

情報ディスプレイ技術の研究開発動向

藤崎好英^{†1}, 木村宗弘^{†2}, 石鍋隆宏^{†3}, 清水貴央^{†1}, 山北裕文^{†4}, 前田秀一^{†5},
奥村治彦^{†6}, 吉田茂人^{†7}, 都築俊満^{†1}, 長谷川拓哉^{†8}, 中村篤志^{†9}

1. まえがき

近年、情報ディスプレイ技術は大きく進展し応用範囲も格段に広がっており、日常生活のさまざまなシーンで欠くことのできない重要なツールとなっている。ディスプレイ技術で最大の国際会議 Display Week (SID) では、発表件数と参加者数が共に増加傾向にあり、ディスプレイのみならずITなどさまざまな業界から注目を集めている。家庭用テレビにおいては、2018年12月からの新4K/8K衛星放送開始に伴い、ディスプレイの大画面・高精細化が進んでいる。2018年9月にベルリンで開催されたIFA国際コンシューマエレクトロニクス展では、70～98インチサイズの大画面の4K/8Kディスプレイが国内外の複数メーカーから発表され話題を集めた。今後、4K/8K超高臨場感放送の普及により、没入感の高い表示システムが望まれる。将来的には、ディスプレイの大画面が進むと、軽量・柔軟で持ち運びに優れたフレキシブルディスプレイの重要性が増すと考えられる。画面サイズ・精細度に加え、ディスプレイの

高画質化も進んでいる。明暗の幅が広いHDR (High Dynamic Range: 高ダイナミックレンジ) 表示に向けたディスプレイの高輝度化や暗部・低階調の画質改善をはじめ、BT.2020 (Rec.2020) で規定された広色域表示を目指した色再現技術、量子ドットを使った波長変換や色純度の高い発光デバイスの研究も活発化している。デジタルサイネージ向けのディスプレイ技術も進展が著しい。低消費電力で視認性の優れた電子ペーパーや高輝度自発光の特徴を活かした発光ダイオード(LED)による大画面ディスプレイや曲面ディスプレイが生活空間に溶け込み、情報提示ツールとして大きな役割を担っている。

一方で、モバイル・携帯端末においても、高精細・高画質化、狭額縁化やインタフェースの多機能化など、技術の進展が著しい。ごく最近には、フォルダブルタイプのスマートフォンの製品化が海外メーカーから公表され話題を集めた。ディスプレイの応用範囲も飛躍的に広がっている。車載用ディスプレイの用途拡大やヘッドマウントディスプレイなどAR/VR端末への応用が注目を集めているのに加え、ヘルスケアやヒューマンセンシングなどウェアラブルデバイスの表示デバイスとして、フレキシブルディスプレイや伸縮性に富んだストレッチャブルディスプレイの研究開発が精力的に行われている。以上のように、表示方式そのものは従来の延長線上であるものの、アプリケーションの広がり新たな機能・付加価値の要求仕様により、ディスプレイ技術は大きく進展している。

本稿では、2016年～2018年の期間に発表、学会などで報告された情報ディスプレイ関連技術の内容をもとに、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、デバイス・材料技術は多岐にわたる。本稿では、まず、液晶や有機ELディスプレイ、電子ペーパー、フレキシブルディスプレイなど主なディスプレイ技術の開発動向・トレンドを概説したのち、AR/VR向けのディスプレイ技術、インタフェースやシステムの動向を紹介する。最後に、透明導電膜や蛍光体、量子ドットなど最新の材料・デバイス技術の開発動向についても紹介する。

(藤崎)

†1 NHK 放送技術研究所

†2 長岡技術科学大学

†3 東北大学

†4 株式会社 JOLED

†5 東海大学

†6 株式会社東芝

†7 シャープ株式会社

†8 高知大学

†9 静岡大学

"ITE Review 2019 Series (2): "Research Trend on Information Display Technology" by Yoshihide Fujisaki, Takahisa Shimizu, Toshimitsu Tsuzuki (Science & Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo), Munehiro Kimura (Department of Electrical, Electronics and Information Engineering, Nagaoka University of Technology, Nagaoka), Takahiro Ishinabe (Department of Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Sendai), Hiroyuki Yamakita (Kyoto Technology Development Center, JOLED Inc., Tokyo), Shuichi Maeda (Optical and Imaging Science & Technology, Tokai University, Hiratsuka), Haruhiko Okumura (Corporate Research & Development Center, Toshiba Corp., Kawasaki), Shigeto Yoshida (Telecommunication and Image Technology Laboratories, Corporate Research & Development Business Unit, Sharp Corporation, Nara), Takuya Hasegawa (Department of Marine Resources Science, Faculty of Agriculture and Marine Science, Kochi University, Kochi) and Atsushi Nakamura (Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University, Hamamatsu)

2. 液晶ディスプレイ

2.1 新規液晶材料

量産性に優れたラビング配向法による水平配向技術から、光配向をベースとした新技術への置換によって、液晶ディスプレイの更なる高精細化が実現された。注目されるのは、配向制御性の著しく向上したポリイミド (PI) 系光配向膜の新規材料の開発と、垂直配向モードにおいては「PIレス」配向技術の開花である。最近開発された IPS (In-Plane Switching) 向けポリイミド系配向膜においては膜の硬度が向上し、ラビング処理を施した場合でも高いコントラスト比が実現できている¹⁾。

垂直配向膜に求められるプロセス温度の低温化が進み、150℃焼成でも VHR (電圧保持率) 96% を達成するとともに、高いスループットと高透過率を実現した材料が発表された。モバイル用途では低誘電率かつ高屈折率な絶縁層を TFT (Thin-Film Transistor) アレイの上に敷くことによって開口率が 50% から 70% に改善できることが報告された²⁾。

垂直配向モードにおいてもプレティルト角制御およびマルチドメイン化技術は非常に重要であり、さまざまな技術が開発されてきた。2004年に、液晶に反応性メソゲンを予め添加し、液晶に適度なバイアス電圧を掛けながら配向制御しつつ UV 光を照射することでメソゲンを偏析・重合させ、基板近傍の液晶層自身に配向膜の機能を発現させる技術が発表されて以来³⁾、当該技術は著しく進歩した。特に、これまで液晶ディスプレイには必ず必要と考えられてきた配向膜を要しない「PIレス」方式においては、配向膜形成工程を省くことができるため、コストダウン・フレキシブル基板への適用だけでなく「ベゼルレス (狭額縁化)」という液晶ディスプレイの一つの夢を実現することが可能となった。垂直配向だけでなく、水平配向を実現できる材料も発表された⁴⁾。さらに、液晶に添加された反応性メソゲンとのナノ相分離 (NPS) 技術の進展により、基板界面だけではなく液晶配向のドメインウォールにもモノマーを偏析・重合させることで「高分子の壁 (すなわちセル厚方向の界面)」を形成することで、セル厚方向の界面とのアンカリング力から“配向復元力”を生み出すことで τ_{OFF} (緩和応答時間) を高速化する技術も発表された⁵⁾。IPSモードの高速化技術として発表された Short-range Lurch Control In-plane Switching (SLC-IPS) モードが NPS と異なるのは反応性モノマーを添加していないことで、SLC-IPSモードでは画素内の電界分布を制御することで液晶の配向が変化しない領域を作り、その仮想領域が界面アンカリングと同じ効果を生み出すことで τ_{OFF} を高速化している。15 Hz という低周波数駆動により消費電力を 60 Hz の場合と比べて 60% も減少させることができ、フリッカの発生も抑制できるモバイル向け LCD は今後の上市が期待される⁶⁾。In-Plane Super-Fast Response においては、Fringe-Field

Switching モードにおける上層側の電極形状をひし形にすることで、ひし形電極の対角線上の液晶分子は電界応答しなくなり、結果として仮想壁を形成する⁷⁾。この技法でも仮想壁の効果により階調間の応答速度は約 2 倍改善し、コントラスト比も 700:1 以上であることが報告された。いずれの方式も車載や VR 機器などへの実装を目指しており、今後の展開が期待される。(木村)

2.2 フレキシブル液晶ディスプレイ

柔軟なプラスチック基板を用いたフレキシブル液晶ディスプレイは、自動車等への応用に向けて、信頼性の向上と高画質化が進んだ。自動車では、特に Center Information Display (CID)、Cluster Display、Car Navigation Display 等への応用が期待されているが、ガラスを基板として用いた場合、湾曲半径が 100 mm 以下になると破損の問題が生じることから、小さい湾曲を実現するためのプラスチック基板材料の革新が重要となってきている。一般に、基板のガラス転移温度が 300 度であればアモルファスシリコン TFT が利用でき、低温ポリシリコン TFT であれば 400 度以上のガラス転移温度が求められる。このことから高い透過率、高いガラス転移温度を有する透明ポリイミドを基板としたフレキシブル液晶ディスプレイの開発が進んでいる。

