

情報ディスプレイ技術の研究開発動向

石鍋隆宏^{†1}, 工藤幸寛^{†2}, 小村真一^{†3}, 奥村治彦^{†4}, 橋本圭介^{†5}, 山北裕文^{†6},
 藤原康文^{†7}, 浦岡行治^{†8}, 清水貴央^{†9}, 本村玄一^{†9}, 辻 博史^{†9}, 薄井武順^{†9}

1. まえがき

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の流行からおよそ3年が経つが、依然として状況は落ち着きを見せず、ディスプレイ分野の研究開発に大きな影響を与えている。昨年までの巣ごもり需要も減少し、半導体不足と重なって、ディスプレイ産業にとってはますます厳しい状況となっているが、このような厳しい状況にありながらもディスプレイ技術とその応用はゆっくりではあるが着実に進歩してきている。

テレビ分野においては、量子ドットとミニLEDバックライトを用いた液晶ディスプレイが普及し、有機ELディスプレイに迫る高画質化を達成した。また、量子ドットを色変換層として用いる QD-OLED テレビも実用化された。これらの共通点は、量子ドットによるディスプレイの広色域化であり、この技術トレンドは、しばらく注目されるものになると考えられる。また、応用においては、有機ELディスプレイがフォールダブルやスライダブル等の新たな機能を創出するとともにその応用範囲を拡大している。自動車分野においては、液晶ディスプレイを用いたインフォメーションディスプレイが普及し、ディスプレイデバイス

の応用とその重要性が増してきている。研究開発では、高輝度化、低電力化が可能なマイクロLEDディスプレイや、広色域化が可能な QD-LED (Quantum Dot-Light Emitting Diode) が注目され、高精細パネルが試作されるなど活発な開発が進んでいる。

このようにデバイス開発が着実に進む一方で、私達の生活の中にどのような新しい価値や体験を提供していくのかという議論は、それほど充分に進んでいないように感じられる。デバイスのスペックを争うだけでなく、私達の生活を豊かにしてくれる技術とは何なのか、そのような議論や提案が今後、この学会から生まれてくることを期待する。

本稿では、2021年～2022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、電子ペーパー、AR/VR向けのディスプレイ技術、量子ドット、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。(石鍋)

2. 液晶ディスプレイ

2.1 液晶ディスプレイの高画質化

近年では、ミニLEDバックライトが液晶ディスプレイの高画質化を牽引している。表示像に合わせてLEDバックライトの発光強度をパネル領域ごとにコントロールするローカルディミング法は以前より多くの製品に採用されてきたが、分割領域が数10～数100分割程度と画素数に対して大幅に少ないため、明暗差が大きな領域で表示が滲むハロ現象が課題となっていた。一方、ミニLEDバックライトは数100 μm の小さなLEDを用いることで数1000の領域に分割して駆動することでハロ現象の発生を抑え、高画質化を実現している。2021年にはミニLEDバックライトを搭載したテレビやノートPCが相次いで市場に投入され大きな話題となった。

^{†1} 東北大学 大学院工学研究科

^{†2} 工学院大学 情報学部 情報通信工学科

^{†3} 株式会社ジャパンディスプレイ

^{†4} 株式会社東芝

^{†5} E Ink Holdings, Inc.

^{†6} 株式会社JOLED

^{†7} 大阪大学 大学院工学研究科

^{†8} 奈良先端科学技術大学院大学

^{†9} NHK 放送技術研究所

"Research Trend on Information Display" by Takahiro Ishinabe (Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai), Yukihiro Kudoh (Department of Information and Communications Engineering, Kogakuin University, Tokyo), Shinichi Komura (R&D Division, Japan Display Inc., Mobarra), Haruhiko Okumura (Corporate Research & Development Center, Toshiba Corp., Kawasaki), Keisuke Hashimoto (E Ink Holdings, Inc., Taiwan), Hiroyuki Yamakita (Kyoto Technology Development Center, JOLED Inc., Kyoto), Yasufumi Fujiwara (Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka), Yukiharu Uraoka (Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, Nara), Takahisa Shimizu, Genichi Motomura, Hiroshi Tsuji and Takenobu Usui (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo)

コントラスト比の観点では、自発光型のOLEDやマイクロLEDディスプレイは $10^6:1$ 以上の極めて高いコントラスト比が得られ一般的な液晶パネルでは太刀打ちできないとされる。しかし、周囲の環境光や表面反射率を考慮したACR (Ambient Contrast Ratio) を用いて計算によりローカルディミングを用いない一般的な液晶ディスプレイとOLEDディスプレイを比較すると、20 lx以下ではOLEDが遥かに高いACRを示すものの20 lxを超えるとこの状況は反転し液晶ディスプレイの方が高いACRが得られることが報告された¹⁾。寝室の照度が概ね20 lxとされていることを考えるとリビングルームなど明るい環境下ではACRの観点で液晶ディスプレイに優位性があることが示唆されている。さらに高コントラスト比が得られるミニLEDは適切に設計されることでマイクロLEDと同等のコントラスト比が得られ、ACRもマイクロLEDに近づくことも同様に報告されている。

液晶セルを2段重ねにすることで高コントラスト比が得られるデュアルセル液晶も高コントラスト化技術として非常に注目されている。ブラックマトリックスの周期構造によりモアレが発生することが課題の一つとされているが、一般的なストライプ状ではなくジグザグ構造とすることで意図的に干渉周期を狭くし視認されにくくする方法が提案された²⁾。このとき、サブピクセル単位で調光しようとするジグザグ状の電極が巨視的には直線とほぼ同一になってしまうため1画素単位での調光制御がモアレ対策において有効であることが示された。同時にこの構造では視角により信号線が隠すサブピクセルが変わってしまうため色むらが発生するが、ダミー信号線をサブピクセル間隔で配置することでRGBの有効面積比を一定に保ち色ムラの発生を抑制可能なことも合わせて報告されている。

高コントラスト化だけでなく、応答性能も高速化が進んでいる。Short-range Lurch Control In-Plane Switching (SLC-IPS) はパネル平面方向に液晶が回転しない仮想境界を周期的に形成することで高速化を図ったIPSモードである。SLC-IPSモードにおいては、従来の両枝電極構造では開口部中央に非点灯領域が形成されるため透過率が低下する課題があった。これを改善するために、電極構造を工夫し、一方のみに枝電極を有し幹部に小さな凸構造をこの枝電極をつなぐ幹部に形成することで非点灯領域を開口部の外に配置し透過率の低下を改善する方法が提案された³⁾。これにより、2.2 msの高速応答性を有する1001ppiの高精細SLC-IPSディスプレイが実現している。

高速応答化の観点では、近年、注目を集めている強誘電ネマチック材料にも触れておきたい。これは一般的な強誘電性液晶にはない高流動性と10,000以上の比誘電率を有する特異な材料である。カイラル強誘電ネマチック相において、1.6 Vpp/ μm の低電圧駆動と15 μs の超高速応答が報告されており⁴⁾、今後の発展に期待が膨らむ。

(工藤)

2.2 AR/VR用液晶技術

AR/VR用の液晶技術の開発が活発であった。ディスプレイ用途の液晶技術だけでなく、液晶を用いたPancharatanam-Berry phase (PBP) 光学素子等、AR/VRのヘッドマウントディスプレイ (HMD) に用いる液晶光学素子も活発に開発された。PBP光学素子とは、液晶の配向方向が面内でパターンニングされた光学素子で、円偏光に対して液晶の配向に対応した位相遅れが発生する。したがって、PBP光学素子は円偏光に対して回折格子として機能する。AR/VR用にPBP光学素子を用いた偏向素子やレンズが開発された⁵⁾。

VR用のHMDには、精細度において優位なLCDが広く用いられている。VR用には高速応答が要求されLCDの課題とされていたが、中間調応答時間の最大値が3.5 msのIPS-LCDが開発されて製品に適用された⁶⁾。従来のIPS-LCDの応答時間は約20 msであったので大幅な性能向上が達成された。精細度は773 ppi (pixel per inch) である。将来的には、人間の視認限界と言われる60 ppi (pixel per degree) のHMDを実現するために3000ppiを超えるディスプレイが必要であると言われており⁶⁾、LCDのさらなる高精細化が進められている。2022年のDisplay Week of the Exhibitionでは2000ppiのLCDが展示された。

High ppiに向けては、ディスプレイの高精細化以外にもさまざまな技術が提案されている。PBP偏向素子を用いて、ディスプレイから発せられる光線の方向を時分割で半画素分偏向させることで、精細度を2倍にする技術が開発された⁷⁾。ディスプレイとPBP偏向素子の間にTN液晶と $\lambda/4$ 波長板を設置して、PBP偏向素子に入射する円偏光の回転方向を時分割で切り替えることでPBP偏向素子から出射する光線の方向を切り替えている。

また、人間の目の解像度が視野の中心部 (中心窩: fovea) で高く周辺で低いことを利用して、中心窩近傍だけHigh ppiであるFoveated Displayが提案されている。従来、時間多重や複数の表示パネルを用いるFoveated Displayが提案されていたが、時間多重が不要であり、表示パネルを1枚のみ用いる偏光多重方式が提案された⁸⁾。折り畳み光学系とコレステリック液晶の選択反射を組み合わせた技術である。コレステリック液晶で反射された円偏光は折り畳み光学系を通過し、コレステリック液晶を透過した逆回転の円偏光は非折り畳み光学系を通過する。折り畳み光学系は低倍率、非折り畳み光学系は高倍率になっている。ディスプレイには、中心窩近傍の低倍率high ppi用画像と周辺の高倍率low ppi用画像を重ねて表示し、中心窩近傍用の円偏光と周辺用の円偏光を重ね合わせた楕円偏光に変換された後、折り畳み光学系に入射する。

