TECHNOLOGY NEWS 기·술·뉴·스

슬롯다이 코팅을 이용한 대면적 이차원 반도체 소자 구현

이차원 소재는 두께가 원자 단위로 매우 얇은 소재로 물질의 구조가 두 가지 주요 차원으로만 제한되는 소재이다. 이러한 소재는 평면적인 특성을 가지며, 표면적이 매우 크고 이로 인해 독특한 물리적 및 전기적 특성을 갖게 된다. 이러한 소재를 활용하면 기존 반도체 소자의 물리적 한계를 극복할 수 있는 고집적도의 칩 생산이 가능하지만, 현재까지 이론 대비 성능이 낮고 대면적 공정에 있어 한계점을 가지고 있다.

본 연구에서는 전기적 특성이 우수하고 대면적 생산이 가능한 이차원 반도체 소재인 이황화 몰리브덴(MoS_2)에 이온이 주입된 절연층(sodium-embedded alumina, SEA)을 도입하여, 대면적 생산과 고성능을 모두 구현할 수 있는 MoS_2/SEA 반도체 전자소자를 개발하였다. 전 공정에 사용되는 소재를 용액공정으로 대량 합성하고 잉크형태로 제작 후, 반도체 산업에서 활용하는 슬롯 다이 코팅 기법으로 절연층과 반도체층 모두 5인치 대면적 웨이퍼에 균일하게 코팅하는 공정을 적용함으로서 이를 구현하는데 성공하였다. 구현된 대면적의 MoS_2/SEA 트랜지스터 전자소자의 성능을 평가한 결과 전하이동도가 100 $cm^2 V^{-1} s^{-1}$ 이상으로 계측되었으며, 이는 기존의 용액공정 기반 이차원 MoS_2 트랜지스터 소자에 비해 100배 이상의 성능 향상을 보이는 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 이차원 반도체 소자의 실용화 가능성을 한 단계 진일보 시킬 수 있을 것이라 기대한다.

본 연구결과는 "Wafer-scale transistor arrays fabricated using slot-die printing of molybdenum disulfide and sodium-embedded alumina"의 제목으로 2023년 6월 *Nature Electronics*에 게재되었다.

<Y. A. Kwon *et al.*, *Nat. Electron.*, **6**, 443 (2023)
DOI: 10.1038/s41928-023-00971-7>

세계최초 초고성능 p형 비정질 반도체 소재 구현

반도체 소자는 미세구조에 따라 원자/분자 구조가 규칙적으로 배열된 결정질과 규칙성을 가지지 않는 비정질 반도체로 나눌 수 있다. 이러한 비정질성 소재는 결정질에 비해 제작 공정이 월등히 단순하고 비용도 저렴하다는 장점이 있지만, 결정질 반도체에 비해 전기적 성능이 크게 떨어지는 것으로 알려져 있다. n형 비정질 반도체의 경우, 많은 연구가 이루어져 고성능의 인듐갈륨아연산화물(IGZO) 등의 소재가 개발된 바 있으며, 현재 OLED 디스플레이 및 메모리 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 이와 함께 상보성 반도체 논리회로(CMOS)를

