

차세대 고이동도 2차원 나노판상 칼코젠 유연 박막 트랜지스터 연구

디스플레이는 전기적 신호를 광변환을 통해 인간이 표현하고자 하는 영상으로 재현하는 기기로써 현재 모바일, 가전제품, 의료기기 등 우리의 삶 속에 꼭 필요한 전자제품이다. 1897년 독일 스트라스부르크 대학교의 카를 브라운 교수가 발명한 음극선관(CRT) 모니터를 시작으로 최근에는 디스플레이의 휴대화, 저소비 전력, 경량화, 평면화의 기능이 요구되면서 LCD, OLED와 같은 평판 디스플레이가 상용화되고 있다.

또한, 디스플레이 산업의 경쟁력을 위해 산학을 중심으로 미래형 차세대 디스플레이에 관한 연구의 일환으로 하드웨어적인 관점에서 유연 디스플레이, 투명 디스플레이, 3D 디스플레이, 바이오·환경 융복합 디스플레이(대기 오염도, 식품 신선도 측정 등)의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 유연·투명 전자회로의 기술들은 디스플레이 산업에 국한되지 않고, 인공 로봇, 바이오 시스템, 박막형 무선 통신 시스템 등을 구현하기 위한 핵심적인 기술로 관심받고 있다.

새 고이동도 반도체 박막 물질 개발

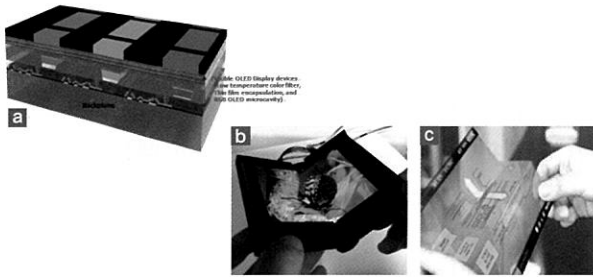
일반적으로 디스플레이는 색을 표현하는 표시소자(액정이나 유기발광소자 등)와 이를 전기적으로 구동하기 위한 전자 회로로 구성되어 있다. 유기 EL은 백라이트가 필요 없고, 빠른 응답속도와 높은 순색을 표현

하기 때문에 차세대 디스플레이의 표시소자로 각광받고 있다.

최근에 본 연구진은 삼성과의 공동연구를 통해 박막 보호층(thin-film encapsulation), 유기 발광소자, 저온 컬러필터를 이용하여 기계적·광학적 안전성을 갖는 유연 표시 소자를 개발하였다. 이러한 높은 성능의 표시소자는 차세대 유연 디스플레이 구현을 위한 초석이 되었으며, 이를 전기적으로 구동하는 전자회로와의 일체화가 절실히 필요하다. 그렇다면 구동 회로의 관점에서 고해상도, 고투명성, 고유연성 등의 새로운 기능 및 기술이 절실히 요구되는 차세대 디스플레이 구현을 위해 기존의 박막 트랜지스터의 성능은 만족스러운가? 지금까지 구동 회로는 실리콘, 산화물 기반 박막 트랜지스터의 집적 회로를 이용하고 있다.

그러나 실리콘, 산화물 기반의 박막 트랜지스터는 낮은 이동도($<50\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$), 구부러지는 동안 쉽게 깨지는 특성 및 불투명한 특성 때문에 투명·유연 집적 회로를 적용하기에는 한계성을 보이고 있다(표 1).

이를 극복하고자 실리콘 박막 트랜지스터를 대체하기 위한 새로운 물질에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고, 이에 대한 대안으로 나노 물질 기반 박막트랜지스터의 연구가 1990년대부터 이루어지고 있다. 나노 물질이 갖는 원자 단위의 두께에 기인한 고투명성 및 고유연성뿐만 아니라, 양자적 물리현상에서 오는 고이



1. (a) 유연 OLED 디스플레이 구조 개념도 (b) Seamless/Foldable OLED 디스플레이 (c) 유연·투명 디스플레이 응용

동도는 차세대 박막 트랜지스터로 각광을 받았다. 1차원 나노튜브·나노와이어는 높은 이동도(1000 ~ 10,000 cm²/V·sec) 및 고유연성 때문에 단일 디바이스에서는 높은 가능성을 보였지만 성장 과정의 불균일한 나노튜브의 크기, 금속성-반도체성의 이중성, 대면적 성장의 불균일성은 수만 개의 트랜지스터의 집적이 필요한 전자회로에서 큰 문제점으로 대두된다.

