

연구실 탐방

서울대학교 분자나노소자 연구실

이 탁 희

연구실 개요

현대 산업을 지탱하고 있는 반도체 산업은 잘 알려진 “무어의 법칙”과 같이 일정 공간에 얼마나 많은 소자를 넣을 수 있는가 하는 고집적화 기술로 평가되고 있으며 지속적인 발전을 거듭하고 있다. 하지만 실리콘 기반의 반도체 소자의 고집적화에는 원천적인 혹은 경제적인 요인들로 인해서 그 발전 속도가 한계에 직면하고 있으며, 그리하여 필연적으로 실리콘 기반의 반도체를 대체할 수 있는 새로운 구조, 즉 나노미터 크기에서도 동작이 가능한 새로운 반도체 기술이 절실히 필요하다. 그 한 가지 예가 자기조립법 기반의 바텀업 공정 방식인 “분자전자소자(molecular electronics)” 기술이다. 이는 특정한 전자소자의 기능을 가진 단일 유기 분자 혹은 분자 박막으로 이뤄진 분자소자의 현상을 탐구하고 기술로 개발하는 연구 분야이며, 특히 분자의 크기가 수 나노미터 미만으로 매우 작으므로, 분자전자소자는 전자소자가 취할 수 있는 가장 작은 크기의 소자에 해당된다. 본 연구실은 “분자나노소자 연구실(Molecular NanoElectronics Lab.)”로 이러한 매우 작은 분자로 이뤄진 전자소자를 제작하고 제작된 분자소자의 전기적 특성 및 구동 메커니즘을 이해하는 연구를 수행하고 있다(그림 1). 뿐만 아니라, 분자의 집합체로 볼 수 있는 폴리머를 이용한 비휘발성 메모리 등 유기물 전자소자에 대한 연구도 함께 진행하고 있다.

주요연구분야

1. 분자전자소자

분자전자소자는 유기 분자를 전자소자의 핵심소재로 사용한다는 개념으로, 1974년에 미국의 아비람과 래터너가 하나의 유기분자가 마치 반도체 전자소자의 하나인 다이오드처럼

저자약력

이탁희 교수는 2000년 미국 퍼듀(Purdue) 대학에서 물리학 박사학위를 받았으며, 미국 예일(Yale) 대학에서 박사후 연구원을 하였고, 2004년부터 광주과학기술원(GIST)에서 교수직을 거쳐서, 2011년부터 서울대학교 물리천문학부 부교수로 재직 중이다. (tlee@snu.ac.kr)



그림 1. 분자나노소자 연구실 구성원 (연구실 홈페이지: <http://mnelab.com>).

정류소자로 사용될 수 있다는 이론적 제안에서 시작하였다. 하지만 1997년이 되어서야 미국의 마크 리드 연구팀에서 이러한 분자로 이루어진 전자소자를 처음으로 제작하고 측정하여 실제 기술로 발전을 시키기 시작하였다. 그 이후로 세계적으로 활발한 연구가 진행되어서 현재까지 단일 분자나 분자 박막으로 이뤄진 분자 전선, 분자 다이오드, 분자 스위칭, 분자 메모리 소자 등 다양한 분자전자소자들이 실험적으로 시도되어 왔으며, 2007년에는 미국 휴렛-패커드 연구소에서 160 킬로비트 분자 메모리 소자를 제작하였는데, 이는 1 제곱센티미터 영역 안에 100 기가비트의 기억소자 셀을 포함하는 정도의 고집적도에 해당된다. 이러한 고집적화에 대한 가능성은, 전자 소자가 직면하고 있는 물리적 한계 및 경제적인 제약에 대한 해법으로써 분자전자소자의 역할을 의미하며, 분자전자소자가 구현될 경우에, 유기분자의 자기조립방법을 이용하여 고가의 나노 공정 장비를 이용하지 않고서도 원자 크기만큼이나 정확하게 소자의 배열이 가능한 장점을 가지고 있는 획기적인 기술임을 의미한다. 본 연구실은 지난 10여 년 동안 이러한 분자전자소자 분야의 연구에 몸담아 왔으며, 대표적인 연구 결과를 들자면, 2009년에 벤젠이라는 하나의 분자가 마치 반도체의 트랜지스터 소자처럼 작동할 수 있다는 것을 최초로 보여주었다(그림 2). 트랜지스터는 반도체의 핵심 소자로 일종의 스위칭 소자이며, 이는 메모리 소자 및 각종 연산 소자의 근간이 된다. 이 연구에서 게이트 전극에



그림 2. 벤젠 분자 트랜지스터 소자 전자현미경 사진 및 모식도 (출처: Song *et al.*, Nature **462**, 1039 (2009)).

