

1-1 ZnO-TFT 技術の開発（コア研究室）

テーマ概要

酸化亜鉛（ZnO）はワイドギャップ（ $\sim 3.3\text{ eV}$ ）材料であり、ディスプレイ用 TFT 用途として考えた場合、可視光に対して透明であるため光リーク電流が少なく、透明・高移動度 TFT の特徴を活かした高開口率設計が期待できる。ZnO は、一般的なスパッタ法にて形成可能なため大面積化が容易であり、さらに室温付近の成膜温度において多結晶状態の薄膜が形成出来ることより、基板温度の制約があるプラスチック等のフレキシブル基板上への TFT 活性層としても有望である。

シリコン系材料を用いた TFT と ZnO-TFT の比較を図 1 に、開発の経緯を図 2 に示す。

	アモルファスSi TFT	Poly-Si TFT	ZnO-TFT
LCDパネル構造 (イメージ)			
移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)	0.5 ~ 1.0	100 ~ 300	10 ~ 100
駆動回路内蔵化			
高精細化			
大面積化			
低温(<150)プロセス			
透明性	×	×	

図 1 . ZnO-TFT の特長

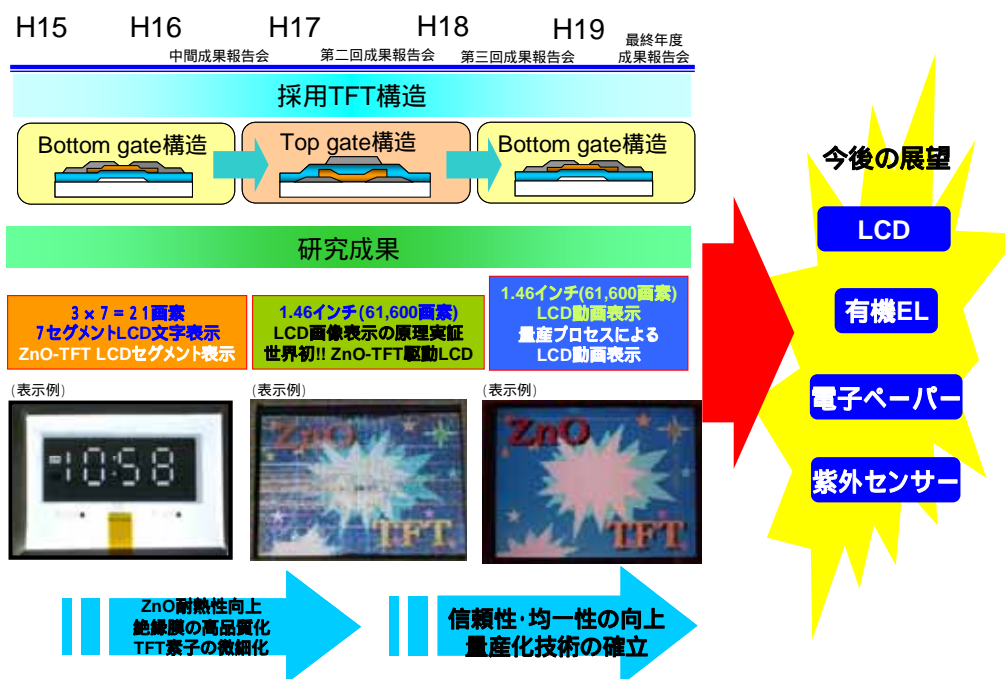


図 2 . ZnO-TFT 開発の経緯

フェーズ

本事業の開始に際し、TFT 素子構造に関してカシオ計算機（株）との協議の結果、“現在事業化されているアモルファスシリコン（以下 a-Si:H）TFT 技術との整合性を確保し、投資額を最小限に抑えつつ高性能な ZnO-TFT を開発する”ことを目的とし、a-Si:H TFT と同様にボトムゲート構造を選択した。本事業の目標に則り、a-Si-TFT の素子構造と製造プロセスに準拠することを前提に、ZnO-TFT フォトリソ加工に関する調査を行なった結果、ZnO 薄膜の耐薬品性に課題があることが明らかとなった。この課題に対し、TFT 作製プロセスにおいて ZnO 表面が露出しない構造により、全ての加工をフォトリソグラフィーで実施可能な ZnO-TFT プロセスを構築した。