VR用のHMDでは、輻輳調節矛盾 (VAC: Vergence-Accommodation Conflict) も大きな課題である。VAC対策としては、Multi-focal Plane Display、可変焦点レンズを用いる方法、Light Field Displayの適用、などが提案されて

いる。可変焦点レンズとしては、PBP光学素子を利用した方法や液晶レンズがある。PBP光学素子を利用した方法では、PBPレンズの液晶に電圧を印加することで、レンズから等方性媒体に切り替える技術が提案された⁷⁾。通常の光学レンズと合わせて用いることで、PBPレンズの液晶に印加する電圧の有無により合わせレンズの焦点距離を2段階に切り替えることができる。液晶レンズは、液晶セルに同心円状に設けた電極に適切な電圧を印加することで、屈折率分布型 (GRIN: Gradient index) レンズとして機能する。印加電圧に応じて液晶の配向状態を変化させることでGRINレンズの焦点距離を変化させることができる。AR/VRに適用可能な5 cmの大開口径で焦点距離を連続的に変化させることが可能な液晶レンズが開発された⁹⁾。光学的にフレネルレンズに類似の構成として液晶層厚を薄くすることで応答時間を低減した。Light Field Displayは視差を利用した3D表示ではないためVACは起こらない。しかしながら、精細度が課題であり、Light Field Displayに向けた高精細LCD技術が開発された¹⁰⁾。

VAC対策としてはMaxwellian-View Displayの適用も提案されている^{11) 12)}。Maxwellian-View Displayは非常に焦点深度が深くフォーカスフリーであるためVACは起こらない。しかしながら、ピンホールに似た結像であるためにアイボックス (像が見える瞳の位置範囲) が非常に狭いという課題がある。この課題を解決する方法としては、複数の瞳位置に光線を集光させる方法やアイトラッキングで検出した瞳位置に光線を集光する方法が提案されている¹²⁾。しかしながら、瞳に集光する光線の主方向と視方向が一致しないという課題があった。この問題を解決する方法として、ねじれ方向が異なる2層のコレステリック液晶レンズを用いる方法が提案された¹³⁾。2層のコレステリック液晶レンズはレーザープロジェクタのコンバイナーとして機能し、それぞれ別々の瞳位置に集光し、集光する光線の主方向は各瞳位置における視方向と一致する。このコレステリック液晶レンズを用いたMaxwellian-View DisplayはAR向けに開発された。

メタバースにおいて、VR用HMDの薄型軽量化が強く望まれている。従来のHMDでは光学系の薄型化のためにフレネルレンズが用いられていたが、近年さらに薄型化されたHMDが製品化された。Pancake光学系と呼ばれる偏光折り畳み光学系が用いられている。しかしながら、HMDを長時間快適に使用するためには、さらなる薄型軽量化が必要である。この要求に対応する技術として、Pancake光学系にホログラフィック光学素子 (HOE) を適用した方式が提案されている¹⁴⁾。光学レンズの代わりに非常に薄いフォトリソレーションからなるHOEレンズを用いることで大幅な薄型軽量化が可能である。この技術ではHOEの強い波長選択性のためにレーザー光源を用いることが必須である。レーザー光源を用いるためにBT.2020の広色再現を実現する

ことも可能である。非常に薄型軽量で色鮮やかな表示が可能なHMDの実現が期待されるが、光利用効率の改善が大きな課題である。Pancake光学系の光利用効率は原理的に25%と低い。また、レーザーダイオードの効率は従来のバックライトに用いられているLEDに比べて低い。

この課題を解決するために、光利用効率の高い偏光レーザーバックライトを用いたLCDを適用した技術が提案された¹⁵⁾。バックライトが直線偏光を出射することでLCDの偏光板の吸収による光ロスがなくなる。偏光レーザーバックライトの偏光度は88.8%であり、無偏光レーザーバックライトLCDの輝度約1.9倍に相当する。偏光レーザーバックライトでは、レーザーダイオードから出射した直線偏光を維持してLCDに向けて出射するために、ゼロゼロ複屈折ポリマーと呼ばれる複屈折のない特殊なポリマーが用いられている。HOEは従来のHMDに用いられている光学レンズを使って二光束干渉露光法により作製された。偏光レーザーバックライトLCD、HOEレンズ、Pancake光学系からなるプロトタイプを試作して、従来の光学系厚さ41 mmを16 mmに低減した。

以上述べた通り、AR/VR用の液晶技術はディスプレイのみならず、HMDの高性能化に必須な光学素子を実現する上でも非常に重要であり、今後のさらなる開発が期待される。

(小村)

3. AR/VR用ディスプレイ

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) や自動車用ヘッドアップディスプレイ (HUD) など、AR/VRディスプレイは、小型で広視野に3D空間を再現することが求められているため、疲労なく奥行感を向上させる技術や広視野 (FOV)、高解像度化とハードサイズとのトレードオフを解決する技術が近年、特に注目されているので、その動向を中心にAR/VRディスプレイの技術動向を紹介する。

(1) 奥行き感向上技術

奥行感を改善する方式としては、液晶レンズなどで焦点距離を変える方法や、複数の焦点位置を時分割に表示する方法、複数の視差画像を生成するライトフィールド方式、ホログラムによる波面再生法、単眼方式などいろいろと提案されているが、どこにでも焦点が合い焦点深度が無限となるMaxwell視も一つの選択肢として注目されている。Maxwell視の光学系の最大の課題は、見える範囲が狭い、アイボックスの狭さがあげられる。これを解決するために、小さなアイボックスを複数、異なる位置に作成する方法が提案されているが、その一つとしてLens Array Based HOEを用いる新たな光学システムの提案が行われた¹⁶⁾。また、同様の方式として、液晶平面光学素子を用いた方式も多く発表があり注目されているが、その一つとして、入力角度に応じて焦点位置をスイッチャブルにシフト可能な複数の斜め配向のCholesteric Liquid Crystal (CLC) polarization holographyとOn/Off切り替え可能な半波長板

を交互に積層して、目の位置に応じて、半波長板をコントロールすることが異なる位置に集光させる方法の提案があった¹⁷⁾。積層数を増やすことで集光位置を増やすことができる。まだ、シフトできることを原理検証したレベルではあるが、シフトさせる光学素子としてレンズやHOEではなく、液晶素子を使った点が興味深い。これに限らず、液晶素子の光学素子としてのさまざまな分野に応用されており、その広がりに今後も期待したい⁵⁾。

(2) 広視野化、高解像度化技術

HMDでは、臨場感を実現するためには、人間の視野相当の広視野化と遅延なく頭部の動きに追従できる高速化が重要となる。視野が広がるほど、より多くの画素が必要となるため、表示パネルの高解像度化は重要であるが、一方でHMDのサイズは、表示パネルサイズに依存するため、小型化と高精細化のトレードオフ問題を解決する必要がある。そのため、視線を検出して、中心部分と周辺部分で解像度を可変にして、処理を軽くする表示方法 (Foveated Rendering) が提案されているが、その一つとして偏光多重を用いて、時分割が不要で表示パネル1枚で実現できる方法の提案があった¹⁸⁾。また、その基本となる視線検出精度を、新しい前庭系と視覚系の連動モデル (動眼反射 (VOR: Vestibulo-ocular reflex) モデル) で、より正確にシミュレーションすることで改善し、さらに微小な電気刺激により移動後の視線を安定化させたHMDシステムの提案があった¹⁹⁾。新しいパーソナルVRシステムとして興味深い発表。また、視線検出の高速化についても多くの発表があり、HMDレンズ周囲の8個のIR-LEDと一つのIRカメラを用いて、新たな視線検出アルゴリズムにより、検出精度0.59°、3.5 m秒と高速、高精度を実現する報告も行われている²⁰⁾。

また、高精細パネルの新しい技術として、Quantum Dot (QD) に電流を流して発光させるナノLEDの超高精細UVパターニング技術の提案があり、Si基板上に3994ppiのパッシブマトリックスELデバイスの試作に成功している⁷⁾。また、マイクロLEDディスプレイを装着したコンタクトレンズ技術が提案され、CMOS上に緑色GaN LEDを形成した28K ppiの試作に成功している²¹⁾。

HUD技術では、視覚の中心部分に注意が集中するため、周辺の注意が疎かになってしまうという高認知負荷下で発生するCognitive Tunnelingの発生を防止するために、表示位置を変化させる方法の有効性が示されているが、今回、焦点距離を変化させることで軽減できることを示した²²⁾。AR/VRディスプレイの知覚については、疲労も含めて、まだまだわかっていない点が多々あるので、並行して、その原因についても解明されていくことを期待したい。(奥村)

4. 有機ELディスプレイ

4.1 有機EL発光材料

(1) 蛍光発光材料

緑、赤色発光材料では内部発光効率100%が期待できるリン光発光材料が2000年以降に実用化され高効率かつ長寿命な材料が現在のテレビ、スマートフォンなどのOLEDディスプレイに用いられている。その一方で、青色については現時点で実用化されているのは、内部発光効率が40%まで得ることができる蛍光材料のみである。近年のCO₂の排出抑制に対する世界的な要請にともない、蛍光発光方式のさらなる効率改良技術が続けられている。まず一つ目は、OLEDの積層に対し、上部電極側から光を取り出すトップエミッション型青色蛍光OLEDの青色OLEDの効率を向上させる有機キャップ層 (CPL) の研究に関する報告が、2022年のSID Display Week 2022においてなされた²³⁾。青色の性能を示す指標には、Blue Index (BI) (電流効率 (L/J) をCIE色度のCIEyで割った値) が、しばしば用いられる。上部側である陰極上に形成するCPLは、プラズモンによるエネルギーロスを軽減する効果が知られているが、そのCPL層の青色波長領域における屈折率を2.2まで上げて光取り出し効率を改善し、Liqと共蒸着する電子輸送材料の組み合わせを最適化することでキャリアバランスを改善するとともに、正孔輸送材料/電子ブロック材料も調整することでBI=305という高い青色発光効率を得た。

