

산학연 연구실 소개(1)

서울대학교 유기 고분자 전자 연구실 (Organic & Polymer Electronics Lab)

주소: 서울특별시 관악구 관악로 1 서울대학교 화학생명공학부 (우: 08826)
 전화: 02-880-8641
 E-mail: joonhoh@snu.ac.kr, Homepage: http://ohgroup.snu.ac.kr/



연구책임자 | 오준학 교수
 서울대학교
 화학생명공학부

1. 연구실 소개

유기 및 고분자 소재는 우수한 기계적 유연성, 분자구조 설계에 의한 특성 변화의 용이성, 용액 공정으로 인한 저비용 생산, 대면적화의 적합성과 같은 기존의 무기/금속 소재들과는 차별되는 다양한 장점을 지니며, 특히 최근 비정질 실리콘의 성능을 능가하는 유기 및 고분자 반도체 소재들이 다수 보고되면서 세계적으로 유기 전자소재 및 소자에 대한 기대감이 커지고 있다. 또한 사물인터넷 시대의 도래와 더불어 착용/부착형 생체 신호 또는 외부 환경물질 감지 센서 개발의 중요성이 커지면서 우수한 기계적 연성을 지닌 분자기반 전자소재는 플렉서블 및 웨어러블 전자소자의 핵심 소재로 큰 각광을 받고 있다.

본 “유기 고분자 전자 연구실”에서는 유기 및 고분자를 기반으로 하는 나노소재, 탄소 나노소재, 유/무기 하이브리드 소재를 합성하고 물리/화학적 특성 제어를 통해 전자 및 광전자적 성능을 향상시키고 이를 유기 전계효과 트랜지스터, 첨단 광전자소자, 다기능성 센서 플랫폼(화학/바이오/광/압력/뉴로모픽)에 응용하는 연구를 활발히 진행하고 있다(그림 1). 또한, 반도체, 전도체, 도펀트 등 다양한 전도 영역의 유기 및 고분자 소재를 개발하고, 박막 소자뿐만 아니라 자기조립, 주형 제조, 잉크젯 프린팅, 전기방사 등을 활용하여 나노소재를 제조하고 이를 유연 나노소자에 응용하는 연구를 진행하고 있다. 전하이동 메커니즘과 구조-물성 상관관계의 체계적 분석을 통해 고성능 유기 및 고분자 전자소재 개발의 지침을 마련하고, 전기적 성능과 구동 및 환경 안정성이 더욱 향상된 실용화가 가능한 분자기반 전자소재의 원천기술 개발을 연구 목표로 두고 있다.



그림 1. 유기 고분자 전자 연구실 연구개요.

2. 주요 연구 분야

2.1 유기 및 고분자 전자소자

2.1.1 유기반도체 기반 고성능 트랜지스터 제작

본 연구진은 thieryl-DPP 구조에 셀레노펜을 전자 주개로 도입한 PTDPPSe 시스템에 실록세인 말단기가 달린 알킬-실록세인 하이브리드 결사슬을 도입한 고분자 반도체를 양극성 트랜지스터로 응용하였고 공정적으로 용액전단법을 이용하여 분자배향 조절 및 결정성 증가를 도출하여 소자 성능을 향상시켰다. 더 나아가 PTDPPSe-Si의 결가짓점 제어로 π -면간 거리 및 3차원 전하이동 채널을 최적화하여 정공 이동도와 전자 이동도가 각각 $8.84 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 와 $4.43 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 인 세계 최고 수준의 고성능 양극성 소자 특성을 보고하였다(그림 2).

2.1.2 탄소 나노재료 기반 전자소자 개발

탄소 원자 한 층의 2차원 평면 구조로 이루어진 그래핀은 높은 전하 이동도와 광 투과도, 우수한 기계적 강도와 화학적 안정성 등 우수한 특성을 바탕으로 여러 분야에서 신소재로 각광받고 있다. 본 연구진은 그래핀을 전계효과 트랜지스터, 태양전지, 센서 등 다양한 전자소자에 적용하여 우수한 성능의 전자소자를 제작하는 연구에 매진하고 있으며, 이를 고성능 투명전극, 트랜지스터, 광/화학 센서에 응용하는 연구를 수행하고 있다.