しかし、一般に透明ポリイミドは線膨張係数 (CTE) が大きく、CTE と基板のリタデーション (R_{th}) はトレードオフの関係にある。このことから、基板のリタデーションを小さくすると支持板であるガラスとポリイミドとの間の残留応力により、高熱処理の後に基板が湾曲することが課題となっていた。この課題に対して、バリア層として用いる無機膜を利用して応力を制御することで、基板の湾曲を抑制できることが報告された⁸⁾。さらに、サブスペーサーを用いずにメインポストスペーサーのみを使用し、スペーサー密度を 1.4% とすることでセル厚の均一性を向上できることが報告された。試作したデバイスは、5.5 インチ、401 ppi、FHD 解像度、コントラスト比 1500:1、偏光板と位相差板を含めた液晶パネルの厚さは 190 μm 。また、フレキシブル液晶ディスプレイの実現に向けて、透明ポリイミド基板上にトップゲート型酸化物半導体 TFT を形成する技術が報告された。プロセス温度は 300 度以下でチャンネル長は 2 μm 、移動度は 3.83 cm^2/Vs が実現された⁹⁾。

また、透明ポリイミド基板上に 220 度の低温でアモルファスシリコン TFT を形成したフレキシブル液晶ディスプレイが報告された¹⁰⁾。ガラス基板上に 370 度で形成した場合と同等の性能が実現されている。試作したデバイスは、13.2 インチ、湾曲半径 R50、R800、R50 の組み合わせで AHVA (Advanced Hyper-Viewing Angle) 方式を採用した。解像度は、1440 × 1920 である。

一方、湾曲時における高画質化において、LCD は単一基板を用いる OLED や EPD と異なり、2 枚の基板を用いることから湾曲時の基板の変形により画素電極とカラーフィルタ

(CF)がずれる画素シフトが問題となっている。この問題を解決するため、CFとTFT基板の両方にポストスペーサを形成する技術が提案された¹¹⁾。それぞれの基板で3個のポストスペーサがジグザグ配置され、両基板を重ね合わせたときに噛み合い、横方向の基板のずれを抑制することができる。この構造により、15mmの湾曲時において、画素のずれを従来の66.5 μm から5 μm 以下に抑えることに成功した。

その他、有機TFTを用いたフレキシブルLCDの高性能化が進んだ。移動度1.5 cm^2/Vs が実現され、ガラス基板上に形成した一般的なアモルファスシリコンTFTよりも優れた特性が実現された。プロセス温度は100度以下で、12.1インチIPS-LCDが試作された^{12) 13)}。基板として厚さ40 μm のTACフィルムを用い、ガラスの支持板に貼り付けて作製後、加熱により剥離を行った。TACフィルムは、リタデーション(Rth)が10nm以下、ヘイズ値や着色がポリイミド基板よりも優れていることが特長である。デバイスの厚さは90 μm 、湾曲半径20mmで90度の湾曲が実現された。

2.3 反射型液晶ディスプレイ

液晶ディスプレイの機能性の向上に向けて、屋外における視認性の向上が注目された。これらはSunlight readable LCDと呼ばれ、反射型液晶ディスプレイや、液晶ディスプレイの表面反射を抑える技術が報告された。

デジタルサイネージへの応用に向けて、反射型液晶ディスプレイの屋外における色再現性の向上について報告があった¹⁴⁾。従来の反射型LCDではRGBWの多色カラーフィルタが用いられ、従来のRGBカラーフィルタと比べて反射率を向上できることが報告されている。しかし、黄色の色純度が充分でないことが応用に向けての課題となっていた。この課題を解決するため、白に代わって黄色のカラーフィルタを用いることで、色再現性の向上が可能であることが報告された。31.6インチ、FHD解像度を有する反射型液晶ディスプレイが開発された。液晶表示モードはノーマリーホワイトのTN-ECB方式、コントラスト比は40:1、色再現性は20%から35%に向上した。この他、SRAMを各画素に設けることで、画像データを保持し低電力化も達成された。各サブ画素は三つの領域に分割され、8階調の表示が可能であり、動画表示の改善に向けて誤差拡散デザリング法について報告があった¹⁵⁾。

散乱性液晶を用いたフルカラー反射型液晶ディスプレイが報告された¹⁶⁾。Surface Anchoring Liquid Crystal (SALC)方式と呼ばれ、電圧オフ時は散乱状態となり明状態を示し、電圧オン時(3.5V)は透過状態となり背面に配置された黒色板により吸収されることで黒状態を示す。偏光板、配向処理、バックライトが不要となることが特長である。RGBカラーフィルタと組み合わせ、6.9インチa-Si TFTを用いたディスプレイが開発された。また、厚さ10 μm のポリイミド基板を用いた試作機も報告された。ディスプレイの厚さは50 μm である。

反射型液晶ディスプレイの高画質化に向けた液晶表示モードについて報告があった。従来、反射型LCDの表示方式として、VA方式、MTN (Mixed TN)方式が用いられる。しかし、これらの方式は無彩色な白表示、高いコントラスト比、広い視野角の実現において課題を有していた。この課題を解決するため、捻れVA方式に着目し、その応答の高速化について検討が行われた¹⁷⁾。一般に、捻れVA方式は、電圧オン時に垂直配向から捻れ配向に変化するが、画素の端部から配向の変化が伝播することから、応答が遅いことが課題となっていた。この課題に対して、画素にすり鉢状の構造を設け、液晶を対称に傾斜させることで高速化が可能となり、高画質な表示が可能な反射型液晶ディスプレイを実現できることが報告された。

液晶ディスプレイの屋外での使用において、周囲光の光反射は表示画像のコントラスト比を低減することから課題となっている。一般に、偏光板の表面における反射率は4.0%、液晶パネル内部における光反射率は1.7%であり、この光反射を抑えるため、反射防止膜を用いるとともに射出側の偏光板を円偏光板とすることで、表面と内部の反射率をそれぞれ0.2%、0.1%まで低減できることが報告された¹⁸⁾。入射側の偏光板は、従来と同様の直線偏光板を用いており、液晶パネルの構造を工夫することで透過率、視野角特性は従来と同等の性能が得られることが示された。12.3インチの試作機が実現され、20,000 luxの環境下におけるコントラスト比は従来の14倍となる42:1が実現された。

また、展示会ではフロントライトを用いた反射型ディスプレイが展示された。従来構造と異なり、フロントライトは導光板と液晶パネルとの間に空気層がないことが望まれており、この構造によりコントラスト比を向上することができる。実用化に向けて、光利用効率と均一性の向上が期待される。このほか、ウェアラブルデバイスに向けた半透過型液晶ディスプレイのサンプルが各パネルメーカより展示された。今後の更なる高画質化と広い用途への普及が期待される。

(石鍋)

3. 有機ELディスプレイ

3.1 発光材料

2018年国際会議Display Week (SID)の有機EL (OLED)材料のセッションでは、青色材料の性能向上についての発表が多くなされた。青色材料は、色純度、寿命もある程度の高性能な材料が量産され、スマートフォンやテレビとして実用化されている。しかし、青色材料は蛍光発光のためリン光材料を用いた赤色や緑色のデバイスと比べると効率が低く、向上が求められている。高効率化を進める方向としてリン光発光材料を利用する方法と、近年開発が進んでいる熱活性化遅延蛍光(TADF)材料を用いる方法が模索されている。リン光青色材料の報告は近年少ないが、TADFの青色の報告は飛躍的に増えてきている。例えば、

CIEy=0.15という色純度の高いTADF材料を用いて、外部量子効率15%という高い効率が2018年SIDで報告された¹⁹⁾。これまで、TADF材料を発光材料として用いると原理的に高色純度化が難しいとされてきたが、比較的高い色純度の青色も得られることが実証された。ただし、寿命は700 nitsでLT97(輝度3%減衰)が10時間程度であり、まだ改善の余地がある。さらに、色度(0.14, 0.07)、PL量子収率90%以上、外部量子効率21%以上の高効率・高色純度の青色TADF発光材料も報告された。しかし、駆動寿命については言及されていない²⁰⁾。

一方、すでに実用化されている青色蛍光材料の高性能化も進められている。発光材料を配向させることで効率を高め、さらに光学設計による膜厚の最適化で色純度を高めることで、CIEy=0.043、LT95(輝度5%減衰)が650時間(10mA/cm²時)という極めて高色純度で実用レベルの長寿命な青色蛍光材料が報告された²¹⁾。

3.2 高色純度化技術

3.1節で述べた青色や、赤色のOLED材料の色純度については、すでにある程度の高色純度材料が実用化されている。しかし、BT.2020(Rec.2020)で規定される広色域を実現する緑色の高色純度OLED材料の見通しはまだ立っていない。緑色の高色純度化は、色域の拡張により再現領域を広げる効果が高いため開発が強く求められている。高色純度化の開発の方向性として大きく二つある。すでに高効率・長寿命なOLEDの色純度を向上させる方法と、高色純度化しやすい量子ドットの効率・寿命を向上させる方法がある。

まず、緑色OLEDの高色純度化技術について述べる。発光色素の設計として、振動構造の少ない剛直な縮環構造で形成される材料や、同様に剛直な縮環構造のリガンドを有するリン光発光材料などは材料の振動構造が制限される。したがって、スペクトルのブロード化が抑えられるため発光色の高色純度化が可能であり、それらの材料を用いた高色純度デバイスの研究が進められた²²⁾。

