

Wafer-scale transistor arrays fabricated using slot-die printing of molybdenum disulfide and sodium-embedded alumina

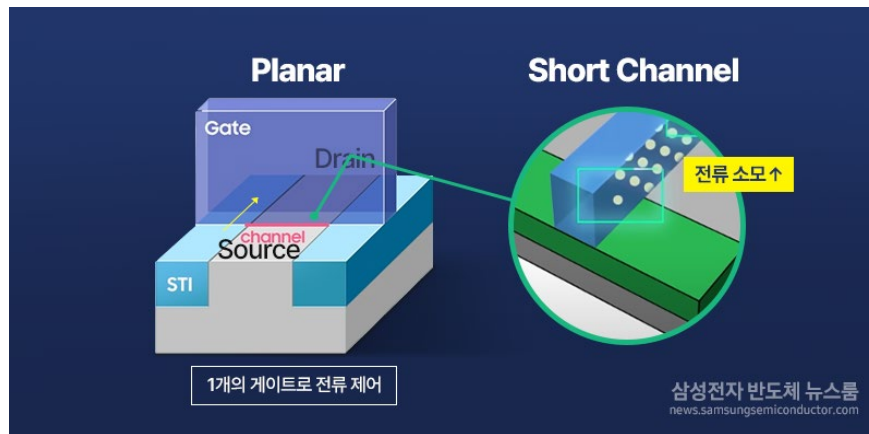
대면적 슬롯 다이 프린팅을 활용한 이황화몰리브데넘 및 소듐 주입 알루미나 기반 트랜지스터 어레이

Yonghyun Albert Kwon (Yonsei University)
권 용 현 (연세대학교)

◆ 반도체 소자의 미세화

• 반도체 칩의 집적도를 높이기 위한 미세화

- 1970년대 초반에 시작되어, 집적회로의 트랜지스터 밀도(집적도)를 지속적으로 높이면서 칩 크기를 축소
- 미세화가 진행됨에 따라 부작용(short channel effect; 전류 제어에 있어 문제 발생)이 발생
- 현재는 이러한 부작용을 극복하기 위해 소자의 구조를 다변화함으로써 문제를 해결
- 수 나노 이하 크기의 최첨단 소자를 구현하기 위해서는 **반도체 채널의 두께** 또한 수 나노 수준으로 얇아져야 함

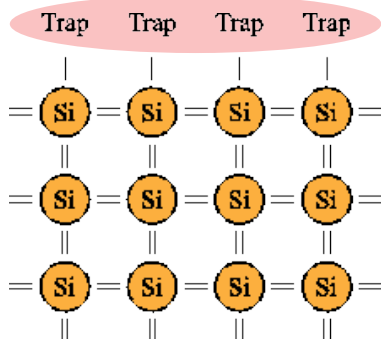


◆ 이차원 반도체의 등장

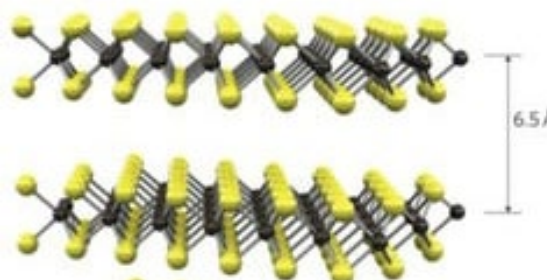
• 기존 실리콘(Si)기반 반도체의 한계와 이차원 반도체의 등장

- 기존의 실리콘(Si) 반도체는 3차원 구조이기에 표면에 dangling bond (화학적 결합을 하지 않은 원자)가 존재하며 전자의 이동을 방해
- Si의 두께가 얇아질수록 dangling bond의 결합적 요소가 확대되어 성능이 급격히 저하됨
- 이차원 반도체는 원자 수준의 얇은 두께에서도 dangling bond가 존재하지 않아 미세화에 유리
- 이차원 반도체 중에서도 이황화몰리브데늄(MoS_2)은 소재 내 전자 이동이 우수해 차세대 반도체로 주목됨

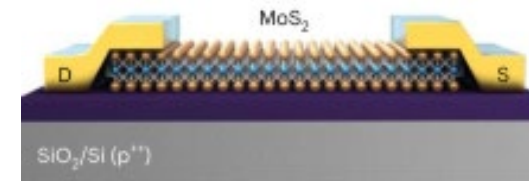
Si 반도체의 표면 결합



원자 수준 두께로 존재하는 MoS_2



MoS_2 이차원 반도체 소자



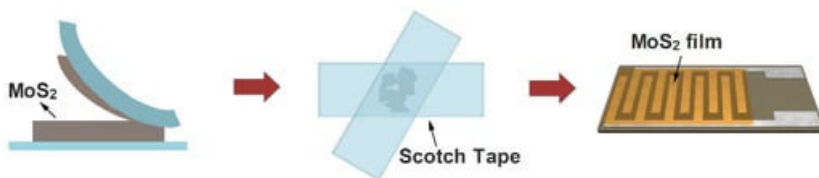
Nature Electronics, 5, 849–858 (2022)

