

산학연 연구실 소개

연세대학교 화공생명공학과 스마트 전자소자 및 공정 연구실 (Smart Electronic-Device & Process Lab. (SEPL), Yonsei University)

주소: 서울특별시 서대문구 연세로 50 연세대학교 화공생명공학과 (우: 03722)

전화: 02-2123-2748

E-mail: jhcho94@yonsei.ac.kr



연구책임자 | **조정호** 교수
연세대학교
화공생명공학과

1. 연구실 소개

1947년 트랜지스터의 발명으로부터 전자공학은 눈부신 발전을 이루어 왔다. 특히 실리콘 기반의 전자소자들은 견고하면서도 우수한 성능을 기반으로 현재 전자공학의 근간을 이루고 있다. 하지만, 미래 전자소자는 성능 및 내구성 이외의 다양한 기능성을 가진 소자를 개발하는 방향으로 진행되고 있고, 이를 만족하기 위해서는 목적에 부합하는 물성을 지닌 소재 및 소자 개발이 요구되고 있다. 실리콘과 같이 화학적 결합에 의해 형성되는 무기소재와 다르게 유기소재의 경우 분자의 파이 오비탈 사이 인력에 의해 형성되기 때문에 유연성, 신축성을 가지면서 높은 전기적 특성을 가진다. 저차원 나노소재(그래핀, 탄소나노튜브(CNT), 금속나노입자/선 등) 역시 우수한 전기적/광학적 특성과 함께 유연성, 신축성 등의 우수한 기계적 특성을 가지고 있어, 실리콘을 대체하는 핵심소재로서 각광받고 활발히 연구되어 왔다.

본 “스마트 전자소자 및 공정 연구실”은 2008년 설립된 이후, 유/무기 소재 및 저차원 나노소재를 이용한 전자소자, 광전소자 및 논리 회로 등을 개발하는 연구를 수행해 왔으며, 특히 높은 전기적, 기계적 성질을 가지는 유기소재(유기 반도체, 전도성 고분자, 이온 전도체 등)와 저차원 나노소재(그래핀, CNT, 전이금속 디칼코게나이드(TMDCs), 은나노선(AgNWs) 등)를 이용해 유연성, 신축성 등 다양한 기능성을 가지는 스위칭 소자, 검출 소자, 센서 소자 등을 구현하는 핵심 기술들을 개발해 왔다(그림 1). 이중 잉크젯 프린팅과 광경화 공정을 이용한 대면적 패터닝 기술은 복잡한 고해상도 유기소재 패턴을 가능하게 해 유기전자소자의 상용화 가능성을 보여주었다. 또한, 저차원 전도체와 고분자 구조체 간 하이브리드를 통해 유연센서의 성능을 크게 향상시켰으며, 이를

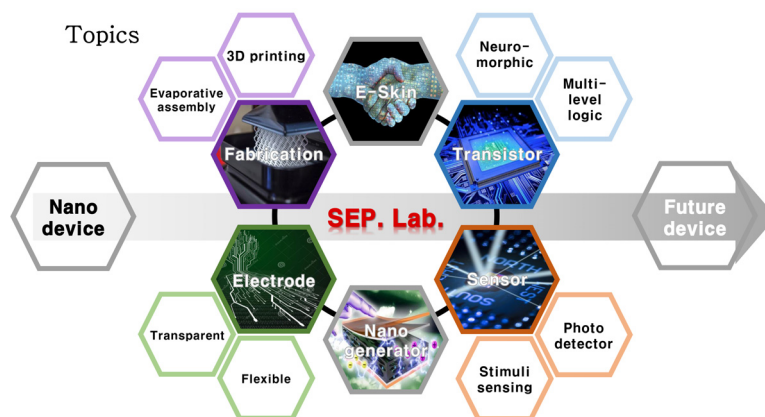


그림 1. 스마트 전자소자 및 공정 연구실 주요 연구분야.

3D 프린팅을 이용해 on-demand 형태로 제작해 self 헬스케어 기술로의 발전 가능성을 보여주었다. 최근에는 인간의 정보전달 및 처리를 모방하는 뉴로모픽 소자 및 회로를 이용해, 기존 컴퓨팅 시스템의 소비전력, 속도 등의 한계를 뛰어넘는 차세대 컴퓨팅 시스템에 대한 연구를 진행중이다.

