

2 산화물 이중접합 기반 차세대 광트랜지스터 관련 연구 동향

글_이바울 석사과정·김찬호 학부연구생·김명길 교수 | 성균관대학교 신소재공학과

1. 서론

‘광(光) 융합기술’은 4차 산업혁명 시대에 상품의 부가가치를 획기적으로 높이고, 신제품 및 서비스를 창출할 핵심 기술 중 하나로 평가 받고 있다. 가까운 미래에 의료, 전자, 정보통신 산업과의 융합을 통해 광의료기기, 디지털 홀로그램 등 다양한 신시장이 개척될 것으로 예상된다. 광융합기술의 주요 분야로는 광센서(photosensors), 광트랜지스터(phototransistors), LED 등이 있으며, 전통적 방식의 광소자 대비 우수한 성능을 확보함과 동시에 저비용(low-cost), 저온(low-temperature), 대면적화(large-scale) 등 다양한 공정 특성을 요구하고 있다 [1-3].

광융합기술 고도화를 위한 고성능, 저비용 소자의 구현은 광신호 검출기(photo signal de-

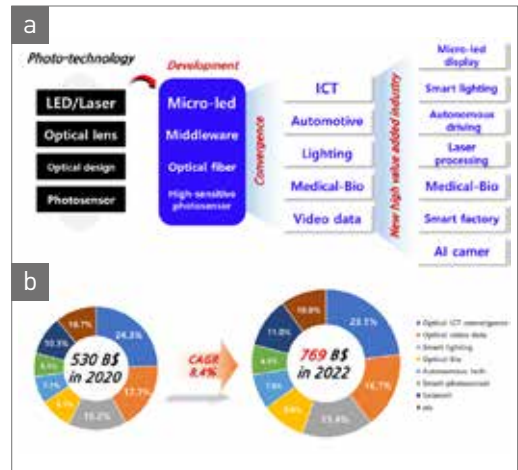


그림 1 ▶ (a) 광융합기술 전개도, (b) 광융합기술 시장 전망.

tor)를 이해하는 것으로부터 출발한다. 광신호 검출기는 빛 에너지로부터 발생한 광자(photon)를 전하 운반체(charge carrier)로 전환시키는 소자를 일컫으며, 소자의 구조 및 동작원리에 따라 크게 광트랜지스터, 광다이오드(photodiode), 광전도체(photoconductor)

로 구분할 수 있다. 개별 소자들은 각각의 장 단점을 가지고 다양한 분야에 응용이 되어왔다. 특히, 빛 에너지에 의한 전류 증폭 작용을 이용한 광트랜지스터는 그 활용처가 매우 다양해 활발한 연구가 진행 중이다. 고성능 광트랜지스터의 구현을 위하여 전통적인 Si 및 화합물 반도체 등이 소재로 사용되어 왔으나, 보다 고성능의 소재 개발을 위하여 다양한 소재가 연구되기 시작였다. 유기반도체, 유무기 하이브리드(organic-inorganic hybrid) 물질, 양자점(quantum dot) 등이 대표적인 신소재기반의 광트랜지스터 구현 사례이며, 최근에는 ‘산화물 이중접합(oxide heterojunction) 기반 고감도 광트랜지스터’가 개발돼, 차세대 광소자로써 주목을 받고 있다. [2,7,8,13]

본 고에서는 차세대 광소자 기술에 중심에 있는 ‘산화물 이중접합 기반 광트랜지스터’의 개발 동향에 대해 소개하고, 미래 산업 적용 가능성에 대해 언급하고자 한다. 본론에서는 광다이오드 및 광트랜지스터로 대표되는 광센서 소자들의 구동원리 및 특징, 산화물 반도체 기반 고성능 광검출기, 유무기 하이브리드 광트랜지스터, 양자점 기술을 활용한 광트랜지스터 등 주요 연구의 간단한 배경지식과 함께 기술적인 내용에 대해 살펴보고자 한다. 끝으로 맺을말을 통해 본론의 핵심 키워드를 정리하고, 위 연구들이 시사하는 바에 대해 언급할 예정이다.

