

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目： 基盤研究（B）
 研究期間： 2007 ～ 2009
 課題番号： 19360155
 研究課題名（和文） 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-speed organic transistors
 研究代表者
 工藤 一浩（KAZUHIRO KUDO）
 千葉大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号： 10195456

研究成果の概要（和文）：短チャネル構造を有する新しい段差型縦構造有機トランジスタ（SVC-OFET）を開発し、アンテナと有機トランジスタを一体化した次世代フレキシブル情報処理デバイスの基礎研究を行った。SVC-OFET の作製条件の最適化と表面処理等の改善を行った結果、高い電流密度と過去報告例のない高い動作周波数(1.5 MHz)を実現した。また、SVC-OFET とループアンテナを一体化させた情報タグ用アクティブアンテナを提案し、シミュレーションおよび素子特性を調べた結果、外部からの電磁波に対してのアンテナ応答を制御できる可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：A novel structure, step-edge vertical-channel organic field-effect transistor (SVC-OFET), have been developed for achieving the short channel length. SVC-OFETs showed excellent device performances having a high current and high cutoff frequency of approximately 1.5 MHz. we propose new active antenna elements which have a loop antenna combined with SVC-OFETs. By choosing the structure and materials of the SVC-OFETs, the characteristics of the active antenna can be controlled. The active antenna is expected for the application to printed radio-frequency identification tag (RF-ID Tag).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野： 有機エレクトロニクス

科研費の分科・細目：5103 電子デバイス・電子機器

キーワード： 電子デバイス・集積回路、フレキシブル有機デバイス

1. 研究開始当初の背景

近年、国内外の研究機関からアモルファス Si を越えるキャリア移動度を有する有機薄膜

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るようになった。特に有機材料を用いた電

子機器は軽量、柔軟性、耐衝撃性に加えて、印刷等の簡単プロセスによる低価格化が期待されているが、従来の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非常に難しい。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、基礎研究を重視した基盤研究を推進する必要があった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、有機半導体などの有機導体を用いた電氣的スイッチング現象を利用した新型有機トランジスタを開発し、次世代フレキシブル情報処理デバイスの基礎研究を行う。

(2) 高い移動度を有する高速有機トランジスタの電氣的スイッチング現象を利用した有機電界効果トランジスタを用い、従来実現が難しいとされていた高速化と低オン抵抗を有するフレキシブル有機トランジスタを実現する。

(3) フレキシブル性を有する高速スイッチング素子をアンテナ部分に組み込んだ情報処理デバイスの設計を行い、情報タグ(RF-ID Tag)等の実用デバイスに結びつくアクティブアンテナと論理回路の基礎特性を実証することを最終目標とする。

3. 研究の方法

(1) 有機トランジスタの高性能化とアクティブアンテナの基礎的設計に関する作製技術に焦点を絞り研究を進めた。高速有機トランジスタの基礎特性では、ステップエッジを利用した段差型縦構造有機トランジスタ(SVC-OFET)の素子作製条件の最適化(段差形状、ペンタセン蒸着条件)と表面処理(hexamethyldisilazane (HMDS)処理)の改善を行った。アンテナの設計では、送受信アンテナの基礎特性から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。

(2) アクティブアンテナとして印刷可能な線幅と電極材料の抵抗から作製可能なサイズのループアンテナを設計し、有限差分時間領域法をベースとした専用高速数値計算機を活用し、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った。シミュレーションによるアクティブアンテナの設計に基づき、有機スイッチングトランジスタを組み込んだ情報タグ用アクティブアンテナ部分の作製技術を検討し、低抵抗金属ペーストと溶媒溶解性を有する有機半導体材料、有機絶縁膜材料と作製条件を検討した。

(3) 作製したアクティブアンテナのMHz帯からGHz帯での入反射特性を測定した。また、有機半導体材料、有機絶縁材料の特性ならびに電極材料の接触抵抗をFET特性のチャネ

