

染谷 隆夫

東京大学工学系研究科 教授

## 大面積ナノシステムのインタフェース応用

### § 1. 研究実施の概要

大面積ナノシステムのインタフェース応用を目指し、ナノ材料からシステム技術という広範なエレクトロニクス技術を統合した新しいデバイス研究開発を進めている。初年度より、以下の要素技術に関する研究に取り組み、ナノシステムの礎を築いてきた。

大面積デバイス技術の開発においては、自己組織化単分子膜を用いた低電圧駆動有機トランジスタおよび有機メモリの作製技術の確立と新しいエレクトロニクスへの展開研究を行ってきた。これまでに2Vで駆動する低電圧駆動の高性能有機トランジスタを実現し、これを用いた有機SRAMを試作した。さらに、独自のナノ薄膜製膜技術および高分子表面修飾技術を開発し、電気的性能を堅持したまま曲率半径 0.1-0.3mm まで折り曲げることができる有機 CMOS 集積回路を実現するとともに、医療用途への応用を示した。

ナノ印刷の研究項目については、インク調整技術とインクジェットノズルを開発することで、有機半導体上に1~2ミクロンの電極を安定して描画できる技術を整えた。このアトリットルインクジェット技術を用いて40V駆動電圧で2.26kHzと高周波数応答なトランジスタ回路を実現した。更にゲート絶縁膜に自己組織化単分子膜を用い印刷技術で作製したデバイスとしては世界最大のトランスコンダクタンス 760 マイクロ S/mm を実現した。

大面積集積回路設計と実証研究においては、2V 有機 CMOS 回路とインクジェット印刷配線を用いたユーザ・カスタマイザブル・ロジック・ペーパー(UCLP)と、20V 有機 CMOS デジタル回路、フローティングゲートによるばらつき補正技術を用いた 20V 有機 CMOS アナログ回路および 100V 有機 PMOS 整流器を集積したシステムオンフィルム(SoF)による 100V 交流電力計の実現可能性について実証した。

以上のとおり、各項目の要素技術を確立し、今後の集積化への道筋が明確になるなど当初の研究計画以上の成果が挙げられている。

## § 2. 研究実施体制

### (1)「染谷隆夫」グループ

①研究分担グループ長: 染谷 隆夫 (東京大学工学系研究科、教授)

#### ②研究項目

- ・大面積デバイス技術の開発

### (2)「桜井貴康」グループ

①研究分担グループ長: 桜井 貴康 (東京大学生産技術研究所、教授)

#### ②研究項目

- ・大面積集積回路設計

### § 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

#### (3-1)本郷グループ

本年度、本郷グループでは大面積ナノシステムの基盤研究として、より具体的には下記の研究を行った。

##### (3-1-1)自己組織化単分子膜を用いた大面積フレキシブル有機 CMOS の開発と応用

自己組織化ナノ機能の研究項目については、自己組織化単分子膜を用いた低電圧駆動有機トランジスタおよび有機メモリの作製技術の確立と素子構造の最適化を行ってきた。特に、自己組織化膜を形成する前処理プロセスとして酸素プラズマを用いるが、このプラズマ条件が自己組織化膜の均一性、絶縁性に大きな影響を与えることが先行研究より分かっていた。初年度に、高真空プラズマ装置を導入することで、真空度、プラズマパワー、ガス流量をパラメータとして、有機半導体、絶縁体に及ぼす影響を詳細に調べ、有機トランジスタの高性能化への道筋をつけた。H22年度は、ナノレベルの構造体を高精度に評価する技術を確立してきた。上記、プロセスの最適化および構造評価技術を基盤とし、本年度作製したトランジスタが移動度  $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、オン/オフ比  $10^6$  を示し、2Vで駆動する優れた有機トランジスタを実現することができた。さらに、これを用いた低電圧駆動できる高性能有機SRAMを実現できた。電気的特性のみならず、機械的特性においてもブレイクスルーを達成した。特に、基板のプラスチックフィルムに前駆体を利用し平坦化を計ることで、曲率半径が  $0.1\text{-}0.3\text{mm}$  と極めて曲げに強い有機 CMOS 集積回路を実現し、医療応用への展開など、まったく新しいエレクトロニクスの姿を示した。一連の成果は、材料分野で世界的に権威のある Nature Materials 誌の Article および表紙に取り上げられ話題を呼んだ。<sup>(1)</sup>

##### (3-1-2)アトリットルインクジェットを用いた有機トランジスタの微細化と高性能化の実証

ナノ印刷の研究項目については、初年度に、アトリットルインクジェットを用いて有機半導体上に数ミクロンの微細電極を形成して、電流・電圧特性を詳細に調べた。これにより、自己組織化単分子膜を透過してくるトンネル電流を評価し、メモリ性能との相関を明らかにすることができた。特に、インクを選定に重点を置き取り組むことで、インク吐出電圧を精度よく制御することができ、有機半導体上に1~2ミクロンの電極を安定して描画できる基盤技術を整えることができた。初年度に続き、平成22年度は、アトリットルインクジェット技術を用いてトランジスタを用いた基本集積回路である発振機(リングオシレータ)を作製したところ、40Vの駆動電圧に対して  $2.26\text{kHz}$  と非常に速い周波数応答を持つトランジスタ回路を実現した。さらにゲート絶縁膜に自己組織化単分子膜を用いることで、印刷技術で作製したデバイスとしては世界最大のトランスコンダクタンス  $760 \text{ S/mm}$  を実現した。一連の研究を通して、高速動作できる印刷デバイスの新しい可能性を示すことができた。

