

酸化亜鉛 (ZnO) トランジスタの開発と その次世代情報デバイスへの応用

古田 守*, 平松 孝浩, 松田 時宜, 平尾 孝

(受領日: 2010年5月11日)

高知工科大学 ナノデバイス研究所

〒 782-8502 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: 酸化亜鉛は資源が豊富、人体に安全、かつ大面積基板への展開が容易なワイドギャップ半導体材料であり、非晶質シリコンに比較して高い電界効果移動度が得られることから電界効果デバイスとして大面積エレクトロニクス応用への期待が高まっている。また、ワイドギャップ半導体である酸化亜鉛にはシリコンでは実現できない可視光透明性という優れた特徴を有しており、透明性を活かした新たな機能デバイスを創出できる。本稿では、酸化亜鉛トランジスタ技術の開発と、次世代情報デバイスであるスーパーハイビジョンに向けた高精細ディスプレイ応用、酸化亜鉛透明トランジスタを信号読出し回路に用いた高精細撮像デバイスに向けた研究開発に関して報告する。

1. 緒言

酸化亜鉛 (Zinc Oxide) は、資源が豊富かつ人体に安全な酸化物であり、室温で 3.37 eV のバンドギャップを有する”古くて新しい”半導体材料である。ZnO の可視光透明性を活かした用途として、透明導電膜があり、導電率を向上させるため Al や Ga といった III 族元素を高濃度にドーピングした ZnO が用いられタッチパネルやディスプレイの画素電極といったパッシブなデバイスに向けた開発が行われている¹⁾。

一方で、ZnO の応用を拡大するためには電界効果デバイスへの応用が不可欠である。電界効果デバイスではキャリア濃度を透明導電膜に比較して、4~5 桁低減する必要がある。このため不純物をドーピングしない真性 ZnO が用いられる。

ZnO 電界効果デバイスの研究は 1968 年に初めての報告があるが、その後 2003 年までの 35 年にわたる長きにわたる空白期間が存在する²⁻⁵⁾。ZnO に代表される酸化物半導体は酸素欠損や格子間亜鉛 (Zn インターstitial) といった欠陥がシャロードナーとなり、不純物をドーピングしない状態においても、製膜条件や熱処理により導電率、特にキャリア濃度が大幅に変化することが電界効果デバイス応用の壁となっていた。高知県地域結集型共同研究事業 (2002 年 12 月~2007 年

12 月) と時を同じくして、世界的に ZnO 電界効果デバイスである薄膜トランジスタ (TFT) の研究が活発になってきた³⁻⁵⁾。研究開発の活発化の要因の一つに、5 兆円産業に成長した液晶ディスプレイ (LCD) のスイッチング素子への応用が期待されている点にある。これに加えて、ZnO にはこれまでのシリコン (Si) 材料では実現できない透明性という優れた特徴がある。電界効果デバイスと透明性の特徴を併せ持つ ZnO トランジスタは、ディスプレイ応用にとどまることなく、これまでにない新しい透明デバイスを創出できる。

本稿では ZnO TFT のディスプレイデバイス応用と、透明性を活かした新たなデバイスである高精細有機撮像デバイスの開発状況に関して報告する。

2. ZnO 薄膜トランジスタ (ZnO TFT) の開発

2.1. ZnO 薄膜合成

ZnO 薄膜の製膜には、rf マグネトロンスパッタ法を用いた。rf マグネトロンスパッタ法は、LCD 製造プロセスにおいて用いられている大型基板に適用可能な製膜手法である。マグネトロンスパッタ法でガラス基板上に製膜された ZnO 薄膜は、一般的に多結晶構造を有し、基板に垂直に c 軸が配向した柱状構造を有する。

図1はZnO薄膜の製膜に用いたマグネトロンスパッタ装置の概略図である。製膜条件の詳細を表1に示す。プロセスガスにはArとO₂の混合ガスを用いた。石英窓を介してプラズマ分光装置が接続されており、製膜時のプラズマモニターが可能である。

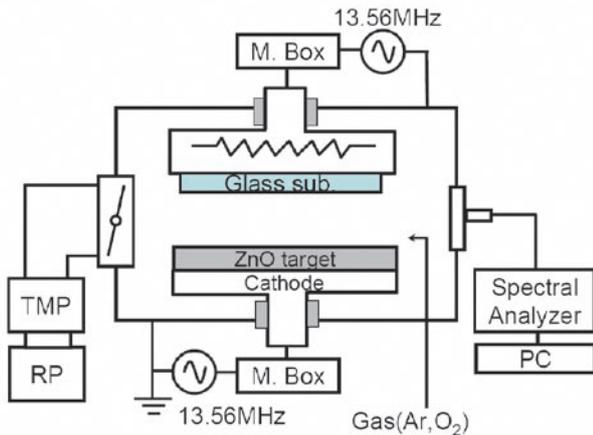


図1 rfマグネトロンスパッタ装置概略

表1 ZnO 薄膜形成条件

ターゲット	ZnO 焼結体 (純度 5N, 4 インチφ)
基板	無アルカリガラス
ガス流量 (sccm)	Ar : 10, O ₂ : 5, 15, 30
製膜圧力 (Pa)	1
投入電力 (W)	180
基板温度 (°C)	150
膜厚 (nm)	65

2.2. ZnO 薄膜の結晶性・熱的安定性制御

ZnO TFT の電子移動度は、活性層である ZnO 薄膜の結晶性に大きく影響される。ZnO 薄膜の結晶性制御は重要な要素技術である。

表1に示された条件において製膜した ZnO 薄膜は、XRD 評価により、全て (002) 配向であることを確認している。図2は XRD パターンから Scherrer の式

$$D = \frac{0.94 \lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

を用いて計算した (002) 方向における結晶子サイズ (D) と製膜速度の酸素流量依存性である。ここで、 λ は X 線の波長、 β は XRD ピークの半値幅 (rad)、 θ はピークの位置を示す。図2に示すように、ZnO 薄膜の結晶子サイズは酸素流量の増大と共に減少する。製膜速度も、酸素流量が増加するにしたがって徐々に減少する傾向を示す⁶⁾。

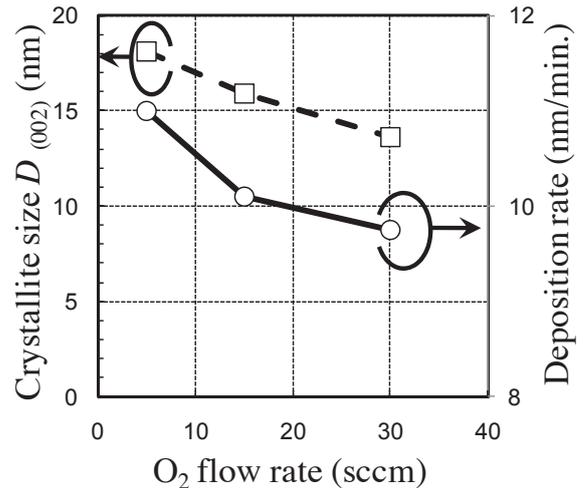


図2 薄膜 ZnO の製膜速度と (002) の XRD ピークより得られた結晶子サイズの酸素流量依存性

TFT の活性層に用いるアンドープ ZnO 薄膜のバンドギャップは室温の熱エネルギー (26 meV) に比較して充分大きく、真性半導体においては室温における熱励起によるキャリアの生成は期待できず絶縁体であることが予想される。しかしながら、酸素空孔 (V_o) あるいは格子間亜鉛 (Zn_i) といった真性欠陥によるキャリア生成が ZnO 薄膜の電気特性に大きく影響する。これら真性欠陥の生成は製膜時の酸素分圧に大きく依存する^{7,8)}。

