



경상국립대학교 화학과 유기반도체 재료 연구실 (Organic Semiconducting Materials Lab, GNU)

김 윤 희 (경상대학교 화학과 교수)

주소 : 경상남도 진주시 진주대로 501 경상국립대학교 화학과 352동 429호
전화 : 055-772-1491
이메일 : ykim@gnu.ac.kr
홈페이지 : <https://gnuosml.wixsite.com/ykimosml>

1. 연구실 소개

유기반도체 재료는 실리콘 기반의 무기물 반도체를 대체할 기술로, 유연성, 경량성, 경제성, 생산성, 뛰어난 성형가공성 및 분자 구조 제어를 통한 광전자적 특성의 용이성 등의 많은 장점으로 차세대 전자 재료로 주목받고 있다. 기존의 유기반도체 재료는 낮은 전하이동도 및 내구성의 문제로 실제 기술 적용에는 많은 어려움이 따를 것으로 알려져 있었으나 최근 들어 고성능 유기반도체의 개발과 다양한 소자 관련 기술 혁신으로 실리콘 반도체 못지않은 성능을 갖춘 유기 반도체 재료들이 보고되고 있다. 유기반도체 재료는 유기박막트랜지스터 (OTFTs) 이외에도 유기발광다이오드 (OLEDs), 유기태양전지 (OPVs), 유기광다이오드 (OPDs)와 같이 다양한 분야에 적용할 수 있으며 앞으로도 그 응용 분야는 점차 확대되어 갈 것이다.

본 “유기반도체 재료 연구실”에서는 다양한

유기 전자 기술 중에서도 유기발광다이오드, 유기태양전지, 유기박막트랜지스터에 적용할 수 있는 다양한 단분자, 고분자를 소자 요구 특성에 맞춰 전문적으로 설계하고 합성하는 연구를 진행하고 있다. 대표적으로 유기발광다이오드 분야에서는 전문성을 인정받아 2011년부터 삼성디스플레이-경상국립대 OLED 센터를 유치하였으며, 고성능의 청색 발광 소재를 비롯하여 다양한 전자 재료를 제공하고 활발한 인적, 물적 교류를 하고 있다. 또한, OLED 기술 분야에서 가장 이슈가 되고 있는 고성능의 청색 소재 개발을 위해 국내외의 여러 석학들과 공동연구를 진행하고 있으며 매년 세계 최고 수준의 성능을 보여주는 소재 개발로 관련 기술 개발에 기여하고 있다. 최근에는, 유기태양전지 소자를 구성하는 여러 층 중, 빛을 전기로 변환하는 광활성층에 적용할 수 있는 전자 억셉터 소재에 대해 연구하고 있다.

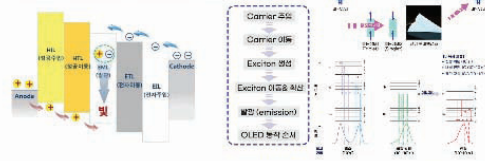
OSML (유기반도체재료연구실)

Organic Light Emitting Diode (OLEDs)

- 유기화합물에 전류가 흐르면 빛을 내는 전계 발광 현상을 이용하여 스스로 빛을 내는 자체발광형 기술로 본 연구실에서는 빛의 3원색에 해당하는 R/G/B 컬러에 해당하는 발광층 소재를 개발하고 있음.

*OLEDs (Organic Light Emitting Diodes)

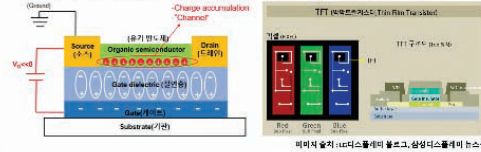
도핑된 유기물 층으로 유기물 층에서 전하의 재결합(recombination)이 일어나면 전하의 재결합(recombination)이 일어나고, 이 과정에서 광에너지가 방출되고 빛으로 방출된다. (radiative decay)이므로 발광층은 유기물 층으로 구성된다.