2. 광다이오드 및 광트랜지스터의 구동 원리

광다이오드는 일반적으로 2개의 터미널인 전극(electrode)과 광활성화(photoactive) pn 접합(pn junction) 반도체 층으로 구성된다. 광다이오드는 평상 시 역방향전압에서 전류가 흐르지 않는다. 하지만 빛 에너지를 받게 되면 전자의 들뜸(excitation) 현상으로 인해 역방향 전압에서도 전류가 흐르게 된다. 그림 2를 통해 알 수 있듯, 광다이오드는 광트랜지스터 대비 비교적 단순한 구조임으로 반응속도가 매우 빠르다. 하지만 고유의 작은 출력으로인해 발생하는 낮은 감도는 소자 응용 측면에서 한계점으로 나타난다. 따라서 이를 보완하기 위한 방안으로 광트랜지스터가 개발되었다 [2,4].

광트랜지스터는 일반적으로 3개의 터미널(terminal)인 소스(source), 드레인(drain), 게이트(gate)와 광활성화 반도체 층으로 구성된

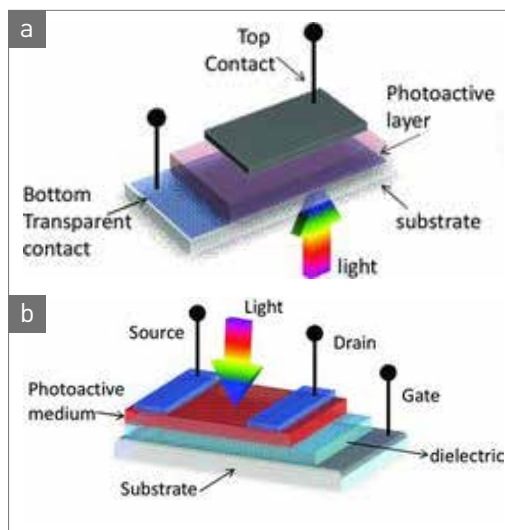


그림 2 ▶ (a) 광다이오드 및 (b) 광트랜지스터의 구조.

다. 먼저, 게이트에 전압을 가하면 반도체 층 내부에 채널(channel)이 형성됨에 따라 전계효과(field effect)가 유도된다. 이 채널을 통해 소스에서 드레인으로 전하가 움직이면서 전류가 흐른다. 이때, 소자를 빛 에너지에 노출시키면 반도체 층 내부에 전자-정공 쌍(electron-hole pair), 즉 전하 운반체(charge carrier)가 생성되는데, 이렇게 생성된 많은 전하량은 드레인에 흐르는 전류량을 증폭시킨다. 결과적으로, 빛 에너지를 통해 내부에 흐르는 전하량을 증폭시켜 많은 양의 전기 에너지로 변환시키는 소자를 광트랜지스터라고 한다 [2,5,6].

3. 광트랜지스터 특징

광트랜지스터는 2개 터미널 소자인 광다이오드와 달리 3개 터미널 소자로, 다른 구동방식 및 특징을 갖는다. pn 접합 반도체 층을 포함한 광다이오드는 양방향 전압에 의한 소자 작동이 가능한 반면, 광트랜지스터는 전계효과 기반의 트랜지스터로써 한방향 전압에서만 소자 작동이 가능하다. 하지만 빛 에너지에 따라 전하량이 급증하는 특성은 광트랜지스터의 고출력, 고감도 특성으로 이어져 LED, 레이저 등 다양한 광학 산업에서 높은 활용성을 보이고 있다. 이런 광트랜지스터의 대표적인 장점은 그림 3을 통해 설명이 가능하다. ‘광트랜지스터 콜렉터(collector) 특성 곡선’은 이미터(emitter)-콜렉터 역할을 하는 소스-드레인 전압

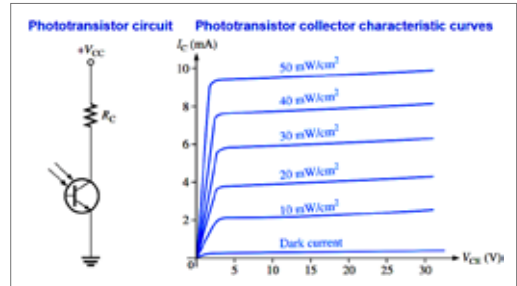


그림 3 ▶ 광트랜지스터 콜렉터 특성 곡선.

