

## IDY 情報ディスプレイ技術の研究開発動向

中村篤志<sup>†1</sup>, 工藤幸寛<sup>†2</sup>, 清水貴央<sup>†3</sup>, 城戸信人<sup>†4</sup>, 中田 充<sup>†5</sup>,  
藤原康文<sup>†6</sup>, 浦岡行治<sup>†7</sup>, 松久直司<sup>†8</sup>, 石鍋隆宏<sup>†9</sup>

## 1. まえがき

2023年から2024年にかけて、世界はCOVID-19の影響から徐々に回復し、私たちの生活は再び活気を取り戻しつつある。パンデミックの経験を通じて得た教訓と新たな技術の進展により、より柔軟な社会を築くことができた。特に、リモートワークやオンライン教育の普及により、ディスプレイと放送・通信は、ますます身近で欠かせないものとなった。地理的な制約を超えて、より多くの人々が多様な機会にアクセスできるようになった。

ディスプレイ技術の進展を俯瞰する。特に注目すべきは、OLED技術の進展が挙げられる。OLEDは、従来のLCDに比べて、より鮮やかな色彩と高いコントラスト比を実現することができる。これにより、テレビやスマートフォン、タブレットなどのディスプレイが一層美しくなり、視覚体験が向上している。また、マイクロLED技術も注目されている。マイクロLEDは、非常に小さなLEDを使用してディスプレイを構成する技術であり、OLEDと同様に高いコントラスト比と鮮やかな色彩を実現する。さらに、マイクロLEDは長寿命であり、焼き付きの問題がないため、次世代のディスプレイ技術として期待されている。ARやVR

分野でもディスプレイ技術の進化が見られる。これらの技術は、よりリアルな体験を提供するために、高解像度で低遅延のディスプレイが求められている。

デバイスだけではなく、放送技術の動向にも大きな変革を迎えた。特に、IPベースの放送技術が注目されている。IPベースの放送技術は、従来の地上波や衛星放送に比べて、より柔軟で効率的な放送が可能であり、視聴者は自分の好きな時間に好きなコンテンツを視聴することができるようになった。さらに、コンテンツTV(CTV)技術も進化し、インターネットに接続されたテレビやストリーミングデバイスにより、視聴者はインターネットを通じて多様なコンテンツにアクセスできる。従来のテレビ放送に加えて、オンデマンドでの視聴が一般化し、視聴体験が大きく変わった。また、放送技術の進化に伴い、視聴者のデータを活用したパーソナライズド広告も増加している。視聴者は自分に関連性の高い広告を受け取ることができ、広告主にとっても効果的なマーケティングが可能となった。さらに、AI技術の進化も放送技術に大きな影響を与えた。AIを活用することで、コンテンツの自動生成や編集、視聴者の嗜好に合わせたコンテンツの推薦が可能となり、視聴体験が一層向上した。

総じて、2023年から2024年にかけてのディスプレイ技術と放送技術の進化は、われわれの視覚体験やエンタテインメントのあり方を大きく変えるものだった。これらの技術の進化は、今後も続くと思われ、われわれの生活にさらなる変革をもたらすことだろう。

本稿では、2023年～2024年の間に学会などで報告された情報ディスプレイの関連技術について、特に各種のディスプレイデバイス、システム、材料などの開発状況と動向をまとめた。情報ディスプレイの関連技術は多岐にわたることからすべてを網羅しきれてはいないが、本稿では液晶ディスプレイや有機ELディスプレイ、マイクロLEDディスプレイ、量子ドットディスプレイ材料並びにそのディスプレイ技術、駆動回路技術などのディスプレイ技術の開発動向・トレンドを概説したのち、ウェアラブルセンサの技術動向についても紹介する。なお、本稿に記載されている商品・サービス名等は各社の商標等である。(中村)

†1 静岡大学

†2 工学院大学

†3 NHK放送技術研究所

†4 昭栄化学工業株式会社

†5 NHK放送技術研究所

†6 立命館大学

†7 奈良先端科学技術大学院大学

†8 東京大学

†9 東北大学

"Research Trend on Information Display" by Atsushi Nakamura (Research Institute of Electronics, Shizuoka University, Hamamatsu), Yukihiko Kudoh (Department of Information and Communications Engineering, Kogakuin University, Tokyo), Takahisa Shimizu (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo), Makoto Kido (SHOEI CHEMICAL Inc., Saga), Mitsuru Nakata (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo), Yasufumi Fujiwara (Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, Shiga), Yukiharu Uraoka (Division of Materials Science, Nara Institute of Science and Technology, Nara), Naoji Matsuhisa (Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Tokyo), Takahiro Ishinabe (Department of Management Science and Technology, Tohoku University, Sendai)

## 2. 液晶ディスプレイ

数100 mm程の小さなLEDを個々に調光できるMini-LEDバックライトを用いたローカルディミング技術は液晶ディスプレイのコントラスト性能を大幅に向上させた。2021年頃から相次いで市場に投入され話題となったが、今や普及価格帯のテレビにも搭載され市場での認知と浸透が進んでいる。Mini-LEDディスプレイ市場は2031年には5,796万台まで拡大すると言われており<sup>1)</sup>、今後も液晶ディスプレイ技術を牽引することが期待される。

近年では車載用途への最適化に向けた研究開発も進んでいる。車載用途では、時間帯や走行環境によってディスプレイ周囲の明るさが大きく変わる。液晶ディスプレイは高輝度が得やすいことから明るい環境での使用に優位性があるが、ローカルディミング法（液晶パネルのバックライトを複数のエリアに分割して駆動し、映像の画質を向上させる技術）は夜間など暗い環境下では表示の明暗エッジ付近で本来暗く表示したい領域に光が漏れて明るい輪郭が生じるハロ現象が顕著に現れるという課題がある。そのため、バックライトの制御アルゴリズムを工夫しハロ現象を抑制することなどがSDTCから報告されている<sup>2)</sup>。

高コントラスト化は、液晶パネルの最適化でも進んでいる。VA (Vertical Alignment) 方式と比較すると光漏れが生じやすくコントラスト比の点で不利なFFS (Fringe Field Switching) モードは、これまでもネガ型液晶を用いることで暗状態の光散乱を抑制しコントラスト比の改善が行われてきた。一方で、応答速度や、透過率、駆動電圧がトレードオフとなる課題があった。近年では、光散乱を生じにくくするために、液晶材料を最適化したりカラーフィルタの粒子を小さくしたりする、絶縁膜の厚みを薄くし駆動電圧の低下と透過率の向上を狙う、導光板の散乱性を低減させてさらにパネル正面方向に光を集中するようなバックライトユニットを設計するなどさまざまな改善の結果、高コントラスト化を実現した事例がBOEから報告されている<sup>3)</sup>。この報告では、4Kディスプレイとして応答速度、透過率、駆動電圧、色域の仕様もバランスよく維持した状態で3000:1の高コントラストをFFSモードにおいて実現したとしている。

VR/AR関連の液晶技術も大きく進んでいる。2024年9月にはMeta Quest 3Sが発売されるなど、5万円以下の価格帯で一般消費者がVRをより手軽に楽しめる環境が整いつつある。その結果、ディスプレイ開発においても超小型・高精度ディスプレイへの注目が非常に高まっている。この用途においても液晶素子の強みは高輝度を安価に得られることにある。波長板や凹面ハーフミラー、凹面反射偏光板などを組み合わせたパンケーキ光学系の登場により、従来に比べて光学系を大幅に薄くすることが可能になった。その一方で、複雑な光学系は透過率の低下をもたらし、より明る

