

IMID 2024 학술대회 기술 동향

- Free form, QD, OLED 소재, 마이크로 디스플레이 -

※ 본 디스플레이 기술동향 보고서는 '한국디스플레이산업협회/한국디스플레이연구조합'에서 해당기술별 전문가(한국전자기술연구원 한철중 센터장, 한국생산기술연구원 우주영 선임, 단국대학교 진병두 교수, 숙명여자대학교 이현구 교수)와 함께 제공하는 정보이며, IMD학술대회 행사의 기술 동향에 대해 서술하였습니다.

<IMID 학술대회 개요>

- 행사명 : 제24회 국제정보디스플레이 학술대회(IMID 2024)
- 주최 : 한국정보디스플레이학회(KIDS), 국제정보디스플레이학회(SID)
- 일시/장소 : 2024년 8. 20(화) ~ 8.23(금) / 제주도 ICC
- 참가사 : 산업계(패널, 장비/부분품, 재료), 학계, 연구계 등 70여개 기관
- 참가규모 : 총 820여편 논문 발표, 국내외 초청연사 150여명 참여

1. Free-Form

□ 주요 기술동향 트렌드

- 다양한 Free-Form 디스플레이 제품 전시
 - 삼성 디스플레이는 제주도의 3차원 모형을 변형되는 stretchable 디스플레이로 전시하였으며, LG 디스플레이는 800R까지 휘어진 곡률을 가진 '39인치 울트라와이드 게이밍 OLED 패널' 전시하며 많은 관심을 받음
- 대학 및 연구기관에서 연구 개발 내용
 - 웨어러블, 스트레처블 디스플레이 구현에 관한 소재 및 구조 변형 연구가 활발히 진행되고 있으며 최대 인장 50% 보고됨
 - 디스플레이가 인장되어도 해상도는 유지되도록 Stretchability와 Resolution을 모두 증가시킬 수 있는 기술 개발이 진행되고 있음
 - Free-Form 디스플레이를 위한 Ultrathin flexible QLED, 3D-foldable QLED, Intrinsically stretchable QLED와 관련된 연구 개발이 원활히 이루어지고 있음
 - Free-Form 디스플레이 뿐 아니라 피부 부착형 헬스케어 웨어러블 센서 등의 다양한 분야에서 연구 개발이 진행되고 있음

□ 주요 발표내용(종합)

○ 삼성 디스플레이 전시 내용

- 최대 1.25배로 신축성 있게 늘어나고(25% 연신율) 게이밍 모니터 수준의 120PPI(Pixel per Inch · 1인치당 픽셀 수) 해상도를 가지는 스트레처블 디스플레이



【사진. 삼성 스트레처블 디스플레이 전시】

○ LG 디스플레이 전시 내용

- 21:9의 넓은 화면 비율과 800R까지 휘어진 곡률을 가진 ‘39인치 울트라와이드 게이밍 OLED 패널’

2. QD

□ 주요 기술동향 트렌드

○ 자발광 QLED

- 자발광 QLED는 QD 관련 연구분야 중 가장 핵심적이며, 사업화계 가장 가까이 접근한 분야임. 이 때문에 다양한 연구기관 및 기업체에서 활발한 연구를 진행하고 있는 것으로 보이며, 본 IMID 2024 학술대회에서 QD 분야 중 가장 많은 연구내용이 발표된 분야임
- 소자 수명: 자발광 QLED의 상용화에 가장 중요한 요소로 평가받는 분야는 소자의 수명 개선이며, 이를 위한 연구가 다수 발표됨. 기존 연구의 트렌드는 QD 소재의 수명을 향상시켜 소자에서도 향상된 수명을 구현하고자 했던 것임

- 그러나 연구가 거듭될수록 QLED 소자의 수명이 QD 소재의 수명 이외에도 다양한 요소와 연관이 있음이 규명됨. 특히 중요한 부분은 전하 수송층과 QD의 상호작용에 있음. QLED 소자 전반에 걸쳐 원활한 전하 수송을 이뤄낼 수 있는 소재가 적용 되어야 QLED 소자의 수명이 획기적으로 향상될 수 있는 것임
- 이와 관련하여 신규 전하수송층 도입을 통한 전하의 accumulation 방지 및 recombination zone 제어 등, 소자 수명 향상과 관련한 다수 연구가 발표되었음
- Flexible display: QLED 기반 디스플레이가 사업화를 앞두고 있는 시점에서, 이를 활용하여 더욱 진보된 형태의 디스플레이 연구도 상당수 보고됨
- 특히 stretchable 및 flexible QLED 디스플레이 관련 연구가 보고됨. 이를 통해 자발광 QLED 디스플레이가 성공적으로 구현이 된다면 이를 기반으로 한 다양한 형태의 제품군들이 끊임없이 사업화에 성공할 수 있을 것이라는 기대감을 확인할 수 있었음

○ 디스플레이 QD 소재

- QLED 구현에 있어 가장 핵심적인 디스플레이용 QD 소재에 대한 연구가 매우 다수 발표됨
- InP QD 소재: 색변환 타입의 QD 디스플레이에서 이미 성공적으로 사업화 된 바 있는 InP QD 소재는, 자발광 QLED 구현과 관련해서도 지속적으로 활발한 연구가 진행되고 있음
- 기존 InP QD 소재의 성능을 향상시키고자 매우 미세적인 레벨에서 다양한 분석과 관련한 연구결과가 보고되었으며, 정교한 표면 산화물 제거 등을 통해 월등히 우수한 InP QD 소재를 제작한 연구 결과도 보고됨. InP QD 소재는 앞으로도 활발한 연구가 진행될 것으로 보임
- Post InP QD 소재: 이와 더불어 post InP QD로 불리는 AIGS, CIS 등의 소재도 디스플레이 응용 관련해서도 많은 가능성을 보여줌. 향후 해당 분야가 더욱 활성화 될 것으로 보임

○ 적외선 QD 소재

- 적외선 QD 관련 연구가 매우 활발하게 진행되고 있는 것으로 확인됨
 - 향후 디스플레이 기술의 트렌드는 기존의 수동적인 디스플레이에서, 사용자와 적극적으로 상호작용하는 형태로 급격히 진화할 것으로 예측됨. 이와 관련해서 핵심적인 부품은 적외선 센서이며, 적외선 QD는 매우 우수한 적외선 센서 소재임
 - 적외선 센서 관련하여 적외선 QD 관련 연구가 매우 활발하게 되고 있으며, 납계열, 비납계열 등 다양한 적외선 QD 소재 연구내용이 발표됨

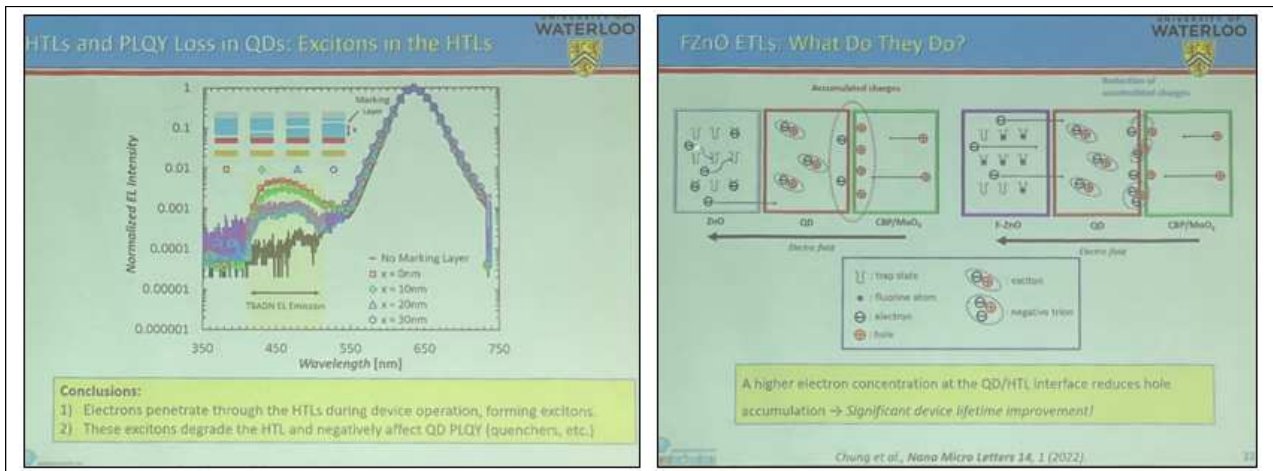
○ QD 패터닝

- 고해상도 및 고성능 디스플레이 구현을 위한 QD 패터닝 연구가 다수 발표됨
 - 잉크젯 프린팅 및 photolithography를 활용한 QD 패터닝 연구내용이 구두 및 포스터 발표에서 다수 발표되었음
 - QD 패터닝 날로 더욱 그 중요성이 더해지고 있으므로, 관련 연구도 앞으로 더욱 성장할 것으로 보임

□ 주요 발표내용(종합)

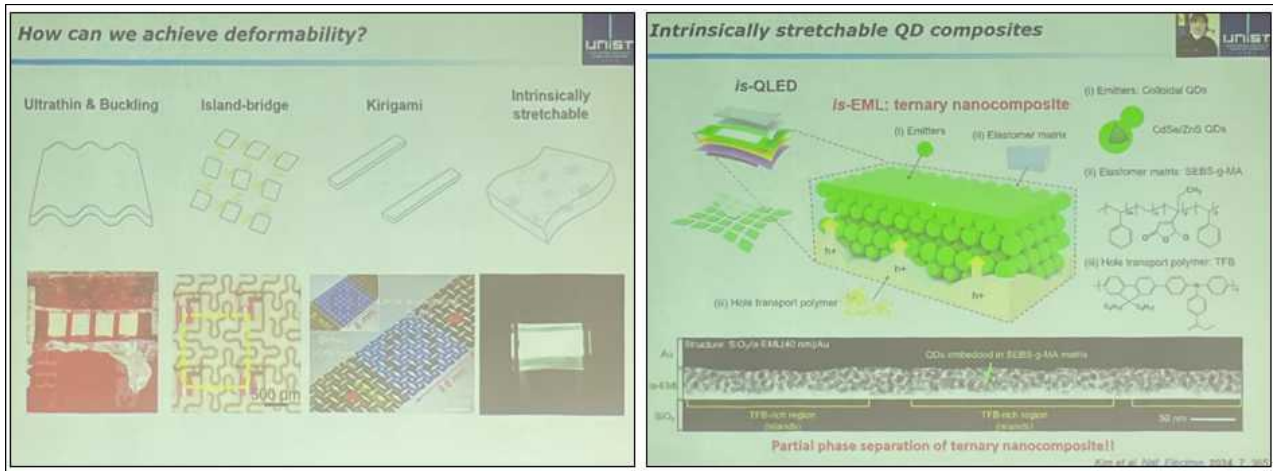
○ 자발광 QLED

- 자발광 QLED 구현에 있어서 가장 핵심이 되는 부분 중 하나는 소재 및 소자의 안전성(수명)임. Charge transport layer가 QLED 의 안정성에 큰 영향을 미치기 때문에 University of Waterloo(Canada) 연구팀은 hole transport layer(HTL) 및 electron transport layer(ETL)이 소자의 안정성에 관여하는 바를 규명하기 위해 수행한 연구 결과를 보고함



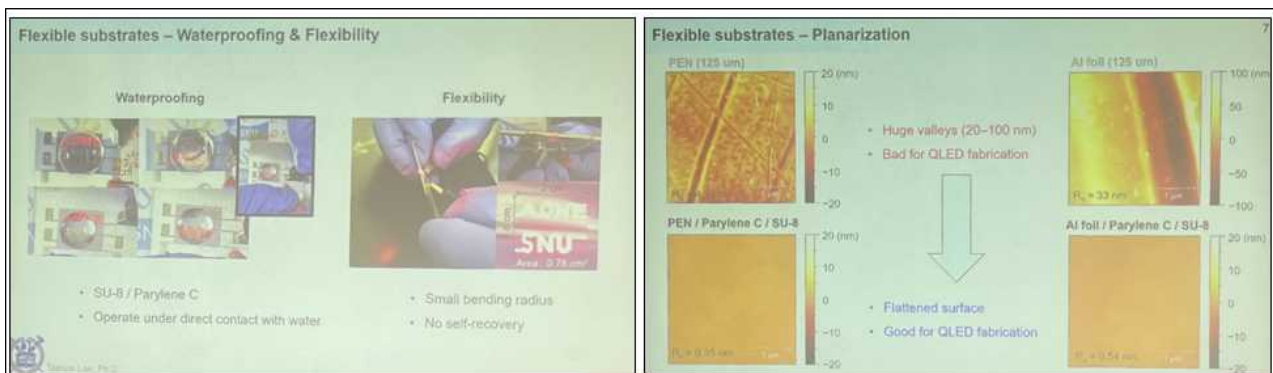
【그림. 초청발표 “The influence of Charge Transport Layers on the EL Stability of QLEDs”】

- 여러 종류의 HTL 소재들을 사용하여 비교하는 실험을 진행했고, QD/HTL 계면에서의 hole 축적을 막는 것에 비해 계면에서 벗어난 곳에서 exciton이 형성되는 것을 억제 했을 때 소자의 안정성 증가에 더욱 효과적인 결과를 보고함
- 또한, ETL 소재로 주로 사용되는 ZnO에 fluorine 처리를 해봤더니 수명이 40배 가량 증가한 것을 확인함. Electron only device 분석으로 플루오린을 처리한 경우, ZnO에 있는 oxygen vacancy를 환원시켜 trap states를 감소시키기 때문에 수명 증가가 일어난다는 사실을 규명함
- QD/HTL 계면에서의 높은 electron 농도는 hole 축적을 억제하기 때문에 상당한 수명 증가를 이루어 낼 수 있다는 결과를 보고함
- 향후 지속적으로 charge transport layer의 연구를 이어 나간다면 수명이 획기적으로 향상된 고성능/고수명 QLED를 구현할 수 있을 것이라는 전망을 전달함
- 자발광 QLED의 개발이 경쟁적으로 진행되고, 상용화가 가시화 되는 상황에서 QLED 기반의 우수한 색 재현성과 고휘도를 유지하면서도 자유롭게 변형 가능한 디스플레이의 연구가 보고됨



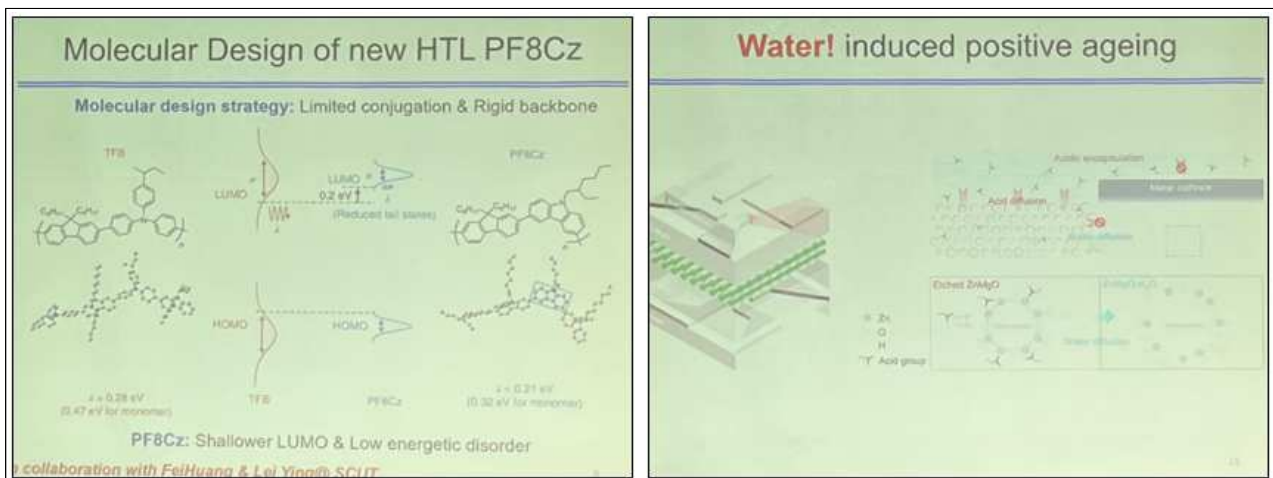
【그림. 구두발표 “Toward Stretchable Quantum Dot Light-Emitting Diodes”】