フェーズ では ZnO 膜の成膜・加工とも十分な精度に満たない状況であったため、TFT アレイを微細にせずとも作製可能な 7 セグメントによる液晶表示実証を行なうことを目標とした。7 セグメント液晶表示は ZnO の成膜はコア研究室で、その他の工程（絶縁膜・メタル配線の材料・加工条件）はカシオ計算機（株）a-Si TFT プロセス条件を用いた。平成 16 年 9 月 16 日開催の第 1 回研究成果発表会にて、7 セグメントによる液晶表示装置の展示および報告を行なった（図 3）。



図 3 . 7 セグメントモノクロ LCD 表示例（第 1 回研究成果発表会）

フェーズ

【トップゲート型 ZnO-TFT 基本プロセスの開発と 6 万画素液晶ディスプレイ原理実証】 （背景）

ZnO-TFT に要求される項目として、大面積化が容易な手法にて、移動度、しきい電圧、リーク電流といった TFT 特性の総合的な向上があげられる。我々は、大面積化が容易なマグネトロンスパッタ法にて ZnO の形成を行なった。マグネトロンスパッタ法にて形成した ZnO の断面 TEM 像および電子線回折像を図 4 に示す。断面 TEM 像に見られるように、スパッタ法にて形成した ZnO は柱状構造の多結晶薄膜であり、(002)方向に優先配向した薄膜である。電子線回折像からは、基板界面側に比べて、薄膜表面側の方が良好な結晶性を有している。これは柱状構造を持つ多結晶体で一般的な現象であり、膜厚方向に成長が進むにつれ、小傾角粒界の緩和などにより粒径の増大と優先成長が進むことを示しており、TFT の活性層に ZnO を用いた場合、基板界面側を活性層に用いるボトムゲート構造よりも、結晶性の良い薄膜表面側を活性層に用いるトップゲート構造の方が、高い移動度や総合的な TFT 特性の向上が見込まれる。

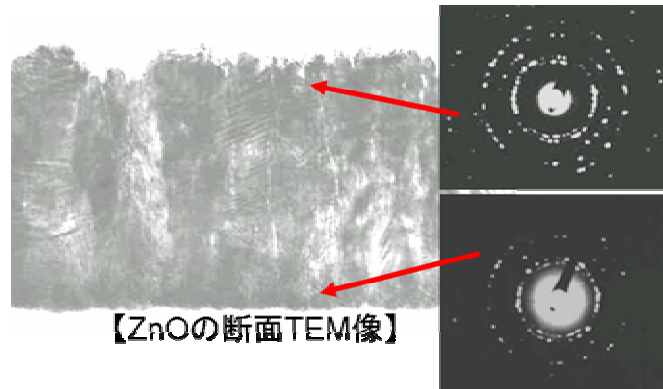


図 4 . ZnO 薄膜の断面 TEM 像と電子線回折

ZnO 薄膜の持つ高い電子移動度を実証するため、トップゲート型 ZnO-TFT のプロセス開発と 6 万画素液晶ディスプレイの原理実証を行なった。

(トップゲート ZnO-TFT プロセスと TFT 特性)

今回開発したトップゲート型 ZnO-TFT の断面構成を図 5 に示す。大面積基板への展開を前提に、ZnO の成膜には rf マグネトロンスパッタリング法を、ゲート絶縁膜にはプラズマ CVD 法にて形成した窒化シリコン (SiN) を用いている。