いディスプレイが必要になっている。また、高い没入感を得るためには高解像度化が必要になるが、パネルサイズが小さいため画素密度のさらなる向上が求められる。2023年にはVR用としては、2.56インチで解像度が4K×4Kのアクティブマトリクス液晶ディスプレイがInnoluxから報告されており、画素密度では2,117 ppiを達成している<sup>4)5)</sup>。画素サイズは12mm×6mmと極めて小さく、均一性を確保し、開口率を向上させるためのさまざまな工夫が施されている。カラーフィルタ (CF) とブラックマトリクス (BM) をTFT側に配置することで、対向基板にこれらを配置した場合に生じる位置ズレにより生じる開口率の低下や視角特性の非対称性の発生を防ぎ生産性と表示品質を向上させている。またフォトスペーサーを上下基板にそれぞれ向かい合うように設置する細かな工夫も行われている。これによりフォトスペーサーの高さを低くすることができ、配向膜成膜時にスペーサーの周囲に配向膜が厚く蓄積される現象を抑制しフォトスペーサー周囲のBMを小さくし開口率を向上させることや、配向膜とスペーサーが貼り合わせ時に擦れて傷がつくことで生じる輝点の抑制を実現している。

一方で新たなタイプの液晶ディスプレイも広がりを見せている。JDIは光散乱型液晶とパネルのエッジに配置したRGBのLEDバックライトを組み合わせたフィールドシーケンシャルカラー方式の透明ディスプレイを兼ねてから開発していたが、2022年から量産品の出荷を始めている。最新のものでは20.8インチ、透過率90%、白輝度300 cd/m<sup>2</sup>と十分な視認性が得られる性能を達成している<sup>6)</sup>。

このように、液晶ディスプレイの技術も着実に進歩している。今後も技術革新を通じて新たな液晶ディスプレイの可能性が切り拓かれることを期待したい。(工藤)

## 3. 有機ELディスプレイ

### 3.1 有機EL材料の動向

電子供与性原子である窒素と電子受容性原子であるホウ素を組み合わせたラダー状の分子により、HOMO-LUMO分布を分子内で交互に局在化させた「多重共鳴効果 (Multi-Resonance)」を利用した狭い半値幅発光材料である多重共鳴型遅延蛍光材料 (MR-TADF: Multi-Resonance Thermally activated Delayed fluorescence) が京都大学大学院理学研究科畠山教授により発表され、ここ数年注目されてきた<sup>7)</sup>。このMR-TADF材料についての新しい骨格や、動作原理を解明するような研究が、ここ数年の大きな材料研究のトレンドになっている。

熱活性化遅延蛍光(TADF)材料およびMR-TADF材料は、一重項エネルギーと三重項のエネルギーが近いため、逆項間交差が起こりやすく、高効率な一重項からの発光を得ることができる。この三重項から一重項への逆項間交差の起こる速度により、初期の一重項からの発光に対し、遅れて発光が起こる成分があるため、熱活性化遅延蛍光材料と呼

ばれている。しかしながら、この三重項から一重項への逆項間交差の速度が遅く、高輝度領域では三重項が停滞して効率の低下を起こすロールオフが問題となっている。また、TADFは、小さい一重項-三重項エネルギーギャップと、高い振動子強度( $f$ )を両立させることが難しいことも課題となっている。これに対し、中国の研究グループは、インドロカルバゾール系の材料をドナーに用い、多重共鳴(MR)骨格をアクセプターとして結合させることで、長距離の電荷移動特性を持つハイブリッド電子励起を実現した。これにより、一重項と三重項のエネルギー差を小さく保ちながら振動子強度( $f$ )を大きくすることに成功した。この材料は、蛍光放射速度定数 $10^{-7}$  s $^{-1}$ に対し、逆交換速度定数は $10^{-7}$  s $^{-1}$ と比較的早い逆交換交差速度を示し、これにより最大外部量子効率40.4%、かつロールオフの少ないデバイスを実現した<sup>8)</sup>。

次に、2023年DW (Display Week)において、Samsung Display社から青色OLEDの高効率化に関する報告があった。一つは、青色のリン光材料を使い、エキサイプレックス型の混合ホストを用いて、白金錯体のリン光材料を発光に用いたデバイスを作製し、CIEy値が0.197、1,000 nitからの輝度が95%まで低下する時間LT95で150時間、70%まで低下するLT70が1,000時間以上を実現している。もう一つは、上記デバイスに、さらにMR-TADF材料を発光材料として加えたデバイスを作製し、CIEy値が0.058まで低下し、色純度の高い青色材料を実現した。ただし、寿命については、LT95で33.3時間と減少した<sup>9)</sup>。

アクセプターユニットとドナーユニットから形成される従来構造のTADF材料の進展について説明する。TADF材料の開発が進むとともに、製造プロセスを簡素化する材料やインクジェット印刷への応用も進められている。そのためには、層数を削減することが大きなポイントとなるが、層数を少なくするためには、発光層のバイポーラ性を高め、電荷ブロック層などを排除することが効果的である。その際重要となるのは、キャリアバランスを良好にし、キャリアトラップを排除することである。2024年DWにおいて、Max Planck研究所からの報告によると、アクセプターとして一つのトリアジン有し、ドナーとして1~4個のカルバゾールを用いた代表的なTADF材料群について、バイポーラ性の検証を行った結果、三つのカルバゾールを用いている場合のみ、良好なバイポーラ性を示したという報告がなされた。X線回折(XRD)分析によると、三つのカルバゾールからなるTADF材料は、アクセプターとドナーユニットが交互に積層し、これにより電子輸送の中心となっているトリアジンがカルバゾールにより囲まれ、電子トラップの要因となる酸素、水分等から保護されることで、良いバイポーラ性を示しているということである。このTADF材料を発光層ホストに用い、緑色のTADF材料としてDMAC-BPという材料を発光層ドープメントに用い、正

孔注入材料としてPEDOT:PSS、電子輸送層にTPBi、電子注入にBaを用いるという簡素な構造にて、外部量子効率EQE=19.6%を実現した。また、さらにバイポーラ性を示すSpiroAcTrzと呼ばれる材料を用いて単層の青色OLEDを作製し、発光波長490 nm、外部量子効率EQE=27.7%を実現した<sup>10) 11)</sup>。

MR-TADF系の材料については、2024年DWにおいて、韓国の大学よりホウ素原子を用いないMR-TADF材料の報告があった。インドロカルバゾールという従来から燐光ホストなどに使われている窒素を含む複素環をラダー状に組み合わせ骨格を上げた構造となっている。インドロカルバゾールは、複素環内で窒素原子が互い違いに配置された構造であるが、アクセプターのホウ素がなくても、多重共鳴を作ることができるということである。この材料により、半値幅23 nm、CIEy値0.158、外部量子効率EQE=33.8%を実現した<sup>12)</sup>。

新たな発光機構による、青色OLEDの低電圧化も大きな話題となった。有機半導体のドナー/アクセプター(D/A)界面で生成する電荷移動(CT)状態は、有機太陽電池の光電変換過程において、電荷分離・再結合の中間体として存在する。CT状態は有機太陽電池の変換効率を大きく左右するため、その性質を明らかにする研究が盛んに行われてきた。そこで、東工大伊澤准教授らは、このCT状態をエネルギー移動前駆体として利用し、発光材料の三重項励起状態にエネルギー移動させ、さらに三重項-三重項消滅によって生じるアップコンバージョンにより、超低電圧で発光する有機EL素子を実現した。典型的な青色蛍光発光体(ピーク波長462 nm (2.68 eV))を発光材料に用いて、乾電池1本のレベルである1.47 Vで発光開始を実現し、1.97 Vの低電圧で100 cd/m<sup>2</sup>の輝度を得ることに成功した<sup>13)</sup>。この研究に端を発し、アップコンバージョンの系も、現在の研究の大きなトレンドになっている。

