

IGZO技術

松尾 拓哉

ディスプレイデバイス開発本部

スマートフォンに代表されるモバイル機器は目覚ましい進化を遂げています。通信速度の飛躍的な高速化に伴って送受信される情報量も増え、それらをより正確に表現できる超高精細ディスプレイの需要が急激に拡大しています。当社の商標（商標登録第5451821号）であるIGZOは、これからのモバイル用ディスプレイに必須となる超高精細対応、低消費電力化の実現に重要な差別化技術となります。高精細モバイルディスプレイ向けに当社が世界で初めて量産に成功したIGZO技術について解説します。

1 はじめに

スマートフォン、タブレットの登場でモバイル機器はこの数年で大きく変化してきました。情報量の多い詳細なホームページ、地図、写真などのやり取りが増大し、より正確に、より美しく表示するためのディスプレイの高精細化と、多様なアプリケーションをタッチパネルで自在に操作するための大画面化が急速に進みました。その結果、従来型の携帯は影を潜め、大型のディスプレイが機器の大半を占めるスマートフォンや、パソコンに近い特徴を持つより大画面化したタブレットが世界を席巻しています。

モバイル用ディスプレイの高精細化は、パネル駆動回路をガラス基板上に作りこむことのできる低温ポリシリコン薄膜トランジスタ（Thin Film Transistor, 以下TFT）の登場でスタートしました。当社でもオンリーワン技術であるCGシリコン^{*}（Continuous Grain Silicon, 高移動度の特長を持つ低温ポリシリコンTFT）でモバイル用液晶ディスプレイを革新。2002年に天理工場にて量産を開始し、ザウルスSL-C700用3.7型217ppiVGA液晶ディスプレイ（640×480ドット）を生産、また2006年には世界で初めて携帯

用として従来の4倍の画素数となる332ppi 2.4型VGA液晶ディスプレイを生産（Softbank 904SHに搭載）しています。その後高精細化の流れは、スマートフォンによって一気に加速しました。2型クラスが中心だった携帯用ディスプレイサイズは3型～5型クラスへと拡大し、画素数もqHD（960×540ドット）～HD720（1280×720ドット）まで増加してきました。また、現在最先端のタブレットは10型クラスでありながらQXGA（2048×1536ドット）の画素数を持ち、フルハイビジョンTV（1920×1080ドット）を優に凌ぐ精細度になっています。

このモバイルディスプレイの高精細化の流れに対応する革新技術として、当社は業界に先駆けてIGZO-TFTを開発し、量産を開始致しました。

※CG Siliconは（株）半導体エネルギー研究所との共同開発成果物です。

2 シリコン半導体から酸化物半導体へ

1948年ベル研究所でのトランジスタの発明に始まり、1950年代のシリコンウェハ上へ形成する集積回路（IC）の発明によって急速に発展し、今日に至る50年以上の長い歴史をもつシリコン半導体は、液晶ディス

プレイの分野でもガラス基板上のTFTとして展開され、1980年代にはアモルファスシリコン（非晶質、a-Si）TFTを縦横に配置したアクティブマトリクス駆動の液晶ディスプレイが開発されてきました。1988年には当社から世界初となる14型TFTカラー液晶ディスプレイを発表しています。さらに半導体層をポリシリコン（多結晶、p-Si）へと進化させたLTPS（Low Temperature Poly Silicon TFT：低温ポリシリコンTFT）が登場し、当社でも低温ポリシリコンの高性能化を追求した前述のCGシリコンを開発しました。CGシリコンでは駆動回路をガラス上に小面積で形成できることからパネル外周部の狭額縁化に極めて有利であり、現在の当社の高精細ディスプレイを支える基盤技術となっています。

シリコン半導体がこのような長い歴史をもつのに対し、酸化物半導体は、2000年代に入ってからTFTへの応用研究が積極的に行われた非常に新しい技術です。その中でもインジウム（In）、ガリウム（Ga）、亜鉛（Zn）の酸化物であるIGZOは、次世代のディスプレイ用TFT技術として広く開発が進められてきました。当社はその実用化競争の中で2012年、世界で初めて亀山第2工

表1 IGZO-TFTと従来シリコンTFTとの比較表

	IGZO-TFT	アモルファスシリコンTFT (a-Si TFT)	低温ポリシリコンTFT (LTPS) CGシリコン (当社)
材 料	インジウム (In), ガリウム (Ga), 亜鉛 (Zn), 酸素 (O) の4元素の化合物	シリコン (Si)	シリコン (Si)
電子移動度	10cm ² /Vs以上	0.5cm ² /Vs	LTPS : 100cm ² /Vs以上 CG Silicon : 250cm ² /Vs以上
リーク電流	10E-16 A/μm以下	10E-13 A/μm以下	10E-12 A/μm以下