製膜時に形成される真性欠陥に加え、TFT プロセスでは ZnO 活性層形成後に各種薄膜を積層する際に、ZnO 薄膜は熱履歴を受ける。ZnO 薄膜の加熱プロセスに対する安定性も、ZnO 薄膜の TFT 応用に際して重要な要素技術である。

そのため ZnO 薄膜の熱処理に対する安定性を調べるため、図3に示す昇温脱離法 (TDS) による評価を行った。TDS の結果から、製膜条件 (酸素分圧) により、膜中から亜鉛が脱離するモードと酸素が脱離するモードが存在することが明らかとなった。

製膜時の O₂ 流量が増加するに従い、ZnO 薄膜から Zn が脱離するモードから O₂ 脱離モードへ変化し、ZnO 薄膜の熱処理に対する安定性を制御できる。

ZnO 薄膜の熱的安定性の変化のメカニズムを明らかにするため、製膜中のプラズマ発光分光 (OES) を行った結果を図4に示す。製膜中の酸素流量の増加により酸素ラジカルに起因した発光量は増大すると同時に Ar からの発光は減少しており、酸素分圧の増大により気相中の酸素の活性種

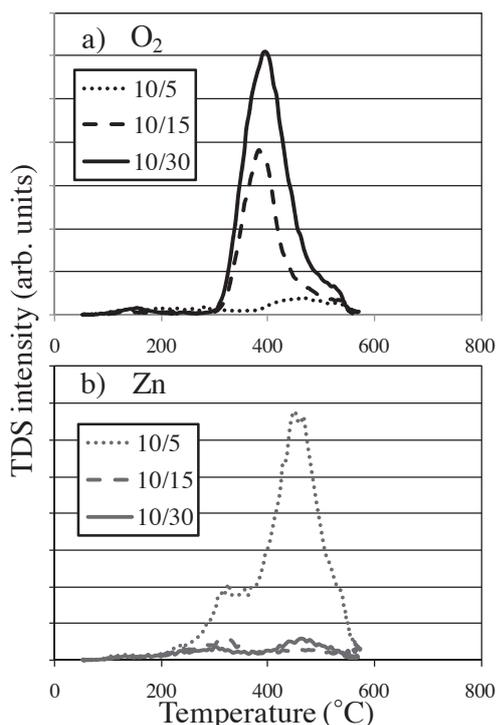


図3 薄膜 ZnO の TDS スペクトルの a) 酸素脱離量の O₂ 分圧依存性及び b) Zn 脱離量の O₂ 分圧依存性

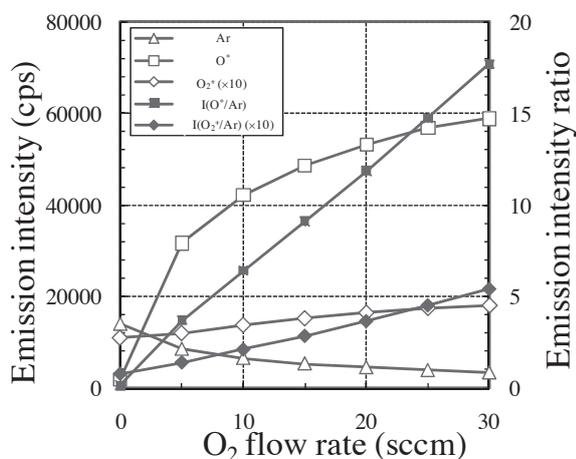


図4 薄膜 ZnO の製膜中プラズマの分光によるピーク強度の酸素流量依存性

(イオン、ラジカルなど) が ZnO 薄膜に於ける結晶子サイズならびに熱的安定性に影響している事が明らかとなった。気相中に存在する酸素の活性種を製膜条件により制御することで、得られる ZnO 薄膜の結晶子サイズならびに熱的安定性を制御できる。

2.3. ZnO 薄膜トランジスタ (ZnO TFT) プロセス

薄膜トランジスタは絶縁基板上に形成した電

界効果素子であり、ゲート電極をチャンネル層の上層に配置するトップゲート構造と、下側に配置するボトムゲート構造とに大別される。またゲート電極に対してチャンネルを介してソース・ドレイン領域が配置される構造をスタガ型、ボトムゲート構造かつスタガ構造を逆スタガ構造と呼ぶ。トップゲート構造では活性層の上層部にチャンネルが形成されるのに対し、ボトムゲート構造では活性層の下層部にチャンネルが形成される。現在市販されている液晶ディスプレイの多くは非晶質シリコン (a-Si:H) TFT をスイッチング素子に用いており、活性層とゲート絶縁膜との界面制御に優れたボトムゲート構造が用いられている。非晶質材料を活性層に用いる場合は上層部と下層部での結晶性の差が少なく TFT 構造が移動度に与える影響は少ない。これに対し、ZnO に代表される多結晶材料では下層部に比較して上層部の方が結晶性が良好な場合が多く、トップゲート構造の方が高い移動度が期待できる。

しかしながらディスプレイ応用に関しては、既存量産インフラとの整合性からボトムゲート構造への要求が極めて強い。このため、現在事業化されている a-Si:H TFT とのプロセス整合性を有するボトムゲート構造 ZnO TFT の開発を行った。

図5に開発したボトムゲート型 ZnO TFT 作製プロセスフローを示す⁹⁻¹¹⁾。

TFT 作製の基本プロセスは、薄膜製膜～フォトリソグラフィー～エッチングを基本サイクルとし、これらを複数回繰り返すことにより TFT を作製する。まず、図5(1)に示すようにガラス基板上にゲート電極を形成し、ゲート絶縁膜 (SiO₂/SiN_x 積層膜) をプラズマ気相成長法 (PECVD) により製膜する。

次いで(2)に示すように、高周波スパッタリング法により活性層となる ZnO 薄膜を形成し、その上層に SiN_x 膜を PECVD により形成する。その後、SiN_x/ZnO 積層膜を活性層の形状に加工する。

(3)に示すように層間絶縁膜となる SiN_x を PECVD 法により形成する。層間絶縁膜形成後、(4)に示すコンタクトホールを開口し、酸化インジウムスズ (ITO) からなるソース・ドレイン電極を形成する。

最後に、(5)に示す SiN_x からなる保護膜 (パシベーション) を PECVD 法により形成し、350～400℃で数時間の熱処理を行い、TFT が完成する。最高プロセス温度は最終熱処理の 350～400℃である。