次に、同様に2022年のSID Display Week 2022において青色蛍光OLEDの性能改善を目的に積層発光層の開発に関する報告がなされた²⁴⁾。発光層内において注入された正孔と電子が出会う再結合領域と、複数の三重項が高密度に存在することで、三重項が対消滅し、それとともに一重項が生成するTTF (TTF: Triplet-Triplet FusionまたはTTA: Triplet-Triplet Annihilationと呼ばれる) 領域を空間的に分離し、余剰キャリアによる三重項励起子のクエンチを抑え、TTFの効率を向上させることで、素子寿命を改善することに成功した。下部の陽極側から光を取り出すボトムエミッション方式の素子にて、12%という高い外部量子効率 (EQE) と5%の輝度減衰 (LT95) 450時間以上の長い寿命を達成した。さらに周辺材料を含めた材料組み合わせを最適化し、14%以上の高いEQEを実現した。

(2) 青リン光/熱活性化遅延蛍光 (TADF) 材料

上述した蛍光発光材料に対し、内部効率100%という特徴を有するリン光材料および熱活性化遅延蛍光材料についても実用化に向けた改良が進められている。青色リン光材料は、ディスプレイ応用のための色純度と連続点灯寿命に大きな課題があった。一つ目は、長寿命な青色リン光OLEDの開発状況についてのSID Display Week 2022での発表である²⁵⁾。これまでPtを用いたリン光材料は、高い水平配向とリガンドの剛直性により、高効率かつ狭い半値幅の発光

が得られる材料として知られてきた。本年のSID 2022の報告では、リガンドを改良し、励起三重項からの大きな放射速度定数 $k_r = 4.7 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ と、短い三重項寿命 $2 \mu\text{s}$ を実現した。このPt錯体を発光ドーパントとし、正孔輸送正ホストと電子輸送性ホストを混合したエキサイプレックスホストを用いて、輝度 1000 cd/m^2 における外部量子効率EQE = 23.4%, CIEy = 0.197で5%の輝度減衰寿命LT95 = 150時間という長寿命な青色リン光デバイスを実現した。

次に、熱活性化遅延蛍光(TADF)材料の進展について述べる。上記リン光材料に対し、TADF材料は、高価なレアメタルを使わない高効率材料として2012年頃より盛んに研究・開発が進められており、実用的な長寿命化と高色純度化が課題となっている。このTADF材料についても、ディスプレイの広色域化のための青色発光材料について、SID 2022で報告があった。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 ν -DABNAが京都大学大学院理学研究科畠山教授により発表され注目されてきた²⁶⁾。 ν -DABNAを母骨格として、電子供与性/受容性置換基を工夫し、発光を短波長化した発表がなされた²⁷⁾。その結果、ELスペクトルの半値幅18 nm(中心波長464 nm)、CIEyが0.08以下となる発光材料を見いだしている。最新の畠山研からの報告では、ELスペクトルの半値幅15 nm(中心波長468 nm)、CIEyが0.10で、最大の外部量子効率EQE = 26.6%、高輝度時における効率低下(ロールオフ)が、わずか3.2%と、効率低下が非常に小さい青色TADF発光材料が得られている²⁸⁾。

(3) 新しい発光材料

フント則により、ある電子配置において、最大のスピン多重度を持つ状態が、最低エネルギーとなることが知られている。したがって、起三重項エネルギー T_1 と、励起一重項エネルギー S_1 の差は、正になる($\Delta E_{\text{st}} = S_1 - T_1 > 0$)ため、三重項から一重項への逆系間交差を経て遅延蛍光を発するためには熱活性化が必要である。この常識を覆す $\Delta E_{\text{st}} = -11 \text{ meV}$ という負の値を示す発光材料が見いだされた^{29) 30)}。過渡PLにより評価を行った結果、その逆系間交差速度定数 k_{RISC} は、 $1.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ という大きな値となった。また、OLED素子としても内部量子効率80%以上であることが実証された。

(清水)

4.2 有機ELディスプレイ技術

(1) パネルモジュール技術

有機EL(OLED)ディスプレイは、軽量薄型、広い視野角特性、高速応答性、高コントラスト、さらには低輝度から高輝度にわたって色再現性が良好などの特性を生かして、適用される製品の範囲がますます広がってきている。大画面テレビやスマートフォンへの占有率は着実に伸び、ゲーム機器、タブレット端末、ノートPC、医療用モニタ

などの他、過酷な環境下で使用され高信頼性が要求される車載用ディスプレイにも適用されている。

現在量産されているOLEDは、主として、大型は白色発光層蒸着+カラーフィルタ方式、小型はRGB発光層蒸着方式で量産されており、中型サイズではRGB印刷方式でも製造されている。さらに新たな方式として、有機EL発光層をベースに量子ドット色変換層と組み合わせたQD-OLED(量子ドット有機ELディスプレイ)が、2022年にCESで展示されて大きな注目を集め、同年、早くも65型4Kテレビ、34型曲面ゲーミングモニタとして製品化された。この方式は、青色有機EL発光層を蒸着方式で形成し、赤色、緑色に変換する量子ドット色変換層をインクジェット印刷により塗り分けるため³¹⁾、大型サイズを製造するのに適しており、同時に色域の拡大も実現している。

大型に関しては、CES 2022で97型テレビのデモ機が展示され³²⁾、また、SID 2022では95型8Kでリフレッシュレート120 Hzを実現したデモ機の展示とともに技術内容が発表され³³⁾、77型8Kという大型高精細でありながらAPL(Average Picture Level)3%で2000 nitの高輝度を実現したプロトタイプも展示された³⁴⁾。これらは、いずれも白色発光層蒸着+カラーフィルタ方式で作製されたものであり、外部結合効率を向上させるレンズアレイによって発光効率を約20%向上させ、かつパネル内部にゲート駆動回路を配置することによってパネルのベゼル幅を34%減少させる技術³⁵⁾や、視野角特性をさらに改善する技術³⁶⁾など、さまざまな高性能化技術が導入されている。一方、RGB印刷方式でも大型サイズの量産検証が進められている。RGB印刷方式としては、CES 2013で56型4Kのデモ機が展示されて以来³⁷⁾、複数の企業で大型化の検討が進められており、SID 2020では、高精細化やパネルの面内均一性が向上していることを示したインクジェット方式の55型8Kがオンラインで公開され³⁸⁾、さらにSID 2022では、それを上回る65型8Kのデモ機が展示された。

中型に関しては、RGB印刷方式のパネルが複数のセットメーカーに採用され、32型4K、27型4Kハイエンドモニタとして製品化されている。さらに、近年のeスポーツ人気の高まりとともに、ゲーミング用モニタへ適用するための開発が活発となっている。最近のゲームはリアルな映像が作り込まれるため、色域、コントラスト、応答速度に高いスペックが要求されるのに加え、高リフレッシュレートに対応する必要がある。SID 2022では、リフレッシュレートを48~240 Hzの範囲で可変できる15.6型有機ELモニタのプロトタイプが展示され、プレーヤを仮想世界に引き込む没入感を提供することが期待されている³⁹⁾。さらに、ゲーミング用モニタに必要な性能の測定方法や考え方についても議論が進んでいる。特に応答速度はゲーミング用途には重要な因子であり、あらためて応答速度の測定方法や定義について見直されている。例えば、OLEDの応答速度は測定

領域に依存するため、走査時間を含まない1ラインまたは1画素の応答時間測定が望ましいが⁴⁰⁾、国際規格であるISO、IDMS等の現行測定法は、LCDの欠点を改善する点に主眼を置かれており、このような現状の課題に対応していない。一方で、観察者の反応時間に着目すると、テレビ用途には応答速度が重要因子であり、ゲーミング用途にはコントラストが重要因子であるという報告もある⁴¹⁾。これらのような観点を踏まえて、各用途に応じて有用な表示性能に関する情報をユーザーに提示することが所望される。

その他の中型～大型OLEDのアプリケーションとして、OLED本来の画質の良さと薄型軽量の特徴を生かして、デジタルアートを鑑賞するための壁掛けインテリアモニタ⁴²⁾や、NFTデジタルアートを鑑賞するためのアプリケーションを組み込んだ有機ELテレビも提案されている⁴³⁾。小型に関しては、スマートフォンへの占有率が高まる中、開発の主流は後述するフレキシブルOLEDに移りつつある。より小型高精細化の技術に関しては、AR/VR用マイクロディスプレイとして網目模様が見えないようなレベルまで開発が進み、さらなる高い没入感と、現実社会/仮想社会のシームレス化を実現するために高輝度化と均一性を改善する技術も進められている⁴⁴⁾。

(2) フレキシブル有機ELディスプレイ

OLEDは、前述したように画質面でさまざまな利点を有するが、一般ユーザーには他方式のディスプレイとの差がわかりにくい面もあり、近年は、シンプルな構造でフレキシブル化が容易な特徴を生かして、さまざまな使用形態が提案されるようになった。エッジ部のみが湾曲した、あるいは任意の部分を凹状または凸状に湾曲させた固定形態に加え、自由に折り曲げる（ベンダブル）、折り畳む（フォールドダブル）、巻き取る（ローラブル）ことができる形態に加え、スライドさせて引き出す（スライダブル）、伸縮する（ストレッチャブル）ことができる形態である。

ベンダブルタイプでは、IFA 2022において、画面をフラットな状態から最大900Rまで20段階で湾曲具合を調整できる42型4Kテレビが展示され、同時に製品化が発表された⁴⁵⁾。用途によって、あるいはユーザーの好みによって湾曲度合の理想形は意見の分かれるところであるが、いつでも自由に湾曲度が変わえられるテレビは、OLEDの得意とするフレキシブル性が生かされた製品のひとつといえる。