대비 드레인에 흐르는 전류량을 보여준다. 빛 조사량을 조절해 채널에 흐르는 전류를 0에서 50 mW/cm²까지 6가지 조건으로 나눠봤을 때, 드레인에 흐르는 전류 IC는 이에 비례해 각각 대략 0~10mA까지 성장함을 알 수 있다 [4-5].

4. 산화물 이종접합 기반 차세대 광트랜지스터 연구 동향

4.1 산화물 이종접합 기반 고성능 광검출기

비정질 IGZO (amorphous indium-galium - zinc-oxide)는 높은 전하 이동도, 대면적화, 저온공정 호환성, 타 산화물 반도체 대비 높은 안정성 등으로 산화물 반도체의 대표주자로 여겨져왔다. 하지만 3.0 eV 이상의 큰 밴드갭 (band gap)으로 인해, 많은 장점에도 불구하고 광트랜지스터로 사용이 제한적이었다. 게다가 산화물 특유의 수분에 취약하다는 점 또한 여전히 숙제로 남아있었다. 이를 극복하고자

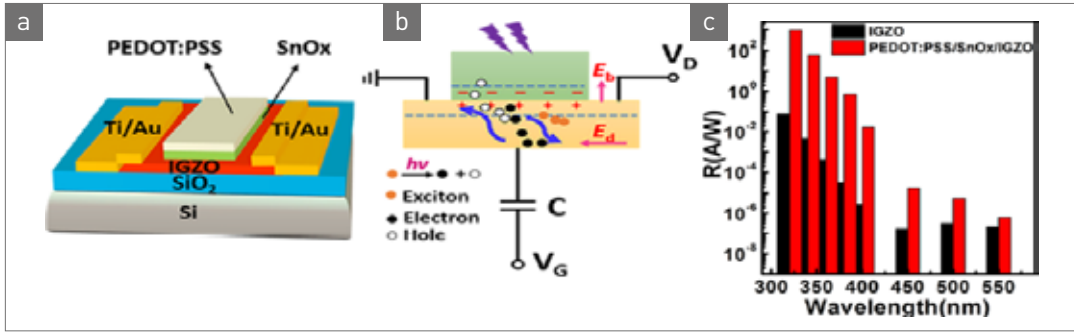


그림 4 ▶ PEDOT:PSS/SnOx/IGZO 이종접합 기반 광검출기의 (a) 구조, (b) 소자 구동원리, (c) 광학적 특성.

다양한 연구가 진행되었고, 최근 산화물 반도체 층에 이종접합 물질을 덧대 소자적 안정성을 키움과 동시에 광특성까지 향상시키는 연구가 관심을 끌고 있다 [6,7].

그림 4는 IGZO의 백채널 표면에 SnOx와 PEDOT:PSS를 증착해 이종접합 구조를 형성하고 소자 특성을 검증한 연구 사례이다. 320 nm 파장에서 986 A/W의 광응답률(photoresponsivity), 4.2×10^{14} Jones 이상의 광검출능(photodetectivity) 등 광검출기로서 기존에 IGZO만 사용한 소자 대비 매우 경쟁력있는 특성을 보여준다. 게다가 0.1 V의 낮은 공급 전압에서도 소자 작동이 가능하며, 큰 밴드갭 산화물 기반 소자에서 발생하는 지속적인 광전도율(photoconductivity)을 짧은 양의 게이트 펄스(pulse)를 활용해 효과적으로 억제한다. 이 높은 광응답률 기반의 광검출기는 고성능 픽셀 어레이(pixel array)로써 가능성을 보여준다. 표 1을 통해 IGZO, IGZO/SnOx 이종접합, IGZO/SnOx/PEDOT:PSS 하이브리드 이종접합 광트랜지스터의 직접적인 비교가 가능하다. IGZO와 IGZO/SnOx 이종접합 소자를 비교했을

표 1 ▶ UV 광검출 반도체 물질의 성능 비교.

