

酸化物半導体 (InGaZnO) 技術の進化

Evolution of the Oxide Semiconductor InGaZnO TFT Technology

上田 直樹*¹ 小川 康行*¹ 内田 誠一*¹ 岡田 訓明*¹ 織田 明博*¹ 加藤 純男*¹

Naoki Ueda Yasuyuki Ogawa Seiichi Uchida Kuniaki Okada Akihiro Oda Sumio Katou

山本 薫*¹ 山本 圭一*¹ 松尾 拓哉*¹ 川森 秀次*²

Kaoru Yamamoto Keiichi Yamamoto Takuya Matsuo Hidetugu Kawamori

スマートフォンに代表される小型ディスプレイ分野でリードしてきた低温ポリシリコン (LTPS) 技術に比肩できる酸化物半導体TFT技術を開発した。素子構造の簡素化を進めたチャンネルエッチ型構造を採用することによって、超低リーク、高耐圧、最小素子面積を達成しLTPS技術に匹敵する高精細度、開口率、狭額縁ディスプレイの実現を可能にした。本技術は4k2k解像度を有するスマートフォン実現を目指して更なる進化をつづけている。本稿では、酸化物半導体の超高精細ディスプレイにおけるアドバンテージについて述べるとともに最新状況及び今後の進化についても言及する。

New oxide semiconductor TFT platform for ultra high resolution displays has been developed.

Ultra-low leakage current, high-withstand voltage and the smallest device area in oxide semiconductor TFTs are achieved by making use of the channel-etch (CE) structures.

These superior characteristics enable to realize the high-resolution display with low power consumption, a high aperture ratio and a narrow bezel comparable to those uses "CGSilicon" TFTs. In this paper, the latest development status of CE-type oxide TFTs and their future perspective for a 4k2k display are discussed.>

まえがき

近年、スマートフォンをはじめとするモバイル機器のディスプレイの高精細化高解像度化が急激に進展し、表示品位向上と狭額縁化の進化を伴いながら400ppiを越えるものが多く製品化されている。図1に示すように2016年にはスマートフォンでUHD (4k) 解像度への市場の広がりも予測され、700ppiクラスも視野に入ってきた¹⁻²⁾。性能上の主要課題は、表示品位と消費電力、狭額縁化である。ハイエンド向け液晶ディスプレイは、バックライトの光を液晶によるシャッター機能を利用してカラーフィルタを経由して透過させることによりフルカラー表示を実現する透過型ディスプレイが主流である。このため、高品位な表示には表示画素に光を透過させる部分の面積構成比率 (開口率) が充分高いことが求められる。これは高コントラストや高色再現性、屋外における高視認性といった表示品位だけではなく、バックライト電力の低減にも重要である。ディスプレイの高精細化により表示画素の面積が縮小するため、TFTや金属配線といった非透過領域の比率が増加し、開口率の低下が起こる。この高精細化と高開口率のトレードオフの解

決には、画素内の非透過部分の面積を削減する技術革新が必要となる。また、高解像度化に伴う画素数の飛躍的増加による消費電力増加も顕著となる。さらには、ディスプレイの狭額縁化の要請も大きい。スマートフォンは

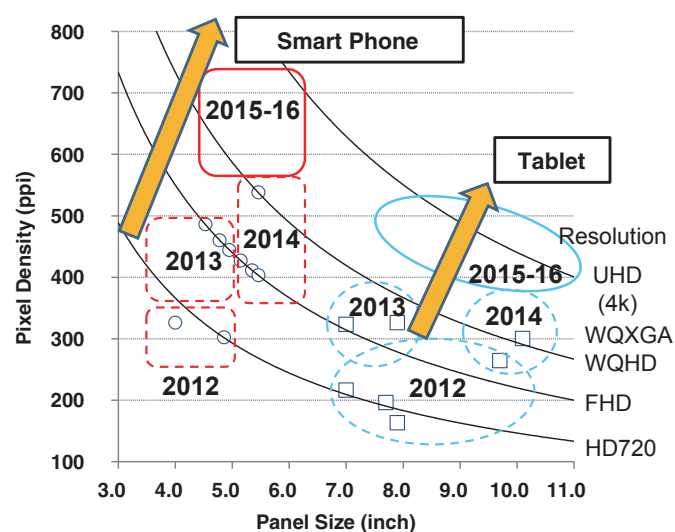


図1 スマートフォンとタブレットにおける精細度と画面サイズ、解像度

Fig.1 Trends of pixel density, resolution, and screen size in Smart-Phone and Tablet.