### 3.2 OLEDディスプレイ

高輝度、高精細が求められるAR/VR等においては、高輝度化のためのタンデム構造形成と、パネル面内の共通層を通じた隣接画素方向への電流リークの低減が重要である。ここ2年では、この問題に対する解決策として、日本のJDI社、半導体エネルギー研究所、中国のVisionox社などから、フォトリソグラフィーを用いたOLEDのパター形成法が相次いで報告された。

まずは、2023年DWにて報告されたJDI社のeLEAPと呼ばれる手法について記述する。時計用途を想定した報告となっており、LTPOを駆動に用いるため消費電力も低くなると考えられる。RGBの順番に、成膜、露光、現像を繰り返しパターン作製する。ディスプレイ仕様としては、サイズが1.4" full round、解像度は454×454、326 ppi、基板はガラスで、TFTにはLTPO (Low-Temperature Polycrystalline-silicon and Oxide)を用いる。トップエミッシヨ

ン方式で、色再現性はDCI-P3 100%、開口率は54.1%である。さらに2023年DWでは、14.0-inchのプロトタイプディスプレイも紹介された<sup>14) 15)</sup>。

また、同様に2023年DWにて、フォトリソグラフィを用いたOLEDのパターニング手法として、中国のVisionox社からViP法が報告された。こちらも、RGBの順にフォトリソフォトリソグラフィによりパターンを形成する。発表内容からだけでは残念ながらJDI社との手法の差は明確になっていない。Under Display Camera (UDC) 用に適していることが示されており、この手法を用いることで、開口率を高くすることができるため、パネル下にカメラを設置した際に透過率の高い画素を形成するのに有利な手法であるということである。試作されたディスプレイの仕様は、7.2inch, 458 ppi, TFTにはLTPS (Low-temperature poly Silicon) が用いられており、基板はポリイミドである。トップエミッション方式で、色再現性はDCI-P3 100%、開口率は28.8%であった<sup>16)</sup>。

次に半導体エネルギー研究所からの同様なフォトリソグラフィを用いたタンデム OLED 形成に関する発表が2024年度DWにて行われた。こちらは2023年度のDWでも発表されており、そのアップデートである。目的はAR/VR用途の超高精細・超高輝度ディスプレイ作製である。この方式は、MML (Metal Maskless Lithography) と呼ばれている方式で、こちらも、フォトリソグラフィを用いたプロセスということであるが、前述の2社のプロセスの違いが判るほどの詳細は述べられていない。明らかに前2社と異なる点は、タンデム構造をターゲットとし、パターニングの際に、通常の間層材料では、大気暴露による素子性能の劣化があるため、劣化の少ない中間層材料を開発したということにある。2024年DWでのパネルスペックは、サイズが1.5inch, 3,207 ppi, 基板はSi, トップエミッション方式で、色再現性はDCI-P3 96%、開口率は53%であった。輝度は15,000 cd/m<sup>2</sup><sup>17)</sup>。

また、あまり学術的な内容は報告されていないが、LGディスプレイは、META Technology 2.0という技術をCES 2024で発表した。技術内容として示されているのは、Micro Lens Array Plus (MLA+)、META Multi Booster、Detail Enhancerと呼ばれる三つの主要技術を組み合わせ、OLEDパネルの輝度を最大3,000 cd/m<sup>2</sup>に向上させ、色の明るさを114%向上させることができる技術であるということである。Micro Lens Array Plus (MLA+) 技術は、マイクロレンズをパネルに配置し、光の放出を最大化する技術で、例えば77インチの4K OLEDディスプレイには、約42.4億個のマイクロレンズが使用されている。META Multi Boosterは、各シーンの輝度情報を正確に分析し、調整するアルゴリズムで、画像のピーク輝度を正確に表現すること。Detail Enhancerと呼ばれる技術は、ピクセルごとの明暗を調整し、色の正確さと色域を広げる技術と

のことである。要は、マイクロレンズによって光の取り出し効率を大幅に改善するとともに、画面全体の輝度の分布を細かく制御しているということであると考えられる<sup>18)</sup>。

次に、パネル製造技術の進展について記述する。インクジェット印刷によるOLEDパネル作製は、材料の利用効率が90%以上と高く、メタルマスクを用いないオンデマンドパターニングができる。2023年DWでは、パナソニックから高精度なインクジェット印刷技術が発表された。従来はノズルから吐出される液滴の体積ばらつきが±7%以上であるため、少量の吐出で、異なるノズルからの吐出を何度か重ね打ちすることで、画素内の液量を平均化するなどが行われ、プロセス時間を長くする要因となっていた。パナソニック社は、制御基板の開発により体積ばらつき±5%以下に調整することに成功し、ワンスキャンで印刷できるラインヘッドを開発した。また、ステージについても、高剛性のガイドを搭載し繰り返し再現性を高めるとともに、重心駆動に近づけヨーイングを減らすなどの工夫により大幅にインクジェット印刷の着弾精度を向上させることに成功した。この方式を用いたパネルがTCL/CSOT社から65インチ8Kの折り畳みOLEDディスプレイとして展示された<sup>19)</sup>。

最後に二つほど、OLEDの応用技術に記載する。一つ目は、OLEDディスプレイを利用した指紋センサである。一般的なスマートデバイスでは、表示用ディスプレイとは別でSiベースのセンサモジュールが筐体に組み込まれるため、製造コストの増加、センシング領域の狭さなどの課題がある。半導体エネルギー研究所では、OLEDディスプレイを用いた有機光センサ (Organic Photodetector : OPD) を開発した。その素子構造は、OLEDの発光層とOPDのセンサ層を縦方向に積層したタンデム構造となっており、この素子に順方向 (従来のOLEDと同じ方向) の電圧を印可すると、OLED同様に発光素子として動作し、逆方向に電圧印可するとセンサ素子として動作する。すなわち、この素子は受光・発光の双方の機能を有しており、印可電圧の向きによってその機能をスイッチングできるということである。この素子をディスプレイに応用し、3サブ画素の内1サブ画素を置き換えることで、表示領域全面にセンシング機能を付与することができる。実際にこのコンセプトでOLEDの赤色サブ画素をこの素子で置き換えたディスプレイを試作し、ディスプレイ全面で指紋撮像が可能であることが確認されている<sup>20)</sup>。

また、もう一つは、OLEDによる近赤外発光を、3Dセンシングに用いる技術であり、九州大学とソニーから発表された。九州大学が開発した高効率なOLEDの近赤外線 (NIR) 発光を用いて、ソニーが物体の表面を三次元でスキャンするシステムを構築したものである。デバイスの安定性も、300時間以上の駆動で劣化しない高い安定性を持っている。高密度のピクセル配置が可能であるとともに、高密度のCMOS回路と統合されたマイクロNIR (近赤外) -OLEDプロ

ジェクタを使用することで、ピクセルごとに投影して詳細な三次元スキャンが可能とのことである<sup>21)</sup>。(清水)