2. 주요 연구 분야

2.1 유기소재 기반 전자/광전자 소자

2.1.1 유기소재 대면적 패터닝 기술 및 전자소자 개발

유기소재는 무기소재에 비해 우수한 기계적 물성으로 인해 유연 전자장치에 적용이 용이하며 유기용매에 쉽게 녹아 대면적 용액공정이 가능하다는 장점을 가진다. 그러나 전자소자의 구현을 위해 전극, 반도체, 절연체 등이 패턴 및 적층되어야 하기 때문에, 모든 소재를 용액공정으로 제작하는 것은 매우 어려운 일이다. 특히, 후속 처리 단계에서 photoresist (PR), developer 등의 다양한 화학 물질 노출에 의해 이전 층이 식각되는 등의 문제가 발생한다. 따라서, 기존 방식을 활용해 다층의 유기소재를 적층하는 것은 어려움이 있다.

이러한 문제를 해결하는 방법으로 프린팅 공정이 있다. 특히, 잉크젯 프린팅 공정은 패턴하고자 하는 위치에만 용액을 도포하기 때문에, 자외선 노출이나 식각 등의 공정이 필요 없어, 다른 층에 미치는 영향이 적다는 장점이 있다. 본 연구실에서는 잉크젯 프린팅을 이용해 고분자 기반 전도체, 반도체, 절연체 등 다양한 유기소재를 패턴 하는 기술을 보유하고 있으며, 이를 통해 트랜지스터 및 NOT, NAND, NOR 등의 다양한 CMOS 논리 소자를 구현하였다.

“광경화 공정”은 유기소재의 패터닝 및 다층 적층의 한계를 극복하는 좋은 방법이다. 광경화는 광원에 선택적 노출을 통해 유기소재의 패턴을 가능하게 하며, 패턴 된 유기소재의 화학적 안정성을 높이기 때문에 여러 유기소재를 패턴하고 적층 하는데 용이한 공정이다. 또한, 분자간의 가교

를 통해 유기소재의 열적, 기계적 안정성을 향상시키는 것이 가능하다. 본 연구실에서는 자외선에 의해 그 구조가 분해되어 유기물의 alkyl chain과 화학결합이 형성되는 azide group(N_3)을 2개 이상 가지는 광경화성 유기소재를 개발하고, 이를 이용해 전도성 나노입자, 반도체 고분자, 절연성 고분자를 각각 패턴하여 all-photopattern 유기 트랜지스터 소자를 제작하였다(그림 3). 또한, p, n형 all-photopattern 트랜지스터를 연결해 NOT, NAND, NOR 등의 다양한 CMOS 논리 소자를 구현하였다.

2.1.2 2차원/유기 하이브리드 소재기반 고성능 광 검출소자

유기소재는 광전자소자 분야에서도 많은 관심을 받으며 연구되어 왔지만 유기소재 기반 광전자소자를 상용화하기 위해서는 많은 한계가 있다. 특히, 유기소재의 낮은 전기적 특성은 고성능 유기 광전자소자의 가장 큰 문제가 된다. 이러한 소재적 한계는 높은 전기적 특성을 가지는 2차원 소재와의 하이브리드를 통해 해결하는 것이 가능하다. 2차원 소재는 전하의 이동방향을 2차원 방향으로 제한함으로써 매우 높은 전기적 특성을 보이지만 원자단위의 매우 얇은 두께로 인해 낮은 광 흡수 특성을 가진다. 또한, 2차원 소재는 유기 반도체의 epitaxy 성장에 도움을 주기 때문에, 유기소재와 2차원 소재의 하이브리드는 고성능 광검출소자를 구현하는 핵심기술이 될 것이다.

본 연구실에서는 그림 4와 같이 그래핀과 유기염료의 하이브리드 소재를 이용하여 고성능의 그래핀 기반 광 검출소자를 제작하였고, 다양한 색을 흡수하는 유기염료를 이용해 특정 파장을 검출하는 광 검출소자, 유기염료들을 혼합하여

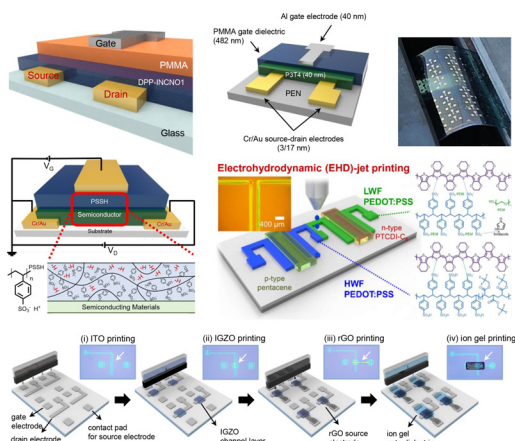


그림 2. 잉크젯 프린팅을 이용한 유기소재 패터닝 및 전자소자 구현.