場にて量産に成功しました。アモルファスシリコンTFTで液晶ディスプレイを開発してから、約20年、低温ポリシリコンTFT (当社独自技術CGシリコン) の量産開始から約10年後にあたります。液晶業界10年に一度の変革にあたりると同時に、酸化物半導体の登場は、シリコン半導体の長い歴史に対する50年来の大変革となります。

3 IGZO-TFTの特長と当社独自技術CAAC-IGZO*

(1) IGZO-TFTの特長

表1に従来のアモルファスシリコンTFT, 低温ポリシリコンTFTとIGZO-TFTとの特徴を比較します。酸化物半導体であるIGZOは、先に述べました通り3つの元素の酸化物となり、シリコン半導体が基本的にシリコン (Si) の単元素で構成されているのと対照的です。IGZO技術の実用化の難度が高くなっている理由もここにあります。各々の酸化物が不安定な挙動を示すため、安定的なトランジスタ特性を得るためには多くの製造ノウハウが必要となります。

図1に各TFT特性の概略図を示します。各々のTFT特性の特徴をアモルファスシリコンTFTをリファレンスに説明します。まず同じシリコン半導体である低温ポリシリコンTFTの特長は、高移動度であるため駆動電流が大きくなることにあります。加えてn型, p型両特性のTFTが作製できる上に、特性

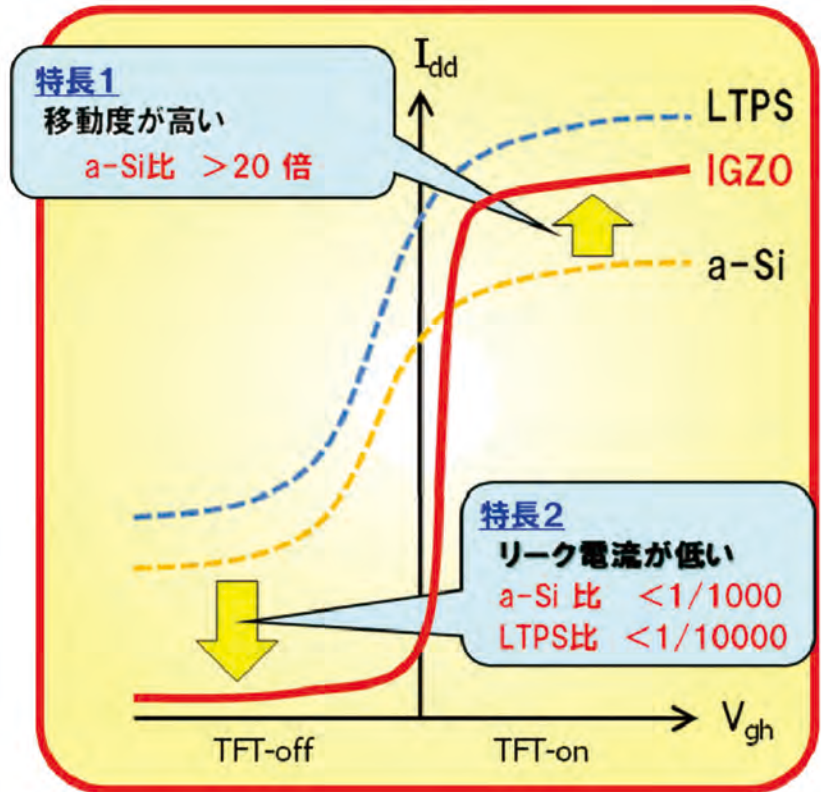


図1 各TFT特性概略図

の安定性も高く、高度な駆動回路をパネル周辺額縁部にコンパクトに形成できます。短所はアモルファスシリコンTFTよりさらにリーク電流が大きいことです。このため画素TFTとして画素電位を保持する能力が低く、通常TFTを2個直列につないでソースドレイン間にかかる電圧を半減させてリーク電流を抑えるデュアルゲート方式を採用します。このため、TFTが画素に占める面積が大きくなり、透過開口部が削減される欠点があります。

これらに対しIGZO-TFTでは、前述のシリコン半導体の長所を受け継ぎ、短所を克服する特性を持ち

ます。電子移動度は低温ポリシリコンTFTより劣るものの、アモルファスシリコンTFTの20倍とディスプレイの周辺駆動回路を形成するのに十分な値を持つため、低温ポリシリコンTFTと同様にガラス上に回路形成を行ってパネル周辺額縁部を縮小するモノリシック技術が可能になります。最大の特長はシリコン半導体では望めない低リーク特性です。アモルファスシリコンと比較して少なくとも3桁以上、ポリシリコンTFTとの比較では4桁以上低い超低リーク特性を持ちます。電子効果移動度が大きいため、画素TFTのサイズを小さくできるとともに、