ル長依存性から評価した。

4. 研究成果

(1) 段差型縦構造有機トランジスタ(SVC-OFET)の素子作製条件の最適化

図1に本研究で新たに提案するトップコンタクト(TC)型SVC-OFETの素子構造を示す。SVC-OFETのチャネルは絶縁膜で覆われたライン状Alゲート電極の段差側壁に縦方向に形成され、チャネル長Lはゲート電極の膜厚程度となる。ソースおよびドレイン電極は、基板に対して斜め方向からAuを蒸着することでゲート電極のエッジがシャドウマスクとして働き、形成される。また、ボトムコンタクト(BC)型の作製も可能であり、ウェットプロセスによる有機半導体の成膜にも対応できる。有機半導体にはキャスト法により成膜した6,13-bis(triisopropylsilylethynyl)pentacene (TIPS-ペンタセン)を、絶縁膜にはPE-CVDにより成膜したSiO₂ (200 nm)およびSiN (50 nm)を主に用いた。チャネル長は250-1000 nm、チャネル幅は3 nmとした。SVC-OFETは自己整合的にチャネルを形成することができるため、低コストでの作製が可能である。

TIPS-ペンタセンを用いたチャネル長250 nmのBC型SVC-OFETの静特性を図2に示す。従来の横型OFETと比べて低電圧で大きな電流が流れている。この素子のソース接地回路で測定した周波数特性を図3に示す。SVC-OFETの寄生容量は非常に小さいため、1 MHzにおいても変位電流は出力電流に比べて小さい。低周波数での出力振幅から-3 dBとなる周波数をカットオフ周波数と定義すると、過去報告例のない1.5 MHzとなった。

以上のように、従来低コストでの作製が困難であったサブマイクロオーダーのチャネル長かつ低寄生容量を持つ有機トランジスタをシンプルかつ低コストプロセスで作製することに成功した。また、TC・BC型およびドライ・ウェットプロセスでのSVC-OFETの作製が可能であることを実証した。さらに、移動度が小さい塗布型有機半導体を用いたSVC-OFETにおいて、低電圧、大電流駆動、1 MHzを超える高速動作を実現した。

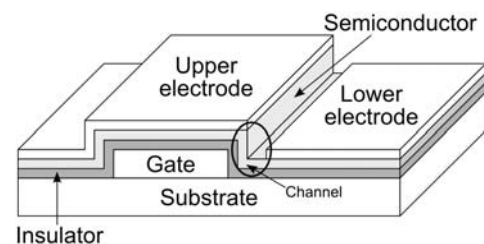


図1 TC型SVC-OFETの素子構造

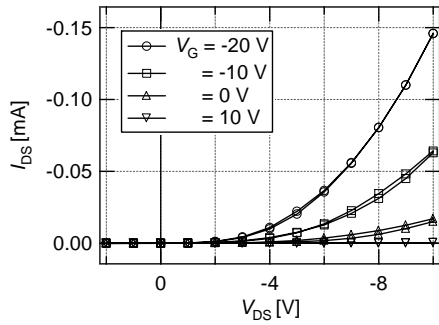


図2 TIPS-ペンタセン SVC-OFET の静特性

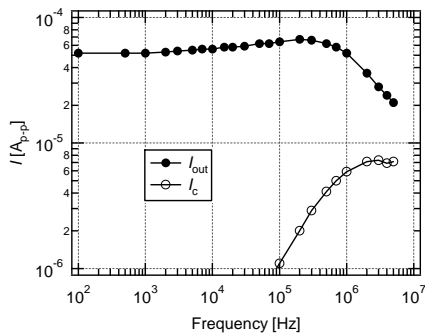


図3 SVC-OFET の周波数特性

(2) アクティブアンテナとして印刷可能なループアンテナの設計

アンテナと有機トランジスタを一体化させたアクティブアンテナを設計した。このアクティブアンテナは図4に示すように送受信機能を持つループアンテナ部に段差型有機トランジスタを直接組み込んだ構造を持つ。また、ループ状のアンテナをまたぐように有機トランジスタを配置し、この有機トランジスタのゲート電極に情報を含んだ信号を入力することにより、アンテナ自身の入出力特性を変化させる。一方、このような構造をもつアクティブアンテナはアンテナと有機トランジスタを簡単プロセスで作製することができ、軽量、柔軟性、印刷プロセスが可能といった特徴を持つ。

