

Cut-and-Paste Organic FET Customized ICs for Application to Artificial Skin

染谷 隆夫[†] 川口 博[‡] 桜井 貴康^{††}

[†] 東京大学工学部 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

[‡] 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

^{††} 東京大学国際・産学共同研究センター 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: [†] someya@ap.t.u-tokyo.ac.jp, {[‡] kawapy, ^{††} tsakurai}@iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 切り貼りによる有機電界効果トランジスタ集積回路の実装をはじめて行った。切り貼りによってカスタマイズされた集積回路は感圧センサアレイ、行デコーダ、列セクタで構成されており、広範囲の圧力情報を読み出すことができる。プラスチックフィルム上に形成された感圧センサアレイと感圧導電性ゴムは機械的に柔軟であるため、電子人工皮膚応用に適している。回路の一部を切り、それを他の回路に接続テープを用いて張るという、物理的な切り貼りによってスケラブルな集積回路が実現できる。集積回路は標準的な SPICE シミュレータとレイアウトツールで設計され、測定により動作を確認した。

キーワード 有機トランジスタ, エリアセンサ, 電子人工皮膚, 切り貼りによるカスタマイズ

Cut-and-Paste Organic FET Customized ICs for Application to Artificial Skin

Takao SOMEYA[†] Hiroshi KAWAGUCHI[‡] and Takayasu SAKURAI^{††}

[†] School of Engineering, University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

[‡] Institute of Industrial Science, University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

^{††} Center for Collaborative Research, University of Tokyo 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

E-mail: [†] someya@ap.t.u-tokyo.ac.jp, {[‡] kawapy, ^{††} tsakurai}@iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract The Concept of cut-and-paste customization is introduced for the first time in designing integrated circuits based on organic field effect transistors. The customized integrated circuits are manufactured by comprising a pressure-sensor array, row decoders, and column selectors to read out pressure information over large area. The pressure-sensor array formed on a plastic film and pressure-sensitive conductive rubber are mechanically flexible, and therefore suitable for electronic artificial skin application. The physical cut-and-paste procedure is employed to make scalable circuits, which are manufactured by cutting a part of the circuits and pasting it to another circuit with a connecting plastic tape. The integrated circuits are designed with a standard SPICE simulator and layout design tool, and the operation is confirmed by measurement.

Keyword Organic Transistor, Area Sensor, Electronic Artificial Skin, Cut-and-Paste Customization

1. はじめに

有機トランジスタ回路は、高速ではあるが価格が高いシリコンを補完するものとして注目されている[1-5]。有機 FET (Organic Field Effect Transistor: OFET) はいくつかの特徴を有するが、最初に大面積電子回路であっても製造コストが安いということが挙げられる。次に機械的に柔軟な(折り曲げ可能な)回路を実現できる。最後にシリコンより 3 桁程度移動度が低く、そのため有機回路は速度が遅い。低速であるため、ビデオや無線応用には適さないが、エリアセンサ用途には最適である。エリアセンサの中でも触覚センサは次世代ロボットやワイヤレスセンサネットワークにとって重要であると考え、有機トランジスタを使ってスケラブルな感圧センサアレイと周辺回路を集積した電子

人工皮膚を初めて試作した。

2. 感圧センサの構造と製法

感圧センサの構造と有機トランジスタの製法を図 1 に示す。

- (1) 最初に金のゲート電極をポリエチレンナフタレート(PEN)フィルムかポリイミド(PI)フィルム上にシャドウマスクで蒸着する。
- (2) 次に毎分 3,000 回転でフィルム上に PI のゲート絶縁膜をスピコートし、窒素雰囲気中で摂氏 180 度で 1 時間加熱する。
- (3) それからビアが必要な場所のゲート絶縁膜に CO₂ レーザで穴を開ける。
- (4) 次にペンタセンを 30 μ Pa の圧力で真空昇華させ、