Semiconductor	Max. R(A/W)	D*(Jones)
IGZO	0.08	1.3×10^{14}
IGZO/SnO _x	328.6	0
IGZO/SnO _x /PEDOT:PSS	986	3.3×10^{14}

때, UV (ultra violet) 파장 영역에서 IGZO는 0.08 A/W의 낮은 최대 광응답률을, IGZO/SnOx 이종접합 소자는 거의 0에 근접한 광검출능을 보였다. 반면, 하이브리드 이종접합 소자인 IGZO/SnOx/PEDOT:PSS는 986 A/W, 3.3×10^{14} Jones의 우수한 특성을 보여, 광검출기의 가능성을 입증했다 [7].

이 외에도 밴드갭을 조절해 전기적 광학적 특성을 대폭 향상시키는 등 다양한 접근이 가능해, 산화물 이종접합 기반의 광트랜지스터 연구는 많은 분야에서 활발히 이뤄지고 있다.

4.2 유무기 하이브리드 광트랜지스터

높은 투명도와 비정질에서도 고 이동도를 갖는 산화물 반도체 및 트랜지스터는 투명한 전자 기기에 알맞는 물질로 여겨져왔다. 하지만 산소결함(oxygen vacancy)으로 발생하는 소자의

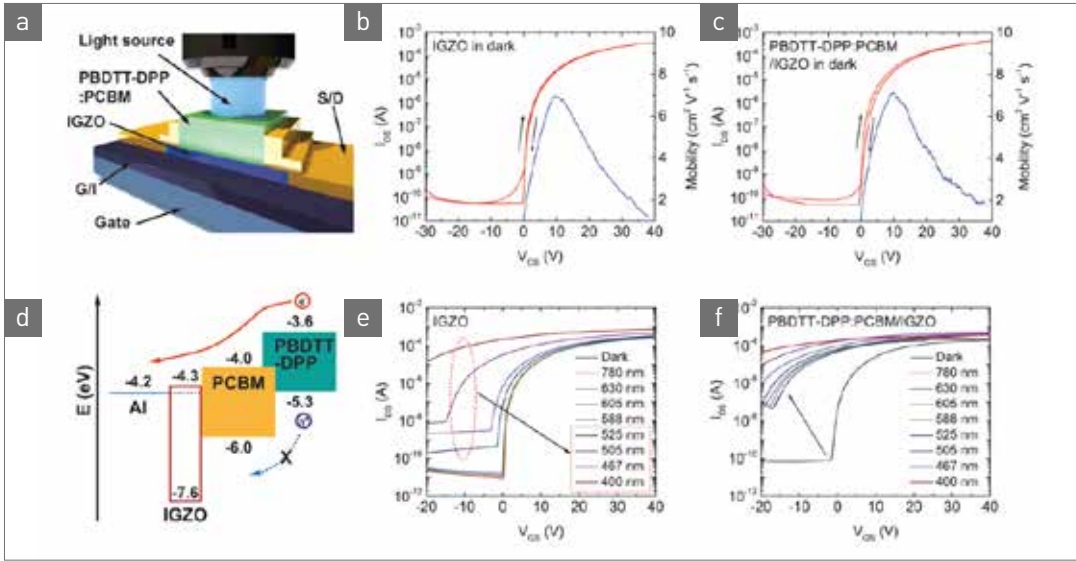


그림 5 ▶ PBDTT-DPP:PC₆₁BM/IGZO 광트랜지스터의 광학적 전기적 특성.

기능 저하 및 광자(photon) 가속 불안정성 등, 여전히 상용화에 있어 많은 문제가 남아있다. 이를 극복하고자 유무기 하이브리드 물질을 활용한 광트랜지스터 개발이 활발히 연구 중이며, 이를 대표하는 논문을 소개하고자한다 [2,6-8].

최근 4 nm 두께의 초박막 IGZO 산화물 반도체에 밴드갭 ≈ 1.44 eV의 PBDTT-DPP와 PC₆₁BM로 구성된 유무기 하이브리드 층을 증착한 광트랜지스터가 개발되었다. 이 소자는 바텀게이트(bottom-gate) 구조로, 7.06 ± 0.42 cm²/V*s의 고이동도와 10^6 이상의 높은 온오프 커런트비(on-off ratio)를 갖는다. 그림 5를 통해 산화물 반도체 위에 유무기 하이브리드 층을 증착 시 높은 전기적 특성을 유지함과 동시에 원치 않는 영역의 빛 흡수로부터 IGZO의 백 채널(back channel)을 효과적으로 보호해 높은 소자 안정성을 확보함을 알 수 있다 [8,9].

