

次世代ディスプレイに向けた酸化亜鉛薄膜トランジスタ技術

古田 守, 平松孝浩, 松田時宜, 新田浩士*, 平尾 孝

高知工科大学 ナノデバイス研究所

*高知工科大学 大学院 工学研究科 基盤工学専攻

〒 780-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

E-mail: furuta.mamoru@kochi-tech.ac.jp

要約: 情報ディスプレイの代表である液晶ディスプレイ(LCD)は中小型パネル分野で不動の地位を確立し、近年ではTV用の大型映像表示パネル分野でも中心的な位置付けになりつつある。一方で、LCDの更なる高画質化や有機ELディスプレイ(OLED)といった次世代ディスプレイ実現には薄膜トランジスタ(TFT)の移動度向上が不可欠である。本稿では、映像ディスプレイ技術の進展からTFTアクティブマトリックスアレイに対する要求性能を整理し、酸化亜鉛TFTの可能性を検証する。

1. はじめに

ディスプレイは情報・映像信号を画像表示するデバイスであり、表示品位が問われる、正に“映像の顔”となるデバイスである。情報表示端末から映像表示に用途が拡大するにつれ、ディスプレイには感性に訴える表示品位が切望されている。

代表的なフラットパネルディスプレイ(FPD)である液晶ディスプレイ(LCD)は、モバイル用途の小型パネル、情報表示用パソコンモニターの中型パネル分野で不動の地位を確立し、近年ではTV用の大型映像表示パネル分野でも中心的な位置付けになりつつある。しかしながら、映像表示ディスプレイとしてのLCDは、動画解像度、応答速度、コントラストなどに解決すべき課題を有する。

一方で、昨年、有機ELディスプレイ(OLED)が事業化され¹⁾、その高い表示品位が映像表示ディスプレイとして注目を集めている。OLEDは電流注入による自発光デバイスであり、視野角依存性がなく、高速応答、コントラスト比が高いといった映像ディスプレイに要求される性能を備える。

本稿では、映像表示ディスプレイ技術の進展から薄膜トランジスタに要求される性能を整理し、酸化亜鉛薄膜トランジスタの次世代ディスプレイ応用に関して展望する。

2. 次世代FPDに要求されるTFTの移動度

近年映像表示ディスプレイ分野におけるLCDの位置付けが高まっているが、動画解像度やコントラストなど、映像表示ディスプレイに要求される性能改善が急務であり、OLEDの優れた表示品位は、LCDの表示品位改善の大きなドライビングフォースとなることは想像に難くない。

LCDの動画解像度の改善を目的として駆動フレームレートの高速化が行われており、倍速(120Hz)、四倍速(240Hz)駆動が一部LCD-TV製品に搭載され始めている。高フレームレートの駆動は動画解像度の向上に有効であり、今後更なるフレームレートの高速化が行われると推察される。²⁾

映像表示用LCDの今後は、大画面・高精細・高フレームレート駆動がキーワードとなり、この実現に必要な性能が薄膜トランジスタ(Thin-Film Transistor: TFT)に求められる。以下に、TFTの要求移動度に関して考察する。^{3,4)}

TFTによるアクティブマトリックス駆動は、 $m \times n$ 個の画素(HDの場合 $1,920 \times 1,080 \times 3$)のそれぞれにTFTを配置し、TFTによるスイッチングにより画像表示を制御する駆動方式であり、LCDの画素は図1に示すように、1つのTFTと1つの容量からなる等価回路で示される。