シャドウマスクを通して蒸着させる。ペンタセンの厚さは 30nm である。ペンタセンの化学式を図に示す。

- (5) 最後にソースおよびドレイン電極を形成するために金を蒸着させる。この製法による有機トランジスタはトップコンタクト構造と呼ばれる。

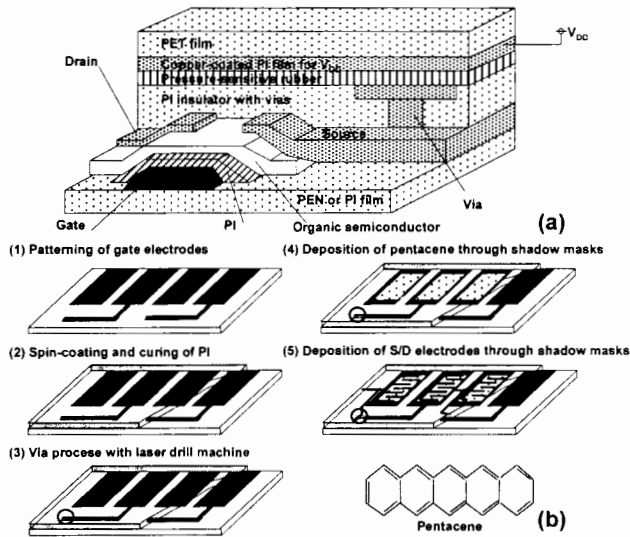


図 1 (a)感圧センサの構造,

(b)有機トランジスタの製造法とペンタセンの化学式

さらにこの有機トランジスタのシート上に圧力センサを重ねる。圧力センサは感圧性電導ゴムのシートを、銅電極をつけた PI フィルムと、直径 100 μ m のランドを持ったスルーホールを 2.54mm ピッチで配置したもう 1 枚の PI フィルムではさんで積層することにより作られる。PI フィルムのスルーホールは従来のフレキ基板の製造法(エッチング, ドリル, メッキ)で作られる。感圧性電導ゴムはグラファイトを含んだシリコンゴムで、厚さは 0.5mm である。抵抗値はオフのときは 10M Ω , オンのときは 1k Ω と変化する。

3. 有機トランジスタの特性

図 2 に pMOS OFET の I_{DS} - V_{DS} 特性を示す。OFET は nMOS の製作が難しく、回路には pMOS のみ使用されている。測定値はソースとドレインに 200k Ω の直列抵抗をつけたレベル 1 SPICE MOS モデルを使ったシミュレーション結果とよく合致する。これにより、回路設計は標準的 SPICE シミュレータを用いて行うことができた。またレイアウトツールについてもシリコンの環境をそのまま利用し、GDS II フォーマットを DXF フォーマットに変換して、シャドウマスク製造業者に渡した。

I_{DS} は経時変化するが、この論文に示した材料と構造

では、最初の数分で急速な変化が生じるだけで、その後の I_{DS} の変化は回路動作に影響を及ぼさない。またヒステリシスも存在するが、これもデジタル回路では影響を及ぼすほどのものではない。有機トランジスタの特性は製作ごとにばらつくが、オンオフ比は 10^4 以上あるため、回路はレシオレスで設計することができた。