次に、量子ドットを用いたLED(QLED)の開発状況について述べる。デバイス構造はOLEDとほぼ同じであるため、学会報告もOLEDのセッションで取り上げられる場合が多い。近年では、SIDやIDWなどディスプレイの国際会議において、ワークショップ化までは至っていないが特別セッションとして取り上げられるケースが増えている。特筆すべきは、Pbを用いたペロブスカイト量子ドットを用いたデバイスの効率がOLEDに匹敵する高い効率となってきたことであり、色純度、安定性、コストの面でこれまでのカドミウム系量子ドットを上回る大きな期待が持たれている。2018年SIDでは、CH(NH₂)₂、PbBr₃系のペロブスカイトを用いた量子井戸構造を用いて、色度(0.168, 0.773)のBT.2020で求められる数値をほぼ実現するとともに、PL量子収率95%以上、外部量子効率5%以上、電流効率21cd/Aの高い性能が報告された²³⁾。また、PbBr_x系のペロブスカ

イトの3次元構造に、一部2次元構造の結晶を混合することで大幅に効率が向上することが示され、外部量子効率14%以上の緑色デバイスが報告された²⁴⁾。さらに、CsPbBr₃系ペロブスカイト表面のリガンドを、一部ZnBr₂、MnBr₂、GaBr₂、InBr₂に置き換えることで発光中心への電荷注入性が向上し、発光効率が大幅に高くなる。特に、ZnBr₂を用いた場合には、外部量子効率16%を得たと報告された²⁵⁾。また、赤色ではあるがCsPbBr₃の構造の一部を、液中で置換し高品質のCsPb(Br/I)₃とすることで21.3%の外部量子効率が得られたとの報告もなされた²⁶⁾。これはOLEDの効率に匹敵する高い効率であり、今後のペロブスカイト量子ドットを用いたLEDの発展に大きく寄与するものと思われる。

3.3 光取り出し効率向上

新たな光取り出し向上技術として、電極近辺の電荷注入材料に屈折率の小さい材料を用いることで、デバイス内部に閉じ込められる光を減らし、発光効率を高める技術が報告された。電極近辺の有機材料に金属酸化物を混合することで電荷注入性を高めるとともに、屈折率を低減する材料を混合することで、従来の注入層の屈折率1.85に対し、屈折率を1.58まで低減することに成功した。これにより黄色リン光デバイスで、41%の極めて高い外部量子効率を実現した²⁷⁾。

3.4 大気安定性向上技術

近年、スマートフォンや大型OLEDテレビなどへのフレキシブルOLEDへの期待が高まっている中で、歩留まり向上や封止部材の低コスト化に寄与する大気安定な逆構造OLEDの開発が進んでいる。2018年SIDでは、水蒸気透過率WVTR=1.7×10⁻⁴g/m²/dayのバリア性能の低いフィルムを封止に用いて逆構造OLEDの大気安定性が評価された。リファレンスとして用いられている通常構造OLEDでは、作製直後より非発光部が拡大し輝度の低下も見られるのに対し、逆構造OLEDでは連続点灯中の非発光部の発生はなく、連続点灯寿命3000時間以上(600cd/m²)の緑色逆構造OLEDと、赤色逆構造OLED(200cd/m²)が得られている²⁸⁾²⁹⁾。本技術はn型半導体を用いたTFTと相性が良く、焼きつきの低減にも効果があるため、OLEDディスプレイのフレキシブル化、長寿命化、低コスト化が期待できる。(清水)

3.5 パネルモジュール技術

ここ数年で有機EL(OLED)ディスプレイの適用範囲は大いに拡大し、従来から開発されてきた大画面テレビやスマートフォンへの製品導入が進んだ。主として、前者は白色発光層蒸着+カラーフィルタ方式、後者はRGB発光層蒸着方式で製造されている。

これらに対して、多様な画面サイズへの展開が容易で、材料利用効率のよい印刷によるRGB塗り分け方式の研究開発が進められてきた。2017年末には、量産技術の確立と生産性の向上を実現し、RGB印刷方式としては世界初の製品

出荷が発表された³⁰⁾。製品化された21.6型4Kディスプレイ(精細度204 ppi)は、発光効率の良好なRGB印刷EL層、RGB発光をシャープにして色純度を向上させるマイクロキャビティ構造、光取り出し効率が高いトップエミッション構造を採用している³¹⁾。このような中型サイズのOLEDは、軽量薄型に加え、低階調での色再現性や高速応答といった性能を生かし、さまざまな分野への適用が期待されている。2018年のSID国際会議では、より高精細な印刷技術を目指したインクジェットや新規印刷技術の報告があった。正孔注入層のみであるが、RGB画素毎に異なる膜厚をインクジェットで形成し413ppiの5型パネルで実証している³²⁾。

テレビに関しては、77型4Kが発売され、CES2018では88型8Kが公開されるなど大画面化が進み、さらなる信頼性向上と画質向上に向けて、新規酸化物TFT構造やTFTの閾値電圧(Vth)補償や輝度、色むら補正方式が継続して開発されている³³⁾。また、BT.2020規格に対応するように色域が拡大することを目的とした深い青色を生成できる発光材料の開発³⁴⁾や、HDR規格対応のための高輝度化とそれに耐え得る寿命向上を目的としたTFT、画素回路、およびOLED構造の開発も進んでいる³⁵⁾。

一方、小型OLEDの高精細化も着実に進歩した。HMDやAR/VR用のマイクロディスプレイでは、RGB蒸着方式で2.43型1200ppiのデモ機が公開された他、白色OLED方式で4.3型UHD(3840×4800, 1443ppi)³⁶⁾や、バックプレーンにシリコン基板を使用した0.5型UXGA(1600×1200, 4032ppi)の超高精細OLEDが報告された³⁷⁾。後者はカラーフィルタをシリコン基板上に直接形成したもので、発光層との距離を縮め、カラーフィルタの色配置を工夫し、またTFTのレイアウトや補正回路によって、画素ピッチの縮小による画質の低下と視野角特性の悪化の問題も改善されている。

3.6 フレキシブル有機ELディスプレイ

OLEDの用途として大きく期待されているのは、フレキシブル化、フォルダブル化である。2018年のSID国際会議でも関連発表が多くなされるとともに、自由曲面への使用が期待される車載用フレキシブルやスマートフォン用フォルダブルタイプなど多数のデモ品が展示された。フォルダブルタイプは、折り畳みタイプのスマートフォンを想定し、タッチセンサや指紋認証も付加され、曲率半径5mm以下での繰り返し曲げ試験での信頼性確認も実施されるなど、実用化に近いことを印象づけるものであった。

大型のフレキシブルでは、77型4Kでフレキシブルと透明化を両立させたタイプが、曲回転半径80mmの曲げ試験でも問題ないことをデモ展示し注目を集めた³⁸⁾。これは白色発光層蒸着+カラーフィルタ方式で、RGBWに透明領域を加えた画素構成とし平均透過率は平均40%である。基板構成は上下共にポリイミド+保護フィルムの構成であり、ポリイミドとキャリヤガラスの間にa-Si犠牲層を設け、レー

ザリフトオフを最適化することでTFT性能劣化や欠陥の低減を実現している。また、CES2018では、65型4Kのローラブル(巻き取り式)のデモ機も展示された。

長寿命化のためのバリア層や基板構成など、フレキシブル用の要素技術に関する研究も盛んに行われている。可撓性と信頼性を両立させるという課題に対して、350℃のバックプレーン処理に適合する薄膜バリア層構造が開発され、さまざまな半径で10,000回の曲げ試験後に60℃90%高温高湿試験をした結果、半径0.5mmまでの曲げに耐えるフォルダブルOLED試作の報告があった³⁹⁾。これは青色単色の小型セルでの検証結果ではあるが、ローラブル化を実現するための要素技術として期待される。

2018年になって複数のパネルメーカーのOLEDがスマートフォンに採用され、また、フォルダブルタイプのOLEDがスマートフォンに採用される予定という発表もされている。10年以上前に構想されたOLEDの特徴を生かした商品コンセプトが、少しずつ製品として具現化されてきた。今後、さらに高信頼性で低コストの材料デバイス、パネル製造技術を確立することによって、OLEDがより広範囲の画面サイズ、用途に拡大することが期待される。(山北)

4. 薄膜トランジスタ、駆動技術

ディスプレイサイズの大形化、4K/8Kなど高精細化に伴い、高速駆動の薄膜トランジスタ(TFT)のニーズが高まっている。現在量産に適用されている酸化半導体IGZOをベースとしたTFTの性能・信頼性向上に加え、Alを添加したInSnZnOやZnONなど移動度 $30\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上をターゲットとした高移動度TFTの開発が進んだ⁴⁰⁾⁴¹⁾。酸化物TFTの問題点として、半導体膜中の水素や酸素欠陥による長時間駆動時の特性変動・劣化がある。酸化半導体のアニール条件、パッシベーション膜やゲート絶縁膜の最適化によりTFTの信頼性を改善する技術が報告された⁴²⁾。TFTの構造については、ソース/ドレインとゲート電極間の寄生容量を大幅に低減でき、ディスプレイの高精細化、低遅延・高速駆動に有利なセルフアライン型のトップゲート構造TFTの開発が進んだ⁴³⁾。トップゲート電極をマスクとしてアルミナをスパッタリング形成し、酸化半導体の低抵抗性を選択的に維持してソース/ドレイン領域をセルフアライン形成する方法により、低寄生容量で高信頼性のTFTが実現されている⁴⁴⁾。狭ベゼルと低消費電力の両立に向けて、ゲートドライバ回路に低温ポリシリコン(LPTS)を、画素駆動に酸化物TFTを夫々適用したハイブリッドタイプのTFT技術も報告された⁴⁵⁾。移動度が高いLPTSは回路面積縮小によるディスプレイの狭ベゼル化に有効である。一方、酸化物TFTはLPTSに比べて移動度が1/10程度と低いが、リーク電流が極めて少ないため、低フレームレート駆動による消費電力の低減に有効である。