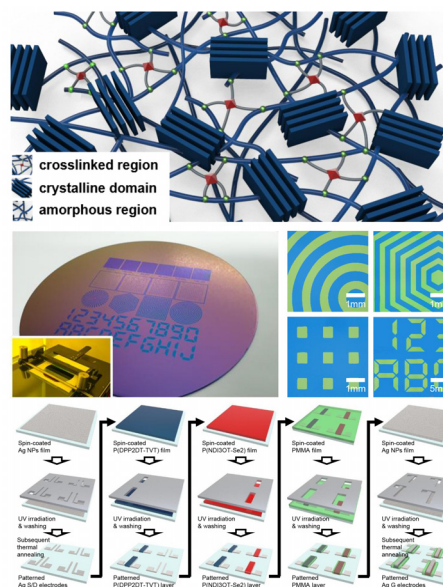


그림 3. Azide group을 가지는 광경화성 유기소재를 이용한 대면적 패터닝 및 all-photopattern 유기소자 제작.

넓은 범위 파장을 흡수하는 광 검출소자를 구현하였다. 또한 그래핀-유기염료-그래핀으로 구성된 샌드위치 구조를 도입해 기존 광 검출소자의 성능을 향상시키는데 성공했다. 마지막으로, 그래핀/유기반도체 소재의 하이브리드를 이용하여, 그래핀 쇼트키 장벽 트랜지스터 구조를 가지는 광 검출소자를 제작하였으며, 게이트에 의한 암 전류 억제효과를 통해 광 검출소자의 검출능을 큰 폭으로 향상시키는 기술을 개발하였다.

2.2 그래핀 소재 기반 유연 센서

그래핀은 2차원 형태의 탄소 동소체로 넓은 표면적과 높은 전기전도도, 우수한 기계적 물성으로 다양한 분야에서 각광받고 있는 나노소재이다. 생체신호 감지 센서 분야 또한 그래핀의 우수한 전기, 화학, 물리적 성능을 활용하고 있다. 본 연구실은 화학기상증착법을 통해 합성된 그래핀과 용액공정이 가능한 그래핀 옥사이드를 이용해 다양한 외부 자극을 동시에 감지할 수 있는 유연 전자피부를 그림 5과 같이 제작하였다. 간단한 스프레이 코팅을 통해 polydimethylsiloxane (PDMS) 위에 매트릭스 형태로 제작된 센서는 온도, 습도, 압력의 세가지 자극을 동시에 감지할 수 있으며, 자극을 매핑하는 것 역시 가능하였다. 또한, 그래핀의 견고하면서도 유연한 물성에 주목해, 그래핀 옥사이드 마이크로 버블 조립을 통해 close-cellular 구조를 가진 strain 센서를 구현하였다. 본 strain 센서는 그래핀의 물성으로 인해 90% 이상의 압축 하에서도 형상이 복원되는 견고한 성질을 보인다.

다공성 구조체인 설당을 3D 프린팅하여 이를 희생층으

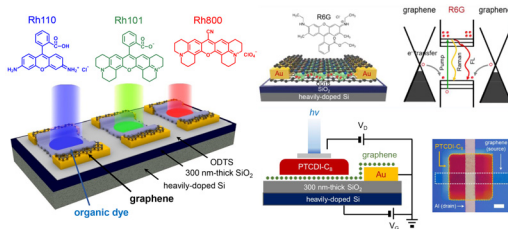


그림 4. 2차원/유기염료 및 2차원/유기반도체소재하이브리드 기반 광검출소자.

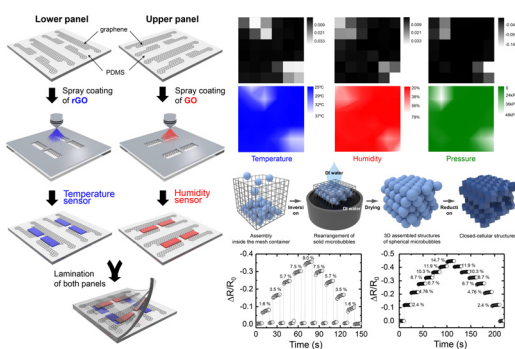


그림 5. 그래핀 기반 소재를 이용한 다양한 유연센서.