이러한 구조: 상정다층재료는

Organic Thin Film Transistor (OTFTs)

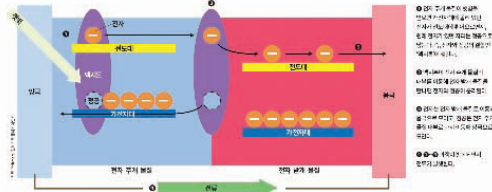
- Channel층에 유기반도체 층을 사용한 박막 트랜지스터, 제작 공정이 간단하고 비용이 저렴, 충격에 의해 깨지지 않고 구부러지거나 접을 수 있어 미래의 산업에 필수적인 요소



이러한 구조: 상정다층재료는

Organic Solar Cell (OPVs)

- 태양 에너지를 전기로 변환하는 기술, 기존 실리콘 기반의 태양전지 기술을 유기반도체 재료로 대체하여 지속가능한 에너지원으로 성장하고 있음. 본 연구실에서는 단분자/고분자 복합성 기술을 바탕으로 진공장비를 이용한 소자의 제작, 성능 향상을 연구하고 있음.

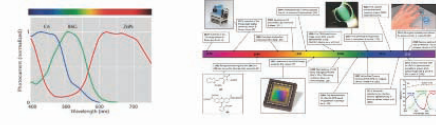


유기 태양전지의 원리는 태양광을 흡수하여 전하를 생성하는 것인데, 유기 태양전지는 전하를 생성하는 데 필요한 에너지가 낮기 때문에, 기존 실리콘 태양전지보다 적은 에너지로 전하를 생성할 수 있다. 또한, 유기 태양전지는 유연하고, 가볍고, 투명할 수 있어 다양한 응용 분야에 사용될 수 있다.

이러한 구조: 과학용어

Organic Photo Diode(OPDs)

- 유기물 기반의 포토다이오드는 UV로부터 Near IR까지의 넓은 흡수스펙트럼을 가지고 높은 photogeneration yield, 상대적으로 낮은 온도의 공정능력을 통해 광학 이미징 및 생체용량 제품이 현실화 가능



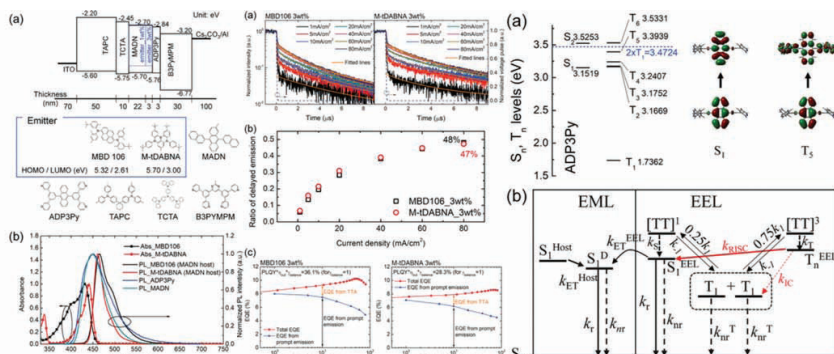
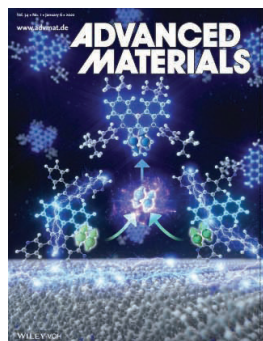
[그림 1] “유기반도체재료연구실”의 주요연구분야

2. 주요 연구 분야

2.1 유기 발광 다이오드 (Organic Light-Emitting Diodes, OLEDs)