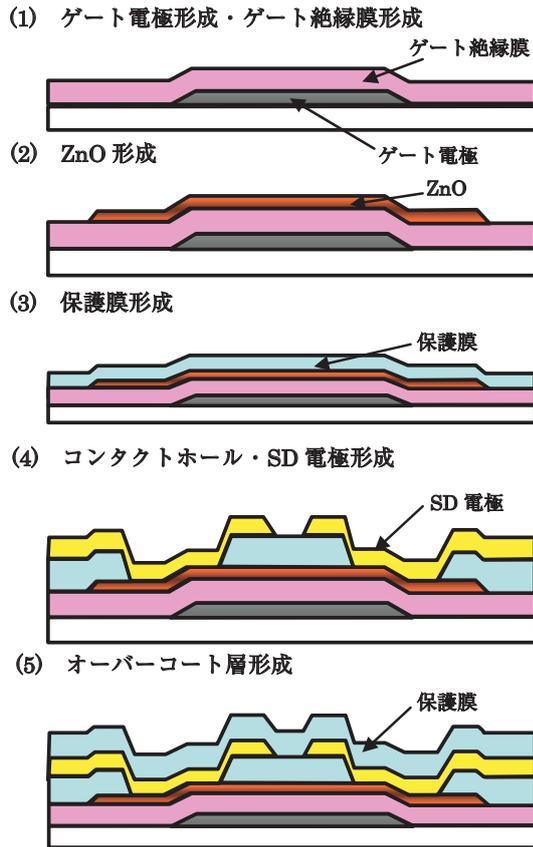


図5 ボトムゲート型 ZnO TFT の作製フロー

ゲート電極以外の材料は可視光透明な材料であるため、ゲート電極を透明導電膜である低抵抗酸化亜鉛やITOにより形成することで、可視光透明なTFTが形成できる。

図6にゲート電極にCrを用いた場合(左)、とITOを用いた場合のガラス基板上に形成したZnO TFTの外観写真を示す。透明導電材料をゲート電極に用いることで透明ZnO TFTが実現できる。波長400 nm以上における透明TFTの透過率は80%以上である。

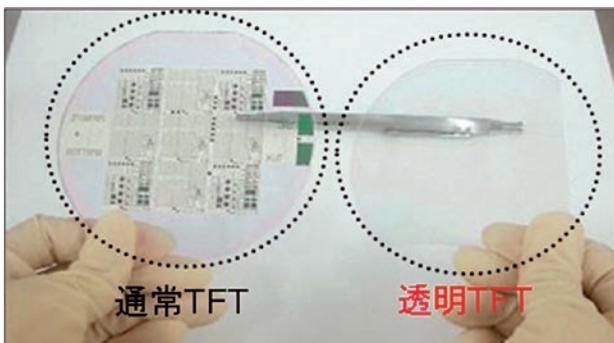


図6 透明 ZnO TFT の外観写真

3. ZnO TFT の次世代情報デバイス応用

次世代の放送システムとして、現行ハイビジョンの16倍の画素数(7,680 × 4,320=約3,300万画素)からなる超高精細映像と22.2chのマルチチャンネル音響により高い臨場感を再現できるスーパーハイビジョン(SHV)の研究開発が進められている。SHV実現には表示デバイスであるディスプレイの高精細化と入力デバイスである撮像デバイスの高精細化の双方が不可欠である。

ZnO TFTの次世代情報デバイス応用として、SHVに代表される次世代高精細映像システムに向けたアクティブマトリクス液晶ディスプレイと透明ZnO TFTと有機光電膜による積層型撮像デバイスの研究を紹介する。

3.1 高精細液晶ディスプレイへの応用

3.1.1. ディスプレイ駆動TFTの要求性能

近年液晶ディスプレイ(LCD)では、動画解像度の改善や三次元(3D)表示のため、駆動フレームレート的高速化が行われている。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TFTに求められる。

LCDで用いられているTFTアクティブマトリクス駆動は、 $m \times n$ 個の画素(ハイビジョンの場合1920 × 1080=207万画素)がRGBからなる3個のサブピクセルから構成されるため、~622万個のTFTにより画像表示を制御する駆動方式が用いられており、RGBそれぞれのサブピクセルは1つのTFTと1つの容量から構成され、図7に示す等価回路で表現される¹²⁾。

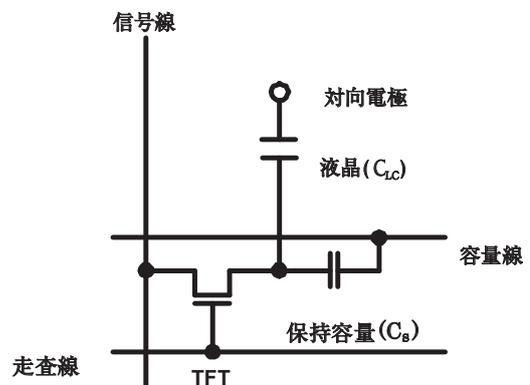


図7 LCDの画素等価回路

図7に示すように走査線(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ート比 m を用いて、

$$t_s = \frac{1}{60 \times m \times n} \quad (2)$$

で表され、走査線数の増大 (高解像度化)、駆動フレームレート増大とともに TFT の選択時間 t_s が短縮される。一方、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、

$$\tau = R_{TFT} \times (C_{LC} + C_S) \quad (3)$$

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 の線形領域でのドレイン電流 (I_d) は、

$$I_d \approx \mu \frac{W}{L} C_i (V_g - V_t) V_d \quad (4)$$

飽和領域でのドレイン電流 (I_d) は、

$$I_d = \mu \frac{W}{2L} C_i (V_g - V_t)^2 \quad (5)$$

で表される。ここで W と L は TFT のチャネル幅とチャネル長を、 C_i はゲート絶縁膜の単位容量、 μ は電界効果移動度、 V_g はゲート電圧、 V_d はドレイン電圧、 V_t はしきい電圧を表す。

TFT の ON 抵抗 R_{TFT} (Ω) は、線形領域で動作している場合、式 (4) を変形して、

$$R_{TFT} = \frac{V_d}{I_d} = \frac{1}{\mu \frac{W}{L} C_i (V_g - V_t)} \quad (6)$$

で表される。TFT による画素の充電が、選択時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、

$$\mu \gg \frac{(C_{LC} + C_S)}{\frac{W}{L} C_i (V_g - V_t)} \times 60 \times m \times n \quad (7)$$

で表わされ、大画面化による画素容量 ($C_{LC} + C_S$) の増大、高精細化による走査線数 (n) の増大、駆動フレームレート比 (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 $7680 \times 4320 = 3,318$ 万画素) ディスプレイにおいては RGB サブピクセルからなる ~ 1 億個の TFT が、移動度 $10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上の性能が必要と試算されており¹³⁾、従来の a-Si:H TFT ($\mu \sim 0.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) では実現困難な性能が要求される。

一方で、近年実用化が始まった有機 EL (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 8 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。

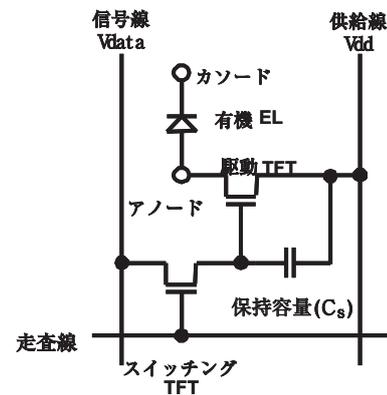


図 8 有機 EL (OLED) の画素等価回路

画面のピーク輝度 L_{max} (cd/m^2) は、駆動 TFT のドレイン電流 I_d (A)、OLED 層の発光効率を η (cd/A)、画素ピッチを a (m)、を用いて、

$$L_{max} = \frac{\eta \times I_d}{A \times a^2} \quad (8)$$

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 のドレイン電流 I_d は (5) 式で表される。ピーク輝度 L_{max} の向上には、駆動 TFT の電流駆動能力 (I_d)、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) に伴い同一輝度実現に必要な I_d 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 画素にスウィッチング 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 のチャネル幅 W を小さくでき、レイアウト上の利点もある。