이런 면에서 성장 및 디바이스 성능의 균일성 확보가 가능한 2차원 나노물질은 큰 관심을 갖게 되었다. 본 연구팀은 2011년부터 반도체적인 특성을 갖는 2차원 나노판상구조 칼코젠 화합물 연구를 진행했으며, 본 논문을 통해 이 물질이 갖는 차세대 고이동도 박막 트랜지스터로서의 가능성 및 기술 발전 방향과 극복해야 할 과제에 관해 논의하고자 한다.

2차원 나노판상 전이금속 칼코젠 화합물

차세대 그래핀 물질로서 2차원 나노판상 칼코젠 화합물은 초고이동도, 저에너지 박막 트랜지스터 개발이 2010년부터 활발히 연구되고 있다. 칼코젠 화합물은 MX₂(M = Ta, W, Mo; X = S, Se, Te) 구조를 갖고 있으며, 각각의 원자들은 공유결합을 통해 삼원자의 육각형 구조(triatomic hexagonal)를 갖는 X-M-X 구조의 한 층을 형성하고, 각 층들은 반데르발스 결합에 의해 형성되어 있다.

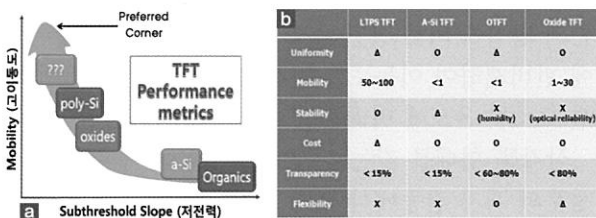


표 1. (a) 박막트랜지스터의 개발 방향 (b) 현 박막 트랜지스터의 성능 및 한계성 분석

2차원 칼코젠 화합물은 (MoS₂, MoSe₂, WS₂, WSe₂ 등) 일반적으로 1~2 eV의 밴드갭을 가지며 층수에 따라 밴드갭이 바뀌는 성질을 보인다. 1960년대와 1970년대의 연구를 통해 MoS₂ 물질은 상온에서 200 cm²/V·sec의 이동도를 보이며, 이동도는 광학 포논 산란에 의해 결정이 되는 것으로 보고되었다. 나노 판상 트랜지스터 연구는 2006년에 MoS₂를 채널로 사용한 디바이스를 최초로 제작하여 시작되었으나 성능이 미흡하여 새로운 박막 물질로 각광을 받지 못했다. 그러나 2011년 스위스 로잔연방공과대학(EPFL)의 키스 교수 연구팀이 제작한 단층 MoS₂의 트랜지스터가 이동도 ~ 200 cm²/V·sec, Ion/Ioff > 10⁷, 문턱전압 이하에서의 스윙(subthreshold swing) ~ 70 mV/dec. 로 저전력 구동, 고이동도 박막 트랜지스터로서 주목을 받게 되었다.

이러한 디바이스 성능을 구현하고자 2차원 나노판상 구조가 갖는 양자 물리현상을 극대화하기 위해 유전율 공학, 즉 반도체 물질을 서로 다른 유전율을 갖는 두 개의 부도체로 감싸으로써 산란 현상을 최소화하는 기술을 이용하여 10~100배 이상의 이동도 증폭에 따른 고성능 디바이스를 구현하였다. 그러나 위의 결과는 2차원 나노판상 반도체가 새로운 박막 물질로서의 가능성을 제시했지



글 김선국

경희대 전자·전파공학과 교수
seonkuk@khu.ac.kr

글쓴이는 고려대학교 물리학과 졸업 후 미국 퍼듀 대학교에서 ECE 석박사 통합 학위를 받았다. 박사 후 미국 인텔 연구소와 삼성 종합기술원에서 책임연구원을 지냈다. 경희대 전자전파공학과와 조교수로 재직 중이며 다기능 나노 바이오 전자회로 관련 연구를 수행하고 있다.



