



즉시 / 2022. 9. 22.(목)

연구책임자 이택희 교수 (02-880-4269), 강기훈 교수 (02-880-7189),  
조경준 박사 (02-958-5305) / 교신저자  
연구진 장준태 (02-880-8806), 김재근 연구원 / 제1저자

## 차세대 반도체 소재 이황화몰리브덴의 전자 이동도를 극대화하는 도핑 방법 제시

- 세계적인 학술지 'Science Advances' 논문 게재 -

- 차세대 반도체 소재로 각광을 받고 있는 이황화몰리브덴의 전자 이동도를 극대화하는 방법이 국내 연구진에 의해 규명되었다.
- 이황화몰리브덴은 대면적 합성 및 대기 안정성, 높은 전도성 등의 다양한 장점으로 인해 반도체, 광전자소자 등의 차세대 전자 소재로 활발히 연구되고 있다.
- 본 연구결과는 세계 최고 과학전문지인 'Science'의 자매지로 자연과학의 모든 분야에 걸쳐 수준 높은 논문이 출판되는 학술지인 'Science Advances'에 2022년 9월 21일자로 게재되었다.
- 이 연구는 서울대 물리천문학부 이택희 교수와 재료공학부 강기훈 교수를 중심으로, 조경준 박사(한국과학기술연구원)가 공동지도하였으며 한국연구재단의 개인연구사업(중견연구, 리더연구, 우수신진연구, 세종과학펠로우십)의 지원으로 수행되었다.
- 24개월마다 반도체 집적회로의 성능이 2배로 증가한다는 무어의 법칙에 따라 반도체 업계는 실리콘 칩 안에 더 많은 칩을 넣기위한 연구를 지속해왔지만, 실리콘 기반 반도체는 두께가 나노단위로 줄어

들수록 물질 자체의 불완전함으로 인해 곧 물리적 한계에 마주할 것으로 많은 연구자들이 예상하고 있다. 이러한 배경 가운데, 원자 한층 수준에서도 안정적인 이차원 물질 그 중에서도 **이황화몰리브덴\***이 주목받고 있다.

※ 이황화몰리브덴 ( $\text{MoS}_2$ ): 몰리브덴(Mo)과 황(S)의 무기화합물로서 한 층의 두께가 약 0.65 nm 이며 밴드갭을 가진 화합물 반도체

- 이황화몰리브덴은 원자 한층 수준에서도 전계효과 트랜지스터 및 광전자 소자로 뛰어난 성능을 보이며, 또한 수많은 이차원 물질과 이종접합구조(heterostructure)의 형태로 새로운 특성을 가진 구조를 제작할 수 있으므로 무궁무진한 가능성을 가지는 차세대 반도체 소재로 평가받는다.
  
- 이황화몰리브덴을 차세대 반도체 소재로 상용화되기 위해서는 도핑을 통한 소자 성능 제어가 필수적이지만 실리콘 반도체와 비교하여 성능과 원리 측면에서 연구가 더 필요한 분야이므로 이를 해결하기 위해 전세계적으로 연구가 진행되고 있다.
  
- 이차원 반도체 물질 도핑 방법으로 치환 도핑, 정전기 도핑 그리고 전하이동 도핑이 있으며, 그 중에서 전하이동 도핑은 전하를 띤 불순물이 필수 불가결하게 유입되어 그로 인해 발생하는 전하 산란으로 인해 이차원 반도체의 전자 이동도가 낮아진다는 단점이 있다.
  
- 본 연구팀은 기존의 표면 전하이동 도핑을 한층 더 발전시킨 육각 질화 붕소(hexagonal boron nitride, h-BN)와 이황화몰리브덴 이종접합구조에서 전자 이동도를 극대화시킬 수 있는 새로운 원격 전하이동 도핑(remote doping) 방법을 제시하였다.
  
- 특히, 원격 전하이동 도핑과 기존 도핑방법으로 제작한 이황화몰리브덴 트랜지스터의 성능을 극저온에서 비교 분석한 결과 원격 전하이동 도핑 소자에서 전하 산란이 효과적으로 줄어든다는 것을 확인하였으며 이로 인해 매우 높은 전하 이동도를 보였다.
  
