

# 휘어지는 투명 유기분자 메모리 소자 개발

**최** 근 실리콘 소자의 집적도 한계를 돌파하고 다양한 기능을 가진 유기분자를 이용한 나노크기의 분자 소자로 개발하려는 연구가 활발하다. 대용량을 갖기 위한 초고집적밀도 메모리 소자 개발에 있어 현재 실리콘 기반의 전자소자는 수나노크기의 제작 공정 기술이 요구되고 있으며 많은 비약적인 발전들이 이루어져 왔다.

## 분자 나노 전자소자, 대량조립공정 등 장점

하지만 수나노크기를 갖는 소자 개발에 있어서 실리콘 기반 나노크기 소자 개발에서 피할 수 없는 물리적인 한계 및 천문학적인 고비용 공정 개발비가 요구되고 있다. 최근 실리콘 반도체를 일부 대체할 수 있는 나노크기 소자들 중에 분자 나노 전자소자 개발에 많은 관심이 쏟아지고 있다. 가장 큰 이유는 기존 실리콘 공정

기술을 이용하면서 상온 및 고온에서도 동작이 가능한 나노소자 구현이 가능할 것으로 판단되기 때문이다.

분자 자체는 수 나노미터 이하로 현재 실리콘 소자보다 수십분의 1 정도로 작다. 때문에 이를 이용하는 이른바 분자 나노 전자소자의 경우 크기나 기능 그리고 대량 조립 공정 등에서는 장점이 있다. 특히 최근 다양한 기능을 가진 유기분자와 플렉서블한 기판을 이용한 분자 전자소자의 개발에 많은 관심을 가지고 있다. 휘어지는 전자기에 대한 수요가 증가함에 따라 특히 분자를 이용할 경우 분자가 갖는 연성으로 적합한 트랜지스터, 발광다이오드, 투명 전극체에 대한 연구가 활발해지면서 분자전자소자도 주목받고 있다.

## 분자전자소자, 제조수를 매우 낮아

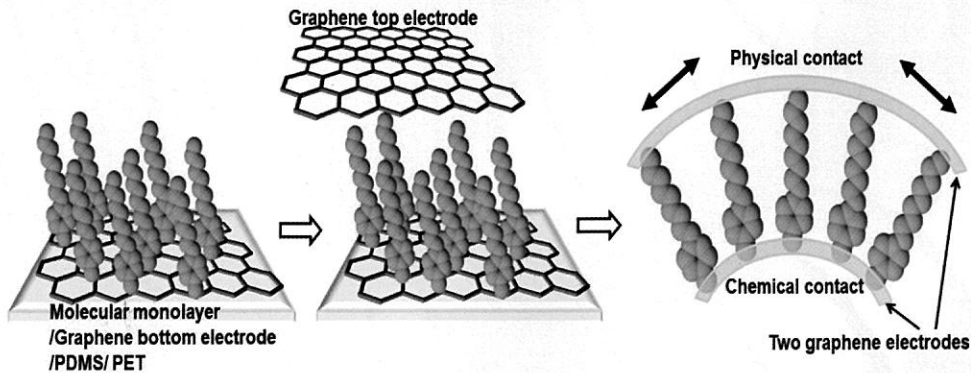
분자를 기반으로 하는 분자전자소자의



글 이효영

성균관대학교 화학과 교수  
hyoyoung@skku.edu

글쓴이는 경희대학교 화학과 졸업 후 동대학원에서 석사학위를, 미시시피대학교에서 박사학위를 받았다. 지능초분자 연구단 선임연구원, 한국전자통신연구원 분자메모리소지팀 팀장 등을 지냈다.



▶▶ 그림 1. 그래핀 전극에 분자 단일막 소자 제조 방법 : 투명기판 위 그래핀 바닥 전극에 분자막을 형성하고, 그 위로 한 층의 그래핀 상부전극을 올리면, 분자와 화학적 결합을 이룬 그래핀 바닥전극과 물리적 결합을 이룬 그래핀 상부 전극은 분자층의 안정성과 유연성을 동시에 확보함으로써 휘어지는 투명 분자 소자를 구현한다.

연구는 유기분자의 안정성이 낮고 유기분자와 전극의 상호작용 수율이 낮다는 것이 숙제였다. 보다 상세히 설명하면 기존 실리콘이나 금 같은 금속을 사용하는 분자전자소자의 경우 전극을 이루는 금속입자가 위에 놓인 유기 분자막으로 침투할 수 있어 전도성을 잃는 등 제조 수율이 매우 낮았다. 또한 단단한 금속의 속성상 휘어지는 소자에 적용하기에도 어려움이 많이 있었으나 이를 극복하기 위해 특히 유기분자와 전극 간의 안정성을 증가시키기 위한 많은 노력들이 이루어져 왔었다.