2.1.3 차세대 유기트랜지스터 개발

본 연구진은 높은 이동도를 가진과 동시에 높은 기계적 물성을 가지는 2차원 유기소재 및 자가치유가 가능한 고분자 소재를 개발하여 이를 플렉서블 유기트랜지스터 개발에 활용한 바 있다. 그리고 2차원 구조를 가지는 방향족 네트워

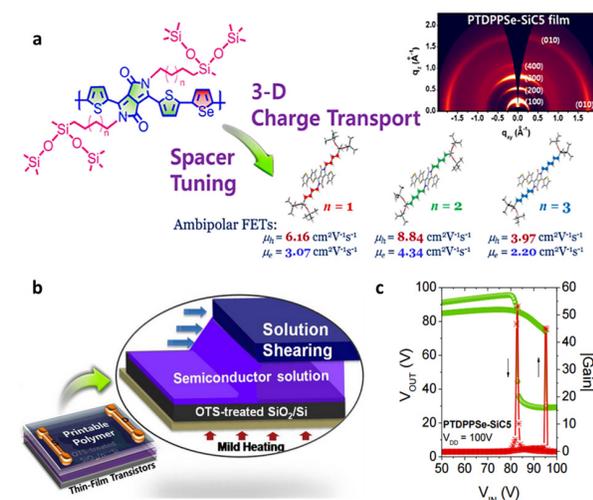


그림 2. (a) 하이브리드 결가짓점을 제어한 PTDPPSe-Si의 분자구조, (b) 용액전단법을 이용한 소자 제작 모식도, (c) 인버터 특성.

크 기반의 유기물 소재(C_5N)를 개발해 이를 트랜지스터에 응용하여, 높은 전자 이동도($996 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) 및 홀 이동도 ($501 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)를 얻었다(그림 3a). C_5N 기반 트랜지스터는 높은 열적 안정성과 더불어 플렉서블 소자로의 응용이 가능하였다. 또한, 신축성 트랜지스터를 제조하기 위해 고분자 반도체 결사슬기에 우레탄 작용기를 도입하여 인접한 결사슬 사이에 수소결합 발생을 유도해 인장으로 인해 발생한 crack이 자가 치유되는 연구를 진행하였다(그림 3b).

2.2 첨단 광전자공학

2.2.1 키랄성 광전자소자 개발

원편광은 전자기파의 편광축 회전 방향에 따른 키랄성을 지니고 있는 빛으로서, 추가적인 광학 요소 없이 이러한 원편광을 발광 혹은 감지하는 기술은 다양한 광학 분야로의 응용이 가능한 차세대 기술로 주목받고 있다.

본 연구진은 키랄성 perylene diimide(PDI)의 자가조립을 통해 유도된 초분자 키랄성을 활용하여 가시광선 영역에서의 원편광 감지를 보고한 바 있다(그림 4a). 또한 PDI의

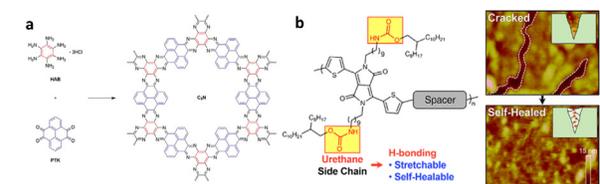


그림 3. (a) 2D 구조를 가지는 C_5N 의 구조 및 모식도, (b) 우레탄기가 도입된 자가치유가능 고분자 공중합체 구조.

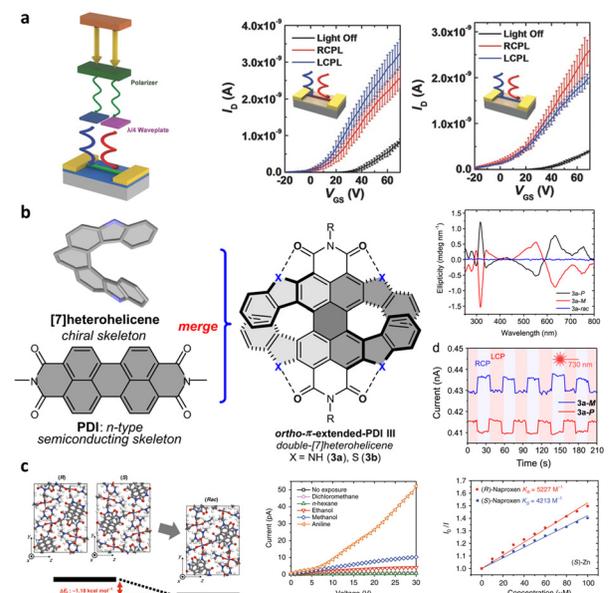


그림 4. (a) 초분자 키랄성을 이용한 원편광 감지 소자, (b) 신개념 키랄성 분자를 이용한 원편광 감지 소자, (c) 키랄성 초분자 배위 고분자 결정 구조 및 센서 응용결과.