- 또한, 원격 전하이동 도핑은 다른 치환 도핑방법과 달리 비침투적이며, 산화-환원반응에 기반하여 필요에 따라 도핑 물질을 선택할 수 있는 높

은 자유도를 가졌으므로 이차원 반도체 연구분야에서 활용될 수 있는 발전 가능성을 가지고 있다.

□ 이 논문의 제1저자인 **장준태** 연구원은 현재 **서울대학교 물리천문학부 석박사통합과정 대학원생**이며 이택희 교수 연구실에서 연구를 수행하고 있다.

○ **장준태** 학생은 “전세계적으로 주목받는 차세대 이차원 반도체 물질에 대해 물리학적 관점에서 연구함으로써 기존의 지식을 넘어선 새로운 지식을 넓혀가는 일에 제가 아주 미세하게나마 기여하는 경험이 뜻깊었다” 고 소감을 밝혔으며 “교수님과 선배님들의 도움으로 예상보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있었고 그 결과, 첫 논문으로 세계적인 저널에 연구결과를 보고할 수 있는 영광을 얻게 된 것에 큰 감사를 느낀다.” 고 덧붙였다.

□ 이번 연구를 공동지도한 **강기훈** 교수는 본 연구성과에 대해 “박사과정 때부터 신반도체 물질의 도핑 방법을 연구해오면서, ‘이차원 반도체 물질에도 적용할 수 있는 효과적인 도핑 방법이 없을까?’ 하는 발상에서 시작하였다” 며 “초기 발상이 이렇게 우수한 결과로 이루어지기까지 최선을 다하여 참여해주신 연구진들께 감사드립니다” 고 소감을 밝혔다.

□ 이번 연구를 공동지도한 **조경준** 박사는 본 연구성과에 대해 “이번 연구를 통해 다양한 분야에서 주목받고 있는 차세대 이차원 반도체의 성능을 극대화 할 수 있는 효율적인 방법을 제시하였다” 며, “특히, 함께 고생하며 의미 있고 재밌는 연구를 진행하여 성과를 낼 수 있게 노력한 여러 연구진들과 도움 주신 모든 분들께 감사드립니다” 고 소감을 밝혔다.

□ **이택희** 교수는 “도핑은 반도체 소자의 특성을 제어할 수 있는 가장

핵심적인 개념 중 하나” 라며 “본 연구결과는 반 데르 발스 힘에 의해 자연스럽게 접합구조가 가능한 이차원 물질의 특성을 적극 활용한 가장 효과적인 도핑 방법 중 하나를 선보이고 있다” 고 연구의의를 밝혔다.

[붙임] 1. 연구결과      2. 용어설명      3. 그림설명

# 연구결과

## Reduced dopant-induced scattering in remote charge-transfer-doped MoS<sub>2</sub> field-effect transistors

Juntae Jang<sup>†</sup>, Jae-Keun Kim<sup>†</sup>, Jiwon Shin, Jaeyoung Kim, Kyeong-Yoon Baek, Jaehyoung Park, Seungmin Park, Young Duck Kim, Stuart S. P. Parkin, Keehoon Kang\*, Kyungjune Cho\*, and Takhee Lee\*

(Science Advances, XXX),

Open Access Published: 21 September 2022; <https://www.XXX>

### 1. 연구배경 및 목적

- 이황화몰리브덴은 원자 한층 수준에서도 전계효과 트랜지스터 및 광전자 소자로서 뛰어난 성능을 보이며, 다른 이차원 물질과 이종접합구조 (heterostructure)의 형태로 새로운 특성을 가진 구조를 제작할 수 있으므로 무궁무진한 가능성을 가지는 차세대 반도체 소재로 평가받는다. 이황화몰리브덴을 차세대 반도체 소재로 상용화되기 위해서는 도핑을 통한 소자 성능 제어가 필수적인 전략으로 주목받고 있다. 그러나 전하이동 도핑으로 도입된 불순물은 채널 내 전하 수송을 방해시켜서 이차원 반도체의 전자 이동도를 저해시킨다는 단점이 있다.
- 본 연구에서는 기존 도핑 방법의 단점을 보완하기 위해 원격 전하이동 도핑을 새롭게 제시하였으며, 원격 도핑된 트랜지스터의 전하 수송을 정량적으로 분석하였다. 또한, 이를 기반으로 이차원 반도체의 전자 이동도를 극대화할 수 있는 새로운 도핑 방법을 제시하였다.

