

有機トランジスタとプラスチックアクチュエータを集積化したフレキシブルな点字ディスプレイ向けの回路技術

川口 博¹、高宮 真²、関谷 毅³、加藤 祐作³、染谷 隆夫³、桜井 貴康⁴

¹神戸大学 工学部 情報知能工学科 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1

²東京大学 大規模集積システム設計教育研究センター 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

³東京大学大学院 工学系研究科 量子相エレクトロニクス研究センター
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

⁴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: mtaka@iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 有機トランジスタとプラスチックアクチュエータを集積化したシステムを提案し、これをシート型の点字ディスプレイに応用した。アクチュエータの遷移時間の遅さを隠すため、世界初の有機トランジスタ SRAM を開発した。5 トランジスタ SRAM セルによるセル面積の 20%削減、SRAM 書き込み動作のパイプライン化による書き込み時間の 74%短縮を実現した。また、バックゲートを用いたしきい電圧制御技術により、SRAM のスタティックノイズマージンの増加と、有機トランジスタの製造後 15 日間の化学劣化の補償に成功した。さらに、ドライバトランジスタのオーバドライブ技術により、アクチュエータの遷移時間を 34 s から 2 s に短縮した。これらの回路技術により、3.1 s という実用的な時間で、点字ディスプレイ上の 144 個の点字ドットすべてを変更することに成功した。今回開発した回路技術は、有機トランジスタを用いた大面積エレクトロニクスを実現する上で、必須の技術になると考えられる。

キーワード 大面積エレクトロニクス、有機トランジスタ、アクチュエータ、点字、SRAM

Circuits Technologies for Flexible Braille Sheet Display with Organic FETs and Plastic Actuators

Hiroshi KAWAGUCHI¹, Makoto TAKAMIYA², Tsuyoshi SEKITANI³, Yusaku KATO³,
Takao SOMEYA³, and Takayasu SAKURAI⁴

¹Department of Computer and Systems Engineering, Kobe University,
1-1 Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657-8501, Japan

²VLSI Design and Education Center, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan

³Quantum-Phase Electronics Center, School of Engineering, University of Tokyo,
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

⁴Center for Collaborative Research, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan
E-mail: mtaka@iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract Organic FETs (OFETs) are integrated with actuators, and a Braille sheet display is demonstrated. A newly developed back-gated OFETs SRAM and the circuits technology for the Braille sheet display to enhance speed, yield and lifetime are presented, which will be essential for future large-area electronics made with OFETs.

Key words Large-area electronics, Organic FET, Actuator, Braille, SRAM

1. はじめに

10 cm 角から 10 m 角程度の大きな柔らかいシートの上に、インテリジェントな電子デバイスを分散して配置することにより、人間生活を快適にサポートする大面積エレクトロニクスという新しいアプリケーションに我々は注目している。曲げることができ、面積あたりのコストが低い有機トランジスタ(OFET)は大面積エレクトロニクスに適している。しかし、有機トランジスタ単体の性能はシリコン MOSFET と比べると格段に低い。表 1 に本研究で用いた有機トランジスタと最近の 90 nm ルールのシリコン MOSFET の特性比較を示す。MOSFET と比べると、有機トランジスタは設計ルールが約 500 倍、単位ゲート幅当たりの駆動電流が 4 万分の 1 倍、ゲート遅延が 3000 万倍である。さらに、有機トランジスタは製造技術が未熟であるため、大気中の酸素と水分による化学劣化により、デバイスの寿命も数日程度と短い。そこで、動作速度が遅くて信頼性の低い有機トランジスタの欠点を補う大面積エレクトロニクス向けの回路技術が重要となる。

我々はこれまでに大面積エレクトロニクスのアプリケーションとして、有機トランジスタと圧力センサを集積化した人工皮膚[1]や、有機トランジスタと光センサを集積化したシート型スキャナ[2]の開発を行ってきた。