유기 발광다이오드는 유기물 반도체의 여러 특성 중 우수한 발광 특성을 이용한 디스플레이 기술로, 유기물에 전류를 흘려주면 유기물의 밴드 갭에 해당하는 에너지만큼의 빛을 스스로 내는 자체 발광형 기술이다. 기존 디스플레이 기술인 LCD와는 달리 백 라이트가 필요 없어 구조가 단순하고 매우 얇을뿐더러 가벼운 디스플레이의 구현이 가능하다. 또한 우수한 발광 효율을 기반으로 높은 휘도를 갖고, 넓은 시야각, 빠른 응답속도로 인해 고화질의 영상을 생동감 있게 표현할 수 있다. 이렇듯 우

수한 특성을 바탕으로 상업화까지 이루어졌으나, 청색 발광 소재의 제한적인 효율 및 내구성의 문제로 한계를 극복하지 못하는 등 진일보하지 못하고 있다. 이러한 배경에는 서두에서 언급한 대로 청색 발광 소재의 태생적인 문제와 관련이 있다. 유기 발광 다이오드가 빛을 내는 방식은 적, 녹, 청색 3가지의 광원을 조합하여 모든 가시 광선 영역의 빛을 만들어낸다. 적색과 녹색 발광 소재는 인광 소재로 최대 내부 양자 효율이 100%에 달해 높은 효율을 달성한 반면 청색 발광 소재는 아직도 1세대 소재라고 불리는 형광 소재를 활용하고 있다. 형광 발광 메커니즘을 가지는 소재는 분자의 S_0 에너지 준위에서 S_1 에너지 준위로 여기된 전자가 다시 S_0 상태로 돌아가면서 생기는 발광