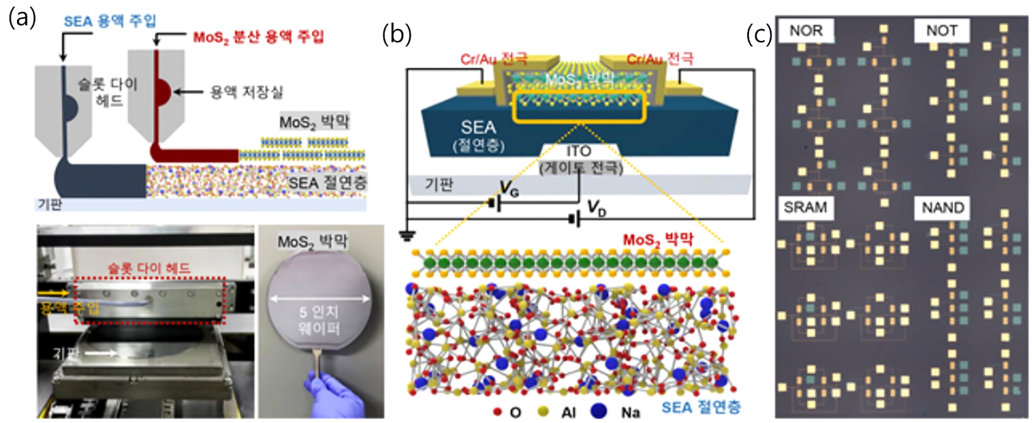

그림 1. (a) 슬롯다이 공정 개요도 및 실제 공정 이미지. (b) 연구에 사용된 이차원 트랜지스터 소자 및 소재의 모식도. (c) 슬롯다이 공정을 통해 구현된 논리회로 이미지.

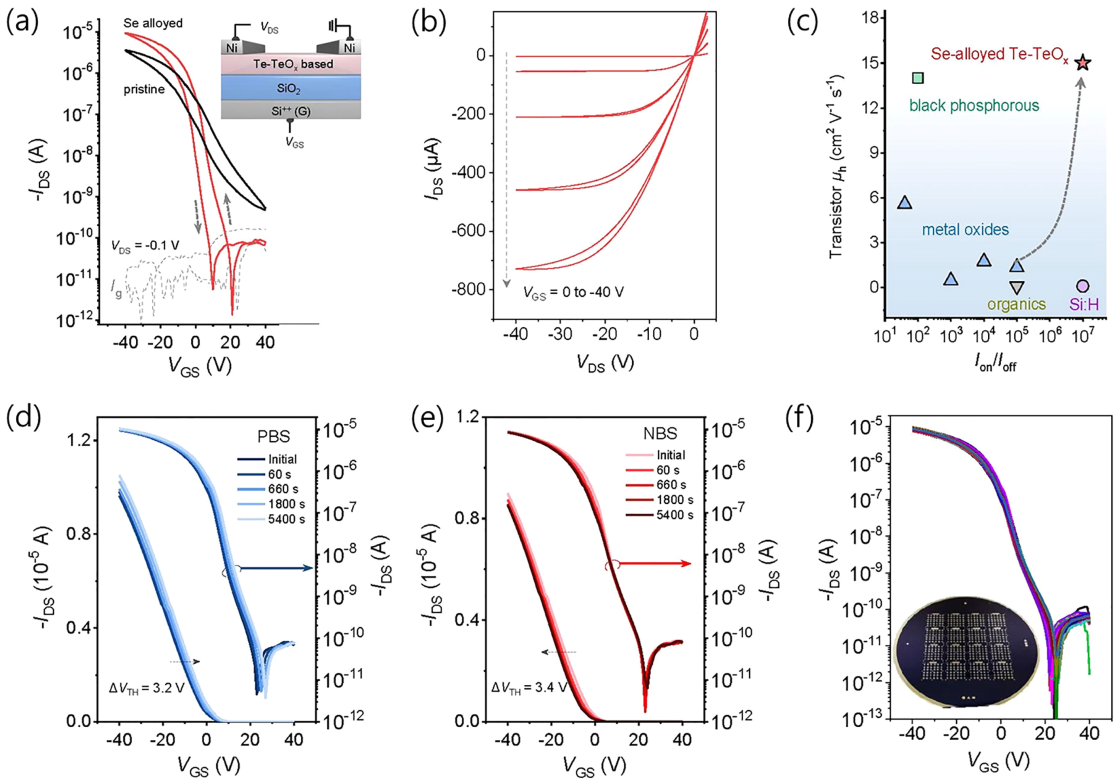

그림 2. (a) 텔루륨-셀레늄 복합산화물 트랜지스터의 트랜스퍼 특성 및 (b) 출력특성. (c) 기존 소재 대비 점멸비에 따른 이동도 특성 비교. (d) 양전압 및 (e) 음전압 부하 조건에 따른 구동 안정성 평가. (f) 대면적공정으로 구현된 웨이퍼에서의 트랜지스터 균일성 평가.