특히 금속 전극에서 유기 전극을 대체 사용하여 분자 전자소자의 수율을 증가시킬 수 있었다. 하지만 유기전극의 구성 물질들이 강산을 포함하고 있어서 분자 전자소자의 안정성을 크게 떨어뜨렸다. 이에 본 연구팀은 그래핀을 전극으로 사용하여 높은 수율을 가지면서도 휘어지며 또한 높은 투과율을 가지는 광스위치분자 메모리 소자를 개발할 수 있었다.

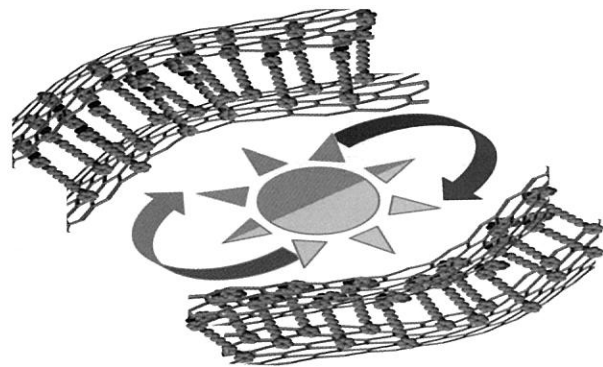
### 기존 금속입자 침투 문제 해결

본 연구에서는 처음으로 그래핀과 분자의 단일층 분자막을 이용한 투명하고 휘어지는 소자를 개발하였다. 그래핀을 이용한 분자와의 소프트 접촉은 매우 안정적인 소자 구현을 할 수 있게 해주었다. 두 그래핀 전극 사이에 분자 자기조립박막법을 이용하여 기계적 안정도가 우수한 휘어지는 투명 소자 개발을 하였다. 분자 스위칭이 가능한 아조 화합물 분자막을 그래핀 위에

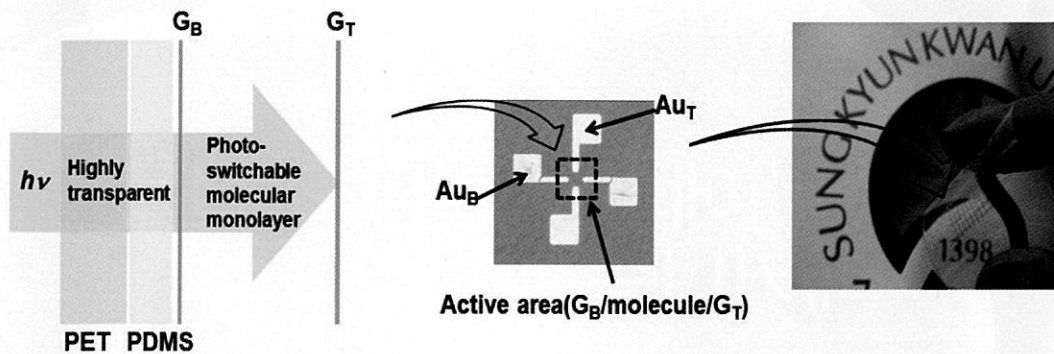
화학적으로 결합시켜 분자전자소자를 구현하였다.

또한 분자 자기조립박막법을 이용하면 소자의 대량 생산이 가능하여 원하는 크기의 소자가 개발되었다(그림 1 참조). 본 연구에서 사용된 분자들의 경우 분자 전자 소자 구현을 위해 카본 체인 길이가 다른 세 가지 아조 물질(예, 페닐옥탄, 페닐데칸, 그리고 페닐도데칸)과 광 스위칭 특성을 가지는 물질(예, 페닐아조벤젠)을 이용하였다. 분자전자소자 구현에 사용한 분자는 빛 또는 전압에 의해 스위칭 역할을 하는 분자로 매우 민감하게 반응하여 분자메모리 소자로서의 특성을 명확하게 보여 주었다(그림 2, 3 참조).