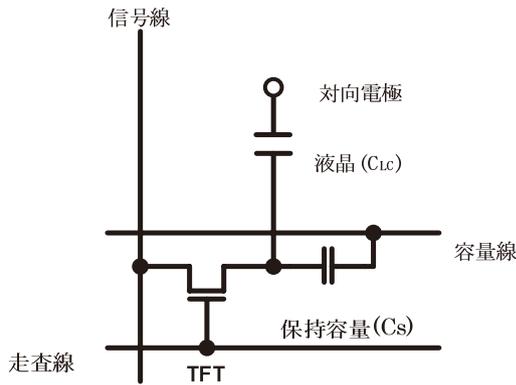


図1 LCDの画素等価回路

走査線（ゲート線）と信号線の交点に TFT が配置され、TFT を介して液晶（ C_{LC} ）と、液晶に並列に配置された保持容量（ C_s ）が接続されている。液晶は対向するガラス基板（カラーフィルター基板）に設けられた対向電極との間で容量（ C_{LC} ）を形成し、保持容量は容量線に接続されている。TFT から見た負荷は、液晶容量と保持容量の合成容量（ $C_{LC} + C_s$ ）となる。

TFT には、走査線選択時間内に、液晶容量並びに保持容量を所定の電位に充電する能力が求められる。TFT の選択時間 t_s (sec) は、走査線数を n 、60 Hz を基準とした駆動フレームレイト比 m を用いて、

$$t_s = \frac{1}{60 \times n \times m} \quad \dots \dots \dots (1)$$

で表され、走査線数の増大（高解像度化）、駆動フレームレイト増大とともに TFT の選択時間 t_s が短縮される。

一方、TFT による画素充電に必要な時定数 τ (sec) は、液晶容量 C_{LC} (F)、保持容量 C_s (F)、TFT の ON 抵抗 R_{TFT} (Ω)、を用いて、

$$\tau = R_{TFT} \times (C_{LC} + C_s) \quad \dots \dots \dots (2)$$

で表され、大画面化、すなわち画素容量（ $C_{LC} + C_s$ ）の増大とともに充電に必要な時定数 τ が増大する。

TFT の ON 抵抗 R_{TFT} (Ω) は、TFT が線形領域で動作している場合、電界効果移動度 μ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)、チャネル幅 W (μm)、チャネル長 L (μm)、ゲート絶縁膜の単位容量 C_i (F)、TFT のゲート電圧 V_{GS} (V)、ドレイン電圧 V_{DS} (V)、しきい電圧 V_t (V) を用いて、

$$R_{TFT} = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{1}{\mu \frac{W}{L} C_i (V_{GS} - V_t)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

で表される。TFT による画素の充電が、選択期間

内に余裕を持って終了するには、 $\tau \ll t_s$ を満足する必要がある。これより、TFT の要求移動度 μ は、

$$\mu \gg \frac{(C_{LC} + C_s)}{\frac{W}{L} C_i (V_{GS} - V_t)} \times 60 \times n \times m \quad \dots \dots \dots (4)$$

で表われ、大画面化による画素容量の増大、高精細化による走査線数 (n) の増大、駆動フレームレイト比 (m) の増大とともに、TFT には高い移動度が要求されることがわかる。NHK が提唱する次世代放送規格であるスーパーハイビジョン（解像度 $7,680 \times 4,320 \times \text{RGB}$ ）ディスプレイにおいては、60Hz 駆動においても移動度 $4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 以上が必要と試算されている。⁵⁾

従来 LCD の駆動においては、a-Si:H TFT の移動度（ $\sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ ）で充分と考えられてきたが、大画面・高精細・高フレームレイト駆動な映像表示ディスプレイでは a-Si:H TFT の移動度が限界に達し、より高移動度が実現できる TFT 技術が必要となる。

一方で、近年実用化が始まった OLED ディスプレイは電流駆動自発光素子であり、1つの画素は、最も単純な構成では、図2に示すように2つの TFT と1つの容量からなる等価回路で示される。

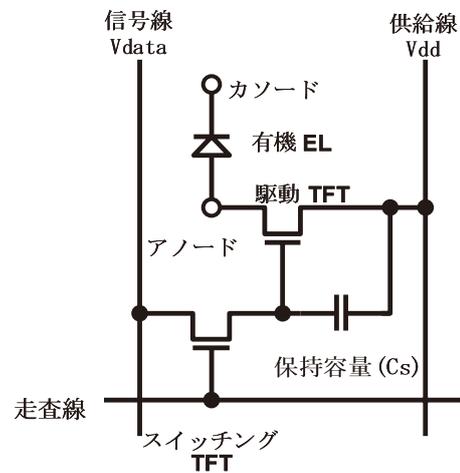


図2 OLEDの画素等価回路

画面のピーク輝度 L_p (cd/m^2) は、駆動 TFT の電流 I_{pixel} (A)、OLED 層の効率を η (cd/A)、画素ピッチを a (m)、を用いて、

$$L_p = \frac{I_{\text{pixel}} \times \eta}{A \times a^2} \quad \dots \dots \dots (5)$$