今回は、新たに有機トランジスタとプラスチックアクチュエータを集積化したシステムを提案し、これをシート型の点字ディスプレイに応用した。点字ディスプレイのプロセス・デバイス技術については[3]で述べた。本論文では点字ディスプレイの回路技術について報告する[4]。アクチュエータの遷移時間の遅さを隠すため、有機トランジスタで作成した SRAM を搭載した。SRAM に関して、5 トランジスタセルによる小面積化、書き込み動作のパイプライン化による高速化、しきい電圧のバックゲート制御による高信頼化を達成した。さらに、ドライバトランジスタのオーバードライブ技術による高速化を実現した。

表 1 本研究で用いた有機トランジスタと最近のシリコン MOSFET の比較

	OFETs	Si MOSFETs
Design rule	50 μm	90 nm
Hardness	Flexible	Solid
Drive current	25 nA / μm @ 40 V	1 mA / μm @ 1 V
Gate delay	0.3 ms	10 ps
Cost / area	Low	High
Cost / transistor	High	Low
Lifetime	Days	Years

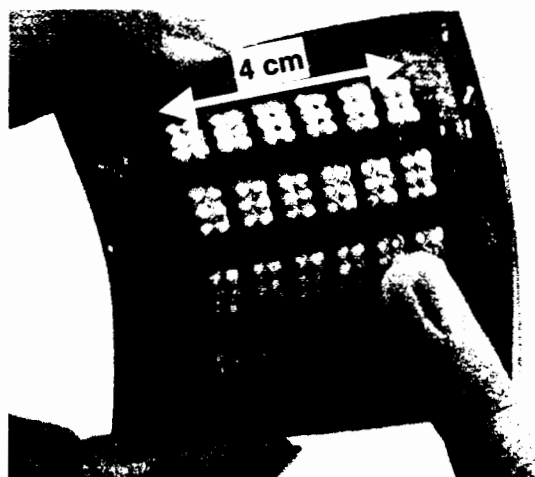


図 1 シート型点字ディスプレイ

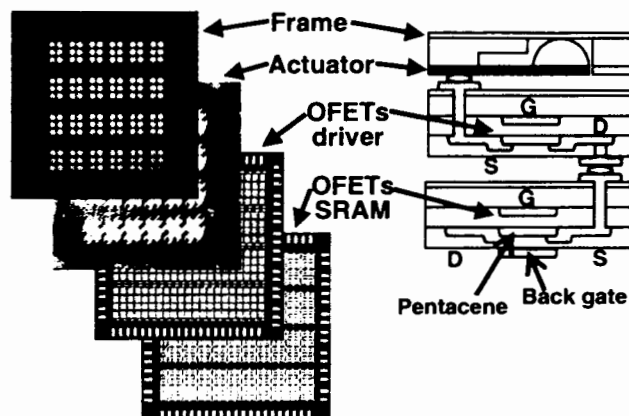


図 2 シート型点字ディスプレイのデバイス構造。4 枚のフィルムが積層されている。

2 章でシート型点字ディスプレイの概要を示し、3 章で開発した回路技術と試作評価結果を示す。4 章で回路技術による点字ディスプレイの高速化を整理し、最後に 5 章でまとめる。

2. シート型点字ディスプレイ

図 1 に開発したシート型点字ディスプレイを示す。6 行 4 列の合計 24 個の点字が 4 cm × 4 cm のディスプレイに表示される。それぞれの点字は 3 行 2 列の合計 6 個のドットで構成されているため、点字ディスプレイには全部で 144 個のドットがある。入力データに応じて、これらのドットをアクチュエータにより上下させることにより、点字を変化させる。図 2 に示すように、フレーム、アクチュエータ、有機トランジスタドライバ、有機トランジスタ SRAM の 4 つのフィルムを積層することにより、シート型点字ディスプレイを実現している。今回用いたアクチュエータの遷移時間は約 1 秒である。仮にこれらのアクチュエータを 1 つずつ順番に駆動した場合、点字ディスプレイ全体の表示を切り替えるのに

1 分以上かかり、実用的ではない。そこで、アクチュエータの遷移時間の遅さを隠すため、それぞれのドットに有機トランジスタで作成した SRAM セルが 1 つずつ接続されている。点字ディスプレイへの入力データがすべての SRAM セルに書き込まれた後、各 SRAM セルに保持されているデータに応じてドライバによりすべてのアクチュエータを一斉に駆動する。このように SRAM を内蔵することにより、144 個のドット全体を変更するのに必要な時間を短縮することができる。