一方、これまで中・小型ディスプレイで主流となってい

たLTPSにおいては、AR/VR用向けの超高精細ディスプレイ向け技術が報告された⁴⁶⁾。

TFTプロセスの簡易化・低コスト化に向けて塗布形成のTFTについても開発が進んだ。スロットダイコートを用いて塗布型酸化半導体を形成し、移動度 $7\text{cm}^2/\text{Vs}$ のTFTバックプレーンおよびQVGAのOLEDパネルが試作された⁴⁷⁾。

(藤崎)

5. 電子ペーパー

直近の2～3年という前に、まず、この15年の電子ペーパーの動向について俯瞰してみたい。15年くらい前は、さまざま電子ペーパーの方式が提案された群雄割拠の時代であった。しかしその後、独自の方式を持ちながらも電子ペーパー開発から撤退する企業が相次いだ。10年くらい前からは徐々に電気泳動方式に集約され、(エレクトロクロミック方式等の一部を除いて)電気泳動方式に天下統一された感がある。実際、5年くらい前の学会発表からは、新規な方式に関する発表はほとんどなく、電気泳動方式を中心とした課題(フレキシブル化、動画対応、カラー化など)に関するものか、応用分野に関するものに占められるようになっていった。

本題である直近の2～3年の電子ペーパーの動向について、「(電気泳動方式を中心とした)応用分野の広がり」と「新規な表示方式の登場」に分けて考えて行きたい。

まず、「応用分野の広がり」についてである。「読む」ための機能を磨きながら進化していった電気泳動方式の電子ペーパーであるが、昨今では、タッチパネル、電磁誘導型ペンライティング技術などの付加により、「書く」ためのデバイス⁴⁸⁾としての進化が著しい。電子ノート端末としての普及が進んでいる。また、カラー化、低温での動作範囲拡大に伴い、店舗での電子値札といった小画面サイズでの応用展開が加速している。フレキシブル化技術の進化により、バックプレーンをガラスから壊れにくいプラスチックに代えることができるようになったことを生かし、空港ではキャリアバックのバーゴード等タグを電子化することも進められている⁴⁸⁾。

一方で、大画面については、屋外広告、屋外時刻表等のサイネージ的な使い方が進んできている⁴⁸⁾。これは、電子ペーパーの特徴である高視野角、直射日光下での視認性、書換え時以外には電気エネルギーを必要としないメモリー性などを生かした用途と言えよう。電子ペーパーの大型化の方法については、電子タイルと呼ばれるモジュールを表示単位として用意し、陶器タイルのように任意の枚数を壁面に貼り付けることにより任意のサイズの壁面表示を実現する方法が提案されている。実際、米国のサンディエゴでは、壁面に約2000枚の太陽電池付き電子ペーパー表示パネルを備えた建築物がすでに存在している。この建築物に平行して隣接する街路樹に取りつけたコントローラーから、

電子ペーパーパネルを無線制御して、全体の外観を可変化するものである。

さらに、時計型、眼鏡型等のウェアラブルデバイスとしての展開も進んでいる⁴⁸⁾。ウェアラブルへの対応としてはフレキシブルだけでなくストレッチャブルも必要であり、この分野の技術の進展が、電子ペーパーの応用分野の広がりのためにも期待されている。

次に、「新規な表示方式の登場」についてである。ここで紹介する技術は、まさに「登場」したばかりなので、今回は簡単に列挙するにとどめたい。注目すべき一つは、再帰性反射特性を持たせた透明層の裏側に電気泳動粒子の層を配置し、透明層裏面に泳動粒子が付着した状態では外光を吸収し、透明層から泳動粒子が離れた状態では外光を反射する方式である⁴⁹⁾。もう一つは高分子フィルムに金属膜を付着した箔を、1画素毎に静電気力で屈伸/収納させる方法である⁵⁰⁾。それ以外にも、表面プラズモン共鳴現象を利用した反射型表示装置⁵¹⁾、低電圧で駆動する散乱型液晶を利用したもの⁵²⁾等もある。いずれも、今後の動向に注目していきたい技術である。

(前田)

6. AR/VR用ディスプレイ

6.1 ヘッドアップディスプレイ(HUD)

近年、AI技術による自動運転システムが進展しているが、完全自動になるまでは、ドライバによる最終判断が求められるため、HUDによるナビや注意喚起など新たなインタフェース技術の拡張現実ヘッドアップディスプレイ(AR-HUD)の重要性が増すと予想されている⁵³⁾。自動車用HUDのハード関連で最も問題となる広視野とHUDサイズとのトレードオフを解消するために、ウインドシールドに光学的なパワーを持たせる新たな光学系として、ホログラフィック光学系⁵⁴⁾やフレネル光学系⁵⁵⁾が提案されている。

また、自動車以外でも、CESなどの展示会で複数の企業からバイク用HUDの試作機が展示されているが、さまざまなスペックを決めるために、広視野多面プロジェクタとバイクの試作機で構成されるシミュレーターを開発して、表示タイミングや位置などを決定して実環境で検証する取り組みも見られた⁵⁶⁾。

今後、さらなるパーソナルモビリティ市場全体へHUD技術が広がっていくことを期待したい。

6.2 ヘッドマウントディスプレイ(HMD)

HMDは、ハードが低コストで入手できるようになったことから、ゲーム市場を中心にVR用やAR用として市場が少しずつ広がっているが、まだまだ、性能は不十分であり、100度以上の広い視野と小型化を両立させることや、どの位置にでも奥行き感を自由に精度良く表示できる奥行き表示技術を改善していく必要がある。

AR/VRに対する取り組みとしては、VRプラットフォーム、VR用描画アプリや位置トラッキング技術などのシス

テム技術に加え、ディスプレイデバイスへの要望として、「Scale」と「Visual Quality」が挙げられている。

Scale, つまり広い視界を確保するためには、首を振ったときに表示が遅延なく追従することが重要である。そのためには、中間調を含めて液晶の応答を6ms以下にするオーバドライブなどの駆動技術を含めた高速応答液晶技術やバックライトを間欠駆動させることで、動画ボヤケを低減する必要がある⁵⁷⁾。また、Visual Quality, つまり広い視野を高精細に表示するためには、解像度を今以上に増やす必要がある。解像度が「現在の10倍以上。片目当たり2,000万画素必要」であることが提示されており、4.3インチ1,800万画素の有機ELディスプレイの開発が報告されている⁵⁸⁾。その際、システムの課題となる高速伝送手法として、画面全体の一部だけを高精細にするレンダリング処理についても検討されている⁵⁷⁾。このように、今後、VR技術を進化させるためには、デバイスからシステムまで総合的に検討することがますます重要になってくる。

また、HMD型AR/VRディスプレイの最大の課題である、輻輳、焦点のコンフリクトの課題を解決するために、視線に応じて焦点を動かすVariFocal方式が提案されており、レンズの焦点を機械的、光学的に動かす手法やマルチにフォーカスポイントを置く方式について有効性の検証が報告されている⁵⁹⁾。

また、奥行き感を実現するための最終的な理想形として、レーザホログラムタイプの3Dディスプレイがあるが、少なくとも1桁以上細かい画素ピッチが必要になる。その際、もっとも問題となる画素間のクロストークと0次回折光を低減するために、画素ごとに壁を設ける構造と新規0次回折光低減光学系が提案されている⁶⁰⁾。

今後、ますます、AR/VR技術を進化させ、市場を拡大させるためには、システムとデバイスの融合、横連携が重要になってくる。そのような融合により、新たな革新的な技術が創造されることを期待したい。(奥村)

7. マイクロLED

近年、AR/VR用の超小型高精細ディスプレイやパブリックビューイング・サイネージ用の大画面高画質ディスプレイ技術として注目されている。マイクロLEDはOLEDと同じく自発光素子であるが、高輝度・高コントラストで色純度も高く、寿命が長い、応答速度が速いなど多くの利点を有している。前述した高精細・大画面ディスプレイへの応用を目指してLEDと駆動バックプレーンとのインテグレーションプロセス手法の開発が進められた。

プロセス手法としては、マイクロLEDアレイを駆動用のSiバックプレーンと接合する手法や、ウェハーからマイクロLEDを分離してTFTバックプレーンに転写する手法が知られている。シリコンバックプレーンと組み合わせると、サブピクセルサイズが $2.6\mu\text{m} \times 7.8\mu\text{m}$ で0.5インチサイズ

