

산학연 연구실 소개

# 아주대학교 분자과학기술학과 하이브리드 반도체 소재 및 소자 연구실 (Hybrid Optoelectronic Materials & Devices Lab, Ajou University)

주소: 경기도 수원시 영통구 월드컵로 206 아주대학교 해강관 619호 (우: 16499)  
전화: 031-219-3934, E-mail: jonghkim@ajou.ac.kr  
홈페이지: <https://sites.google.com/site/homdlab/>



연구책임자 | 김중현 교수  
아주대학교  
응용화학과/분자과학기술학과

## 1. 연구실 소개

유기 및 무기 하이브리드 반도체 소재는 우수한 흡광도, 전하이동도, 유연신축성 등 기존 무기물 반도체에서 발견되지 않는 우수한 광전 및 기계적 물성을 나타냄으로써 고성능 디스플레이, 고효율 에너지변환장치 등 첨단산업소재의 핵심소재로 응용성을 확장해 나가고 있다.

본 “하이브리드 반도체 소재 및 소자 연구실”은 2015년에 설립된 이후, 공액형 유기 반도체 소재 및 무기 하이브리드 반도체 소재 개발과 이를 차세대 에너지 및 디스플레이 소자, 그리고 케모센서 등에 응용하는 연구를 수행해 왔다. 특히, 에너지 생산기술과 관련하여, 고효율 유기열전소자 구현을 위한 신개념의 유기도핑공정 개발과 페로브스카이트 광전소자의 효율 개선을 위한 계면처리기술 개발에 집중하고 있다. 나아가, 디스플레이 및 센서기술과 관련하여서는 유기 및 양자점 소재를 이용한 고품출력 적외선 포토디텍터 개발연구와 함께 유해가스를 포함한 유해인자를 색/형광/전기신호 변화로 손쉽게 검출할 수 있는 케모센서 개발연구를 함께 수행하고 있다.

본 연구실은 2017년부터 현재까지 University of New South Wales, Macquarie University, University of Queensland 등의 호주대학과 PV Lighthouse 등 호주 기업과 공동연구를 수행하고 있다. 특히, 본 연구실은 최근 해외우수연구기관 협력 허브 구축사업(GHUB 사업)에 선정되어 ‘광전반도체 소재 및 소자 인공지능 플랫폼연구센터’를 개소하여 호주 연구기관들과 긴밀한 국제 공동연구를 수행하고 있다.

### Hybrid Optoelectronic Materials & Devices Lab.

**NIR-SWIR Photodetector**

**Organic Thermoelectrics**

**Indoor Photovoltaics**

**Chemosensors & Nanomaterials**

**분자도핑 공정 및 고효율 유기열전 소자 개발 연구**

- 신규 분자도핑 공정 개발
- 고투과 및 고전도성 유기 박막 개발
- 고효율 유기 열전소자 개발

**근적외선-단파적외선 포토디텍터 개발 연구**

- 유기물 기반 근적외선 포토디텍터
- 양자점 기반 단파적외선 포토디텍터

**고효율 페로브스카이트 태양전지 개발 연구**

- 계면조질 및 결함 패시베이션
- 다양한 광원에서의 광전변환 구동원리 분석

**기능성 유기소재 및 분산공정 개발 연구**

- 유해인자 검출 케모센서 개발 연구
- 안료 및 고분자복합 나노소재 분산연구
- 나노입자 광가교 리간드 소재 개발연구

그림 1. 하이브리드 반도체 소재 및 소자 연구실의 연구 분야.