リーク電流が極めて小さいため、ポリシリコンTFTのようにTFTを複数必要とすることも無く、画素内にコンパクトにTFTを形成できます。この結果、非常に透過開口率の高い画素設計を行うことができます。

(2) オンリーワン技術CAAC*

IGZO-TFTの半導体膜には、従来アモルファス（非晶質）状態のものが用いられてきました。アモルファスであるため、均一性に優れていることがその主な理由です。これに対し、次世代の新IGZOとしてCAAC-IGZO（C-Axis Aligned Crystal-IGZO）を、半導体エネルギー研究所と当社の共同開発によって実現しました。構成元素であるIn, Ga, Zn, Oに変更はありません

が、膜成長方向でC軸に強く配向した原子配列を持つ結晶構造薄膜で、単結晶や明確な結晶粒界を持つ多結晶ではない新しい状態です。図2¹⁾にCAACのTEM像と原子配列図を示します。従来のアモルファス構造がランダムな原子配置であるのに対し、膜表面に垂直な方向（C軸）に対しInO₂, (Ga, Zn) Oが規則正しく層状態に形成されています。結晶方位の均一性が高く、明確な粒界も持たないためTFT特性の均一性に優れています。CAACを用いたTFTの信頼性データを図3¹⁾に示します。光バイアスストレス下でも閾値変化が小さく、TFT特性の変動が抑制されています。このようにCAACは緩やかな結晶構造であるためアモルファスが持つ膜均一性と

結晶構造が持つ高安定性を併せ持つことを特長とします。

※CAACおよびCAAC-IGZOは半導体エネルギー研究所の登録商標です（登録第5473530号および第5494218号）。

4 ディスプレイ応用

(1) 液晶ディスプレイの低消費電力化

①高開口率化によるバックライト透過率の向上

モバイル機器では高精細化が進み今日では、300ppiクラスの画素精細度を持つものも多く商品化されてきましたが、この傾向は今後も続くと考えられます。ここで高精細化の需要について人の識別能力から推測を行います。一般的な視力検査では、5mの距離からランドルト環の1.5mmの切れ目の方向を識別できる場合を視力1.0としますので、スマートフォンをもっともよく見える位置から凝視する場合を想定して計算します。例えば、視力1.0の人が30cmの距離で見た場合は比例計算で0.09mmの隙間が識別可能となり、精細度の識別能力は282ppi相当となります。視力1.5程度の比較的目的目がいい人が20cmの距離で見ると、同様の計算で、635ppiに相当します。このように人の識別能力には個人差があり、現在のディスプレイは視力1.0の人に相当する平均的な識別可能解像度レベルに留まっていることが分かります。今後、最先端ハイエンド機種ではスペック競争によって、400～500ppiを超える精細度に移行することが容易に想定されます。

このようなモバイルディスプレイの超高精細化に伴って各画素は比例して小さくなり、その中に配置する画素TFTの寸法が画素開口率に大きな影響を与えるようになってきます。前述のようにIGZO-TFTでは高移動度、低リーク特性から、TFT