구현하기 위해 필수적인 p형 반도체의 경우, 현재까지 개발된 소재는 매우 높은 내재적 결함으로 인해 고성능화가 이루어지지 못했다.

본 연구에서는 희토류 금속인 텔루륨 산화물의 경우 산소가 부분적으로 결핍된 상황에서 전하량이 높아진다는 현상을 발견하였으며, 이를 기반으로 고성능의 p형 반도체 소재를 개발하는데 성공하였다. 부분적으로 산화된 텔루륨 박막과 셀레늄을 사용한 텔루륨-셀레늄 복합 산화물(Se:TeO_x)을 사용하여 안정적인 고성능을 구현하였으며, 현재까지 보고된 p형 비정질 산화물 TFT 중 가장 우수한 수준의 정공 이동도(15 $cm^2\ V^{-1}\ s^{-1}$)와 전류 점멸비(10^6~10^7)를 보였다. 뿐만 아니라 전압 및 환경조건에서 높은 구동안정성을 보였으며, 비정질 소재의 특성에 걸맞는 높은 대면적 공정 적합성을 보인 바 있다. 이는 차세대 디스플레이 분야와 저전력 CMOS 및 DRAM 메모리 연구를 위한 중요한 성과로서 다양한 분야에서 고부가가치의 실현이 가능할 것으로 기대한다.

본 연구결과는 "Selenium alloyed tellurium oxide for amorphous p-channel transistors"의 제목으로 *Nature*에 게재되었다.

<A. Liu *et al.*, *Nature*, **629**, 798 (2024)
DOI: 10.1038/s41586-024-07360-w>

화학구조 제어를 통한 열전소자용 고분자 도핑효율의 획기적 향상

열전발전은 소재의 온도 차로부터 전력을 생산하는 발전 방식으로 버려지는 열에너지를 재활용할 수 있는 청정 발전 방식이다. 열전발전을 위한 소재 중 고분자 반도체 기반의 열전소재는 기존 무기물 기반 열전소재와 달리 기계적 유연성과 낮은 열전도도 등 높은 열전성능 달성에 유리한 이점을 가지고 있다. 그러나 대부분의 고분자 반도체 기반 열전소재가 높은 성능을 보고하는 경우는 드문데, 이는 고분자 반도체의 낮은 전기 전도도 때문이다. 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 고분자 반도체의 화학적 도핑을 통해 고분자 반도체의 전기 전도도를 향상함으로써 열전성능을 개선하는 연구가 학계에서 활발히 보고되고 있다. 하지만 고분자 반도체는 소재에 따라 효과적인 도핑이 가능한 도판트의 종류가 달라지며, 도핑이 전혀 불가능한 고분자-도판트 쌍도 존재한다. 지금까지 수많은 고분자 반도체와 도판트 소재가 연구되어 왔지만, 고분자 반도체의 분자 구조에 따른 도핑 효율의 민감한 변화의 원인에 대해서는 여전히 충분한 이해가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 고분자 반도체의 주사슬에 메톡시기의 도입을 통해 규칙적으로 배열된 고분자들의 분자 간 거리를 확장하는