- 웨어러블 디스플레이를 제작하기 위해 필요한 핵심특성은 변형성임. 변형성을 가지려면 아주 얇고, 압력에 잘 휘어지고 구부러지는 island-bridge, Kirigami 구조를 활용하는 방법이 있음
- 기존 유기 반도체로는 낮은 전기적 특성과 열 내구성이 약해 높은 결정성과 훌륭한 전기적 특성을 가진 무기 반도체를 사용하여 스트레처블 디바이스를 제조하는 것이 더욱 적합함
- UNIST 연구팀은 본 발표에서 무기 양자점 코어셸 소재를 활용해 elastomer matrix와 nanocomposite을 형성해 intrinsically stretchable QLED를 제작하였음
- 양자점과 matrix의 비율을 조절해 변형성 강도를 조절할 수 있으며 TFB 물질을 사용한 HTL이 기둥 역할로 지탱할 수 있는 구조를 고안함
- 서울대학교 연구팀은 새로운 substrate 소재 도입을 통해 flexible display 구현의 가능성을 보여줌



【그림. 구두발표 “Substrate Modification of Flexible Quantum Dot Light-Emitting Diodes”】

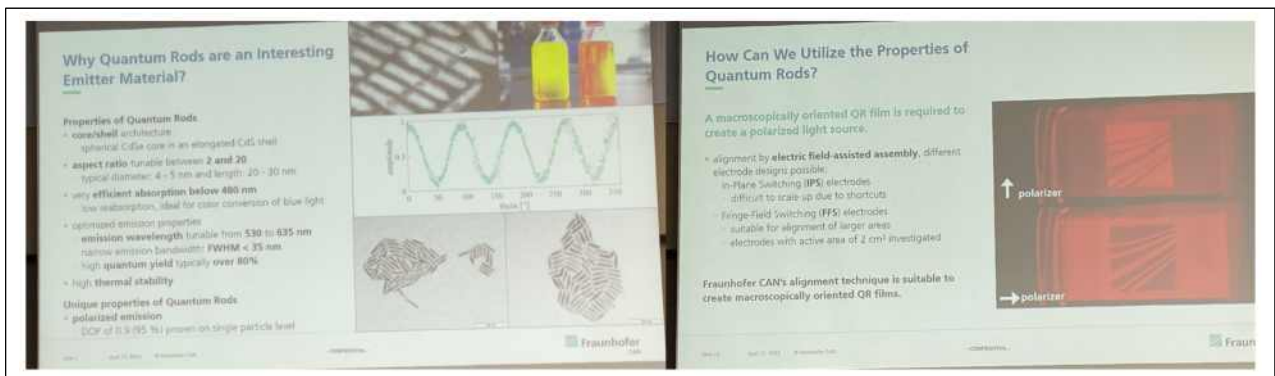
- Flexible display 구현을 위해서는 낮은 디바이스 구동 온도에서 높은 휘도를 가져야하며 waterproofing 효과도 가지고 있어야 함
- 기존 사용되던 PEN 또는 Al은 표면에 valley가 많아 QLED 제작에 악영향을 끼침
- Parylene C, CYTOP, polyimide 등 투명하고 flexible한 substrate (Planarization layer)를 사용해 top-emitting architecture를 고안하여 flexible display 가능성을 보여줌
- QLED에서 신규 HTL 소재인 PF8Cz를 사용하면 shallower LUMO와 low energetic disorder 효과를 가지기 때문에 hole injection 개선을 할 수 있다는 연구가 보고됨



【그림. 초청발표 “Positive aging and transient dynamics on quantum dot light-emitting diodes”】

- 실제로 녹색과 청색 QLED에서 각각 28.7%, 21.9%의 EQE 성능을 달성함으로써 거의 100%에 가까운 캐리어에서 exciton으로의 전환율을 보여줌
- Acid encapsulation(carbonate compound)와 sintering/necking 방법으로 물을 처리한 ZnMgO를 사용해 완벽한 positive ageing 효과를 제공, QLED의 성능을 높일 방법 중 하나임을 증명함
- 이후 negative ageing을 완전히 억제하면서 QLED 수명 또한 늘릴 수 있는 연구 결과를 발표함
- 하지만 ZnO-based ETL에서 물이 ZnO 의 trap states를 줄여준다는 것 이외의 역할을 더 파악하는 것이 과제로 남아있으며, 추가의 연구를 통해 positive aging 원리에 대한 면밀한 증명이 필요함

- 기존의 구형 입자인 QD를 넘어, 긴 막대기 형태를 가짐으로 aligned structure 구현이 가능한 quantum rods (QRs) 소재에 대해 보고됨
- QRs는 구형의 CdSe core에 길쭉한 CdS shell 구조로 종횡비를 2~20까지 변형할 수 있는 소재임
- CdSe/CdS QRs은 480 nm 이하 파장에서 효율적으로 흡수할 수 있으면서 재흡수는 낮아 청색광을 흡수하여 다른 색상으로 재방출하는 것에 이상적임

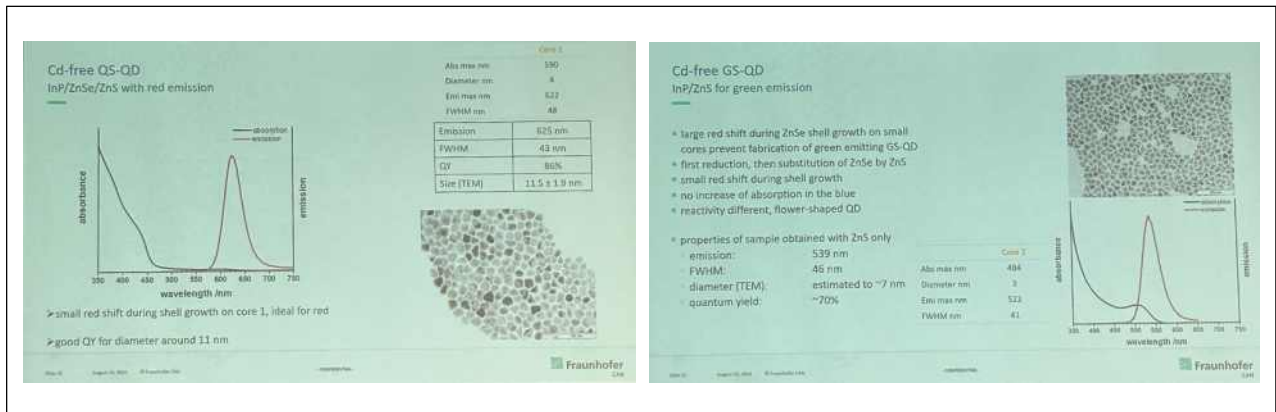


【그림. 초청발표 "Aligned Quantum Rods as Emitter for Polarized Light Sources"】

- 530~635 nm 범위의 발광 파장 변조가 가능하며 FWHM < 35 nm, 80% 이상의 QY 특성을 가지며 열 안정성이 높음. 특히 편광 발광을 하는 독특한 특성을 가지며 편광 정도가 0.9임
- 이를 기반으로 Fraunhofer Can 연구팀만의 기술로 넓은 범위에서 정렬된 QR 필름을 제작함
- AI 및 machine learning을 활용하여 우수한 특성의 QLED를 예측하는 연구가 보고됨
- 중국 베이징 공과대학 연구팀은 수백개의 QLED 소자에서의 J-V-L, IS, 소자 aging 데이터 등을 수집하여 QLED 소자의 수명을 예측하는 연구를 수행함. 연구진이 도출한 주요 요소들을 입력함으로써, QLED 구현에 가장 핵심적인 blue QLED 수명을 예측할 수 있었으며, 0.70 수준의 Pearson correlation coefficient를 확인함

○ 디스플레이 QD 소재

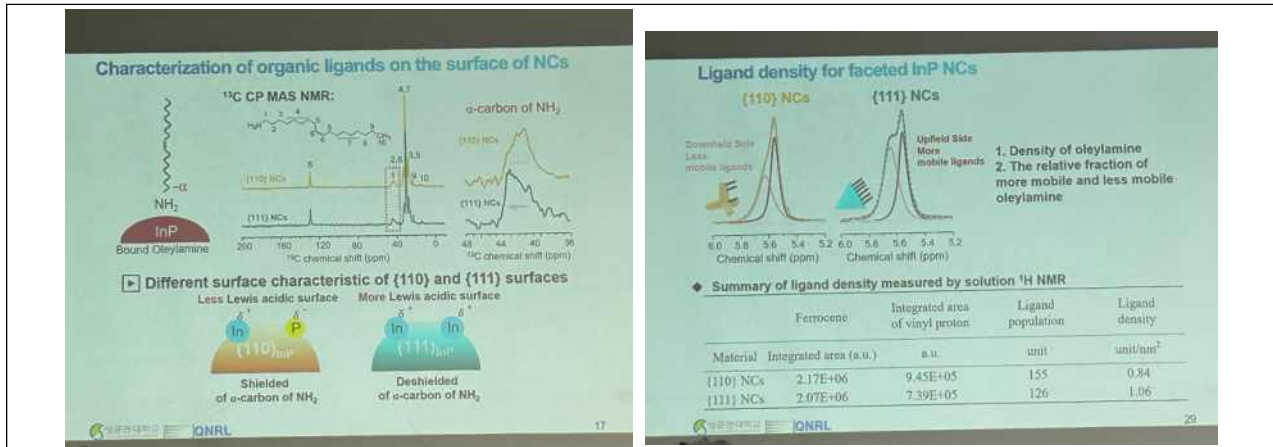
- 디스플레이에 응용할 수 있는 giant-shelled InP QD 소재에 대한 연구내용이 발표됨



【그림. 초청발표 "Giant Shelled Cadmium-Free QDs with Increased Absorption and Stability for Colour Conversion of Blue Light"】

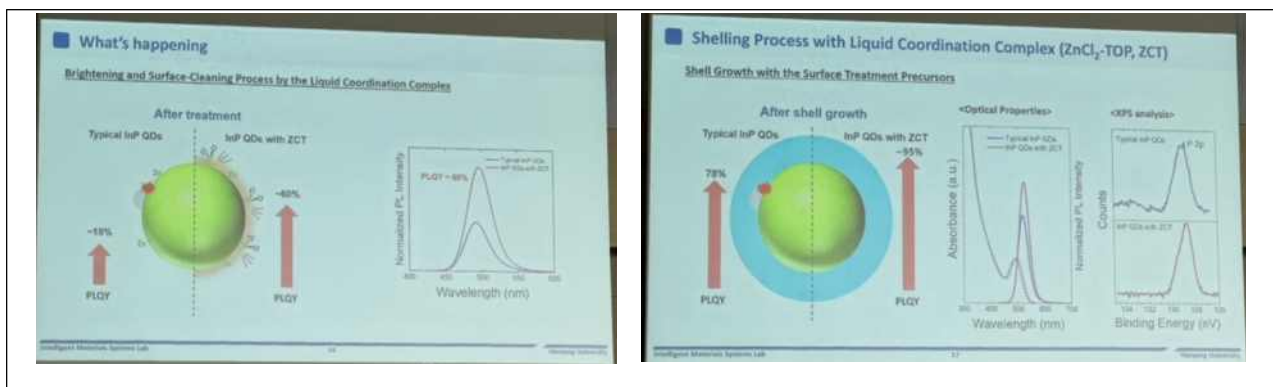
- 기존에 Fraunhofer Institute 연구팀은 CdSe 기반의 코어 QD를 활용하고, 두꺼운 Zn chalcogenide 껍질을 형성한 giant-shelled QD (GSQD) 소재를 제작하여 보고함
- 이는 비록 코어에 CdSe를 포함하고 있지만 워낙 작은 비율로 존재하기 때문에 Cd의 원소비율을 0.1% 수준까지 절감할 수 있었음
- 하지만, 여전히 toxic한 원소인 Cadmium을 포함하고 있기 때문에 본 발표에서는 대체 소재로써 InP QD를 소개함
- 앞서 CdSe/ZnSe/ZnS QD와 같이 두꺼운 Zn chalcogenide 껍질을 형성한 InP/ZnSe/ZnS 및 InP/ZnS GSQD를 제작하였고 각각의 껍질 형성에 따른 경향성을 설명함
- InP GSQD 소재를 합성하여 높은 안정성 및 red, green 등의 다양한 발광색상을 구현한 결과를 보고함
- Magic Angle Spinning NMR (MAS-NMR) 및 XPS을 통해 InP QD 소재 표면에서의 산화물 형성 메커니즘을 규명한 연구 내용이 발표됨
- 표면 산화물의 존재는 InP QD 소재의 발광특성에 크게 영향을 주는 것으로 알려져 있음

- 성균관대학교 연구팀은 기존에 합성과정 중 InP QD 소재 표면에 2차 산화물 형성이 발생함을 보고했으며, MAS-NMR 분석을 통해 각 면에서의 산도를 확인하여 리간드 결합 강도를 규명하고자 했음
- 이에 더해 추가적인 XPS 분석을 통해 각 면에서의 리간드 밀도를 확인하여 InP QD 소재 표면에서 산화물 형성 메커니즘을 제시함



【그림. 구두발표 "Surface Chemistry of InP NCs on (110) and (111) Facets in Response to Oxidation"】

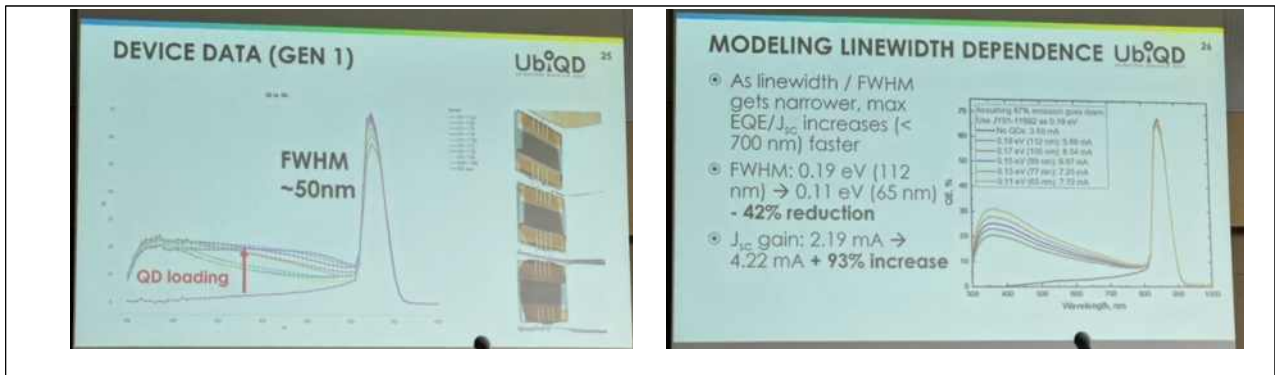
- 한양대 연구팀은 InP QD 소재의 표면 산화물 형성 메커니즘을 규명하고, 산화물 형성 방지를 통해 발광특성을 대폭 향상시킨 연구를 보고함



【그림. 초청발표 "Exploiting Surface Ligands of Pnictide Quantum Dots for Active Functionality Beyond Merely Encapsulation"】

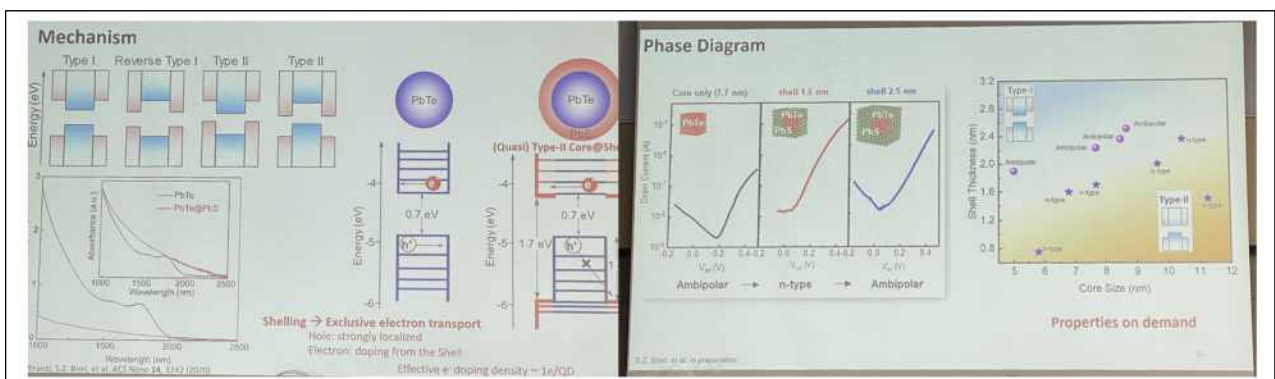
- InP QD core에 ZnCl₂를 처리해 core에 존재하는 산화물을 억제하고 이를 density functional theory 및 XPS 분석을 통해 규명함
- 2차 산화물의 억제에 따라 core에서 발광효율이 18%에서 60%로 놀랍도록 향상되었으며, shelling 후 발광효율이 95%에 육박하는 매우 우수한 녹색 InP QD를 보고함