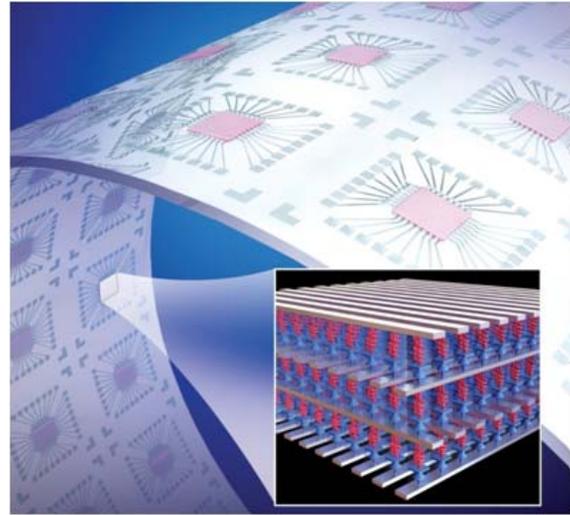


그림 4. 휘어질 수 있는 3차원 적층형 유기 메모리 소자 모식도 (출처: Cho *et al.*, Advanced Functional Materials **21**, 2806 (2011) - 리뷰 논문).

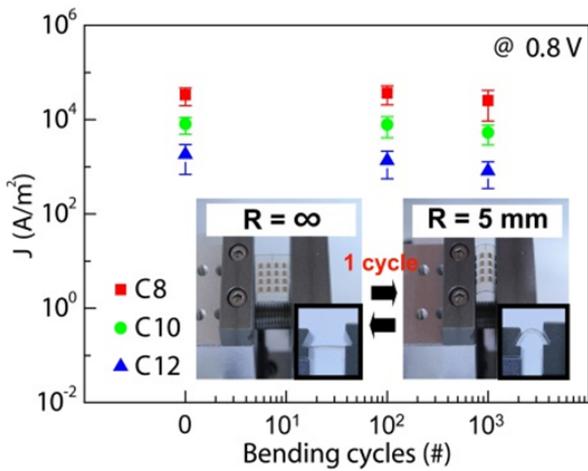


그림 3. 유연한 분자전자소자의 1,000회 이상의 반복적인 휨 테스트 데이터 (출처: Park *et al.*, Nature Nanotechnology **7**, 438 (2012)).

걸어주는 전압으로 소스-드레인 두 전극 사이에 연결된 단일 분자의 오비탈을 제어하여 흐르는 전류를 조절하였다. 또한 분자를 통해 움직이는 전자와 분자의 고유진동 간의 상호작용을 비탄성투과(inelastic electron tunneling) 현상으로 설명을 하였다.

최근에는 이러한 분자전자소자가 휘어진 기판에 만들어졌을 때, 소자의 특성이 어떠한지에 대한 연구를 진행하였다(그림 3). 얇은 플라스틱 기판 위에 잘 알려진 알킬 분자 박막으로 분자전자소자를 제작하였고, 제작된 소자가 다양한 형상의 휨 환경에서도 안정적인 특성을 지니고 1,000회 이상의 반복적인 휨 테스트에서도 안정적인 형태를 유지하였음을 확인하였다.