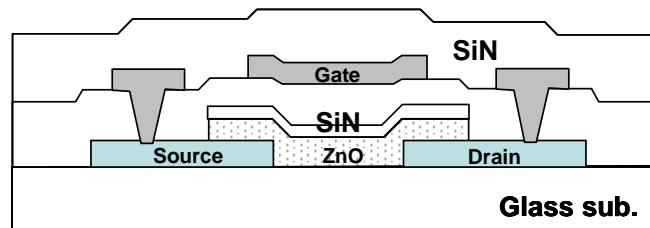


図 5 . トップゲート型 ZnO-TFT の断面構成図

最高プロセス温度はゲート絶縁膜成膜温度である 250 である。ゲート絶縁膜を二層構造とし、SiN/ZnO 積層構造を形成後、TFT のチャネル領域のパターニングを行なうことで、チャネル領域加工プロセスによる ZnO へのダメージを防止している。この手法を用いることにより、全ての微細加工プロセスに一般的なフォトリソグラフィとエッチング技術を用いることができ、液晶ディスプレイ応用に必要な高精度 TFT を実現している。

開発したトップゲート型 ZnO-TFT の Id-Vg 特性を図 6 (左) に示す。チャネル長 (L) は 20 μ m、チャネル幅 (W) は 100 μ m である。飽和領域から計算した移動度 : 50.3 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 、しきい電圧 (V_{th}): 1.1V、サブスレッショルド特性 : 0.21V/dec、ON/OFF 電流比 4.6×10^6 の優れた特性が得られた。

ZnO-TFT 駆動液晶ディスプレイとしてカシオ計算機 (株) の実製品 a-Si TFT-LCD (対角 1.46 インチ、61,600 画素) をモチーフデバイスとした設計とし、ZnO-TFT の技術水準を評価した。この結果、ZnO-TFT アクティブ駆動 6 万画素カラー LCD の表示動作に世界ではじめて成功し、平成 17 年 10 月 14 日開催の第 2 回研究成果発表会にて展示および報告を行なった (図 6 右)。

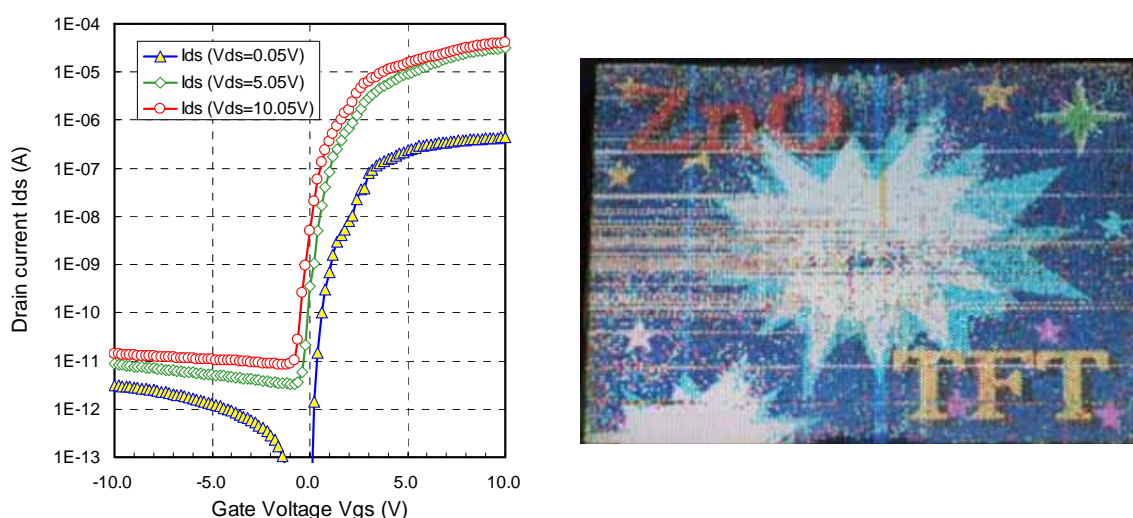


図 6 . トップゲート型 ZnO-TFT の Id-Vg 特性 (左)
 作製した ZnO-TFT 駆動 6 万画素液晶表示装置の表示例 (右)