*¹ ディスプレイデバイス開発本部 デバイス技術開発センター

*² ディスプレイデバイス開発本部 表示モード開発センター

ガラス基板上の左右額縁部分にゲートスキンドライバを搭載しているため、TFT素子の小型化や回路構成の工夫によって回路領域幅を縮小することが狭額縁化において重要である。

酸化物半導体によるTFT技術は、従来のアモルファスシリコンに対して、高い移動度、非常に低いオフリーク、そして従来のアモルファスシリコンの製造工程の大部分を共通化可能な投資効率の高さゆえに、TVやPCディスプレイに代表される中型から大型ディスプレイの次世代技術として注目され開発が進められてきた。一方で、スマートフォンやタブレットに代表される小型ディスプレイ分野では、低温ポリシリコン (LTPS) 技術がその高い移動度と信頼性をアドバンテージとして技術革新をリードしてきたが、当社ではLTPS技術に比肩する酸化物半導体TFT技術を開発した。素子構造の簡素化を進めたチャンネルエッチ型構造を採用し、これに付随する種々の副作用を克服することによって、独自の超低リーク、高耐圧、最小素子面積を達成しLTPS技術に比肩する高精細度、開口率、狭額縁ディスプレイの実現を可能にした。さらに酸化物半導体の特長である超低リークを利用したアイドリングストップ駆動により超低消費電力を同時に実現し、超低消費電力かつ高画質なスマートフォンの最有力技術として、酸化物半導体として世界で初めて2012年に量産を開始した³⁾。本技術は4k2k解像度を有するスマートフォン実現を目指して更なる進化をつづけている。本稿では、チャンネルエッチ型TFTによる酸化物半導体の超高精細におけるアドバンテージについて述べるとともに駆動消費電力、開口率、狭額縁の最新及び今後の進化についても言及する。

4k解像度ディスプレイは、先ずTV市場において臨

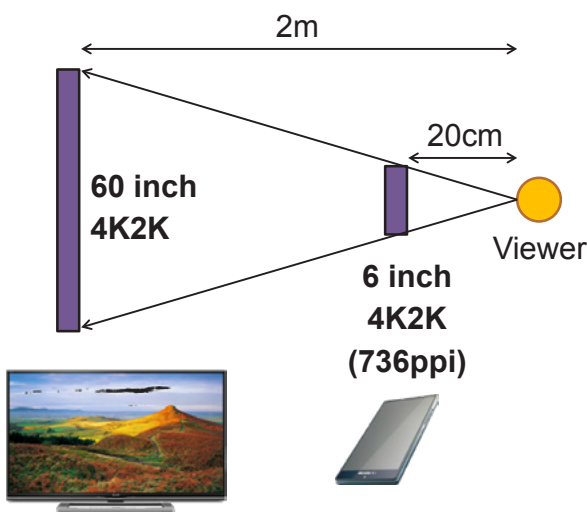


図2 4k2k解像度における60型と6型ディスプレイの視野角比較
Fig.2 Comparison of the Viewing Angle between 60 inch 4K2K and 6 inch 4K2K.

場感や質感の高い表現力が評価されシェアが拡大している。図2に示すように、原理的に視聴者から20cm離れた6型4kディスプレイは、同様に2m離れた60型4kディスプレイは同じ視野角と同じ角解像度 (Cycles Per Degree ; CPD) を持ち、同等の視覚を得ることができるはずである。このように、4Kテレビに端を発した超高解像度の需要は、将来的にスマートフォンまで波及することが想定される。6型4k解像度ディスプレイの精細度は736ppiに及ぶ。今回我々はこの736ppi精細度を実現可能な技術開発とプロトタイプパネル開発を行った。

1. 高精細対応InGaZnO TFT技術のアドバンテージ

1.1 超低オフリーク電流

超低オフリークは、InGaZnOに代表される酸化物半導体の優れた長所の一つである (図3)。これはいくつかの恩恵を超高精細ディスプレイに与えてくれる。画素TFTの保持能力が低い場合は、描画中のデータ線の電位に応じて保持電荷が喪失することによるフリッカやクロストーク等の発生の原因となる。一方、TFTの保持能力が高い場合は前述の課題を解消した上で、画素電圧のリフレッシュ周波数を低減することが可能になり、大幅なパネル駆動電力の低減が可能になる。