### 2. 연구결과

- 이 연구에서는 원격 전하이동 도핑을 통해 h-BN/MoS<sub>2</sub> 이종접합구

조 트랜지스터의 전자 이동도를 기존 도핑 방법과 정량적으로 비교 분석하였다. 원격 도핑된 h-BN/MoS<sub>2</sub> 이중접합구조 소자 구조 모식도와 도핑 전 광학 현미경 이미지이며(그림 1a,b), h-BN/MoS<sub>2</sub> 이중접합구조의 원자현미경으로 소자 두께가 약 2.7 nm 로 측정되었다(그림 1c). 주사투과전자현미경으로 분석한 소자 단면이며 다섯 층의 h-BN과 네 층의 MoS<sub>2</sub>를 확인할 수 있다(그림 1d).

□ 이황화몰리브덴을 차세대 반도체 소재로 상용화되기 위해서는 도핑을 통한 소자 성능 제어가 필수적이므로 h-BN/MoS<sub>2</sub> 트랜지스터에서의 원격 전하이동 도핑을 활용한 소자 컨트롤 가능성을 확인하였다(그림 2a,b). 기존 전하이동 도핑과 원격 전하이동 도핑을 했을 때 도핑 농도에 따른 컨덕턴스 변화를 확인하였으며 특히, 원격 전하이동 도핑에서 컨덕턴스가 더 큰 폭으로 증가하는 것을 확인하였다. 도핑 농도에 따라 증가된 전하 밀도량을 확인하기 위해 기존 전하이동 도핑(그림 2c, 왼쪽), 1-nm h-BN(그림 2c, 가운데), 2-nm h-BN에서의 원격 전하이동 도핑(그림 2c, 오른쪽)으로 비교 분석을 진행하였다. 그 결과, h-BN의 두께가 두꺼워질수록 증가된 전하 밀도량이 작아지는 것을 확인하였으며, h-BN의 두께와 원격 도핑의 상관관계를 규명하였다.

□ 원격 전하이동 도핑에서 관측된 전하 불순물 산란 효과의 감소 원인을 규명하기 위해 시뮬레이션 모델링을 구현하였으며 이를 실험적으로 얻은 데이터와 비교 분석하였다(그림 3). 연구팀은 원격 전하이동 도핑에서 더 큰 전하 이동도를 보이는 이유를 h-BN을 통해 터널링된 전자는 유효하지만 줄어든 채널 내 전하 산란 효과 때문이라고 결론짓는 동시에, 기존 도핑(그림 3a)으로 얻은 전자 이동도를 원격 전하이동 도핑(그림 3b)으로 얻은 전자 이동도와 비교 분석함으로써 원격 도핑에서 매우 높은 전자 이동도를 갖는 이유를 뒷받침하였다.

### 3. 연구성과 및 기대효과

- 본 연구에서는 기존 표면 전하 이동 도핑에서의 단점인 전하 산란으로 인한 소자 성능 저하를 효율적으로 감소시킨 원격 전하이동 도핑법을 제시하였다. 본 연구의 방법론은 원격 도핑된 이차원 반도체에서의 전하 수송에 대한 정량적, 정성적 분석을 제공하였고, 매우 높은 전자 이동도를 구현하는데 넓게 적용될 수 있는 새로운 방향을 제시하였다는 점에 학술적 의의가 높다.
- 본 연구는 이차원 소재에서의 원격 도핑과 전하 불순물로 인한 산란 분석에 활용 가능하여, 특히 차세대 이차원 반도체에 요구되는 비파괴적이면서 소자 성능을 극대화할 수 있는 도핑 기술 개발에 핵심 통찰력을 제공할 것이라고 기대해 볼 수 있다.

