研究を進めた結果を示す。

(1) 高速有機トランジスタの基礎特性

独自に開発した段差構造縦型有機トランジスタ(SVC-OFET: Step-edge Vertical Channel Organic Field Effect Transistor)において短チャネル化が可能となり、塗布型ペンタセンを用いた簡単プロセスで高性能な有機トランジスタを実現した。図 1 に SVC-OFET の素子構造を示す。本素子は、ゲート電極段差部分にサブミクロン(500-800 nm)の短チャネルを作製可能であり、自己整合したチャネルをウェットプロセス、ナノインプリント法などの印刷法で容易に作製できる利点を有する。

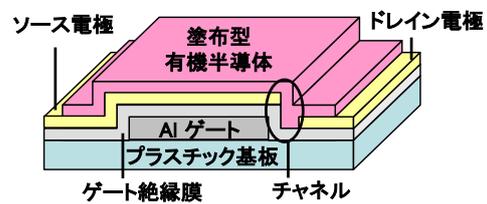


図 1 SVC-OFET の素子構造

半導体材料として塗布可能な p 型ペンタセン(Tips Pentacene)、を用いた素子の高周波特性を測定した。トランジスタの特性改善のために、チャネル長の縮小(600 nm)、浮遊容量の影響を少なくするためにゲート電極幅の縮小(10 μm)を行った結果、2 MHz 以上での高速動作素子が歩留まりよく作製可能であることを確認した。トランジスタが入力信号に追従して信号を出力することができるかを判断するカットオフ周波数について評価した結果を図 2 に示す。

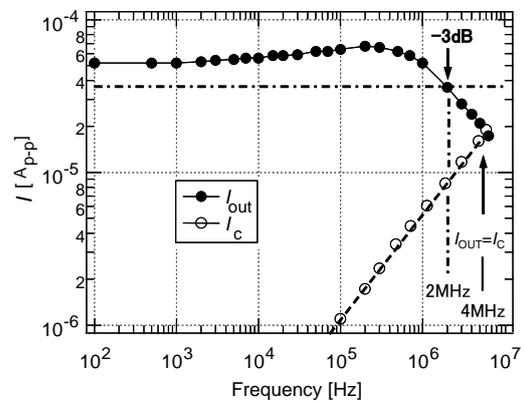


図 2 SVC-OFET の周波数特性

SVC-OFETにおいて 100 Hz でのドレイン電流( $I_{DS}$ )から -3 dB となる周波数をカットオフ周波数( $f_{cd}$ )と定義した場合とトランジスタ

のゲート充電電流  $I_c$  と  $I_{Ds}$  が一致するカットオフ周波数を  $f_{co}$  と定義した場合、それぞれ 2 MHz と 4 MHz という高いカットオフ周波数得られた。

### (2) アクティブアンテナの設計と基礎特性

アクティブアンテナとして、通常のループアンテナに段差型有機トランジスタ (SVC-OFET) を装荷することにより、SVC-OFET の ON/OFF に対応したインピーダンス変化によるアンテナ系の入出力特性を詳細に検討し、送受信特性に必要なアクティブアンテナの基本設計を進めた。図 3 にループアンテナに SVC-OFET を組み込んだアクティブアンテナとリーダーアンテナによる 13.56MHz 帯情報タグシステムを示す。

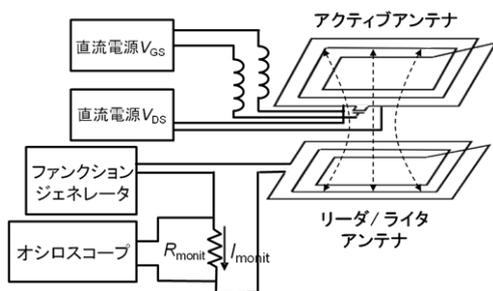


図 3 情報タグシステムの測定模式図

また、数値シミュレーションによる素子の基本パラメータの絞り込みを行い、数値シミュレーションからさらなる素子設計を行った。図 3 に示す測定系について、ネットワークアナライザを用いて測定を行い、変調度  $m$  を求めた結果を図 4 に示す。その結果、アクティブ素子である SVC-OFET のオン抵抗が 200k $\Omega$  以下において実用的情報タグシステムに必要な 10% 以上の変調度が見込まれることが分かった。