#### 4. 量子ドット技術

量子ドットはナノスケールの半導体結晶であり、バンドギャップがサイズ依存性を持つという特徴がある。そのため、組成を変えずに発光波長が調整可能であり、さらに粒径を精密に制御することで非常に色純度の高い発光が得られるため、ディスプレイ用の色変換材料として注目されている<sup>22)</sup>。2023年には量子ドットの発見と合成に携わった3名がノーベル化学賞を受賞し、広く世の中に認知されることとなった。従来カドミウムを含む量子ドットが開発をけん引してきたが、環境への配慮から非カドミウム系の材料も多く検討されている。中でもリン化インジウム系量子ドットは、緑色発光で半値幅31.0nm、赤色発光で半値幅33.0nmで、かつ量子収率が95%以上の特性が報告されており<sup>23)</sup>、すでに広く市場に浸透している。他にも、より高色純度の発光が期待される材料として、ペロブスカイト系の量子ドット<sup>24)</sup>や、硫化銀インジウムガリウムなどI-III-VI族半導体からなる量子ドット<sup>25)</sup>が注目されている。

ディスプレイ用途では、緑発光と赤発光の量子ドットをシート化して、青色LEDの光をRGB成分の多い白色光に変換する、波長変換膜として多く使用されている。高色域用途に使用される赤色蛍光体のKSFと比較して応答性に優れるため遅延や残光の問題が起りにくく、特にMiniLEDを利用したローカルディミングとの相性が良い<sup>26)</sup>。量子ドット保護のためシートの両面にはガスバリアフィルムが使用されるが、安定性を改善し拡散板に量子ドットを練り込んだ製品も実用化されている<sup>27)</sup>。

赤と緑の量子ドットをインクジェットでパターンニングし、青色OLEDと組み合わせたQD-OLEDを使用したディスプレイの採用も広がっている。QD-OLEDはサブ画素ごとに色変換するのが特徴で、量子ドットによる広色域化と自発光方式による高コントラスト比など双方の利点を両立できる点で優れており、特に高輝度領域での色再現性は白色発光層蒸着+カラーフィルタ方式のOLEDを凌駕する<sup>28)</sup>。一方で、緑色のリン化インジウム系量子ドットは青色光の吸光度が低いという課題があり、より吸光度の高いペロブスカイト系量子ドットの使用が検討されている<sup>29)</sup>。また、AR/VRやスマートウォッチなどの高輝度、高精細が求められる分野においては、マイクロLEDと量子ドットの併用が検討されている<sup>30)</sup>。インクジェットでは対応できないような高精細の用途では、フォトリソグラフィによる量子ドット層のパターンニングが有効である<sup>31)</sup>。紫外LEDチップとRGBの量子ドットパターンを組み合わせることで、混色を防ぎ更なる高色域化を目指す取り組みもある<sup>32)</sup>。

次世代のディスプレイとして、量子ドットを用いたエレクトロミネッセンス(QD-LED)の研究も盛んである。

QD-LEDには溶液プロセスが適用できるため、蒸着プロセスを必要とするOLEDと比較して生産性が優れるとされている。論文ベースでは、非対称な量子ドットを自己組織化によって膜内に配向させることで、35%の外部量子効率を達成したという報告がある<sup>33)</sup>。他にも、高効率化および長寿命化を達成するために、量子ドット自体の改良、電子輸送層/ホール輸送層の最適化、パターンニング手法の確立など、さまざまな検討がなされている<sup>34)</sup>。2023年にはRGBのQD-LEDを利用したプロトタイプ機が発表されており、早期の実用化が期待される<sup>35)</sup>。(城戸)

#### 5. 薄膜トランジスタ、駆動技術

薄膜トランジスタ(Thin-Film Transistor)技術では、高移動度酸化物半導体、短チャネル化技術などが報告された。

多結晶酸化物半導体InGaOを用いた高移動度TFTが報告された<sup>36)</sup>。寄生容量を低く抑えられるトップゲートセルフアライン構造TFTを作製し、移動度 $50\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上が得られることを示した。第6世代のマザーガラス(1800mm×1500mm)上に量産装置を用いて作製できることを示した。良好な信頼性特性や従来のIGZOと比較してチャネルサイズ依存性が優れていることも示した。

酸化インジウム( $\text{In}_2\text{O}_3$ )を用いた高移動度TFTが報告された<sup>37)</sup>。 $\text{In}_2\text{O}_3$ は高移動度材料として期待されていたが、空気中の酸素や水蒸気の吸着によるキャリア密度変動に起因して電気特性の信頼性に課題があった。 $\text{In}_2\text{O}_3$ 上に気体分子の吸着を抑制する保護膜を適用することで、信頼性を改善した。 $70\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の高い移動度を示した。

酸化物半導体の高移動度化を目指して、In-Zn-O-XのXにさまざまな金属元素を適用して評価した結果が報告された<sup>38)</sup>。XにTa, Cr, Ni, W, Nbを適用してボトムゲート型のTFTを試作して評価した。Cr, Niについてはスイッチング特性が得られなかった。In-Zn-O-Wで移動度 $40\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、In-Zn-O-TaとIn-Zn-O-Nbでは $70\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の移動度が得られた。In-Zn-O-TaとIn-Zn-O-NbではIGZOと同程度の信頼性特性が得られており特に有望な材料であるとした。

通常、トップゲート構造で用いられるLTPS-TFTについて、ボトムゲートを加えたデュアルゲート構造を採用するメリットを計算および実験から調査した結果が報告された<sup>39)</sup>。ボトムゲート側に電圧を印加することでサブスレッシュホールド電圧(S値)を改善でき、閾値電圧をコントロールすることが可能になる。各パラメータのばらつきの抑制にも貢献できる。また、ボトムゲート側に電圧を印加することでトップゲート側のゲート絶縁膜/半導体界面にかかる電界強度が小さくなることから信頼性改善につながることを示した。これらはディスプレイとして消費電力抑制や画質改善につながる。

通常のフォトリソグラフィ装置を用いてチャネル長60nmの短チャネル酸化物TFTの作製について報告された<sup>40)</sup>。

Self-aligned Nano Gap Patterning (SNAP) と名付けられた本手法は、ボトムゲート型酸化物 TFT のソース/ドレイン電極のパターニングにおいて、2回の電極成膜およびフォトリソグラフィによるパターニングを実施する。1回目のフォトリソグラフィで1st電極を形成する。1st電極上のレジストは除去せず、このレジスト上から2回目の金属薄膜を形成する。1回目のパターニングにおいて1st電極のレジスト端部からのオーバエッチングで生じる隙間によって、2回目の成膜で自己整合的にレジストに沿って成膜された2nd電極との距離を数10 nmに制御することが可能となる。この後2nd電極をパターニングする。この二つの電極をソース/ドレイン電極 (S/D電極) として利用することで数10 nmのチャンネル長の TFT を作製することができる。酸化物半導体 AIZTO (Al をドーブした InZnSnO) を用いてチャンネル長 60 nm の TFT を作製し、移動度  $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  でスイッチング動作することを示した。

円形のコンタクトホールのような構造を利用した縦型酸化物 TFT の報告がされた<sup>41)</sup>。まず S/D 電極の片方となるボトム S/D 電極を形成する。その上にスペーサーと呼ぶ絶縁膜を形成し円形の穴を形成する。スペーサーの表面の穴の周辺にトップ S/D 電極を形成する。スペーサーの穴の中とトップ S/D 電極上を覆うように酸化物半導体、ゲート絶縁膜、ゲート電極を形成することで、スペーサーの穴の側面がチャンネル領域に相当する縦型 TFT が作製できる。スペーサーの穴の深さがチャンネル長、穴の円周がチャンネル幅に相当する。チャンネル長  $0.5 \mu\text{m}$ 、チャンネル幅  $6.3 \mu\text{m}$  の縦型 TFT を作製し、スイッチング動作を確認した。1 TFT あたり  $4 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$  の領域に収めることができ、ディスプレイの高精細化に適している。この縦型 TFT を用いて 513 ppi の有機 EL ディスプレイを作製した。

