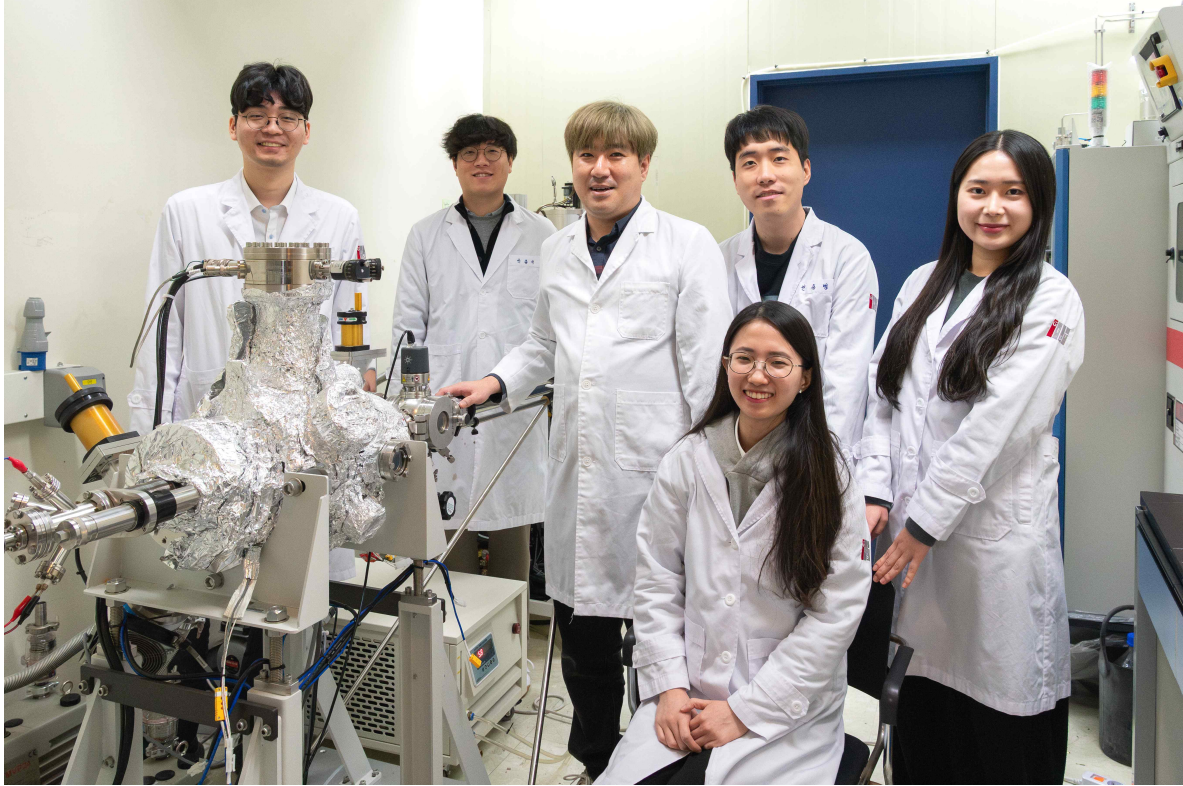


“잘 만든 반도체인지 깨뜨리지 않고 한눈에 판별한다” GIST, 차세대 반도체 비파괴 품질 검사 기술 개발

- 화학과 임현섭 교수 연구팀, 시료 손상 없이 단결정 여부 판별하는 비파괴 분석 기술 개발... 저에너지 전자회절(LEED)로 기존 파괴적 분석의 한계 넘어 웨이퍼 공정 적용 가능
- 마치 엑스레이 촬영처럼 웨이퍼 전체의 단결정 품질 한눈에 확인할 수 있어, 차세대 이차원 반도체 대량 생산 수율 개선 핵심 기술로 기대... 국제학술지 《Nano Letters》 게재



▲ (왼쪽부터) 화학과 김도훈 석박사 통합과정생, 안채현 박사, 임현섭 교수, 전준병·주혜리 석사과정생, (의자에 앉은) 오주희 석박사 통합과정생

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 화학과 임현섭 교수 연구팀이 차세대 반도체 소재가 제대로 합성되었는지를, 시료를 전혀 손상시키지 않고도 정확히 판별할 수 있는 비파괴 분석 기술을 개발했다고 밝혔다.

현재 반도체 산업의 주력 소재인 실리콘(Si)은 칩을 더 작게 만들수록 성능과 효율을 유지하기 어려워지는 한계가 있고, 전력 소모 증가 등으로 성능 향상에 물리적 제약에 직면해 있다. 이에 따라 원자 한 층 두께에서도 우수한 전기적·광학적 특성을 구현할 수 있는 이차원 반도체 소재가 ‘포스트 실리콘(Post-Silicon)’ 시대의 핵심 대안으로 주목받고 있다.