◆ 이차원 반도체의 단점

• MoS_2 반도체 소자의 상용화 걸림돌 : 생산성과 성능

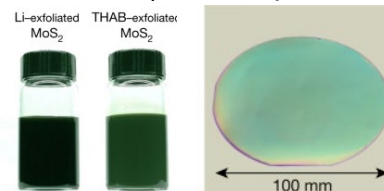
- 물리적 박리(mechanical exfoliation)를 통해 생산된 MoS_2 는 높은 성능을 보이나 **대면적 생산이 불가능**
- 기상화학법(CVD)으로 생산된 MoS_2 는 전이(transfer)등의 추가 공정으로 인해 **성능 저하**
- 용액공정(solution process)으로 생산된 MoS_2 는 **대면적 생산이** 가능하나 불순물 등의 영향으로 **성능 저하**

물리적 박리(mechanical exfoliation)



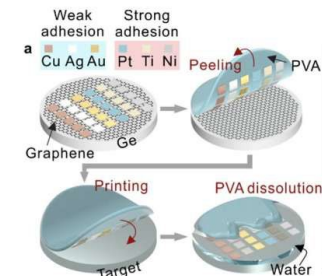
Sensors, 19(9), 2123 (2019)

용액공정(solution process)



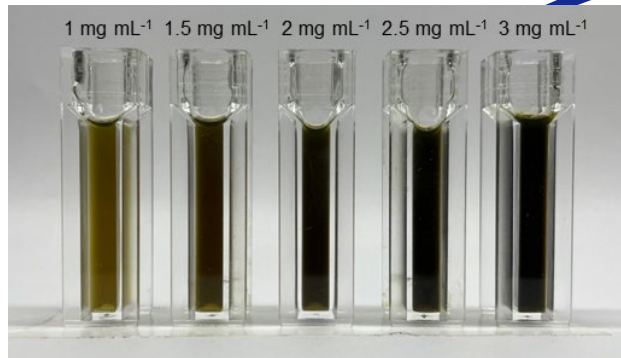
Nature, 562, 254–258 (2018)

기상화학법(CVD)

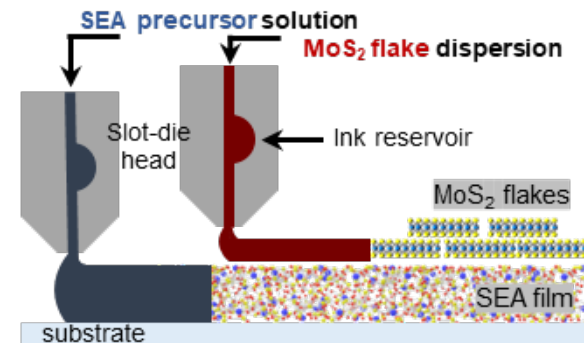


Nature Electronics, 5, 275–280 (2022)

