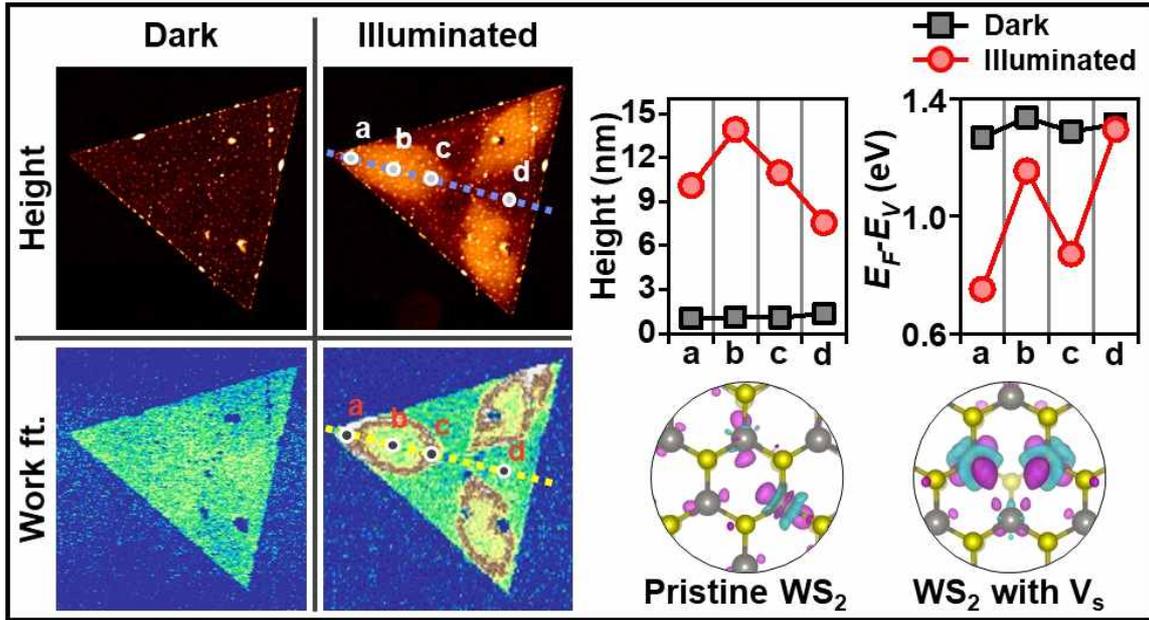


한미 공동연구팀, 2차원 원자층에서 광-전기-기계 특성이 결합된 현상 세계 최초 관측·분석

- 2차원 원자층에 빛을 쏘았을 때 광-전기-기계 특성이 결합된 특이 현상 세계 최초 확인... 빛으로 움직이는 2차원 나노 액추에이터로 응용 가능
- GIST-펜실베이니아대 공동연구팀, 국제학술지 <Nano Letters> 논문 게재



2차원 원자층에서 광-전기-기계 특성이 결합된 현상의 관측 및 분석 결과가 한미 공동연구팀에 의해 밝혀졌다.

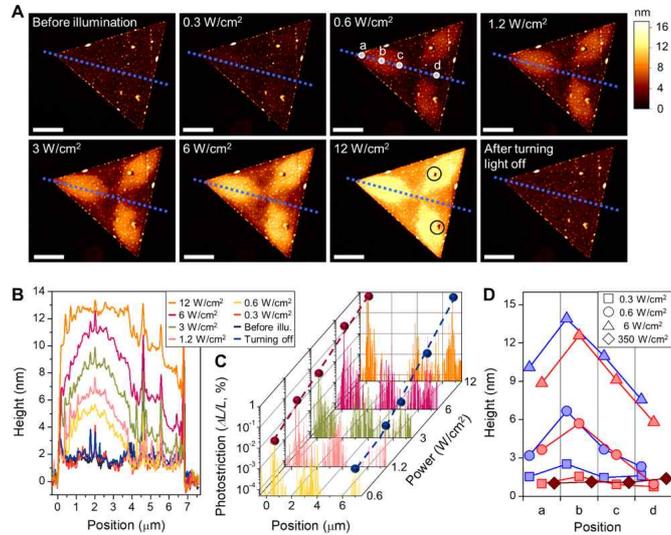
광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 고등광기술연구소 임상엽 책임연구원팀과 미국 펜실베이니아 대학교 공동연구팀이 2차원 원자층에 빛을 비출 때 박막이 부풀어 오르고 국소적으로 반도체 도핑 특성이 바뀌는 현상의 원인이 폴라론*이라는 것을 규명했다고 밝혔다.