有機 EL ディスプレイにおいて、駆動 TFT の S 値が低く伝達特性の立ち上がりが急峻であると低調の制御が難しいという課題があった。S 値を高めるために酸化物半導体 IGZO の上にスパッタで  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を形成する手法が報告された<sup>42)</sup>。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  が形成されることで IGZO のキャリア密度が上昇し、S 値を高めることができる。また、一つの TFT の酸化物半導体上に部分的に  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を形成することで、高いキャリア密度と通常のキャリア密度の領域を並列で作製することができ、移動度劣化のない高い S 値の TFT を実現した。通常のキャリア密度の TFT 特性に対して 1.78 倍の S 値を実現しながら移動度  $7.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を得た。(中田)

## 6. AR/VR/MR 技術

### 6.1 AR/VR/MR 技術の将来性と今後の展望

AR (拡張現実)、VR (仮想現実)、MR (複合現実) 技術は、エンタテインメントがけん引する形で教育、医療、製造業など多岐にわたる分野での応用が期待され、注目度が増している<sup>43)</sup>。スマートグラス、ヘッドマウントディスプレイ

が市場規模の拡大をけん引している。BtoC 向けには、ゲームコンテンツや映像コンテンツならびに映像配信が拡大しており、VR で臨場感を体験できるライブ配信などが今後とも充実してくるものと期待される。BtoB 向けには、作業効率化や研修、トレーニングに活用され、遠隔支援による機械操作の指示用途での導入が進んでいる。BtoBtoC 向けでは、アミューズメントや観光・旅行用途でのサービスが挙げられる。観光地でのデジタルスタンプラリーや小売業でのバーチャル試着、家具配置展示などのサービスは今後ますます拡大していくものと思われる。

### 6.2 拡大を後押しする要素

これら AR/VR/MR 体験の質はハードウェア端末に大きく依存する。①ハードウェア端末の進化、②開発環境の整備、③情報通信技術の向上、④在宅需要、が主な技術拡大の要素である。

ハードウェア端末の進化では、Meta 社の Oculus Quest などのハイエンド VR ヘッドセットが登場し、他にも、Meta Quest 3、Microsoft HoloLens や Magic Leap One、Apple Vision Pro などが 2023 年～2024 年にかけて注目された。これらのハードウェア端末の内訳となる部品に注目すれば、AR/VR 表示デバイスとしては、LCD/OLED ディスプレイ、マイクロ OLED/MEMS/マイクロ LCD、マイクロ LED ディスプレイ、HMD (ヘッドマウントディスプレイ) 用光学レンズ、レンズ/導光板用高屈折樹脂、スマートグラス用導光板、回折光学素子/ホログラム光学素子材料、導光板用高屈折ガラス基板、HUD (ヘッドアップディスプレイ) 用中間膜、透明スクリーン、透明ディスプレイパネル、空中ディスプレイ用光学素子の革新的進展によるものである。さらに、CPU/GPU の高性能化に加えて、センサ/フィードバックデバイス群 (モーショントラッキングセンサ、エリアイメージセンサ、ToF (Time of Flight) センサ、超音波センサ、脳波センサ、高感度ハプティクス用アクチュエータ、空中ハプティクスデバイス) などが導入されている。

開発環境の整備状況では、開発者向けツールが進化し、普及していることが注目される。Google の ARCore や Vuforia、Unity や Unreal Engine など、誰でも手軽に AR/VR の開発ができる環境が整っている。

情報通信技術の向上においては、5G の登場によって実用性が向上したことが注目される。5G ネットワークは、高速大容量、低遅延、多数端末との接続が可能という特徴があり、これによりリアルタイムで臨場感のあるユーザ体験が可能になった。

在宅需要は、コロナ以降に、世界中で在宅勤務や遠隔教育の必要性が高まったことから、リモート会議、オンライン授業、オンラインコミュニティなど AR と VR 技術を活用したサービスが拡大した。さらにメタバースやデジタルツインなど、私たちの生活様式にも浸透してくるよう

なった。こうした動きは、AR/VRなどの新技術の市場拡大の追い風になると考えられる。

(中村)

## 7. マイクロLEDディスプレイ

マイクロLEDディスプレイは液晶ディスプレイや有機ELディスプレイ等、既存のディスプレイと比較して、明るさ、コントラスト、応答速度、消費電力、素子寿命等、多くの点で上回る性能を有するが<sup>44)</sup>、その作製にはさまざまな課題が山積している。特に、現状では製造コストが高く、その低減化が急務となっている。今年3月の「AppleがマイクロLED搭載Apple Watchの開発を中止」という報道により、その開発速度が鈍化しているように感じられる。

マイクロLEDディスプレイの作製には「蛍光体を用いた色変換」と「赤色(R)/緑色(G)/青色(B)LEDからの直接発光」を用いる2方式がある。2023年ノーベル化学賞が「量子ドット」に授与されたこともあり、青色あるいは紫色LEDチップを配置し、その上に量子ドット蛍光体を塗布する色変換方式を用いた作製が活発である。しかしながら、緑色を発色するInP量子ドットの場合、励起光である青色光をほぼ完全に吸収するためにはsub-10 μmの膜厚が必要であること<sup>45)</sup>、自己吸収のため外部量子効率が40%程度に留まること<sup>45)</sup>、強励起条件下では劣化すること<sup>45)</sup>、使用温度により発光波長が変動することが解決すべき課題となっている。

一方、RGB LEDを直接配置する方式として、コスト効率の高い製造を可能とするマストランスファーが用いられている。しかしながら、AR/VR用途に用いられる小型・超高精細ディスプレイの作製には微細なLEDチップを物理的に並べるには限界があるため、結晶成長技術による配列が不可欠である。2021年にEu添加GaIn赤色LED/InGaIn青色LED/InGaIn緑色LEDを面内ではなく、鉛直方向に積層したRGB LEDが発表されたのを契機として<sup>46)</sup>、InGaIn赤色LEDを用いた積層LEDの発表が相次いでいる<sup>47) 48)</sup>。この場合、成長温度の関係で積層順が基板側から青色/緑色/赤色となり、青色/緑色LEDに比べて量子効率の低い赤色LEDが最上層となる。InGaIn赤色LEDの外部量子効率はかなり改善され、今年9月にLumiledsから20%というプレスリリースもあり、今後の展開が期待される。

(藤原)

## 8. 最近のトピックス

### 8.1 ウェアラブルセンサ等の技術動向

ウェアラブルセンサ技術は、医療、フィットネス、ヘルスケアの分野において急速に発展している<sup>49)~52)</sup>。これらのセンサは、体温、心拍数、血圧、血中酸素濃度などの生体情報をリアルタイムで測定し、利用者の健康状態を詳細にモニタリングすることが可能となっている。特に医療分野では、慢性疾患の早期発見や管理に活用され、個別化医療への貢献が期待される。また、フィットネス分野では、

トレーニングの効果を最大化するために、個人のパフォーマンスデータを基にしたフィードバックを提供するシステムが広がっている。

技術的には、センサの小型化、軽量化、低消費電力化が進んでおり、長時間の装着が可能なデバイスが増加している。また、柔軟性のある素材やストレッチ可能なエレクトロニクスを使用したセンサが開発されており、これにより快適に装着できるウェアラブルデバイスが実現されつつある。特に、皮膚に直接装着するタイプのセンサは、体表の生体信号を高精度に検出できるため、今後の応用が期待されている。

さらに、5GやIoTとの連携が進んでおり、データのリアルタイム送信や遠隔地でのデータ解析が可能となっている。この技術進展により、リモートモニタリングや遠隔医療が大きな発展を遂げている。例えば、患者が自宅でウェアラブルセンサを使用し、医師が遠隔から患者の状態を監視することが可能となり、特に高齢者や慢性疾患患者のケアにおいて効果的である。