광검출능 및 외부 양자 효율(external quantum efficiency)은 광트랜지스터의 광학적 특성을 보여주는 대표적인 특징들이다. 특히, 내부 양자 효율(internal quantum efficiency)과 광 추출 효율(light extraction efficiency)의 곱으로 표현되는 외부 양자 효율은 광소자의 에너지 효율 및 수명에 직접적인 영향을 끼친다. 그림 6은 400~800 nm 파장에서의 IGZO 광트랜지스터와 유무기 하이브리드 물질을 적용한 광트랜지스터의 광검출능 및 외부 양자 효율의 차이를 보여준다. IGZO의 경우, 588 nm의 파장에서 외부 양자 효율이 1% 이하로 떨어지며, 광검출능 또한 $\sim 10^3$ Jones 감소한다. 이는 IGZO가 가진 넓은 밴드갭으로 인해 효율적인 광흡수가 불가하기 때문이다. 반면, 유무기 하이브리드 광트랜지스터는 800 nm에서도 30% 이상의 높은 외부 양자 효율을 보였으며, 광검출능 또한 초기성능의 대부분을 유지한다 [8,10].

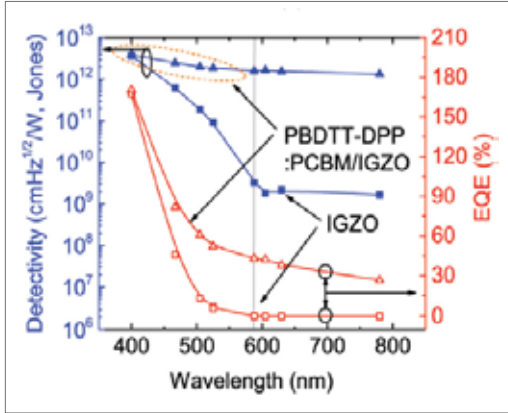


그림 6 ▶ PBDTT-DPP:PCBM/IGZO의 광검출능 및 외부 양자 효율 특성.

이외에도 P(PDI-BDT-O)/IGZO, PBDTT-DPP/ZnON 등 다양한 유무기 하이브리드 물질을 활용한 광트랜지스터 개발이 진행 중이며, 이는 산화물 반도체 층 보호, 밴드갭 조절을 통한 전하량 증폭, 안정적 외부 양자 효율 확보 등 공통된 연구 목표를 갖는다 [8,10,11].