ortho position에 π -확장을 통해 double-helicene 형태의 나선형 PDI 반도체를 제조하였다. 최종적으로 전계 효과 트랜지스터 기반 광 감지 소자를 제작하였을 때 우수한 원편광 감지 능력을 보여주었다(그림 4b). 한편, naphthalene diimide 리간드와 Zn 이온과의 반응을 통하여 키랄성 초분자 배위 고분자를 제작하였고, 이를 자외선, hydrazine 및 aniline 등을 감지할 수 있는 다기능성 센서로 활용하였다. 더 나아가 photoluminescence quenching 현상을 이용하여 (R)-naproxen 과 (S)-naproxen을 구분하는 데 성공하였다(그림 4c).

2.2.2 페로브스카이트 기반 고성능 광전자소자 개발

본 연구진은 효율적인 결정 구조 제어 방법, 결합 차폐 공법, 첨가물 공법 등의 공정 적용을 통해 페로브스카이트(perovskite)의 특성을 제어하여 고성능 광전자소자로 응용하는 연구를 진행하고 있다. 주석 함유 페로브스카이트에 formamidinium thiocyanate(FASCN) 혹은 ionic imidazolium tetrafluoroborate(IMBF₄)를 첨가제로 활용하여 박막 형성 과정에서의 산화 방지, 결합 차폐, 결정성 향상을 통한 태양 전지의 성능 향상을 유도하였다(그림 5a,b). 또한, 용액공정 방식을 이용하여 페로브스카이트의 일차원 자가조립을 유도하였다. 이를 기반으로 제작된 광 감지기는 와이어의 장축 방향으로의 독특한 band-edge 조절을 특징으로 하는 에너지 장벽으로 인해 매우 낮은 암 전류 값을 갖는 것을 확인하였다(그림 5c).

2.2.3 플라즈모닉 기술을 응용한 고성능 광전자소자 개발

본 연구진은 블록 공중합체 리소그래피와 나노임프린팅 리소그래피 기술을 결합한 다중 나노 패턴 제작 공정방식을 고안하였고, 이를 이용하여 전자 소자의 후면 전극에 다중 나노 패턴을 도입하여 이로 인해 발생하는 다양한 플라즈모

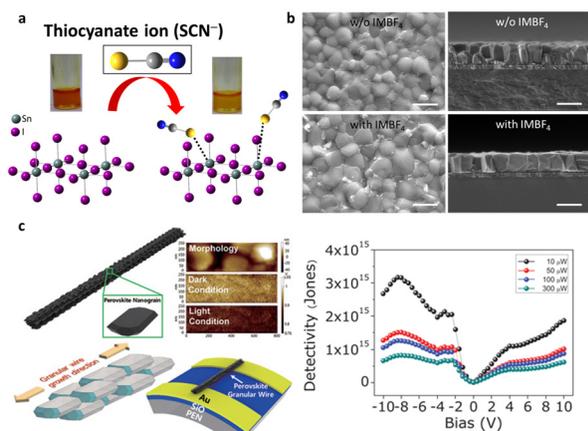


그림 5. (a) FASCN첨가제의 산화 방지 효과, (b) IMBF₄ 첨가제의 결정성 향상 효과, (c) 일차원 과립형 페로브스카이트 와이어를 활용한 광 센서.

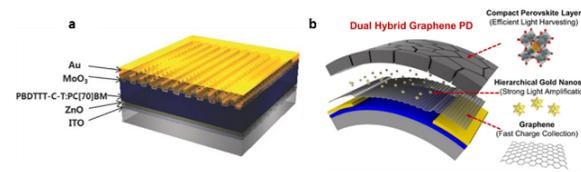


그림 6. (a) 다중나노패턴의 플라즈모닉 효과를 활용한 광센서, (b) 금 나노 입자를 활용한 광센서.

닉스 효과를 통해 유기전자 소자의 광 흡수를 향상시킨 연구를 보고하였다(그림 6a). 또한, 금 나노입자의 도입을 통해 강한 플라즈모닉 효과를 유도하여 기존 그래핀 기반 소자 대비 광 감지 성능을 높인 바 있다(그림 6b). 최근에는 플라즈모닉 효과를 도입한 고성능, 고에너지 변환 효율을 갖는 광소자 개발을 목표로 다양한 금속 나노입자 및 복합 나노구조체를 개발하고 있다.