## 2. 연구분야

### 2.1 분자도핑 공정 및 고출력 유기열전 소자 개발

유기열전 소자는 저비용 친환경 에너지 변환 장치로 주목받고 있지만, 유기물 반도체의 낮은 전기전도도와 열전 성능은 실용화의 주요 한계로 작용하고 있다. 이를 극복하기 위해 본 연구실에서는 새로운 분자 도핑 공정을 개발하여 도핑 효율과 열전 성능을 극대화하는 연구를 수행하고 있다 (그림 2). 전통적으로 유기 반도체의 도핑에 사용되어온 혼합 도핑법과 순차적 도핑법의 한계를 극복하기 위해 두 공정을 결합시킨 하이브리드 도핑법 개발에 성공하였다. 하이브리드 도핑은 혼합 도핑법으로 공액고분자 박막을 형성한 후, 순차적 도핑을 추가적으로 적용하여 박막 전영역에서의 도핑 효율을 극대화한다. 이를 통해, 공액고분자의 전하밀도와 전하이동도를 동시에 향상시키는데 성공하였다. 특히, 하이브리드 도핑법을 indoloindole 기반의 p형 공액고분자(PIDF-BT)에 적용하여 630 S/cm 이상의 높은 전기전도도와 76  $\mu\text{W}/\text{mK}^2$  이상의 우수한 열전 파워팩터를 가지는 고성능 유기열전 소자를 구현하였다(Adv. Funct. Mater., 30, 2004598 (2020)). 공액고분자의 도핑 효율을 극대화하기 위한 또다른 접근으로, 서로 다른 에너지 준위를 갖는 두개의 도판트를 도입하는 캐스케이드 도핑법을 개발하였다. 상대적으로 얇은 LUMO 준위를 갖는 도판트(F4TCNQ)를 이용하여 1차 도핑 후, 더 깊은 LUMO 준위를 갖는 도판트(NOBF<sub>4</sub>)로 2차 도핑을 진행하면, 단일 도판트 사용 대비, 고분자 박막의 도핑효율이 급격히 증가함을 밝혔다. 연구 결과, PIDF-BT 박막에 캐스케이드 도핑을 적용하여 610 S/cm 이상의 높은 전기전도도를 확보하였으며, 이는 F4TCNQ 단일 도핑 전기전도도(243 S/cm) 대비 250%나 증가한 수준이다(Adv. Mater., 32, 2005129 (2020)).

나아가, 높은 비점을 갖는 용매를 포함하는 세 가지 용매를 조합하여 고분자 박막을 형성시킨 후, 잔류 용매에 의한 도판트의 확산 효율과 전하밀도를 극대화시키는 용매조합도핑법을 개발하였다. 해당 공정을 indoloindole 기반의 p형 공액고분자

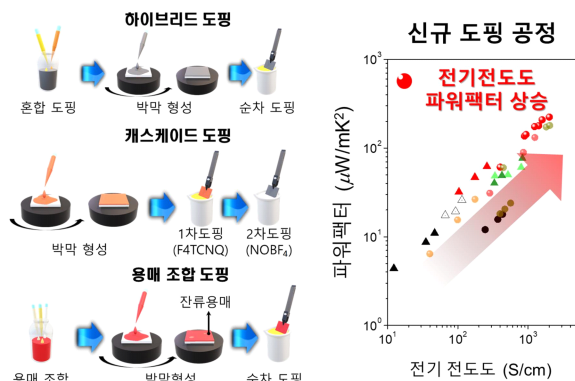


그림 2. 본 연구실에서 개발한 분자도핑 공정 및 이를 적용한 고성능 유기열전 소자의 특성.

(PIDF-BT04)에 적용하여 2,000 S/cm 이상의 세계 최고수준의 전기전도도 및 260  $\mu\text{W}/\text{mK}^2$  이상의 높은 파워팩터를 갖는 고성능 유기열전소자 개발에 성공하였다. 나아가 2,000 시간 이상의 대기 구동안정성 확보 및 해당 공정이 다양한 공액고분자, 도판트, 그리고 용매에 적용 가능함을 밝혔다(Joule, 7, 2291 (2023)).