4.3 양자점 기술을 활용한 산화물 이중접합 광트랜지스터

기존 광검출 시스템은 대부분 특정한 파장

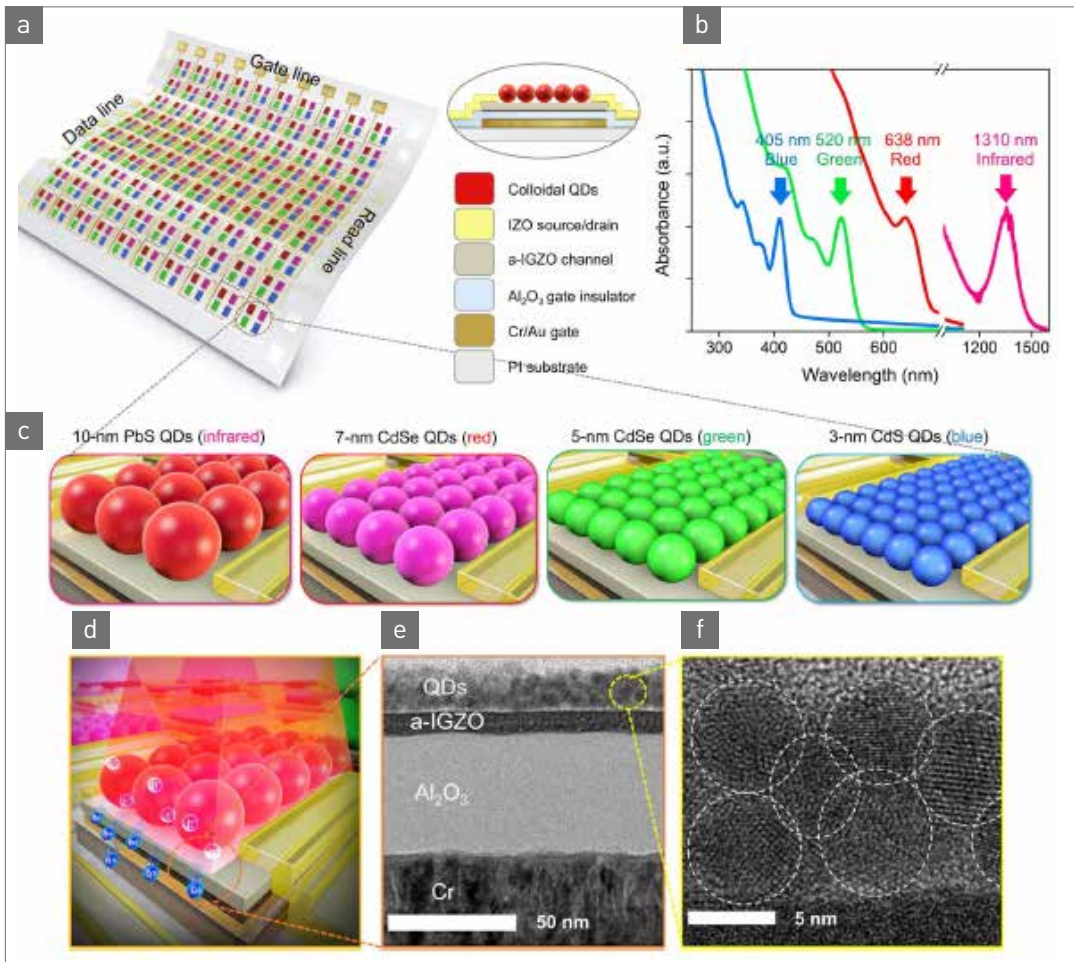


그림 7 ▶ 양자점/a-IGZO 하이브리드 광트랜지스터 구조.

의 빛만을 감지하는 광검출기로, 이는 낮은 픽셀 분해능(pixel resolution), 제한된 밴드갭(band gap) 조정성을 가진다. 따라서 이를 해결하기 위해 모든 색의 빛을 검출하는 소자개발이 필수적인 상황이다. 그림 7은 최근 보고된 넓은 밴드갭 조정성과 높은 광흡수 계수를 가진 콜로이드 양자점(colloidal quantum dots; QDs) 물질에 고이동도 a-IGZO 기반 박막트랜지스터를 접목한 광검출기이다. 150°C 이하의 저온 용액공정을 통해 제작되었고, 2차원의 풀컬러 소자이다. 이 소자 내 각 양자점은 PbS(지름: 10 nm, 밴드갭 0.95 eV), CdSe(지름: 7, 5 nm, 밴드갭 1.95, 2.39 eV), CdS(지름: 3 nm, 밴드갭 3.07 eV)으로 증착되었으며, 파장 365~1,310 nm에서 4.2×10^{17} Jones 이상의 초고 광검출능과 8.3×10^3 A/W 이상의 높은 광응답률을 보여주었다 [12,13].

그림 8에서 확인할 수 있듯, 양자점 물질 표면의 리간드(ligand)의 길이에 따라 전하 전송 효율, 광검출능, 광감도 등 다양한 특성이 변화했다. 적절한 양자점-리간드 결합을 위해 $\text{Sn}_2\text{S}_6^{4-}$, $\text{Sn}_2\text{Se}_6^{4-}$, $\text{In}_2\text{Se}_4^{2-}$, Cu_7S_4^- , $\text{Sb}_2\text{S}_4^{2-}$, $\text{Sb}_2\text{Se}_4^{2-}$, SCN^- 등 다양한 리간드가 활용 가능하며, 이중 $\text{Sn}_2\text{S}_6^{4-}$, $\text{Sn}_2\text{Se}_6^{4-}$, SCN^- 의 리간드를 활용하여 각 리간드 별 전하이동 특성에 대해서 연구하여 이중 $\text{Sn}_2\text{S}_6^{4-}$ 가 최적의 특성을 가짐을 보여주었다. 또한, 높은 감도의 풀컬러 광검출기를 실현하기 위한 전략으로 인픽셀 회로(in-pixel CIC)와 광검출기 아키텍처가 수행되었고, 풀컬러 광흡수와 고효율의 전하 축적을 위한 양자점 물질과 a-IGZO 활성층의