# 용 어 설 명

## 1. < 사이언스 어드밴시스 (Science Advances) >

- 사이언스 자매지로 자연과학의 모든 분야에 걸쳐 논문이 출판되며 2021년 기준 JCR Impact Factor가 14.136이다.

## 2. 이황화몰리브덴 (MoS<sub>2</sub>)

- 몰리브덴(Mo)과 황(S)의 무기화합물로서 전이금속 디칼코젠나이드의 한 종류이며, 약 0.65 nm 두께의 한 층이 반 데르 발스 힘으로 수직으로 쌓여있는 구조이다. 밴드갭을 가지고 있어 원자 한 층 수준의 반도체 소자로 제작할 수 있으며, 광전자 소자 및 양자효과를 관측할 수 있는 소재로 각광받고 있다.

## 3. 전이금속 디칼코젠나이드 (Transition metal dichalcogenides)

- 전이금속 (주기율표상 IV 족 - VII 족 원소)의 원자 면이 칼코젠 원자 (S, Se 및 Te)의 두 원자 면 사이에 끼어 있는 형태로 MX<sub>2</sub>의 조성을 갖는 화합물이다. 전이금속 디칼코젠나이드는 원자 한 층 수준에서도 매우 뛰어난 전자 및 광전자 특성을 가지고 있어서 반도체소재부터 기초과학의 현상을 입증하는 소재까지 사용되는 미래 소재로서 전세계적으로 주목받고 있다.

## 4. 전계효과 트랜지스터 (Field-effect transistors, FETs)

- 소스, 드레인, 게이트 세 가지 터미널 시스템으로 구성되어있으며, 현대 전자소자에서 높은 에너지 효율과 고성능 스위칭에 필수적인 전자 부품이다.



## 5. 전자 이동도 (electron mobility)

- 고체 물리학에서 금속이나 반도체 내 전기장이 걸렸을 때 얼마나 빠르게 전자가 움직일 수 있는지를 나타내는 물리량이다. 전자소자의 성능을 나타내는데 중요한 지표로써 사용된다.