で表される。A は定数である。TFT は飽和領域で使用されるため駆動 TFT の電流 I_{pixel} は、

$$I_{\text{pixel}} = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu C_i (V_{GS} - V_t)^2 \quad \dots \dots \dots (6)$$

で表される。ピーク輝度 L_p の向上には、駆動 TFT の電流駆動能力 (I_{pixel})、すなわち移動度の向上が必要である。加えて、大画面化 (画素ピッチ a の増大) に伴い同一輝度 L_p 実現に必要な I_{pixel} が増大し、TFT の高移動度化が要求される。また、LCD が 1 画素に一つの TFT であるのに対し、OLED ではスタティック駆動を実現するため最低でも 1 画素にスイッチング TFT と駆動 TFT の二つの TFT が必要である。このため、高移動度 TFT を用いることで TFT のチャンネル幅 W を小さくでき、レイアウト上の利点もある。

式 (5) に示すように、OLED では、画素間の駆動 TFT の電流 (I_{pixel}) ばらつきが輝度ばらつきとして視認される。このため、TFT には初期特性の均一性が強く求められると同時に、電流ストレスに対するしきい電圧 V_t の安定性が強く要求される。しきい電圧 V_t の変動により、(6) 式で示される I_{pixel} が変動し、結果として輝度 L_p ばらつきとして視認されるためである。

現在大画面 TV の駆動素子に用いられている a-Si:H TFT は移動度が小さい ($\sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$) ことに加え、電流ストレスに対するしきい電圧 (V_t) の安定性に課題があり、OLED の駆動には移動度・信頼性に優れた低温多結晶 Si (LTPS) TFT^{3,6)} が用いられているが、LTPS TFT は大面積化に課題があり、大画面 OLED-TV は実現されていない。

これら次世代ディスプレイ実現に必要な性能を実現する TFT 技術として、酸化物 TFT が注目されている。

次に我々が開発している酸化亜鉛 (ZnO) TFT の性能・信頼性に関して、次世代ディスプレイの駆動素子に求められる性能を評価する。

3. 酸化亜鉛 (ZnO)TFT 技術

3.1 ボトムゲート型 ZnO TFT 作製プロセス

今回我々が開発したボトムゲート型酸化亜鉛 (ZnO) TFT の断面構造図を図 3 に示す。

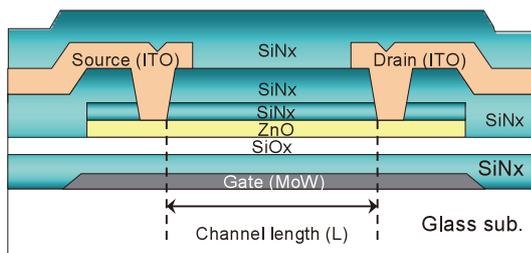


図 3 ボトムゲート型 ZnO TFT の断面構造図

TFT の構造は現在事業化されている非晶質 Si (a-Si:H) TFT とのプロセス互換性を有するボトムゲート構造であり、ゲート絶縁膜としてプラズマ CVD 法にて形成した $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x$ (50/100 nm) 積層膜を用い、その上にスパッタ法にて ZnO 活性層 (40 nm)、プラズマ CVD 法にて SiN_x 保護層 (20 nm) を形成後、活性層の形状に加工する。層間絶縁膜 (SiN_x) を形成後、コンタクトホールを開口し ITO からなるソース・ドレイン電極を形成する。最後にパッシベーション (SiN_x) 膜を形成し TFT が完成する。最高プロセス温度は 350°C である。