계면제어를 최적화하였다. 이렇게 제작된 소자는 고집적도의 픽셀화된 구성과 비선형의 광응답성으로 넓은 동작범위를 가능하게 해 다양한 분야에 적용이 가능했다. 게다가, 그림 7의 모식도와 같이 서로 다른 밴드갭을 가지는 양자점 박막을 동일 기판에 선택적으로 다중 배열하여 전체 색상의 빛을 감지할 수 있었다. 이에 따라 최적화된 양자점과 박막트랜지스터를 연결하는 리간드에 의한 a-IGZO로의 전하 주입의 최적화와 고신뢰성의 a-IGZO 박막트랜지스터를 사용해 높은 이동도 및 광흡수 효율을 얻어 풀컬러 범위 파장의 빛을 구별하는데 탁월한 성능을 보였다 [13].

최근 이런 양자점을 활용한 연구는 상업적으로 높은 가능성을 가진 근적외선(near-infrared) 광검출기, 2차원 전이금속 양자점을 활용한 바이오 이미징 기술, 양자점 껍질(shell)

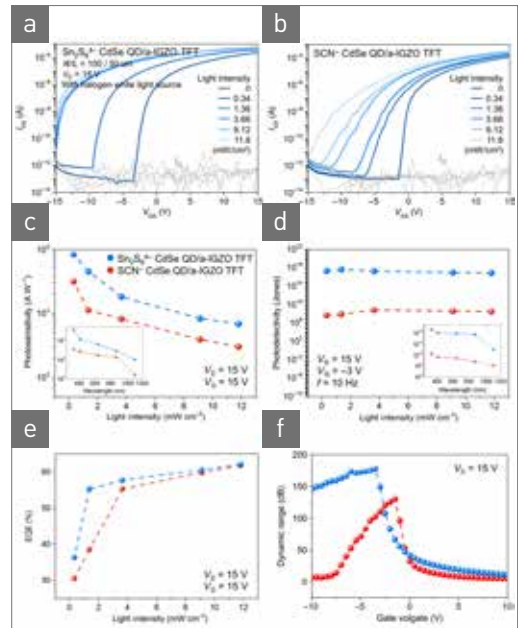


그림 8 ▶ 양자점/a-IGZO 하이브리드 광트랜지스터 광전자적 특성.

을 활용한 안정적인 양자점 발광 다이오드 등 많은 논문을 통해 미래 가치를 인정받고 있으며, 기술의 범용성 또한 뛰어난 차세대 광소자의 핵심 기술 중 하나로 주목 받고 있다 [14-16].

5. 맺음말

본 고에서는 광다이오드 및 광트랜지스터의 동작원리 및 특성을 시작으로, 산화물 이종접합 기반 고성능 광트랜지스터 연구동향에 대해 소개하였다. 산화물 이종접합 기반의 광트랜지스터는 산화물 반도체의 장점인 높은 전자 이동도, 대면적화, 저온공정 호환성을 유지함과 동시에 취약점인 산소결함으로부터 발생하는 기능 저하 및 소자 불안정성이 획기적으로 개선됨을 확인하였다. 또한, 유무기 하이브리드 물질과 양자점 기술을 적용해 광트랜지스터의 전기적 광학적 특성을 한단계 더 발전시킬 수 있음을 확인하였다. 향후 더 미세한 양자점 패터닝 기술과 최적화된 유무기 하이브리드 물질이 개발된다면, 이는 광융합기술로 대변되는 4차 산업혁명시대에 코어(core) 기술로 자리잡을 것으로 기대된다. 🌐