2. 유기전자소자 - 비휘발성 메모리

분자전자소자는 사용되는 분자의 크기가 매우 작아서 분자 양쪽에 전극을 부착하는 기술적 어려움이 있으며, 이로 인해서 분자전자소자의 수율이 매우 낮은 것이 큰 문제점으로 여겨지고 있다. 거기에 비해서, 폴리머를 이용하는 일반적인 유기물 기반의 전자소자는 사용되는 폴리머 층의 크기(두께)가 100 나노미터 정도로 충분히 두껍기 때문에 소자의 제작 및 안정성에 유리하다. 본 연구실에서는 이러한 폴리머 유기물을 이용하여 비휘발성 메모리 전자소자에 대한 연구를 수행하고 있다. 특히 특정한 유기 소재가 메모리 현상을 보여준다는 차원을 넘어서서 이러한 유기물 메모리 소자가 실제 산업적으로 사용이 되기 위해서 보다 실질적인 아키텍처 측면에 중점을 두고 연구에 매진하고 있다. 가령 유기 메모리 셀이 여러 이 형태로 집적되어 있을 경우, 주변의 셀에 의해서 간섭을 받아서 메모리 셀이 정상적으로 동작하는데 지장을 받는 크로스 토크(cross-talk) 문제점이 발생할 수 있는데, 트랜지스터 혹은 다이오드를 접목하여 이러한 크로스 토크 현상을 방지하는 아키텍처 상의 설계가 중요하다. 그림 4는 유기 메모리 소자가 휘어질 수 있는 플라스틱 기판에 3차원 적층을 이루고 있으며 각 메모리 셀은 다이오드가 접목되어 있어서 크로스 토크 문제점이 없는 구조의 유기메모리 소자의 모식도이다.

향후 전망

본 연구실에서는 분자 및 유기전자소자 그 외 다양한 나노

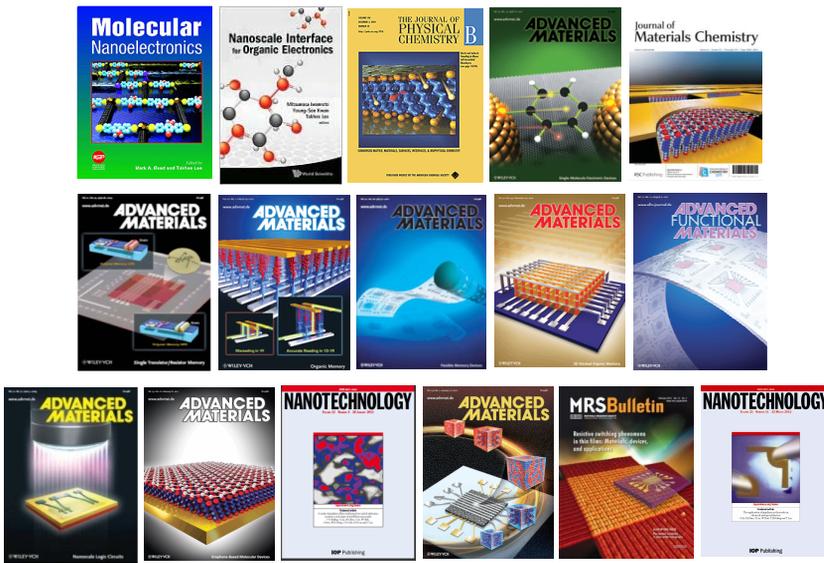


그림 5. 분자나노소자 연구실의 주요 연구 결과 표지 논문들.

전자소자 분야에서 꾸준한 연구 활동을 해 왔으며(그림 5), 2012년부터 분자나노소자 리더연구사업(창의적연구) 지원 하에 연구에 매진하고 있다. 분자 트랜지스터 소자가 가능하게 되면, 트랜지스터를 기반으로 하는 메모리, 논리회로 소자 등 다양한 전자회로 소자들도 분자로 가능하게 될 것이며, 이러

한 전자소자 요소들이 분자 크기로 극소형화가 되었을 때 일어날 수 있는 새로운 현상, 그리고 그 현상의 동작 메커니즘을 탐구하고자 하는 것이 본 연구실에서 추구하는 연구이다. 이러한 연구를 통하여 학문적으로는 분자스케일에서의 전하수송현상을 이해하는 분자전자학의 학문체계를 확립하는 데 기여를 하고, 과학기술적으로는 실리콘 기반의 나노기술의 한계점을 극복하는 대체기술로 그 역할을 할 것으로 기대하고 있다. 뿐만 아니라, 최근 특히 각광 받고 있는 유기물 기반의 광전자소자의 경우 구성체인 각종 유기물들의 분자단위에서 구동 메커니즘을 이해하고 제어를 해야 한다는 점에서 분자전자소자 기술이 유기전자소자의 근간이 되는 기술 역할을 할 것으로 기대된다.

특히 최근에 연구가 활발하게 진행되고 있고 산업적으로도 중요한 유연한 유기전자소자 분야에서 유연 소자들의 분자단위에서 구동 현상을 이해할 수 있게 되어 보다 자유자재로 쉽게 휘어지거나 변형이 될 수 있는 유연한 전자소자의 개발 가능성도 전망된다.