フォールドダブルタイプは、1枚のディスプレイを折り畳むことができる、タブレット端末やノートパソコンへの使用を想定した8型から12型、17型サイズのプロトタイプが各社で開発されており、SID 2022では、単純な内折り、外折りに加え、二つの折り目を有してS字状に折り畳むタイプや、一つの折り目が内折りにも外折りにもできる（360°折り畳み）タイプのデモ機も複数展示された⁴⁶⁾。フォールドダブルOLEDモジュールの信頼性を向上させるためのキーマテリアルの一つは、光学用透明粘着フィルム（OCA）で

ある。さまざまな折り畳み半径で、さまざまな温度環境下でのOCAの挙動をシミュレーションし、その結果に基づいて適切なOCA特性を調査することによって、安定した折り畳み特性を保持するためのフォールドダブルディスプレイ設計手法を提案⁴⁷⁾するなど、信頼性向上のための地道な取り組みも行われている。

ローラブルタイプでは、設置台に巻き取られるテレビ用65型4Kが2020年末に製品化されているが、モバイルテレビという新しいカテゴリーの市場を形成することを目指して、印刷方式で作製された14型から31型サイズのプロトタイプも開発されている⁴⁸⁾。

スライダブルタイプは、例えば、フレキシブルOLEDパネルの一部を端末の背面に収納し、必要な時に引き出して画面を大きくして使用する構造である⁴⁹⁾。フォールドダブルやローラブルで培われた技術を生かして、端末の端部に設けた支持体の径を小さくし、端末の薄さを維持することによって洗練されたデザインを可能にしている。SID 2022では完成度の高いプロトタイプが多数展示され、技術が大きく進歩していることがアピールされた。

ストレッチャブルタイプは、伸縮性と高精細化が進んでいる⁵⁰⁾。複雑な形態が要求されるため、実用化レベルに達するには前述したフレキシブルの他の形態に比べても技術的難易度がより高くなるが、三次元的な新たな表現が可能になり、ウェアラブルディスプレイとしての適用範囲がより広範になる他、新たなアプリケーションが期待される。

また、フレキシブルOLEDは曲面を利用したデザインにも適用しやすいため、車載用ディスプレイとしても大いに期待されている。車載用の厳しい条件をクリアするために、デバイス構成を最適化することやRGB層を二層積層にすることによって高効率化、長寿命化することに加え、むらや焼き付きを補償するためのアルゴリズム開発も実用化され、高級車を中心に大型センターディスプレイにも使用され始めている⁵¹⁾。SID 2022では、車載用としては世界最大となる34型プラスチックOLEDが展示された。このプロトタイプでは、最大曲率半径R 800を有する人間工学設計により、運転者はナビゲーションとダッシュボードを同時にクリアに見ることができるとしている⁵²⁾。車載用ディスプレイは、耐久性やユーザビリティもさることながら、安全性も重要な要素であるため、その視認良好性についても研究が進んでいる。例えば、車載用ディスプレイの画質に影響を与えるハロ現象について、一画素のハロを抽出することによって、OLEDと、ローカルディミングを用いるミニLED LCDとを比較して、その優位性が定量的に示された⁵³⁾。

以上述べてきたように、OLEDは材料、デバイス技術とともに、パネルモジュール技術やフレキシブル化のような応用技術も着実に進化してきた。一方で、LCDは製品化されてからも長年にわたってその弱点を改善する技術が次々と開発されて進化し続けているし、量子ドットディスプレ

イやマイクロLEDなど、優れた性能を有する可能性を秘めた新規方式ディスプレイも台頭してきている。OLEDがさらに飛躍するためには、長寿命化、高輝度化などの弱点を補う技術開発を進めつつ、自発光デバイスとしての良好な光学性能やシンプルなデバイス構造等の特徴を生かした新規商品、アプリケーションを提案し展開していくことが重要と考える。

(山北)

5. 電子ペーパーディスプレイ

5.1 電気泳動電子ペーパー

マイクロカプセル方式の電気泳動電子ペーパーはその酸化チタニウムの白色色素材料によるペーパーホワイト、およびその広い視野角特性により、紙に近い読みやすさを実現し、主に電子書籍、電子ノート等のアプリケーションで普及している。近年では、電子ノートの分野において、白黒2値の表示応答速度向上と、システムハードウェアの進化によって、ペン書きのLatencyが30 msec台まで向上してきた。また、マイクロカップ方式の電気泳動電子ペーパーは、これまでの白黒に加えて赤や黄色が加わった3色電子ペーパーが登場したことにより、電子値札等の用途で赤札表示などの利便性により一気に普及が加速し、身近な店舗でも見られるようになった。

近年の電気泳動のカラー化技術は下記のように著しい進化を遂げている。

- (1) ACeP (Advanced Color ePaper) Color：2016年にCyan, Magenta, Yellow, Whiteの4色の色素で、32パレット色のフルカラーを実現し、主にサイネージ用途への展開が行われた。また、パレットカラーを10色に減らすことにより、それぞれさらに鮮やかな色味を実現してサイネージなどの用途の広がりに貢献してきた。2016年には書き換えに10秒以上要していたが、2022年には次世代ACeP (Gallery 3) が登場し、駆動技術などの向上で350 msec (白黒)、500 msec～1,500 msec (カラー) と劇的に短縮され、今後のeBookやeNoteへの普及も期待できるようになってきた⁵⁴⁾。
- (2) Spectra Color：マイクロカップの電気泳動電子ペーパーで、白・黒に赤色、もしくは黄色のピグメントを追加することにより3色表現を実現してきたが、2022年には白・黒・赤・黄色の4色の色素を同一マイクロカップ内に封止することによって、色素の4色＋オレンジの5色を表現する技術が紹介された⁵⁵⁾。前述のACePと比較して駆動がシンプルで、システムも単純化することができ、電子値札等の更なる普及が期待できる。
- (3) Prism Color：単色カラー (Blue, Cyan, Green, Yellow, Brown, Red) とWhiteの2色素顔料でマイクロカプセルを構成して、アクティブマトリックスではなく、単純電極フィルムと組み合わせることに

より、フレキシブルかつ大面積で特にアーキテクチャ等の意匠デザイン用途への展開も行っている。

- (4) Kaleido Color：2020年、電子書籍にて培ったフィルム方式のフロントライト技術の進化、フレキシブル電子ペーパーで培ったマイクロカプセルフィルムの薄型化、カラーフィルタの印刷技術の向上、TFTの高解像度化などの組み合わせにより、反射型カラー特有のパララックスによる色ずれ改善等を行った。2022年には次世代Kaleido3の登場により、カラーフィルタ印刷方式がさらに進化してcolor gamutの改善等を行った。特に、量産性が高く、先述のピグメント方式フルカラー電子ペーパーよりもより速い書き換え時間を要求される、カラー電子書籍、電子ノートへの展開が期待されている。

また、従来のディスプレイ以外の用途への開発も行われている。黒色素顔料のみ入ったマイクロカプセルを特定の周波数でAC駆動を行うことによって光の透過を制御することにより、スマートウィンドウの用途への展開が提案されている⁵⁶⁾。大画面の黒板のような用途として、色素が入ったマイクロカプセル内部に磁気を持たせることにより、書く際に電力を必要とせず、かつwriting latencyを大きく改善した技術も紹介された⁵⁷⁾。

フレキシブル電気泳動電子ペーパーとしては、ACeP Gallery3カラーディスプレイを用いたFoldable, Rollableの技術展示が行われた⁵⁸⁾。また、単一電極電気泳動フィルムを車のボディの三次元表面にフレキシブルに張り付けて2色素のマイクロカプセルの電気泳動により、動的な外観意匠の変化を可能にしたコンセプトカーも発表されている⁵⁹⁾。また、マイクロクラック電極を用いたストレッチャブル、ウォッシュャブルな電子ペーパーの研究も行われている⁶⁰⁾。

5.2 エレクトロクロミック電子ペーパー

エレクトロクロミック (EC) 表示素子は電気化学的酸化還元による物質の色変化を利用した表示素子である。近年では、ヘイズ (曇り) をほぼ変化させずに透過率のみを変えることができるので、眺望を保ちながら遮光状態を変化させる用途として調光ガラスの研究開発が進んでいる。ボーイング787の窓や車の防眩ミラーとしての実用化が先行しており、現在、オフィスなどの窓ガラスおよび車の窓への応用が進んでいる。使用されるEC材料としては、酸化タングステン等の無機材料、ビオロゲン等の有機分子、共役高分子等の有機材料、メタロ超分子ポリマー等の金属錯体材料などが研究されている。EC調光ガラスを用いた効果的な遮光と遮熱により空調の省エネへの貢献が期待される。

5.3 エレクトロウェットティングディスプレイ

電極の上に配置された撥水性の誘電膜に水滴を置き、電極と液滴間に電圧を加えることにより液滴の接触角が変化する現状を利用したエレクトロウェットティング電子ペーパーの研究も進められている。液滴の接触角変化の応答速度が

速く、低消費電力で前述の電子ペーパー技術とは異なった特色を持つ。近年では、ディスプレイ用途以外に、この誘電膜による液滴接触角操作とTFTの技術を利用した、マイクロ流体チップ・デバイスの研究も行われている⁶¹⁾。将来の医薬分野でのシングルセルオミクスを用いた分析等での活用が期待される。

（橋本）

6. 薄膜トランジスタ、駆動技術

6.1 薄膜トランジスタ

大型・高精細ディスプレイや、伸縮性やベゼルレス構造を有する次世代ディスプレイに向けて、薄膜トランジスタ（TFT）を用いたさまざまなバックプレーン技術が報告された。