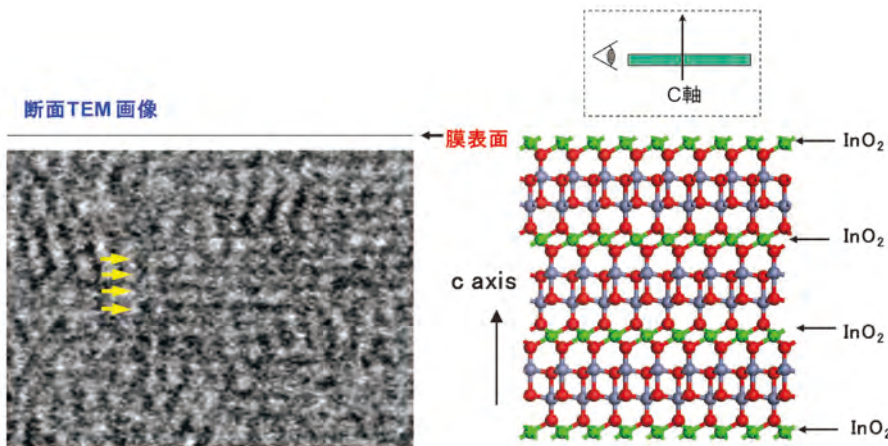


図2 CAAC-IGZO原子配列（TEM像および原子配置図）

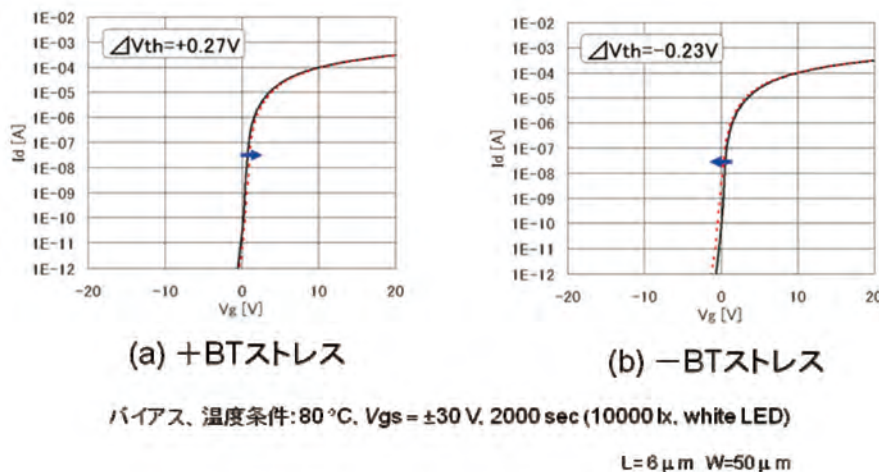


図3 CAAC-IGZO TFTストレス変化

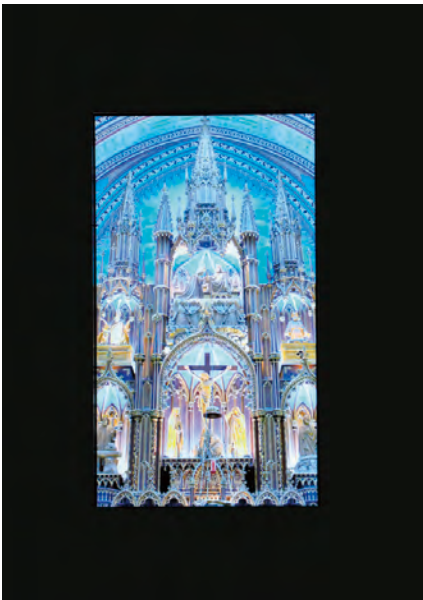


図4 4.9型302ppi液晶ディスプレイ (720×1280ドット)



図5 6.1型超高精細498ppi液晶ディスプレイ (2560×1600ドット)

を小型にでき、特にCAAC-IGZOでは、500ppi以上のディスプレイでも高開口率が得られるサイズを実現しています。この結果、バックライトの消費電力を抑えることができます。

図4および図5にCAAC-IGZOで作製しました4.9型302ppi (720×1280ドット)、6.1型超高精細498ppi (2560×1600ドット)液晶ディスプレイを示します。

②低消費電力休止駆動の実現

IGZOを用いたディスプレイでは、休止駆動が可能になります。休止駆動とは表示データが変わらない静止画の表示において、画像データの書き換え動作を休止する技術です。動作概念図を図6に示します。従来のアモルファスシリコン、低温ポリシリコンTFTを用いた液晶ディスプレイでは、画素TFTのリーク電流の大きさから液晶にかかる画素電位が変動します。この変動を可視化させないために、一般的に60Hzで画像データの書き込み（画素への再充電）を行う必要があります。図中①にあるように書き込み周波数を下げて休止期間を設けた場合には、その

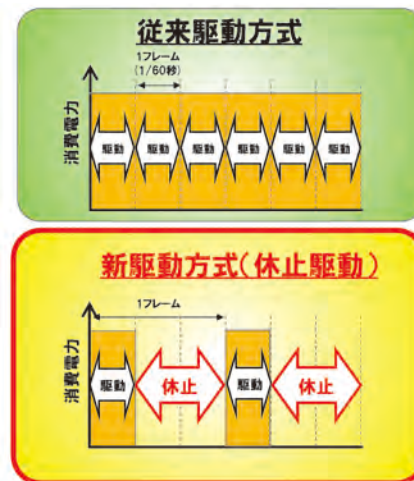


図6 休止駆動概念図

期間中にTFTのリーク電流によって画素電位が低下することで輝度が下がり、ディスプレイが明滅するフリッカー現象が発生します。

IGZO-TFTを用いた液晶ディスプレイでは、リーク電流の低さから休止期間中の画素電位低下もほとんど無いため、再書き込み周波数を大幅に下げることができます。画像データの書き換えがなければ、液晶をAC駆動するための反転動作だけになりますのでパネル部分の消費電力は、従来の1/5～1/10となります。