の高精細マイクロOLEDが試作された。マイクロOLEDでは輝度ばらつきの抑制が課題となっているが、微細な素子のため放出電流が小さく外部補償回路の適用が難しい。MOSFETの内部補償回路により、ばらつきを改善する技術が報告された⁶¹⁾。ウェーハスケールで化合物半導体層とSi ICを集積化するプロセス技術も報告され、 1270ppi , $5 \times 105\text{cd/m}^2$ を超える輝度のマイクロLEDディスプレイが紹介された⁶²⁾。

一方、情報サイネージやパブリックビューイング向けにマイクロLEDを用いた大型ディスプレイが展示・報告された。モジュール式を採用し、8K画素(7680×4320)に対応した440型のディスプレイシステムも展示された。(藤崎)

8. インタフェース技術

2018年12月1日より新4K/8K衛星放送がスタートし、次世代の高精細映像を容易に視聴することができる環境がよいよ整ってきた。それに伴い、4K/8K高精細映像を取り扱うためのインタフェース技術についても整備が進んできている。本章では、特にこの1、2年で規格化および製品化された代表的な高精細映像対応インタフェース技術を紹介する。

8.1 HDMI[®]2.1

テレビを中心に広く利用されているHDMI[®]において、HDMI[®] forumが2017年11月に正式にリリースした「HDMI[®]2.1」は⁶³⁾、従来のHDMI[®]2.0のアダプタ形状と共通にしながらも、伝送帯域幅を従来HDMI[®]2.0の18Gbpsから48Gbpsに拡大することで、8K60Pあるいは4K120Pを一本で伝送できる仕様になっている。また色空間の仕様においても、従来のHDMI[®]2.0においては4KのYCbCr4:2:0およびYCbCr4:2:2までの対応であったが、HDMI[®]2.1は4K/8KいずれもRGB, YCbCr4:2:0, 4:2:2, 4:4:4の10/12bit信号まで対応しており、ITU-R BT.2020に準拠する仕様になっている⁶⁴⁾。

さらに各シーン/フレームごとに画像を最適化した動的HDRにもサポートしている。従来の静的HDRにおいては、一つのコンテンツ/プログラムに用意されている固定メタデータの単一画像記述子を使用して表示するため、例えば、明るいシーンと暗いシーンが折り混ざったコンテンツの場合、それぞれに応じた最適なHDR表現が難しかったが、本仕様追加によって映像表現の幅が広がったと言える。

HDMI[®]2.1の仕様としては、上記の他にも、主にゲーム機などで求められるフレームレートを可変させるVariable Refresh Rate (VRR) 機能や自動的にフレーム遅延量を最小化するAuto Low Latency Mode (ALLM) 機能などが盛り込まれているのも特徴と言える。

8.2 Display Port[™] 1.4a

PCを中心にさまざまなアプリケーションに展開されているDisplay Port[™]においても、先日、新しい規格が公開され

ている。VESA (Video Electronics Standards Association) が2018年4月に公開したDisplay Port™ 1.4a⁶⁵⁾には、新たに「DP8K」と銘打ったケーブルの仕様も盛り込まれている。この「DP8K」はHBR3 (High Bit Rate 3) と呼ばれる仕様に準拠しており、具体的には、1レーン当たり8.1 Gbpsの転送レートを有し、一部のオーバヘッドを差し引いても、4レーンで25.92 Gbpsの転送レートが可能となっている。

さらにDisplay Port™ 1.4aの大きな特徴としてUSB-Type Cとの互換性についても盛り込まれている。例えば、上記4レーンのうち、2レーンで4K-60Pを伝送し、残りの2レーンでUSB-Type Cでの高速データ伝送といった自由度の高い使い方もカバーされている。

上記、HDMI® 2.1およびDisplay Port™ 1.4aいずれにおいても大幅に仕様が追加できるようになった背景にはVESAが2017年1月に公開しているDSC1.2a (Display Stream Compression)⁶⁶⁾を適用している要素が大きい。このDSC1.2aはVisually Losslessの圧縮原理であり、また低遅延であることも特徴の一つである。

これまで、8Kモニターや8Kテレビに対しては、複数本の信号ケーブルで伝送することが必要であったが、HDMI® 2.1, Display Port™ 1.4aの規格により、いずれも8K映像を1本のケーブルで伝送することが可能となり、一般ユーザがより導入しやすい環境になったと言える。

8.3 V-by-One® US

以上は、高解像度ディスプレイと信号源とを接続するインタフェースの紹介であったが、一方、高解像度ディスプレイ内部インタフェースに目を向けると、ザインエレクトロニクス社が2018年9月より評価サンプル出荷を開始した4K, 8K映像向け次世代高速インタフェース「V-by-One® US」⁶⁷⁾に注目が集まっている。すでに多くの4Kテレビの内部インタフェースに使用されている「V-by-One® HS」はデファクトスタンダードとして浸透しているが、V-by-One® HSの場合、伝送速度が4 Gbpsである。例えば、8K60 Hzの映像を内部伝送する場合、ケーブルの本数は32対必要となる。しかし今回開発されたV-by-One® USは、該社独自の高速伝送技術により、伝送速度が前述の約4倍の16 Gbpsとなっているので、8K60 Hzの映像を内部伝送する場合、8対で対応可能となる(ディスプレイの仕様によってケーブル本数が前後する可能性あり)。薄型軽量化を問われるディスプレイにとって、内部配線が大幅に削減できることは非常に魅力的な技術である。上記の通り、該社より評価用サンプルの出荷も始まっていることから、今後、高解像度モニターやテレビはじめ多くのアプリケーションに数多く採用される可能性がある。

以上、特にこの数年で規格化、製品化された代表的なインタフェース技術を紹介したが、いずれにも共通して言えることは、高速伝送に伴うノイズ問題に対し、デバイスメーカ、コネクタメーカ、ケーブルメーカからと連携し、相乗的に高い

パフォーマンスでそれらを対策されていることが挙げられる。各社のたゆまぬ努力の下に、これら高速伝送インタフェースが実現されていることを忘れてはならない。(吉田)

9. 最新のトピック

9.1 量子ドット

ディスプレイの広色域化を実現するための技術として量子ドット材料技術が注目を集めている。量子ドット材料は、ナノスケールの半導体微粒子であり、粒径制御により、バンドギャップが変化する特徴を有している⁶⁸⁾。粒径が大きくなると発光スペクトルが長波長シフト、小さくなると短波長シフトする。粒子全体の粒径ばらつきを小さくすることで発光スペクトルを先鋭化でき高色純度発光が得られる。例えば、粒径ばらつきを抑えたCdSやCdSeの量子ドット材料は半値全幅が30 nm以下の高色純度発光を示す。しかしながら、これらの材料は有毒なCdを含んでいるという問題があるため、環境法規への対応としてCdフリー量子ドット材料の研究が行われている。量子ドット材料のディスプレイへの応用例として、量子ドットをバックライトユニットに導入したLCDがある。このLCDでは、青色LEDと、緑・赤色に発光する量子ドットのフォトルミネッセンス(青色LEDで励起)との組み合わせによりバックライト用白色光を生成し、カラーフィルタ(CF)で色分けしてRGBサブ画素を形成する。最近では、緑・赤色に発光する量子ドット材料をLCDのサブ画素に配置して、青色LED光を直接、緑・赤色光へ色変換する方式も検討されている⁶⁹⁾。この色変換方式は、白色光を生成してから色分けする方式よりも光利用効率が高い利点がある。また、LCDとは別に、量子ドット材料のエレクトロルミネッセンスを利用した自発光型EL素子(QD-LED)の研究も行われている。量子ドット発光層は塗布により製膜するが、将来的に電荷輸送層を含むすべての層を塗布製膜することで広色域の大画面ディスプレイを実現できる可能性がある。Cd系材料を用いたQD-LEDで、20%を超える外部量子効率を得られた報告例がある⁷⁰⁾。CdフリーのQD-LEDについては、InPを用いたQD-LEDの報告例がある⁷¹⁾、Cd系材料を用いた素子に比較して、色純度、発光効率ともに低くとどまっている。最近、極めて高い色純度の発光が得られるペロブスカイト材料を用いたEL素子の研究も進展している^{72) 73)}。材料合成法、成膜法、素子構造の改善により、この2、3年で発光効率が著しく向上し、ハロゲン化金属ペロブスカイト材料CsPbBr₃を用いた緑色EL素子、CsPbBr₃の臭素の一部をヨウ素で置換したCsPb(Br/I)₃を用いた赤色EL素子で、それぞれ20%を超える外部量子効率を得られたという報告例がある。(都築)