まず大型ディスプレイとして、世界初の95インチ8K120Hz駆動OLEDディスプレイの開発が報告された⁶²⁾。ITOとIGZOを電極として用いた透明保持容量構造（画素の開口率が従来に比べて30%向上）、配線抵抗を低減するための厚膜（8,000Å以上）Cu配線、高画質化のための高度な補正技術（TFT特性に対する電氣的補償、ガンマ調整、EL特性に対する光学的補償）などの新技術が用いられた。

またLTPO（Low Temperature Polycrystalline Oxide）を用いたハイブリッドバックプレーン技術として、バックプレーンの層数を削減可能な新構造が開発された⁶³⁾。IGZO-TFTをボトムコンタクト構造にすることでLTPS-TFTとの接続を一つのビアのみで実現し、層数の削減を可能にした。さらに作製プロセスを最適化することで、IGZOとMo電極の良好なコンタクト特性を実現した。

さらに高精細なOLED VRディスプレイ向けの技術として、新たなバックプレーン構造が開発された⁶⁴⁾。駆動用TFTをボトムゲート構造とする一方で、選択用TFTにはトップゲート構造を用いている。これにより、駆動用TFTのゲート絶縁膜を厚くする一方で（S値大）、選択用TFTの絶縁膜は薄くすること（S値小）が可能になり、良好な階調表現と高速な画素駆動の両立が可能になった。さらに、駆動用TFTと選択用TFTをシングルコンタクトホールで接続でき、高精細化も可能になった。

短チャネル酸化物TFTの作製手法として、SANP（Self-Aligned Nanogap Patterning）プロセスが提案された⁶⁵⁾。ネガレジストを用いたフォトリソグラフィによる逆テーパー構造とリフトオフプロセスを組み合わせたSANPプロセスにより、分解能3μmのコンタクトアライナーを用いて、チャネル長0.1μmまでのサブミクロン酸化物TFTを作製可能なことが示された。

次世代ディスプレイとして注目されている伸縮性を有するストレッチャブルディスプレイに関しても多くの報告がなされた。発光素子としてOLEDを用いたストレッチャブルディスプレイ⁶⁶⁾⁶⁷⁾やマイクロLEDを用いたディスプレイ⁶⁸⁾⁶⁹⁾、アクリル系の接着層を用いた伸縮耐性の高いTFTアレイ⁷⁰⁾などが開発されている。またディスプレイ

のベゼルレス構造の実現に向けて、フィルム基板裏面から駆動可能な新構造の酸化物TFTが提案された⁷¹⁾。

（辻）

6.2 駆動技術

有機ELディスプレイは、長時間駆動による焼き付きなどの画質劣化の問題があり。これまでに、画質劣化を補償するための多様な技術が提案されてきた。画素回路内に補償回路を設ける内部補償方式や、画素電流を外部に読み出すことで、劣化状態を検出する外部センシング補償方式、OLEDの発光履歴を画素単位で保存し、これらの情報から劣化を予測するデータカウンティング方式などが提案されている。

データカウンティング方式は、特別な補償回路が必要なくシンプルな方式であるが、高精細ディスプレイのOLEDの劣化情報を保存するためには、多くのメモリーを必要とする。そこで、劣化情報を領域ごとにまとめたマルチユニット補償マップを使用することで、使用メモリーを削減する手法が報告された⁷²⁾。通常は画素ごとに劣化情報を保存する必要があるが、劣化状態の近い領域を一つのブロックとして、任意形状のブロックごとに劣化情報をまとめるマルチユニット補償マップを作成した。これにより、補償マップを1/16のサイズまで減らしても、高精度に補償できることが示された。

また、大画面ディスプレイでは、歩留まり向上の観点から、外部センシング補償方式が用いられており、高精度に補償することが可能で、実用化が進んでいる。近年では、さらに、コスト削減や歩留まり向上のための技術が開発されている。通常、画素回路内にデータ書き込み用のスイッチTFTと、センシング用のスイッチTFTを持ち、それぞれに走査用電極が必要であったが、走査用電極を共用とするとともに、電流読出し用センシング電極もサブピクセルは共用とすることで、配線数を大幅に減らした大型8K有機ELテレビが開発されている⁷³⁾。また、画素電流センシングは、フレームのブランキング期間を使用するため、1フレーム期間で1ライン分のデータしか取得できないため、高解像度のテレビでは、画素電流のデータ取得に要する時間が長くなり、補償するまでに多くの時間が必要であった。そこで、周辺画素からセンシングデータを補間することで、センシング回数を減らしても、従来と同程度の補償を可能とする方式も提案されている⁷⁴⁾。

（薄井）

7. 量子ドット技術

ディスプレイの広色域化に量子ドット（Quantum Dot: QD）が活用されている。量子ドットはナノスケールの半導体結晶材料であり、結晶サイズに応じてバンドギャップが変化する量子サイズ効果を示す。液相合成で作製されるコロイダル量子ドットは、合成条件によって粒子サイズを制御することができ、サイズばらつきを小さくすることで高色純度発光を得ることができる。これまでに毒性が懸念さ

れているカドミウム系量子ドット材料にて高色純度・高効率発光が達成されてきたが⁷⁵⁾、環境への配慮からカドミウムフリー量子ドット材料の開発が進められ、特性が改善されてきた。

カドミウムフリー量子ドット材料として、リン化インジウム系の量子ドットでは、緑色材料において、フォトルミネッセンス(PL)の半値全幅33nmの高色純度発光が⁷⁶⁾、赤色材料では半値全幅35nm、PL量子収率は100%に近い高色純度かつ高効率発光が得られることが報告されている⁷⁷⁾。青色材料では、テルルを添加したセレン化亜鉛系の量子ドットにて、高色純度、高効率の発光が報告されている⁷⁸⁾。また、その他の高色純度発光が期待される材料系として、硫化銀インジウムガリウムなどのI-III-VI族半導体からなる量子ドット材料が注目されている⁷⁹⁾。

量子ドットのディスプレイ応用として、ディスプレイの青色光源を量子ドットで色変換することによる広色域フルカラー化が検討されている⁸⁰⁾。例えば、青色OLEDと量子ドット技術を組み合わせたQD-OLEDディスプレイが開発され、各画素に赤色と緑色の量子ドット色変換フィルタを形成する技術開発が盛んに進められている⁸¹⁾。

量子ドットを用いたQD-LEDの研究開発も行われ、発光効率や色純度の改善が進んでいる。カドミウムフリー量子ドット材料を用いたQD-LEDにおいて、赤色で21.4%⁷⁷⁾、緑色で17.6%⁸²⁾、青色で20.2%⁷⁸⁾の高い外部量子効率が表示されており、カドミウム系量子ドットの発光特性に迫りつつある。また、QD-LEDディスプレイとして、RGBカドミウムフリー量子ドットをインクジェット印刷によって塗り分けたディスプレイ⁸³⁾、フォトリソグラフィーを用いてパターンニングを行ったアクティブマトリックスディスプレイが試作されている⁸⁴⁾。

(本村)

8. マイクロLEDディスプレイ

マイクロLEDとは一般にチップサイズ50 μ m以下のLEDを指す。それを用いたマイクロLEDディスプレイはLCDやOLEDに比べて、輝度、コントラスト、応答速度、消費電力、寿命といったすべての点において優れており、高機能次世代ディスプレイとしての位置づけには揺るぎないものがある⁸⁵⁾。そのため、研究開発競争が激化しており、これまでに巨額の投資がなされている。Yale Intelligenceのレポートによると、2008年から2022年の14年間に開発費として80億ドル以上がすでに投資され、2022年から2025年の試作フェーズでは少なくとも30億ドルの投資が見込まれる。また、R&D費として2022年だけでも13億ドル、2025年までにさらに50億ドルの投資が見込まれる。一方、数多い応用の内訳として、2029年にはモニターやテレビよりむしろ、AR/MR/VR用スマートグラスやスマートフォン/スマートウォッチなど、小型・高精細が求められる分野が大部分を占めると予測されている⁸⁶⁾。

マイクロLEDディスプレイは現状では製造コストが高く、その低減化が課題となっている。マイクロLEDディスプレイ作製には「蛍光体を用いた色変換」と「AlGaInP/GaAs系赤色(R)LEDとInGaN/GaN系緑色(G)/青色(B)LEDからの直接発光」を用いる2方式がある。色変換の場合、青色あるいは紫色LEDチップを配置し、その上に蛍光体を塗布してRGBを発色させる方式である⁸⁷⁾。ここで用いられる蛍光体としてCdSe/ZnS系量子ドットが有望であるが、耐環境面からInP/ZnS系量子ドットに関する研究が精力的に進められている⁸⁸⁾。

一方、RGB LEDを直接配置する方式として主に「pick-and-place」が用いられているが、低い配置効率が高コスト化の一因となっている。また、従来の赤色LEDの発光効率がチップサイズの減少とともに劇的に劣化することも大きな問題である⁸⁹⁾。この現象はキャリア拡散長に関係しており、チップ端面での注入キャリアの非輻射再結合に起因している。そのため、チップ端面をAl₂O₃でコーティングする技術が提案されている⁸⁹⁾。

マイクロLEDディスプレイの将来応用として、小型・超高精細ディスプレイが期待されている。その場合、ピクセルサイズとして20 μ m角以下、サブピクセルサイズとして5 μ m角以下(将来的には2 μ m以下)が必要となる。このようなディスプレイ作製にあたり、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求められる。そのためには赤色LEDを、青色/緑色LEDに用いられている窒化物半導体で実現することが必須であり、世界的にホットな研究課題となっている。通常、窒化物半導体LEDでは発光層として、InGaN/GaNからなる量子井戸構造が用いられており、理論上、In組成を増やすことにより赤色発光を得ることができる。しかしながら、格子歪みに起因するピエゾ電界による量子閉じ込めシュタルク効果の増大や結晶自体の品質の劣化が著しく、赤色LEDの外部量子効率は最大5%程度に留まっている⁹⁰⁾。また、その発光半値幅は最低でも50nmと色純度が悪く、さらに発光ピーク波長が注入電流量とともに短波長側へシフトすることが避けられない。