- Post InP 소재에 속하는, 매우 좁은 선폭을 나타내는 I-III-VI2 QD 소재에 대한 연구내용이 발표됨



【그림. 초청발표 “Quantum Dot Linewidth: Importance for Applications Beyond Display”】

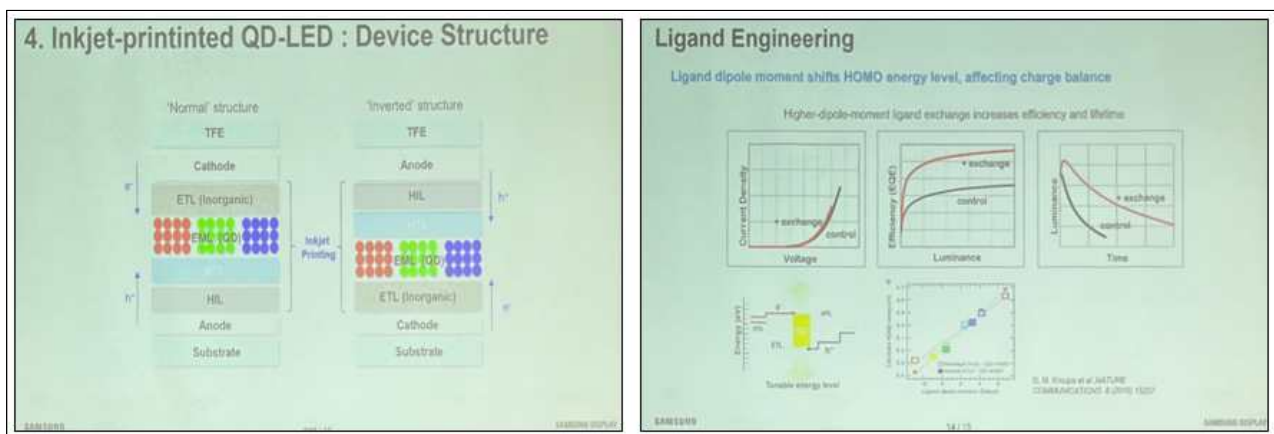
- 미국의 UbiQD 연구팀은 I-III-VI2 QDs 소재의 반치폭을 줄이기 위한 연구를 진행함
- 이 과정에서 JY01-119B2를 사용해 반치폭은 112 nm에서 65 nm로 42% 감소하였으며, Jsc 가 2.19에서 4.22로 향상되는 효율을 보고함
- 적외선 QD 소재
 - 적외선 QD 소재는 디스플레이에 응용될 수 있는 적외선 센서 소재로써 매우 많은 관심을 받고 있는 연구 분야임. 본 IMID 2024 학술대회에서도 관련하여 의미 있는 다수의 연구결과들이 보고됨



【그림. 초청발표 “Electronic Transport Control of Core-shell Colloidal Quantum Dot Assemblies”】

- QD 소재는 주로 core에 shell을 쌓아 안정성을 향상시키고 트랩 및 결함을 억제하여 발광소자로서 연구가 많이 되었음. 반면 수광소자의 경우 core-only QD 소재 위주로 연구가 되어왔음

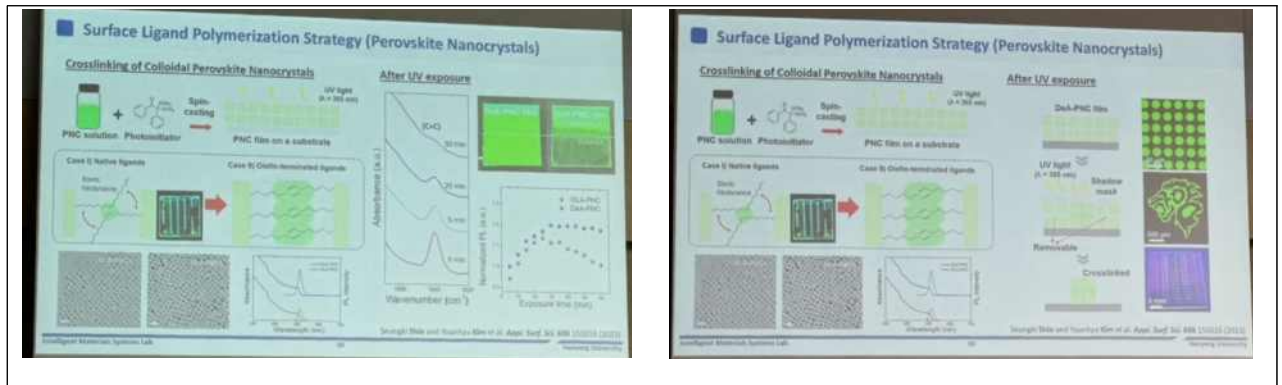
- 도쿄대학교 연구팀은 앞선 연구에서 PbTe/PbS core/shell 구조의 QD를 합성하여 shelling의 효과에 규명한 바 있음
- PbTe core에 PbS shelling의 효과는 정공은 효과적으로 구속하며 전자만 수송 가능한 (Quasi) Type-II의 구조를 갖는 것을 밝혀냄
- 또한, 기존 널리 쓰이는 EDT 리간드 대신 iodine 리간드를 사용한 경우, core/shell assembly의 전도도 특성 및 전자 수송의 안정성 특성을 크게 향상시킨 것을 보고함
- core 크기 및 shell 두께를 조절하여 분석한 결과 shell의 두께에 따라 n-type 또는 ambipolar 특성으로 조절할 수 있음을 제시함
- 이외에도 다수의 적외선 QD 관련 연구가 구두발표 및 포스터 심사에서도 이뤄졌으며, 이를 통해 적외선 QD 분야에 대한 관심과 중요성을 확인할 수 있었음. 적외선 QD 분야는 향후 더욱 팽창할 수 있는 분야인 것으로 평가됨
- QD 패터닝
 - QD 기반 디스플레이 구현이 있어서 핵심기술 중 하나는 패터닝 기술임. 삼성 디스플레이 연구팀은 잉크젯 기술을 기반으로 한 패터닝 관련 기술을 소개함



【그림. 초청발표 “Overview of QD-LED: Current Status and Future Prospect”】

- 잉크젯 프린팅 기술은 고성능 QLED 구현에 유망한 기술임. 그러나 잉크의 끓는 점, 표면 장력, 점도 등 잉크의 특성을 컨트롤할 수 있어야함

- 본 발표에서는 프린트된 층의 uniformity 향상을 위해 잉크 formulation, drying process를 최적화하는 잉크젯 프린팅 기술을 소개함
- 또한 리간드 엔지니어링을 통해 thiol anchor를 가진 리간드가 기존 carboxylic anchor를 가진 리간드 보다 QLED 의 밝기 및 수명이 증가하는 데이터를 보여줌
- Photolithography를 이용한 페로브스카이트 나노결정의 패터닝 연구가 보고됨



【그림. 초청발표 “Exploiting Surface Ligands of Pnictide Quantum Dots for Active Functionality Beyond Merely Encapsulation”】

- 한양대 연구팀은 리간드를 Oleylamine에서 9-decenoic acid로 교환했고, 이후 리간드간의 가교결합을 유도하여 용매 저항성을 개선시키고 원하는 패턴을 형성할 수 있는 전략을 보고함
- 리간드 교환 후 페로브스카이트 나노 결정은 용매저항성이 향상되었으며(첫번째 우측 상단), UV-radiation에서도 안정적인 것을 알 수 있음
- 리간드 중합이 높은 선택성을 가지고 있음을 통해 원하는 페로브스카이트 나노결정 필름 패턴을 형성할 수 있기에 photolithography와 유사하게 적용이 가능함을 보고함

3. OLED 소재

□ 주요 기술동향 트렌드

- OLED 발광재료 시장의 규모는 2024년 24억 달러에서 2028년 27억 달러까지 성장할 것으로 전망되며, iPad Pro 등 IT제품용 OLED의 핵심소재와 8.6G IT라인 투자, tandem OLED 발광소재, 고효율/장수명 발광재료 등이 주요 키워드임
- 2024년 IMID의 OLED front-plane 분과는 6개의 oral 세션을 운영하여 16명의 초청강연을 포함하는 22편 구두발표로 구성됨. 나머지 포스터 발표와 OLED의 공정, 소자, 평가 등 인접영역까지 포함하면 작년의 100여편 수준을 뛰어넘는 각 분야의 논문이 발표됨. OLED 소재 분야의 키워드는 MR-TADF 재료/소자의 고효율화 시도로서 붕소계 및 indolocarbazole 등 비붕소계 청색재료 개발, 새로운 인광(청색)재료/소자의 특성 향상, TSF/PSF소자 연구로의 확장 등임
- OLED 재료 소재 부문의 기술적 특성 요약
 - 고효율화를 위한 MR-type TADF 재료
: 다양한 청색발광체 설계/이전 소재 대비 진보성 발표 (청색; DABNA 재료 core unit 변경/보강, fused indolocarbazole계 사용 및 excimer device/발광체 배향 제어기술)
 - 인광 감응형 (PSF) OLED 의 효율 향상을 위한 새로운 물질 개발
 - 수명 향상을 위한 중수소화 물질 (Deuterated compound; host and other common layers)
 - Infrared emitter, europium (Eu+2)계, Pt-based 청색인광소재; 분자배향을 통하여 높은 horizontal emitting dipole ratio를 갖는 소재 등의 지속적 개발 진행
 - Cluster Light Emitting Diode; Cu4I4 클러스터코어-리간드 엔지니어링 기술
 - Plasmonic 인광 OLED (UDC) ; incoupling-outcoupling에 의한 고효율/장수명 확보 가능성 제시

□ 주요 발표내용(종합)

○ OLED 관련 전시기업 동향

- 삼성디스플레이는 25% 연산율을 가진 고해상도(120 ppi) 스트레처블 디스플레이를 IMID 2024에서 최초 공개함. 3차원으로 표현한 제주도 형상과 사계절이 특징인 이 디스플레이는 기존 업계의 제품 중 최고의 연산율을 가졌고, 부스에서 실물 전시가 이루어짐. 이외에 W-OLED 및 RGB방식의 OLEDoS, IT형 초박형 (UT) 패널 등을 전시
- LG Display는 OLED TV, 게이밍 OLED 패널, 차량용 디스플레이, VR 및 스마트워치에 사용되는 초고휘도 OLEDoS 등을 전시. '메타테크놀로지 2.0'이 적용된 OLED TV는 MLA+ 초미세 렌즈 패턴과 휘도/화질 강화 알고리즘을 채용
- 재료 관련 업체로서는 Idemitsu Kosan, ChemE, 태원과학, (주)이엠엔아이, Anycasting 등이 전시에 참여하였으며, OLED 측정장비 업체 중에서는 Radiant Solution, McScience, Admesy, 영풍지케이(주) 등이 OLED 색차, 결함, 무라, 기타 광학 검사와 전기 측정, 광학 설계, 측정 자동화 등의 다양한 시스템을 전시
- Ansys, Synopsys, Schrodinger 등에서 OLED 재료 및 광학/포토닉스 시뮬레이션 소프트웨어, 정밀한 멀티스케일 설계기법 등을 전시. 재료/제품 개발을 가속화 하고 성능 및 신뢰성을 개선할 수 있는 시뮬레이션 tool 소개
- 한국전자통신연구원, 한국나노기술원, 한국생산기술연구원, Fraunhofer IPMS 등의 국내외 연구소들은 차세대 디스플레이, OLED 마이크로 디스플레이, QD 디스플레이 및 감각 입출력 패널 등 다양한 연구 성과를 발표함



【사진; IMID2024 전시회의 삼성/LG등 부스 전경】

○ 학술발표 주요내용

- OLED 청색재료/소자 개발 동향

· MR-TADF (붕소계)

- * 경희대학교 권장혁 교수 연구팀은 DABNA 구조를 modify한 청색 발광 MR-TADF 물질을 보고함. 청색 발광 물질은 470 nm의 발광 파장과 21 nm의 반치폭을 가지며 HF 소자에서 22.8%의 효율과 1,000nit에서의 낮은 roll-off 특성을 발표함
- * Jilin 대학의 Ping Lu 연구진은 MR framework에 benzonitrile 유도체를 결합한 3종의 MR-TADF emitter(BN-TPACN, BN-CzCN, BN-PTZCN)를 보고함. 이중 BN-TPACN을 사용한 OLED 소자는 36.6%의 높은 효율과 31 nm의 좁은 반치폭을 달성함

· MR-TADF (비 붕소계)

- * 성균관대학교 이준엽 교수팀은 indolocarbazole 유도체의 MR-TADF 물질을 사용하여 청색 excimer OLED를 보고함. excimer OLED에서 도핑 농도가 1 wt% 보다 15 wt%로 증가했을 때 26.3%의 효율을 달성하였으며 473 nm의 발광 파장과 (0.13, 0.19)의 색 좌표를 달성

- 인광재료

- * 경희대학교 권장혁 교수팀은 인광 OLED에 적용할 두 종류 (KHU-17a, KHU-17b)의 높은 T1을 가지는 n-type host를 보고함. CN-Ir을 사용한 청색 인광 OLED에서 p-type host인 oCBP와 exciplex를 형성하는 KHU-17a 물질은 29%의 높은 효율과 33.9 h의 LT50을 달성

- TSF

- * Duham 대학의 Andrew Monkman 교수 연구팀은 3종의 TADF sensitizer(DMAC-TRZ, ACRSA, AZB-TZRZ)와 v-DABNA를 사용한 TSF OLED를 보고함. TADF의 물리적인 성질과 sensitizer에서의 성능은 상관관계가 없다는 것을 보고하며 TADF sensitizer의 새로운 design rule을 제시함

- PSF

- * 삼성디스플레이에서 4성분계를 가지는 청색 PSF OLED 소자에서의 degrading factor를 보고함. 연구진은 TADF 안정성 factor는 emitter에 direct hole trapping과 TADF emitter로의 dexter energy transfer가 원인이라고 발표함
- * 삼성종합기술연구원에서 Pt(II) complex sensitizer와 2종의 final emitter(HCF, MRF)를 사용한 PSF OLED를 보고함. sensitizer와 emitter의 적용 기준과 방향을 보고하였으며 고효율 PSF OLED의 가능성을 시사함
- * 성균관대학교와 중앙대학교 연구팀은 PSF OLED의 효율 증대를 위해 높은 trap reactivity를 갖는 물질의 중요함을 보고함. FD-DOS 모델링을 통하여 Ir(tms-py)₃ 물질을 선택하여 사용한 TBRB-based PSF 소자는 391%의 효율 증대와 360% 수명 향상

- Clustering Host, Non-doping 재료 등

- * Heilongjiang 대학 연구진은 Cu₄I₄ 클러스터 소자의 효율을 증대시키기 위해 TADF host engineering 결과 발표. TADF host는 30%의 효

율을 달성하며 클러스터 소자는 기존 배위체 기반 인광 소자보다 뛰어난 효율을 강조함

- * South China 대학과 Chinese 대학의 연구진은 두 종의 매우 빠른 bipolar charge transport 청색 물질을 보고(FCO-1, TCO-1). 두 종의 thin non-doped OLED는 30.2%와 40.6%의 높은 효율을 달성하였으며 thick OLED는 23.0%의 효율과 낮은 roll-off 소자를 보고함

- OLED 녹색재료/소자 개발 동향

· 인광재료

- * Summer sprout사의 Jing Wang 연구팀은 BT2020 OLED CIE(x,y)=(0.170, 0.797)를 달성하기 위하여 2종의 녹색 인광 소재 (DGD-I, DGD-II) 를 보고함. DGD-II의 전면발광소자에서 (0.162, 0.777)을 달성하였으며 182 cd/A의 CE Max와 1,000시간 이상의 수명을 달성

- Tandem용 재료, 중수소치환 등

· Crosstalk 저감을 위한 HTL 재료기술

- * Merk사와 EMD Performance Materials사의 연구팀은 lateral current 를 control하여 crosstalk을 억제할 수 있는 정공수송 물질(HTM)을 보고함. 청색 sub-pixel로부터의 lateral current를 억제하며 수명 및 전력 소비 저하가 없음을 보고