글 최웅

국민대 신소재공학부 교수

글쓴이는 서울대학교 무기재료공학과 졸업 후 동대학원에서 석사 학위를 받았으며 미국 UC 버클리 재료공학과에서 박사학위를 받았다. 미국 로스앨러모스 국립연구소, 어플라이드 머티리얼즈, 삼성 전자 종합기술원 등에서 근무하였으며 주요 연구분야는 다기능 집적재료이다.

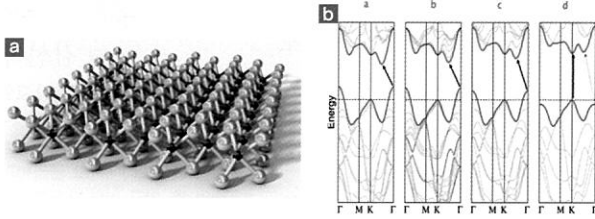


글 권준연

경희대 전자·전파공학과 연구원

글쓴이는 경희대 전자전파공학과 학위중에 있다.

만, 현재의 디스플레이 기술과의 호환성에는 다음과 같은 문제점이 있다.



2. (a) 전이금속 칼코젠 화합물 결정 구조 (b) MoS₂ 층 수에 따른 밴드갭의 변화
단일층 : 1.8 eV direct bandgap, 다층 : 1.35 eV indirect bandgap

첫째, 8세대, 9세대의 유리기판상(> 3m*3m 이상)에서 1nm 두께의 단층을 균일하게 증착하는 것은 불가능하다. 둘째, 2개의 유전율을 사용하는 것은 현 디스플레이 공정과 일치하지 않으며 추가적 공정비가 소요된다.

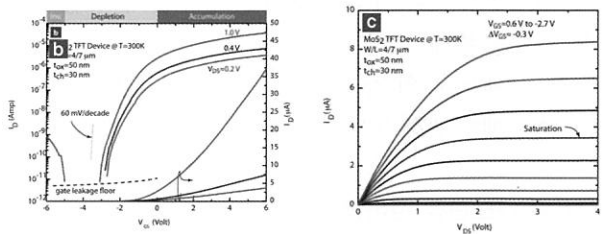
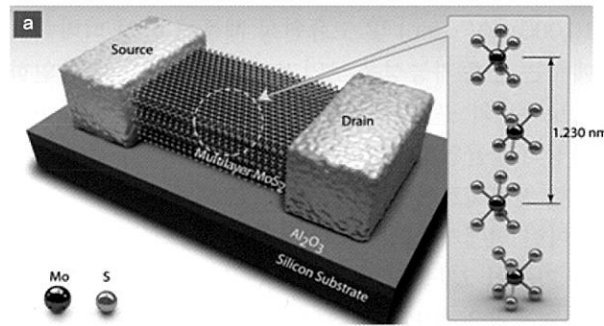
MoS₂ 박막 트랜지스터, 높은 출력 저항 보여

이러한 문제를 해결하고자 최근 본 연구팀은 단층 구조가 아닌 현 디스플레이 공정과의 호환성을 고려하고 대면적 성장의 균일성을 확보하기 위해 단층구조가 아닌 복층구조의 MoS₂ 박막 트랜지스터의 전기적·광학적 특성의 측정을 통해 차세대 고이동도 박막 물질로서의 가능성에 대한 실험을 진행하였다. 전이금속 칼코젠 화합물 중에서 가장 연구가 많이 진행되고 있는 이황화몰리브덴(MoS₂)을 기계적으로 박리하여 샘플을 준비하였다.

그림 3은 MoS₂ 박막 트랜지스터의 디바이스 구조로서, MoS₂ 반도체에 Ti/Au 금속 전극을 소스-드레인으로 형성하고, 게이트 부도체로는 SiO₂ 단층을 사용하였다. 박막 트랜지스터는 반도체-금속 전극 접합시 발생하는 쇼트키 장벽에 의해 큰 접촉 저항이 생겨 전기적 성질이 저하된다. 따라서 실험적으로 MoS₂ 반도체와 쇼트키 장벽을 가장 낮게 형성하는 Ti/Au 전극을 사용하여 접촉 저항을 낮추어 높은 전도도를 얻을 수 있었다.