今後の課題としては、データのプライバシー保護や信頼性の向上が求められる。特に医療用途では、正確で信頼性の高いデータ取得が重要であり、センサの精度向上やデータ処理の効率化が引き続き研究開発の中心となるだろう。

(浦岡)

### 8.2 ストレッチャブルディスプレイ向け伸縮性

#### デバイスの技術動向

次世代ディスプレイとして注目されているストレッチャブルディスプレイは、大きく変形させても壊れない究極の堅牢性と、われわれの皮膚を含めた自在に変形する柔らかい自由曲面への高い密着性を示す。ストレッチャブルディスプレイを実現するため、非伸縮性の発光素子(マイクロLEDやOLEDなど)を伸縮性配線技術で繋いだリジッドアイランド方式を用いたものがSamsung DisplayやLGなどの企業からも含めていくつか報告されている。伸縮性の配線技術として、これまではバネのような構造を持たせたフレキシブル配線が主流であったが<sup>53)</sup>、毒性の少ないガリウム系の液体金属を用いた冗長性のない低シート抵抗配線技術が進展している<sup>54) 55)</sup>。リジッドアイランド方式ではデバイスの伸長によって発光素子の占める面積が変わってしまうため、伸長した際の画素密度が下がってしまう問題がある。この問題を解決するため、伸長を加えた際に3次元的な構造を用いて発光素子の数が増えるデバイスなどが提案されている<sup>56)</sup>。

ストレッチャブルディスプレイとして理想的なのは、トランジスタバックプレーン、発光素子などすべてに伸縮性を持たせることである。そのため、素子の構造ごと伸びる全伸縮性のトランジスタや発光素子の開発が進んでいる<sup>57)~61)</sup>。全伸縮性トランジスタは近年大きく発達した。黎明期の全伸縮性トランジスタは、駆動電圧、大チャネル長、移動度、

駆動速度などに問題があった<sup>62)~64)</sup>。駆動電圧は20を超える高い比誘電率を示すニトリルブタジエン系ゴムを用いることで5V以下にまで低減できることが報告されている<sup>65)</sup>。チャンネル長はフォトリソグラフィをベースにした作製プロセスを取り入れることで2 $\mu\text{m}$ まで低減することに成功している<sup>61)</sup>。さらにチャンネル材料として20 $\text{cm}^2/\text{Vs}$ もの高移動度を示すカーボンナノチューブを用いることで、5V駆動で2 $\mu\text{A}/\mu\text{m}$ もの大電流を流せ、カットオフ周波数がMHz以上の伸縮性トランジスタ技術が報告されている<sup>57)</sup>。特性はすでに最先端のフレキシブルなトランジスタのそれに迫るほど高く、1,000個以上のトランジスタを組み合わせたリングオシレータが駆動できる。全伸縮性のトランジスタは伸長によって特性が変わってしまう問題があるが、チャンネルを円形にしたり<sup>66)</sup>、伸長によって移動度が向上するチャンネル材料を用いたり<sup>67)</sup>、回路構成の工夫によって改善できる<sup>68)</sup>。

全伸縮性の発光素子についても近年急激に特性が改善されている。ZnS粒子をゴム高分子に分散させた素子に100Vを超える大きな交流電圧をかけて発光させる発光キャパシタ素子や<sup>69)</sup>、イオン液体をドーブした有機半導体を用いた発光電気化学素子があるが<sup>70)</sup>、駆動電圧や駆動速度に問題があった。近年は発光ダイオード素子に伸縮性を持たせる試みがいくつか報告されている。発光材料にTADFを取り入れてEQEを10%以上に改善したり<sup>59)</sup>、量子ドットを用いることで高い色純度を達成されたりしている<sup>71)</sup>。伸縮性の発光ダイオードは、フレキシブル素子と比較して用いることができる材料やプロセスが限定されているが、まだまだ改善の余地があり今後の発展が期待される。(松久)

## 9. むすび

本稿で述べられたように、近年における情報ディスプレイ技術および放送技術は著しい進化を遂げてきているが、その一方で新たな応用の開拓に遅れが生じていると感ぜられる。AR/VR端末や車載ディスプレイの次に来るべき応用がどのような分野であるのかという議論が今後、重要になってくると予想される。近年の注目すべき開発の一つとして、人に優しいディスプレイの開発が挙げられる。ディスプレイ表面の反射防止や広視野角化など、アプリケーションに応じた情報表示のあり方を考えることが重要となるであろう。このためには、ディスプレイデバイスだけでなく、光を制御する周辺部材が重要となる。日本のディスプレイ技術は、材料から応用分野まで幅広い研究者・技術者がそろっていることが特徴である。新たな発想による情報ディスプレイ技術の今後の発展に期待したい。(石鍋)

(2024年11月25日受付)

## 〔文 献〕

- 1) 矢野経済研究所：“プレスリリース：マイクロLEDおよびミニLEDディスプレイ世界市場に関する調査を実施(2024年)”，矢野経済研究所(2024)，[https://www.yano.co.jp/press-release/show/press\\_id/3556](https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/3556) [2024/11/11 閲覧]
- 2) N. Yamaguchi, N. Kondo, H. Miyata, H. Furukawa, M. Yashiki: "42-4: Automotive Liquid Crystal Display Using mini-LED Backlight Managed by Flexible Local Dimming System", SID Symposium Digest of Technical Papers, **55**, pp.334-338 (2024)
- 3) T. Fang, Z. Wang, B. Wang, et al: "23-1 Research on High Contrast Ratio for ADS Products", SID Symposium Digest of Technical Papers, **55**, pp.285-290 (2024)
- 4) Y. Wu, C. Tsai, Y. Wu, et al: "5-2: Invited Paper: High dynamic range 2117-ppi LCD for VR displays", SID Symposium Digest of Technical Papers, **54**, pp.36-39 (2023)
- 5) 柴崎稔：“Virtual Reality (VR) 用超高解像度LCDへの挑戦”，SID日本支部設立50周年記念講演第四回「ディスプレイの高精細化およびマイクロディスプレイ技術」予稿集, **50**, **4**, **7** (2024)
- 6) Japan Display Inc.: “透明インタフェース Raelclear (レルクリア)”, Japan Display Inc., <https://www.j-display.com/metagrowth/raelclear.html> [2024/11/18 閲覧]
- 7) Y. Kondo, T. Hatakeyama, et al: "Narrowband Deep-blue Organic Light-emitting Diode Featuring an Organoboron-based Emitter", Nature Photonics, pp.678-682 (2019)
- 8) G. Meng, et al.: "High-efficiency and stable short-delayed fluorescence emitters with hybrid long- and short-range charge-transfer excitations", Nature commun., **14**:2394, pp.1-10 (2023)
- 9) C. Chu, et al: "Highly Efficient and Stable Deep-blue Organic Light-emitting Diode Using Phosphor-sensitized Thermally Activated Delayed Fluorescence", SID2023 Digest, pp.583-586 (2023)
- 10) O. Sachnik, et al.: "Elimination of charge-carrier trapping by molecular design", Nature Materials, **22**, pp.1114-1120 (2023)
- 11) O. Sachnik et al.: "Efficient Single-layer Blue-emitting OLEDs", SID2024 Digest, pp.475-477 (2024)
- 12) J. Kang et al.: "Highly Efficient and Pure Blue Organic Light-emitting Diodes Using Boron Free Emitters", SID2024 Digest, pp.725-726 (2024)
- 13) S. Izawa, et al.: "Blue organic light-emitting diode with a turn on voltage of 1.47 V", Nature Commun., **15**:5494, pp.1-10 (2023)
- 14) N. Shiomi, et al.: "Development of the Novel eLEAP AMOLED Display with Breakthrough Panel Performance", SID2023 Digest, pp.202-204 (2023)
- 15) N. Shiomi, et al.: "Revolutionary New Photolithography-Patterned AMOLED Display Bringing Technology Advances", IDW2023 Digest, pp.565-568 (2023)
- 16) Y. Xiao, et al.: "Development of Visionox intelligent Pixelization (ViP) Technology in AMOLED Applications", SID2023 Digest, pp.205-208 (2023)
- 17) S. Fukuzaki et al.: "High-Luminance and Highly Reliable Tandem OLED Display Including New Intermediate Connector Designed for Photolithography Applications", J. SID., **32**, pp.309-319 (2024)
- 18) <https://news.lgdisplay.com/en/2024/01/a-new-era-of-oled-picture-quality-introducing-meta-technology-2-0/>
- 19) H. Yoshida, et al.: "High-precision and high-stability inkjet printing technology for QD color converter-type micro-LED display", J. SID., **31**, pp.316-327 (2023)
- 20) T. Kamada et al.: "OLED/OPD Dual-Mode Device Integrated into Side-by-Side Patterned OLED", SID2024 Digest, pp.166-170 (2024)
- 21) N. Yamada, et al.: "Three-dimensional sensing of surfaces by projection of invisible electroluminescence from organic light-emitting diodes", Science Advances, **10**, **1**, pp.1-6 (2024)
- 22) Y. Shu, et al.: "Quantum Dots for Display Applications", Angew. Chem. Int. Ed. **59**, pp.22312-22323 (2020)
- 23) T. Moriyama, et al.: "Highly luminescent and narrow-band-emitting InP/ZnSe/ZnS quantum dot synthesis by halide modified shell