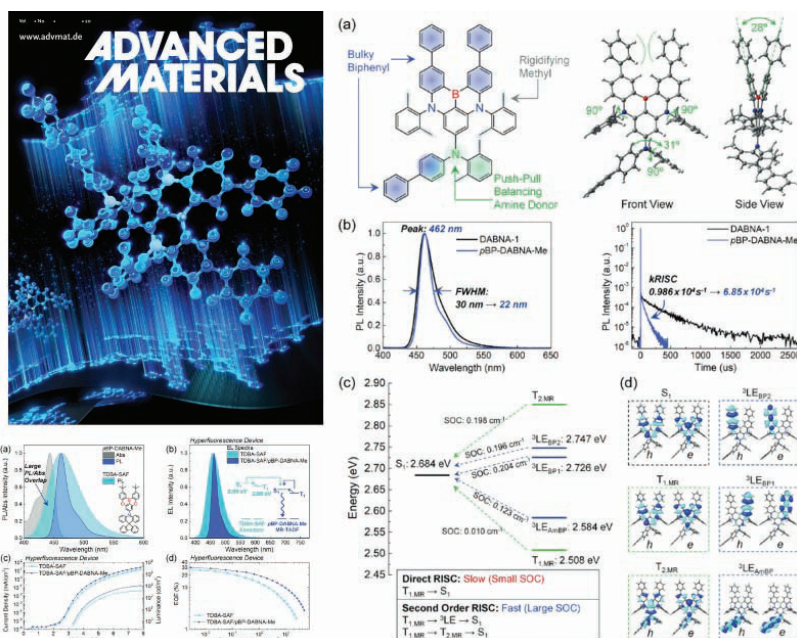


[그림 2] 형광 소재의 이론적 효율 한계를 뛰어넘는 OLED 소자

을 사용하는 형태이다. 인광 소재는 S_0 에너지 준위에서 S_1 로 여기된 전자가 T_1 에너지 준위로 계간전이(단일항에서 삼중항으로 이동하는 에너지전이)되어 다시 S_0 에너지 준위로 돌아갈 때 발생하는 에너지를 발광의 형태로 이용하게 되어 내부 양자 효율이 100%이다. 형광 소재는 인광 소재와는 달리 최대 내부 양자 효율이 25% 밖에 미치지 못해 절대적인 효율이 낮게 측정된다. 한편 인광 소재의 경우 일반적으로 금지된 계간전이를 발생시키기 위해 가격이 비싼 중금속을 이용해야 한다는 경제적인 문제와 함께 낮은 수명 특성 등의 문제점을 가지고 있어 아직까지도 청색 발광 소재로는 형광 소재가 이용되고 있다. 형광 소재의 단점으로는 에너지 전이가 단일항간에서만 일어나기 때문에 OLED 소자의 내부 양자 효율이 녹색, 적색의 인광 소재에 비해 1/4 정도로 낮다는 점이다. 최근 본 연구실에서는 새로운 효율 향상층 (Efficiency Enhancement Layer, EEL) 개발로 형광 소재의 단점으로 지적되던 이론적 효율의 한계를 뛰어넘는 OLED 소자를 구현하는 연구 결과를 논문으로 발표하였다. (*Adv.*

Mater., 2022, Inside front cover)

또한 본 연구실에서는 최근 OLED 재료에서 가장 많은 관심을 받고 있는 “열 활성 지연 형광” 일명 TADF(Thermally Activated Delayed Fluorescence) 발광 메커니즘을 가지는 소재에 대한 많은 연구와 함께 많은 우수논문들을 발표하며 국내 TADF 소재 부분을 선도하고 있다. 분자 내에서 도너와 억셉터 부분의 비틀림에 따라 분리된 HOMO와 LUMO는 T_1 에너지 준위와 S_1 에너지 준위를 가깝게 만들어 실온에서도 역계간전이가 이루어지게 한다. “열 활성 지연 형광”이라고 불리는 이 TADF 기술은 인광 메커니즘과 동일하게 삼중항을 사용하기 때문에 이론적으로 100%의 내부 양자효율을 가질 수 있어 발광 효율이 일반적인 형광 소재에 비해 매우 높게 나타난다. 본 연구실에서는 단단한 구조를 통해 분자 내 진동으로 인한 에너지 손실을 줄이고, 분자의 높은 수평배향률을 통해 높은 효율의 청색 TADF 물질을 보고한 연구 결과 (*Adv. Mater.*, 2020) 및 분자간 상호작용을 방해하는 작용기를 통해 우수한 색 순도를 갖고 도펀트 물질의 높은 도핑 농도에



[그림 3] 분자간의 상호작용을 효과적으로 억제하여 색순도를 향상시킨 고효율 청색 TADF 소재

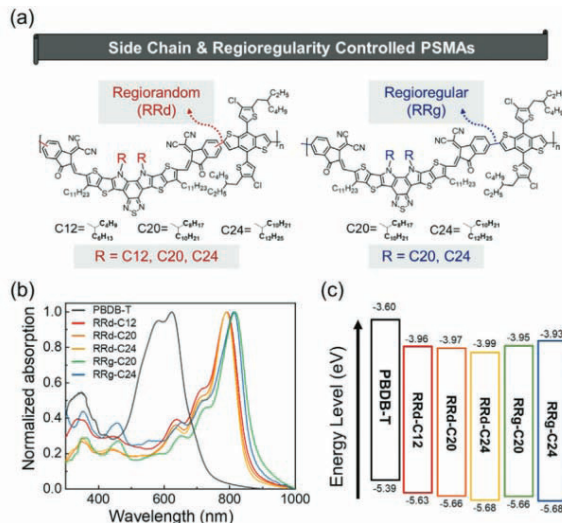
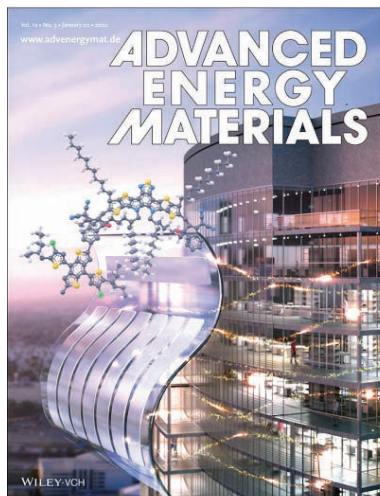