· 중수소치환

- * Merck 사는 OLED 재료 중 triplet matrix 물질과 electron blocking layer의 중수소화를 통한 소자의 수명향상 연장을 보고하였음. 대량 제조의 가능성과 공정 효율성 등을 발표하며 중수소화 기술의 경제적 가치 강조

- 낮은 반치폭, plasmonic mode 활용기술

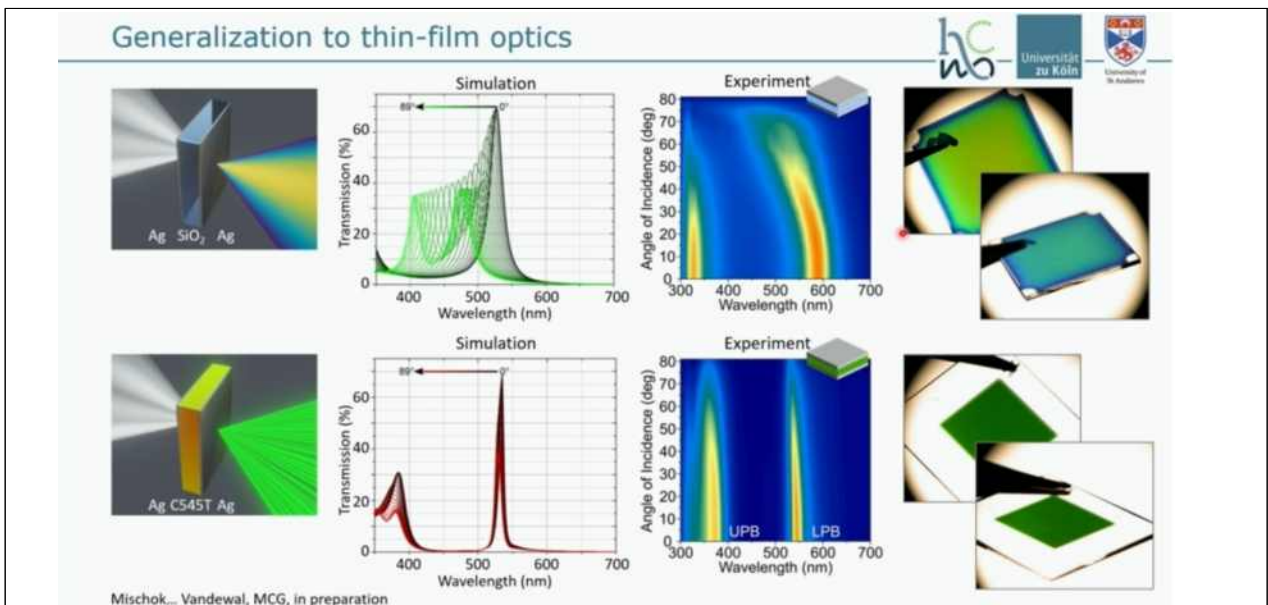
· Polaritonic OLED

- * Cologne 대학의 Malte C. Gather교수는 마이크로캐비티와 엑시톤을

혼성화하여 polariton을 형성한 Polaritonic OLED를 보고함.
Polaritonic OLED는 20nm 이하의 반치폭과 10nm 이하 수준으로 시야각이 거의 변화없음을 보임

· Plasmonic OLED

- * Universal display corp.사는 미래의 디스플레이는 넓은 색 재현, 긴 수명, 높은 효율을 필요로 하며 기존의 PhOLED는 엑시톤이 빛으로 변환될 때 소재의 영향을 받지만 Plasmonic PhOLED는 소자 구조의 영향을 받으며 이론적인 효율의 한계가 증가했음을 보고함. 또한 incoupling과 outcoupling에 의해 높은 효율과 긴 수명을 보여줄 수 있음을 설명

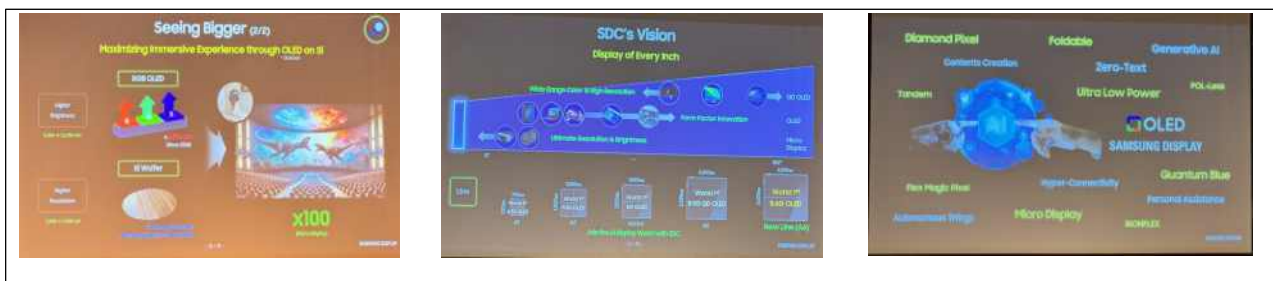


【사진; 좁은 반치폭과 시야각 이동이 적은 Polaritonic OLED; Prof. M. Gather/쾰른대학】

4. 마이크로 디스플레이

□ 주요 기술동향 트렌드

- 2023년에 이어 가상/증강현실(Virtual Reality(VR)/Augmented Reality (AR))에 대한 관심이 증가하면서 IMID2024에서 좀 더 세분화된 관련 세션이 다양하게 분포함
- Tutorials 세션에서는 가상/증강현실 및 초고해상도 패터닝 관련 발표가 2개 있었고, Workshops 세션에서는 3개의 가상/증강현실 디스플레이 및 디바이스와 마이크로 디스플레이 드라이버 IC 관련 발표가 있어 이에 대한 관심이 매우 높은 것으로 판단됨
- 마이크로 디스플레이, 초고해상도 디스플레이, 가상/증강현실 관련 세션은 전체 72개의 세션 중 약 10개 정도로 14%를 차지하여 작년 10% 대비 증가하였으며, 측정, 디스플레이 모드, 구동 등 좀 더 세분화된 내용으로 발표가 진행됨
- Keynote 세션에서 삼성디스플레이는 “Everlasting Evolution of Display with AI” 라는 주제로 발표를 하며 보다 큰 화면을 구현하기 위해서는 초고해상도 디스플레이가 필요하고, Si 기반의 OLED 마이크로 디스플레이인 OLEDoS의 중요성을 강조함
- 삼성디스플레이에서는 SDC's Vision 중 하나로 Ultimate Resolution&Brightness를 위해 Micro Display를 나타내었고, 결론에서도 다양한 키워드 중에 Micro Display가 포함되어 삼성디스플레이에서도 마이크로 디스플레이에 대한 관심이 매우 높은 것으로 판단됨



【삼성디스플레이 Keynote 발표 사진】

○ 마이크로 디스플레이 성능 향상

- IMID 2024에서는 작년에 이어 많은 기관들이 Liquid crystal on silicon (LCoS), OLED 기반의 OLED on silicon (OLEDoS), Micro LED 기반의 마이크로 디스플레이 등 다양한 마이크로 디스플레이 기술 및 패널을 전시함
- 세계적인 Major 디스플레이 업체인 LG Display와 삼성디스플레이는 매우 우수한 성능의 OLEDoS를 전시함
- LG Display는 단순히 OLEDoS 전시 이외에 OLEDoS기술과 Light field 기술을 융합한 스마트 와치를 선보였고, 삼성디스플레이는 백색OLED+칼라필터와 적, 녹, 청 발광층을 패터닝한 RGB 기술 등 OLEDoS를 구현할 수 있는 두 가지 대표적 기술이 적용된 패널을 선보임
- ETRI의 경우 마이크로 디스플레이 자체를 전시하기 보다는, 자체 개발한 OLEDoS VR 기기에 적용한 다초점 방식의 OLED 디스플레이를 선보였고, RAONTECH에서는 다양한 크기 및 디스플레이 모드의 마이크로 디스플레이를 전시하였음
- 프라운호퍼 연구소에서는 기존에 선보였던 VR용 초고해상도 OLEDoS, AR용 OLEDoS, 초저소비전력 OLEDoS를 전시하였을 뿐만 아니라, AR 기기의 광학계를 단순화 할 수 있는 투명 OLEDoS도 같이 전시하여 매우 다양한 OLEDoS 포트폴리오를 구성하고 있음을 확인함

□ 주요 발표내용(종합)

- 학회 첫날 진행된 Tutorials 세션에서는 서강대 강문성 교수가 “Patterning Quantum Dots through Photolithography” 라는 주제로 초고해상도 디스플레이를 위한 양자점 패터닝에 대한 강의를 진행함
- Workshops 세션에서는 DSCC에서 AR/VR 디스플레이 기술 트렌드를, 서울대 박재형 교수가 AR/VR 디스플레이용 광학계를, Merck Performance Materials에서 AR/VR 기기를 위한 소재를, 한양대 임재명 교수가 마이크로 디스플레이용 드라이버 IC에 대해 발표하여

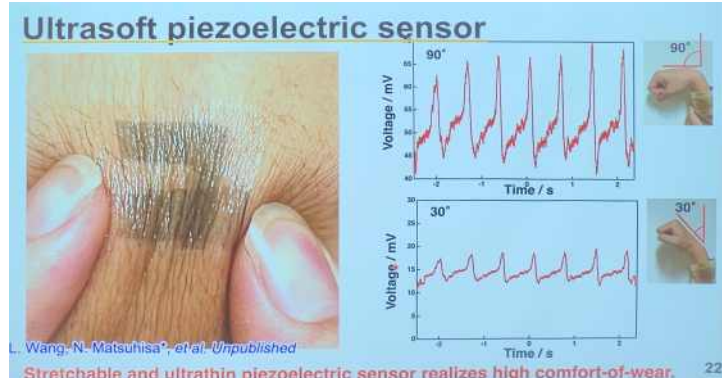
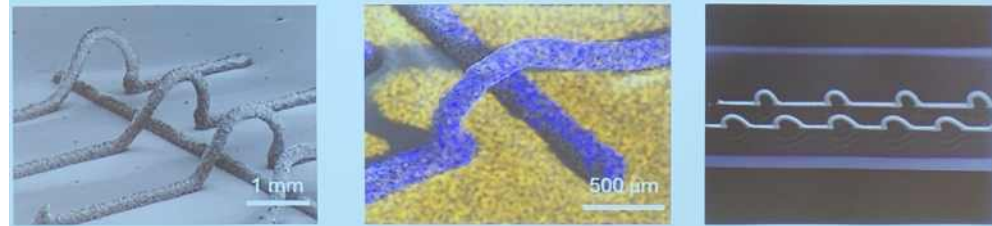
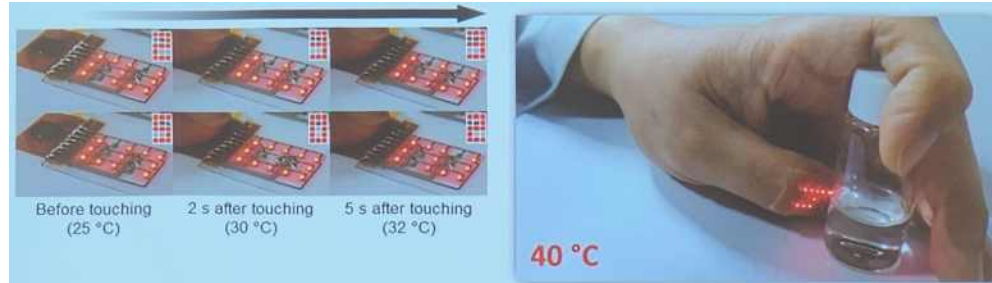
AR/VR 디스플레이 및 마이크로 디스플레이에 대한 관심이 높은 것을 확인할 수 있음

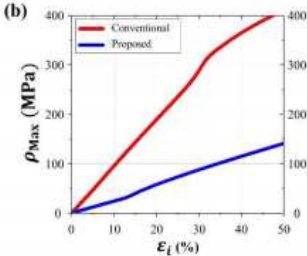
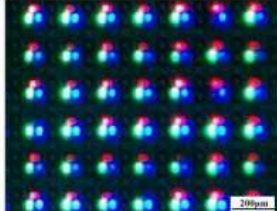
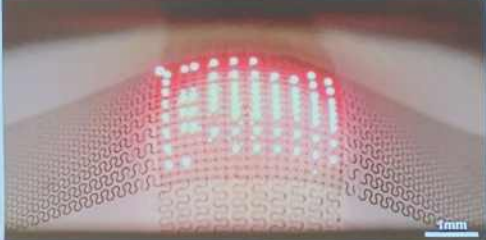
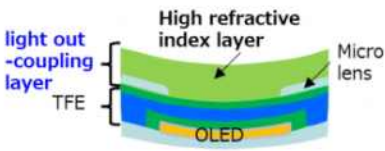
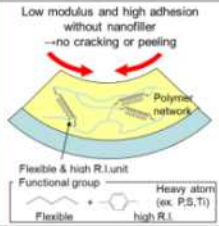
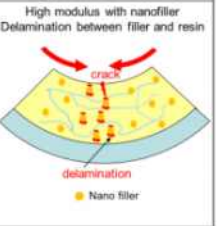
- Metrology and Inspection for Micro Display 세션에서는 VR 기기 디스플레이의 측정 방법 및 마이크로 LED 등의 검사 및 불량 검출 등에 대한 발표가 있었음
- Fraunhofer IPMS 에서는 마이크로 디스플레이용 28 nm CMOS 백플레인 기술을 발표하며 2.5 um 피치가 가능하여 고해상도 구현이 가능함을 강조하였고, Frame based와 Memory based 구동 기술을 결합하여 성능과 파워를 모두 만족할 수 있는 구동 기술을 제안함
- APS Inc.에서는 초고해상도 디스플레이를 위한 다양한 기술을 소개하며, APS의 Laser FMM 패터닝 공정(4 um Holes)에 대해 설명하였고, 하부 전극인 ITO/Ag/ITO 전극 에칭 방식 및 FMM 기반의 3,000 ppi OLED 마이크로 디스플레이에 대해 발표함
- 베이징 공대에서는 페로브스카이트 양자점을 photolithography 공정을 이용하여 10 um 두께로 2,450 ppi 까지 패터닝을 하여 PL 방식의 초고해상도 디스플레이 응용이 가능함을 설명함
- Meta에서는 MR 디스플레이 기술 트렌드에 대해 설명하며 이를 위한 OLED 마이크로 디스플레이와 고해상도 LCD 디스플레이 기술에 대해 발표함
- Fraunhofer IPMS에서는 Semi-Transparent 한 CMOS 백플레인을 적용하여 투명한 OLED 마이크로 디스플레이 기술에 대해 발표하였고, 이는 마이크로 디스플레이 자체가 optical combiner 역할을 하며 exit pupil expander를 제거하여 Near-to-Eye 디스플레이의 광효율을 향상시킬 수 있음을 강조함
- OLEDWorks에서는 XR기기를 위한 multi stack OLED frontplane 기술에 대해 소개하며, WUXGA 패널에 RGBB (5.5 um x 5.5 um) 화소 구조를 적용하여 120 Hz 구동까지 가능하고, SXGA 패널은 9.6 um x 9.6 um 의 픽셀 피치로 90 Hz 구동이 가능함을 설명하였고, 특히

Tandem 구조에서 화소 간 전기적 간섭으로 인한 색상 왜곡 문제를 OLEDWorks 만의 기술로 해결하여 OLED 마이크로 디스플레이용 우수한 Tandem OLED 구조를 개발하였음을 발표함

- OLEDON에서는 자체 개발한 plane 소스 및 증착 방식을 이용하여 10,000 ppi RGB tandem OLEDs 구현이 가능함을 설명하였고, 증착 시스템에 대해 설명함
- 한양대 권오경 교수는 초고해상도 OLEDs 마이크로 디스플레이의 관련 human factor와 연관하여 기술적 이슈에 대해 설명하였고, Meta에서는 XR기기를 위한 디지털 드라이빙 백플레인 기술에 대해 설명함
- 라온텍에서는 XR시스템의 디스플레이 컨트롤러관련 MIPI D-PHY/LVDS Combo Receiver Design에 대해 발표함
- 대만 Nat' l Yang Ming Chiao Tung 대학에서는 박막 기반의 청색 마이크로 LED가 사파이어 기반의 마이크로 LED보다 더 우수한 성능을 보임을 발표함
- 서울대 이태우 교수는 PL용 페로브스카이트를 3,000 ppi 까지 패터닝 가능함을 발표하였고, 라온텍에서는 마이크로 디스플레이 관련 In-Cell Up-Scaler 기술에 대해 소개하며 소비전력 저감을 강조하였고, Foveated Rendering 기술에 대해서도 발표함