式 (8) に示すように、OLED では、画素間の駆動 TFT の電流 (I_d) 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

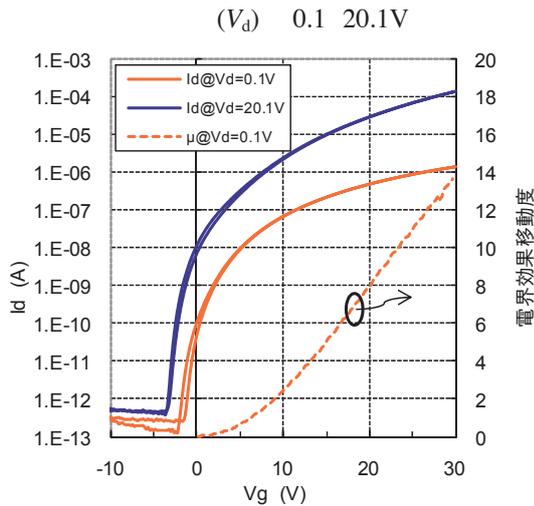


図9 ZnO TFT の伝達特性

しきい電圧 V_i の安定性が強く要求される。 V_i の変動により、(5) 式で示される I_d が変動し、結果として輝度ばらつきとして視認されるためである。

3.1.2. ZnO TFT の特性および信頼性

作製した ZnO TFT の伝達 $[\log(I_d) - V_g]$ 特性を図9に示す。ドレイン電圧 (V_d) は 0.1、20.1 V にて測定した。

電界効果移動度 (μ) は、線形領域における伝達コンダクタンス g_m 、

$$g_m = \left. \frac{\partial I_d}{\partial V_g} \right|_{V_d = \text{const.}} \quad (9)$$

を用いて、

$$\mu = \frac{L g_m}{W C_i V_d} \quad (10)$$

により算出できる。

作製した ZnO TFT の線形領域における電界効果移動度は、 $10 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上と、非晶質シリコン (a-Si:H) TFT に比較して 20 倍以上の移動度が得られている。また、ゲート電圧 (V_g) が負の領域 (Off 領域) におけるドレイン電流 (I_d) は 1 pA 以下と極めて低い値が得られており、スイッチング性能を表す ON/OFF 電流比は 8 桁以上が得られており、ディスプレイのスイッチング素子として十分な性能が得られている。

電子デバイスへの応用に際しては、初期性能に加えて信頼性が極めて重要である。信頼性評価は、温度加速のもと、ゲート電圧 (V_g) を連続的に印加し伝達特性の変化を評価する Bias-Temperature (BT) ストレス試験を実施した。BT ス

トレス試験は、温度 (50°C) による加速のもと、ゲート電圧 (V_g) ストレスを印加し、一定時間ごとに伝達特性を測定し、しきい電圧の変化量を算出する。チャンネル領域全体に均一な縦方向電界を印加するため、ソース・ドレイン電極は接地電位として試験を行った。

図 10 に BT ストレスによる伝達特性の変化の代表例を示す。BT ストレス試験条件は、ゲート電圧 (V_g) ストレス = 20 V、試験温度 = 50°C にて 10^4 s まで測定を行った。

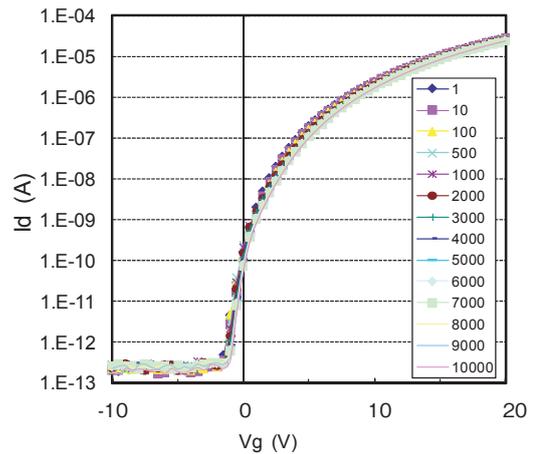


図10 BT ストレスによる伝達特性の変化

これまでの研究にて、チャンネル/ゲート絶縁膜の界面やゲート絶縁膜の膜質が ZnO TFT の特性・信頼性に大きく影響していることを明らかにしている¹¹⁾。これら界面制御が不十分な場合には伝達特性の大きなシフトが時間とともに観察されるが、TFT 作製プロセスを最適化することにより伝達特性のシフトは大幅に低減され BT ストレス信頼性が大きく向上する。図 10 の結果では、ゲートバイアス (V_g) ストレス +20 V、ストレス温度 50°C 、印加時間 10^4 s において、しきい電圧 (V_i) 変動量 0.5 V 以下の高い信頼性が確認できている。このしきい電圧変動量は同等の条件で行った場合に報告されている a-Si:H TFT の 1/5 以下である。また OLED 応用に重要なドレイン電流ストレスにおける信頼性も同等であることを確認している。

このように ZnO TFT は現在実用化されている a-Si:H TFT に比較して、電界効果移動度 10 倍以上、しきい電圧シフト量 1/5 以下という、液晶や有機 EL ディスプレイ应用到に十分な、優れた特性・信頼性が得られている。

3.1.3. ZnO TFT の液晶ディスプレイ応用

前述(3.1.1)のように次世代ディスプレイに要求される特性・信頼性を実現する TFT 技術として、ZnO TFT が注目されている。

我々は高知県地域結集型共同研究事業において、カシオ計算機㈱と共同で、ZnO TFT によるアクティブマトリクス駆動液晶ディスプレイの画像表示に世界で初めて成功した¹⁴⁾。

図 11 に TFT アレイ (1 画素) の断面構成図を示す。図 7 に示した等価回路と同様の構成である。走査線により選択された期間 (t_s) の間 ZnO TFT は ON 状態となり、画素電極を通じて液晶を信号線と同電位に充電する。走査線選択期間終了後 TFT は OFF 状態となり、液晶電位を保持する。OFF 期間の保持特性向上のため、画素電極と容量配線の間には保持容量が形成されている。

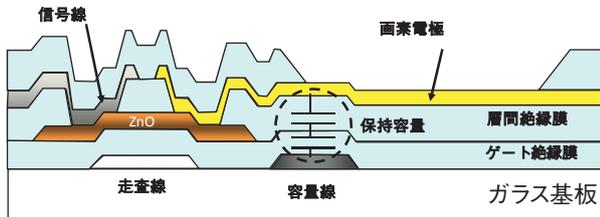


図 11 TFT アレイの画素断面構成図

これら ZnO TFT を $220 \times 280 \times \text{RGB}$ の 61,600 個集積した 1.46 インチ液晶ディスプレイの画像表示例を図 12 に示す。画像欠陥はほとんどなく、作製した 6 万個を超える TFT の大部分が良好に動作しており、動画表示が可能な画像表示が得られている。高移動度・高信頼性 ZnO TFT が次世代高精細ディスプレイのスイッチング素子として有望であることを確認した。