9.2 蛍光体

液晶ディスプレイに用いられる波長変換材として、無機系蛍光体が最も広く利用されている。最近では青色LEDの

低価格化に伴い、ほとんどの液晶ディスプレイには青色LEDが励起源として用いられる。したがって、青色光にตอบสนองする蛍光体材料が用いられる。バックライト用蛍光体には、そのナローバンドの発光スペクトルが求められることから、酸窒化物系 (β -SiAlON:Eu²⁺) が盛んに研究されてきたが⁷⁴⁾、最近では、高効率な緑色発光を示すアルカリハライド系 (Cs₄PbBr₆) 材料も急速に研究されている⁷⁵⁾。また、A₄SiO₄:Eu²⁺ (A: アルカリ金属) といったEu²⁺添加ケイ酸塩系 (A₄SiO₄:Eu²⁺) も盛んに研究されている⁷⁶⁾。

一方、赤色材料については、そもそも青色光にตอบสนองする材料自体が少ない。照明用として広く知られているCASN (CaAlSiN₃:Eu²⁺) 蛍光体では、その発光スペクトルが幅広く、照明用途にはあまり向かない。これに対して、それを満足する赤色材料として、Mn⁴⁺を発光イオンとするフッ化物蛍光体が大きな期待を受けている。とりわけ、K₂MF₆ (M = Si, Ge, Ti) で表された母結晶に、Mn⁴⁺が取り込まれることで、青色LEDにตอบสนองしながらも、高輝度かつ高い色再現性を持つ赤色が得られる^{77) 78)}。しかし、この材料の欠点の一つに、化学的安定性が乏しいことが挙げられ、大気中の水分により輝度が劣化する。この問題に対して、疎水基を有する表面被覆処理によって飛躍的に耐水性の向上がなされてきている^{79) 80)}。また、そうしたフッ化物材料の合成には、高い腐食性・毒性を持つフッ酸中での反応が必要不可欠となっており、大量生産に対して課題となっている。フッ酸中での反応が不可欠となっている背景には、Mn⁴⁺の原料となるK₂MnF₆の生成条件が非常にシビアで、フッ酸のようなフッ化物イオンが過剰にある環境でのみ合成が可能である、ということが挙げられている^{81) 82)}。最近では、水溶性Mn⁴⁺イオンを原料として用いることでフッ酸フリー合成に成功している研究例はあるものの^{81) 83)}、その発光輝度はまだまだ低く、フッ酸を用いない合成方法の開発がより一層の注目を浴びるだろう。(長谷川)

9.3 透明導電膜

透明導電膜(TCF)は可視光に対して透明で導電性があり、現在のディスプレイをはじめとするオプトエレクトロニクス分野によって重要な材料の一つである。透明導電膜自体は古くから研究開発がなされているが、新規ディスプレイの要請に伴い材料系・製造方法の革新的進展が求められている。これまでの透明導電膜は真空プロセスによって製膜した透明導電性酸化物(TCOs)薄膜が中心であったが、フレキシブルディスプレイ、曲面ディスプレイ、ウェアラブルディスプレイ等が今後の牽引するアプリケーションとして期待されている背景において、液晶(LCD)、有機EL(OLED)、量子ドット(QDs)材料に適した成膜材料の探索、成膜工程・方法への関心が高い。

導電材料の内訳ではITOのシェアが90%以上という現状であるが、ITO原材料の中でインジウムに課題があり、希少金属であること、原料の産出国に偏りがあること、高価

で価格変動が大きいことなどの問題点がある。さらにITOは金属酸化物のため、曲げる・伸ばす・曲面加工が難しいなどの欠点を持っており、代替材料の開発が続けられている。ITOと置き換えうる材料として研究されている候補としては、以下があげられる：

- (1) 希少金属以外の材料系として酸化亜塩系 (Al, Ga ドープ)、酸化スズ系 (F, Sb ドープ)、酸化チタン系が研究されている。しかしながら金属酸化物であり、低抵抗/高透過率の性能 (FOM) がITOに及んでいない現状である。スパッタITOの課題である可撓性を改善するため、塗布型ITOの利用が検討されている。ITO分散インクを作る必要があるが、溶媒の選択、分散剤の選択とITOナノ粒子の添加量、分散方法および分散条件の最適化が進められている。塗布型ITOは可撓性があり、加工費が安価であるメリットは大きいですが、表面抵抗は高いままであるため適用できるデバイスはタッチセンサ用などに限定される。
- (2) 炭素系 (CNT: カーボンナノチューブ) はコスト高、分散して塗料化することが困難 (凝集) であるが、ITO相当の低抵抗化に向けて研究が進められている。
- (3) 銀ナノワイヤ系はITOに最も近い性能を発揮できている。絡み合うことで導電性を発揮させるため、導電配線の絶縁不良を防ぐことが課題である。
- (4) 有機導電ポリマ系は、さまざまなポリマの選択性がある点が他の材料系と比べて優位である。ポリチオフェン系・ポリアセチレン系・ポリピロール系・ポリアニリン系等から選択することができる。中でもポリチオフェン系 (PEDOT) は導電性・透明性・安定性のすべてを満足する特性が得られ応用展開に関する研究が進んでいる。PEDOT/PSSの物性は薄膜時で透明～薄青の色合いがあり、水溶性、強酸性 (pH1~2) であることから、使用するにはノウハウを必要とする。一方で、PEDOT/TMAは有機溶媒中に分散が可能で、非腐食性であるためインクジェットプリンティングに使用するのに適しており、研究が進められている。有機導電ポリマ材料の課題点は低抵抗化である。

2017年12月6日～8日に開催された第24回IDW'17では上記に関連した進展の研究開発成果が報告されている。FMC4/FLX5: Roll-to-Roll Manufacturing Technologiesのセッションでは、大面積フレキシブルタッチセンサ用のTCFプリント技術 (FMC4/FLX5-1)⁸⁴⁾、ITO/メタルグリッド/ガスバリアフィルムの積層技術 (FMC4/FLX5-2)⁸⁵⁾、PEDOT・CNT複合材料の合成方法 (FMC4/FLX5-4L)⁸⁶⁾、PEDOT/TMAフィルムは200nm～1100nmの範囲で高透過率を実現し、UVオゾン処理により超親水性が得られた (FMCp1-12L)⁸⁷⁾、AgNW膜の良好な高透過率を維持しながら電気的耐久性・伸展性を実現する製造方法 (FMC5-1)⁸⁸⁾、

ITO/Ag/ITOの多層膜にすることでフレキシビリティを実現した(FMC5-2)⁸⁹⁾等の報告があった。これらは、リジッド、カーブド、ペンダブル、フォルダブル、ローラブルディスプレイへの実現を支える技術である。今後はAgNW系やCNT系との複合化など、より高性能な透明導電膜を目指した開発が続いていくと予想される。(中村)

10. 今後の発展

各種の主要な表示ディスプレイ技術やシステムのトレンド、今後のディスプレイ技術を支える最新の材料・デバイス技術の動向について概観した。

冒頭でも述べた新4K/8K衛星放送の普及や、2020年に商用化が予定されている第五世代移動通信(5G)による通信ネットワークの高速・大容量化に伴い、今後、ディスプレイの高画質化やモバイルディスプレイの多機能化がより一層進むと予想される。また、AR/VR端末や車載ディスプレイをはじめさまざまな応用展開など、情報提示ツールとしてディスプレイ技術の役割はますます重要となるであろう。

本稿で紹介した技術の進展に加え、新たな表示方式・原理の創造や既存のデバイス性能を打破するブレークスルーなど、情報ディスプレイ技術の今後の発展に期待したい。

(藤崎)

(2018年12月21日受付)