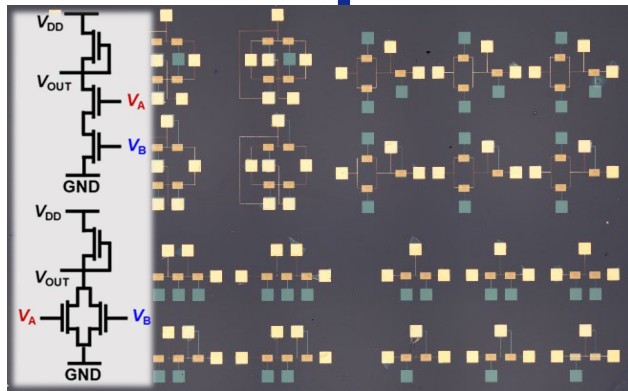
1 응용소재의 용액 제조



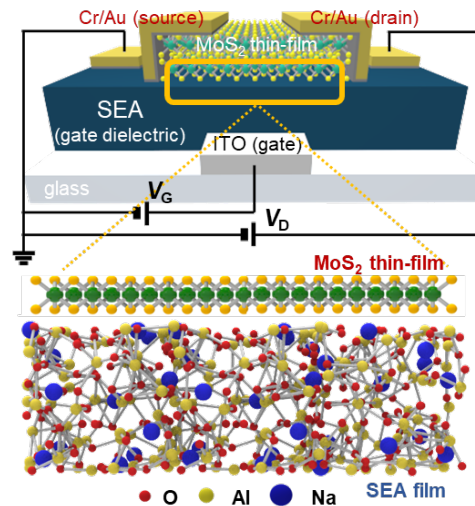
2 슬롯 다이 프린팅 공정



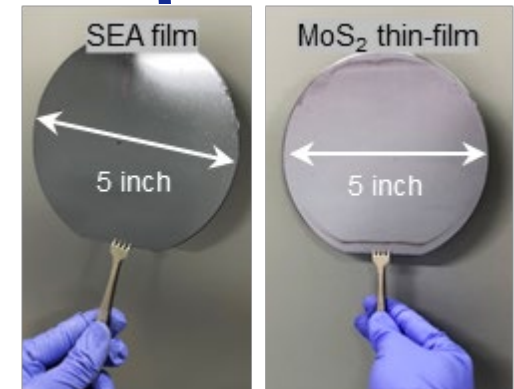
5 논리 회로에 응용



4 이차원 트랜지스터 소자 제작 및 평가

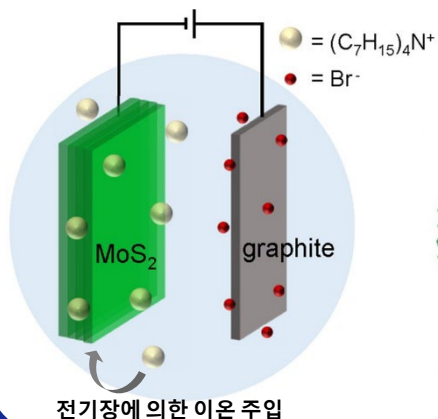


3 대면적 웨이퍼에 코팅

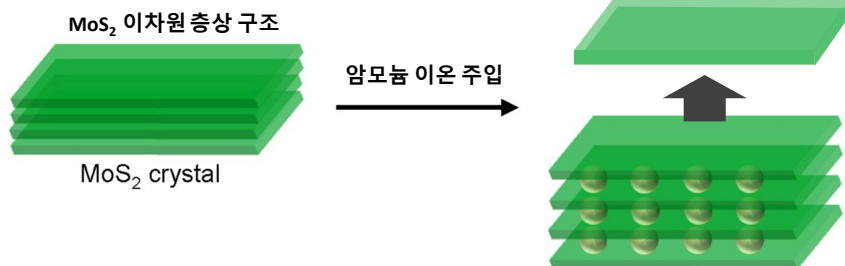


◆ 전기화학적 액상 박리 공정으로 MoS₂ 분산 용액 생산

전기화학적 액상 박리 공정

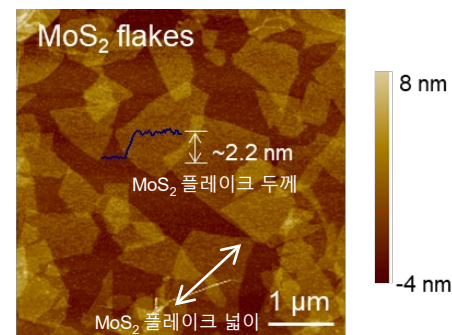


전기화학적 액상 박리 원리