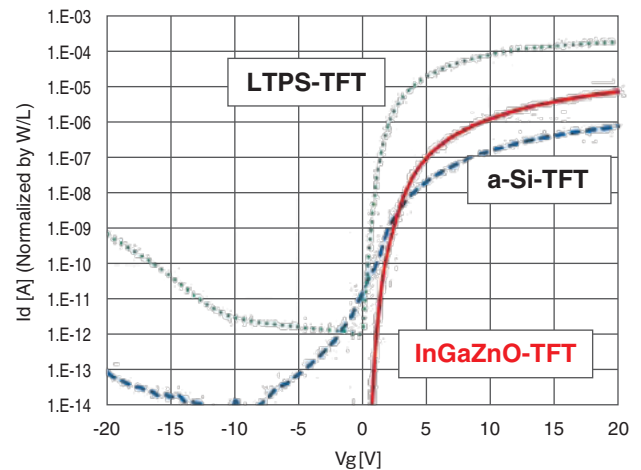
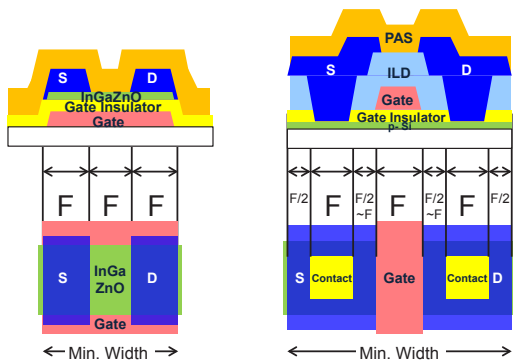


図3 TFTの電流電圧特性の比較 (LTPS/InGaZnO/a-Si)
Fig.3 Comparison of I-V characteristics among different TFT technologies.

1.2 最小面積TFT

TFTの構造は大きくボトムゲート型とトップゲート型に大別される^{4,5)}。トップゲート型はLTPS技術に採用されており、寄生容量の低減が容易で高性能用途に向いている一方、マスク枚数の多いこと、製造プロセスが複雑になることが課題である。ボトムゲート型は、酸

化物半導体技術やアモルファスシリコン技術に採用されており、マスク枚数の少なさに代表される製造プロセスコストの低さにアドバンテージがあるが、寄生容量の低減や高性能化には種々の工夫が必要である。ボトムゲート型は、エッチングストップ型 (ES型) TFT 構造と、これに対して構造を簡素化し最小面積を実現可能なチャンネルエッチ型 (CE型) TFT 構造がある。図4にトップゲート型 (LTPS), チャンネルエッチ (CE) 型 (InGaZnO) のTFT構造を比較した。CE型は省面積に優れたコンタクトレス構造であり、原理的な最小サイズはトップゲート型の1/2となる。我々は、このCE型TFT構造を採用して酸化物半導体のアドバンテージを組み合わせることで高開口率化を律速する画素TFTの小型化や額縁幅を律速するモノリシックゲートスキンドライバー回路の小型化を実現した。



	CE-InGaZnO	LTPS (LDD)
# of Contact	None	2
Min. Width	3F	5~6F

F: Featured patterning dimension

図4 TFT素子の断面図, 平面レイアウト図, 仕様比較
Fig.4 Comparison of TFT cross section and unit layout.

1.3 スケーラビリティ

素子寸法の縮小可能性の高さも超高精細ディスプレイにおけるCE型酸化物半導体TFTのメリットである。図5に示すように、閾値電圧 (V_{th}) のチャンネル長依存性は現行量産レベルの最小線幅である3 μm まで安定している。3 μm 未満ではしきい値電圧 (V_{th}) の低下がみられるが、この効果はTFT素子の最適化設計により、シンプルな構造を維持したままさらに縮小可能である。InGaZnO半導体は50nmのチャンネル長までの素子開発が報告されており、短チャンネル素子におけるドレイン/ソース間の耐圧の高さも特長の一つである⁶⁾。短チャンネルではさらにホットキャリア耐圧が低下する傾向があるが、素子構造の工夫により抑制されている。このように、負荷設計を最適化すればチャンネル長を製造レベ