3. 回路技術

3.1. 5 トランジスタ SRAM セルと書き込み動作のパイプライン化

図 3 にプラスチックアクチュエータ 1 つとそれに付随する有機トランジスタ SRAM と有機トランジスタドライバの回路図を示す。一般に、有機トランジスタでは nMOS よりも pMOS の性能が高いため、図 3 の回路は pMOS のみで構成されている。SRAM 用の有機トランジスタはしきい電圧(V_{TH})を制御するためにバックゲート[5]を有している。今回の点字ディスプレイにおいては、アクチュエータは保持されたデータ(DATA, DATAb)に応じて動作し、SRAM の読み出し動作は不要で

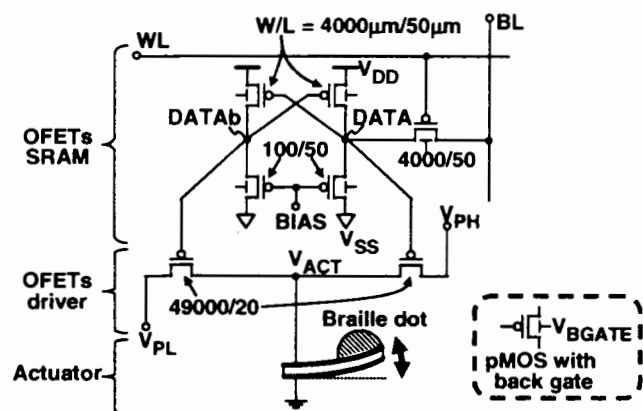


図 3 アクチュエータ 1 つに付随する有機トランジスタ SRAM とドライバの回路図

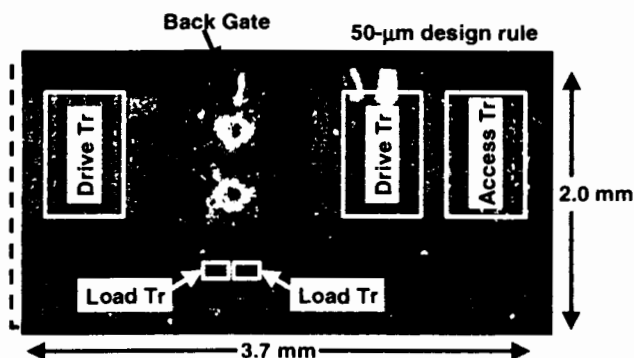


図 4 5 トランジスタ SRAM セルの顕微鏡写真

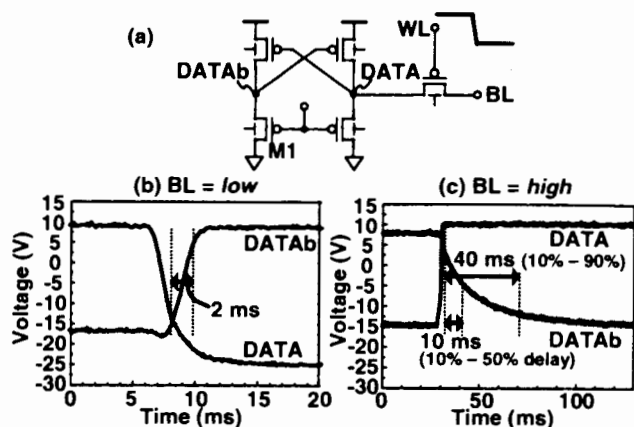


図 5 (a) 測定した SRAM の回路図。(b)(c) SRAM 書き込み動作の実測波形。(b) BL が low。(c) BL が high。

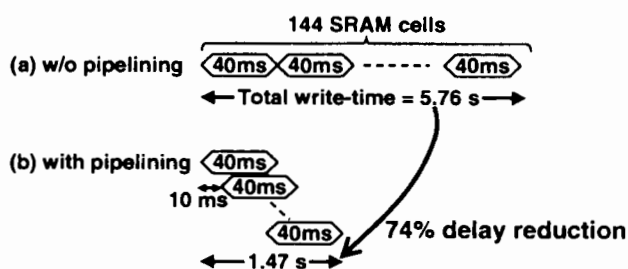


図 6 SRAM 書き込み動作のタイミングチャート。(a) パイプライン化なし。(b) パイプライン化あり。

あるため、書き込み動作のみの SRAM を採用した。従って、フィルム面積を節約するため、5 トランジスタ SRAM セルを開発した。従来の 6 トランジスタ SRAM セルと比べ、5 トランジスタ SRAM セルはビット線の本数を半分に、セル面積を 20%削減することができる。図 4 に 5 トランジスタ SRAM セルの顕微鏡写真を示す。セル面積は 3.7 mm×2.0 mm である。セル全体がバックゲートで覆われている。

5 トランジスタ SRAM セルでは、DATAb にアクセストランジスタがないため、DATAb の書き込み動作の遅さが問題となる。SRAM 全体(144 セル)の書き込み時間の設計ターゲットは 2 秒以内である。図 5 に書き込み動作における DATA と DATAb の実測波形を示す。図 5(b) に示す BL が low の場合、DATAb の遷移時間は 2 ms と小さく、設計ターゲットを満たす。