* 폴라론(polaron): 고체 물질 내에서 전하 캐리어와 원자의 상호작용을 이해하기 위해 도입된 준입자 개념으로, 전자나 정공과 같은 전하 캐리어는 격자 진동과 상호 작용하여 격자변형을 일으킬 수 있는데, 이 현상을 전하 캐리어와 원자의 반응(격자변형)으로 나누어 생각하는 대신 전하 캐리어가 마치 격자변형을 '착용'한 상태로 이동하는 준입자로 보는 개념.

실리콘 소재 대신 2차원 나노 소재를 활용한 2차원 반도체 물질*은 독특한 전기, 광, 화학 및 기계적 특성이 있어 유망한 미래 물질로 주목받고 있으나 각각의 특성들이 서로 결합된 현상에 대해서는 아직 명확하게 밝혀진 바가 없다.

그 현상 중 하나가 광압축(혹은 광팽창)인데, 열을 가하지 않은 상태에서 빛을 비추면 샘플의 크기나 모양이 변화하는 것이다. 2차원 원자층에서 광압축이나 광팽창이 일어난다면, 나노미터 크기의 기계적 움직임을 제어할 수 있는 나노 시스템 개발이 가능해진다.

* **2차원 반도체 물질:** 2차원 소재는 그래핀과 같이 원자층 하나의 두께를 가진 물질로, 실리콘 소재를 대체할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 실리콘 반도체에 비해 전기적 특성을 제어하기 어려워 원하는 논리 소자를 구현하기 어렵다는 문제가 있다.



▲ **빛의 세기에 따른 WS₂ 원자층의 팽창.** WS₂ 원자층에 적색 레이저 빔을 입사시키며 표면 높이 변화를 관측한 결과, 빛의 세기에 따라 가역적인 팽창 현상을 보임. WS₂ 원자층이 흡수할 수 있는 청색 레이저 빔으로도 비슷한 결과가 나타났지만, 흡수가 없는 근적외선 레이저 빔으로는 변화가 없음.

이황화텅스텐(WS₂) 원자층에 **적색 레이저 빔**을 입사시키며 원자 현미경으로 표면 높이 변화를 관측한 결과, 결함이 적은 영역에서 먼저 부풀어 오르기 시작하여 **대칭적인 팽창 패턴**을 관측할 수 있었다. 이것은 빛의 세기가 강할수록 크게 팽창하고, 빛을 비추지 않으면 원상태로 돌아가는 **가역 현상**임을 확인했다. **적색 레이저 대신 청색 레이저를 사용해도 비슷한 현상**이 관측되었다.

하지만 이황화텅스텐(WS₂) 원자층이 흡수하지 않는 근적외선 레이저는 매우 강한 세기로 쏘아도 아무런 변화가 없었다. 흡수된 빛에 의해 **여기*된 전하 캐리어와 결함*이 중요한 역할을 수행**한다는 것을 확인하였다.

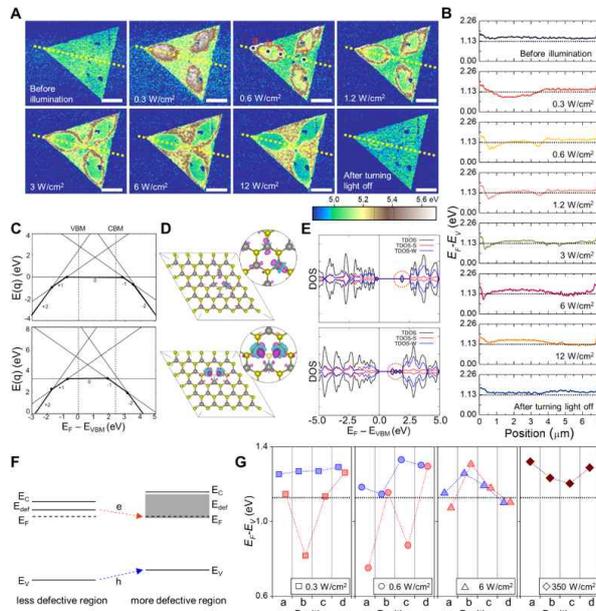
* **여기(excitation):** 원자의 최외각에 있는 전자는 외부로부터 에너지가 주어진다면 에너지 준위가 높은 전자 궤도로 올라가는데 이 상태가 된 원자 또는 분자를 여기 상태에 있다고 함.