図4に示した FET 挿入アクティブアンテナにおいて FET のオン・オフ動作に対応した S パラメータを計算した結果を図5に示す。シミュレーション結果から、特に 2 - 5 MHz の周波数帯で FET のオン・オフ時の S パラメータの変化が大きいことを確認した。さらに FET を 3 箇所挿入した場合は 1 箇所挿入した場合よりも大きな変化が得られた。また、FET 挿入位置によってもアンテナ特性を変化することを確認した。

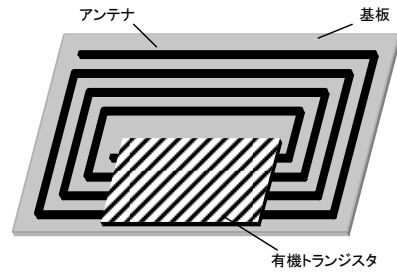


図4 アクティブアンテナの構造

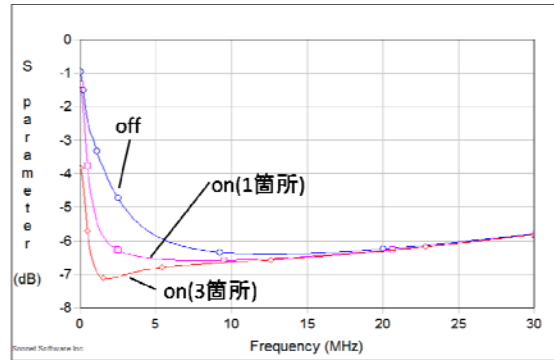


図5 トランジスタ挿入の結果

(3) アクティブアンテナの MHz 帯から GHz 帯での入反射特性

作製したアクティブアンテナ素子と比較のために有機半導体層を形成しないダイポールアンテナをネットワークアナライザに接続し、各々についてリターンロス特性を測定した結果を図6に示す。この有機半導体膜を有するアクティブアンテナは、ダイポールアンテナのみ(有機半導体膜なし)に比べ、リターンロスが小さく、若干高周波数側にシフトしているという結果となった。これより、有機 FET 部分の抵抗値、キャパシタンスの変化により、アンテナ特性に変化があることがわかった。

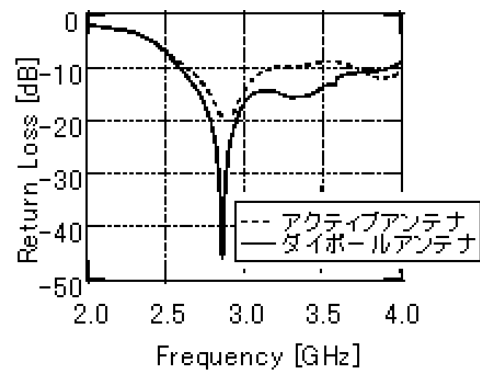


図6 アクティブアンテナ(有機 FET 有り)とダイポールアンテナ(有機半導体無し)の特性

本研究では、アンテナと有機トランジスタを一体化させたアクティブアンテナを提案した。また、この素子は、アンテナと一体化させた有機トランジスタに信号を入力することによって変化するアンテナの特性を利用して、外部からの電磁波に対してのアンテナの応答を制御できる可能性が示された。

本研究期間で得られた研究成果は、関連する国内学会（応用物理学会、電子情報通信学会等）、国際会議（MRS, SSDM等）における学会発表ならびに論文として発表した。

今後、有機材料の特長であるフレキシブル性を活かすためにプラスチック基板上でのプロセス技術の開発を行い、さらに商品化に必要な高速情報通信機能や多機能化に向けたデバイス設計と性能向上に関して、千葉大学の研究グループと東洋大学や産業技術総合研究所との共同研究を計画中である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