一方、赤色発光を示すことが知られているEuを添加したGaN(GaN:Eu)を発光層に用いて、赤色LEDが実現されている⁹¹⁾。発光原理が従来のLEDで用いられるバンド間遷移と異なり、電流注入で励起されたEuイオンの内殻遷移を利用している関係上、発光半値幅が1nm以下と極端に色純度が高く、発光波長が環境温度や注入電流量に依存しないというディスプレイにとって最適な特徴を有する。また、低注入電流域で高い外部量子効率(現状では9%程度)が得られること⁹²⁾、チップサイズの減少に対して効率が変化しないこと⁹³⁾、ウエファー面内での波長均一性が100%であること等、超高精細ディスプレイにとって魅力的な特性が得られている。

小型・超高精細ディスプレイの実現には三原色LEDのモノリシック集積が求められる。これまで、電子線描画によりパターンニングを施した基板への超高真空での選択成長によりInGaNナノコラムが成長すること、そのコラム径により発光色が変わることが報告されている⁹⁴⁾。このInGaNナノコラムを利用して、三原色ナノコラムLEDのモノリシック集積が実証されている⁹⁵⁾。しかしながら、個々のナノコラム径のバラツキによる発光スペクトルのブロード化が生じており、その解消が課題となっている。一方、Ga₂N:Eu赤色LEDと従来のInGaN青色/緑色LEDを縦方向に積層した三原色LED集積が報告されている⁹⁶⁾。この集積LEDはRec.2020に対して面積比105%と極めて広い色域をカバーしており、すでに3,000 cd/m²を超える輝度を達成している。AR応用に向けて、赤色LEDの更なる高輝度化が今後の課題である。（藤原）

9. ウェアラブルセンサの技術動向

近年、ウェアラブルセンサの研究が非常に活発に行われている。特に医療用途のウェアラブルセンサの開発が加速している。医療用途に使われるセンサには、さまざまなタイプが提案されている。一つは、心臓の動きや筋肉の挙動、眼球の動きなどを計測するタイプで、これらは、電極を利用するもので、生体電位センサと呼ばれている。このタイプは、ウェアラブルデバイスと埋め込み型デバイスを結合したものが一般的である。具体的にはセンサの機能を持つウェア、チェストストラップ、スキンパッチなどが利用されている。その他、まだ製品化はされていないが、センサを自動車用のシートに搭載するなど、直接、皮膚にタッチしないタイプの提案もされている^{97)~99)}。さらに、センシングデバイスを利用した、例えば、神経を刺激するなどの治療にも活用する事例も提案されている¹⁰⁰⁾¹⁰¹⁾。

もう一つは、オプティカルセンサで人体から得られる情報(生体情報)を測定するデバイスが提案されている¹⁰²⁾¹⁰³⁾。医療用途として承認されているものは、まだ少ないのが現状である。オプティカルカメラを利用して、リモートで計測する手法が理想ではあるが、感度の向上、ノイズの低減など多くの克服すべき課題が残っている。このことから、高い精度で計測することが重要な医療デバイスとして、人体の皮膚に直接タッチするウェアラブルなセンサの開発が現在、主流となっている。

近未来には、生体情報など人体が発信するシグナルを検知し、それらの日々の情報を基本情報として蓄え、センシングデバイスが異常と判断した場合には、自宅や救急医療現場に自動的に送られるような状況が想定される。このようなセンサを人体に装着するウェアラブルデバイスの実現に向かって開発が行われている¹⁰⁴⁾。このような未来が到来すると、健康な人だけでなく介護が必要な患者や、痴ほう老人の徘徊のケアなどさまざまな場面での活躍が期待できる。

このように、さまざまな薄膜加工技術の進歩に伴い、ウェアラブルセンサは今後、ますます高性能化、高機能化にむけた発展が期待できる¹⁰⁵⁾¹⁰⁶⁾。（浦岡）

(2022年12月22日受付)

〔文 献〕

- 1) E.L. Hsiang, Y.F. Lan and S.T. Wu: "Mini-LED, OLED or Micro-LED: Who Wins?", Proc. of IDW, 27, pp.50-53 (2020)
- 2) 兵頭祐祐, 岡真一郎, 大平啓史, 廣瀬敬也, 富沢一成, 石原朋幸, 小橋淳二, 板倉史門: "デュアルセル液晶ディスプレイにおけるモアレ低減技術の開発", 映像学誌, 76, 6, pp.741-746 (2022)
- 3) T. Matsushima, S. Kimura and S. Komura: "Fast Response In-Plane Switching Liquid Crystal Display Mode Optimized for High-Resolution Virtual-Reality Head-Mounted Display", J. Soc. Inf. Display, 29, 4, pp.221-229 (2021)
- 4) H. Nishikawa and F. Araoka: "Polymorphic Structures and Characteristics of Nematic-Based Ferronematics", Proc. of IDW, 28, pp.46-49 (2021)
- 5) F. Peng, et al.: "Liquid Crystals for Virtual Reality (VR)", SID 2021 Digest, pp.427-430 (2021)
- 6) C. Kim, et al.: "High-ppi Fast-Switch Display Development for Oculus Quest 2 VR Headsets", SID 2022 Digest, pp.40-43 (2022)
- 7) K. Yin, et al.: "Tutorial on Diffractive Liquid-Crystal Devices for AR/VR Displays", SID 2022 Digest, pp.36-39 (2022)
- 8) K. Yin, et al.: "Foveated Imaging by Polarization Multiplexing for Compact Near-Eye Displays", SID 2022 Digest, pp.937-940 (2022)
- 9) A. Bhowmick, et al.: "Optical performance characterization of 5cm aperture size continuous focus tunable liquid crystal lens for resolving Accommodation-Convergence mismatch conflict of AR/VR/3D HMDs", SID 2022 Digest, pp.166-169 (2022)
- 10) Y. Wu, et al.: "High-Resolution Light-Field VR LCD", SID 2022 Digest, pp.945-948 (2022)
- 11) T. Lin, et al.: "Maxwellian near eye display with an expanded eyebox", Opt. Express 28, pp.38616-38625 (2020)
- 12) J. Kim, et al.: "Foveated AR: dynamically-foveated augmented reality display", ACM Transactions on Graphics, 38, 4, pp.99:1-99:15 (2019)
- 13) J. Zou, et al.: "Gaze Matched Pupil Steering Maxwellian-view Augmented Reality Display", SID 2022 Digest, pp.624-627 (2022)
- 14) A. Maimone and J. Wang: "Holographic optics for thin and lightweight virtual reality", ACM Transactions on Graphics, 39, 4, pp.67:1-67:14 (2020)
- 15) S. Komura, et al.: "Thin and Lightweight Head-Mounted Displays with Polarized Laser Backlights and Holographic Optics", SID 2022 Digest, pp.636-639 (2022)
- 16) X. Xia, et al.: "Eyeglasses-Style Maxwellian-View Near-eye Display with Lens-Array-Based Holographic Optical Element", 31.1, pp.394-397, Proc. of SID2021 (2021)
- 17) J. Xiong et al.: "Aberration-Free Pupil Steering Maxwellian Display for Augmented Reality", 31.2, pp.398-401, Proc. of SID2021 (2021)
- 18) K. Yin, et al.: "Foveated Imaging by Polarization Multiplexing for Compact Near Eye Displays", 70.1, pp.937-940, Proc. of SID2022 (2022)
- 19) V. Alexandrov, et al.: "Human Eye's Sharp Vision Area Stabilization for VR Headsets", 29.4, pp.376-379, Proc. of SID2021 (2021)
- 20) J. Zou, et al.: "An Easy-to-Implement and Low Cost VR Gaze-Tracking System", 29.3, pp.373-375, Proc. of SID2021 (2021)
- 21) K. Tsujino, et al.: "Ultra-High Resolution NanoLED Panel for AR/VR by UV Patterning Technology", 25.2 pp.291-294, Proc. of SID2022 (2022)
- 22) J. Pullukat, et al.: "Consideration of Image Distance on Cognitive Tunneling with Augmented Reality Head Up Displays", 54.5, pp.719-722, Proc. of SID2022 (2022)
- 23) X. Liang, et al.: "Marching Toward Theoretical Limits of Blue Fluorescent OLEDs with BI>300", SID 2022 Digest, pp.501-504 (2022)
- 24) S. Tasaki, et al.: "Realization of Ultra-High Efficient Fluorescent Blue OLED", SID2022 Digest, pp.441-451 (2022)
- 25) S. Kim, et al.: "Prolonging Device Lifetime of Blue Organic Light-