〔文 献〕

- H.J. Park, et. al: "Advanced Photo-alignment Material for Both Photo and Rubbing-alignment Methods", SID 2018 Digest, pp.372-374 (2018)
- H. Tokuhisa, et. al: "Novel Alignment Layer, Insulation Materials and Color Photo Lithography Materials for Advanced LCD", SID 2018 Digest, pp.369-371 (2018)
- K. Hanaoka, et. al: "A new MVA-LCD by polymer sustained alignment technology", SID 2004 Digest, pp.1200-1203 (2004)
- R. He, et. al: "PI-less IPS/FFS Liquid Crystal Displays Utilizing Reactive LC with Cinnamate Moiety" SID 2018 Digest, pp.378-380 (2018)
- T. Fujisawa, K. Jang, F. Kodera, H. Hasebe, H. Takatsu: "Novel Photo-Polymer Stabilization of Nano-Phase-Separated LCs with Fast Response", SID 2017 Digest, pp.381-384 (2017)
- T. Matsushima, K. Seki, S. Kimura, Y. Iwakabe, T. Yata, Y. Watanabe, S. Komura: "New fast response in-plane switching liquid crystal mode", J. SID, pp.602-609 (2018)
- T. Katayama, S. Higashida, A. Kanashima, K. Hanaoka, H. Yoshida and S. Shimada: "Development of In-Plane Super-Fast Response (ip-SFR) LCD for VR-HMD", SID 2018 Digest, pp.671-673 (2018)
- S. Oka, et. al: "High Resolution IPS-LCDs Fabricated with Transparent Polyimide Substrates", SID 2018 Digest, pp.764-767 (2018)
- Y. Yamaguchi, et. al: "Development of Top-Gate Oxide TFTs for Plastic-Film LCDs", SID 2018 Digest, pp.121-124 (2018)
- W.-M. Huang, et. al: "Curved LCD and Future Application", Proc. of IDW, pp.1494-1496 (2017)
- T.-H. Huang, et. al: "Bending Shift Free Plastic Liquid Crystal Display", SID 2018 Digest, pp.1732-1734 (2017)
- M.J. Harding, et. al: "Flexible LCDs Enabled by OTFT", SID 2017 Digest, pp.793-796 (2017)
- P.A. Cain, et. al: "Large Area, Low Cost, High Performance LCDs on Plastic", Proc. of IDW, pp.1497-1499 (2017)
- T. Yata, et. al: "Development of a Novel Reflective Display System with Multi-Primary Color for Digital Signage", SID 2017 Digest, pp.1085-1088 (2017)
- T. Ozaki, et. al: "Development of New Error-Diffusion Dithering Method for Reflective Memory-In-Pixel (MIP) LCD", SID 2017 Digest, pp.1089-1092 (2017)
- C.-H. Chen, et. al: "Flexible Colorful Reflective Display by Using Proprietary Surface Anchoring Liquid Crystal Technology", Proc. of IDW, pp.143-144 (2017)
- Y. Kuge, et. al: "Novel Alignment Control Method Using Mortar-shaped Structure for High-Contrast Twisted-VA mode Reflective LCDs", Proc. of IDW, pp.302-304 (2017)
- Y. Kawahira, et. al: "Sunlight-Readable Low-Reflection FFS-LCD", SID 2018 Digest, pp.985-988 (2018)
- T. Baumann, et. al: "Progress of Highly Efficient Blue TADF Emitter Materials Towards Mass Production", SID 18 Digest, pp.142-144 (2018)
- D.H. Ahn, et. al: "Highly Efficient Deep Blue Thermally Activated Delayed Fluorescent Emitter", SID 18 Digest, pp.56-59 (2018)
- T. Masuda, et. al: "Highly Efficient Fluorescent Blue Materials and Their Applications for Top Emission OLEDs", SID 18 Digest, pp.52-55 (2018)
- H. Fukagawa, T. Oono, et. al, "High-efficiency ultrapure green organic light-emitting diodes", Mater. Chem. Front., pp.704-709 (2018)
- C.-J. Shih, et. al: "Ultrapure Green Light-Emitting Diodes using Colloidal Quantum Wells of Hybrid Lead Halide Perovskites", SID 18 Digest, pp.214-217 (2018)
- X. Yang, et. al: "Efficient green light-emitting diodes based on quasi-two-dimensional composition and phase engineered perovskite with surface passivation", Nature Commun., DOI: 10.1038/s41467-018-02978-7 (2018)
- J. Song, et. al: "Organic-Inorganic Hybrid Passivation Enables Perovskite QLEDs with an EQE of 16.48%", Adv. Mater., 1805409-1-9 (2018)
- T. Chiba, et. al: "Anion-exchange red perovskite quantum dots with ammonium-iodine salts for highly efficient light-emitting devices", Nature Photo., 10.1038/s41566-018-0260-y (2018)
- T. Watanabe, et. al: "Extremely High-Efficient OLED Achieving External Quantum Efficiency over 40% by Carrier Injection Layer with Super-Low Refractive Index", SID 18 Digest, pp.332-335 (2018)
- T. Sasaki, et. al: "Demonstration of Long-Term Stable Emission from Inverted OLED with Imperfect Encapsulation", SID 18 Digest, pp.811-814 (2018)
- H. Fukagawa, et. al: "Long-Lived Flexible Displays Employing Efficient and Stable Inverted Organic Light-Emitting Diodes", Adv. Mater., pp.1706768-1-7 (2018)
- <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO24322730W7A201C1000000/>
- <https://www.j-oled.com/technology/>
- M.T. Lee, et. al: "High Efficiency and High PPI AMOLED with Cavity Tuned by Inkjet Printed Hole Injection Layer", SID 18 Digest, pp.624-626 (2018)
- H.J. Shin, et. al: "Advanced OLED Display Technologies for Large-Size UHD TV", Proc. IDW/AD'16 Digest, pp.277-280 (2016)
- Y. Takita, et. al: "Highly Efficient Deep-Blue Fluorescent Dopant for Achieving Low-Power OLED Display Satisfying BT.2020 Chromaticity", SID 18 Digest, pp.138-141 (2018)
- S. Eguchi, et. al: "Strategy for Developing an Ultra-High-Luminance AMOLED Display", SID 18 Digest, pp.433-436 (2018)
- C. Vieri, et. al: "An 18 Megapixel 4.3" 1443 ppi 120 Hz OLED Display for Wide Field of View High Acuity Head Mounted Displays", SID 18 Digest, pp.5-8 (2018)
- T. Fujii, et. al: "4032ppi High-Resolution OLED Microdisplay", SID 18 Digest, pp.613-616 (2018)
- C.II Park, et. al: "World 1st Large Size 77-inch Transparent Flexible OLED Display", SID 18 Digest, pp.710-713 (2018)
- H. Akkerman, et. al: "High temperature Thin-Film Barriers for Foldable AMOLED Displays", SID 18 Digest, pp.717-720 (2018)
- J.H. Choi, et. al: "Toward Sub-micron Oxide Thin-Film Transistors