2.3 다기능성 센서 개발

2.3.1 유기 기능성 물질 개발 및 유기 센서 응용

본 연구진은 화학물질, 빛, 압력 등의 외부자극을 민감하게 감지할 수 있는 유기소재 기반 활성 물질을 활용한 유연/신축성 센서 플랫폼을 개발하는 연구를 수행하고 있다.

부드러운 고무상의 계면을 유도할 수 있는 유기 분자 절연체 *m*-bis(triphenylsilyl)benzene(TSB3)를 도입함으로써

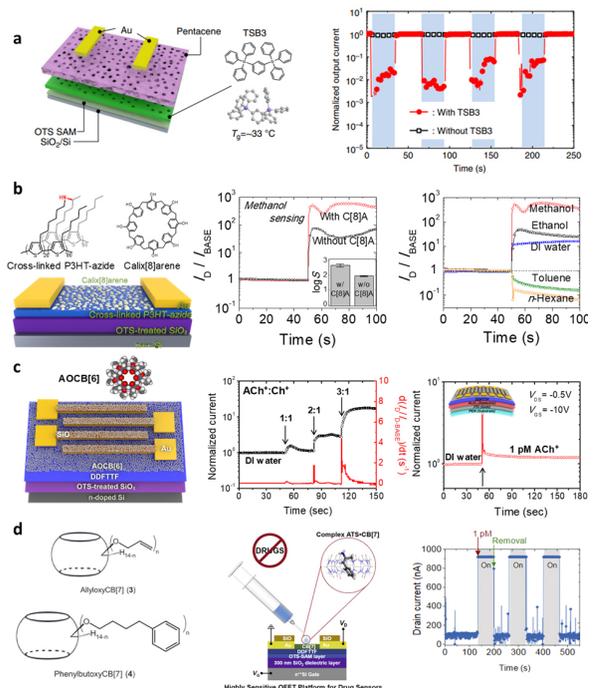


그림 7. (a) 펜타센/TSB3 박막 기반 센서와 메탄올 감지 결과, (b) P3HT-azide를 활성층으로 사용하고 C[8]A로 기능화한 화학 센서의 감지 결과, (c) AOCB[6]로 기능화된 바이오 센서와 아세틸콜린 감지 결과, (d) CB[7]로 기능화된 암페타민 감지 센서와 감지 결과.

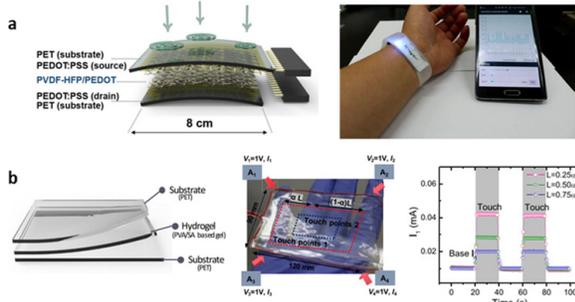


그림 8. (a) 3차원 전도성 나노스핀지막의 제조 및 저항타입 센서, (b) 하이드로젤을 활용한 멀티센서.

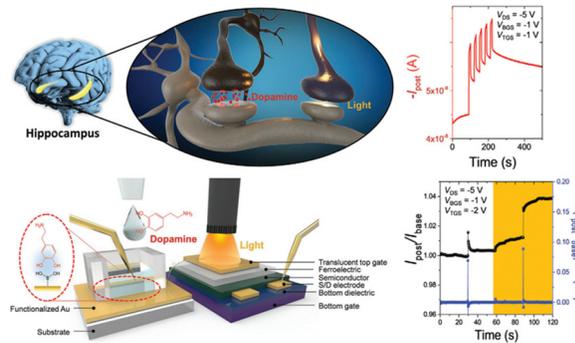


그림 9. 해마 시냅스 모방형 도파민-빛 감응형 인공 시냅스 소자 및 감지 결과.