이 가운데 이황화몰리브덴(MoS_2)*은 실리콘처럼 두꺼운 두께를 가진 기존의 입체적인(삼차원) 반도체와 달리, 종이 한 장보다 훨씬 얇은 원자 한 층 두께의 초박막 구조를 지닌 대표적인 이차원 반도체 물질이다. 그러나 이를 실제 반도체 칩으로 활용하기 위해서는, 대면적으로 합성하더라도 모든 원자가 한 방향으로 정렬된 ‘완벽한 단결정’ 상태를 유지하는 것이 무엇보다 중요하다.

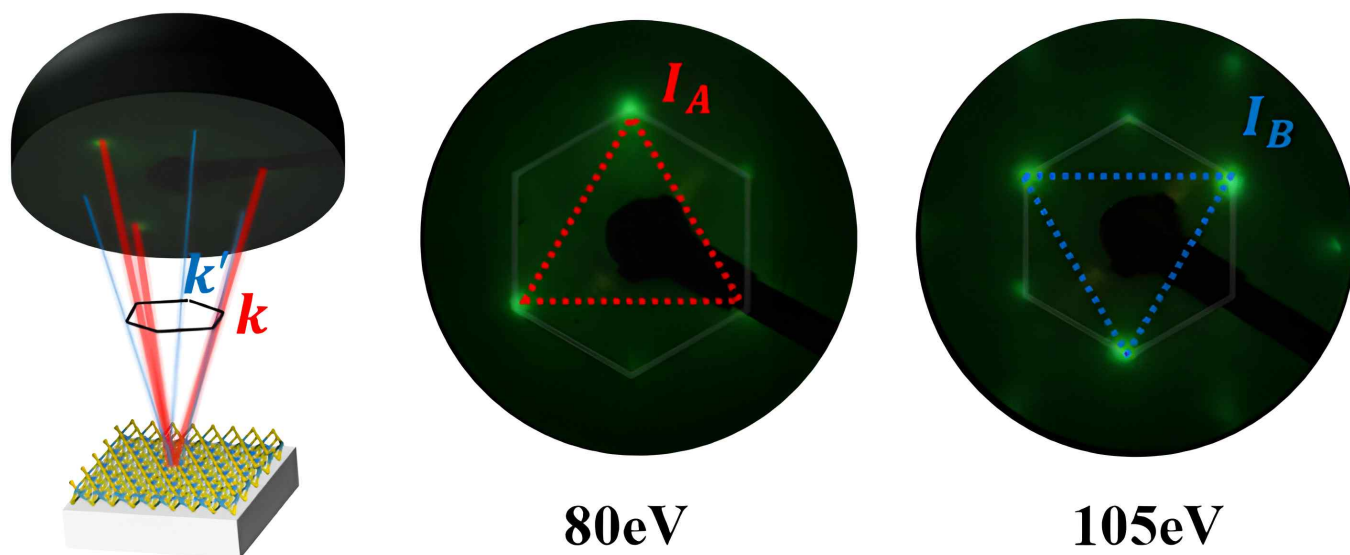
* **이황화몰리브덴(MoS_2)**: 몰리브덴(Mo)과 황(S)으로 이루어진 대표적인 이차원 반도체 물질로, 원자 한 층 두께의 매우 얇은 구조를 가지면서도 우수한 전기적·광학적 특성을 나타낸다. 실리콘의 물리적 한계를 극복할 차세대 반도체 핵심 소재로 주목받고 있으며, 모든 결정이 한 방향으로 정렬된 '단결정 성장'이 이루어질 때 전자의 이동이 원활해져 소자의 성능과 에너지 효율이 크게 향상된다.

문제는 합성된 시료가 겉보기에는 원자들이 질서정연하게 정렬된 완벽한 결정, 즉 '단결정'처럼 보여도, 실제로는 원자 배열이 180도 뒤집힌 '가짜 결정(domain)'이 섞여 있는 경우가 빈번하다는 점이다.

이러한 결정들이 공존하면 경계면에서 전자의 흐름이 방해받아 반도체 성능이 급격히 저하되고, 소자의 신뢰성 역시 떨어진다. 따라서 차세대 이차원 반도체의 상용화를 위해서는 단결정 여부를 정확하게 검증할 수 있는 평가 기술이 반드시 필요하다.