1. K. Kudo, T. Takano, H. Yamauchi, M. Iizuka, and M. Nakamura, High-Speed Operation of Step-Edge Vertical-Channel Organic Transistors with Pentacene and Tips-Pentacene, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49, 04DK03(4pages) (2010)、査読有
2. H. Iechi, Y. Watanabe, H. Yamauchi, K. Kudo: Organic Inverter Using Monolithically Stacked Static Induction Transistors, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 49, 01AB12 (4 pages) (2010)、査読有
3. M. Sakai, Y. Ito, T. Takahara, M. Ishiguro, M. Nakamura and K. Kudo, Ferroelectriclike Dielectric Response and Metal-Insulator Transition in Organic Insulator-Gate Insulator Interface, *J. Appl. Phys.*, 107, 043711(2010)、査読有
4. 工藤一浩、大森 裕、岩本光正、有機エレクトロニクスの技術進展と展望、電子情報通信学会論文誌、J92-C, 8, 488-497(2009)、査読有(招待論文)
5. F. Pu, Y. Watanabe, H. Yamauchi, M. Nakamura, K. Kudo, Effect of gate insulating layer on organic static induction transistor characteristics, *Thin Solid Films*, 518, 514-517 (2009)、査読有
6. T. Takano, H. Yamauchi, M. Iizuka, M. Nakamura and K. Kudo, High-Speed Operation of Vertical Type Organic Transistors Utilizing Step-Edge Structures, *Appl. Phys. Express*2, 071501 (2009)、査読有
7. M. Nakamura, H. Ohguri, N. Goto, H. Tomii, M. Xu, T. Miyamoto, R. Matsubara, N. Ohashi, M. Sakai, K. Kudo, Extrinsic limiting factors of carrier transport in organic field-effect transistors, *Appl. Phys. A*, 95, 73-80(2009)、査読有
8. H. Iechi, Y. Watanabe, H. Yamauchi and K. Kudo: Characterization of Zinc Oxide and Pentacene Thin Film Transistors for CMOS Inverters, *IEICE Trans. Electron.*, E91-C, pp.1843-1847(2008)、査読有
9. H. Yamauchi, Y. Watanabe, M. Iizuka, M. Nakamura and K. Kudo: Characterization of Organic Static Induction Transistors with Nano-Gap Gate Fabricated by Electron Beam Lithography, *IEICE Trans. Electron.*, E91-C, pp.1852-1855(2008)、査読有
10. 家地洋之、渡邊康之、山内博、工藤一浩 : 酸化亜鉛とペンタセン薄膜トランジスタを用いたコンプリメンタリー型論理素子の作製と評価、電気学会論文誌、128, 213-219 (2008)、査読有
11. M. Sakai, H. Miyata, K. Itami, M. Nakamura and K. Kudo, Spontaneous Activation Process for Self-aligned Organic Nanochannel Transistors, *Appl. Phys. Express* 1, 081802(2008)、査読有
12. M. Sakai, H. Sakuma, Y. Ito, A. Saito, M. Nakamura and K. Kudo, Ambipolar Field Effect Transistor Characteristics of (BEDT-TTF)(TCNQ) Crystals and Metal-Like Conduction Induced by a Gate Electric Field, *Phys. Rev. B*, 76, 045111-1-5(2007)、査読有

[学会発表] (計 32 件)

(主な国際会議発表)

1. K. Kudo, Vertical-Type Organic Thin-Film Transistors, 6th International Thin-Film Transistor Conference 2010 (Himeji, Japan), *Proc. 6th ITC*, pp.74-77 (2010). (Invited)
2. N. HAGA, and K. ITO, Frequency dependence of on-body channels with top-loaded monopole antennas in the range of HF to UHF, *Asia-Pacific Microwave Conference 2009* (Singapore), pp.2208-2211(2009).
3. K. Kudo and M. Nakamura, New Fabrication Process of Vertical-Type Organic TFTs for High-Current Drivers, *IMID2009* (Ilsan, Korea), *Proc. IMID2009*, p.25-1 (2009). (Invited)
4. M. Sakai, Y. Ito, T. Takahara, M. Nakamura and K. Kudo, Phase Transition Induced by a Gate Electric Field in (BEDT-TTF)(TCNQ) Single Crystalline Field Effect Transistor, *SSDM2009* (Sendai, Japan), Abstracts, P-10-4 (2009).
5. K. Kudo, T. Takano, H. Yamauchi, M. Iizuka and M. Nakamura, High-Speed Operation of Step-Edge Vertical-Channel Organic Transistors, 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2009) (Sendai, Japan), Abstracts, F-4-2 (2009).