図 12 ZnO TFT アクティブマトリクス駆動液晶ディスプレイの画像表示例

3.2 高精細撮像デバイスへの応用

次世代の放送システムである SHV 映像の撮影に用いるカメラは高画質なカラー映像を得るために、入射した光を色分解プリズムで青 (B)・緑 (G)・赤 (R) に分け、3 枚の撮像デバイスで受光する方式 (3 板式) を採用している。持ち運びに便利な小型 SHV カメラを実現するには、撮像デバイスの小型化を図ることが重要であるが、約 3,300 万という非常に多くの画素が必要なこと、また、画素サイズを小さくすると感度やダイナミックレンジなどの特性が劣化すること、さらに、レンズなどの光学系の解像度特性を考慮すると、撮像デバイスの小型化には限界がある。この問題を解決する方法として、色分解プリズムが不要な単板カラー撮像デバイスを用いることが考えられるが、現状の単板カラー撮像デバイスは 3 板式に比べて、原理的に感度や解像度が劣るため、高画質が要求される SHV カメラには適さない。そこで我々は、NHK 放送技術研究所と共同で、SHV カメラの小型軽量化を実現するために、波長選択性を持つ有機光導電膜を積層することで光を 3 原色に分離し、かつ、3 原色のそれぞれに対応した光生成電荷を透明トランジスタアレイにより独立に取り出すことのできる新しい概念の撮像デバイス「有機撮像デバイス」の開発に取り組んでいる^{15,16)}。

3.2.1 有機撮像デバイスの概念

現在のカラー撮像方式である 3 板式と単板式の比較を図 13 に示す。

3 板式は、入射光を色分解プリズムを使い B・G・R に分け、それぞれの色を三つの撮像デバイスで撮像する方式で (図 13 (a))、感度・解像度・色再現性に優れることから、ほとんどの放送用テレビカメラでこの方式が用いられている。しかし、色分解プリズムと 3 枚の撮像デバイスが必要なため、カメラの小型化には限界がある。

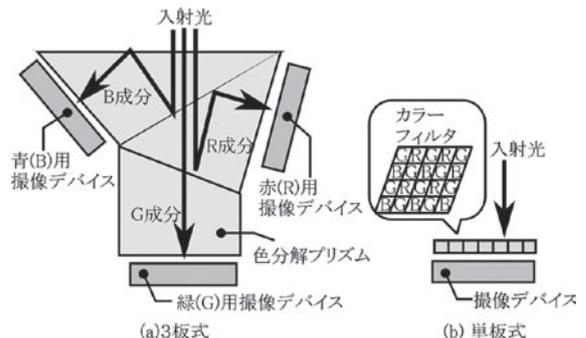


図 13 従来のカラー撮像方式

一方、家庭用のビデオカメラやデジタルスチルカメラには主に単板式が採用されているが、この方式では1枚の撮像デバイスの画素上に3色もしくは4色の微小なカラーフィルタをモザイク状に配置することで色分解を行っている(図13(b))。この方式は色分解プリズムが不要で、撮像デバイスも1枚で済むため、カメラの小型・軽量化が可能であるが、3板式と比べて解像度が劣り、入射光の利用効率(感度)も低下する。このように、現状の3板式と単板式には一長一短があるが、撮像デバイスの深さ方向、すなわち、光の進行方向に光を3原色に分離するための三つの層を設けて、それぞれの層から各色に対応する映像信号を独立に取り出すことができれば、3板式と同等な撮像特性を有する理想的な単板式のカラー撮像を実現できる。

この考えに基づいて開発を進めている積層型有機撮像デバイスの概念を図14に示す。

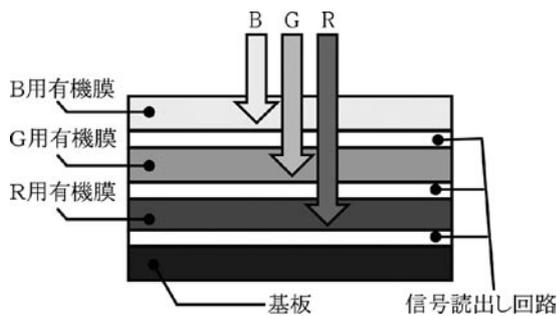


図14 積層型有機撮像デバイスの概念

このデバイスは、光を色分離して信号電荷に変換する3種類の有機光電膜と、信号電荷を走査して有機光電膜の電荷を読み出す回路を交互に積層して構成される。この撮像デバイスに光が入射した際の動作は次のようになる。白色光が入射すると、入射光のB光成分をB用有機膜が吸収することで電荷が生成され、この電荷はTFTアレイによる信号読み出し回路を通してB色の映像信号として取り出される。入射光のG光・R光成分はB用有機膜を透過し、G用有機膜に達する。G用・R用有機膜でも同様の動作が繰り返され、最終的に、デバイスに入射した白色光は光の3原色に分離されるとともに電荷に変換され、外部に出力される。

各層で生成した電荷を外部に取り出す信号読み出し回路にはスイッチング性能と同時に有機膜で光電変換された波長以外の光を下層に透過する可視光透明性が要求される。このためシリコン(Si)等

の可視光透過率の低い材料は使用できず、ワイドギャップ材料である可視光透明 ZnO TFT が好適である。

3.2.2. 透明材料とは？

透明性とは可視光透過性を指し、短波長側で透明な材料とは3.3 eV以上のエネルギーギャップ(E_g)を有する材料であり、Si(1.12 eV)やGaAs(1.42 eV)に比較してエネルギーギャップが大きく、ワイドギャップ材料と呼ばれる所以であり、ZnOは代表的なワイドギャップ材料である。短波長域の吸収は材料のバンド間遷移による吸収であり、キャリア濃度にほとんど依存せず、材料自身の E_g により決定される。

一方で、長波長側の透過率は材料中のキャリア濃度に依存して変化し、キャリア濃度の増大により赤外領域の透過率が減少する。

これはキャリア(金属中の自由電子や半導体中のフリーキャリア)濃度により誘電関数が変化したためであり、フリーキャリアに起因する誘電関数のモデル化にはDrudeモデルが広く用いられている¹⁷⁾。

長波長側には、プラズマ振動数で決まる閾値があり、そのエネルギーより低エネルギーの光が反射されることで反射波長が決まり、長波長側の透明性が決まる。Drudeモデルを用い、フリーキャリアの運動方程式を解くことにより、プラズマ振動数(ω_p)はキャリア濃度の関数として、以下の式(11)で求められる¹⁾。

$$\omega_p = [e^2 \times N_f / (\epsilon_0 \epsilon_S m^*)]^{1/2} \quad (11)$$

ここで、 N_f はフリーキャリア濃度、 ϵ は誘電率、 m^* は有効質量である。式(11)に示すように、フリーキャリア濃度 N_f が大きくなるほど反射が始まる波長が短波長側にシフトする。一般的な金属材料はキャリア濃度が大きく、プラズマ周波数は可視～紫外域に存在し、これが金属光沢の所以である。酸化物導電膜材料に関しても、長波長側の吸収端はキャリア濃度に依存し、キャリア濃度の増大と共に赤外領域の反射・吸収が増大し、可視光“透明”性を維持するためのキャリア濃度の上限はITOの場合、 $2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ と計算されており、透明導電膜の抵抗率の限界はキャリア濃度と移動度から予測されている¹⁾。