ナノ印刷材料の開発としては、伸縮導体の作製において、カーボンナノチューブの分散技術の

高性能化により、導電率50S/cm を安定して出せることが可能となった。また、フッ素系ゴムのみならずさらに柔らかく密着性に富むゴム材料とナノチューブの相溶性を見出すことができた。

アクチュエータを用いた電子ペーパーの試作に関しては、アクチュエータ素子の作製と最適化に取り組んだ。ナノチューブを用いたアクチュエータのプロセス最適化を通して、応答速度1Hz 以上、変位電圧2V、変位量0.3mmなど、低電圧駆動ながら大きな変位量を実現することができた。さらに、自己組織化単分子膜を用いた低電圧駆動の有機トランジスタとアクチュエータの集積化技術を確立し、1セルでのディスプレイセルの動作確認に成功した。アクチュエータにおいては、発生力2g、発生変位300ミクロンを実現し、携帯型点字ディスプレイのプロトタイプを試作することができた。有機赤外線センサーにおいては、有機センサーセルをガラス基板上に作製、有機トランジスタとの集積化を行い、電気性能およびプロセスの整合性を確認することができた。

### (3-2) 駒場グループ

大面積集積回路設計と実証において、以下の(1)(2)の提案と実証を行った。

#### (1) 2V 有機 CMOS 回路とインクジェット印刷配線を用いたユーザ・カスタマイズブル・ロジック・ペーパー(UCLP)

センサレイなどの大面積エレクトロニクス機能および集積度が高まるにつれ、開発におけるプロトタイピングの重要度が増してくる。このプロトタイピングに適したデバイスとして User Customizable Logic Paper(UCLP)を提案する。本デバイスは自己組織化単分子膜を用いた2V有機CMOSによるSea-of-Transmission-Gates(SOTG)と呼ぶ論理セルアレイと、家庭用インクジェットプリンタを使用した印刷配線技術とで構成される。これによって、今後ユーザの手により有機CMOS集積回路のカスタマイズをすることが可能になり、大面積エレクトロニクス開発の効率化が期待される。

#### (2) 20V 有機 CMOS デジタル回路、フローティングゲートによるばらつき補正技術を用いた 20V 有機 CMOS アナログ回路および 100V 有機 PMOS 整流器を集積したシステムオンフィルム(SoF)による 100V 交流電力計

自由に曲げられるフィルム状に印刷形成可能な有機半導体は、低コストでコンパクトな電子機器の実現に向けて高いポテンシャルを秘めている。システムオンフィルム(System-on-a-Film)と呼ぶ新たな実装技術により、100V 交流電力計を提案する。これは、(1) フローティングゲートを有する20V有機CMOSオペアンプを電流検出回路に用いたアナログ回路、(2) 測定電流を積算する20V有機CMOS分周器、(3) 交流100Vから直流20Vを取り出す100V有機PMOS整流器、(4) 有機LEDを用いた表示器、(5) 電源コンセントとプラグの間に挟んで使用する電極といった構成部品の全てが、 $200 \times 200\text{mm}^2$ の折り曲げ可能なフィルム上に集積したものである。本研究ではその実現可能性について実証した。

## § 4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ● 論文詳細情報

1. Tsuyoshi Sekitani, Ute Zschieschang, Hagen Klauk, Takao Someya, “Flexible organic transistors and circuits with extreme bending stability”, *Nature Material* 9, 1015-1022 (2010), doi:10.1038/nmat2896, 07 November 2010
2. Tsung-Ching Huang, Kenjiro Fukuda, Chun-Ming Lo, Yung-Hui Yeh, Tsuyoshi Sekitani, Takao Someya, Kwang-Ting Cheng, “Pseudo-CMOS: A Design Style for Low-Cost and Robust Flexible Electronics”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.58, No.1, pp.141-150, Jan. 2011.
3. K. Ishida, N. Masunaga, R. Takahashi, T. Sekitani, S. Shino, U. Zschieschang, H. Klauk, M. Takamiya, T. Someya, and T. Sakurai, “UCLP with organic sea of gate architecture and inkjet printed interconnect”, *IEEE Journal of Solid State Circuits*, Vol.46, No.1, pp. 285-292, Jan. 2011
4. Koichiro Zaitzu, Sunghoon Lee, Kiyoshiro Ishibe, Tsuyoshi Sekitani, and Takao Someya, “A field-induced high-dielectric phase in ferroelectric copolymer”, *Journal of Applied Physics* Vol. 107, 114506 (2010).
5. Yusaku Kato, Tsuyoshi Sekitani, Yoshiaki Noguchi, Tomoyuki Yokota, Makoto Takamiya, Takayasu Sakurai, and Takao Someya, “Large-area, flexible, ultrasonic imaging system with an organic-transistor active matrix”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 57, pp. 995-1002 (2010).
6. Ute Zschieschang, Frederik Ante, Tatsuya Yamamoto, Kazuo Takamiya, Hirokazu Kuwabara, Masaaki Ikeda, Tsuyoshi Sekitani, Takao Someya, Klaus Kern, Hagen Klauk, “Flexible Low Voltage Organic Transistors and Circuits Based on a High Mobility Organic Semiconductor with Good Air Stability”, *Advanced Materials*, Vol. 22, no. 9, pp. 982-985 (2010).
7. Lechang Liu, Makoto Takamiya, Tsuyoshi Sekitani, Yoshiaki Noguchi, Shintaro Nakano, Koichiro Zaitzu, Tadahiro Kururoda, Takao Someya, Takayasu Sakurai,

“A 107-pJ/bit 100-kb/s 0.18-mm Capacitive-Coupling Transceiver With Data Edge Signaling and DC Power-Free Pulse Detector for Printable Communication Sheet”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol, 56, pp. 2511-2518 (2010).