**【ボトムゲート型 ZnO-TFT 量産プロセスの開発と
 高品位 6 万画素液晶ディスプレイ動画表示実証】**

トップゲート ZnO-TFT アクティブ駆動により液晶ディスプレイの画像表示に世界ではじめて成功し ZnO-TFT の可能性を実証したが、事業化の視点では、図 6 に示すように表示品位に課題があり、事業化技術 (量産プロセス) の開発を目的に高品位表示が可能な ZnO-TFT プロセスの開発を行なった。高品位表示を行なうためには、TFT の特性ばらつきの低減、ならびに表示欠陥の低減が重要である。加えて量産プロセスでは、既存の製造インフラ (a-Si:H TFT) 技術との整合性も重要である。トップゲート構造 ZnO-TFT による高移動度の実証と液晶ディスプレイの原理実証は一定の成果が得られたため、TFT の特性ばらつきの低減に主眼を置き、ボトムゲート型 ZnO-TFT 量産プロセスの開発を行なった。

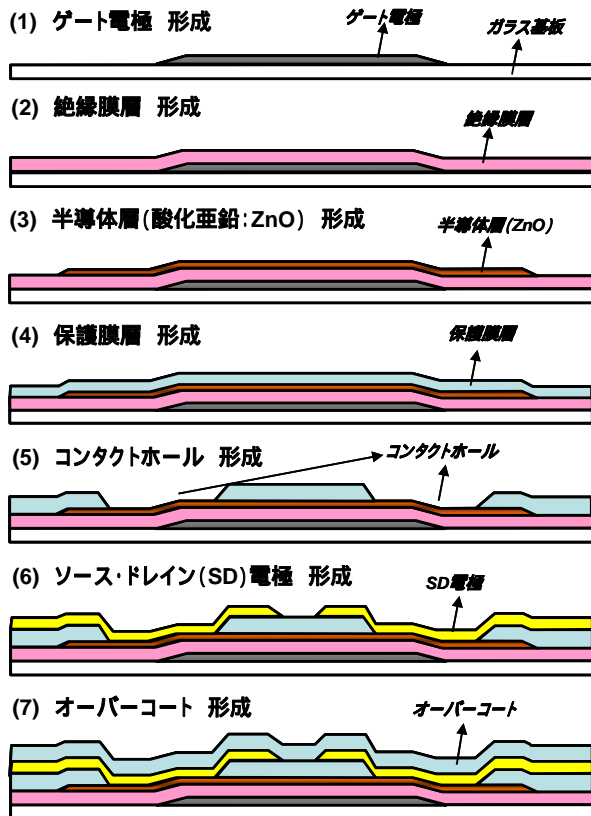
ボトムゲート構造では、図 4 に示すように成膜初期層に TFT チャンネルが形成されるため、TFT 特性は ZnO 成膜初期層の結晶性の影響を強く受ける。ZnO 成膜初期層の結晶性制御手法の開発を行なうことで、a-Si:H TFT で用いられているゲート絶縁膜である SiNx 上に形成した ZnO に比較して、格段に優れた結晶性を有する ZnO 薄膜の形成に成功した。

ZnO 初期成長過程の制御により実現した結晶性に優れた ZnO 薄膜を用い、ボトムゲート型 ZnO-TFT 量産プロセスの開発を行なった。図 7 にボトムゲート型 ZnO-TFT のプロセスフローと TFT 特性を示す。ZnO 成膜初期層を活性層に用いるボトムゲート構造においても、a-Si:H TFT の 10 倍の電子移動度 $\sim 5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を有する特性ばらつきの少ない、均一性に優れた TFT を実現した。