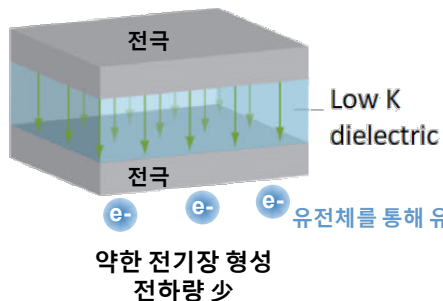
액상 박리된 플레이크의 원자힘 현미경 이미지

넓은 크기의 (~1 μ m) MoS₂ 플레이크 분산 용액 생산

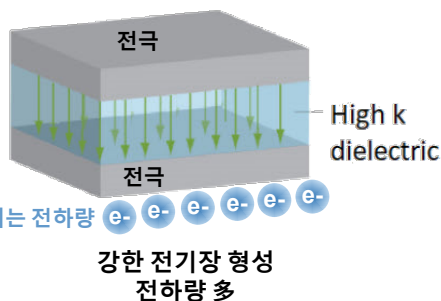


◆ 이온이 주입된 형태의 고유전율 금속산화물 유전체

저유전율 (low-k) 유전체

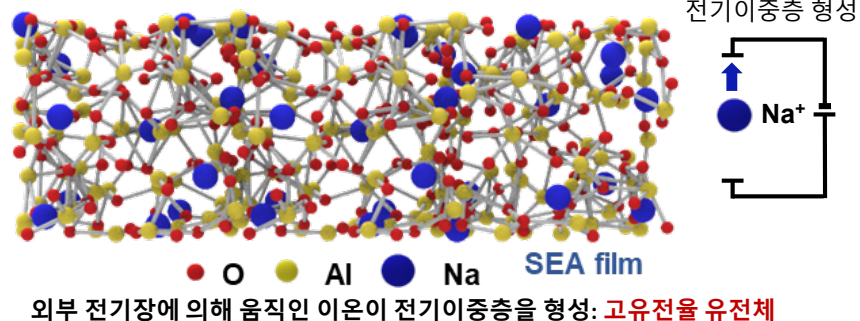


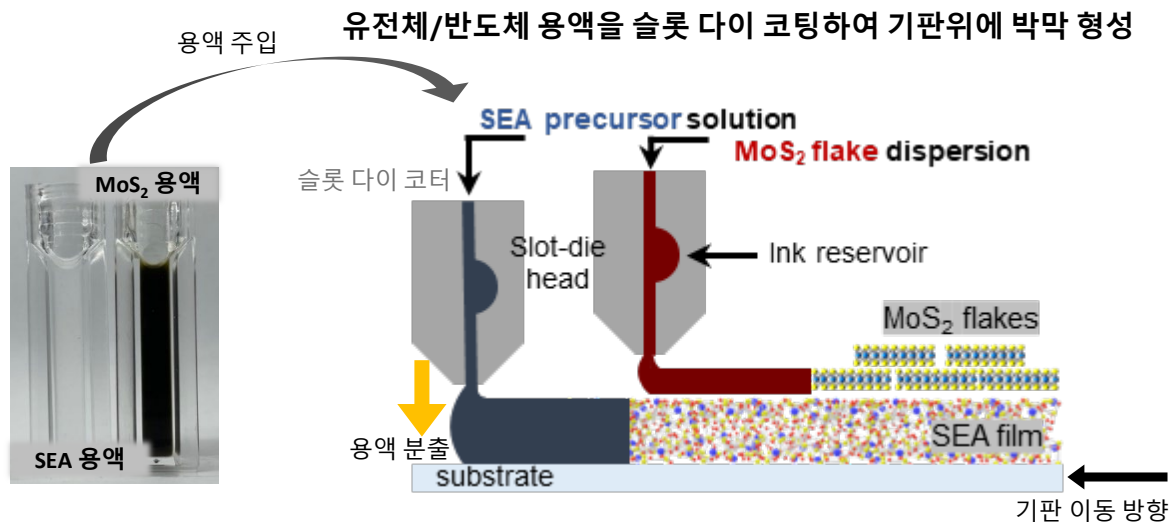
고유전율 (high-k) 유전체



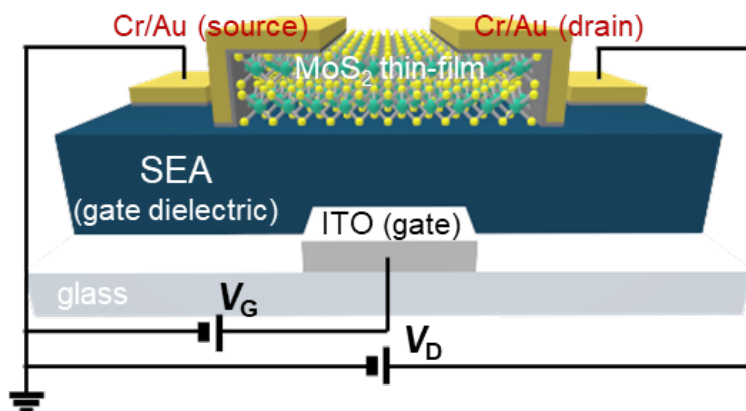
이온이 주입된 형태의 금속산화물 (Sodium-embedded-alumina; SEA) 개발