* **결함:** 결정 구조의 고체는 원자들의 주기적인 배열로 형성되지만, 그 규칙성이 항상 완전하지는 않고 깨진 영역이 존재하며, 이를 결함이라고 지칭함. 점, 선, 면, 부피 결함으로 분류할 수 있고, 원자의 위치와 방향, 종류에 따라 다양한 결함이 형성됨.

연구팀은 **빛의 세기에 따라 국소 영역에서 반도체 도핑 특성이 변하여 국소 p-n 접합이 발생하는 현상**을 켈빈 현미경*으로 관측했다. 그 결과, **결함에 결합된 전자-홀라론 상태가 격자 팽창과 국소적인 반도체 도핑 특성 변화의 원인**임을 규명하였다.

연구팀은 전이금속 디칼코제나이드 **2차원 반도체 박막**의 일종인 이황화텅스텐(WS₂) 원자층에서 **빛을 비출 때 패턴화된 모양으로 박막이 부풀어 오르고** 반도체 도핑 특성이 국소 영역에서 바뀌어 **국소 p-n 접합*이 형성되는 현상**을 관측했으며, **전자-홀라론이 그 원인**임을 밝혔다.

* **p-n 접합**: p형 반도체와 n형 반도체를 접합할 때, 외부 전압이 걸릴 경우 한쪽 방향으로만 전류가 흐르게 되는 다이오드의 기본 구조.



▲ **빛의 세기에 따른 WS₂ 원자층의 반도체 도핑 특성 변화**. 국소 영역에서 반도체 도핑 특성이 변하여 국소 p-n 접합이 발생하는 현상 관측. 격자 팽창과 국소적인 반도체 도핑 특성 변화의 원인이 결합된 결함된 전자-플라톤 때문임을 전자계산으로 확인함.

2차원 원자층에서 이와 같은 광-전기-기계 특성이 결합된 현상의 관측과 분석은 연구팀이 세계 최초로 보고한 연구 성과이다.

* **켈빈 현미경(Scanning Kelvin-probe Force Microscopy)**: 원자 현미경의 일종으로, 프로브와 샘플 사이의 정전기력을 감지하여 재료의 일함수를 국소적으로 측정/영상화하는 기법. 반도체 재료의 경우 반도체 도핑 특성을 정량적으로 측정할 수 있음.

임상엽 책임연구원은 “이번 연구가 **다양한 2차원 반도체 물질에서 유사한 현상을 관측하는 시도와 결함의 종류/밀도를 제어하는 연구의 초석이 될 것**”이라며 “향후 초소형, 저전력으로 작동하는 **광-나노 액추에이터 개발이 가능할 것으로 기대된다**”고 말했다.

GIST 고등광기술연구소 임상엽 책임연구원팀과 미국 펜실베이니아 대학교 (University of Pennsylvania) Agarwal 교수팀 및 Rappe 교수팀이 협력하여 수행한 이번 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업과 GIST 고등광기술연구소 고유과제 사업의 지원을 받았으며, '나노 레터스(Nano Letters)'에 2024년 4월 24일 온라인 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Nano Letters (IF= 10.8 (2022년 기준))
- 논문명 : Optically-triggered emergent mesostructures in monolayer WS₂
- 저자 정보 : Ritesh Agarwal(공동교신저자, U. Pennsylvania)
임상엽(공동교신저자, GIST 고등광기술연구소)
Andrew M. Rappe(공동교신저자, U. Pennsylvania)
임용철(공동제1저자, 현)삼성종합기술원)
Zhenyao Fang(공동제1저자, U. Pennsylvania)
이윤경(참여저자, 파크시스템스)
김나영(참여저자, GIST 고등광기술연구소)
Arvin Kakekhani(참여저자, U. Pennsylvania)
Wenjing Liu(참여저자, U. Pennsylvania)
조성표(참여저자, 서울대학교)
김철수(참여저자, 파크시스템스)
Yuhui Wang(참여저자, U. Pennsylvania)
Zhurun Ji(참여저자, U. Pennsylvania)
Abhirup Patra(참여저자, U. Pennsylvania)
Leeor Kronik(참여저자, Weizmann Institute of Science)