그러나 기존 분석 기법은 시료를 절단하거나 손상시키는 방식이 대부분이어서, 손상 없이 반도체 칩을 만들기 위해 얇은 원판 형태의 재료를 가공하는 '웨이퍼 공정'에 적용하는 데 한계가 있었다.

연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 '저에너지 전자회절(LEED, Low-Energy Electron Diffraction)*' 기법에 주목했다.



▲ **비파괴로 단결정 품질 검증하는 방법**: 전자빔 에너지를 바꿔가며 회절 패턴의 점들 밝기 변화를 측정하면, 원자 배열이 뒤집힌 '쌍둥이 결정'이 섞여 있는지, 얼마나 섞였는지 알 수 있다.

전자빔의 에너지를 단계적으로 변화시키며 전자들이 원자 배열에 부딪혀 만들어내는 회절 패턴의 강도 변화(회절 신호의 세기 변화)를 정밀 분석한 결과, 시료를 전혀 파괴하지 않고도 모든 결정이 한 방향으로 정렬된 '진짜 단결정'과 방향이 뒤섞인 결정이 포함된 시료를 명확히 구분하는 데 성공했다.

특히 이번 연구는 단층 이차원 반도체의 구조적 특성과 전자의 다중 산란 효과를 함께 고려해 결정이 얼마나 잘 정렬돼 있는지를 정량적으로 판단할 수 있는 방법(새로운 전자회절 해석 기준)을 제시함으로써, 단순한 이미지 관찰을 넘어 신뢰도 높은 단결정 판별 방법을 확립했다는 점에서 의미가 크다.

* **저에너지 전자회절(LEED, Low-Energy Electron Diffraction)**: 물질 표면에 낮은 에너지의 전자빔을 조사해, 전자가 원자 배열에 의해 회절되는 패턴을 분석함으로써 표면 결정 구조와 배열 상태를 파악하는 분석 기법이다. 전자는 물질의 가장 바깥 원자층에 민감하게 반응하기 때문에, LEED는 특히 원자 한 층 두께의 이차원 반도체와 같은 초박막 소재의 결정성 평가에 적합하다.



▲ 화학과 임현섭 교수 연구팀의 김도훈 학생(제1저자)이 저에너지 전자회절(LEED) 분석을 통해 반도체 소재가 제대로 합성되었는지를 시료 손상 없이 판별하고 있다.

이번 성과는 새로운 분석 기법 제시에 그치지 않고, **산업 현장 적용 가능성을 함께 제시했다는 점에서도 주목된다.**

아무리 우수한 반도체 소재가 개발되더라도, 이를 빠르고 정확하게 검사할 수 있는 기술이 없다면 대량 생산은 불가능하다. 연구팀의 분석법은 마치 엑스레이 촬영처럼 웨이퍼 전체의 단결정 품질을 한눈에 확인할 수 있어, 차세대 이차원 반도체의 대량 생산 과정에서 정상 제품의 비율, 즉 수율을 획기적으로 높일 핵심 기술로 기대된다.

또한 이 기술은 이황화몰리브덴(MoS_2)뿐 아니라 다양한 이차원 반도체와 서로 다른 초박막 소재를 층층이 쌓아 만든 구조(반데르발스 이종접합 구조)에도 적용 가능해, 차세대 반도체 공정 전반의 품질 관리 표준 기술로 확장될 가능성이 크다.

임현섭 교수는 “실리콘을 넘어설 차세대 반도체 소재가 실제 산업 현장에 적용되기 위해서는 대면적 합성 기술과 이를 검증할 수 있는 확실한 평가 기술이 반드시 함께 갖춰져야 한다”며, “이번에 개발한 비파괴 분석법은 실험실 수준에 머물던 이차원 반도체 연구를 산업 현장의 웨이퍼 공정으로 연결하는 중요한 가교 역할을 할 것”이라고 말했다.

이번 연구는 GIST 화학과 임현섭 교수의 지도 아래 김도훈 석·박사통합과정생이 수행했으며, 과학기술정보통신부·한국연구재단 기초연구사업, 과학기술정보통신부 이노코어(InnoCORE) 사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지 《나노 레터스(Nano Letters)》에 2026년 1월 8일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명: Nano Letters (IF: 9.1 / 2025년 기준)
- 논문명: Revisiting Dynamical Theory to Elucidate Friedel's Law Breaking in Low-Energy Electron Diffraction as Strong Evidence of Unidirectional Growth of Monolayer 2H MoS₂
- 저자 정보: 김도훈 (제1저자, GIST), 오주희 (공동저자, GIST), 안채현 (공동저자, GIST), 전준병 (공동저자, GIST), 주혜리 (공동저자, GIST), 임현섭 (교신저자, GIST, IBS 양자변환연구단)