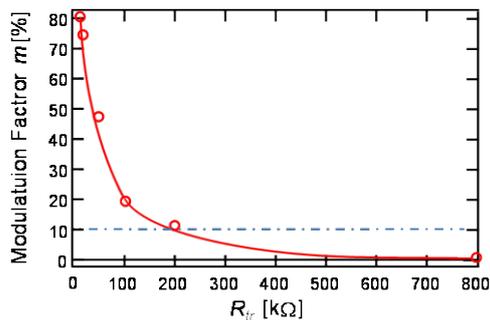


図 4 SVC-OFET のオン抵抗に対する変調度変化

新規にプラスチック基板上に作製した情報タグシステムにおいて、変調度 5.6% の特性が得られた。目標とする 10% 以上の変調度を得られなかった原因として、オン抵抗の低下がまだ不十分であることと、アクティブアンテナとリーダーアンテナの結合係数が低

かったことがあげられる。今後、電極/半導体界面処理とアンテナ巻数の増加によって目標を達成できる見込みである。

### (3) アクティブアンテナ材料と作製技術

有機スイッチングトランジスタを組み込んだアクティブアンテナ部分の作製技術を検討した。また、各種塗布型有機半導体の電極間での接触抵抗が低く、アンテナのインピーダンスへの影響が最小限となる塗布電極材料とインクジェットによる印刷法の検討を行った。図 5 に示すゲート電極段差を形成できるナノインプリント法によって、プラスチック基板に簡易に SVC-OFET が作製でき、良好なトランジスタ特性を示すことを確認した。

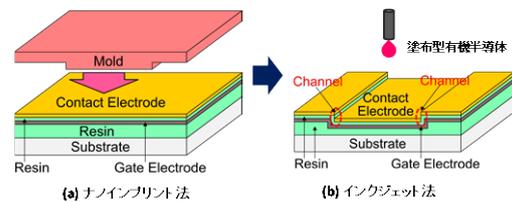


図 5 ナノインプリント法とインクジェット法による素子作製法

### (4) 次世代フレキシブル情報処理デバイスへの応用可能性

人体そのものを信号伝送路として利用する“人体通信”が注目されており、開発した情報タグシステム的应用展開として、在宅医療用ウェアラブルセンサや生体装着型ワイヤレス情報タグへの応用に向けた電磁界解析と適用可能性について検討を進めた。まず、各種情報を伝送するための最適な搬送波周波数について検討した。図 6 に示すように、数 MHz ~ 数 10MHz 程度の搬送波周波数であれば、人体周辺に均一な電界分布を発生可能であることがわかった。そこで、図 7(a) に示すように、簡単な送受信機と腕を模擬した生体等価ファントムを試作し、信号伝送実験を行ったところ、同図(b)に示すように、20MHz の信号を伝送することができた。

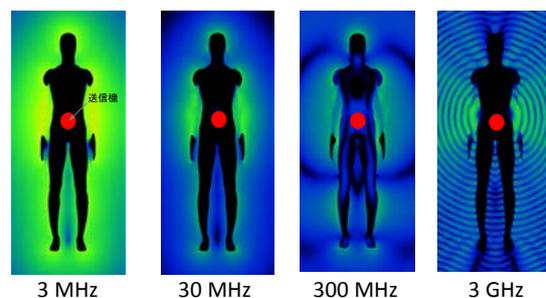
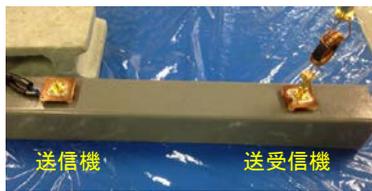
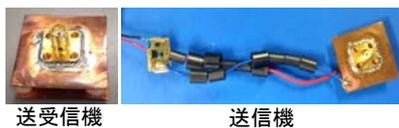
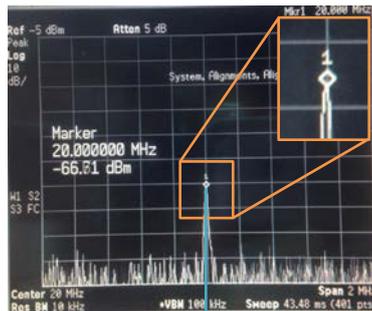


図 6 様々な周波数による人体周辺の電界分布 (計算機シミュレーション結果)



信号伝送実験の様子  
(a) 実験システム



20 MHz  
(b) 計測結果

図7 人体通信の実験的評価

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 18 件)