これに対して、図 5(c) に示す BL が high の場合、図 5(a) の M1 の駆動電流が小さいため、DATAb の遷移時間は 40 ms と大きく、設計ターゲットを満たさない。しかし、書き込み動作をパイプライン化することにより、SRAM のシステムレベルでこの遅い遷移時間を隠すことができる。図 6 に SRAM 書き込み動作のパイプライン化のタイミングチャートを示す。パイプライン化により、SRAM 全体(144 セル)に対するトータルの書き込み時間を 5.76 s (= 40 ms×144)から 1.47 s (= 10 ms×143 + 40 ms)に 74%短縮し、設計ターゲットを満たすことができた。

3.2. バックゲートによる SRAM スタティックノイズマージンの制御

有機トランジスタでは V_{TH} を正確に制御するプロセス技術が未熟である。そこで、未熟な V_{TH} 制御プロセス技術を補い、高信頼の SRAM 動作を実現するために、バックゲートを用いた V_{TH} 制御技術を開発した。図 7 に pMOS 有機トランジスタのドレイン電流のゲート電圧依存の実測結果を示す。バックゲート電圧(V_{BGATE})を変えることにより、 V_{TH} を変化させることができる。図 8 に SRAM バタフライカーブの V_{BGATE} 依存の実測結果を示す。 V_{BGATE} を大きくすると、スタティックノイズマージン(SNM)が増加する。

この V_{TH} 制御技術により、有機トランジスタの化学劣化を補償することもできる。図 9 に SRAM 中のインバータの入出力特性の経時変化の実測結果を示す。測定時以外は、有機トランジスタは窒素雰囲気中に保管した。それに関わらず、化学劣化により有機トランジスタの $|V_{th}|$ が減少し、インバータの入出力特性は右方向にシフトする。図 10 に図 9 から計算した SNM の経時変化を示す。製造から 15 日たつと、SNM は 6.2 V から 2.0 V に減少する。つまり、経時変化により SRAM 動作のマージンが減少してしまう。しかし、15 日後に、バックゲートを用いて化学劣化による V_{TH} シフトを補償すると、SNM を 2.0 V から初期状態に近い 6.4 V に復元することができた。さらに、バックゲートを用いて常に適応的に化学劣化を補償すれば、SNM を常に一定に保つことができる。化学劣化は有機トランジスタの本質的な課題であるため、今回開発したバックゲートによる補償技術は有機トランジスタの実用化に重要な役割を果たすと考えられる。