一方で、TFTに代表される電界効果デバイスにおいては長波長側でのフリーキャリアに起因する反射は問題とならず、光学的には短波長側に於ける材料固有(E_g)の吸収のみを考慮すればよい。

3.2.3. ZnO TFT による透明トランジスタ

ワイドギャップ材料である ZnO は、図 6 に示すようにゲート・ソース・ドレインの各電極に透明導電膜を用いることで、波長 400nm 以上の可視光において透過率 80% 以上の透明トランジスタが実現できる。しかしながら、電界効果トランジスタにおいては、光照射によるチャンネル領域中のキャリア濃度の微小変動が、しきい電圧 (V_t) や OFF 電流の変化となり電気特性に大きく影響を与える。このため、可視光照射における電気的特性の変化(フォトコン)は透明トランジスタにおける重要な評価項目である。

図 5 に示すプロセスにより作製した ZnO TFT に紫外～可視光照射を行い、TFT 特性の変化を調べた。光照射は Xe 光源 (150 W) からの光をモノクロメーターにより単色化し、光ファイバーにより TFT 直上から行った。光強度は $200 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ で一定とした。

図 15 に ZnO TFT の波長 370、400、460 nm の光照射における伝達特性を暗状態 (dark) との比較で示す。

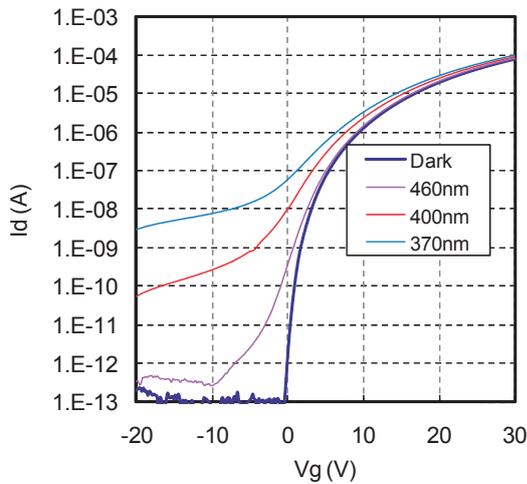


図 15 可視光照射による伝達特性変化 (チャンネル全体照射)

活性層に用いた ZnO 薄膜の E_g は 3.3 eV であるので、 E_g 以下の光である 400、460 nm の光照射に対しては特性変動がないことが望まれる。しかしながら、図 15 に示すように TFT 全体に光照射を行った場合、これら E_g 以下のエネルギーの光照射においても OFF 電流の増大や subthreshold 特性の変化が観察される。図 14 に示す積層型有機撮像デバイスにおいては、有機光電膜を透過する際に 400 nm 以下の波長の大部分は吸収されるためほとんど問題にならないが、真の透明トランジ

スタ実現に向けた課題である。

そこで、吸収端近傍の波長の光照射による伝達特性変化のメカニズムを解析するため、チャンネル領域のソース側半分とドレイン側半分のそれぞれの領域に選択的に光照射を行い、TFT 伝達特性の変化を評価した。

チャンネル領域のソース側半分の領域のみに光照射を行った場合の伝達特性の変化を図 16 に、ドレイン側半分のみに光照射を行った場合の伝達特性の変化を図 17 に示す。

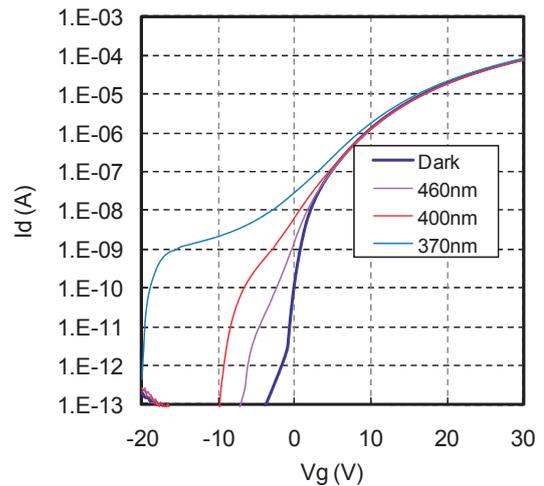


図 16 ソース領域に光照射を行った場合の伝達特性の変化

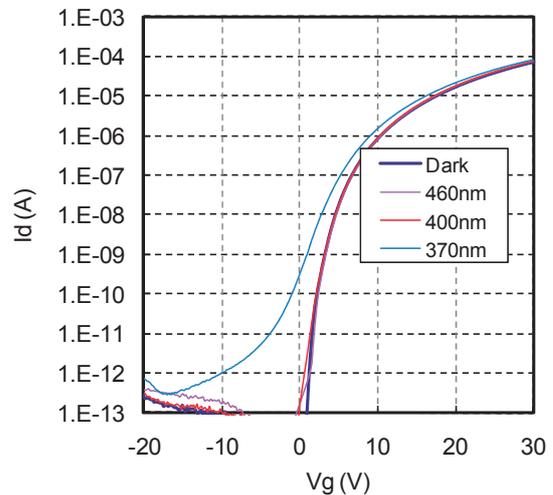


図 17 ドレイン領域に光照射を行った場合の伝達特性の変化

図 16 に示すチャンネル領域のソース側半分に光照射を行った場合には、波長 370 nm においては全体照射とほぼ同等の OFF 電流が発生している。波長 400、460 nm の光照射においては全体照射に比較して OFF 電流の減少は見られるものの、subthreshold 領域ではしきい電圧の負シフトが見

られており、全体的な傾向としてはチャンネル全体に光照射を行った図 15 の場合と同様である。

一方で、図 17 に示すチャンネル領域のドレイン側半分に光照射を行った場合には、波長 370 nm においても全体照射に比較して大幅な OFF 電流の減少が見られている。さらに波長は 400、460 nm の光照射においては暗状態とほとんど変化が見られておらず、バンドギャップ以下のエネルギーを持つ光に対して電氣的にも透明な TFT が得られている。

これら結果より、光照射による伝達特性変化の大部分はソース領域で生じていることが明らかとなった。この要因として、光照射により生じた電子 - 正孔対のうち、ソース近傍に生じた正孔がソース電極のポテンシャルバリアを低減することにより、ソース電極からのキャリア注入が促進されるためと考えている。¹⁸⁾

現状でもソース領域のみに光遮蔽を設けることでバンドギャップ以下のエネルギーを持つ光照射により特性変化のない透明トランジスタが実現できているが、今後は、光遮蔽層がない状態での透明トランジスタの実現に向けた研究を行っていく計画である。

3.2.4. 有機光電膜と ZnO TFT 透明回路積層構造有機撮像デバイスの原理実証

有機光導電膜と ZnO TFT 信号読出し回路を積層した構造の撮像デバイスを試作して、カラー撮像の原理実証を試みた。試作した撮像デバイスの構造を図 18 に示す。