# 그림 설명

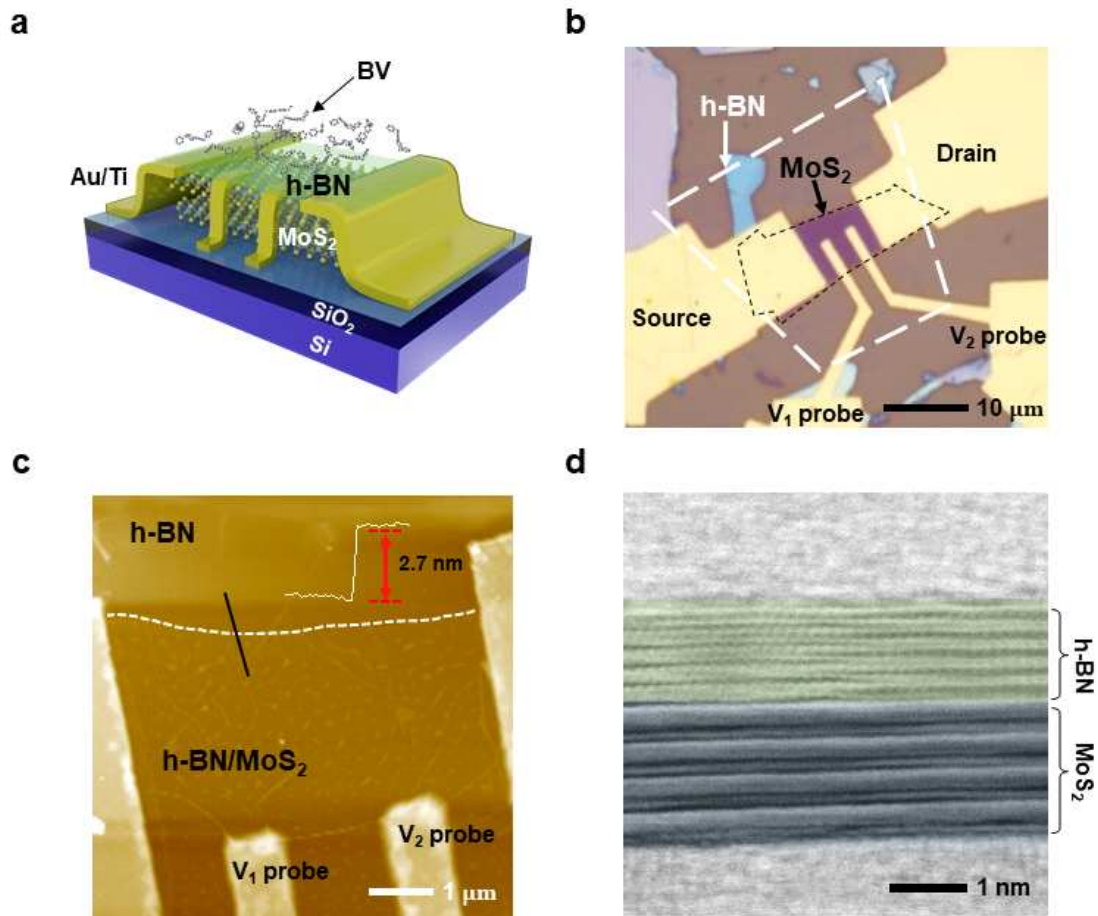


그림 1. 원격 전하 이동 도핑을 위한 h-BN/MoS<sub>2</sub> 이종접합구조 트랜지스터. a, h-BN/MoS<sub>2</sub> 이종접합구조 소자 구조 모식도. b, 도핑 전 h-BN/MoS<sub>2</sub> 이종접합구조 소자 광학 현미경 이미지. c, h-BN/MoS<sub>2</sub> 이종접합구조의 원자현미경 이미지. 소자의 두께가 약 2.7 nm 로 측정되었다. d, 주사투과전자현미경으로 분석한 소자 단면. 다섯 층의 h-BN과 네 층의 MoS<sub>2</sub>를 확인할 수 있다.

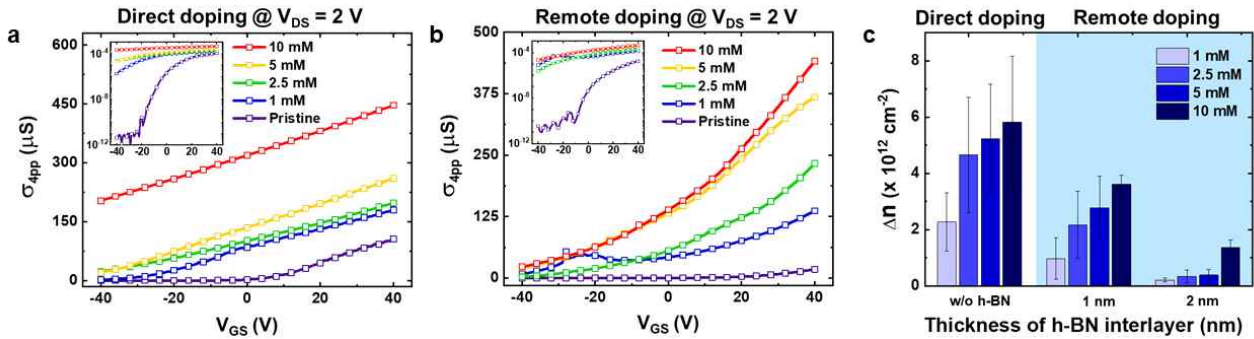


그림 2. h-BN/MoS<sub>2</sub> 트랜지스터에서의 원격 전하 이동 도핑을 활용한 소자 컨트롤 가능성. **a**, 도핑 용액 농도별 기존의 전하이동 도핑에 따른 컨덕턴스 변화. **b**, 도핑 용액 농도별 원격 전하이동 도핑에 따른 컨덕턴스 변화. **c**, 용액 농도에 따라 증가된 전하 밀도량. 기존의 전하이동 도핑(왼쪽), 1-nm h-BN에서의 원격 전하 이동 도핑(가운데), 2-nm h-BN에서의 원격 전하 이동 도핑 (오른쪽). h-BN의 두께가 두꺼워질수록 증가된 전하 밀도량이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