1. Free-Form

구분	주요내용
플렉시블 디스플레이 소재/부품	[F06-1] Ultrasoft sensors and displays that can conform to skin wrinkles (The Univ. of Tokyo, JP) - 피부 밀착형 전자 소재를 활용한 웨어러블 디스플레이 및 센서 개발 * 피부 밀착형 디스플레이 구현을 위한 초박형(~6μm), 전극재료(PEDOT/PSS) 및 기판 폴리머 소재를 통한 이질감을 최소화 할 수 있는 웨어러블 전자 소재 개발  * 스트레처블 센서 어레이를 활용한 압전 센서 사례 Ultrasoft piezoelectric sensor  Stretchable and ultrathin piezoelectric sensor realizes high comfort-of-wear.
플렉시블 디스플레이 소재/공정기술	[F06-2] Omnidirectional Printing of Intrinsically Soft Interconnects for Free-Form Displays (Korea Univ.) - 탄성 전도체 소재를 3D 프린팅 하여 부착형 디스플레이 및 바이오메디컬 디바이스에 활용할 수 있는 프린팅 기술 개발 * 프린팅 공정을 통해 저온, 비진공 환경에서 3차원 전도성 소재를 최소 선폭 100μm 미만과 150% 이상의 뛰어난 신축성 달성  * 피부 부착형 mini LED 디스플레이에 이 기술을 적용하여 온도를 시각화할 수 있는 피부 부착형 웨어러블 디바이스 시연  Before touching (25 °C) 2 s after touching (30 °C) 5 s after touching (32 °C) 40 °C

구분	주요내용									
플렉시블 디스플레이 소자	[F06-3] Novel Stretchable Interconnect Structure and Its Display Application (ETRI) - Serpentine line 형태의 3면을 이용할 수 있는 신규 상호연결 구조를 개발 * 기존 전극 대비 3면을 이용해 좁은 선폭과 200% 인장에도 안정적인 전극특성을 보임. * serpentine 형태의 신규 상호연결구조로 2/3차원 스트레처블 디스플레이 구현 (a) Conventional Proposed (b)  (c)  Fig. 1. (a) Comparison between conventional and proposed structure, (b) Changes in maximum stress of interconnects against elongation, and (c) Full-color uLED transferred stretchable display with over 100PPI.  									
	플렉시블 디스플레이 소재	[F06-4] Development of High Refractive Index and Foldable Material for Inkjet Printing (Panasonic Ind., JP) - 폴더블 디스플레이의 광추출층(Light Out-Coupling Layer)에 요구되는 3가지 특성 (1) 잉크젯 박막 코팅, (2) 고굴절율(High R.I. 1.70), (3) 200k회 이상의 접힘성(in-fold, R=1mm) 등을 만족시키는 재료의 개념을 제안 - 재료개념: 에틸렌기/긴 탄화수소기는 저점도와 탄성을/벤젠기는 고굴절율 등의 기능을 부여함. light out-coupling layer High refractive index layer Micro lens TFE OLED  Fig. 1. Schematic diagram of the light out-coupling layer Table 1. Material concept <table><tr><th></th><th>Our material</th><th>Conventional material</th></tr><tr><td>Material Composition</td><td>Unique high R.I. monomer nano-filler free</td><td>Low viscosity monomer R.I. 1.5 + high R.I. nano filler R.I. >2</td></tr><tr><td>Schematic diagram</td><td>Low modulus and high adhesion without nanofiller →no cracking or peeling</td><td>High modulus with nanofiller Delamination between filler and resin</td></tr></table>  		Our material	Conventional material	Material Composition	Unique high R.I. monomer nano-filler free	Low viscosity monomer R.I. 1.5 + high R.I. nano filler R.I. >2	Schematic diagram	Low modulus and high adhesion without nanofiller →no cracking or peeling
	Our material	Conventional material								
Material Composition	Unique high R.I. monomer nano-filler free	Low viscosity monomer R.I. 1.5 + high R.I. nano filler R.I. >2								
Schematic diagram	Low modulus and high adhesion without nanofiller →no cracking or peeling	High modulus with nanofiller Delamination between filler and resin								

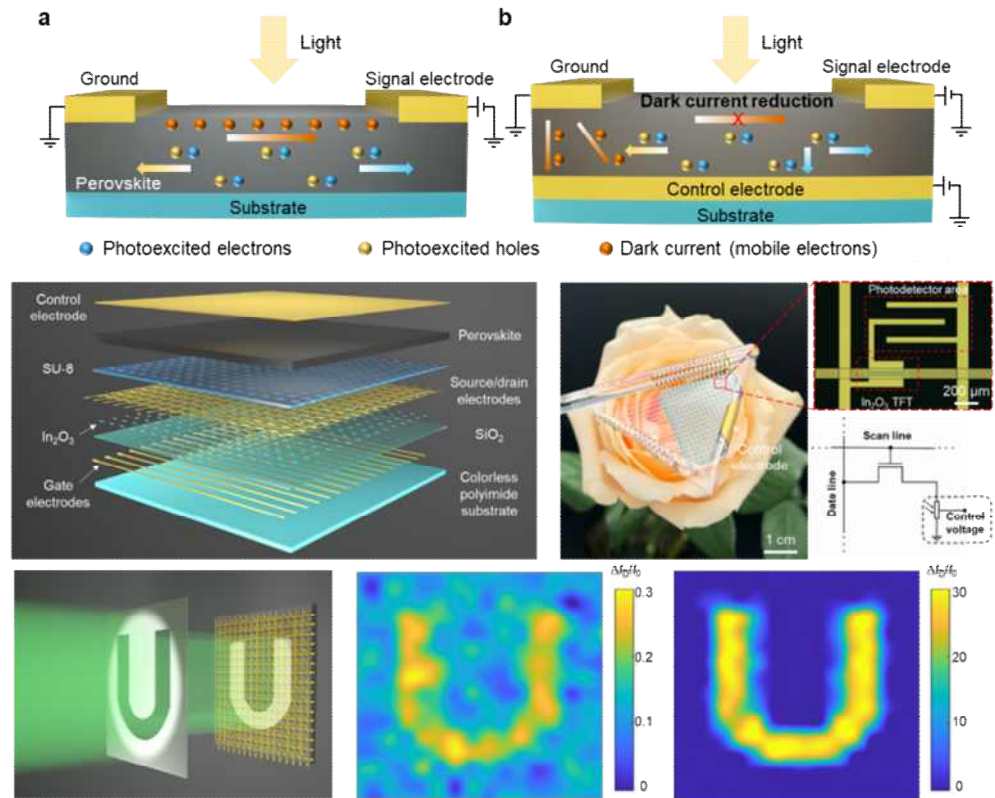
플렉시블
디스플레이
BP/소자/센서

[F14-2] Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors Based Active-Matrix Photodetector Arrays (Westlake Univ., CN)

- AM-Perovskite 광검출기 구조상 조절 전극(control electrode)을 도입하여 암전류이동(dark current drift)을 제거한 신기술을 개발 (Nat. Comm., 14, 4961(2023)에 대한 구두발표)

* cPI기판에 광검출기 소자를 형성하여 낮은 광세기(500 nW/cm^2)에도 높은 대비의 이미지 구현 능력을 보임.

* a: 비교용 페로브스카이트 AM광검출기, b: 신규 페로브스카이트 AM광검출기



플렉시블
디스플레이
BP/소자/열관리

[F14-3] Hydrogel-Elastomer Hybrid Platform for Effective Heat Dissipation based on Evaporative and Radiative Cooling in Wearable Devices (Seoul Nat'l Univ.)

- 웨어러블 소자의 열관리 측면에서 탄성체 (Polydimethylsiloxane elastomer) 플랫폼을 탄성체-하이드로젤(Boron nitride/poly(vinyl alcohol) hydrogel) 플랫폼으로 변경하여 녹색 LED 구동 시, 최대온도보다 약 $\sim 6^\circ\text{C}$ 를 낮춘 결과를 발표함.

* 소자 발열에 의한 화상 위험성을 완화하고 소자의 성능과 수명 개선 기대.

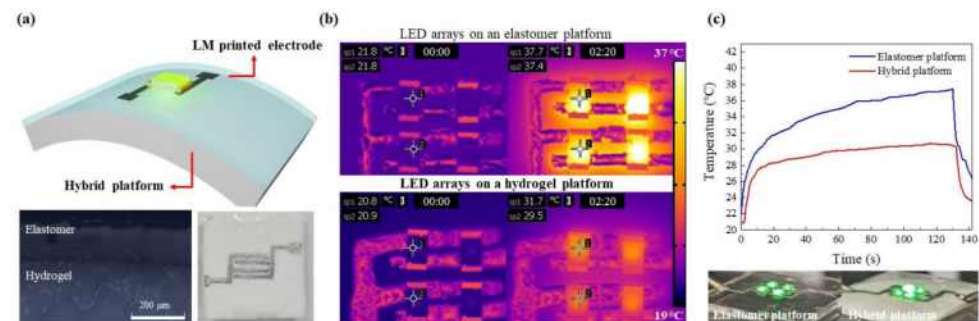


Fig. 1. (a) Conceptual diagram and side/top view of BN/PVA-PDMS hybrid platform, (b) Heat generation IR images of green LED arrays on the hybrid platform and PDMS reference platform, (c) Temperature graph of each green LED arrays by time and photograph of emitting LED arrays.

플렉시블
디스플레이
검사기술

[F06-5] Enhancing Foldable Display Analysis: Integrating Cross-Sectional and Three-Dimensional DIC Techniques (Seoul Nat'l Univ.)

- 폴딩 검사 결과(Strain Distribution)를 분석하는 시뮬레이션 도구인 2D 및 3D 디지털이미지보정 (DIC) 기술을 개발.

* 기존의 유한성분법(FEM)으로 시뮬레이션할 수 없는 복잡한 재료 행동 분석이 가능하여 FEM시뮬레이션의 정확도 향상에 기여할 수 있음.

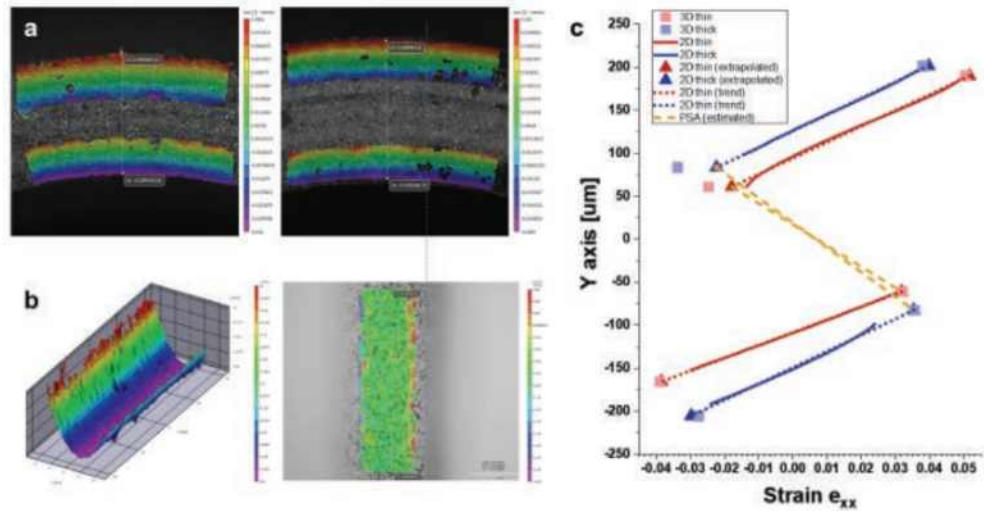


Figure 1. (a) Color-mapped image of the results from a two-dimensional cross-sectional DIC measurement, (b) Results of three-dimensional DIC measurement: (left) mapped on a 3D surface and (right) mapped on a top view 2D surface, (c) Comparison of 2D-DIC and 3D-DIC measurement data.

플렉시블
디스플레이
BP/소자

[F14-1] High Throughput and Performance InZnAlO TFT on Polyimide Substrate via Atmospheric Pressure Spatial-ALD (Hanyang Univ.)

- IZAO 산화물 TFT공정에 sputtering의 단점을 보완하고 ALD의 단점인 생산성이 개선된 Spatial-ALD방식으로 InZnAlO TFT를 개발

* 공정상 Al subcycle은 2회차로 형성된 IZAO TFTs의 특성이 최적화됨.

* 가혹한 1mm반경 벤딩테스트 50k회 까지 양호한 ΔV_{th} , ΔSS , $\Delta Mobility$ 등을 보임.

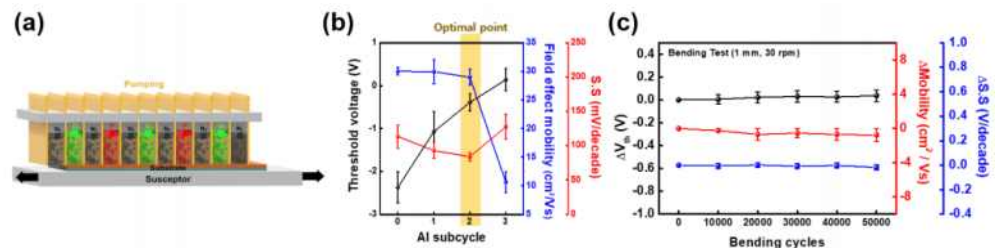
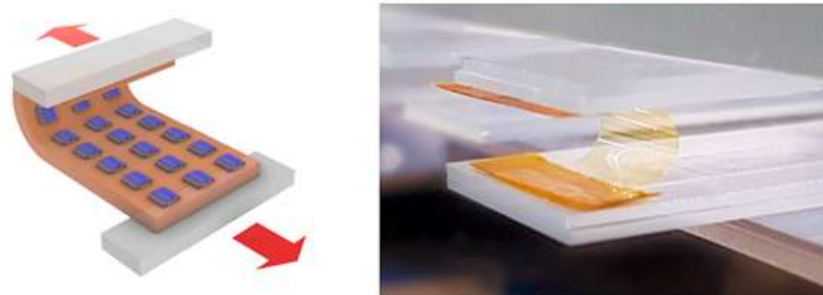


Fig. 1. (a) AP S-ALD system scheme, (b) Electrical performances of AP S-ALD InZnAlO TFT on Al sub-cycle, (c) Electrical parameter variations as a function of bending cycle.