酸化亜鉛 (ZnO) 薄膜の物性に関しては文献 6,7) に、作製プロセスの詳細は文献 8) を参照されたい。電気特性の評価の前に 375°C にて窒素雰囲気アニールを行った。

3.2 ZnO TFT 初期特性

作製した ZnO TFT の伝達特性 [$\log(I_d) - V_g$] を図 4 に示す。測定した TFT のチャンネル幅 W は $50 \mu\text{m}$ 、チャンネル長 L は $20 \mu\text{m}$ である。TFT のオフ電流は 1 pA 以下、オン電流は $10 \mu\text{A}$ 以上、ON/OFF 電流比 10^7 以上の優れたスイッチング特性が得られている。ドレイン電流の飽和領域から求めた電界効果移動度 μ は $6 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ が得られ、この値は従来用いられている a-Si:H TFT の 10 倍以上の高移動度である。

また、ゲート電圧 V_g はダブルスイープにて測定しており、 $V_g = -10\text{V}$ から 20V まで変化させた特性と、 $V_g = 20\text{V}$ から -10V まで変化させた特性との差から求めたヒステリシス性 (ΔV_H) は、 $\Delta V_H = 0.2\text{V}$ と良好な値が得られている。これら性能を有する ZnO TFT は次世代ディスプレイのスイッチング素子として有望である。

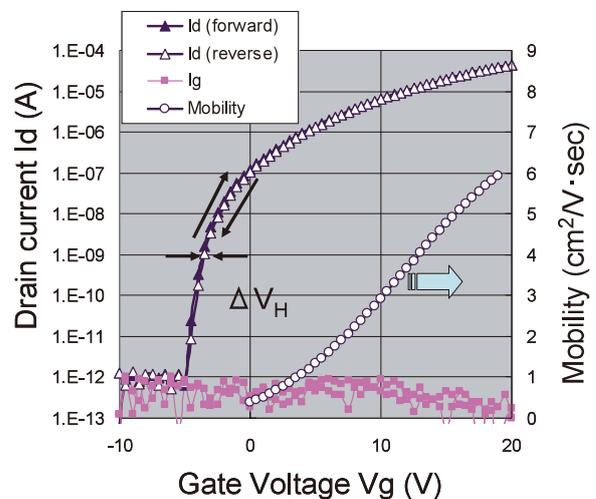


図 4 作製した ZnO TFT の伝達特性

3.3 ZnO TFT の信頼性

TFT のディスプレイデバイス応用に際し、信頼性は重要な評価指標である。TFT の代表的な信頼性評価試験として、バイアス・温度 (BT) ストレス試験、ドレイン電流ストレス試験があげられる。ドレイン電流ストレス試験は BT ストレス試験に比較して試験条件が厳しく、かつ OLED ディスプレイ応用で最も重要視される信頼性試験である。作製した ZnO TFT のドレイン電流ストレス印加による伝達特性の変化を図 5 に示す。

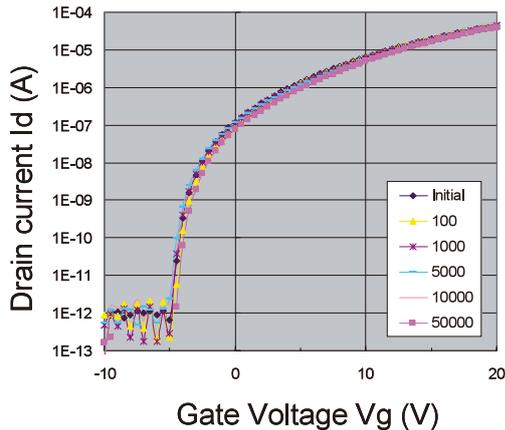


図 5 ZnO-TFT のドレイン電流ストレス試験結果

信頼性試験は TFT をドレイン電流 $45 \mu\text{A}$ ($V_g=V_d=20\text{V}$) にて動作させ、試験温度 50°C にて加速試験を 50,000 秒実施した。50,000 秒動作後のしきい電圧 V_t の変動量 (ΔV_t) は 0.4V であり、非常に安定な動作が可能であることを実証した。この値 (ΔV_t) は報告されている a-Si:H TFT のしきい電圧変動 (ΔV_t) の $1/10$ 以下であり、信頼性に優れる微結晶 Si TFT と同等レベルであり、OLED ディスプレイの駆動に適用可能であることが確認できた。