- reaction", *Appl. Phys. Express* **16**, 015504 (2023)
- 24) O. Shan et al.: "Perovskite Quantum Dots for the Next-Generation Displays: Progress and Prospect", *Adv. Funct. Mater.* **34**, 2401284 (2024)
- 25) T. Uematsu et al.: "Facile High-Yield Synthesis of Ag-In-Ga-S Quaternary Quantum Dots and Coating with Gallium Sulfide Shells for Narrow Band-Edge Emission" *Chem Mater.* **35**, pp.1094-1106 (2023)
- 26) 森山喬史: "量子ドットの基礎と応用", 第19回SID日本支部サマーセミナー (2024)
- 27) R. Qiu et al.: "Super-Stable Quantum Dots for Low-Cost, Barrier-Free Components", IDW2021 MEET 4-2 (2021)
- 28) <https://www.rtings.com/discussions/xtmC07G5yJ6FrX3F/tv-test-bench-1-12-spotlight-introducing-gamut-rings>
- 29) <https://global.canon/ja/news/2023/20230529.html>
- 30) J. Chen et al.: "A Review on Quantum Dot-Based Color Conversion Layers for Mini/Micro-LED Displays: Packaging, Light Management and Pixelation" *Adv. Opt. Mater.*, **12**, 2300873 (2023)
- 31) S.Y. Park et al.: "Patterning Quantum Dots via Photolithography: a Review", *Adv. Mater.* **35**, 2300546 (2023)
- 32) M. Zhu et al.: "Technological Advancements and Manufacturing Readiness of Micro-LED Displays", IDW2022 MEET2-3 (2022)
- 33) H. Xu et al.: "Dipole-dipole-interaction-assisted self-assembly of quantum dots for highly efficient light-emitting diodes" *Nat. Photonics* **18**, pp.186-191 (2024)
- 34) E. Jang and H. Jang: "Review: Quantum Dot Light-Emitting Diodes", *Chem. Rev.* **123**, pp.4663-4692 (2023)
- 35) <https://www.cnet.com/tech/home-entertainment/the-quantum-dot-powered-tv-of-the-future-takes-a-big-step-forward/>
- 36) M. Tsubuku, H. Watakabe, T. Sasaki, T. Tamaru, R. Onodera, M. Mochizuki, H. Kimura, E. Kawashima, D. Sasaki, Y. Tsuruma: "High Mobility Poly-Crystalline Oxide TFT Achieving Mobility over 50cm<sup>2</sup>/Vs and High Level of Uniformity on the Large Size Substrates", *SID 2023 Digest*, pp.78-81 (2023)
- 37) P.R. Ghediya, Y. Magari, H. Sadahira, T. Endo, M. Furuta, Y. Zhang, Y. Matsuo, H. Ohta: "Reliable operation in high-mobility indium oxide thin film transistors", *Small Methods*, 2400578 (2024)
- 38) S. Tokuchi, R. Shiranita, K. Teramura, M. Furuta: "Oxide Semiconductor In-Zn-O-X System with High Electron Mobility", *SID 2023 Digest*, pp.85-88 (2023)
- 39) K. Kim, B. Sung, D. Kim, S. Kim, H. Kim, J. Shin, H. Kwak, D. Lee, C. Seol, S. Choi, J.H. Lim, T. Kang, C. Lee: "Reliable low-power high-performance low-temperature polycrystalline thin-film transistor technologies in bottom gate-controlled device architectures for AMOLED displays", *SID 2023 Digest*, pp.576-579 (2023)
- 40) C. Sung, S. Nam, S.H. Cho: "Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors with Deep Submicron Channel Fabricated with Hyperlithography", *SID 2023 Digest*, pp.692-694 (2023)
- 41) M. Saito, H. Shishido, S. Kawashima, S. Eguchi, C. Misawa, H. Mori, E. Koezuka, K. Kusunoki, K. Okazaki, N. Seo, S. Yamazaki: "Vertical Oxide Semiconductor Transistor Suitable for High-Resolution OLED Display", *SID 2023 Digest*, pp.695-698 (2023)
- 42) S. An, J. Park, J. Lee, Y. Yun, S.-Y. Lee: "High Subthreshold Swing a-IGZO Driving TFTs Without Mobility Degradation for Low-Gray Level Image Quality Improvement in Active-Matrix OLED", *SID 2024 Digest*, pp.33-36 (2024)
- 43) Shanghai Optics: "AR/VR innovations: Transforming healthcare through advanced technologies", *News-Medical* (July 2024), retrieved on Nov. 16, 2024, <https://www.news-medical.net/whitepaper/20240708/ARVR-innovations-Transforming-healthcare-through-advanced-technologies.aspx>
- 44) Z. Chen et al.: "MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress and challenges", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54**, pp.123001/1-35 (2021)
- 45) I. Nakonechnyi et al.: "Quantum dot color conversion in display application: in pursuit of the holy grail", *SID 2023 Digest*, pp.1094-1097 (2023)
- 46) S. Ichikawa, Y. Fujiwara et al.: "Eu-doped GaN and InGaN monolithically stacked full-color LEDs with a wide color gamut", *Appl. Phys. Exp.* **14**, pp.031008/1-4 (2021)
- 47) K. Doshono et al.: "GaN monolithic full-color light-emitting diode developed by selective removal of active layers in a single p-n junction", *Appl. Phys. Exp.* **16**, pp.082004/1-5 (2023)
- 48) T. Saito et al.: "RGB monolithic GaInN-based  $\mu$ LED arrays connected via tunnel junctions", *Appl. Phys. Exp.* **16**, pp.084001/1-5 (2023)
- 49) J.V. Vaghasiya, C.C. Mayorga-Martinez and M. Pumera: "Wearable sensors for telehealth based on emerging materials and nanoarchitectonics", *npj Flex Electron* **7**, 26 (2023)
- 50) S. Shajari, K. Kuruvinashetti, A. Komeili, U. Sundararaj: "the Emergence of AI-Based Wearable Sensors for Digital Health Technology", *A Review, Sensors*, **23**, 9498 (2023)
- 51) AÇ. Seçkin, B. Ateş M. Seçkin: "Review on Wearable Technology in Sports: Concepts, Challenges and Opportunities", *Applied Sciences*, **13**, 18, 10399 (2023)
- 52) J. Moon, B.-K. Ju: "Wearable Sensors for Healthcare of Industrial Workers: A Scoping Review", *Electronics*, **13**, 3849 (2024)
- 53) Park, S.-I. et al.: "Printed assemblies of inorganic light-emitting diodes for deformable and semitransparent displays", *Science* **325**, 977-981 (2009)
- 54) Miyakawa, M. et al.: "93-2: Highly stretchable liquid metal-based deformable micro-LED displays", *Dig. Tech. Pap.* **55**, 1317-1320 (2024)
- 55) Park, C. et al.: "Biaxially stretchable active-matrix micro-LED display with liquid metal interconnects", *Adv. Mater. Technol.* **9**, 2301413 (2024)
- 56) Lee, D. et al.: "Stretchable OLEDs based on a hidden active area for high fill factor and resolution compensation", *Nat. Commun.* **15**, 4349 (2024)
- 57) Zhong, D. et al.: "High-speed and large-scale intrinsically stretchable integrated circuits", *Nature* **627**, pp.313-320 (2024)
- 58) Zhang, Z. et al.: "High-brightness all-polymer stretchable LED with charge-trapping dilution", *Nature* **603**, pp.624-630 (2022)
- 59) Liu, W. et al.: "High-efficiency stretchable light-emitting polymers from thermally activated delayed fluorescence", *Nat. Mater.* **22**, pp.737-745 (2023)
- 60) Kim, J.-H. & Park, J.-W.: "Intrinsically stretchable organic light-emitting diodes", *Sci Adv* **7**, eabd9715 (2021)
- 61) Zheng, Y.-Q. et al.: "Monolithic optical microlithography of high-density elastic circuits", *Science* **373**, pp.88-94 (2021)
- 62) Wang, S. et al.: "Skin electronics from scalable fabrication of an intrinsically stretchable transistor array", *Nature* **555**, pp.83-88 (2018)
- 63) Oh, J.Y. et al.: "Intrinsically stretchable and healable semiconducting polymer for organic transistors", *Nature* **539**, pp.411-415 (2016)
- 64) Xu, J. et al.: "Highly stretchable polymer semiconductor films through the nanoconfinement effect", *Science* **355**, pp.59-64 (2017)
- 65) Wang, W. et al.: "Neuromorphic sensorimotor loop embodied by monolithically integrated, low-voltage, soft e-skin", *Science* **380**, pp.735-742 (2023)
- 66) Wu, C. et al.: "Strain-induced performance variation in stretchable carbon-nanotube thin-film transistors and the solution through a circular channel design", *IEEE Trans. Electron Devices* **71**, pp.3411-3416 (2024)
- 67) Xu, J. et al.: "Tuning Conjugated Polymer Chain Packing for Stretchable Semiconductors", *Adv. Mater.* **34**, e2104747 (2022)
- 68) Zhu, C. et al.: "Stretchable temperature-sensing circuits with strain suppression based on carbon nanotube transistors", *Nature Electronics* **1**, pp.183-190 (2018)
- 69) Larson, C. et al.: "Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing", *Science* **351**, pp.1071-1074 (2016)
- 70) Liang, J., Li, L., Niu, X., Yu, Z. & Pei, Q.: "Elastomeric polymer light-emitting devices and displays", *Nat. Photonics* **7**, pp.817-824 (2013)
- 71) Kim, D.C. et al.: "Intrinsically stretchable quantum dot light-emitting diodes", *Nat. Electron.* **7**, pp.365-374 (2024)