- ① Ho-Yu Lin, Masaharu Takahashi, Kazuyuki Saito, and Koichi Ito, Design of Miniature Implantable Tag Antenna for Radio-Frequency Identification System at 2.45 GHz and Received Power Analysis, *IEICE Transactions on Communications*, 査読有、vol.E97-B, no.1, pp.129-136, 2014.  
DOI: 10.1587/transcom.E97.B.129
- ② Ho-Yu Lin, Masaharu Takahashi, Kazuyuki Saito, and Koichi Ito, “Characteristics of electric field and radiation pattern on different locations of the human body for in-body wireless communication,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 査読有、vol.61, no.10, pp.5350-5354, 2013.  
DOI: 10.1109/TAP.2013.2272672
- ③ K. Kudo, D. Tsutsumi, H. Yamauchi, S. Kuniyoshi and M. Sakai: Vertical Channel Organic Transistors for Information Tag and Active Matrix Display Applications, *Trans. Mat. Res. Soc. Japan*, 査読有、vol.38, no.3, pp.369-372, 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.14723/tmrj.38.369>
- ④ Ho-Yu Lin, Masaharu Takahashi, Daisuke Takei, Kazuyuki Saito, and Koichi Ito, “Performance evaluation and experiment of an implantable RFID tag antenna in human arm for in-body wireless communication,” *IEICE Communications Express (ComEX)*, 査読有、vol.2, no.8, pp.347-351, 2013.  
DOI: 10.1587/comex.2.347
- ⑤ F. Bussolotti, S. Kera, K. Kudo, A. Kahn and N. Ueno: Gap states in pentacene thin film induced by inert gas exposure, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有、vol.110, 267602-1-5, 2013.  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.267602
- ⑥ Nozomi Haga, Kazuyuki Saito, Masaharu Takahashi, and Koichi Ito, “Equivalent circuit of intrabody communication channels inducing conduction currents inside the human body,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 査読有、vol.61, no.5, pp.2807-2816, 2013.  
DOI: 10.1109/TAP.2013.2246534
- ⑦ Ho-Yu Lin, Masaharu Takahashi, Kazuyuki Saito and Koichi Ito, Performance of implantable folded dipole antenna for in-body wireless communication, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 査読有、vol.51, no.3, pp.1353-1370, 2013.  
DOI: 10.1109/TAP.2012.2227099
- ⑧ K. Kudo, S. Kuniyoshi, H. Yamauchi, M. Iizuka and M. Sakai, Vertical Channel Organic Transistors for Information Tag Applications, *IEICE Trans. Electron.*, 査読有、vol.E96-C, no.3, pp.340-343, 2013.  
DOI: 10.1587/transele.E96.C.340
- ⑨ 工藤一浩, フレキシブルディスプレイと有機電子デバイス, *未来材料*, 査読有、vol.12, pp.27-31, 2012.
- ⑩ K. Kudo, H. Yamauchi and M. Sakai, Nanoimprinted Step-Edge Vertical-Channel Organic Transistors, *Jpn. J. Appl. Phys.* 査読有、vol.51, 11PD05-1-4, 2012.  
DOI: 10.1143/JJAP.51.11PD05
- ⑪ Chia-Hsien Lin, Kazuyuki Saito, Masaharu Takahashi and Koichi Ito, A Compact Planar Inverted-F Antenna for 2.45 GHz On-Body Communications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 査読有、vol.50, no.9, pp.4422-4426, 2012.  
DOI: 10.1109/TAP.2012.2207038
- ⑫ Z. Li, Z. Du, M. Takahashi, K. Saito, K. Ito, Reducing mutual coupling of MIMO antennas with parasitic elements for mobile terminals, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 査読有、vol.60, no.2, pp.473-481, 2012.  
DOI: 10.1109/TAP.2011.2173432
- ⑬ Z. Li, K. Saito, M. Takahashi, K. Ito, Small wearable antenna with folded ground for body-centric wireless communications, *IEICE Transactions on Communications*, 査読有、vol.E95-B, no.1, pp.109-112, 2012.  
DOI: 10.1587/transcom.E95.B.109