### 2.2 근적외선-단파적외선 포토디텍터 개발

#### 2.2.1 유기반도체 기반 근적외선 포토디텍터

유기반도체 소재는 높은 흡광 계수와 우수한 기계적 물성으로 근적외선 포토디텍터의 광흡수층으로 많은 관심을 받고 있다. 본 연구실에서는 다양한 종류의 신규 비풀러렌 엑셉터 도입 및 소자 엔지니어링을 통해 고성능 유기 근적외선 포토디텍터 구현을 위한 암전류 억제 및 광전류 향상 연구를 수행하고 있다(그림 3). 대표 연구 사례로, 기존 비풀러렌 엑셉터(COTIC-4F)에 CN기가 치환된 COTCN2를 도입하여 포토디텍터의 암전류를 효과적으로 낮출 수 있었다. COTCN2의 깊어진 HOMO는 전극에서 주입되는 정공을 차단하여, 포토 디텍터의 암전류를  $1.08 \times 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$  수준으로 매우 효과적으로 감소시킴을 확인하였다. 그 결과, COTCN2를 이용한 포토 디텍터로부터, 1,000 nm에서  $1.18 \times 10^{12}$  Jones의 우수한 광검출력을 확보할 수 있었다(Adv. Funct. Mater., 33, 2211486 (2023)). 나아가, 기존 비풀러렌 엑셉터(Y6-BO)에 단일 비대칭(YOR1) 및 이중 대칭(YOR2) 전자공여성 alkoxy thiophene 유닛을 도입하여 분자 대칭성에 따른 포토디텍터의 성능변화를 분석하였다. YOR2는 분자의 대칭성 및 우수한 결정성으로

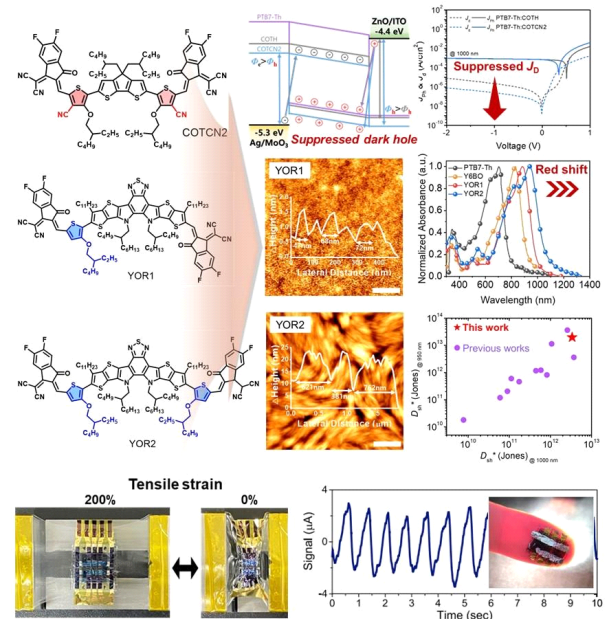


그림 3. 본 연구실에서 개발한 비풀러렌 엑셉터 기반의 고성능 근적외선 유기포토디텍터 및 스트레처블 유기포토디텍터 및 PPG센서.

인해 도너고분자(PTB7-Th)와 혼합필름 형성 시 350 nm 이상의 큰 상분리가 일어나는 반면, YOR1은 분자 비대칭성, 고흡해도 그리고 낮은 결정성으로 인해 PTB7-Th와 혼합 시 ~50 nm 수준의 엑시톤 분리에 유리한 그레인 크기를 갖는 박막을 형성하였다. YOR1 포토디텍터는 낮은 전하 재결합과  $1.58 \times 10^{-10} \text{ A/cm}^2$  수준의 낮은 암전류밀도를 나타내었다. 그 결과 YOR1 소재를 활용하여 950 nm에서  $1.98 \times 10^{13}$  Jones의 고광검출력을 나타내는 근적외선 포토디텍터 개발에 성공하였다(ACS Nano, 17, 18792 (2023)). 또한 유기소재의 신축성을 활용하여 고성능 스트레처블 유기포토디텍터 및 photo-plethysmography(PPG) 센서 구현이 가능함을 밝혔다(iScience, 25, 104194 (2022)).