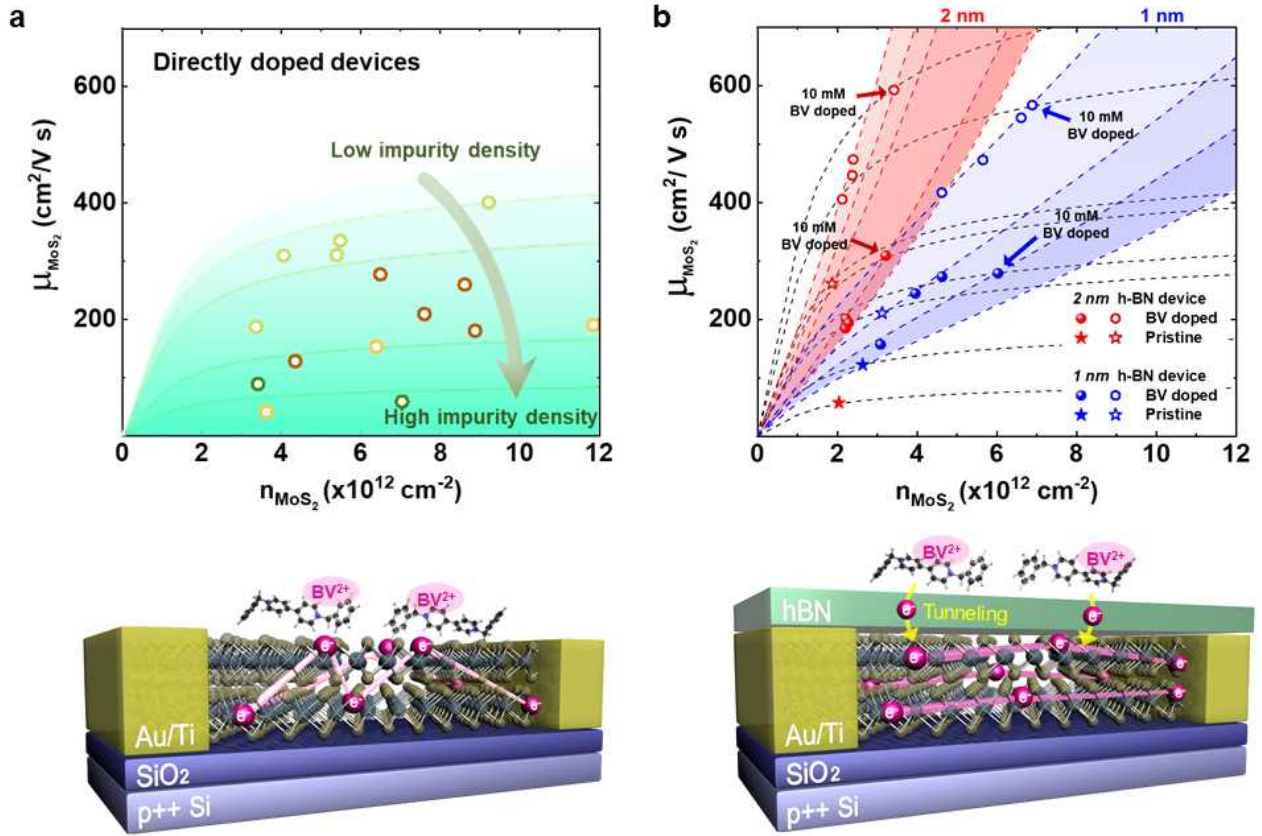


그림 3. 전하 불순물 산란 효과의 감소 원인을 규명하기 위한 기존 도핑과 원격 도핑 사이에서의 전하 이동도 비교. a, 기존 도핑에서의 전하 농도에 따른 전자 이동도 및 모식도 b, 원격 도핑에서의 전하 농도에 따른 전자 이동도 및 모식도.