: 비정질 산화 알루미늄 (Al₂O₃)에 소듐 (Na⁺) 이온 주입

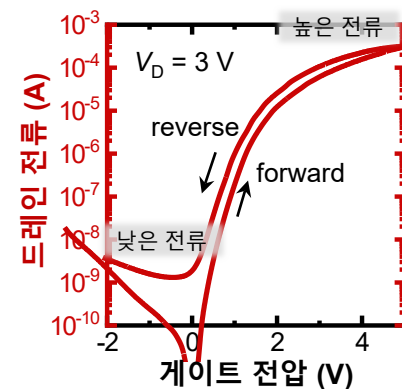




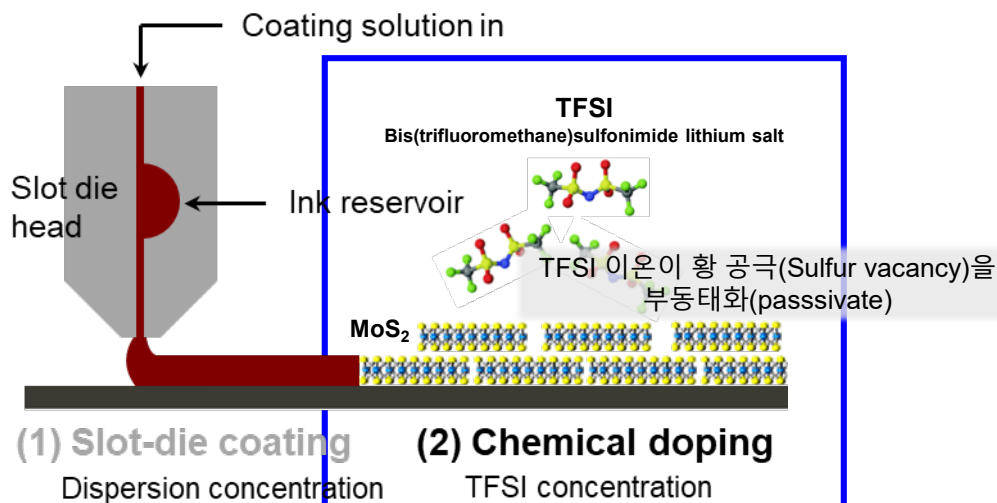
노광 패터닝 및 금속 전극 증착 공정을 거쳐 트랜지스터 소자 제작



트랜지스터 소자의 동작 : 전류 스위치
외부 전압(게이트 전압)에 따른 전류의 흐름이 변화

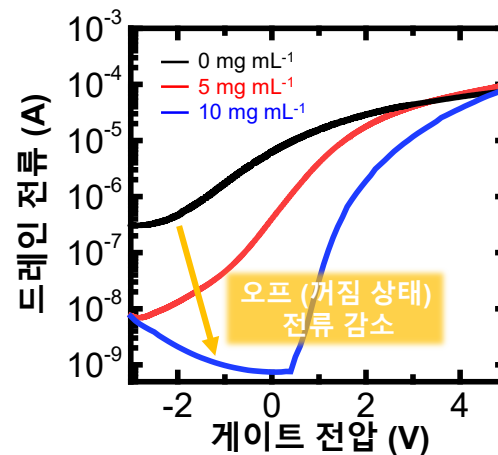


◆ 소자의 최적화 과정(1)_화학적 도핑

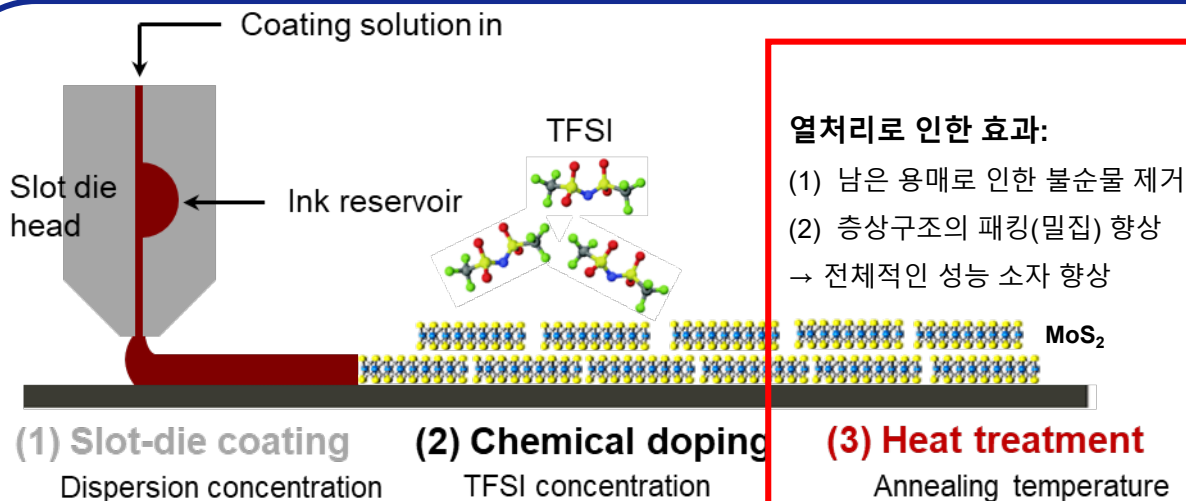


황 공극의 부동태화로 인한 효과:

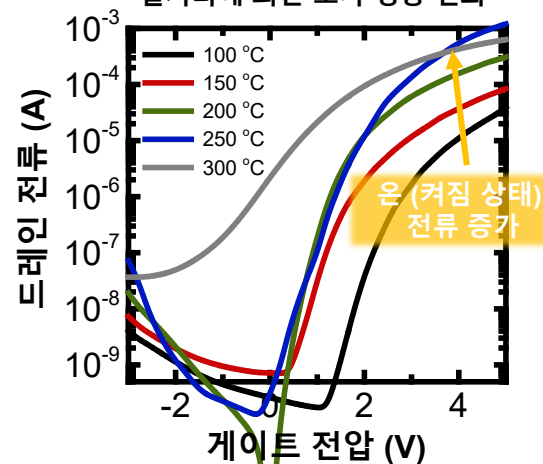
- (1) 전류밀도 감소로 인한 오프 전류 감소
- (2) 전하 이동의 방해요소 제거