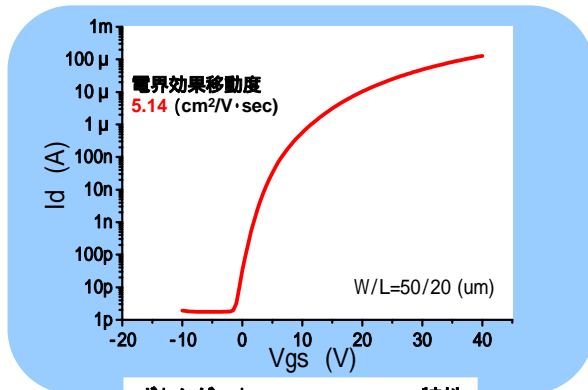
作製したボトムゲート型 6 万画素カラー ZnO-LCD は、平成 17 年度のそれに対し大幅な表示品位の改善に成功し、製品並みの静止画ならびに動画表示が可能であることを実証した。

この成果は平成 19 年 10 月 25 日開催の最終年度研究成果報告会にて展示発表を行なった (図 8)。

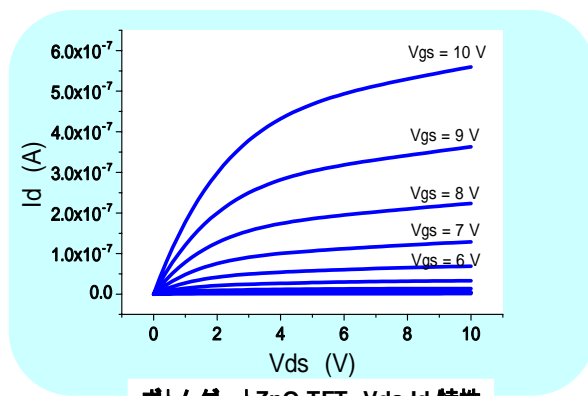
【ボトムゲートZnO-TFT作製プロセスフロー】



【ボトムゲートZnO-TFT 特性】



ボトムゲートZnO-TFT Vg-Id 特性



ボトムゲートZnO-TFT Vds-Id 特性

図7. ボトムゲート型 ZnO-TFT のプロセスフローと TFT 特性

H17年度 トップゲート型6万画素



H19年度 ボトムゲート型6万画素



図8. ボトムゲート型 ZnO-LCD 表示例

【ZnO-TFT の電子ペーパー応用】

ZnO 薄膜は低温 (150) で多結晶薄膜が形成できることから、ZnO-TFT は電子ペーパー等のフレキシブルディスプレイの駆動素子として有望である。フレキシブルディスプレイ実現を目的に、コニカミノルタテクノロジーセンター (株) と共同で、ZnO-TFT 駆動電子ペーパーの実証と、プラスチック基板の耐熱温度 (~150) 以下のプロセスによる高移動度 ZnO-TFT の開発を行なった。

図9に作製した電子ペーパーパネルの断面構造図を示すが、ガラス基板上に作製した ZnO-TFT

アレイと、反射型でメモリー性を有するカイラルネマチック液晶とで構成した表示デバイス（100ppi、 $8 \times 8 = 64$ 画素数）を試作し、動作実証した。