- Emitting Diodes", SID2022 Digest, p.505 (2022)
- 26) Y. Kondo, T. Hatakeyama, et al: "Narrowband Deep-blue Organic Light-emitting Diode Featuring an Organoboron-based Emitter", Nat. Photonics, pp.678-682 (2019)
 - 27) K. Naveen, et al: "Achieving Deep-Blue Color in Diboron-Embedded Multi-Resonance Thermally Activated Delayed-Fluorescence Emitter for Narrowband OLEDs", SID2022 Digest, pp.986-989 (2022)
 - 28) S. Oda, et al: "Ultra-Narrowband Blue Multi-Resonance Thermally Activated Delayed Fluorescence Materials", Advance Science, pp.2205070-2205075 (2022)
 - 29) N. Aizawa, et al: "Delayed Fluorescence from Energetically Inverted Singlet and Triplet Excited States for Efficient Light-Emitting Diodes", SID2022 Digest, pp.881-884 (2022)
 - 30) N. Aizawa, et al: "Delayed Fluorescence from Inverted Singlet and Triplet Excited States", Nature, pp.502-506 (2022)
 - 31) <https://www.samsungdisplay.com/eng/tech/quantum-dot.jsp>
 - 32) <https://news.lgdisplay.com/en/2022/01/ces2022-07-97-inch-oled/>
 - 33) Zhongyuan Wu, et al: "Development of Ultra-Large 95inch 8K 120Hz OLED Display", SID 2022 Digest, pp.110-113 (2022)
 - 34) <https://www.displaysupplychain.co.jp/blog/220516-1/>
 - 35) H.J. Shin, et al: "Technical Progress of OLED Displays for Premium TVs", SID 2022 Digest, pp.673-676 (2022)
 - 36) D.G. Lee, et al: "Enhanced Viewing Angle Performance of an Advanced WRGB OLED Technology", SID 2022 Digest, pp.681-684 (2022)
 - 37) <https://news.panasonic.com/jp/press/jn130109-1>
 - 38) J. Kang, et al: "Recent Developments in Inkjet-printed OLEDs for High Resolution, Large Area Applications", SID 2020 Digest, pp.591-594 (2020)
 - 39) <https://global.samsungdisplay.com/29982/>
 - 40) Z.W. Liangchen, et al: "A New Approach to the Response Time Measurement Method of OLED TVs", Proc. of IDW, pp.612-615 (2021)
 - 41) Yan Jin, et al: "Evaluation for Reaction Time of Gaming Displays", SID 2022 Digest, pp.907-909 (2022)
 - 42) 麻倉 怜士: "パネルメーカーが提案する, アートを楽しむモニタ", Pen, 528, pp.134 (May2022)
 - 43) <https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2209/06/news080.html>
 - 44) K.S. Bae, et al: "Novel Optical Structure of OLED Panel for Immersive and Seamless VR", SID 2022 Digest, pp.733-735 (2022)
 - 45) <https://www.phileweb.com/news/d-av/202208/31/56292.html>
 - 46) <https://www.lgdisplay.com/eng/company/media-center/latest-news?contentId=5031>
 - 47) M.H. Lee, et al: "The foldable display architecture technique depending on the wide temperature range and the folding curvature", SID 2022 Digest, pp.692-695 (2022)
 - 48) J.G. Lee, et al: "31" Flexible Printed OLED TV Display Technology: It's TV Mobiles", SID 2022 Digest, pp.993-997 (2022)
 - 49) Youngdo Cha, et al: "Flexible Display Device", US 2022/0066510
 - 50) J. Yoon, et al: "Technical Advances in Stretchable Displays for High Pixel Density and High Stretchability", SID 2022 Digest, pp.514-516 (2022)
 - 51) T. Tarnowski, et al: "OLED Technology for Automotive Display Applications", SID 2022 Digest, pp.794-797 (2022)
 - 52) <https://www.lgdisplay.com/eng/company/media-center/latest-news?contentId=5031>
 - 53) K. Blankenbach, et al: "Halo Mura of OLED and FALD LCD: Measurements and Perception for Automotive Displays", SID 2022 Digest, pp.424-427 (2022)
 - 54) S.J. Telfer: "Multipigment Full-color Electrophoretic Display with Improved Update Time", IDW2022 EP1-2 (2022)
 - 55) HongMei Zang: "A Five-Color Electrophoretic Display", IDW2022 EP1-1 (2022)
 - 56) M.D. McCreary: "Variable-Transmission Electrophoretic Films", SID2019 36.1 (2019)
 - 57) M.D. McCreary: "Magnetically Written Electrophoretic Display", SID2019 36.2 (2019)
 - 58) Touch Taiwan 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=RKAAdXYWop-Q&t=17s> (2021)
 - 59) CES2022, <https://www.bmw.com/en/events/ces2022/ixflow.html> (2022)
 - 60) B. Yang: "An Electrophoretic E-Paper Device with Stretchable, Washable and Rewritable Functions", SID2022 60.1 (2022)
 - 61) H. Ma: "Active-Matrix Digital Microfluidics System for Single Cells Manipulation" SID2022 60.3 (2022)
 - 62) Z. Wu, et al: "Development of Ultra-Large 95 inch 8K 120Hz OLED Display", SID 2022 Digest, pp.110-113 (2022)
 - 63) M. Honjo, et al: "Advanced hybrid process with back contact IGZO-TFT", J. Soc. Inf. Display, 30, pp.471-481 (2022)
 - 64) K. Oh, et al: "Novel LTPS-TFT Backplane Structure on Glass for 1, 443ppi 4.3-in. AMOLED VR Display", SID 2022 Digest, pp.314-317 (2022)
 - 65) C. Sung, et al: "Metal Oxide Thin-Film Transistors with 0.1 μm channel length formed by Self-Aligned Nanogap Patterning", SID 2022 Digest, pp.388-390 (2022)
 - 66) J. Yoon, et al: "Technical Advances in Stretchable Displays for High Pixel Density and High Stretchability", SID 2022 Digest, pp.514-516 (2022)
 - 67) P. Wang, et al: "A 200 PPI Oval Shape Stretchable AMOLED Display", SID 2022 Digest, pp.524-525 (2022)
 - 68) H. Jung, et al: "Active Matrix Micro-LED Stretchable Display and Technical Challenges", SID 2022 Digest, pp.517-520 (2022)
 - 69) C.-L. Wang, et al: "High Resolution Stretchable Micro-LED Displays", SID 2022 Digest, pp.521-523 (2022)
 - 70) M. Miyakawa, et al: "Highly stretchable island-structure metal oxide thin-film transistor arrays using acrylic adhesive for deformable display applications", J. Soc. Inf. Display, 30, pp.699-705 (2022)
 - 71) H. Tsuji, et al: "Oxide Thin-film Transistors Driven from Substrate Backside Using Three-dimensional Wires", Proc. IDW '21, pp.143-144 (2021)
 - 72) J. Ok, Y. Yu, J.-y. An, S. Na, W. Jang, H.-W. Lim, J.-Y. Lee: "A Multi-Unit Compensation for OLED Burn-In in Mobile Displays", SID2022 Digest, pp.165-168 (2022)
 - 73) H.-J. Shin, S.-H. Choi, S.-H. Hong, C.-H. Lee, D.-H. Oh, S.-J. Bae, T.-S. Kim, H.-S. Song, H.-S. Kim, C.-H. Oh: "Technical Progress of OLED Displays for Premium TVs", SID2022 Digest pp.673-676 (2022)
 - 74) T. Usui, T. Okada, T. Shimizu, K. Nakamura, M. Moriya, H. Katoh: "An External Compensation Technique for Burn-in Degradation in 30-inch Flexible AMOLED Display", Proc. of IDW2021, pp.877-880 (2021)
 - 75) Y. Shirasaki, G.J. Supran, M.G. Bawendi, V. Bulovic: "Emergence of colloidal quantum-dot light-emitting technologies", Nature Photonics, 7, pp.13-23 (2013)
 - 76) D.A. Taylor, J.A. Teku, S. Cho, W.-S. Chae, S.-J. Jeong, J.-S. Lee: "Importance of Surface Functionalization and Purification for Narrow FWHM and Bright Green-Emitting InP Core-Multishell Quantum Dots via a Two-Step Growth Process", Chem. Mater., 33, pp.4399-4407 (2021)
 - 77) Y.-H. Won, O. Cho, T. Kim, D.-Y. Chung, T. Kim, H. Chung, H. Jang, J. Lee, D. Kim and E. Jang: "Highly efficient and stable InP/ZnSe/ZnS quantum dot light-emitting diodes", Nature 575, pp.634-638 (2019)
 - 78) T. Kim, K.-H. Kim, S. Kim, S.-M. Choi, H. Jang, H.-K. Seo, H. Lee, D.-Y. Chung, E. Jang: "Efficient and stable blue quantum dot light-emitting diode", Nature, 586, pp.385-389 (2020)
 - 79) W. Hoisang, T. Uematsu, T. Torimoto, S. Kuwabata: "Luminescent Quaternary Ag (InxGa1-x) S2/GaSy Core/Shell Quantum Dots Prepared Using Dithiocarbamate Compounds and Photoluminescence Recovery via Post Treatment", Inorg. Chem., 60, pp.13101-13109 (2021)
 - 80) R. Tangirala, E. Lee, C. Sunderland, W. Guo, A. Mamuye, K. Wang, E. Hwang, N. Kim, C. Hotz: "Quantum Dot Color Conversion for OLED and microLED Displays", SID 2021 Digest, 52, pp.906-908 (2021)
 - 81) J. Burschka, C.-S. Choi, N. Greinert, E. Kossov, T. Suzuki, A. Yamamoto, I. Koehler: "Challenges in QD-OLED Display Technology", SID 2022 Digest, 53, pp.295-298 (2022)
 - 82) C. Ippen, B. Newmeyer, D. Zehnder, D. Kim, D. Barrera, C. Hotz, R. Ma: "Progress in High-Efficiency Heavy-Metal-Free QD-LED Development", SID 2020 Digest, 51, pp.858-861 (2020)
 - 83) M. Park, Y. Kim, Y. Jung, J. Kang, S. Kim, J. Ha, Y. Yoon, C. Lee: "All inkjet-printed 6.95" 217 ppi active matrix QD-LED display with RGB Cd-free QDs in the top-emission device structure", J. Soc. Inf. Display, 30, pp.433-440 (2022)