- ⑭ N. Haga, K. Saito, M. Takahashi, K. Ito, Proper derivation of equivalent-circuit expressions of intra-body communication channels using quasi-static field, 査読有, vol.E95-B, no.1, pp.51-59, 2012.  
DOI: 10.1587/transcom.E95.B.51
- ⑮ K. Kudo, M. Sakai, Molecular Manipulation Technologies Using an Electric Field and Application to Organic Nanoelectronics, IEICE Transactions on Electronics, 査読有, vol.E94-C, no.12, pp.1816-1823, 2011.  
DOI: 10.1587/transele.E94.C.136
- ⑯ 工藤一浩, フレキシブルデバイスを目指した有機トランジスタの開発, 化学経済, 査読有, vol.9, pp.42-46, 2011.
- ⑰ 宇野由美子, 齊藤一幸, 高橋応明, 伊藤公二, 腕部装着型広帯域アンテナ, 電子情報通信学会論文誌B, 査読有, vol.J94-B, no.9, pp.1114-1121, 2011.
- ⑱ F. Pu, H. Yamauchi, H. Iechi, M. Nakamura, K. Kudo, Organic Complementary Inverters Based on Step-Edge Vertical Channel Organic Field-Effect Transistors, Appl. Phys. Express, 査読有, vol.4, 054203-1-3, 2011.  
DOI: 10.1143/APEX.4.054203
- [学会発表] (計 49 件)
- ① Chia-Hsien Lin and Koichi Ito, Dual - mode Wearable Antenna for On-/off-body Wireless Communications, Proceedings of the International Workshop on Antenna Technology 2014, 2014年5月5日, Sydney (Australia), (招待講演)
- ② K. Kudo, S. Yamaguchi, M. Sakai, Step-edge Vertical Channel Organic Transistors and Flexible Device Applications, India-Japan Workshop on “Biomolecular Electronics and Organic Nanotechnology for Environment Preservation”, 2013年12月14日, Delhi (India), (基調講演)
- ③ K. Kudo, Vertical Channel Organic Transistors for Information Tag and Display Applications, International Symposium on Organic Optical and Electronic Materials and Devices, 2013年3月8日, Osaka, (招待講演)
- ④ K. Kudo, M. Sakai, T. Okamoto, H. Yamauchi, S. Kuniyoshi, Thermal press crystallization of organic materials and its application to flexible electronic devices, 12th International Discussion & Conference on Nano Interface Controlled Electronic Devices, 2012年10月25日, Gyeongju (Korea), (基調講演)
- ⑤ K. Kudo, D. Tsutsumi, H. Yamauchi, S. Kuniyoshi, M. Sakai and M. Iizuka, Vertical Channel Organic Transistors for Information Tag Applications, 7th International Symposium on Organic Molecular Electronics, 2012年6月7日, Tokyo, (招待講演)

- ⑥ K. Kudo, H. Yamauchi, M. Sakai, Common Gate Vertical Channel Transistors Using Printing Process, 2012 MRS Spring Meeting & Exhibit, San Francisco (USA), 2012年4月13日, (招待講演)
- ⑦ K. Kudo, M. Sakai, H. Yamauchi, M. Nakamura, Fabrication of Organic Conductive Wires and Molecular Break Junction, India-Japan Workshop on Biomolecular Electronics & Organic Nanotechnology for Environment Preservation, 2011年12月9日, Himeji, (招待講演)
- ⑧ K. Kudo, M. Sakai, H. Yamauchi, Vertical Channel Transistors using Printable Materials, Eco-materials and Eco-innovation for Global Sustainability, 2011年11月30日, Osaka, (招待講演)
- ⑨ M. Nakamura, T. Okamoto, S. Masuda, M. Sakai, K. Kudo, Chemical Carrier Doping into Large-IP Organic Semiconductors, The 6th International Workshop on Electronic Structure and Processes at Molecular-Based Interfaces, 2011年9月28日, Karlsruhe (Germany), (招待講演)
- ⑩ K. Kudo, Vertical Type Organic Transistors and Application to Flexible Sheet Displays, The International Conference in Display Taiwan 2011, 2011年6月14日, Taipei (Taiwan), (招待講演)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://mole.te.chiba-u.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

工藤 一浩 (KUDO, Kazuhiro)  
千葉大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10195456

### (2) 研究分担者

酒井 正俊 (SAKAI, Masatoshi)  
千葉大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：60332219

伊藤 公一 (ITO, Kouichi)  
千葉大学・フロンティア医工学センター・教授  
研究者番号：90108225