이렇게 형성된 트랜지스터는 이동도 (> 100cm²/V·sec), 문턱전압 이하에서의 스윙 ~ 70 mV/dec. 또한, 출력 곡선에서는 높은 출력 저항을 보인다. 이와 같이 유전율 공학을 이용하지 않고 현 디스플레이 박막 디바이스 구조로 고이동도를 얻을 수 있었으며, 낮은 스윙은 트랜지스터를 쉽게 끄고 켤 수 있기 때문

에 저에너지 구동 소자로의 가능성을 보였다. 현재까지 연구된 나노디바이스(카본 나노튜브, 산화물 나노선, 그래핀 등)는 항상 낮은 출력 저항 때문에 전자회로로의 응용에는 한계성을 보였으나, MoS₂ 박막 트랜지스터는 최초로 높은 출력 저항을 보였다. 이러한 높은 출력은 디지털 회로에서 출력과 입력 신호를 분리할 수 있으며, 아날로그 회로에서 높은 출력 전압 증폭이 발생되기 때문에 전자회로적인 관점에서 큰 의미를 갖고 있다.



3. 다층 이황화몰리브덴 박막 트랜지스터 구조 (a) 및 전기적 특성 그래프; (b) 전압 특성, (c) 출력 특성

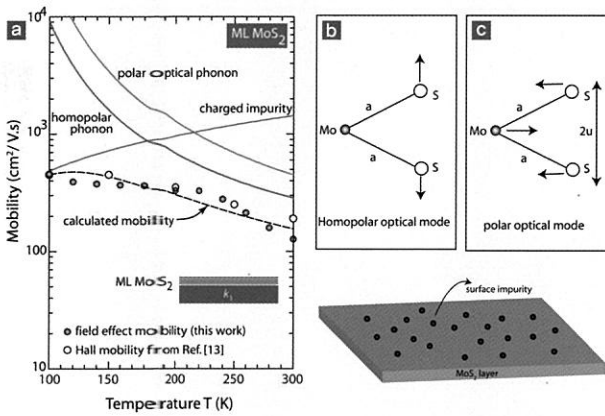
광학적 안정, 광반응성 실험 평가 필수

디바이스의 구조적 전도도 향상뿐만 아니라 상온에서의 2차원 나노판상구조의 고유 이동도에 대한 연구는 산란 현상과 깊은 관계를 갖고 있다. 이를 분석하고자 저온 실험을 통해 온도에 따른 물질의 이동도 변화로 산란 요소를 알아보고자 하여, 저온 실험 결과와 이론적 모델링을 통해 산란 요소를 유도하였다. 메티슨의 법칙에 의해 산란 요소 중 대전된 불순물은 온도에 반비례하여 이동도를 저하시키며, 격자 산란에 의한 요소는 온도에 비례하여 이동도를 저하시킨다.

삼각뿔 형태를 갖는 칼코젠 화합물은 수평과 수직 성분의 격자 진동에서 오는 격자 산란이 상온에서 크게 작용한다. 저온 실험을 통해 77K 근처의 저온에서

는 대전된 불순물에 의해 물질의 이동도가 제한을 받으며, 상온에서는 수평성분의 격자 산란에 의한 영향이 큰 것을 볼 수 있다. 추후 연구를 통해 상온에서 수평성분의 격자 산란을 효과적으로 억제함으로써 2차원 나노판상 구조가 갖는 고유의 이동도를 유도하는 실험연구가 필요하다.

2005년부터 연구되고 있는 산화물 반도체는 차세대 박막 트랜지스터로 각광을 받았지만 트랩에 의한 광 신뢰성 때문에 생기는 문턱전압의 변화는 디스플레이 양산화에 큰 문제점을 안겨 준다. 이렇듯 새롭게 제안되고 있는 2차원 나노판상 칼코젠 화합물 박막 트랜지스터는 상용화를 위해서는 광학적 안정성과 광반응성에 대한 실험적 광 평가는 필수적이다.