ルの最小線幅に設定可能であることから、最小面積TFTのメリットを引き出すことが可能となる。

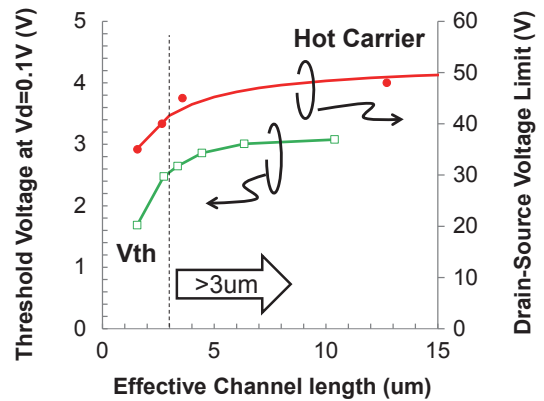


図5 CE型InGaZnO TFT特性のチャンネル長依存性
Fig.5 CE type InGaZnO TFT characteristics and channel length.

2. 超高精細ディスプレイへの要求

2.1 高開口率

開口率の低下は超高精細化において最大の課題である。ディスプレイの高精細化に伴う画素面積の縮小に対して、画素内の非透過領域を構成する金属配線、TFT素子と画素コンタクトの面積縮小が重要となる。超高精細画素では画素の保持容量は低下傾向にあるため、画素容量の充電に対する画素TFTの電流駆動能力の要求が緩和されることもTFTの小型化を有利にしている。図6に、精細度に対する開口率のトレンドを示す。実線が現状のスマートフォン向けに採用している酸化物半導体 (InGaZnO) 技術によるものである。これは2014年に量産化された487ppiの4.5型FHD解像度ディスプレイに採用されている。我々はさらにTFTの小型化と、InGaZnO材料の透明性を活用した前述の非透過領域の縮小を可能にする次世代画素設計技術をStep2として、WQHD解像度をスマートフォンで実現可能な500ppiクラスに対応する。さらには、光配向技術やカラーフィル

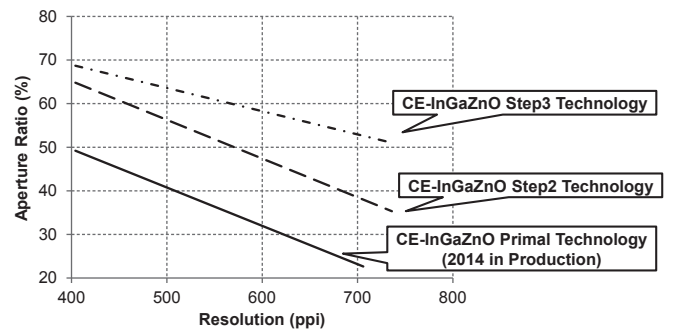


図6 InGaZnO 高精細ディスプレイの開口率技術トレンド
Fig.6 Aperture ratio and resolution roadmap.

タの位置合わせ精度の向上等により Step3として4k2k解像度のスマートフォンに相当する600-700ppiクラスを実現していく。

2.2 低消費電力

超高解像度ディスプレイでは、画素数の急激な増加に伴い駆動電力が飛躍的に増加する。これはモバイル機器ではバッテリー駆動時間の低下につながる深刻な問題である。酸化膜半導体を採用した液晶パネルでは、独自の低周波駆動技術によりリフレッシュレートを通常採用されている60Hzから、1Hzまで低減させることが可能である。ディスプレイパネルの駆動電力はリフレッシュレートに比例するため、画素数の増大による駆動電力の上昇をリフレッシュレートの大幅な低減によってキャンセルすることができる。図7に解像度の増加に対するパネル駆動電力（相対値）の推移をリフレッシュレートに対してプロットしている。通常のリフレッシュレートである60Hzでは、FHD解像度から4k解像度への増加に対して大幅に電力が増加している一方、1Hzのリフレッシュレートでは顕著な増加はみられない。このように、表示コンテンツに応じてリフレッシュレートを60Hzから1Hzまで最適化する当社独自の液晶アイドリングストップ技術により、4k解像度でもパネル駆動電力の増加を抑制することが可能になる。