로 사용, 설당의 역구조를 가지는 다공성 PDMS 구조체를 만들었고, 그 표면에 CNT를 도포해, 생체신호를 감지하는 센서를 제작하였다. 완성된 센서는 그림 6과 같이 착용자의 신체에 맞게 디자인하여 다양한 생체신호를 감지하는데 사용하였다. Strain을 비롯해 electroencephalography (EEG), electrodermal activity (EDA), electromyography (EMG) 등의 생체신호를 측정하였고, 이는 상용화된 전극소재와 비교하여 우수한 성능을 보이는 것을 확인하였다. 이외에도 AgNW를 PDMS에 함침하고 기관에서 박리할 때 발생하는 micro-crack을 이용해 strain 센서로 활용하는 연구도 진행하였다. 가해지는 strain에 따라 micro-crack으로 유입되는 유체의 양이 달라져 정전용량이 변하게 되고, 이를 통해 strain을 정량화하는 것이 가능하였다. 현재는 2D 소재이면서 물에 분산이 가능하고 높은 전기전도도를 가지는 MXene을 센서로 활용하는 연구와 이를 artificial synaptic 트랜지스터와 연결해 인간의 행동을 모사하는 연구를 동시에 진행 중이다.

2.3 사람을 모사하는 뉴로모픽 소자

최근 자율주행, 인공지능 로봇 등 인공지능기술에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라, 인공지능을 일상생활에 도입하기 위해 소프트웨어 분야에서 많은 연구들이 진행되고 있다. 하지만 하드웨어의 개발없이 소프트웨어 개발을 통해 자율주행, 인공지능 로봇과 같은 고수준의 인공지능을 구현하는 것은 높은 에너지 소모량, 낮은 집적도, 낮은 연산 효율

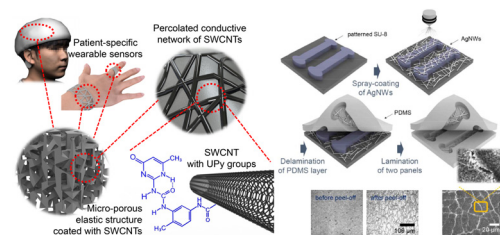


그림 6. 3D 프린팅을 사용해 제작된 생체신호 감지용 전도성/다공성 구조체.

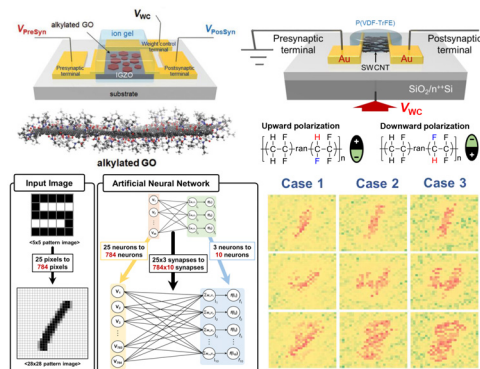


그림 7. 고분자 소재 기반 뉴로모픽 소자 및 패턴인식 시뮬레이션.

등의 많은 제약이 존재한다. 따라서 본 연구실에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, 인공지능에 적합한 뉴로모픽 소자 제작에 대한 연구를 진행하고 있다(그림 7). Floating-gate 메모리 기반의 뉴로모픽 소자의 경우, floating-gate로 사용된 그래핀 옥사이드 표면에 alkylation을 통해 터널링 절연층을 형성하였다. 터널링 절연층을 통한 전하의 이동이 인가된 게이트 전압에 의해 효과적으로 제어되는 것을 확인하였다. 또한 charge trapping용 소재를 더욱 간편하게 제조하기 위하여, 표면이 자연 산화되는 특성을 가진 MXene을 이용한 MXene floating-gate 뉴로모픽 소자에 관한 연구도 진행하였다. 이를 통해 간단한 구조의 뉴로모픽 소자를 제작하였으며, 잉크젯 프린팅을 통해 강유전체 층을 형성하여 보다 간단한 공정을 통해 뉴로모픽 소자를 제작하였다. 이러한 소재 개발 및 소자 최적화 연구를 통해 높은 패턴 인식률을 지닌 뉴로모픽 소자를 개발하였고, 뉴로모픽 소자가 인공지능용 하드웨어 소자로써의 적합성을 확인하였다.