### 2.2.2 양자점 기반 단파적외선 포토디텍터

콜로이드 양자점은 입자의 크기조절을 통해 다양한 단파적외선 영역의 광을 효율적으로 흡수할 수 있는 특징을 갖는다. 본 연구실에서는 단파적외선 흡수를 가지면서도 유해원소가 포함되지 않은 친환경 InSb 양자점을 이용한 단파적외선 포토디텍터 개발 연구를 수행하고 있다. 특히, 기존 InSb 양자점의 불안정한 표면을 할로겐으로 치환하여 고안정성, 고검출력 단파적외선 흡수 양자점 개발에 성공하였다. 이를 이용하여 1,520 nm에서 세계최고수준의 광검출력( $3.60 \times 10^{12}$  Jones)을 나타내는 단파적외선 포토디텍터를 구현하였다(Adv. Sci., 11, 2306439 (2024))(그림 4a). 그 외에도, 최초로 cationic metal chalcogenide 리간드를 양자점에 도입하여 기존 유기 리간드 대비 개선된 단파적외선 포토디텍터 개발에 성공하였다(그림 4b)(Adv. Mater. Technol., 8, 2201864 (2023)).

## 2.3 고효율 페로브스카이트 태양전지 개발 연구

### 2.3.1 계면 제어 및 결합 페시베이션

페로브스카이트 소재는 우수한 광전기적 특성으로 인해 태양전지 광활성층으로서 각광받고 있다. 하지만 페로브스카이트 태양전지 내에 존재하는 계면 결함은 생성된 전하의 재결합을 유도하여 태양전지 효율을 저하시키는 문제를 야기시킨다.

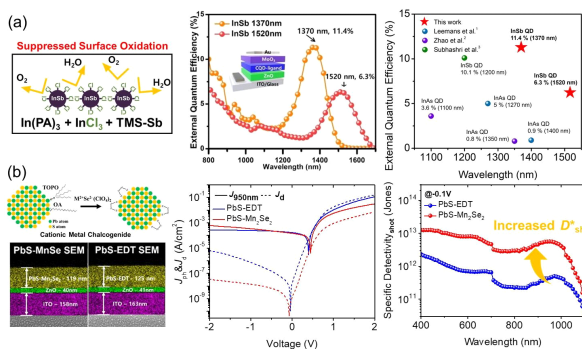


그림 4. 양자점 기반 단파적외선 포토디텍터.

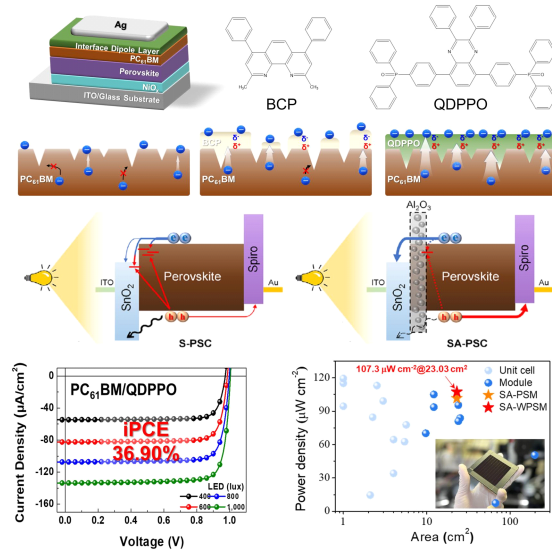


그림 5. 고효율 페로브스카이트 태양전지와 모듈구현을 위한 계면 제어 기술.

본 연구실은 다양한 계면 처리 및 결합 페시베이션을 통해 페로브스카이트 태양전지의 성능을 향상시키는 연구를 수행하고 있다(그림 5). 페로브스카이트 태양전지의 전하 수송층/전극 계면의 dipole 극대화를 위해 높은 극성을 갖는 퀴녹살린 기반 계면 소재(QDPPPO)를 도입하였다. QDPPPO는 전자수송층 표면에 균일한 전자분포를 유도하였고, 그 결과 1 SUN 환경에서 21.08%, LED 800 lux 환경에서 36.90%라는 우수한 효율을 나타내는 태양전지를 구현하는 데 성공하였다(Chem Eng J., 454, 140284 (2023)). 나아가, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층의 도입을 통해 단위소자를 넘어 페로브스카이트 태양전지 모듈에서의 계면 결합 억제에 성공하였다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>층은 모듈 레이저패터닝 과정에서 발생하는 결합 형성을 막아주어, 누설 전류를 효과적으로 억제하고 전하확산거리를 향상시켰다. 이를 통해 23.03 cm<sup>2</sup> 기준 1 SUN에서 19.96%, LED 1,000 lux에서 33.5%의 고효율 페로브스카이트 태양전지 모듈 구현에 성공하였다(EcoMat, 6, e12455 (2024)).