그래핀은 단일층으로 이루어진 탄소 나노물질로서 매우 투명하여 높은 광 투과율을 가지며, 전도도가 높



▶▶ 그림 2. 그래핀 전극을 이용한 광 스위칭분자소자의 광 스위칭 : 투명하고 유연한 그래핀전극을 이용하여 구현한 광 스위칭분자소자는 빛에 의해 분자의 구조가 바뀌는 아조벤젠 화합물을 이용하였으며, 빛의 파장에 따라 바뀌는 서로 다른 분자 구조의 분자층을 통과하여 흐르는 전류량의 차이로 소자의 온·오프 기능이 가역적으로 작동함을 보여주는 그림



▶▶ 그림 3. 투명하고 유연한 두 그래핀 전극 사이에 제조된 광 스위칭분자소자 : 분자소자 단면 모식도와 단일 소자 구조, 그리고 투명하고 유연한 단일 소자 어레이 기판의 유연성을 보여주는 사진.

고 플렉서블하므로 광분자 화합물을 화학적으로 결합시켜 휘어지는 소자 구현에 적절한 물질이다. 상기 단일층의 그래핀 박막을 유기분자막 위아래에 모두 배치함으로써 기존 금속입자의 침투로 인한 문제를 해결하였다. 상하부 전극 모두 그래핀으로 된 소자는 상부전극만 그래핀을 적용한 경우(10% 미만)보다 월등히 뛰어난 80% 이상의 제조 수율을 나타냈다.

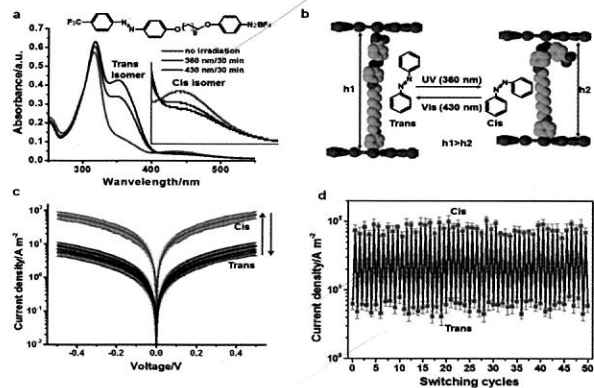
### 반복적 광 스위칭 작동 구현

분자메모리 전자소자 구조에 있어서 하부전극을 그래핀으로 교체할 수 있었던 것은 분자막과 그래핀 전극 간의 상호보완적인 결합에 있다. 유기분자들은 아

래에 놓인 그래핀 전극과 일정간격을 유지하면서 화학적으로 결합하는 한편 그래핀 전극은 위에 놓인 유기분자와 물리적으로 접촉하도록 한 것이다. 그래핀이 사이에 놓인 분자막의 휘어짐을 붙잡아줘 반복적인 광 스위칭에도 불구하고 물리적인 안정성을 유지한다는 사실을 실험(그림 4 참조)을 통해 확인하였다.

결론적으로 그래핀의 전도성, 유연성, 안정성 등의 고유특성을 고려하여 휘어지는 투명기판 위에 그래핀 전극을 이용한 분자 전자 메모리 소자를 구현하였다. 개발된 분자전자 메모리 소자는 높은 분자소자 수득률과 높은 물리적 안정성까지 보여주었다. 기계적 안정도를 측정하기 위한 휘어짐 테스트 결과, 기판이 휘어지는 동안 위-아래 그래핀 전극이 그 사이에 존재하는 분자의 휘어짐에도 불구하고 화학적으로 결합된 분자들이 그래핀 전극 위에 안정적으로 고정돼 있어서 반복적 광 스위칭 작동을 구현할 수 있었다.

그래핀과 화학적 결합이 가능한 유기분자 소자는 공정이 쉽고 수율이 높으며 다양한 기능을 가져 기존 실리콘과 금속 전극의 대체가 가능할 것으로 예상된다. 향후 미래 기술로 다가오고 있는 휘어지는 전자소자 및 기기에 대한 수요가 크게 증가함에 따라 분자메모리뿐만 아니라 이에 적합한 유기 반도체 분야들인 휘어지는 유기박막 트랜지스터, 휘어지는 유기발광다이오드, 휘어지는 태양전지, 휘어지는 투명전극체 등에도 많이 응용될 것으로 기대된다. **ST**



▶▶ 그림 4. 아조벤젠분자의 광반응 특징 및 분자 소자의 전기적 반응 : (a) 광 스위칭 소자에 사용한 아조벤젠분자의 UV/vis 스펙트럼 (b) 두 그래핀 전극사이에서 칩에 의한 구조적 변화를 보여주는 3D 구조 (c) 아조벤젠의 빛에 의한 가역적 구조 차이에서 발생하는 분자층을 흐르는 전류 곡선의 차이 (d) 반복적인 광 스위칭에 의한 소자의 메모리특성을 확인할 수 있는 전기적 특성