3.3. ドライバトランジスタのオーバドライブ技術

アクチュエータの遷移時間の設計ターゲットは 2 秒以内である。しかし、アクチュエータは 100 μ F という大きな容量を持つため、これを高速に充放電するためにはドライバに大電流を流す必要がある。図 11 にアクチュエータ電圧(V_{ACT})とアクチュエータの変位の実測波形を示す。 V_{PL} のステップ電圧高さ(V_X)を変化させた。点字を指の触覚で読み取るのに必要な変位は 0.2 mm である。また、アクチュエータの耐圧は 3 V である。 V_X が耐圧と等しい -3 V の場合、アクチュエータの遷移時間は 34 s であり、設計ターゲットを満たさない。そこで、遷移時間を短縮するため、 V_{PH} と V_{PL} のオーバドライブ技術を開発した。 V_X を -3 V から -10 V に増加させることにより、遷移時間を 34 s から 2.0 s へ短縮し、

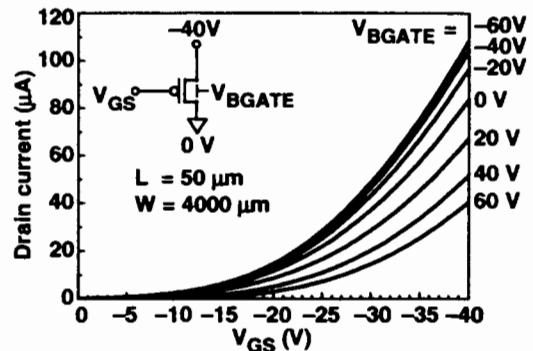


図 7 pMOS 有機トランジスタの $I_D - V_{GS}$ 特性の V_{BGATE} 依存の実測結果

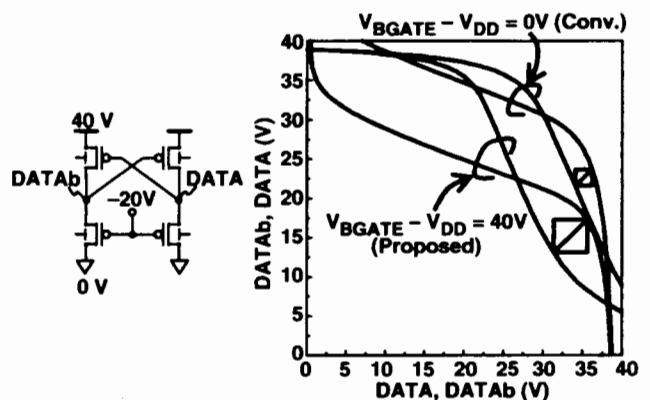


図 8 SRAM バタフライカーブの V_{BGATE} 依存の実測結果

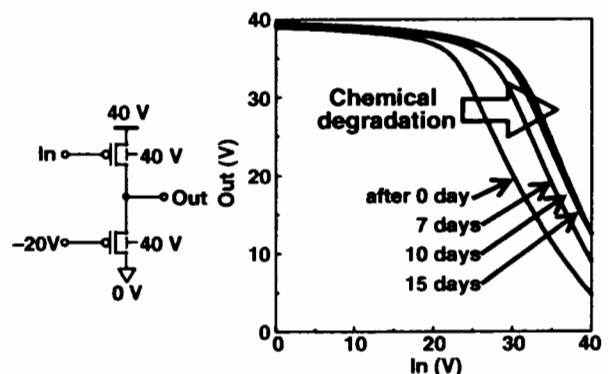