ディスプレイの高精細化に伴う透過率の低下と配線数増加から生じ

る容量の増大から、超高精細パネルの消費電力は急激に増加します。IGZOでは高透過率画素や休止駆動の実現によって、今後の超高精細化においても消費電力を抑制したモバイルディスプレイを実現します。

(2)有機ELディスプレイへの応用

現在、有機ELディスプレイではバックプレーン(TFT基板)として、低温ポリシリコンTFTが量産に用いられています。この理由は、電流駆動力が大きいことn型、p型TFTが造れること、TFTの特性安定性に

優れていることです。アモルファスシリコンTFTでは、電流駆動力および特性安定性が低く有機EL用として採用困難です。低温ポリシリコンTFTを用いた場合の問題点は、結晶化工程のレーザーアニールに起因するTFT特性のばらつきが大きい

ため、5個前後のTFTを用いた補償回路を画素内に設けなければならないことです。多くのTFTを、プロセスの長いポリシリコンTFTで精度良く作らなければならない、有機ELディスプレイの歩留まりが低い要因にもなっています。

IGZOでは、前述のように十分な電流駆動力があることおよびTFT特性の均一性に優れているため有機ELディスプレイに適したTFTと言えます。またIGZO-TFTの製造プロセスはアモルファスシリコンTFTともほとんど変わらない工程数であるため、有機ELディスプレイの課題である歩留り向上も期待できます。図7および図8にバックプレーンをCAAC-IGZOにて作製しました13.5型326ppi有機ELディスプレイ(3840×2160ドット)、3.4型326ppiフレキシブル有機ELディスプレイ(540×960ドット)を示します。

5 おわりに

2000年代初頭に登場し、技術的にはまだ歴史の浅い酸化物半導体であるIGZO-TFTは、従来のシリコンTFTには無い特長を有し、大きな可能性を秘めている次世代デバイスとして期待されています。当社はそのリーディングカンパニーとして、IGZO技術の絶え間ない進歩を図るとともに、2012年3月に量産を開始しました超高精細モバイルディスプレイをはじめとし、市場の要求に応えながら、有機ELディスプレイ、さらにはIGZOの特長を活かした医療用センサなどの非ディスプレイ領域へとその応用範囲を広げたいと考えています。

参考文献

- 1) Shunpei Yamazaki, Jun Koyama, Yoshitaka Yamamoto and Kenji Okamoto, "Research, Development, and Application of Crystalline Oxide Semiconductor" SID 2012 183-186



図7 13.5型326ppi有機ELディスプレイ (3840×2160ドット)

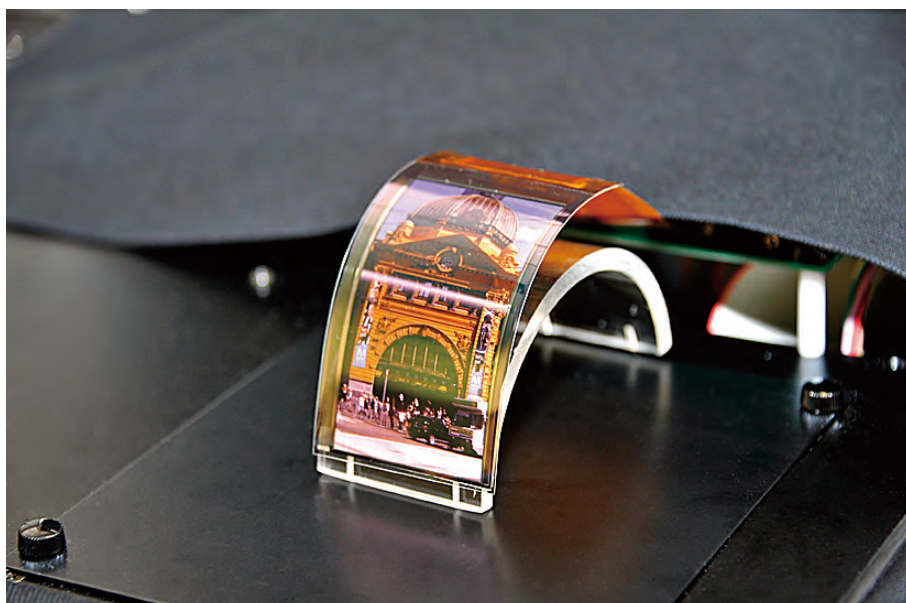


図8 3.4型326ppiフレキシブル有機ELディスプレイ (540×960ドット)