- 84) Y. Nakanishi, M. Kanehiro, S. Okamoto, K. Matsushita, S. Horiue, H. Utsumi, Y. Qu, X. Fu, K. Konishi, A. Oda, M. Kitagawa, T. Ishida, C. Ippen, D. Barrera, J. DaRos, R. Ma: "Development of Active-Matrix NanoLED Display Using Heavy-Metal-Free QDs Patterned by Photolithography Process", SID 2022 Digest, 53, pp.65-68 (2022)
- 85) Z. Chen et al.: "MicroLED technologies and applications: characteristics, fabrication, progress and challenges, ", J. Phys. D: Appl. Phys. 54, pp.123001/1-35 (2021)
- 86) E. Virey, Z. Bouhamri: "Trends toward Integrated RGB Microsystems for Mini and MicroLEDs", the 29th International Display Workshops (IDW2022), MEET3-3, Fukuoka, Japan (Dec. 14-16 (2022))
- 87) G. Chen et al.: "Monolithic Red/Green/Blue Micro-LEDs with HBR and DBR Structures", IEEE Photonics Technol. Lett. 30, pp.262-265 (2018)
- 88) Y. Kim et al.: "Bright and uniform green light emitting InP/ZnSe/ZnS quantum dots for wide color gamut displays", ACS Appl. Nano Mater. 2, pp.1496-1504 (2019)
- 89) M.S. Wong et al.: "Improved performance of AlGaInP red micro-light-emitting diodes with sidewall treatments", Opt. Exp. 28, pp.5787-5793 (2020)
- 90) D. Iida et al.: "Recent progress in red light-emitting diodes by III-nitride materials", Semicond. Sci. Technol. 37, pp.013001/1-29 (2022)
- 91) A. Nishikawa, Y. Fujiwara et al.: "Room-Temperature Red Emission from a p-Type/Europium-Doped/n-Type Gallium Nitride Light-Emitting Diode under Current Injection", Appl. Phys. Exp. 2, pp.071004/1-3 (2009)
- 92) B. Mitchell, Y. Fujiwara et al.: "Perspective: Toward efficient GaN-based red light emitting diodes using europium doping", J. Appl. Phys. 123, pp.160901/1-12 (2018)
- 93) D. Denier van der Gon, Y. Fujiwara et al.: "Size dependence of quantum efficiency of red emission from GaN:Eu structures for application in micro-LEDs", Opt. Lett. 45, pp.3973-3976 (2020)
- 94) H. Sekiguchi et al.: "Emission color control from blue to red with nanocolumn diameter of InGaN/ GaN nanocolumn arrays grown on same substrate", Appl. Phys. Lett. 96, pp.231104/1-3 (2010)
- 95) K. Kishino et al.: "Two-dimensional multicolor (RGBY) integrated nanocolumn micro-LEDs as a fundamental technology of micro-LED display", Appl. Phys. Exp. 13, pp.014003/1-5 (2020)
- 96) 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)
- 97) Vital Sign Monitoring in Car Seats Based on Electrocardiography, Ballistocardiography and Seismocardiography: A Review, <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5699>
- 98) Unobtrusive Vital Sign Monitoring in Automotive Environments-A Review, <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/3080>
- 99) A Smart Health Monitoring Chair for Noninvasive Measurement of Biological Signals, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6078433>
- 100) A bioinspired flexible organic artificial afferent nerve, <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aao0098>
- 101) Skin-integrated wireless haptic interfaces for virtual and augmented reality, <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1687-0?ref=mainstream-dotcom/>
- 102) Disposable Sensors in Diagnostics, Food and Environmental Monitoring (check section 3.1), <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.201806739#adma201806739-bib-0006>
- 103) Nanomaterial-based devices for point-of-care diagnostic applications (check section 2.1 and Table 1), <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/CS/C7CS00837F>
- 104) https://sakura-school.jp/security/senior-smartwatch-ranking/#index_id4
- 105) Yongtaek Hong et al.: "Stretchable Hybrid Electronics for High Performance On-skin Electronics", FLX-WS, IDW'22 (2022)
- 106) 板生清ほか：「ウェアラブルデバイスの応用と近未来の展開」，エレクトロニクス実装学会誌，18，6（2015）



いしなべ たかひろ
石鍋 隆宏

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。



くどう ゆきひろ
工藤 幸寛

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，工学院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。



こむら しんいち
小村 真一

1987年，京都大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年，(株)日立製作所日立研究所入社。液晶ディスプレイの研究開発に従事。STN-LCD，PDLC，反射型/半透過型LCDのデバイス開発を担当。2006年，(株)日立ディスプレイズに異動。モバイル機器向け液晶ディスプレイ新技術開発を担当。2012年，(株)ジャパンディスプレイに転属。液晶ディスプレイの新技術開発を担当。博士(理学)。正会員。



おくむら はるひこ
奥村 治彦

1983年，早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年，(株)東芝入社。固体撮像装置(デジタルカメラ，ビデオカメラ)の高画質化技術，テレビ会議やテレビ電話の画像圧縮技術に関する研究開発を経て，1988年より，アクティブマトリックス型液晶表示装置の研究開発に従事。2002年，表示材料デバイスラボラトリ室長。2004年，ディスプレイ技術の研究主幹。2014年より，参事。2018年より，シニアフェローとなり，現在に至る。2012年より，千葉大客員教授。液晶ディスプレイの残像を大幅に低減するデファクトスタンダード技術であるオーバドライブ技術の発明に関して，2004年，SID Special Recognition Award受賞。2007年，市村産業賞貢献賞受賞。2009年文部科学大臣科学技術賞受賞，恩賜発明賞受賞。2006年より，IDW DESワークショップチェア，2012年，IDW実行委員長。2015年，IDW組織委員長。2017年～2018，SID日本支部長。2020年より，SID Japan Region VP，SID表彰委員会委員，SID Associate Editor。IEEEフェロー，SIDフェロー，IEICEフェロー。博士(工学)。当会フェロー認定会員。



はしもと けいすけ
橋本 圭介

1986年，金沢大学大学院工学研究科修了。同年，ソニー(株)入社。2004年，電子ペーパーを用いた世界初電子書籍端末Librieの開発・商品化。2011年，13.3インチフレキシブル電子ペーパー端末Sony Digital Paperの開発責任者。2011年，ソニー(株)にて，Distinguished Engineer取得。2013年，IDW '13 Best Paper Award受賞。2014年，E Ink corporationにCorporate Fellowとして入社。2016年～2021年，IDW EP WG Chair。2022年，SID FLX sub-committee Chair。2020年より，E Ink Holdings。正会員。



山北 裕文 やまきた ひろゆき 1988年、早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、松下電器産業(株)(現パナソニック(株))入社。中央研究所にて、フラットパネルディスプレイの研究に従事。以来、本社研究所にて、フラットCRT、LCD、PDP、有機ELディスプレイのデバイスシミュレーションおよびパネル高性能化に関する研究に従事。2015年より、(株)JOLED。正会員。



藤原 康文 ふじわら やすふみ 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)。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 ゆきはる 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。



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。



本村 玄一 もとむら げんいち 2006年、慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻修士課程修了。同年、NHK入局。松山放送局を経て、2008年より、同放送技術研究所。現在、放送技術研究所にて、フレキシブルディスプレイおよび量子ドットEL素子の研究に従事。正会員。



辻 博史 つじ ひろし 2005年、大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。同年、日本学術振興会特別研究員(PD)。2007年、大阪大学特任研究員。2011年、NHK入局。放送技術研究所にて、薄膜トランジスタ、フレキシブルディスプレイの研究開発に従事。現在、同研究所新機能デバイス研究部主任研究員。博士(工学)。正会員。



薄井 武順 うすい たけのぶ 2004年、東京工業大学大学院理工学研究科集積システム専攻修士課程修了。同年、NHK入局。大阪放送局を経て、2007年より、同放送技術研究所。現在、放送技術研究所にて、フレキシブルディスプレイの駆動・信号処理技術の研究に従事。博士(工学)。正会員。



続々・わかりやすいパターン認識 ～線形から非線形へ～

石井健一郎・前田英作 著

本書は、教師付き学習における非線形な識別処理を主テーマに、パターン認識・機械学習を解説したものです。タイトルに「続々」と記載されているように、本書は「わかりやすいパターン認識」(第1版1998年、第2版2019年)、「続・わかりやすいパターン認識」(2014年)に続く、シリーズ第3の書となっています。続々編ではありますが、本書だけでも独立して読めるよう工夫されています。教師付き学習を扱っている点では初版と同じですが、本書ではサポートベクトルマシン、カーネル法、畳み込みニューラルネットワークを取り上げ、それらの前段階として、一般化線形識別関数、ポテンシャル関数法を紹介しています。非線形な識別処理として重要な地位を占めているのが、深層学習の分野ですが、本書では、深層学習の中でも特に注目を集めている畳み込みニューラルネットワークに話題を絞って解説し

ています。

扱うテーマは基本的な項目に絞られていますが、それらを重点的かつ詳細に解説していますのでパターン認識・機械学習を初めて学ぶ方向けの入門書としてお勧めです。また、具体例、実験例を多く取り入れて記載されており、章末には演習問題も多数設けられていますので、手を動かしながら少しずつ丁寧に学べるように設計されています。

近年の機械学習技術への関心の高まりもあり、新しいアルゴリズムの解説記事がインターネット上にあふれています。また、ソースコードも公開されていることも多く、技術の習得は昔に比べて、はるかに容易になってきました。しかし、ソースコードをコピーしてプログラムをただ単に動かすことと、アルゴリズムを理解して自ら実装することは意味が異なるのではないのでしょうか。技術の進展が著しく速いだけに、それぞれの新しい技術の肝を正しく理解することは、むしろ大変になっています。だからこそ、基本をきちんと学ぶことと、歴史的な流れの中での各技術の位置づけをつかむことが大切だと思います。本書の大きな特長の一つとして、古典的な手法や技術が、どのようにして新しい技術の発案に結びついたのか、その経緯を辿って解説されています。本書から、今後新しい技術を生み出すヒントが得られるかもしれません。紹介 浜田宏一(帝京大)

オーム社刊(2022年11月28日発行)、A5判、304頁、定価:3,000円+税