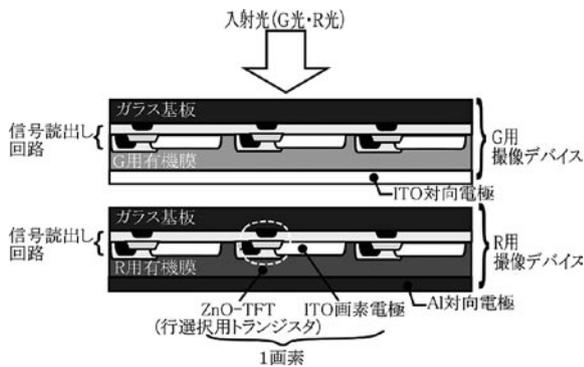


図 18 試作した ZnO TFT 信号読出し回路を用いた有機撮像デバイスの構造

この撮像デバイスは、入射光の G 光成分を撮像する G 用撮像デバイスと、G 用撮像デバイスを透過した R 光成分を撮像する R 用撮像デバイスから構成される。有機膜から信号を読出す回路として

は、ガラス基板上に形成可能な TFT 回路が適している。また、信号読出し回路の光透過率を高められることから、可視域の光に吸収帯がない ZnO TFT を信号読出し回路に採用した。回路の総画素数は約 1,500 で、1 画素 (600 μm 角) を一つの行選択用トランジスタと一つの画素電極で構成した。この信号読出し回路の開口率 (全撮像面積に占める画素電極面積の割合) は約 60 % であり、光透過率は約 50 % であった。開口率と光透過率の差は、画素電極に用いた ITO 薄膜の光吸収分と考えられる。

この ZnO TFT 信号読出し回路上に表 2 に示す構成の G 用、R 用有機膜を形成した。

表 2 有機膜の材料と膜厚

セル	有機材料と膜厚
G 用	NN'-QA (30nm)/Py-PTC (30 nm)/NTCDA (1400 nm)
R 用	ZnPc (30 nm)/TiOPc (70 nm)/BAIq (30 nm)

G 用有機膜は、正孔輸送性の光導電膜として NN'-QA 膜を、電子輸送性の光導電膜として Py-PTC {2,9 di(pyrid-2-yl) -anthra [2,1,9-def:6,5,10-d' e' f'] diisoquinoline- 1,3,8, 10 - tetrone} 膜を、保護層として NTCDA 膜を真空蒸着法により連続製膜した後に対向 ITO 透明電極をスパッタ法により製膜して作製した。一方、R 用有機膜は、正孔輸送性の光導電膜として ZnPc 膜を、電子輸送性の光導電膜として TiOPc (Titanyl Phthalocyanine) 膜を、暗電流低減のためのブロッキング膜として BAIq [Aluminum Bis (2-methyl- 8-quinolinato) 4-phenylphenolato] 膜を真空蒸着法によって連続製膜した後に対向アルミニウム (Al) 電極を真空蒸着法により製膜して作製した。R 用有機膜では対向電極として Al を用いたが、これは、入射光を透過させる必要がないこと、および、保護層が不要となり量子効率が向上するためである。

作製した G 用、R 用撮像デバイスの対向電極に、G 用には 1 V、R 用には 5 V の電圧をそれぞれ印加し、50 μW/cm² の強さの光を基板側から入射して測定した出力信号を図 19 に示す (実線)。あわせて、比較のために、ZnO TFT 回路上に形成したものと同一構成の有機膜を作製して測定した量子効率も同図に示す (点線)。G 用、R 用有機膜の量子効率の最大値はそれぞれ約 5 %、約 20 % であり、また、G 用・R 用撮像デバイスとも、信号読出し回路上に形成した有機膜の分光感度特性にはほぼ対応した信号が出力され、有機膜内で発生

した信号電荷を ZnO TFT 回路で読出しできることを確認した。

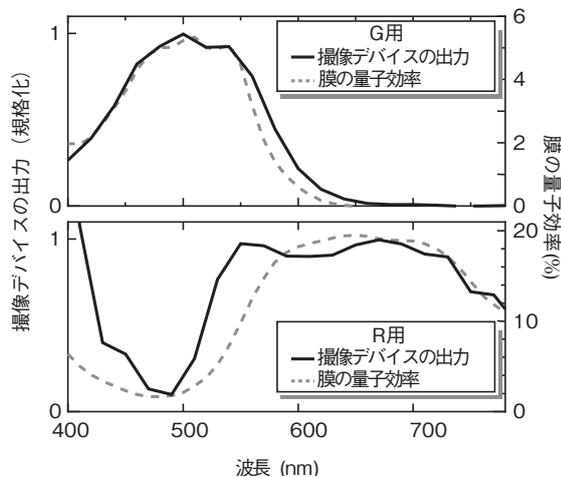


図 19 試作したそれぞれの撮像デバイスの出力と有機光導電膜の量子効率

G 用撮像デバイスの出力特性が G 用有機膜の分光感度特性によく一致しているのに比べて、R 用撮像デバイスでは特に波長 400~580 nm 付近の領域において、両者のスペクトル形状に違いが見られた。この原因は明らかではないが、R 用有機膜の吸光度が低い波長領域でスペクトル形状が異なっていることから、この波長領域の光が対向 Al 電極と信号読出し回路との間で反射を繰り返した影響が考えられる。今後のフルカラー化・微細高集積化には、回路、電極等を含めたすべての層界面での反射・透過のメカニズムの理解が重要となることから、今後、シミュレーションを含めて検討を進めていく。

これらの撮像デバイスをレンズ側から G・R の順に、また、入射光が基板側から入るように設置して実験用カメラを構成した撮像実験の概略図を図 20 に示す。実験では、白色光源に 2 色のカラーフィルタを組合せた G・R の文字を被写体として用いた。また、それぞれの撮像デバイスに ZnO TFT を駆動するための回路と、撮像デバイスからの出力信号を増幅し同期信号を付加するための信号処理回路を接続した。そして、G 用・R 用撮像デバイスの信号処理回路出力を、それぞれモニタの G・R チャネルに入力してカラー出力映像を観察した。

実験用カメラによる撮像例を図 20 に示す。

実験用カメラの出力映像から、ZnO TFT 信号読出し回路の画素数に応じた解像度が得られることを確認できた。また、被写体のうち、R の部分は

R 用撮像デバイスから、G の部分は G 用撮像デバイスから出力されており、有機光導電膜と信号読出し回路を交互に積層した構造でカラー撮像が原理的に可能であることが実証できた。

現在、B 用撮像デバイスを加えた RGB 積層型フルカラー有機撮像デバイスに向けた試作を行っており、2010 年 5 月の NHK 技研公開で一般公開した。

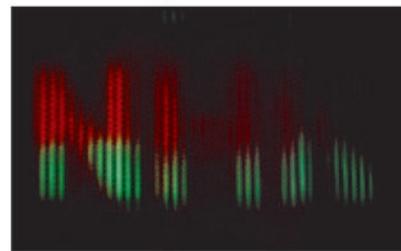
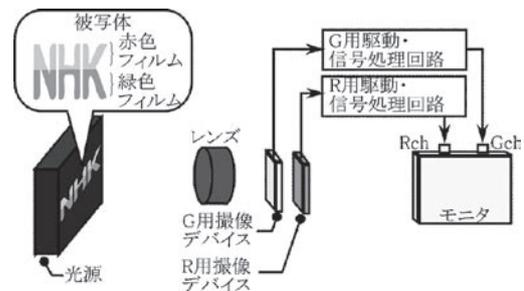