◆ 소자의 최적화 과정(2)_열처리



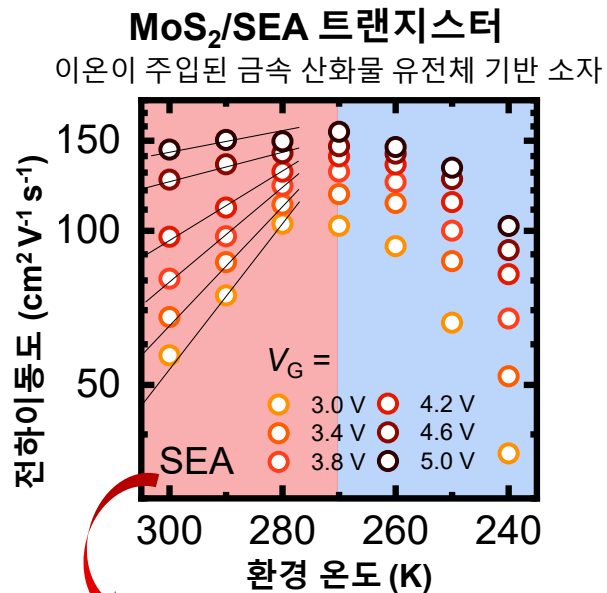
열처리에 의한 소자 성능 변화



◆ 전하의 수송 메커니즘 분석

• 환경 온도에 따른 소자의 성능 변화를 통해 전하의 수송 메커니즘 분석

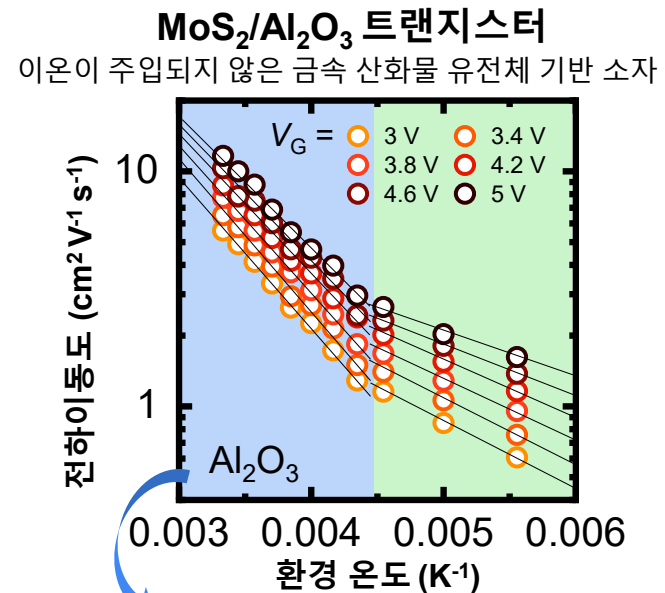
- 비교 분석을 위하여 이온이 주입되지 않은 산화 알루미늄 기반의 이차원 트랜지스터 측정
- 유전율 비교 : SEA > Al_2O_3 (~ 17배)