図 9 SRAM 中のインバータの入出力特性の経時変化の実測結果

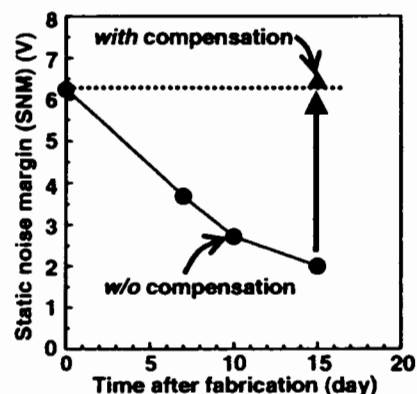


図 10 SNM の経時変化と経時変化の補償

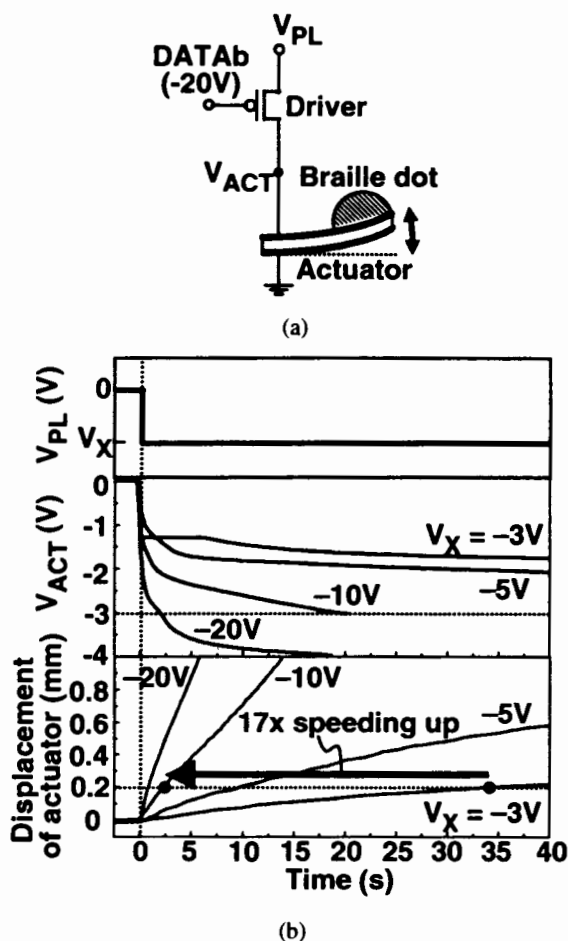


図 11 (a) 測定したドライバとアクチュエータの回路図。(b) オーバドライブ技術によるアクチュエータの加速

設計ターゲットを満たすことができた。但し、アクチュエータの過電圧による破壊を防止するため、 V_{ACT} が ± 3 V 以下となるようにオーバドライブの期間を決定する必要がある。

最後に、シート型点字ディスプレイの動作を実証する。図 12 に有機トランジスタドライバの電圧とプラスチックアクチュエータの変位の実測波形を示す。点字のドットを 0.2 mm 以上、上下に動かせることを実証した。開発した V_{PH} と V_{PL} のオーバドライブ技術により、1.6 s のアクチュエータの遷移時間を達成し、設計ターゲットを満たすことができた。

4. 開発した回路技術による点字ディスプレイの高速化のまとめ

図 13 に 144 個の点字ドットすべてを変更するのに必要な時間が、開発した回路技術によって短縮される過程を示す。SRAM のない、初期設計では、144 個のアクチュエータを 1 つずつ順番に駆動するので、4896 s かかる。次に、SRAM を追加した場合、データを SRAM に