**中村 篤志** なかむら あつし 2002年、静岡大学大学院理工学研究科物質工学専攻修士課程修了。2005年、同大学大学院電子科学研究科電子応用工学博士課程修了。同年、同大学電子工学研究所助手。2007年、同大学電子工学研究所助教。2014年、同電子工学研究所講師。2015年、同大学大学院工学研究科講師となり、現在に至る。その間、酸化亜鉛系エピタキシャル成長と発光・受光素子への展開、グラフェンCVD成長と透明電極への応用の研究に従事。2005年、応用物理学会講演奨励賞、2008年、高柳研究奨励賞を受賞。2014年より、当会情報ディスプレイ研究会幹事。博士(工学)。正会員。



**工藤 幸寛** くどう ゆきひろ 2015年、工学院大学大学院工学研究科電気・電子工学専攻博士後期課程修了。同年、同大学工学部情報通信工学科助教。現在、同大学情報学部情報通信工学科准教授。博士(工学)。正会員。



**清水 貴央** しみず たかひさ 1995年、東京工業大学生命理工学部生体分子工学科卒業。2000年、同大学院総合理工学研究科物質電子化学専攻博士課程修了。同年、凸版印刷(株)入社。2010年、NHK入局。有機EL材料研究、印刷法による有機ELディスプレイの研究開発に従事。工学博士。正会員。



**城戸 信人** きと まこと 2016年、九州大学大学院工学府物質創造型工学専攻修士課程修了。同年、昭栄化学工業(株)入社。ディスプレイ向け量子ドット材料の研究開発と量産化を担当。正会員。



**中田 充** なかた みつる 2001年、東京工業大学大学院修士課程修了。同年、日本電気(株)入社。2010年、NHK入局。酸化物薄膜トランジスタ、フレキシブルディスプレイ、ストレッチャブルディスプレイの研究に従事。博士(工学)。正会員。



**藤原 康文** ふじひら やすみ 1985年、大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻(電気工学分野)博士後期課程中途退学。同年、同大学助手(基礎工学部)。1991年、同大学講師(基礎工学部)。1993年、名古屋大学助教授(工学部)。2003年、大阪大学教授(大学院工学研究科)。2024年、同大学名誉教授、立命館大学教授(総合科学技術研究機構)。希土類添加半導体の原子レベル制御薄膜結晶成長、物性評価、光デバイス応用に関する研究に従事。2020年、文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)受賞。工学博士。正会員。



**浦岡 行治** うらおか ゆきひろ 1985年、豊橋技術科学大学大学院電気電子工学専攻修了。1985年、松下電器産業(株)半導体研究センター入社。1999年、奈良先端科学技術大学院大学准教授。2009年、同大学教授。IEEEシニアメンバ。正会員。



**松久 直司** まつひさ なおし 2017年、東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻博士課程修了。同大学研究員、Nanyang Technological Universityポスドク、Stanford Universityポスドク、慶應義塾大学専任講師を経て、2022年より、東京大学准教授。2022年、MIT Technology Review Innovators Under 35 Global、2023年、PMI Future 50に選出。正会員。



**石鍋 隆宏** いしなべ たかひろ 2000年、東北大学大学院博士課程修了。同年、日本学術振興会特別研究員(PD)。2003年、東北大学大学院工学研究科電子工学専攻助教。2010年～2011年、セントラルフロリダ大学客員教授。2013年、東北大学大学院工学研究科電子工学専攻准教授。2023年、同大学大学院工学研究科技術社会システム専攻教授となり、現在に至る。低電力ディスプレイ、広視野角・高速液晶ディスプレイ、フレキシブルディスプレイ等の研究に従事。2020年、Society for Information Display (SID) Fellow Award受賞。博士(工学)。正会員。