환경 온도↑ → 전하이동도↓

소재 내 결함이 없는 상태의 전하 이동 현상

높은 유전율로 인해 전하들이 소재 내 결함을 부동태화



환경 온도↑ → 전하이동도↑

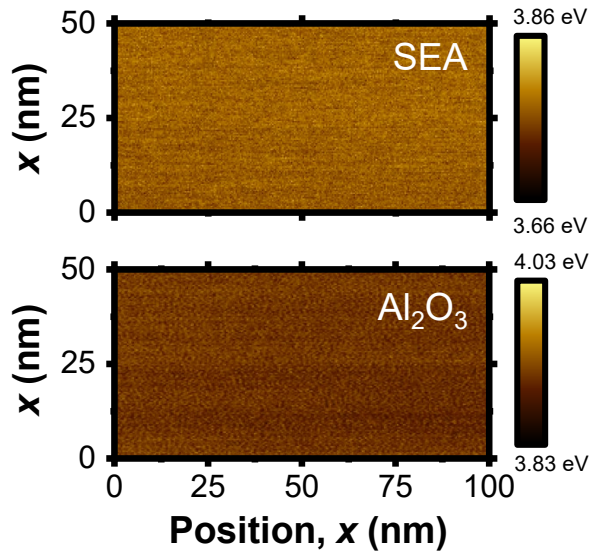
소재 내 결함이 존재하는 상태의 전하 이동 현상

◆ 유전 소재의 표면 분석

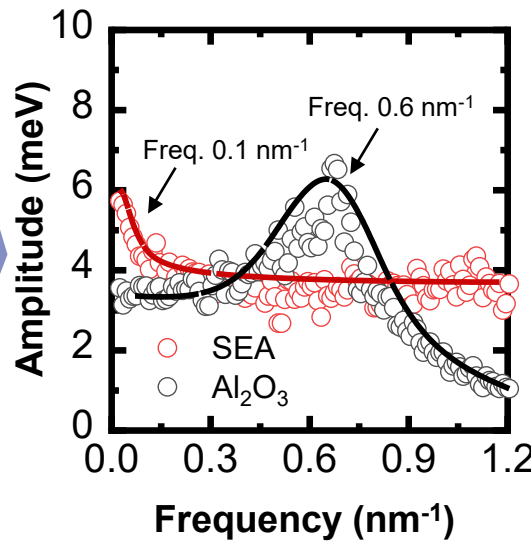
• KPFM(kelvin probe force microscopy)를 이용한 유전 소재의 표면 분석

- KPFM을 이용하여 소재의 일 함수(work function)* 측정
- 푸리에 변환 (Fourier transformation)**을 통한 표면의 에너지적 굴곡을 분석
- 에너지적으로 평탄한 유전체의 계면은 이차원 반도체 소재 내의 전하 이동을 향상

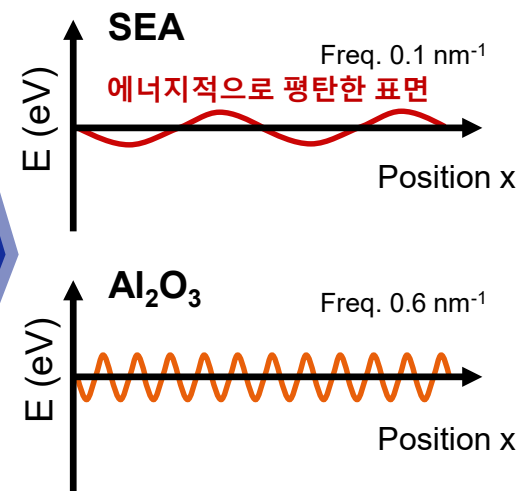
일 함수 분포 측정 (KPFM)



일 함수 분포 이미지의 푸리에 변환

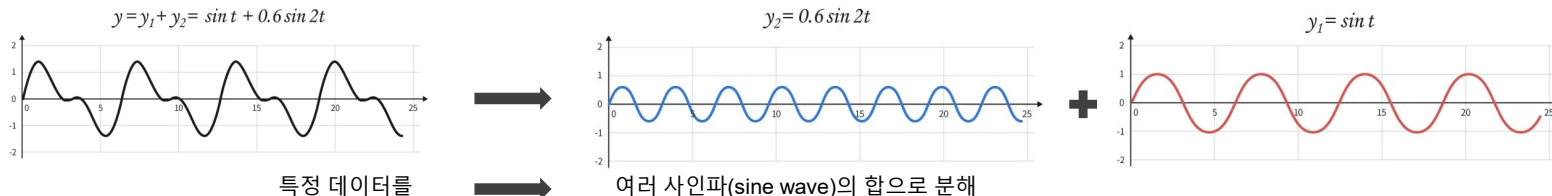


유전체 표면의 에너지적 굴곡 도식화



*일 함수(work function): 고체의 표면에서 한 개의 전자를 고체 밖으로 빼내는 데 필요한 에너지

**푸리에 변환(Fourier transformation): 시간이나 공간에 대한 함수를 시간 또는 공간 주파수 성분으로 분해하는 변환

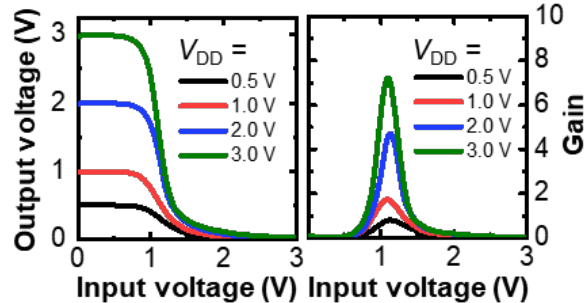
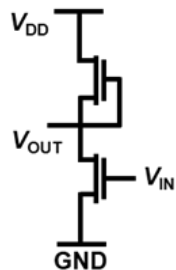