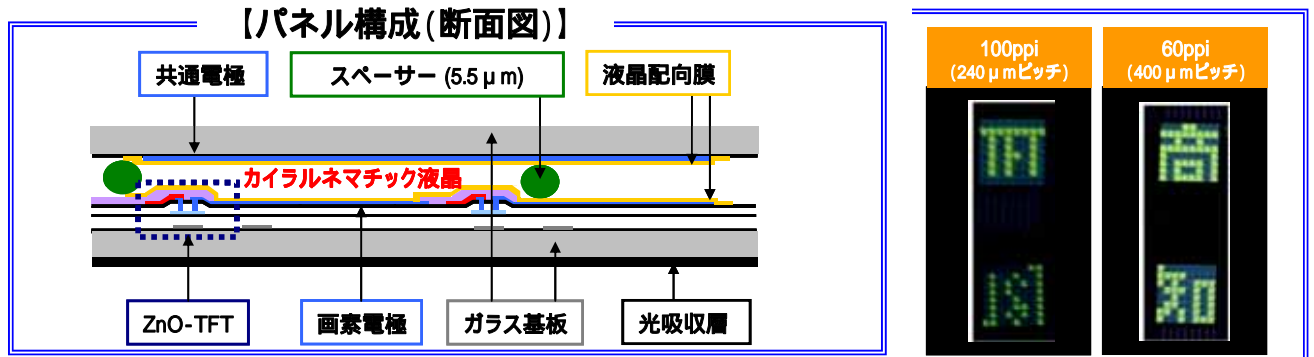


図9．作製した ZnO-TFT 駆動電子ペーパーと 64 画素文字表示例

【ZnO-TFT の紫外センサー応用】

酸化亜鉛（ZnO）はバンドギャップ $E_g \sim 3.3\text{eV}$ の直接遷移型半導体であり、波長 375nm 以下の紫外線を検知するセンサーとして応用可能である。ガラス基板上に形成した ZnO-TFT アレイ化技術をセンサーに展開することで、センサーをアレイ化した線・面センサーを実現することが可能である点が他の紫外線センサーに比較した特長である。そこで、本研究では、ZnO-TFT の基本構造を利用した紫外センサーの理論設計・生産プロセスの確立および実用化レベルでのアプリケーション作成を目的とし、ZnO-TFT の拡張機能としての面構造、線構造の紫外センサー開発を行ない、商品化（紙幣読取機、デジタルカメラへの応用）への目処（プロトタイプ作成）を目標として、地場企業である（株）土佐電子と共同で研究を行なった。

コア研究室にて作製した ZnO-TFT の紫外光（365nm）に対する応答特性、照射強度依存性を測定した（図 10）。ZnO-TFT 紫外線センサーの基本特性として、紫外線の高感度検出、低暗電流、および照射強度に対する線形性等、基本性能を確認した。

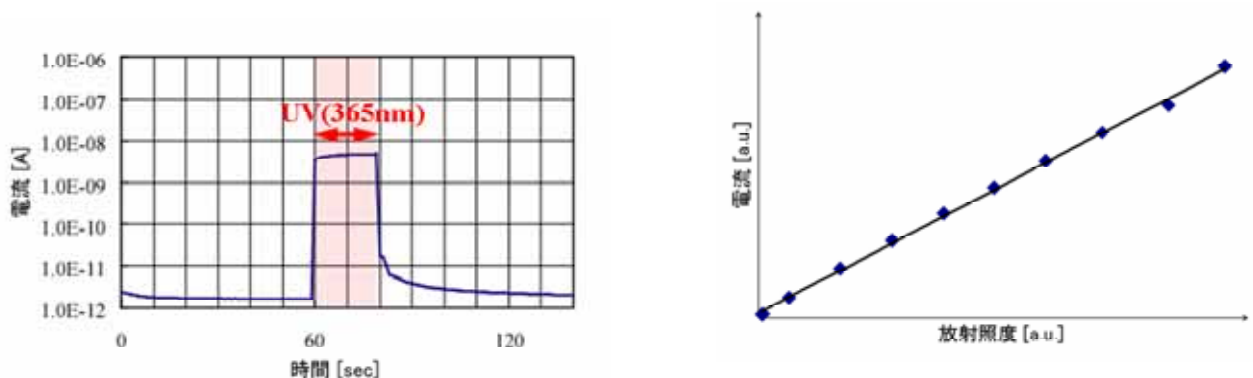


図 10．ZnO-TFT 紫外線（365nm）センサーの基本特性 [応答性(左)、線形性(右)]

基本性能が確認できた ZnO-TFT を用い、紫外センサー素子 25 個をアレイ化したラインセンサーを作成し動作実証を行なった。紫外線ラインセンサーを用い、幅および長さの異なるスリットを通

過した紫外光を ZnO-TFT 紫外線センサーで検出することで、スリットの幅および長さを検知可能なセンサーを実証した。スリットの幅が照射時間、長さが照射面積に対応しており、試作した ZnO-TFT ラインセンサーでの紫外線二次元センシングが可能であることを実証した（図 11）。