그림 4. 분자간 상호작용을 방해하는 작용기를 가져 높은 도핑농도에서도 안정적인 청색 TADF소재

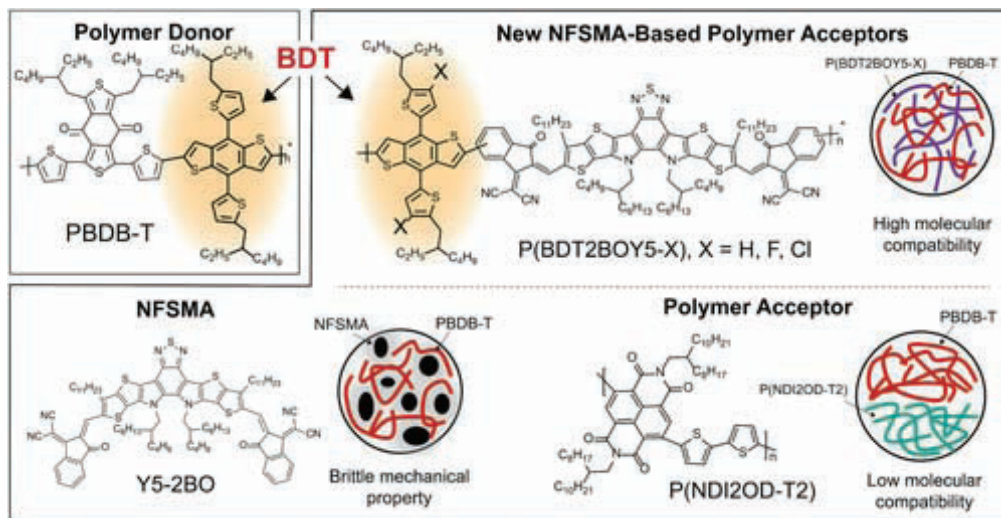
도 색의 변화가 없이 높은 효율을 나타내는 새로운 초형광 소재 개발이라는 우수한 연구 결과를 보고하였다. (*Sci. Adv.* 2023, *Adv. Mater.* 2022, Back cover / *Small*, 2022, Cover)

2.2 유기 태양전지 (Organic Photovoltaics, OPVs)

현재 유기 태양전지는 과거 폴리렌 기반 엑셉터 물질의 단점을 가지지 않으면서 높은 효율을 지니는 Y6 단분자 엑셉터 물질을 기반으로 한 연구가 중요하다. 본 연구실에서는 Y6 단분자를 기반으로 한 단분자 유도체들의 합성에



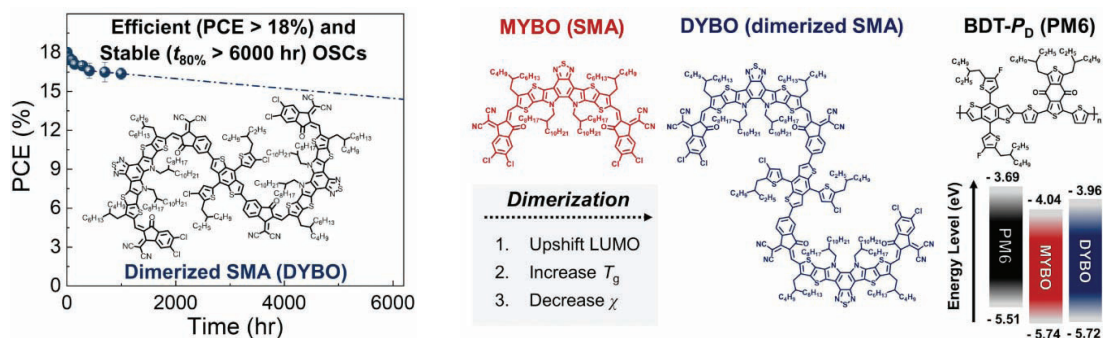
[그림 5] 체계적인 결사슬 및 백본 엔지니어링을 통해 유기 태양전지 성능을 극대화한 연구