나노다공성 펜타센(pentacene) 박막을 제조한 바 있으며, 이러한 나노다공성 박막은 높은 이동도($\sim 6.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)를 가지면서 동시에 높은 민감도를 보이는 고성능 화학 센서로의 응용이 가능하였다(그림 7a). 또한 자외선 조사만으로 가교(cross-linking)가 가능한 azide-functionalized poly(3-hexylthiophene) (P3HT-azide)을 유기 반도체 트랜지스터 기반 화학 센서의 활성층으로 활용하여 소자의 용매 안정성을 향상시켰다(그림 7b). 반도체 표면 기능화와 더불어, 기공을 가지는 Cucurbituril 기반 유기 수용체를 도입하여 고성능 화학/바이오 센서의 구현에도 성공하였다(그림 7c,d). 신경 전달 물질인 아세틸콜린(acetylcholine) 또는 각성제의 주성분인 암페타민(amphetamine)을 선택적으로 감지할 수 있는 센서 플랫폼을 제시하였다.

본 연구진은 또한 압력에 대한 자극을 정밀하게 감지할 수 있는 유기소재 기반 압력/터치 센서를 제조한 바 있다. 3차원 형태로 고분자 섬유 스펀지 막을 제작하였으며, 저항타입 센서로 개발하였다(그림 8a). 또한, 신규 이온전도성 하이드로젤 복합체를 활용하여, 투명하면서도 자가치유성을 지닌 유연 터치센서 제작에 성공하였다(그림 8b).

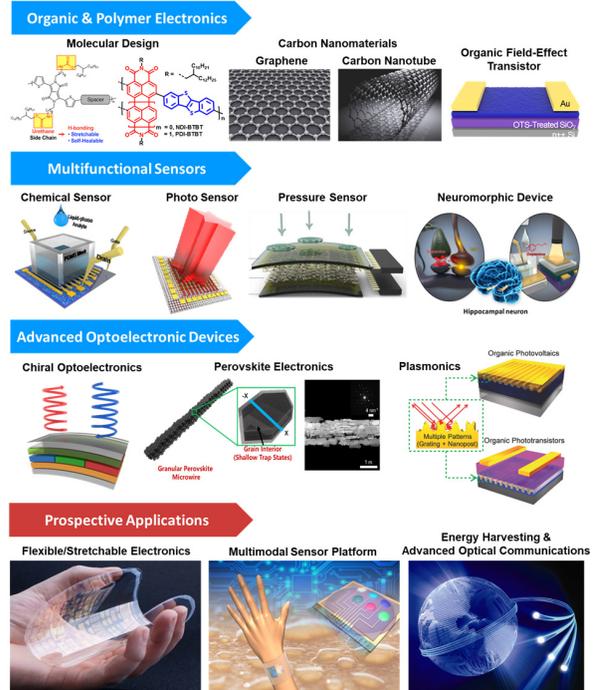


그림 10. 본 연구실이 보유한 기술 및 비전.

2.3.2 뉴로모픽 소자 및 생체 감각신경 모사 시스템 개발

뉴로모픽 컴퓨팅, 차세대 지능형 반도체 등으로의 응용이 가능한 인공 시냅스 소자에 대한 연구는 최근 크게 각광을 받고 있다. 해마 시냅스 모방형 도파민-빛 감응형 인공 시냅스 소자 개발에 성공하였다(그림 9). 추가 게이트 전극을 도입한 이중 게이트 소자를 기반으로 구동 전압을 낮춘 것은 물론, paired pulse facilitation 수치를 향상하였으며, 빛에 의해 더욱 강화된 메모리 consolidation 효과를 보이며, 학습 이벤트에 대한 반복적 노출(도파민)을 통해 해마 시냅스, 신경 축진 및 빛에 의한 기억 강화의 특수 기능을 성공적으로 모방하였다.

3. 연구실 현황 및 비전

현재 본 연구진은 오준학 교수와 박사후 연구원 1명, 박사과정 12명, 석사과정 1명으로 구성되어 있으며, 유기 및 고분자 반도체, 전도성 고분자, 유전체 및 탄성체 등 다양한 유기 고분자 소재를 합성하고, 유기 트랜지스터, 유기 태양전지, 화학/바이오/광/압력/뉴로모픽 센서, 전자피부 및 유연/신축성 전자소자로 응용하는 연구를 활발히 수행하고 있다. 본 연구진은 성능과 안정성이 극대화된 신개념 고성능 유기 및 고분자 전자소재를 개발하고, 차세대 유기 전자 및 광전자소자의 상용화를 앞당기는 핵심 원천기술을 확보하여, 국내외 관련 산업의 발전에 이바지하고자 한다(그림 10).