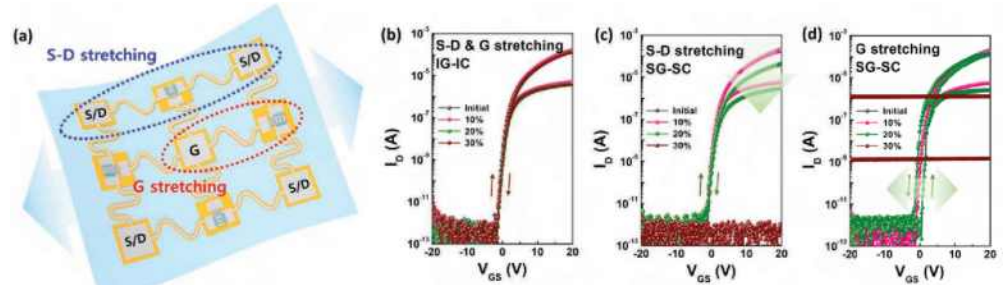


AP S-ALD-fabricated InZnAlO TFTs: (a) Schematic illustration and (b) photograph during mechanical bending test ()

플렉시블
디스플레이
BP/소자

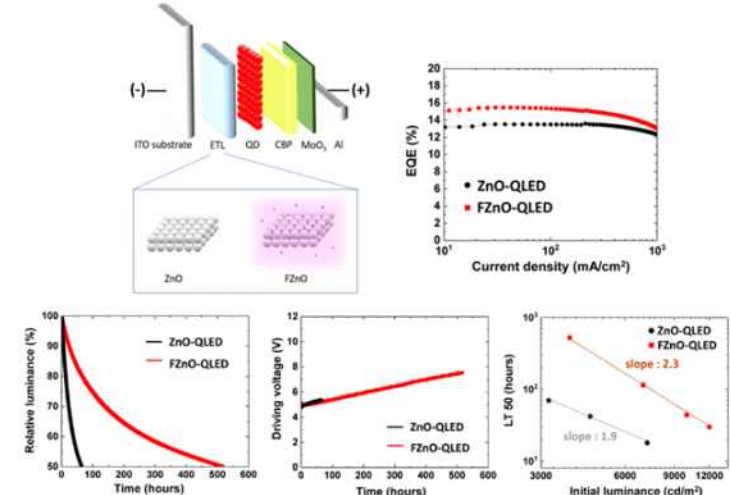
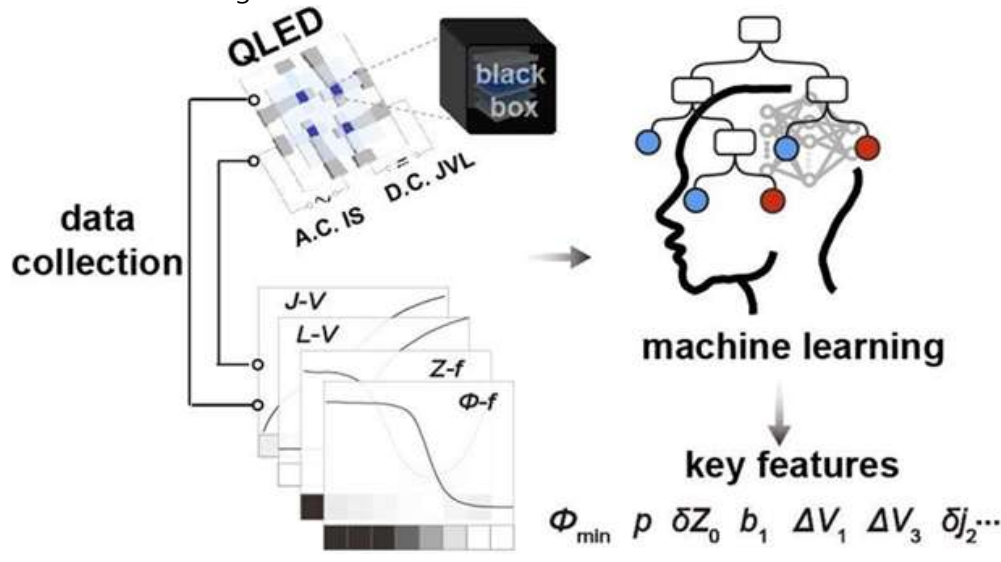
[F14-4] Effect of Elongation Stress on Island-Bridge Structural Oxide TFT with Metal Interconnects for Stretchable Electronics (Hanyang Univ.)

- 아일랜드-브릿지구조의 산화물TFT의 연신 스트레스에 따른 TFT특성을 발표
- * 스트레처블기판위 S/D전극과 G전극을 동시에 평가할 수 있는 구조를 구현 (a)
- * 4가지 다른 특성 확인법: (1) IG-IC(연결되지 않은 상태)-변화 없음, (2) IG-SC (단지, S/D 연결 브릿지만 고려), (3) SG-IC(단지, G 연결 브릿지만 고려), (4) SG-SC (모든 S/D/G 연결 브릿지를 고려)-연신 시, 이동도 및 on 전류 하락 발생
- * 연신 스트레스에 근거한 브릿지 저항과 TFT성질 사이의 관계를 설명하고자 함.

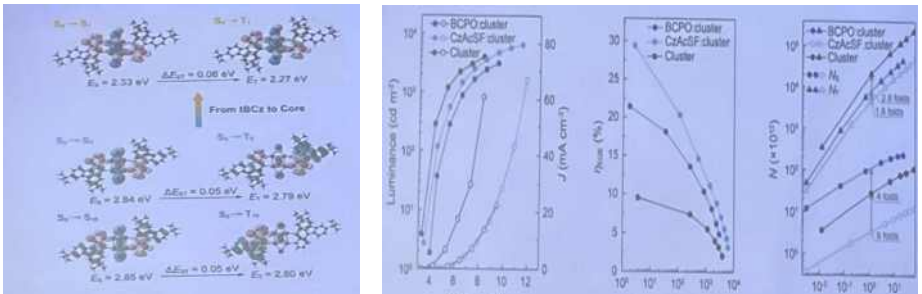
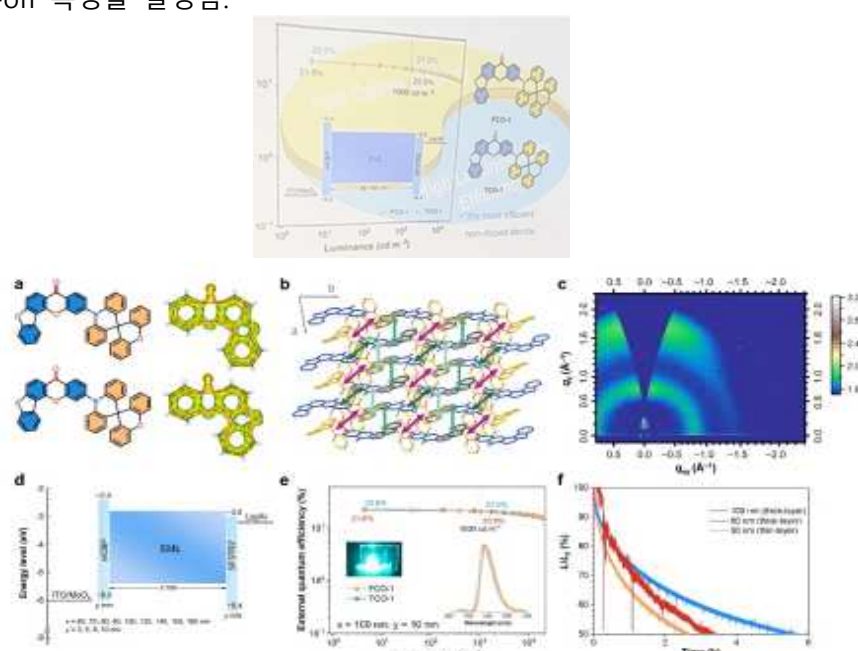


(a) S/D 및 G 브릿지 방향 평가방법; 초기(0), 10, 20, 30% 스트레칭시, S-D스트레칭시 (b)IG-IC 및 (c)SG-SC; G-스트레칭시 (d) SG-SC 결과 비교

2. QD

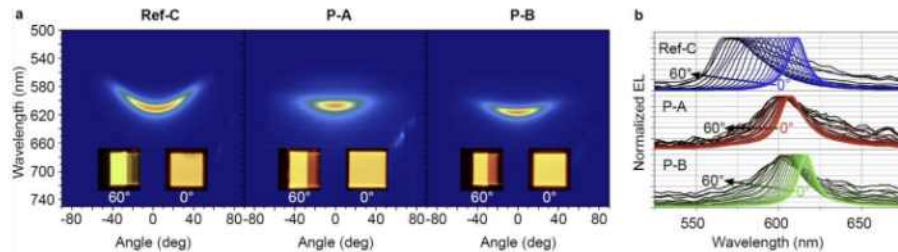
구분	주요내용
QD	The Influence of Charge Transport Layers on the Electroluminescence Stability of QLEDs (University of Waterloo) - QLED 수명 향상은 가장 중요한 이슈임. - 본 발표에서는 ETL 및 HTL 제어를 통해 QLED 소자를 획기적으로 향상시킨 연구를 보고함. 특히 ETL에 fluorine 처리를 통해 trap을 제어할 수 있었으며, 그에 따라 charge accumulation 방지를 통해 소자 수명을 획기적으로 향상시킴. 
QD	Devices Analysis of QLED: Methodology and Models (Beijing Institute of Technology) - BIT 연구팀은 AI 및 machine learning을 도입하여 소자 수명을 예측 및 향상시키는 연구결과를 보고함. - 소자수명에 영향을 끼칠 것으로 예측되는 주요 인자를 실험적으로 확보한 뒤 machine learning을 수행하여 실질적인 결과를 도출함. 

3. OLED 소재

구분	주요내용
OLED Materials I: Advances in Emitting Materials	Host Engineering for Efficient Cluster Light-Emitting Diodes (Heilongjiang University, Harbin) - 클러스터($[X]_2Cu_4I_4$) 소자의 외부 양자 효율(EQE)을 극대화하기 위한 host engineering 전략 보고. * 클러스터 코어→리간드 엔지니어링을 통해 EQE를 ~8%까지 끌어올림. * TADF host engineering으로 한계치에 가까운 약 30%의 효율성을 실현함. * 클러스터가 단순히 triplet에서 singlet으로의 up-conversion 경로를 추가할 뿐만 아니라 TADF 호스트를 통해 RISC를 일으키며 EML 내부와 계면의 결함을 차단한다는 결과를 보고. 기존 배위체 인광 기반 소자보다 뛰어난 성능 및 실용성 강조. 
	Efficient blue delayed fluorescence molecules with ultrafast bipolar charge transport for simplified non-doped thick-layer organic light-emitting diodes (South China University of Technology, Guangzhou) * 고리형 결합 카보닐 계열 전자 acceptor와 비편재화된 π 전자, 스파이로-아크리딘 전자 donor를 포함하는 2종의 청색 물질을 보고. * 2종의 물질을 사용한 thin non-doped OLED에서 최대 30.2% 및 40.6%의 EQE를 달성하였으며 thick non-doped OLED에서는 23.0%의 EQE와 낮은 roll-off 특성을 달성함. 

Polaritonic OLEDs with assistant strong-coupling layers: a new approach to sub-20nm emission linewidth in OLED displays (University of Cologne, Greinstr.)

- 마이크로 캐비티와 엑시톤 상태를 혼성화하여 폴라리톤 상태를 만들 수 있음을 보고.
- * 기존의 마이크로 캐비티 구조의 OLED는 좁은 발광스펙트럼을 갖지만 시야각에 의존하는 단점이 있음.
- * Polaritonic OLED: recombination 영역에서 떨어진 곳에 있는 assistant strong-coupling layer을 사용하면 20 nm 이하의 FWHM, @60°에서 10 nm 이하의 시야각 이동을 지닌 효율적인 OLED를 발표함.



Deuteration of OLED Materials: Performance, Scalability, Sustainability (Lara-Isabel Rodriguez, Merck Electronics KGaA, Germany)

- OLED 재료의 중 triplet matrix material TMMs와 electron blocking layer(EBL) 수소화를 통한 소자 수명 증대를 보고.
- OLED의 PL 스펙트럼, 굴절률, 전류밀도-전압 특성 등을 비교한 결과 기존 OLED 특성에 유의미한 영향을 미치지 않음을 확인함.
- 소재의 대량 제조 가능성 및 공정 효율성을 강조하며 중 수소화의 경제적 가능성을 제시함.

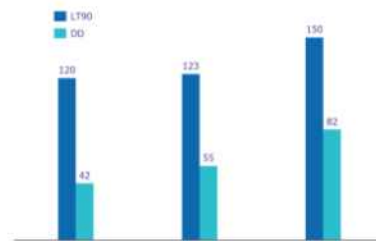
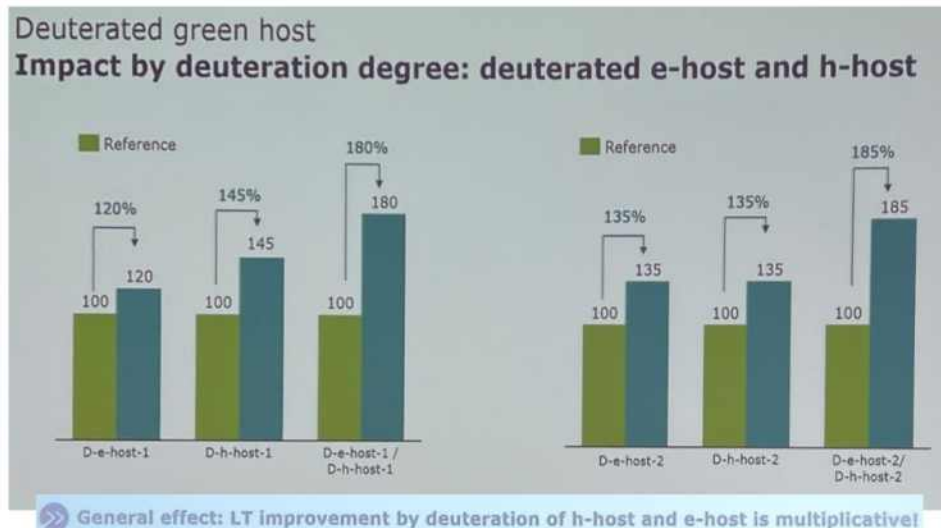
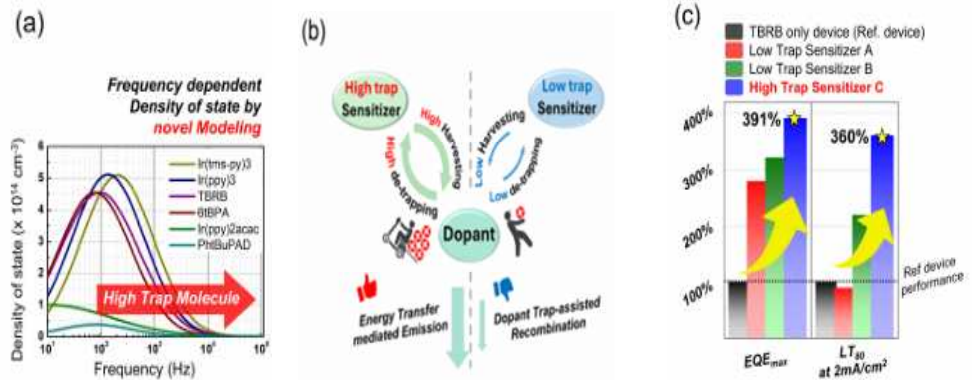


Fig. 1. Correlation between deuteration degree (DD, %) and lifetime improvement (LT90, %)



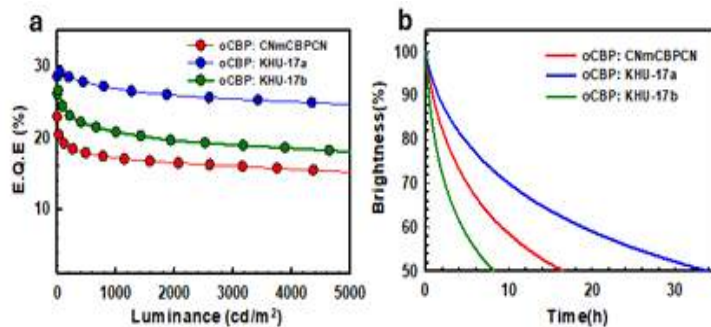
Key Requirements of Sensitizer for Efficient Phosphor-Sensitized Fluorescence :Energetic Landscape Generated by Sensitizer and Emitting dopant (Sungkyunkwan Univ. and Chung-Ang Univ.)

- 높은 trap reactivity를 갖는 소재가 PSF OLED의 효율 증대를 위해서 필요함을 보고함.
- Frequency(energy)-dependent density of state (FD-DOS)를 통해 ir(tms-py)3가 TBRB-based PSF의 sensitizer로 채택.
- TBRB only device 대비 PSF OLED device는 EQE는 391%, 수명은 360% 향상을 달성함을 보고.



Regioisomeric High Triplet Host Materials Enable Exceptional Lifetime For Blue Phosphorescent organic Light-Emitting Diodes (Young Hun Jung and JangHyuk Kwon, Kyung Hee univ, Korea)

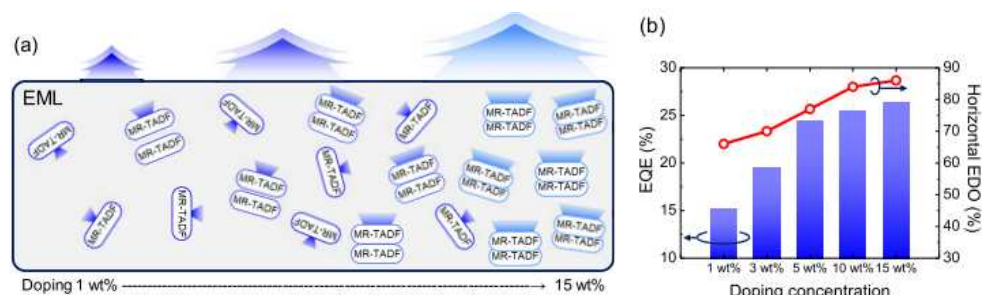
- Blue phOLED에서 성능을 향상을 위해 높은 triplet 준위를 갖는 host 물질이 필요.
- Quantum chemical과 Molecular dynamics 시뮬레이션을 통해 높은 triplet 준위를 가지는 2종의 n-type host 보고.
- KHU-17a 와 KHU-17b는 regioisomeric의 관계를 가짐.
- oCBP는 exciplex를 형성하고 KHU-17b는 exciplex를 형성하지 않음.
- oCBP와 KHU-17a, KHU-17b를 혼합한 host는 기존의 것보다 높은 효율성, 높은 수명, 낮은 turn-on voltage를 가짐.