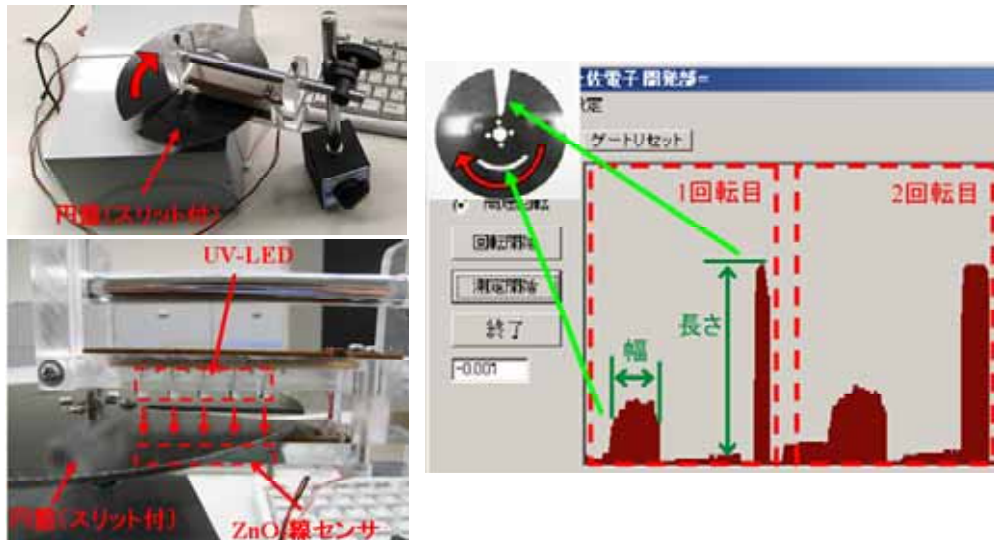


図 11 . ZnO-TFT ライン紫外センサーによる紫外光二次元センシング例

今後の展開

ZnO-TFT の量産プロセスの開発を行ない、a-Si:H TFT の 10 倍の電子移動度 $\sim 5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ を有する特性ばらつきの少ない、均一性に優れた TFT 量産プロセスを構築した。この ZnO-TFT を用いてアクティブ駆動液晶ディスプレイにて製品同等の動画表示結果を得た。

これら研究成果は世界でも例がなく、本事業の高い進歩性を実証した結果である。

しかしながら事業期間中におけるディスプレイ技術の進展も著しく、a-Si:H TFT-LCD はシャープ(株)の第 10 世代基板投資が発表されるなど大型化が進展し、単なる a-Si:H TFT の置き換えでは事業化が困難な状況である。

ZnO-TFT の持つ優れた特長は、高移動度性と低温プロセス性、透明性である。

高移動度の視点で事業化を考えた場合、ディスプレイの大型化と同時に応答速度改善のための高フレームレート駆動の普及により、TFT の要求移動度は増大しており、大画面ディスプレイ分野で a-Si:H TFT の限界がささやかにはじめている。一方で、2007 年ソニー(株)により事業化された有機 EL ディスプレイは移動度 $2 \sim 5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度の TFT が必要であり、a-Si:H TFT での駆動が困難である。このようにディスプレイ技術自体が転換期を迎えつつあり、TFT に要求される移動度も、従来の $0.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ (a-Si:H TFT) から $\sim 5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 程度に変化しつつある。このため ZnO-TFT の高移動度は次世代ディスプレイの駆動に有望な技術として注目されている。

ZnO-TFT の事業化(フェーズ)においては、ディスプレイ応用に関しては有機 EL と電子ペーパーを 2 大製品と位置付け、新たな事業化に向けたスキームの構築を模索中である。

一方、紫外線センサーに関しては、こうち産業振興基金「地域研究成果事業化支援事業」の支援を受け、地元企業である(株)土佐電子、(株)高知豊中技研と共同で、紙幣鑑別器やヘルスケア製品の事業化プロジェクトをスタートさせている。