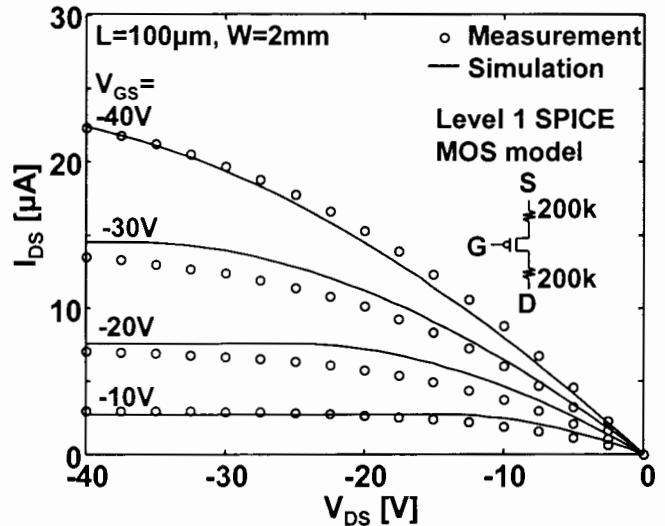


図 2 pMOS OFET の I_{DS} - V_{DS} 特性

4. 切り貼りによるカスタマイズ

電子人工皮膚システムの回路図を図 3 に示す。

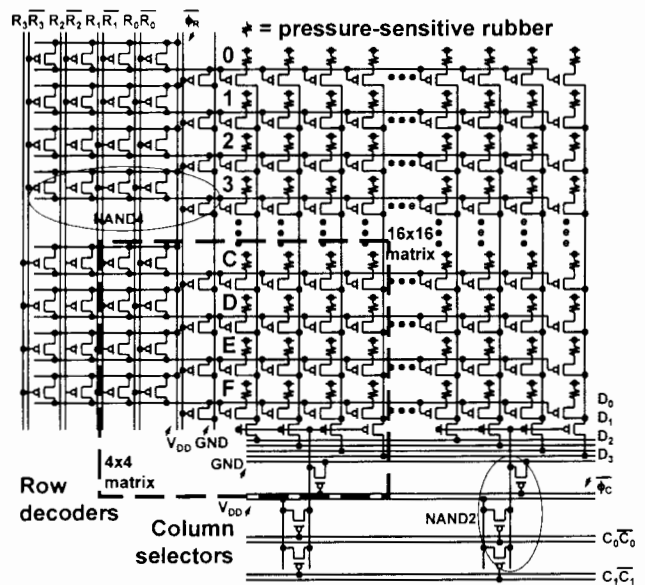


図 3 電子人工皮膚システムの回路図

システムは感圧センサマトリクス、行デコーダ、列セクタの 3 つの集積回路から構成されている。各回路は別々に製作し、PET フィルムに配線用の金を 0.1 インチ間隔で蒸着した接続テープと導電性接着剤を用いて接続する。これにより回路の切り貼りが可能にな

る。感圧センサマトリクスは 16 x 16 の感圧セルを持ち、0.1 インチ x 0.1 インチ間隔で配置されている。図では 16 x 16 の感圧セルによる構成を示しているが、たとえば 4 x 4 の感圧セルが必要な場合は、破線の矩形領域を切り取り、そのまま感圧センサマトリクスとして利用することもできる。これは任意の m 行 x 4n 列 ($m \leq 16, n \leq 4$) の感圧セルを、ただ切り取るだけで駆動できるように、アドレス拡張性を持ったワイヤード NAND 形式の行デコーダと列セクタを採用しているからである。感圧センサマトリクスは矩形だけでなく、凸型である限り、任意の形状も可能である。

センサの配列数や形状に応じて新しくマスクをつくる必要がないので、マスク代と回路設計に要する時間の節約になり、コストを削減させることが可能である。この論文では 16 x 16 のセルを紹介しているが、この切り貼りの概念は任意の大きさのセンサに拡張できる。前もって、もっと長い行デコーダと列セクタのシートと、大きな感圧センサマトリクスを用意して置き、必要な大きさが決まれば、そのサイズの回路をシートから切り出し、接続テープで貼り付ければよい。

5. 測定結果

図 4(a)に感圧センサセルに流れる電流の圧力依存性を示す。エリアセンサのある部分が押されたときには、その押された部分の感圧ゴムだけがオンし、図 4(b)に示すように対応する感圧セルがビット線を V_{DD} まで引き上げる。

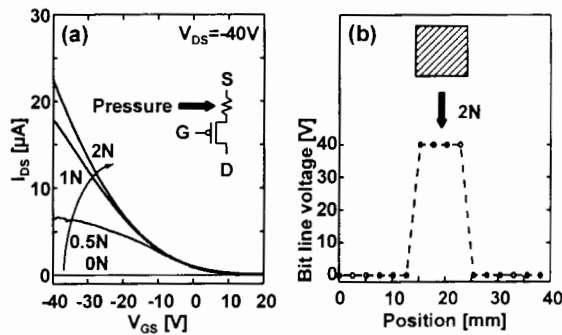


図 4 (a)センサセルの圧力依存、
(b)エリアセンサの一部が押されたときの出力電圧

図 5 は人工皮膚システムの動作波形である。感圧センサマトリクスに圧力が加わると、その部分の導電性ゴムが導通し、対応する感圧セルがビット線を V_{DD} まで引き上げる応答を示している。 V_{DD} が 40V の場合、行デコーダ活性化信号 $\phi_{R\text{-bar}}$ からビット出力までの読み出し遅延は 23ms である。このシステムでは上記の回路図のとおり、並列 4 ビット読み出しを採用しているため、16 x 16 の感圧センサ全てをスキャンするには

2 秒弱かかる。

V_{DD} 対読み出し遅延依存を図 6 に示す。 V_{DD} を 100V にすれば、読み出し遅延は 40V の場合の約半分になる。シミュレーションは上述の SPICE モデルを用いて行い、測定点はシミュレーション結果と合致する。