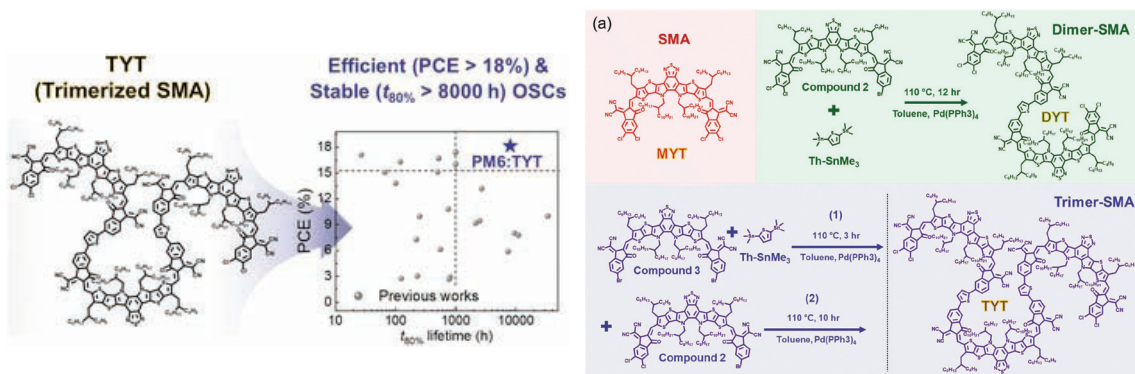
[그림 6] 동일한 단위체를 통해 안정성을 높인 유기 태양전지

관한 연구는 물론, 이를 고분자 형태로 연결한
 엑셉터 고분자에 관한 연구를 수행하여 그 결
 과를 보고하였다. 유기 태양전지의 광 활성층

에선 도너 역할을 하는 물질과 엑셉터 역할을
 하는 물질의 배열이 성능에 중요한 영향을 미
 치는데, 일반적으로는 도너 물질과 엑셉터 물



[그림 7] SMA의 이합체가 SMA 기반 유기태양전지의 안정성을 크게 향상시킨 연구

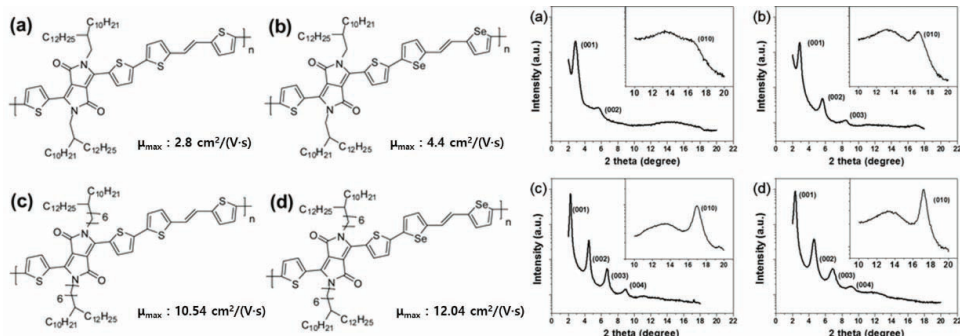


[그림 8] SMA의 삼합체가 SMA 기반 유기태양전지의 안정성을 크게 향상시킨 연구

질의 낮은 친화도로 인해 각각 물질의 자가 조립이 일어나 유기 태양전지의 성능과 안정성이 떨어지게 된다. 이를 해결하기 위해 도너 고분자와 엑셉터 고분자에 동일한 단위체를 도입하여 상호간의 친화도를 높여서 나타나는 안정한 배열을 통해 유기 태양전지의 성능을 끌어올릴 수 있음을 보고하였다. (*Adv. Energy Mater.* 2022, Cover / *Adv. Energy Mater.* 2022)