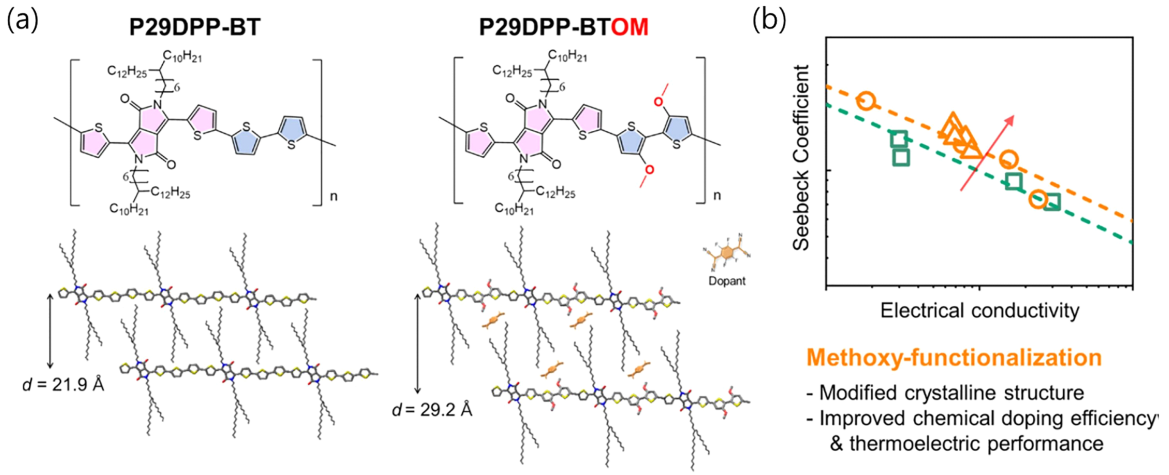

그림 3. (a) 고분자 결사슬의 화학적 구조에 따른 결정 형성 비교. (b) 메톡시 작용기 기능화에 따른 열전특성 평가 결과.

방식으로 도핑 효율을 제어하는데 성공하였다. 고분자 반도체의 도핑은 도판트가 고분자 주사슬에 근접할 때 일어날 수 있는데, 이러한 분자 간 거리 확장은 고분자 주사슬 사이사이에 도판트가 침투할 수 있는 충분한 물리적 공간을 제공하여 도핑 효율을 크게 향상시켰다. 연구팀은 해당 소재 기술을 통해 고분자 반도체 열전소재의 파워팩터를 20% 이상 향상했으며, 심지어 메톡시기 부재 시 도핑이 불가하던 고분자-도판트 쌍이 메톡시기 도입 후에는 효과적인 도핑이 가능한 쌍으로 전환될 수 있음을 보였다. 이러한 결과는 반도체의 분자구조와 도핑 특성 간 상관관계를 이해하고 소재의 도핑효율 및 열전성능을 획기적으로 향상할 수 있는 분자 디자인 전략을 확립한 결과로써, 다양한 고분자 반도체 소재에 적용하여 효과적인 고분자-도판트 쌍을 위한 폭넓은 선택지를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 "From non-doped to dopable: The impact of methoxy functionalization on doping and thermoelectric properties of conjugated polymers"의 제목으로 *EcoMat* 표지논문으로 게재되었다.