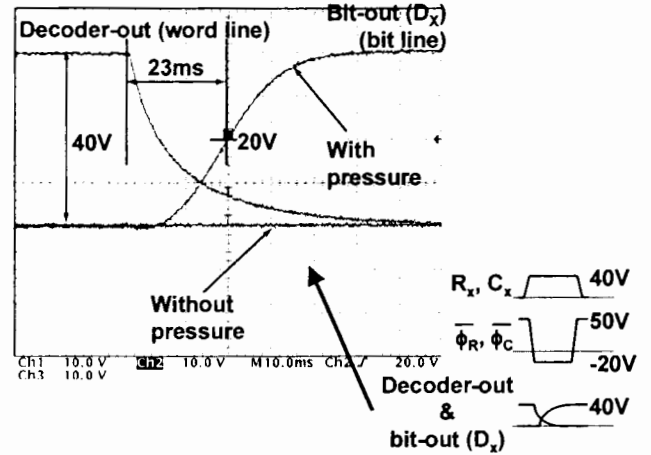


図 5 動作波形

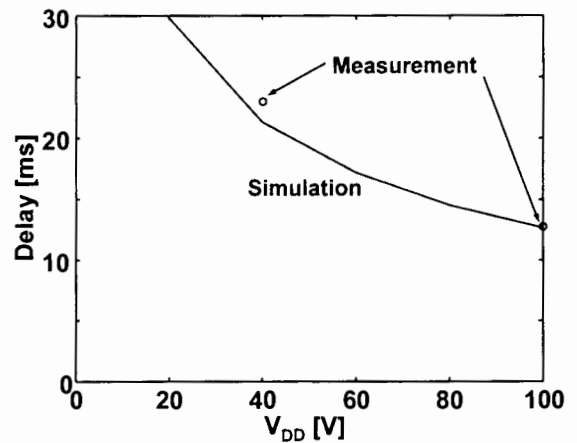


図 6 V_{DD} 対読み出し遅延

メタルマスクには 100 μ m ルールを適用しており、有機トランジスタの短チャネル化やワード線、ビット線などの配線層の細線化などで容量や動作電圧を減少させる余地はまだまだある。これらの短チャネル化や細線化と、外部回路による出力センス電圧を 20V からより低電圧の 10V 以下に下げることができれば、将来は読み出し遅延 23ms から一桁以上の減少を達成できる。

図 7 に電子人工皮膚システムの写真を示す。行デコーダと列セクタは感圧センサマトリクスと接続テープで接着されている。

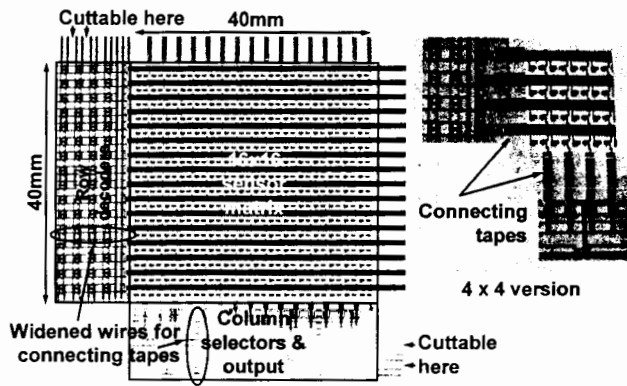


図7 電子人工皮膚システムの写真

OFETは半径5mmまで弾性を持って曲げることができ、ロボットの表面に巻きつけるのに十分である。曲げ応力を加えることにより、OFETのドレイン電流は減少するが、半径5mmまで曲げてもその減少の割合は3%以下である。さらに半径1mmまで曲げてもトランジスタとして十分に機能し、これは機械的な柔軟性を示すのに十分なものである。

謝 辞

有益な議論を賜った小林正氏と関谷毅氏に感謝する。本研究の一部は、NEDO「産業技術研究助成事業」、文科省ITプロジェクト、特別推進研究の助成を受けて進められた。

文 献

- [1] R. Brederlow, S. Briole, H. Klauk, M. Halik, U. Zschieschang, G. Schmid, J.-M. Gorris-Saez, C. Pacha, R. Thewes, and W. Weber, "Evaluation of the Performance Potential of Organic TFT Circuits," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 378-379, Feb. 2003.
- [2] Edzer Huitema, Gerwin Gelinck, Bas van der Putten, Eugenio Cantatore, Erik van Veenendaal, Laurens Schrijnemakers, Bart-Hendrik Huisman, and Dago de Leeuw, "Plastic Transistors in Active-Matrix Displays," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 380-381, Feb. 2003.
- [3] E. Cantatore, C. M. Hart, M. Digioia, G. H. Gelinck, T. C. T. Geuns, H. E. A. Huitema, L. R. R. Schrijnemakers, E. van Veenendaal, D. M. Leeuw, "Circuit Yield of Organic Integrated Electronics," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 382-383, Feb. 2003.
- [4] T. Someya and T. Sakurai, "Integration of Organic Field-Effect Transistors and Rubbery Pressure Sensors for Artificial Skin Applications," IEDM, pp. 203-206, Dec. 2003.
- [5] T. Someya, H. Kawaguchi, and T. Sakurai, "Cut-and-Paste Organic FET Customized ICs for Application to Artificial Skin," ISSCC Dig. Tech. Papers, pp. 288-289, Feb. 2004.