### 2.3.2 저조도 광환경에서의 광전구동원리 분석

저조도 혹은 실내광원은 AM1.5G 1 SUN 광원 대비 광량이 낮으며 방사 스펙트럼도 다르다. 본 연구실에서는 페로브스카이트 태양전지를 다양한 광환경에서 고효율로 구동하기 위한 소재 및 소자 설계원리와 광전 변환 구동원리 분석 연구를 수행하고 있다(그림 6). 페로브스카이트 태양전지에서 mesoporous-TiO<sub>2</sub>는 1 SUN 조건에서 우수한 전자수송층으로 알려져 있다. 하지만 저조도 환경에서는 여기되는 전하밀도가 급격히 줄어들기 때문에 상대적으로 표면적이 작고 표면결함밀도가 낮은 compact-TiO<sub>2</sub>의 도입이 훨씬 높은 효율을 유도한다는 것을 밝혔다. 이는 전자수송층/페로브스카이트 계면 결합 밀도의 제어가 낮은 광량에서 고효율을 확보하기 위한 핵심



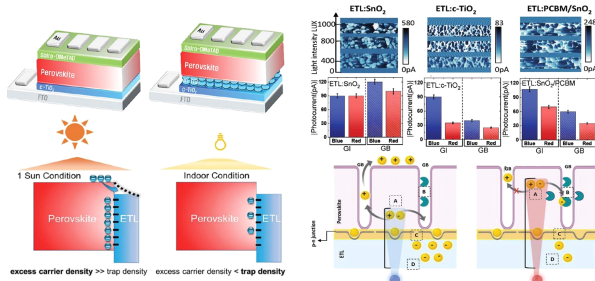


그림 6. 다양한 광원에서 페로브스카이트 태양전지의 광전구동 메커니즘.

전략임을 의미한다(*Nano Energy*, **68**, 104321 (2020)). 나아가, SnO<sub>2</sub>, compact-TiO<sub>2</sub> PCBM/SnO<sub>2</sub> 전하수송층이 도입된 페로브스카이트 태양전지에 대한 저조도 광원에서의 광전변환 특성을 연구하였다. 다양한 흡수 깊이를 가지는 blue/red LED광을 조사하며 광전구동 분석을 통해, 저조도 실내광 환경에서는 소자의 벌크층보다는 전하수송층 계면에서의 결합이 효율 변화에 큰 영향을 미침을 밝혔고, 상대적으로 결합밀도가 낮고 계면 전하수송을 향상시킬 수 있는 전하수송층(SnO<sub>2</sub>)을 도입하는 것이 저조도 환경에서 페로브스카이트 태양전지의 효율감소를 효과적으로 막아줄 수 있음을 밝혔다(*Adv. Energy Mater.*, **11**, 2101739 (2021)).

## 2.4 기능성 유기소재 및 분산공정 개발

### 2.4.1 유해인자 검출 케모센서 개발

본 연구실에서는 유해가스, 산염기가스 및 중금속이온 등의 유해인자들을 선택적으로 감지할 수 있는 색/형광/전기신호 변화 소재 및 소자를 개발하고 있다. 이소인디고 기반의 물에 녹는 H<sub>2</sub>S 센서를 이용하여 강, 호수 등의 현장 수질테스트 연구에 성공하였으며, 마스크나 섬유에 센서소재를 염색하여 필름상에서도 센싱이 가능한 센서를 구현하였다(*Sens. Actuators B: Chem.*, **402**, 134989 (2024)). 또한 ppb-ppm 수준의 NH<sub>3</sub> 가스를 변색 및 형광 변화로 검출할 수 있는 케모센서소재(*J. Harard Mater.*, **465**, 133150 (2024)), 그리고 트랜지스터 및 레지스터 소자의 전기신호 변화로 감지할 수 있는 유기소재(*Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2101981 (2021)) 및 탄소나노튜브/고분자 복합소재 개발에 성공하였다(*Sens. Actuators B: Chem.*, **367**, 132076 (2022))(그림 7).