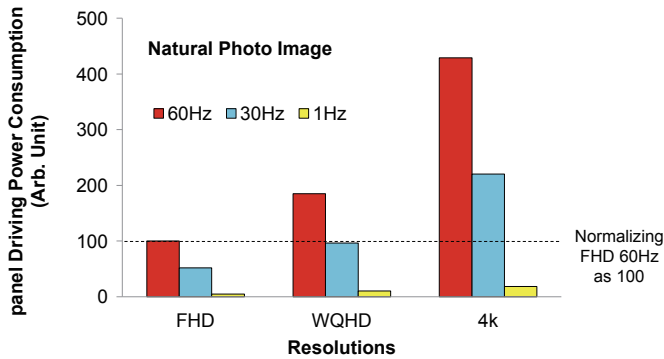


図7 InGaZnO LCDパネルの消費電力と解像度、リフレッシュレート
Fig.7 InGaZnO Panel Driving Power Consumption Trends and Smart Refresh Control Driving.

2.3 狭額縁化

狭額縁化もまた、超高解像度ディスプレイにおける重要な競争軸であり、ゲートドライバー回路幅の低減は狭額縁化において必須である。InGaZnOの移動度は狭額縁技術をリードしているLTPSの約1/10と低くなっている。しかしながら、酸化物半導体の長を画素やドライバー回路に活かす設計上の工夫によりこの格差を大幅に縮小することが可能である。具体的には画素TFTが

小面積であること、超低リーク特性の恩恵により画素あたりのTFT素子がLTPSの半数であること等の効果により、ゲート線の駆動負荷がLTPSに対して半減が可能であり、実質的な出力段のトランジスタ寸法の比率はLTPSに対して2.5倍以下に圧縮可能である。図8に2014年1月に量産化された4.5型FHDパネルの額縁部の写真を示す。本製品ではLTPSに迫る1.0mmの狭額縁を実現している。

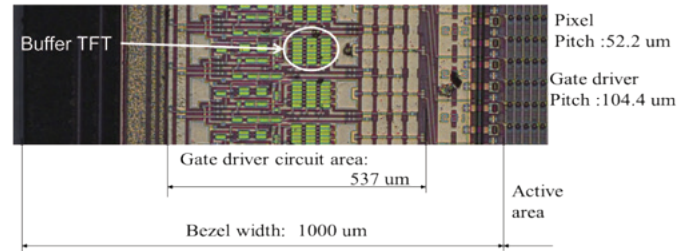
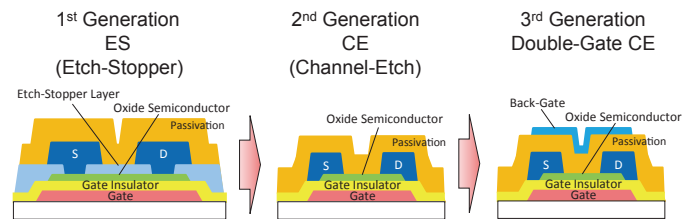


図8 4.5 inch FHDディスプレイのゲートドライバー回路と額縁部の写真
Fig.8 4.5 inch FHD gate driver circuits.

3. 今後の酸化物半導体の進化

上述のように、現在量産に適用されている酸化物半導体InGaZnOの移動度はLTPSの1/10程度であるが、酸化物半導体の移動度向上の多くの取り組みが進められており、InGaZnOの5倍程度まで向上する可能性が見えてきている⁷⁾。さらにデバイスの縮小やデバイス構造の革新も継続的に進化している。図9に示すように、ES型TFT構造から、高精細ディスプレイに適した現行のCE型TFT構造にとどまらず、チャンネル長の縮小や、バックチャンネル側にもゲートを配置したダブルゲート構造



	1st Generation	2nd Generation	3rd Generation
TFT 構造	ES	CE	ダブルゲートCE
マスク枚数	6	5	←
最小素子幅	5~6F	3F	←
チャンネル長	2F	1.5F	1F
駆動能力比	0.7	1.0	2~6

F: Featured patterning dimension

図9 酸化膜半導体 TFT 構造の進化
Fig.9 Evolution of the oxide semiconductor TFT technologies.