図 20 撮像実験の概略図と有機撮像デバイスからの出力画像

4. 結言

本稿では、ZnO トランジスタの開発と、アクティブマトリックス駆動液晶ディスプレイ応用、有機光電膜と ZnO TFT 信号読出し回路を積層した有機撮像デバイスの研究開発状況に関して概観した。次世代放送システムであるスーパーハイビジョンに対応した入出力デバイス実現に向け、ZnO TFT の更なる高性能化、高信頼性化に向けた研究開発を推進していく。

謝辞

本研究を推進するに当たり、ZnO TFT 技術の開発に関しては科学技術振興機構 (JST) 高知県地域結集型共同研究事業、(財)高知県産業振興センター、液晶ディスプレイの実証に関してはカシオ計算機株、有機撮像デバイスの実証に関しては NHK 放送技術研究所のご支援をいただきました。ZnO TFT 透明トランジスタの解析に関しては京都大学 藤田静雄教授、京都大学博士後期課程 鎌

田雄大氏、TFT 作製に関しては(財)高知県産業振興センター下方技術員、森澤技術員に多大なご支援をいただきました。関係各位のご協力に深く感謝します。

文献

- (1) 日本学術振興会 透明酸化物光・電子材料第 166 委員会編集, “透明導電膜の技術”, オーム社, 2006.
- (2) G. F. Boesen, J. E. Jacobs, “ZnO Field-Effect Transistor”, Proceedings of the IEEE, Nov. 2094, (1968).
- (3) J. Nishii, F. M. Hossain, S. Takagi, T. Aita, K. Saikusa, Y. Ohmaki, I. Ohkubo, S. Kishimoto, A. Ohtomo, T. Fukumura, F. Matsukura, Y. Ohno, H. Koinuma, H. Ohno, and M. Kawasaki, “High Mobility Thin Film Transistors with Transparent ZnO Channels”, Jpn. J. Appl. Phys. 42, (2003) L347.
- (4) S. Masuda, K. Kitamura, Y. Okumura, S. Miyatake, H. Tabata, and T. Kawai, “Transparent Thin Films Transistors Using ZnO as an Active Channel Layer and Their Electrical Properties”, J. Appl. Phys., 93, (2003) 1624.
- (5) R. L. Hoffman, B. J. Norris, and J. F. Wager, “ZnO-based transparent thin-film transistors”, Appl. Phys. Lett. 82, (2003) 733.
- (6) M. Furuta, T. Hiramatsu, T. Matsuda, H. Furuta, and T. Hirao, “Effect of Energetic Particle Bombardment on Microstructure of Zinc Oxide Films Deposited by RF Magnetron Sputtering”, Jpn. J. Appl. Phys., 46, (2007) 4038.
- (7) T. Hiramatsu, M. Furuta, H. Furuta, T. Matsuda, and T. Hirao, “Influence of Thermal Annealing on the Microstructures of Zinc Oxide Films Deposited by RF Magnetron Sputtering” Jpn. J. Appl. Phys., 46, (2007) 3319.
- (8) T. Matsuda, M. Furuta, T. Hiramatsu, H. Furuta, C. Li, and Takashi Hirao, “Thermal Stability of ZnO Thin Film Prepared by RF-Magnetron Sputtering Evaluated by Thermal Desorption Spectroscopy”, Appl Surf. Sci., 256, (2010) 6350.
- (9) T. Hirao, M. Furuta, H. Furuta, T. Matsuda, T. Hiramatsu, H. Hokari, M. Yoshida, H. Ishii, and M. Kakegawa, “Novel top-gate zinc oxide thin-film transistors (ZnO TFTs) for AMLCDs”, J. SID, 15/1, (2007) 17.
- (10) 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 ED., 55, (2008) 3136.
- (11) M. Furuta, T. Nakanishi, M. Kimura, T. Hiramatsu, T. Matsuda, H. Furuta, T. Kawaharamura, C. Li, and T. Hirao, “Effect of surface treatment of gate-insulator on uniformity in bottom-gate ZnO thin-film transistors”, Electrochem. Solid-State Lett., 13, (2010) H101.
- (12) 古田 守、薄膜材料デバイス研究会編, “薄膜トランジスタ”, コロナ社, 2008.
- (13) Y. Matsueda, “Required Characteristics of TFTs for Next Generation Flat Panel Display Packplanes”, Proceedings of the 6th International Thin-Film Transistor Conference, (2010) 314.
- (14) T. Hirao, M. Furuta, H. Furuta, T. Matsuda, T. Hiramatsu, H. Hokari, M. Yoshida, “High Mobility Top-Gate Zinc Oxide Thin-Film Transistors (ZnO-TFTs) for Active-Matrix Liquid Crystal Displays”, SID Symposium Dig., 37, (2006) 18.
- (15) S. Aihara, H. Seo, M. Namba, T. Watabe, H. Ohtake, M. Kubota, N. Egami, T. Hiramatsu, T. Matsuda, M. Furuta, H. Nitta, and T. Hirao, “Stacked Image Sensor With Green- and Red-Sensitive Organic Photoconductive Films Applying Zinc Oxide Thin-Film Transistors to a Signal Readout Circuit”, IEEE Trans. on ED., 56, (2009) 2570.
- (16) 瀬尾 北斗, 相原 聡, 難波 正和, 渡部 俊久, 大竹 浩, 久保田 節, 江上 典文, 平松 孝浩, 松田 時宜, 古田 守, 新田 浩士, 平尾 孝, “有機光導電膜と ZnO TFT 回路の積層構造を用いた有機撮像デバイスの原理実証実験”, 映像情報メディア学会誌, 64, (2010) 365.
- (17) 藤原 裕之, “分光エリプソメトリー”, 丸善, 2003.
- (18) Y. Kamada, S. Fujita, T. Hiramatsu, T. Matsuda, H. Mitta, M. Furuta, and T. Hirao, “Photo-Leakage Current of Zinc Oxide Thin-Film Transistors”, Jpn. J. Appl. Phys., 49, (2010) 03CB03.

Zinc Oxide Thin-Film Transistors and Its Application to Next Generation Information Devices

Mamoru Furuta*, Takahiro Hiramatsu, Tokiyoshi Matsuda, Takashi Hirao

(Received : May 11th, 2010)

*Research Institute for Nanodevices, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami city, Kochi 782-8502

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

Abstract: Zinc oxide (ZnO) is a safe and abundant wide-gap semiconductor material. Since field effect mobility of ZnO is higher than that of amorphous silicon (a-Si:H), ZnO thin-film transistor (ZnO TFT) for large-area electronics has been expected. Furthermore, transparent ZnO TFT can create novel devices that cannot be achieved by conventional silicon-based technology. In this report, we report on development of ZnO TFTs and its application to the next generation information devices.