Blue Thermally Activated Delayed Fluorescence Excimers with High External Quantum Efficiency and Enhanced Horizontal Emitting Dipole Orientation (Sungkyunkwan Univ. and Seoul Nat'l Univ.)

- TADF type의 fused indolo[3,2,1-jk]carbazole 유도체 화합물을 도핑하여 excimer 형성 청색 OLED를 보고함.

- excimer device(15wt%)는 최대 외부 양자 효율이 26.3%로, monomer prevalent device(1wt%)가 15.2%인 것과 비교하여 향상, excimer device는 473nm의 피크 파장과 (0.13, 0.19)의 색 좌표를 나타내어 이 발표는 청색 발광과 높은 외부 양자 효율(26.3%)을 가진 최초의 excimer TADF OLED 달성.



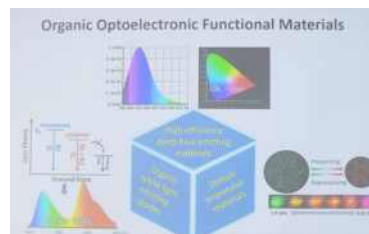
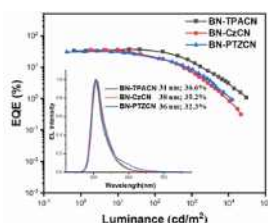
High-Efficiency Organic Light-Emitting Materials with Narrowband Emission (Zhuang Cheng and Ping Lu, Jilin Univ, China)

- MR-TADF 발광체 설계 : BN-TPACN, BN-CzCN, BN-BTZCN 합성

* 3-(diphenylamino)benzonitrile, 3-(9H-carbazol-9-yl)benzonitrile, 3-(phenothiazine)benzonitrile를 MR framework에 도입한 3종의 청색 MR-TADF를 보고함.

* 주변 페닐 유도체의 도입이 stretching 진동을 억제하고 분자 간 상호작용을 방지, 좁은 반치폭과 높은 양자 효율을 얻는데 기여함.

그중, BN-TPACN은 36.6%의 높은 EQE와 31nm의 FWHM으로 우수한 성능을 달성.

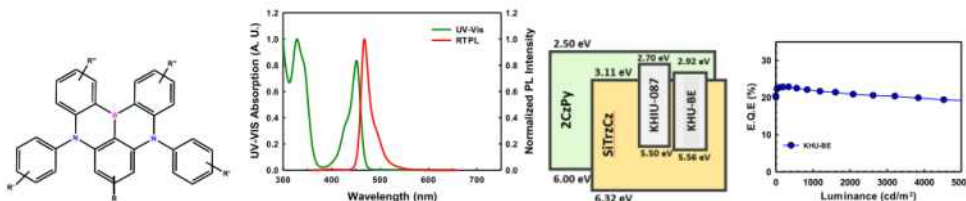


A Narrowband Stable Blue MR-TADF emitter via combining DABNA and Heterocyclic Analogous (Tirupati Mehana and JangHyuk Kwon, Kyung Hee Univ., Korea)

- MR-TADF 발광체 설계 : KHU-BE 합성

* DABNA 구조에 heterocyclic alignment를 하여 boron의 peripheral position에 heterocycle electron donor 도입

* heterocycle electron donor는 MR-effect를 향상시키며 이는 470 nm의 발광 파장과 21 nm의 좁은 반치폭을 달성. 이를 사용한 HF 소자는 22.8%의 효율과 21.8%의 1,000 nit에서의 낮은 roll-off 특성을 가짐.

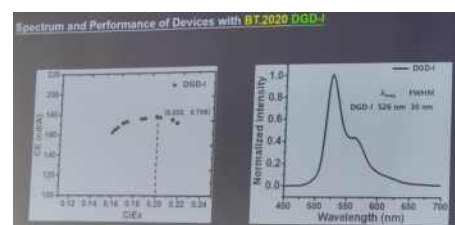
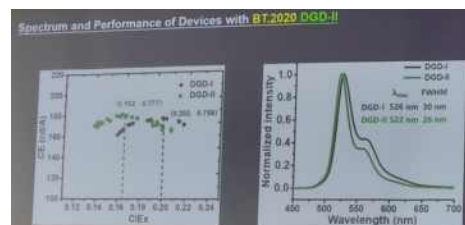
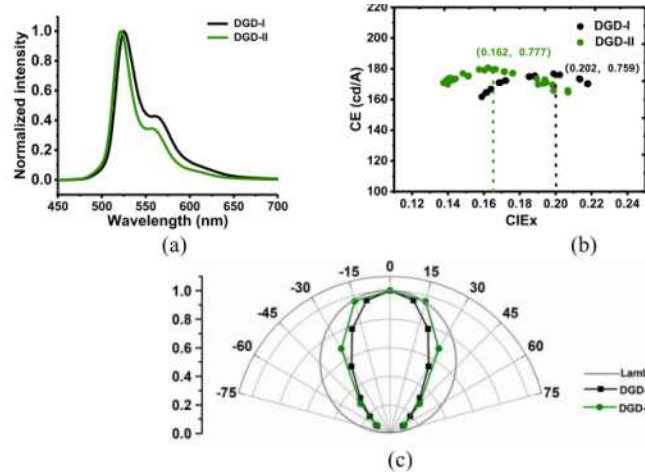


High Performance Green Phosphorescent Emitters Suitable for BT.2020 Color Gamut (Jing Wang, Summer Sprout Tech. Co. Ltd., China)

-BT2020 OLED CIE(x,y) = (0.170, 0.797)를 달성하기 위하여, 녹색 인광 (DGD-I,II) 개발/보고함.

* DGD-I top emission OLED 소자 성능은 CIE(x, y)=(0.170, 0.777) 171 cd/A의 CE 달성. 그러나 CE_max는 CIE(0.202, 0.759)로 목표 색상에서 벗어남.

* DGD-II top emission OLED 소자 성능은 발광 파장 522 nm, FWHM 26 nm CIE (x, y) = (0.162, 0.777)에서 10 mA/cm²에서 182 cd/A의 높은 전류 효율 (CE_max)을 달성. 1,000 h 이상 수명을 달성.

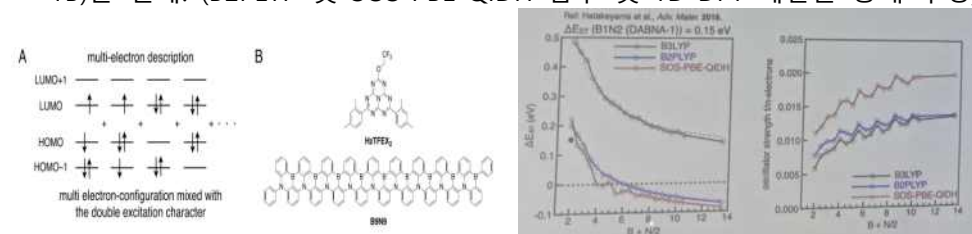


Luminescence of the Molecules with Double Excitation Character (CEMS, Japan)

-Double excitation 특성을 가진 분자의 발광특성을 다루어 OLED의 효율을 크게 향상시킬 수 있음을 보고.

* 음의 ΔE_{st} (HzTFE₃에서 -11meV)를 나타내는 헵타진 분자를 설계하고 합성하여 기존 TADF OLED보다 빠른 전자 발광 감소 및 높은 EQE를 확인.

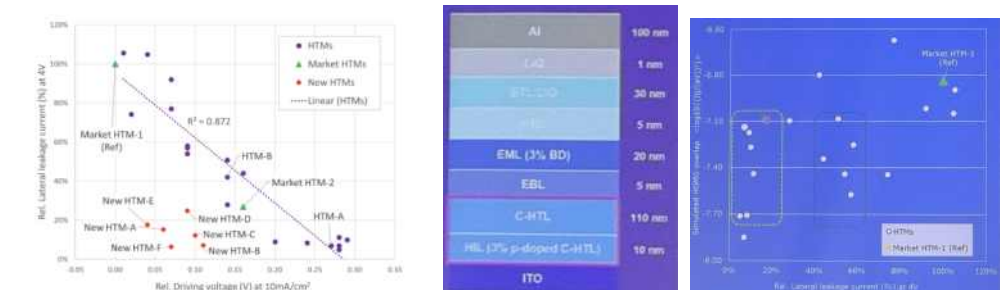
* 음의 ΔE_{st} 를 가지기 위해 상호작용값 K는 가능한 한 작아야 하고, 계산적으로 음의 ΔE_{st} 와 큰 진동자 강도를 가진 선형 사다리형 분자(B9N9, Figure 1B)를 설계. (B2PLYP 및 SOS-PBE-QIDH 함수 및 TD-DFT 계산을 통해 추정)



OLED Materials
Ⅲ : Emitting
Materials and
New Emission
Mechanisms in
OLEDs

Hole transport materials to control lateral current in OLED panel (Merck Electronics KGaA, Germany)

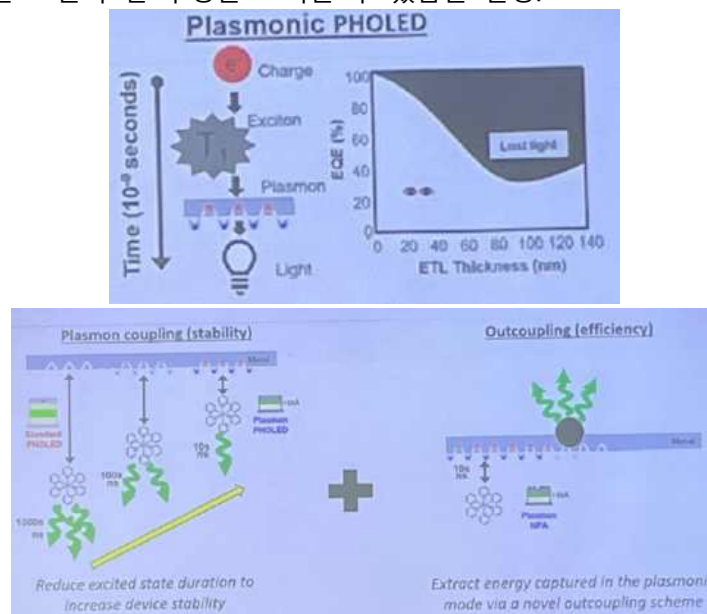
- OLED 패널에서 lateral current에 의해 발생하는 crosstalk issue를 해결하기 위해 새로운 Hole transporting material (HTM) 보고.
- * Blue 서브 픽셀에서 비활성 Red, Green 서브픽셀로의 전류 누설을 방지
→ Crosstalk ↓, 수명 및 전력 소비 저하 X



OLED Devices I:
Future
Perspectives
(Advancements
and Challenges)

OLEDs of Future(Michael S. Weaver (Universal Display Corp. USA))

- 미래의 display는 넓은 색 재현, 긴 수명, 높은 효율은 필요.
- Conventional PHOLED는 엑시톤이 빛으로 변환되는 것에 화학 물질의 영향을 받지만 Plasmonic PHOLED는 디바이스 구조의 영향을 받으며 이론적인 효율의 한계가 증가했음. 또한, Plasmonic PHOLED는 incoupling과 outcoupling에 의해 높은 효율과 긴 수명을 보여줄 수 있음을 설명.



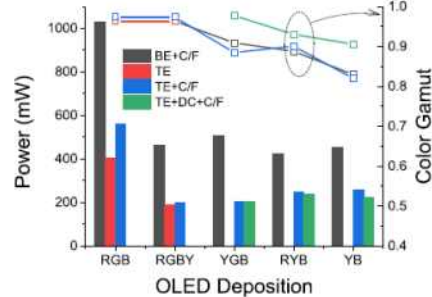
Synergetic Interface Engineering on Blue Perovskite Light-Emitting Diodes (Jianxin Tang, Macau Univ. of Science and Tech, China)

- Perovskite nanocrystals의 결정화 과정은 수소 결합의 상호작용에 의해 trap-mediated의 non-radiative 재결합 손실을 억제하며 조절되는 방식을 고안함. 해당 방식의 시너지 효과는 소자 수명과 스펙트럼 안정성을 개선하며 낮은 trap-state와 대면적 blue-perovskite 필름이 될 수 있음을 보고.
- sky-blue PeLED는 486 nm, 18.65% EQE를 달성, 스펙트럼 왜곡 없이 outcoupling 구조 결합 후 28%의 EQE를 달성.

OLED Devices I:
Future
Perspectives
(Advancements
and Challenges)

High-Efficiency and Enhanced-Color-Gamut RGBY AMOLED Display(Woo-Young So, Mike Hack, Eric Margulies, Michael S, and Julie J, Brown(Universal Display Corp, USA)

- 기존의 SBS 디스플레이에 비해 크게 줄인 전력 소비로 높은 색영역을 달성하는 서브 픽셀 RGBY AMOLED 디스플레이 구조를 제안함.
- YGB 구조는 색 전체 비율을 0.98로 개선하고, RGB OLED deposition의 50%인 204mW로 전력 소비를 낮춘 것을 증명.

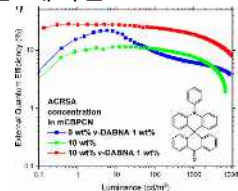
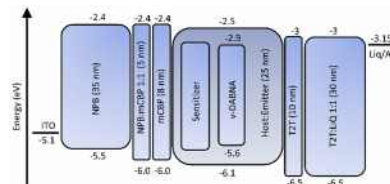


Short Legend	Description
BE+C/F	Red, green, and blue color filters(C/F) used for each bottom emission (BE) subpixel
TE	Each color is optimized for a top emission (TE) cavity without color filters
TE+C/F	red and green color filters used a TE cavity subpixel
TE+DC+C/F	A down-conversion (DC) layer and a color filter used for red or green subpixel

OLED Devices II:
Future
Perspectives
(Innovations in
OLED
Technology)

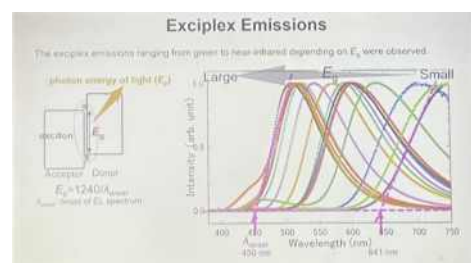
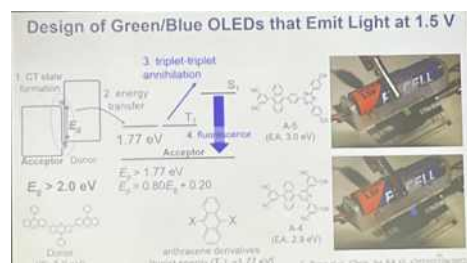
Key Design Rules for Ultra-Efficient Sensitisation in Hyperfluorescence OLEDs (Kleitos Stavrou, Duham Univ., UK)

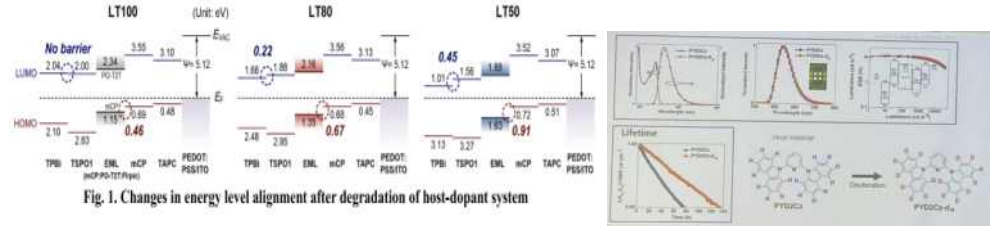
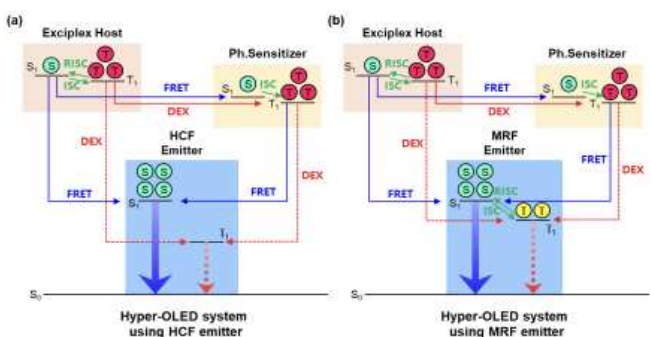
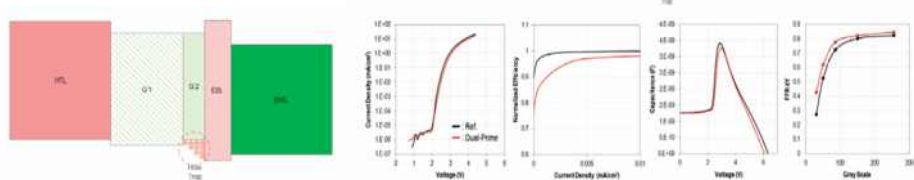
- HF OLED 소자에서 v-DABNA와 다양한 TADF sensitizer를 통한 최대 효율, 여기 스펙트럼 제한, 수명 향상을 보고함.
- * 세가지 sensitizer, DMAC TRZ, ACRSA, AZB-TRZ 연구를 보고함. 이중 ACRSA의 경우 순수 ACRSA 소자와 비교할 때 EQE가 3배 이상 증가한 28% 이상 달성.
- * 우수한 TADF 분자가 sensitizer에는 적합하지 않음(매개변수 차이), 따라서 TADF sensitizer 분자에 대한 새로운 설계규칙을 제시함.