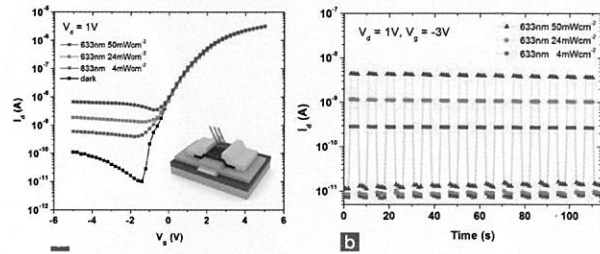


4. (a) 온도에 따른 산란 현상의 변화와 이동도 관계도 (b) 포논 산란 (c) 이온화 불순물에 따른 산란 현상

최근에 본 연구팀은 MoS₂ 포토트랜지스터에 장시간 빛을 주어 디바이스의 광 신뢰성 측정, 소수 캐리어 수명(excess carrier lifetime ~ τ) 및 광흡수성 등 칼코젠 화합물의 광학적 특성을 평가하였다. 그림 5(a)에서 다른 파워를 갖는 빨간색 레이저를 노광함에 따라 트랜지스터의 'OFF' 상태의 광전류만 변화를 측정하였다. 이는 광신뢰성이 보장되는 Si 박막 트랜지스터와 같은 경향으로서, 빛을 가두는 트랩이 존재하지 않기 때문에 문턱전압의 변화가 없이 광전류만 파워에 따라 비례적으로 발생하였다.

또한 장시간 레이저의 높은 에너지를 전달하여도 트랜지스터의 문턱전압은 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 디스플레이 소자에서 발광하는 빨간색, 녹색, 파란색의 빛에 따른 구동회로의 박막 전자소자가 영향

을 받지 않기 때문에 디스플레이 구동회로의 광학적 안정성을 보장받을 수 있다. 또한, 펄스 시험을 통해 이황화 몰리브덴 물질의 소수 캐리어 수명 (τ)은 1.27ns 으로 측정되었다. 이에 같은 빠른 광반응성은 추후의 개발을 통해 포토다이오드 및 광센서로의 활용이 기대된다.



5. (a) MoS₂ 포토 트랜지스터의 633 nm 파장의 레이저 다른 파워에 따른 광전류의 변화. (b) 펄스 레이저 광원에 따른 트랜지스터 광전류의 변화

대면적 성장법 개발 필요

이황화몰리브덴과 같은 전이 금속 칼코젠 화합물은 오랫동안 윤활유, 촉매로서 연구되고 사용해 왔으나, 2년 전부터 전자소자 활용 연구가 진행되고 있다. 1 eV 이상의 띠틈을 갖는 반도체 특성의 트랜지스터의 'ON' 과 'OFF'를 표현하는데 장점을 갖고, 나노 층상 구조에서 나타나는 고유연성, 높은 소자 이동도, 저소비전력의 특성은 차세대 박막 트랜지스터의 핵심소자로 응용이 기대된다.

그러나 실질적인 응용을 위해서는 기관 상에서 회로 집적을 위해 대면적 성장법이 개발되어야 한다. 많은 연구팀들이 화학적 증착 방법(CVD), 물리적 증착 방법(PVD), 액상 공정, ALD 등으로 활발한 연구를 진행 중에 있다. 위와 같은 결과들을 통해 단결정성애 가까운 초고이동도 박막을 대면적으로 두께 및 도핑 등의 요소가 조절이 가능해진다면 새로운 전자소자 및 회로로 크게 쓰일 것으로 기대된다.

2차원 나노물질에 오는 기계적 고유연성, 전기적 고이동도 특성은 전이금속 칼코젠 화합물 박막 트랜지스터의 큰 장점이며, 이러한 장점은 기존의 박막 트랜지스터 산업을 대체할 것이다. 또 차세대 디스플레이, 오감증강 전자회로 및 바이오·환경 융복합 시스템 등의 새로운 영역으로의 개발이 확대될 것으로 기대된다.