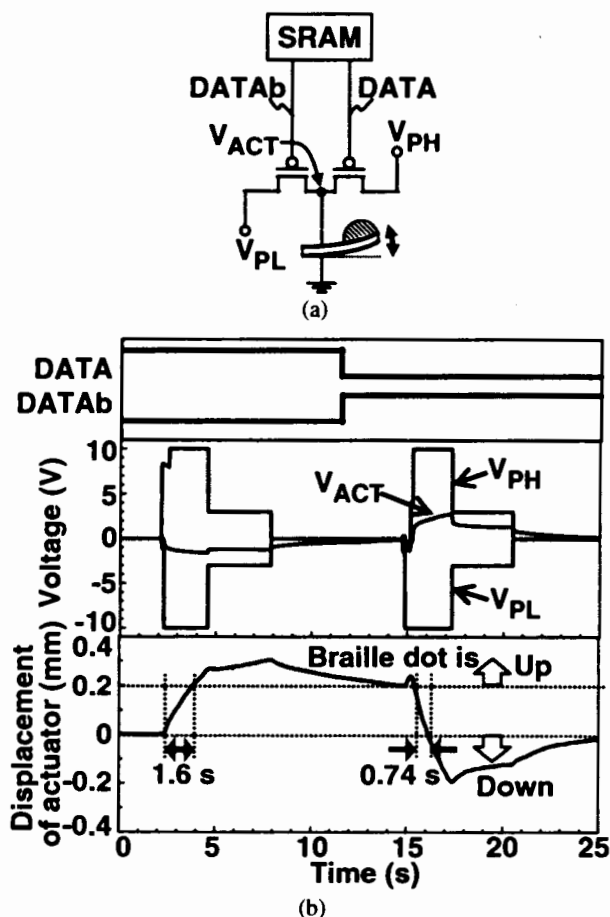


図 12 (a) 測定した点字ディスプレイの回路図。(b) 点字ディスプレイ動作の実測波形。

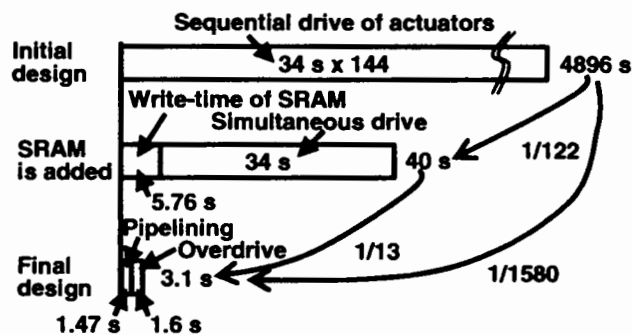


図 13 144 個の点字ドットすべてを変更するのに必要な時間。開発した回路技術による点字ディスプレイの高速化を示す。

書き込んだ後、一斉に 144 個のアクチュエータを駆動するので、40 s かかる。最終設計では、SRAM 書き込み動作のパイプライン化とドライバトランジスタのオーバドライブ技術により、3.1 s というシート型点字ディスプレイにとって実用的な時間を達成した。これは初期設計と比べると、1580 倍高速である。

5. 結論

有機トランジスタとプラスチックアクチュエータを集積化したシステムを提案し、これをシート型の点字ディスプレイに応用した。アクチュエータの遷移時間の遅さを隠すため、世界初の有機トランジスタ SRAM を開発した。5 トランジスタ SRAM セルによるセル面積の 20%削減、SRAM 書き込み動作のパイプライン化による書き込み時間の 74%短縮を実現した。また、バックゲートを用いたしきい電圧制御技術により、SRAM のステイックノイズマージンの増加と、有機トランジスタの製造後 15 日間の化学劣化の補償に成功した。さらに、ドライバトランジスタのオーバドライブ技術により、アクチュエータの遷移時間を 34 s から 2 s に短縮した。

これらの回路技術により、3.1 s という実用的な時間で、点字ディスプレイ上の 144 個の点字ドットすべてを変更することに成功した。

今回開発した回路技術は、有機トランジスタを用いた大面積エレクトロニクスを実現する上で、必須の技術になると考えられる。

参考文献

- [1] T. Someya, H. Kawaguchi, and T. Sakurai, "Cut-and-paste organic FET customized ICs for application to artificial skin," ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 288-289, Feb. 2004.
- [2] H. Kawaguchi, S. Iba, Y. Kato, T. Sekitani, T. Someya, and T. Sakurai, "A sheet-type scanner based on a 3D stacked organic-transistor circuit with double word-line and double bit-line structure," ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 580-581, Feb. 2005.
- [3] Y. Kato, S. Iba, T. Sekitani, Y. Noguchi, K. Hizu, X. Wang, K. Takenoshita, Y. Takamatsu, S. Nakano, K. Fukuda, K. Nakamura, T. Yamaue, M. Doi, K. Asaka, H. Kawaguchi, M. Takamiya, T. Sakurai, and T. Someya, "A flexible, lightweight Braille sheet display with plastic actuators driven by an organic field-effect transistor active matrix," IEDM Tech. Dig., pp. 105-108, Dec. 2005.
- [4] M. Takamiya, T. Sekitani, Y. Kato, H. Kawaguchi, T. Someya, and T. Sakurai, "An Organic FET SRAM for Braille sheet display with back gate to increase static noise margin," ISSCC Dig. of Tech. Papers, pp. 276-277, Feb. 2006.
- [5] S. Iba, T. Sekitani, Y. Kato, T. Someya, H. Kawaguchi, M. Takamiya, T. Sakurai, and S. Takagi, "Control of threshold voltage of organic field-effect transistors with double gate structure," Applied Physics Letters, 87, 023509, July 2005.