참 / 고 / 문 / 헌

- [1] Ministry of Trade, Industry and, Energy, *Comprehensive Development Plan for Photovoltaic Technology* (Seoul, Korea, 2019) pp. 1.
- [2] K. J. Baeg, M. Binda, D. Natali, M. Caironi, and Y. Y. Noh, *Advanced Materials*, 25, 4270 (2013). <https://doi.org/10.1002/adma.201204979>.
- [3] H. R. Lim, H. S. Kim, R. Qazi, Y. T. Kwon, J. W. Jeong, and W. H. Yeo, *Advanced Materials*, 32, 2 (2019). <https://doi.org/10.1002/adma.201901924>.
- [4] T. N. Ng, W. S. Wong, M. L. Chabinyc, S. Sambandan, and B. A. Street, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 191 (2008). <https://doi.org/10.1063/1.2937018>.
- [5] Bharadwaj, *Phototransistor working principle*, <https://engineeringtutorial.com>, 2016.
- [6] Y. S. Rim, K. C. Ok, Y. M. Yang, H. Chen, S. H. Bae, C. Wang, Y. Huang, J. S. Park, and Y. Yang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 8, 14665 (2016). <https://doi.org/10.1021/acsami.6b02814>.
- [7] J. Yu, K. Javaid, L. Liang, W. Wu, Y. Liang, A. Song, H. Zhang, W. Shi, T. C. Chang, and H. Cao, *Appl. Mater. Interfaces*, 8, 8102 (2018). <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16498>.
- [8] Y. S. Rim, Y. M. Yang, S. H. Bae, H. Chen, C. Li, M. S. Goorsky, and Y. Yang, *Advanced Materials*, 27, 6885 (2015). <https://doi.org/10.1002/adma.201502996>.
- [9] H. J. Joo, M. G. Shin, H. S. Jung, H. S. Cha, D. Nam, and H. I. Kwon, *Materials*, 12, 3815 (2019). <https://doi.org/10.3390/ma12233815>.
- [10] S. Wei, F. Zou, L. Wang, C. Liu, X. Liu, W. Hu, Z. Fan, J. C. Ho, and L. Liao, *Advanced Materials*, 32, 1907527 (2020). <https://doi.org/10.1002/adma.201907527>.
- [11] Y. Wang, L. Wang, F. Liu, Z. Peng, Y. Zhang, and C. Jiang, *Organic electronics*, 83, 105778 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105778>.
- [12] C. R. Kagan, E. Lifshitz, E. H. Sargent, and D. V. Talapin, *Science*, 353, aac5523 (2016). <https://doi.org/10.1126/science.aac5523>.
- [13] J. Kim, S. M. Kwon, Y. K. Kang, Y. H. Kim, M. J. Lee, K. J. Han, A. Facchetti, M. G. Kim, and S. K. Park, *Sci. Adv.*, 5, eaax8801 (2019). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax8801>.
- [14] D. K. Hwang, Y. T. Lee, H. S. Lee, Y. J. Lee, S. H. Shokouh, J. H. Kyhm, J. Lee, H. H. Kim, T. H. Yoo, S. H. Nam, D. I. Son, B. K. Ju, M. C. Park, J. D. Song, W. K. Choi, and S. Im, *NPG Asia Materials*, 8, e233 (2016). <https://doi.org/10.1038/am.2015.137>.
- [15] X. Ding, F. Peng, J. Zhou, W. Gong, G. Slaven, K. P. Loh, C. T. Kim, and D. T. Leong, *Nature Communications*, 10, 41 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07835-1>.
- [16] H. Moon, C. Lee, W. Lee, J. Kim, and H. Chae, *Advanced Materials*, 31, 1804294 (2019). <https://doi.org/10.1002/adma.201804294>.

저/자/약/력



성명	이 바 울	
학력	2018년	성균관대학교 신소재공학 공학사
	2020년 - 현재	성균관대학교 신소재공학 석사과정
경력	2018년 - 2020년	현대자동차 전략기술본부 연구원



성명	김 찬 호	
학력	2015년 ~ 현재	성균관대학교 신소재공학과 학부연구생



성명	김 명 길	
학력	2006년	한국과학기술원 화화학 이학사
	2012년	Northwestern University 이학박사
경력	2012년 - 2012년	Northwestern University 화학과 박사후연구원
	2013년 - 2014년	Stanford University 화학과 박사후연구원
	2014년 - 2019년	중앙대학교 화학과 부교수
	2019년 - 현재	성균관대학교 신소재공학과 부교수