또한 현재 SMA(Small Molecule Acceptor) 기반 유기태양전지의 전력변환효율은 획기적으로 높아졌으나 상용화에는 장기적인 안정성이 부족하다. 본 연구실에서는 SMA의 이합체와

삼합체가 SMA 기반 유기태양전지의 안정성을 크게 향상시킨다는 결과를 보고하였다. 소자내 광활성층을 구성하는 엑셉터 소재로 구성된 SMA, 즉 단일 공여 단위인 벤조다이싸이오펜에 의해 공유 결합된 SMA 단위를 포함하는 분자 구조를 가진 올리고머 엑셉터를 개발하여, 고효율 특성은 유지하면서도 열적으로, 광학적으로 매우 안정한 고성능 유기 태양 전지 기술들을 개발하였다. (*Joule.* 2023 / *Energy & Environmental Science.* 2023)



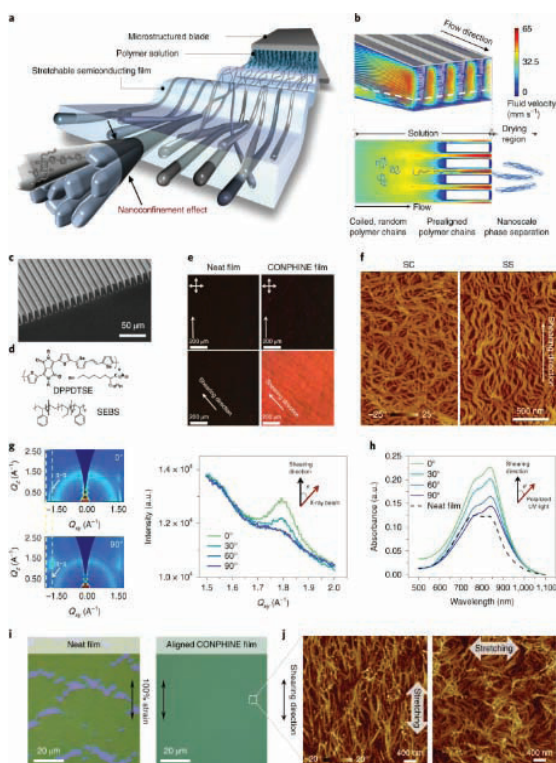
[그림 9] 세계 최고의 이동도를 가지는 유기 박막 트랜지스터 소재

2.3 유기 박막 트랜지스터 (Organic Thin Film Transistors, OTFTs)