TFTへ進化することにより同じ移動度でも電流駆動能力は現行比2~6倍に高めることが可能である。

4. 超高精細技術プロトタイプパネル

前述の技術を採用して736ppi精細度でWQXGA解像度のプロトタイプディスプレイパネルを新規開発した。本パネルの写真を図10、表1にスペックを示す。736ppi精細度と51%という高開口率と両立させた。また、左右額縁0.9mmを実現した627ppiプロトタイプパネルも同様の技術で開発した。736ppiの精細度は4k2k解像度では6型の画面サイズに相当する。



図10 超高精細プロトタイプパネルの写真 (a) 4.8型(b)4.1型
Fig. 10 Photo image of the prototype LCD panels.

表1 超高精細プロトタイプパネルの仕様
Table 1 Specification of the developed prototype LCD panels.

Panel Size	4.10 inch	4.80 inch
No. of pixels	2560 x 1600 (WQXGA)	
Resolution	736ppi	627ppi
Pitch size	11.5 μ m x RGB x 34.5 μ m	13.5 μ m x RGB x 40.5 μ m
Design Rule	LTPS mass-production equivalent	
Aperture Ratio	>50%	>55%
Bezel Width	-	0.9mm

5. まとめ

スマートフォンに代表される小型ディスプレイ分野を

リードしてきたLTPS技術に比肩できる酸化物半導体技術を開発した。素子構造の簡素化を進めたチャンネルエッチ型構造を採用することによって、超低リーク、高耐圧、最小素子面積を達成しLTPS技術に迫る高精細度、開口率、狭額縁ディスプレイの実現を可能にした。本技術は4k2k解像度を有するスマートフォン実現を目指して更なる進化をつづけている。また、本技術を採用した736ppi精細度の4.1型WQXGAプロトタイプディスプレイパネルを開発した。このように、当社の超高精細ディスプレイ技術は、超低消費電力を特長とする酸化物半導体技術と、高性能・狭額縁を特長とするLTPS技術の2つの柱の棲み分けにより、いっそう幅広い需要に対応することが可能となった。

本研究は株式会社半導体エネルギー研究所並びにアドバンストデバイスフィルムインク株式会社との共同開発によるものです。

参考文献

- 1) Y. Takubo, Y. Hisatake, T. Iizuka and T. Kawamura, "Ultra-High Resolution Mobile Displays" SID'12 DIGEST 869 - 872, (2012)
- 2) Y. Kataoka, H. Imai, Y. Nakata, T. Daitoh, T. Matsuo, N. Kimura, T. Nakano, Y. Mizuno, T. Oketani, M. Takahashi, M. Tsubuku, H. Miyake, T. Ishitani, Y. Hirakata, J. Koyama, S. Yamazaki, J. Koezuka, K. Okazaki, "Development of IGZO-TFT and Creation of New Devices Using IGZO-TFT" SID 56.1, 771-774 (2013).
- 3) T. Matsuo, S. Mori, A. Ban, and A. Imaya, "Advantages of IGZO Oxide Semiconductor" SID'14 DIGEST 83 - 86, (2014).
- 4) N. Ibaraki, "Low Temperature Poly-Si TFT Technology" SID 1999 DIGEST 15.1 172-175 (1999)
- 5) Toshiaki Arai, Narihiro Morosawa, Kazuhiko Tokunaga, Yasuhiro Terai, Eri Fukumoto, Takashige Fujimori, Tetsuo Nakayama, Takashi Yamaguchi* and Tatsuya Sasaoka., "Highly Reliable Oxide-Semiconductor TFT for AMOLED Displays" SID '10 Digest 69.2, p. 1033-1036 (2010)
- 6) Y. Yakubo, S. Nagatsuka, S. Matsuda, S. Hondo, Y. Hata, Y. Okazaki, Y. Yamamoto, M. Nagai, S. Sasagawa, T. Atsumi, M. Sakakura, T. Nakura, Y. Yamamoto and S. Yamazaki, "High-speed and Low-leakage Characteristics of 60-nm C-axis Aligned Crystalline Oxide Semiconductor FET with GHz-ordered Cutoff Frequency", Abstracts of the 2014 SSDM, pp648-649
- 7) J. Song, J. Lim, B. Ahn, J. Lee, "High Mobility Oxide TFTs for Future LCD Applications" SID 10.3, 93-96 (2013).