- for Digital Holography", SID 17 Digest, pp.394-397 (2017)
- 41) H. Tsuji, et. al: "Improvement in switching characteristics and long-term stability of Zn-O-N thin-film transistors by silicon doping", AIP Advances 7, pp.065120-1-6 (2017)
- 42) J.H. Ye, et. al: "Reliability Improvement of IGZO and LTPS Hybrid TFTs Array Technology", SID 18 Digest, pp.128-131 (2018)
- 43) J.Y. Noh, et. al: "Development of 55" 4K UHD OLED TV Employing the Internal Gate IC with High Reliability and Short Channel IGZO TFTs", SID 17 Digest, pp.288-290 (2017)
- 44) H. Hayashi, et. al: "AlO Sputtered Self-Aligned Source/Drain Formation Technology for Highly Reliable Oxide Thin Film Transistor Backplane", Proc. of IDW, pp.324-327 (2017)
- 45) M. Tada, et. al: "An Advanced LTPS TFT-LCD using Top-Gate Oxide TFT in Pixel", SID 18 Digest, pp.117-120 (2018)
- 46) H.S. Lee, et. al: "An Ultra High Density 1.96" UHD 2250ppi Display", SID 17 Digest, pp.403-405 (2017)
- 47) M. Marinkovic, et. al: "Large-Area Processing of Solution Type Metal-Oxide in TFT Backplanes and Integration in Highly Stable OLED Displays", SID 17 Digest, pp.169-172 (2017)
- 48) 堀田吉彦ほか: "日本画像学会関連技術のこの10年の歩み - 電子ペーパー技術 -", 日本画像学会誌, 57, pp.338-350 (2018)
- 49) R. Fleming et al: "Frustrated eTIR as a Path to Color and Video", SID Dig., vol.9, pp.630-632 (2018)
- 50) E. Schlam et. al: "Highly Reflective Electrostatic Shutter", Proc. IDW, EP1-3, pp.1230-1232 (2017)
- 51) D. Chanda, et. al: "Skin-like Full-Color Plasmonic Reflective Displays", Proc. IDW, EP3-2, pp.1248-1251 (2017)
- 52) C.-H. Chen et al: "Colorful Active-Matrix Reflective Display by using proprietary Surface Anchoring Liquid Crystal and high performance Front-Light Module", SID Dig., 9, pp.637-639 (2018)
- 53) K. Blankenbach, et. al, "Automotive Displays from Direct View to AR Head-Up", pp.231-232, ICCE2018 (2018)
- 54) P. Coni, et.al, "The Future of Holographic Head Up Display", pp.354-355, ICCE2018 (2018)
- 55) H. Okumura, et.al: "Wide field of view Optical Combiner for Augmented Reality", pp.459-462, ICCE2018 (2018)
- 56) K. Ito, et.al: "Motorcycle HUD Design of Presenting Information for Navigation System", pp.463-466, ICCE2018 (2018)
- 57) C. Bavor: "Enabling rich and immersive experiences in virtual and augmented reality", Keynote (2), Proc. of SID2017 (2017)
- 58) C. Vieri, et.al: "An 18-Megapixel, 4.3-in. 1443-ppi 120-Hz OLED Display for Wide Field-of-View High-Acuity Head-Mounted Displays", pp.5-8, Proc. of SID2018 (2018)
- 59) Douglas Lanman: "Reactive Displays: Unlocking Next-Generation VR/AR Visuals with Eye Tracking", Keynote (2), SID2018 (2018)
- 60) Y. Isomae, et.al: "Phase Hologram 3D Head Mounted Displays Without Zero Order Diffraction", pp.469-470, Proc. of ICCE2018 (2018)
- 61) K. Kimura, et.al: "New Pixel-Driving Circuit Using Self-Discharging Compensation Method for High-Resolution OLED Micro displays on a Silicon Backplane", Proc. of SID' 17 (2017)
- 62) L. Zhang, et.al: "Wafer Scale Hybrid Monolithic Integration of Si-based IC and III-V Epilayers - a Mass Manufacturing Approach for Active Matrix micro-LED Displays", pp.786-789, Proc. of SID' 18 (2018)
- 63) HDMI® Forum "High Definition Multimedia Interface Specification Version 2.1" (Nov. 28, 2017)
- 64) ITU-R "Recommendation ITU-R BT.2020-2" (Oct, 2015)
- 65) VESA 2018 Workshops seminar official Documents (May, 2018)
- 66) VESA Display Stream Compression (DSC) Standard version 1.2a (Jan. 18, 2017)
- 67) <https://www.thine.co.jp>, ニュースリリース
- 68) Y. Shirasaki, et. al: "Emergence of colloidal quantum-dot light-emitting technologies", Nature Photonics, 7, pp.13-23 (2013)
- 69) E. Lee, et. al., "Quantum Dot Conversion Layers Through Inkjet Printing", SID Digest, 41.5, pp.525-527 (2018)
- 70) X. Dai, et. al: "Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots", Nature, 515, pp.96-99 (2014)
- 71) A. Wedel, et. al: "From the Synthesis of High-Quality InP-based Quantum Dots to the Development of Efficient QD Light-Emitting Diodes", SID Digest, 4.2, pp.25-27 (2018)
- 72) K. Lin, et. al: "Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 per cent", Nature, 562, pp.245-248 (2018)
- 73) T. Chiba, et. al: "Anion-exchange red perovskite quantum dots with ammonium iodine salts for highly efficient light-emitting devices", Nature Photonics, 12, pp.681-687 (2018)
- 74) R.-J. Xie et. al: "Silicon-based oxynitride and nitride phosphors for white LEDs-A review", Sci. Technol. Adv. Mater. 8, 588-600 (2007)
- 75) M.I. Saidaminov, et al. "Pure Cs₄PbBr₆: Highly Luminescent Zero-Dimensional Perovskite Solids", 1, 840-845 (2016)
- 76) M. Zhao, et. al: "Next-Generation Narrow-Band Green-Emitting RbLi (Li₃ SiO₄)₂:Eu²⁺ Phosphor for Backlight Display Application", Adv. Mater. 30, 1802489 (2018)
- 77) D. Chen, et. al: "A review on Mn⁴⁺ activators in solids for warm white light-emitting diodes", RSC Adv. 6, 86285-86296 (2016)
- 78) S. Adachi: "Photoluminescence spectra and modeling analyses of Mn⁴⁺-activated fluoride phosphors: A review", J. Lumin. 197, 119-130 (2018)
- 79) H.-D. Nguyen, et. al: "Waterproof Alkyl Phosphate Coated Fluoride Phosphors for Optoelectronic Materials", Angew. Chem. Int. Ed. 54, 10862-10866 (2015)
- 80) P. Arunkumar, et. al: "Hydrophobic Organic Skin as a Protective Shield for Moisture-Sensitive Phosphor-Based Optoelectronic Devices", ACS Appl. Mater. Interfaces 9, 7232-7240 (2017)
- 81) L. Huang, et. al: "HF-Free Hydrothermal Route for Synthesis of Highly Efficient Narrow-Band Red Emitting Phosphor K₂Si_{1-x}F_{6-x}Mn⁴⁺ for Warm White Light-Emitting Diodes", Chem. Mater. 28, 1495-1502 (2016)
- 82) R. Verstraete, et. al: "K₂MnF₆ as a precursor for saturated red fluoride phosphors: the struggle for structural stability", J. Mater. Chem. C 5, 10761-10769 (2017)
- 83) X. Pan, et. al: "HF-Free Preparation, High Thermal and Color Stability of Mn⁴⁺ Activated K₂TiF₆ Red Phosphors for White Light-Emitting Diodes", ECS J. Solid State Sci. Technol. 7, R3006-R3011 (2018)
- 84) T. Tanaka, et. al: "Development of Printed Electronics Device by Nano-Scale Roll to Roll Patterning", Proc. IDW, FMC4/FLX5-1 (2017)
- 85) T. Muto, et. al: "Flexible Transparent Electrodes for Large-Area Printed Electronics", Proc. IDW, FMC4/FLX5-2 (2017)
- 86) P.-C. Wang, et. al: "Microwave-Assisted Rapid Synthesis of Carbon Nanotubes Covalently Conjugated with Sulfonated Polyaniline for Enhancing Stable Dispersion of Aqueous Conductive Inks", Proc. IDW, FMC4/FLX5-4L (2017)
- 87) S. Tsuji, et. al: "Influence of UV-Ozone Treatment on Properties of Poly (3,4-ethyenedioxythiophene) Tetramethacrylate Prepared on Various Substrate Materials", Proc. IDW, FMCp1-12L (2017)
- 88) T. Araki, et. al: "Enhanced Electrical Durability and Mechanical Stretchability of Ag Nanowire-Based Transparent Electrodes by Nanometer-Thick Metal Plating", Proc. IDW, FMC5-1 (2017)
- 89) Y. Toshimori, et. al: "ITO/Ag Alloy/ITO Structure as Alternative to ITO for Display Electrode", Proc. IDW, FMC5-2 (2017)



藤崎 好英 1998年、早稲田大学大学院電子情報通信専攻修士課程修了。同年、NHK入局。2001年より、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、8K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上級研究員。2006年、2009年、当会鈴木記念奨励賞、丹羽高柳賞論文賞受賞。

2013年～2014年、国際会議IDW AMD Workshop Chair。当会情報ディスプレイ研究委員会委員長。博士(工学)。正会員。



木村 宗弘 1992年、東京農工大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年、長岡技術科学大学工学部電気系助手。液晶の界面アンカリング測定や強誘電性液晶などの諸物性の観測に取組むほか、LCDの新しいモードの研究に従事。1998年、文部科学省在外研究員(Case Western Reserve Univ.)。帰国後、2001年、長岡技術科学大学電気系講師。2005年、同大学同助教授。2007年、同大学准教授。2016年、同大学教授。当会情報ディスプレイ研究委員会副委員長。博士(工学)。正会員。

2016年、同大学教授。当会情報ディスプレイ研究委員会副委員長。博士(工学)。正会員。



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年より、東北大学大学院工学研究科電子工学専攻助教。2010年～2011年まで、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。2011年、Society for Information Display (SID) Special Recognition Award受賞。博士(工学)。正会員。

2011年、Society for Information Display (SID) Special Recognition Award受賞。博士(工学)。正会員。



清水 貴央 2000年、東京工業大学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ディスプレイやフレキシブル有機EL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上級研究員。博士(工学)。正会員。

現在、同研究所新機能デバイス研究部上級研究員。博士(工学)。正会員。



山北 裕文 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))に入社。同社中央研究所にて、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、現職。正会員。

2015年より、現職。正会員。



前田 秀一 1989年、慶應義塾大学理工学研究科修士課程修了。王子製紙(株)にて、情報記録用紙、電子ペーパー、光学部材などの研究開発に従事。2010年より、東海大学工学部光・画像工学科にて、電子ペーパー用表示材料などの研究を開始。現在、同大学教授。1994年、英国王立化学会よりPolymer Lab. Award受賞。2001年度、紙パルプ技術協会賞および印刷朝陽会賞受賞。技術士(化学部門、総合技術監理部門)。Ph.D(Sussex大学)。正会員。

2001年度、紙パルプ技術協会賞および印刷朝陽会賞受賞。技術士(化学部門、総合技術監理部門)。Ph.D(Sussex大学)。正会員。



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)東芝に入社。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。2006年、関東地方発明神奈川支部長賞受賞。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年より、SID日本支部長、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。

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。2006年、関東地方発明神奈川支部長賞受賞。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年より、SID日本支部長、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。



吉田 茂人 1990年、シャープ(株)入社。反射型ディスプレイ、低温ポリシリコンTFT-LCD等のモバイル機器向けのディスプレイ周辺駆動回路の開発に従事。2014年、同社8Kディスプレイの開発プロジェクトチームのチーフ職を歴任。現在、同社通信・映像技術研究所に所属。各種次世代ディスプレイの開発に従事。正会員。

2014年、同社8Kディスプレイの開発プロジェクトチームのチーフ職を歴任。現在、同社通信・映像技術研究所に所属。各種次世代ディスプレイの開発に従事。正会員。



都築 俊満 1994年、大阪大学工学部応用化学科卒業。1999年、同大学大学院工学研究科物質化学専攻博士課程修了。同年、トヨタ自動車(株)入社。2002年、NHK入局。放送技術研究所にて、有機EL、量子ドットの研究開発に従事。現在、同研究所新機能デバイス研究部副部長。博士(工学)。正会員。

現在、同研究所新機能デバイス研究部副部長。博士(工学)。正会員。



長谷川拓哉 2012年、新潟大学工学部卒業。2016年、同大学大学院自然科学研究科博士課程修了。同年より、高知大学総合科学系複合領域科学部門助教。照明およびディスプレイ用無機発光材料の合成、光物性、構造解析に関する研究に従事。当会情報ディスプレイ研究委員会幹事補佐。博士(工学)。正会員。

照明およびディスプレイ用無機発光材料の合成、光物性、構造解析に関する研究に従事。当会情報ディスプレイ研究委員会幹事補佐。博士(工学)。正会員。



中村 篤志 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、助教、2014年、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。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。

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。