6. M. Sakai, Y. Tada, Y. Ito, T. Takahara, M. Nakamura and K. Kudo, Growth and Electrical Properties of Organic Nanowires using Charge Transfer Complexes, MRS Spring Meeting 2009 (San Francisco, USA), AA9.25 (2009).
7. K. Kudo: Vertical Channel Organic Transistors with Step-Edge Structure, NonoForum & IDC-NICE Joint Conference 2008 (Pohang, Korea) , Proc. IDC-NICE2008 pp.46-47 (2008). (Invited)
8. K. Kudo, Recent Progress on Flexible Organic Transistors, 2008 Workshop on Industrial Trends of Flexible Electronics and RFID (Tainan, Taiwan), Workshop Abstract, pp.1-4 (2008). (Invited)
9. K. Kudo: Organic Field-effect Transistors with Step-edge Structure, 8th International Meeting on Information Display, International Display Manufacturing Conference and Asia Display (IMID/IDMC/ASIA 2008) (Ilsan, Korea), Proc. IMID2008, pp.91-93 (2008) (Invited)
10. K. Kudo, Vertical Channel Organic Transistors with Step-edge Structure, NonoForum & IDC-NICE Joint Conference 2008 (Pohang, Korea) , Proc. IDC-NICE2008 pp.46-47 (2008). (Invited)
11. K. Kudo, K.Nakamura, T.Hata and A. Yoshizawa: Active Matrix Drive of Flexible Sheet Displays Using MIS-type Organic Light-emitting Transistors, IDW' 07 (Sapporo), AMD4/OLED4-2(2007). (Invited)
12. K. Kudo, M. Sakai and M. Nakamura: Organic Static Induction Transistors, MRS Fall Meeting 2007(Boston, USA), F1.7 (2007). (Invited)
13. K. Kudo: Vertical Type Organic Transistors for Flexible Opto-electric Devices, 2007 International Conference on Solid State Devices and Materials, SSDM 2007 (Tsukuba), Extended Abstracts SSDM, PP.1096-1097 (2007). (Invited)
14. K. Kudo: Vertical Type Organic Transistors and Flexible Display Applications, 7th International Meeting on Information Display (Daegu, Korea) , Digest of Technical Papers pp.168-169 (2007). (Invited)

(主な国内学会発表)

15. 工藤一浩、フレキシブル有機デバイスの開發現状と将来展望、東京大学新領域創成科学シンポジウム「持続可能社会を支えるマテリアルサイエンスイノベーション」(柏市)、シンポジウム資料、pp.12-13(2009). (招待講演)
16. 前田 悠, 高野智輝, 山内 博, 飯塚正明, 国吉繁一, 酒井正俊, 中村雅一, 工藤一浩、情報タグ用高速有機 FET とアンテナ特性

の検討、電子情報通信学会, 2009年ソサイエティ大会(新潟), 講演論文集, C-13-5(2009).

17. 工藤一浩、有機薄膜トランジスタと界面制御、電気学会, フィルムベース有機デバイス第1回シンポジウム(東京), シンポジウム資料, pp.36-40(2009).
18. 工藤一浩: 有機半導体デバイスの将来展望と実装技術、第23回エレクトロニクス実装学会講演大会(横浜)、講演論文集、pp.219-220(2009). (招待講演)

上記以外に講演 14 件

(なお、論文番号 1 と講演論文 5 は注目論文として紹介された。<http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20090928/175731/>)

[図書] (計 3 件)

1. Y. Watanabe, M. Nakamura and K. Kudo, Vertical-Type Organic Transistors, Organic Electronics –Materials, Processing, Device and Applications-, CRC Press. (Ed., Franky So) pp.293-318(2009).
2. 工藤一浩: 有機半導体の展開、シーエムシー出版(総頁 283 頁); 第1章3節; 有機トランジスタの展開、pp.27-35 (2008年10月25日)
3. 工藤一浩、中村雅一: 有機薄膜形成とデバイス応用展開、シーエムシー出版(総頁 255 頁); 第2章2節; 蒸着法による有機トランジスタの作製と評価、pp.22-30(2008年1月11日)

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

工藤 一浩 (KAZUHIRO KUDO)

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

伊藤 公一 (KOICHI ITO)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90108225

(3) 連携研究者

酒井 正俊 (MASATOSHI SAKAI)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60332219