<H. Lee *et al.*, *EcoMat*, **6**, e12442 (2024)
DOI: 10.1002/eom2.12442>

RGB 선별적 혼합을 통한 가시광 무선 통신맞춤형 광원 개발

라이파이(Li-fi)는 가시광(빛)을 사용해 데이터를 전송하는 통신 기술이다. 전파를 사용하는 와이파이(Wi-fi)보다 속도가

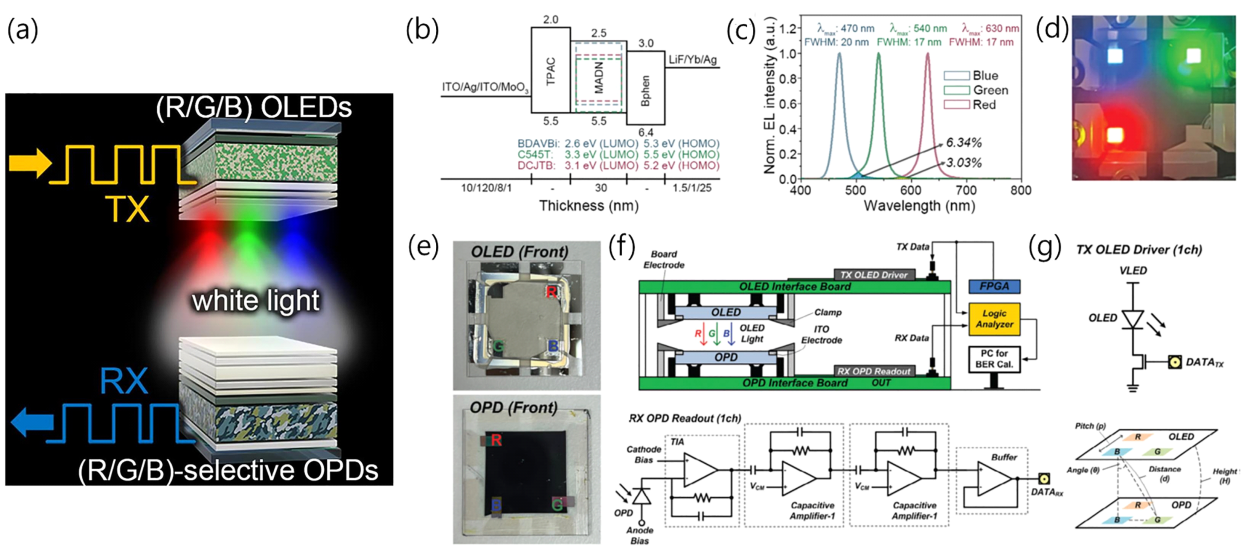

그림 4. (a) 연구의 개념도. 연구에 사용된 OLED 소재의 (b) 에너지 다이어그램, (c) 발광특성, (d) 실제 발광 이미지. OLED 및 OPD 기반의 (e) 실제 소자 이미지, (f) 소자 및 회로 구성도 및 (g) 가시광영역 통신 평가를 위한 구성도.

100배 이상 빠르며, 대역폭이 높아 많은 정보를 동시에 전달할 수 있다. 또, 빛이 도달하는 영역에만 데이터를 보내기 때문에 보안도 좋은 편이며, 무엇보다 LED 등 이미 설치된 실내 조명을 활용하면 별도 인프라도 필요하지 않다. 하지만 실제 조명에 가시광 통신 시스템을 적용했을 때, 데이터 전송의 안정성과 정확성이 떨어진다는 문제점이 있었다.

본 연구에서는, 이를 극복하기 위해 새로운 광원으로 빛의 간섭을 줄여 실내 조명을 활용한 무선 통신을 구현하였다. 빨강(Red), 초록(Green), 파랑(Blue) OLED(유기발광다이오드)를 혼합해 일반 조명처럼 백색광으로 보이지만 서로 간섭되는 영역이 적은 광원을 구성하였으며, OLED가 각 파장의 색상을 더욱 선명하게 표현할 수 있도록 캐비티(cavity)구조를 도입하고, 빛을 흡수하는 OPD(유기포토다이드)에는 파브리-페로(Fabry-Perot) 구조를 적용해 특정 파장의 빛만 잘 받아들일 수 있도록 했다. 구현된 혼합 백색광은 기존 광원에 비해 BER(Bit Error Rate)이 매우 낮았으며, 이는 정보 전달의 정확성이 크게 향상되었음을 의미한다. 이러한 결과는 기존 광원과 달리 세 종류의 파장이 혼합된 광원으로 간섭현상을 막아 데이터 전송에 있어 안정성과 정확성을 높인 결과로서, 기존 조명 시스템을 활용한 미래 무선 통신 기술 개발에 크게 기여할 것으로 기대한다.

본 연구는 “Visible-Light Communication with Lighting: RGB Wavelength Division Multiplexing OLEDs/OPDs Platform”의 제목으로 *Advanced Materials*에 게재되었다.

<D. Kim *et al.*, *Adv. Mater.*, **36**, 2309416 (2024)
DOI: 10.1002/adma.202309416>

<조새벽, email: sbjo@skku.edu>