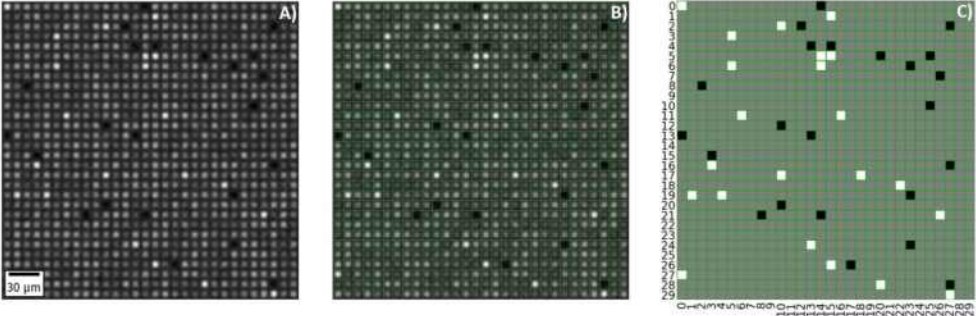
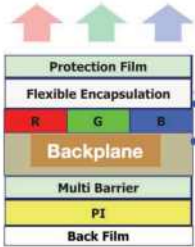
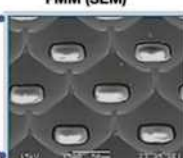
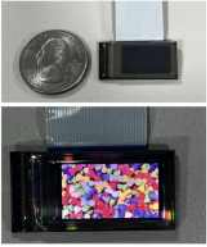
Tuning The Energy Levels of Exciplexes for Ultralow-Voltage Operation of Organic Light-Emitting Diodes (Hirohiko Fukagawa, Chiba Univ., Japan)

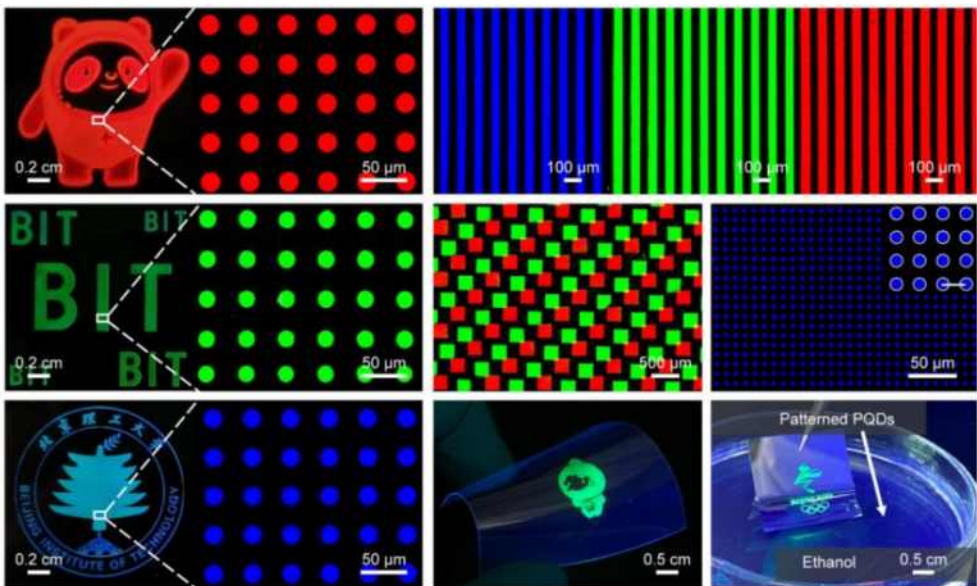
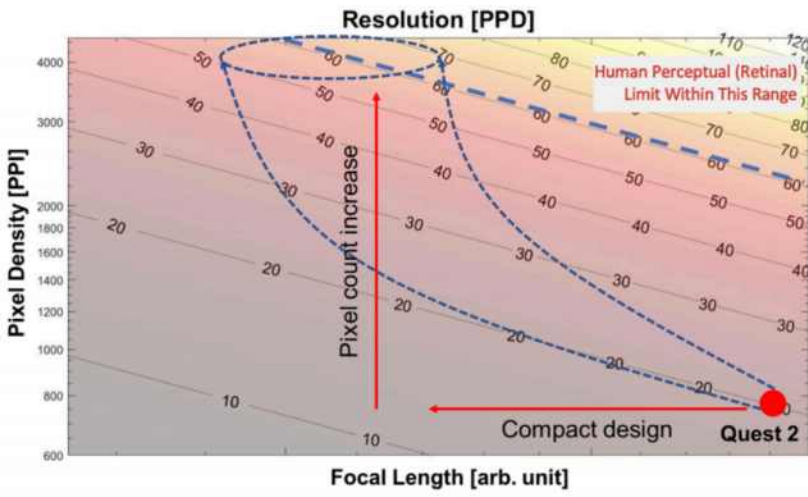
- OLED의 Operating Voltage를 줄이기 위해 초저전압 OLED에 적합한 D/A 분자 설계를 보고. Exciplex를 보여주는 D/A 분자 특성과 실제 에너지원 간의 상관 관계를 조사하여 $V_{on} = 1.0 \times (E_g - E_b) / q - 0.5$ 를 유도.
- 1.5V에서 빛을 방출하는 Blue, green OLED 발표

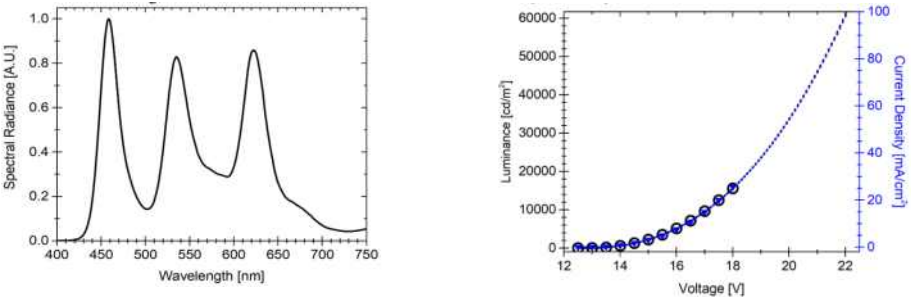
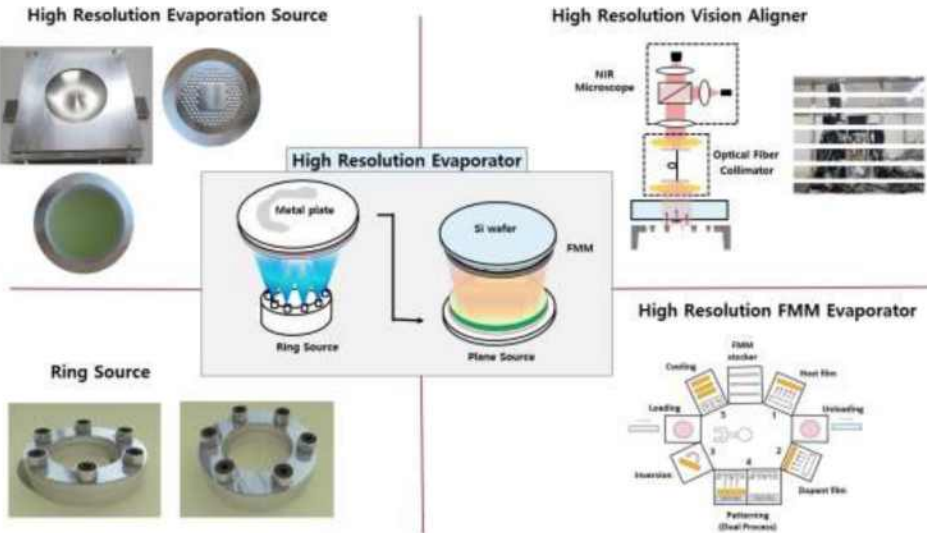


구분	주요내용
OLED Devices III: Comprehensive Analysis on Devices	Probing OLED Degradation Mechanism with Direct- and inverse-photoelectron Spectroscopy: Insights into Host-Dopant Systems and Deuterium Isotope Effects (Yonsei University) - 광전자 분광법을 이용해 전자 구조 변화를 세부적으로 분석하여 더 안정적이고 효율적인 OLED 개발 기여 가능성 제시. * 광전자 분광법을 통해 열화(Degradation) 후 OLED 장치에서 Host 및 Dopant 재료의 전자 구조 변화를 발견. * 중수소 동위원소가 진동수 및 zero-point 에너지 감소로 물리적/화학적 안정성이 증가하기 때문에 lifetime을 80시간에서 140시간으로 증가한 것을 확인했고, 이를 효과적으로 적용할 수 있는 열화가 큰 분자의 위치를 제시함.  Fig. 1. Changes in energy level alignment after degradation of host-dopant system
	Key Requirements for Blue Hyperfluorescent Organic Light-Emitting Diode (Samsung Advanced Institute of Technology ; SAIT) - hyperfluorescent-OLED는 sensitizer 물질을 사용하여 기존에 손실될 수 있는 에너지를 재활용하고 형광 방출체에 전달함으로써 고효율, 긴 수명 기대 가능. * 요구사항: PLQY <80%, Stokes shift >25nm, FWHM >30nm * 인광 sensitizer (Pt(II) 복합체)을 사용 및 EML로 형광(HCF) 또는 다중 공명 형광(MRF)을 이용하여 청색 OLED를 제작하여 고효율 OLED의 성공적인 가능성을 시사함.  Fig. 1. Schematic mechanisms for hyper-OLED system using HCF and MRF emitters.
	Enhancing First Frame Ratio in OLED Displays Through Dual-Prime Layer (Eun-Hyung Lee, LG Display) - Dual-Prime Layer (DPL) 구조를 OLED에 적용하여 First Frame Ratio (FFR)의 향상을 보고. * DPL 구조가 LTPO (Low-Temperature Polycrystalline Oxide) 기술을 사용하는 OLED 장치에 발생하는 hysteresis 문제를 완화, OLED의 active layer에 안정적인 전류주입을 제공. * DPL 구조 적용은 low grayscale 효율에서 현저한 개선점을 보이며, 균일한 밝기, 일관된 전하 분포 등 디스플레이 성능을 개선할 수 있음을 시사 

4. 마이크로 디스플레이

구분	주요내용
마이크로 디스플레이 검사	Photoluminescence-based optical inspection metrologies for GaN/InGaN uLED wafers (SEMILAB) - Photoluminescence를 이용하여 1~5 um의 작은 사이즈의 마이크로 LED를 웨이퍼에서 검사하는 기술에 대해 소개 
마이크로 디스플레이 구동 기술	CMOS integrated circuitry active-matrix backplane design for high-resolution XR microdisplays (Fraunhofer IPMS) - 300 mm process 기반의 28 nm 백플레인 공정을 적용한 0.18인치 마이크로 디스플레이 구현 - Memory-based 구동과 Frame-controlled 구동을 결합하여 성능과 파워적인 면을 모두 향상시킴 Memory-based  Frame-controlled   ▪ Low to high bandwidth interface ▪ Enabling high resolutions by very small pixels ▪ Embedded framebuffer enables flexible driving schemes ranging from memory-based to frame-controlled with framerate ranging from 0...480Hz ▪ Very high internal framerate of up to 10kHz to compensate optical effects ▪ Flexible number of grey levels to trade performance vs. power ▪ Deep sub-micron (28nm) CMOS is key enabler for new microdisplay architecture
마이크로 디스플레이 패터닝 기술	OLED Color Patterning Technologies for AR/VR and IT Displays (APS Inc.) - 적, 녹, 청 OLED 발광층을 FMM을 이용하여 패터닝 하였고, 이를 통해 0.7인치 크기의 3,000 ppi OLED 마이크로 디스플레이를 구현함.  FMM (SEM)  

고해상도 패터닝 기술	Direct in situ Photolithography of Perovskite Quantum Dots (Beijing Institute of Technology) - 적, 녹, 청의 Perovskite 양자점을 Photolithography 공정을 이용하여 2,450 ppi를 안정적으로 구현함. 																				
마이크로 디스플레이 기술	The trend of MR display technology (Meta) - MR 기기의 성능을 나타내는 다양한 지표와 이를 위해 필요한 디스플레이의 해상도에 대해 설명함. 																				
마이크로 디스플레이 측정	Evaluation of Energy Efficiency in Microdisplays for AR/XR/MR Wearable Devices (Shenzhen Sitan Technology) - AR/XR/MR 용 다양한 디스플레이의 효율 비교 후, Micro-LEDs 가 가장 우수함을 발표함. Table 1. Comparison of different display specifications <table><tr><th>Display solution</th><th>LCD</th><th>OLED</th><th>Micro-OLED</th><th>Micro-LEDs</th></tr><tr><td>Brightness(B) in nits</td><td>3,000</td><td>1,500</td><td>6,000</td><td>100,000</td></tr><tr><td>Power Consumption (PC)</td><td>100%</td><td>20%</td><td>20%</td><td>10%</td></tr><tr><td>Energy Efficiency (EE)</td><td>1.7</td><td>2.4</td><td>2.9</td><td>5.0</td></tr></table>	Display solution	LCD	OLED	Micro-OLED	Micro-LEDs	Brightness(B) in nits	3,000	1,500	6,000	100,000	Power Consumption (PC)	100%	20%	20%	10%	Energy Efficiency (EE)	1.7	2.4	2.9	5.0
Display solution	LCD	OLED	Micro-OLED	Micro-LEDs																	
Brightness(B) in nits	3,000	1,500	6,000	100,000																	
Power Consumption (PC)	100%	20%	20%	10%																	
Energy Efficiency (EE)	1.7	2.4	2.9	5.0																	

마이크로 디스플레이 프론트플레인	High Brightness Microdisplays Combining Multi-stack OLED Frontplanes with Advanced SXGA CMOS Backplanes (OLEDWorks) - OLED 마이크로 디스플레이용 6-stack 백색 OLED 및 전기적 간섭 감소를 통한 성능 향상에 대해 발표함. 
마이크로 디스플레이 프론트플레인	High Resolution Evaporator For 10Kppi RGB OLEDoS XR Displays (OLEDON) - 초고해상도 OLED 발광층 패턴링을 위한 증착기술에 대해 발표함. 
마이크로 디스플레이 백플레인	Challenging Issues on Ultra-High Resolution and High Frame Rate OLEDoS Microdisplays for Hyper-Realistic Metaverse Systems (Hanyang Univ.) - 사람의 다양한 인지기능을 바탕으로 몰입감이 높은 HMD 구현을 위해서는 12,000 x 8,000 해상도와 360 fps의 프레임 레이트가 필요하고, 이를 위해서는 매우 빠른 비디오 시그널 전송 속도가 필요함. - 이를 위해 Foveated rendering 기술과 through-silicon vias (TSVs), variable refresh rate (VRR)기술 등이 필요함. -
마이크로 디스플레이 백플레인	Next Generation Image Reconstruction Technology of Microdisplay for XR Glasses (RAONTECH) - Foveated Rendering 관련 라온텍에서 제안한 기술을 통해 저해상도 이미지를 고해상도로 reconstruction 하여 전송 bandwidth와 소비 전력을 10분의 1까지 줄일 수 있다고 설명함. 