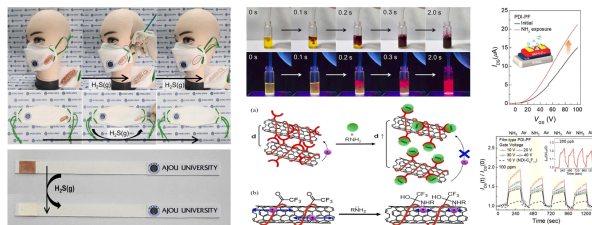


그림 7. 유해물질을 검출하는 변색, 형광, 전기적 케모센서.

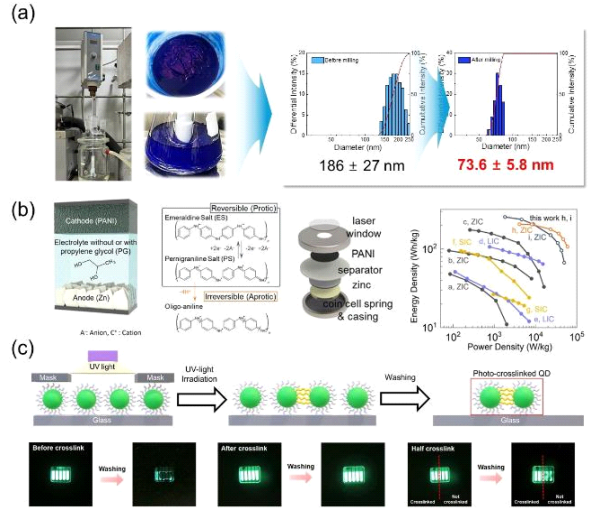


그림 8. (a) 안료, 분산제, 및 분산공정 개발을 통한 고안정성 안료분산액 개발, (b) polyaniline 기반 슈퍼커패시터 및 (c) 광가교 리간드를 적용한 LED 소자 패터닝 연구 결과.

### 2.4.2 안료 및 고분자복합 나노소재 분산

이미지센서와 디스플레이에 사용되는 컬러필터용 안료 및 안료분산제 개발 연구를 수행하고 있다. 이와 함께 wet milling 공정을 최적화하여 수십나노미터 사이즈의 고균일, 고온안정성 안료분산액 개발에 성공하였다(그림 8a). 또한, 응집성이 강한 전도성 고분자인 polyaniline을 다양한 산화 상태(ES/EB/LB)에서 고균일 나노입자로 분산시키는 공정을 개발하고 이를 기반으로 내부식성 polyaniline/금속 나노복합 소재 개발에 성공하였다. 개발된 고성능 polyaniline을 양극재로 도입하여 고안정성, 고출력(255 Whkg<sup>-1</sup>) 슈퍼커패시터를 구현할 수 있었다(*Small Sci*, **4**, 2400295 (2024))(그림 8b).

### 2.4.3 나노입자 광가교 리간드 소재 개발

본 연구팀에서는 자외선조사를 통해 광가교가 가능한 기능을 도입하여, 가교 기능과 소재의 분산기능을 동시에 갖춘 리간드 소재들을 설계하고 합성하는 연구를 수행하고 있다. 이를 발광형 나노입자에 도입하여 나노입자 박막 및 LED 소자의 광가교 패터닝을 구현하였다(*Chem Eng J*, **485**, 149792 (2024))(그림 8c).

## 3. 연구실 현황 및 비전

‘하이브리드 반도체 소재 및 소자 연구실’은 지난 약 10년간 유기 및 무기 하이브리드 소재 개발과 더불어 이를 기반으로 하는 차세대 에너지, 디스플레이, 센서소자를 구현하는 연구를 지속적으로 진행해 왔다. 그동안 쌓아온 연구업적과 경험을 기반으로, 본 연구실은 광전자산업이 직면한 한계점들을 돌파할 수 있는 첨단 소재 및 소자기술의 개발을 목표로 하고 있고, 이를 위해 연구실 모든 구성원이 연구에 매진하고 있다.