또한 본 연구실에서는 뉴로모픽 소자의 응용분야를 확장하기 위하여 인체의 생명 활동을 전자소자로 모사하는 연구 또한 진행하고 있다(그림 8). 인간의 시신경과 같이 외부 자극(빛 신호)에 반응하는 뉴로모픽 소자 제작을 위하여, 유기 반도체 물질인 copper-phthalocyanine(CuPc)과 para-sexiphenyl(p-6p)를 사용하였으며, 빛 신호를 통해 학습 및 인식이 가능한 소자를 제작하였다. 더 나아가 항상성 유지가 가능한 뉴로모픽 소자로써, 음성 피드백 방식을 도입하여 호흡을 통해 혈중 산소농도를 유지시키는 시스템에 관한 연구를 진행하였다. 혈중 산소농도를 유지시켜주는 시스템의 경우, 인공 뉴런 회로와 하나의 뉴로모픽 소자를 이용하여, 산소가 없을 때는 산소를 공급해주고, 높은 산소 농도에서는 산소 공급을 차단하는 기능을 구현하였다. 이러한 생체와 유사한 거동을 보이게 설계된 뉴로모픽 소자를 통해, 최근에는 인체의 여러 생명활동을 모사하는 것뿐 아니라 그 기능을 보다 발전시키는 연구를 진행하고 있다.

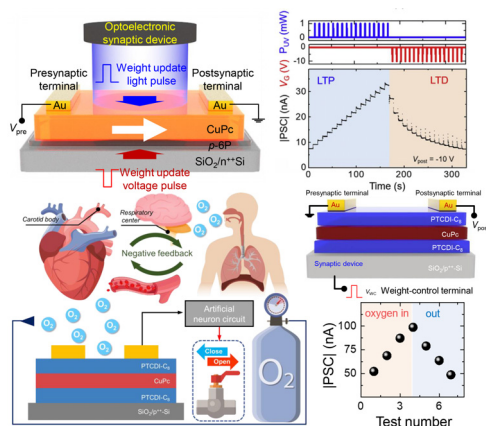


그림 8. 뉴로모픽 소자 기반 시신경 및 생체 항상성 유지 시스템 모사.

3. 연구실 현황 및 비전

본 스마트 전자소자 및 공정 연구실은 지난 13년간 유/무기 소재 및 저차원 소재를 기반으로 하는 다양한 전자소자, 광전소자, 센서소자 구현에 대한 연구를 지속적으로 진행해 왔다. 이를 통해 현재까지 국내외 학술 논문 250여 편을 게재하였으며(피인용횟수: 12,000여 회), 그 중 36편의 논문이 100회 이상 인용되었다. 본 연구실은 다양한 유/무기/저차원 나노소재 기술, 대면적 소자공정 기술(잉크젯 프린팅, 3D 프린팅 등), 기능성 소자(트랜지스터, 메모리, 센서, 뉴로모픽 소자 등) 및 회로 구현 기술과 경험을 보유하고 있다(그림 9). 이러한 기술과 경험을 이용하여 유연소재 기반 시각, 촉각, 온도 등의 다양한 정보를 검출하는 센서 및 전자 피부를 개발하고, 이를 뉴로모픽 기반 시냅스/뉴런 소자 및 회로와 연결해 self-learning이 가능한 인공 신경망 등을 구현하며, 더 나아가 감각 신경, 중추 뉴런, 운동 신경으로 이루어진 생체의 정보 전달 시스템을 완전히 모사함으로써 컴퓨팅 시스템, 인공지능, 로봇공학 등 미래의 산업에 핵심적인 기술을 개발해, 국내외 산업 발전에 중추 연구그룹이 되는 것을 목표로 연구실의 모든 구성원이 최선을 다해 노력하고 있다(그림 10).

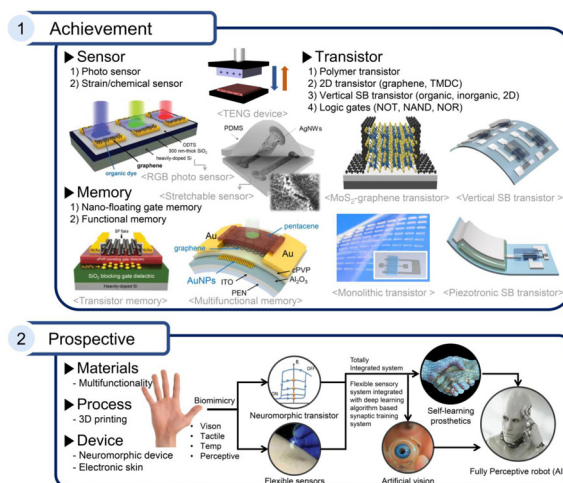


그림 9. 본 연구실이 보유한 기술 및 비전.



그림 10. 스마트 전자소자 및 공정 연구실 하계 워크숍.