4. まとめ

高フレームレート駆動 LCD や OLED ディスプレイに代表される次世代フラットパネルディスプレイ (FPD) の駆動素子として TFT に要求される性能を整理した。現在 LCD の駆動に用いられている a-Si:H TFT は大面積性に優れる反面、電子移動度 ($\sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$) が小さく、次世代ディスプレイ応用に際し移動度が限界に達すると考えられる。次世代ディスプレイ向け TFT には大面積プロセスへの展開と同時に、高移動度・高信頼性が要求される。これら要求を満足する TFT 技術は未だ未確立であるが、酸化亜鉛 (ZnO) TFT がその有力候補であることを、特性・信頼性の両面から示した。

文献

- 1) T. Urabe, T. Sasaoka, K. Tatsuki, and J. Takai, "Technological Evolution for Large Screen Size Active Matrix OLED Display", SID 07 Digest, (2007), p.161.
- 2) I. Mori, Y. Sato, Y. Ooishi, and K. Ono, "Improvement of Motion Blue for IPS-Pro LCD-TVs Driven by 180 Hz Impulsive Driving" Proceedings of the 14th International Display Workshops (IDW' 07), (2007), p.79.
- 3) 古田守、薄膜材料デバイス研究会編、“薄膜トランジスタ”、(2008/10)、コロナ社。
- 4) 古田守、“映像ディスプレイからみた TFT 技術の今後の展望”、三井造船技報 No.194 (2008-6)、p.1。
- 5) 栗田泰市郎、“超高精細・高画質映像開発の将来展望”、ISTF2008 シンポジウム講演。
- 6) 古田守、浦岡行治監修、“低温ポリシリコン薄膜トランジスタの開発 -システムオンパネルをめざして-” (2007/2)、シーエムシー出版。
- 7) M. Furuta, T. Hiramatsu, T. Matsuda, H. Furuta, and T. Hirao, "Influence of Energetic Particle Bombardment on the Microstructure of Zinc Oxide (ZnO) Films Deposited by rf Magnetron Sputtering", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.46 (2007) pp.4038-4041.
- 8) M. Furuta, T. Hiramatsu, T. Matsuda, C. Li, H. Furuta, and T. Hirao, "Oxygen bombardment effects on average crystallite size of sputter-deposited ZnO Films", Journal of Non-Crystalline Solids 354 (2008) pp.1926-1931.
- 9) T. Hirao, M. Furuta, T. Hiramatsu, T. Matsuda, C. Li, H. Furuta, H. Hokari, M. Yoshida, H. Ishii, and M. Kakegawa, "Bottom-Gate Zinc Oxide Thin-Film Transistors (ZnO TFTs) for AM-LCDs", IEEE Trans. on Electron Devices, Vol.55, No.11, Nov. (2008), pp 3136-3142.

Zinc Oxide Thin-Film Transistors (ZnO TFTs) for Next-Generation Flat Panel Displays

**Mamoru Furuta, Takahiro Hiramatsu, Tokiyoshi Matsuda,
Hiroshi Nitta * and Takashi Hirao**

Research Institute for Nanodevices, Kochi University of Technology

* Faculty of Engineering, Kochi University of Technology

185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami city, Kochi 782-8502 JAPAN

E-mail: furuta.mamoru@kochi-tech.ac.jp

Abstract: The liquid crystal display (LCD) has established an impregnable position in the field of small- and middle-size information displays. In recent years, LCD is becoming mainstream even in the field of large-size video display for TVs use. On the other hand, high mobility TFT will be required for next-generation flat panel displays such as high-speed LCD with high frame rate driving and organic light emitting diode (OLED) displays. In this report, we will discuss the electrical properties and reliability of ZnO TFTs for next-generation flat panel display application.