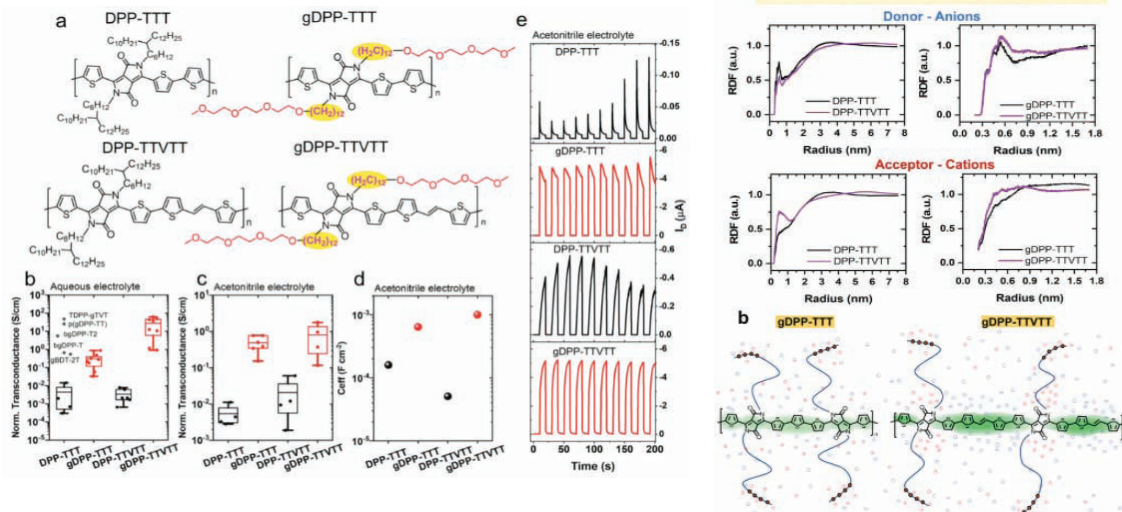
유기 박막 트랜지스터는 유기 물질로 이루어진 소자에서 전기적 신호를 통해 전류의 흐름을 제어하는 기술로, 기존의 실리콘으로 대표되는 무기물 트랜지스터가 가지지 못한 경제성, 경량성, 유연성을 가지는 소재로 주목받고 있다. 유기 박막 트랜지스터에서의 중요 요소는 전하이동도와 온-오프 비율이다. 트랜지스터의 효과를 잘 발휘하기 위해서는 양의 전하를 가지는 정공과 음의 전하를 가지는 전자가 원활하게 전달될 수 있어야 하기 때문에 전하이동도가 중요하며, 동시에 트랜지스터에서 전류의 흐름을 켜다 켜다 하는 스위치 작용을 발휘하기 위해서는 소자에 전압이 가해지지 않을 때와 가해지지 않을 때의 차이를 나타내는 온-오프 비율 또한 중요하다고 할 수 있다.

본 연구실에서는 다이케토피롤로피롤 유도체를 중심으로 한 유기 고분자 물질의 측면 알킬사슬을 바꾸어 고분자 박막에서의 분자구조 배열을 전하 이동에 효율적인 배열로 변화시키면서 전하이동도가 향상되었고, 이와 같은 결과를 통하여 세계 최고의 이동도를 가지는 유기

박막 트랜지스터 물질을 합성하고 그 결과를 보고하여 우수한 성과를 냈다. 또한 해당 물질을 기반으로 국내뿐 만이 아니라 해외 여러 우



[그림 10] 스트레처블 유기 박막 트랜지스터 구현



[그림 11] OEET에 적용하여 우수한 성능을 보인 유기 반도체 소재

수한 연구진들과의 공동연구를 통하여 외부에
서의 스트레치에 강한 스트레처블 유기 박막
트랜지스터를 구현할 수 있다는 뛰어난 연구
결과를 보고하였다. (*Science* 2023, *Nat. Mater.*
2019, *Science*, 2017) 최근에는 이들 소재를
OEET (organic electrochemical transistor)에 적
용하여 우수한 성능을 나타내는 결과를 보고하
였다 (*Adv. Mater.* 2022).



[그림 12] 유기반도체재료연구실 단체사진

• 김윤희 •



학력 및 경력

- 1986.3~1987.2 한국과학기술원 화학과(전공)
(이학석사과정)
- 1987.3~1990.2 한국과학기술원 화학과(전공)
(이학박사)(지도교수: 최삼권)
- 2012.1~2022.12 Scopus 발간 Macromolecular
Research(SCI J) 편집위원
- 2011.12~현 재 삼성 디스플레이/경상대 OLED 센터장
- 2016.3 ~ 현 재 경상대학교
분자재료화학의인재양성사업단 단장
- 2017.1 ~ 현 재 한국고분자학회 총무이사,
전무이사, 감사, 부회장,
수석 부회장
- 2019.10~2021.9 한국연구재단 국책본부 전문위원
- 2019.11~2022.11 국가과학기술지문위 소부장
기술특별위원회 위원/기술자문단 위원
- 2023.1 ~ 현 재 ACS 한국 지부장
- 2021.1 ~ 현 재 한국공학한림원 회원
- 2006.9 ~ 현 재 경상대학교 화학과 교수