◆ 논리 회로 응용

• 제작한 소자의 응용가능성 입증을 위해 논리 회로 구현

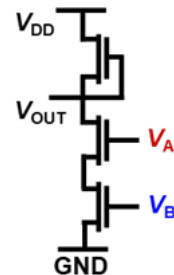
- 논리 회로 (Logic circuit) : 컴퓨터 연산을 수행하는 가장 기본 단위의 회로
- 논리 회로의 성공적인 구현을 통해 소자의 다양한 응용가능성을 증명

NOT : Inverter; 출력이 입력과 반대되는 값을 가짐



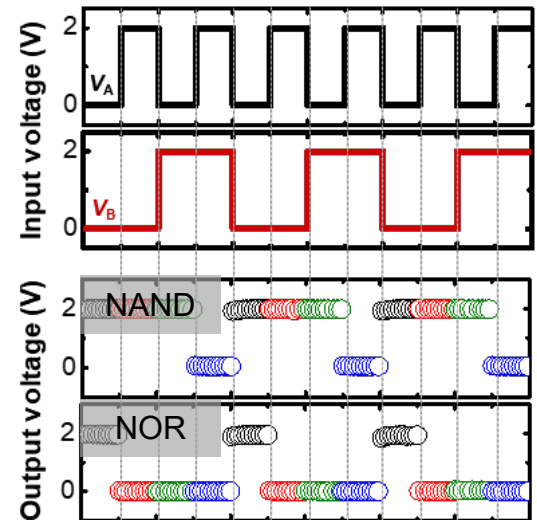
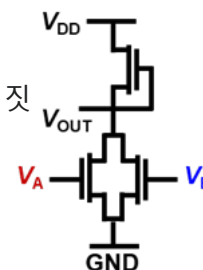
NAND

: 모든 입력이 참일 때에만 거짓



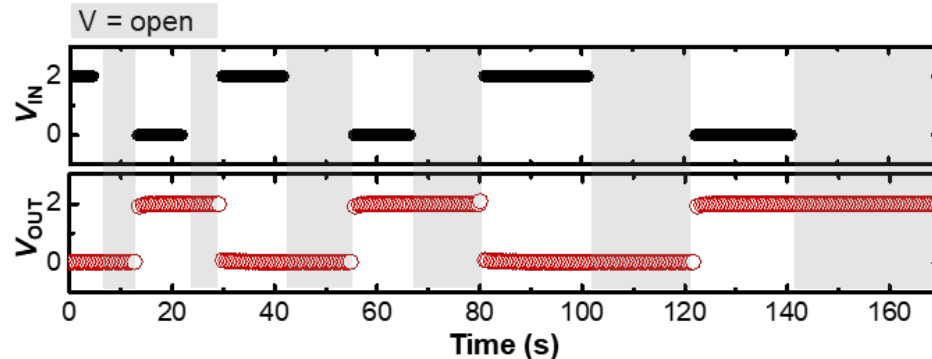
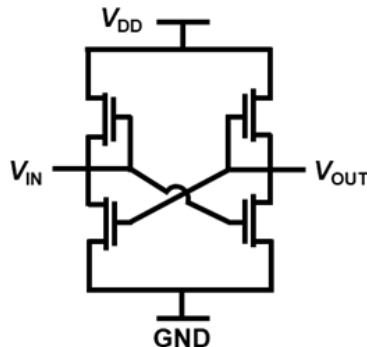
NOR

: 모든 입력이 거짓 일 때에만 참



SRAM

: Static random access memory; 전원이 공급되는 동안 데이터를 기억해주는 장치



nature electronics

[Explore content](#) ▾ [About the journal](#) ▾ [Publish with us](#) ▾

[nature](#) > [nature electronics](#) > [articles](#) > article

Article | [Published: 08 June 2023](#)

Wafer-scale transistor arrays fabricated using slot-die printing of molybdenum disulfide and sodium-embedded alumina

[Yonghyun Albert Kwon](#), [Jihyun Kim](#), [Sae Byeok Jo](#), [Dong Gue Roe](#), [Dongjoon Rhee](#), [Younguk Song](#), [Byoungwoo Kang](#), [Dohun Kim](#), [Jeongmin Kim](#), [Dae Woo Kim](#), [Moon Sung Kang](#), [Joohoon Kang](#)  & [Jeong Ho Cho](#) 

[Nature Electronics](#) **6**, 443–450 (2023) | [Cite this article](#)

4555 Accesses | **38** Altmetric | [Metrics](#)

<https://doi.org/10.1038/s41928-023-00971-7>



❖ 공동 교신 저자

조정호 교수

연세대학교

화공생명공학과

<https://jhcho9400.wixsite.com/seplab>



❖ 공동 교신 저자

강주훈 교수

성균관대학교

신소재공학부

<https://sites.google.com/view/mfmp>



❖ 공동 1저자

권용현 연구원

연세대학교

화공생명공학과



❖ 공동 1저자

김지현 연구원

성균관대학교

신소재공학부