



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0120298
(43) 공개일자 2022년08월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01Q 60/24 (2010.01) G01Q 10/04 (2010.01)
G01Q 30/04 (2010.01) G01Q 60/38 (2010.01)
H01L 33/00 (2010.01) B82Y 20/00 (2017.01)

(52) CPC특허분류

G01Q 60/24 (2013.01)
G01Q 10/04 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0024218

(22) 출원일자 2021년02월23일

심사청구일자 2021년02월23일

(71) 출원인

울산과학기술원

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

(72) 발명자

박경덕

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

구연정

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

(74) 대리인

특허법인 무한

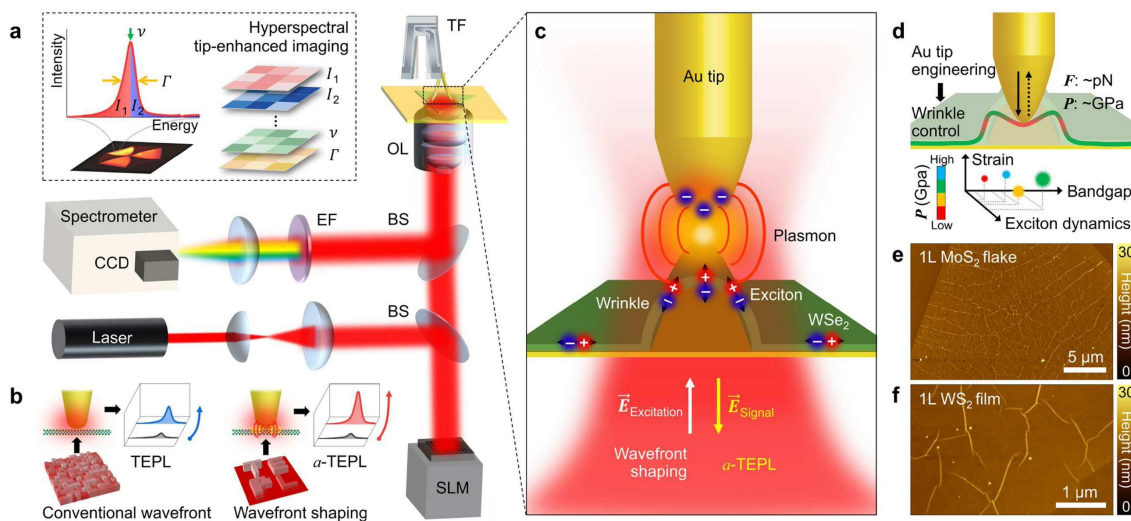
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법 및 나노주름 광원

(57) 요약

본 발명은, 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법 및 나노주름 광원에 관한 것으로, 보다 구체적으로, 2차원 반도체 물질층을 준비하는 단계; 상기 2차원 반도체 물질층 방향으로 나노스케일 팁을 위치시키는 단계; 상기 나노스케일 팁을 이용하여 상기 2차원 반도체 물질층의 나노주름이 형성된 영역을 관찰하는 단계; 및 상기 나노주름이 형성된 영역에 상기 나노스케일 팁으로 압력을 가하여 상기 나노주름을 변형시키는 단계; 를 포함하는, 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법, 나노주름 광원의 제어 및 분석 시스템 및 나노주름 광원에 관한 것이다.

대표도



(52) CPC특허분류

G01Q 30/04 (2013.01)

G01Q 60/38 (2013.01)

H01L 33/00 (2020.05)

B82Y 20/00 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711114959
과제번호	2020R1C1C1011301
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	저차원 반도체 나노분광 특성 제어를 위한 능동형 나노스코피 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2020.03.01 ~ 2021.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	220010301
과제번호	220010301
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	연구교류지원사업(양자)
연구과제명	2차원 반데르발스 이중접합 물질의 밸리트로닉 양자 광원 연구
기 여 율	1/2
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2020.01.01 ~ 2021.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

2차원 반도체 물질층을 준비하는 단계;
 상기 2차원 반도체 물질층 방향으로 나노스케일 팁(tip)을 위치시키는 단계;
 상기 나노스케일 팁을 이용하여 상기 2차원 반도체 물질층의 나노주름이 형성된 영역을 관찰하는 단계; 및
 상기 나노주름이 형성된 영역에 상기 나노스케일 팁으로 압력을 가하여 상기 나노주름을 변형시키는 단계;
 를 포함하는,
 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
 상기 2차원 반도체 물질층은,
 2차원 반도체 물질의 단일층인 것인,
 나노주름 광원의 제조방법.

청구항 3

제1항에 있어서,
 상기 팁의 반경은, 15 nm 이하이고,
 상기 팁은, Au, Ag, Al, Cu, Co, Cr, Pt, Pd, Rh, Ti 및 Ni로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 것
 인,
 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,
 상기 나노스케일 팁은, 전단력 (shear-force) AFM에 장착된 플라즈모닉 팁이고,
 상기 플라즈모닉 팁은, TEPL (tip-enhanced photoluminescence spectroscopy), TERS (tip-enhanced Raman spectroscopy) 및 TEEL (tip-enhanced electroluminescence) 중 적어도 하나를 측정하는 것인,
 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,
 상기 나노주름을 변형시키는 단계 중 실시간으로 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 모니터링하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 나노주름을 변형시키는 단계는,

상기 나노주름 영역의 변형률, 밴드갭, 광발광 에너지 파장, 광발광 에너지 파장 세기, 엑시톤 거동 및 엑시톤 밀도 중 적어도 하나를 제어하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 나노주름을 변형시키는 단계는,

상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나의 가역적 변형을 유도하고,

상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 능동적으로 제어하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 나노주름을 변형시키는 단계는,

상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 영구적 변형을 유도하고,

2차원 물질의 결정면(crystal face) 특성으로 유도하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 나노주름을 변형시키는 단계는,

상기 나노주름의 구조적 변형을 통해 상기 나노주름 중 적어도 일부 또는 전부를 제거하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 나노주름을 변형시키는 단계는,

상기 나노주름의 발광 특성을 상기 나노스케일 팁 높이에 따라 2단계 스위칭, 3단계 변조 또는 이 둘에 의해 조정하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 나노스케일 팁은, 최초 높이 원자현미경 기준 신호의 1 % 내지 100 % 미만에서 압력을 가하고,

상기 나노스케일 팁은, 10 nm 이하의 단위로 수직 이동하여 상기 나노주름에 압력을 가하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 나노주름을 변형시키는 단계는,

상기 나노주름의 변형률을 30% 이하 및 시분해 상으로 1 kHz 이하의 주파수로 국소적 또는 가역적으로 제어하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 나노주름을 변형시키는 단계는,

변형률 변화에 의한 고속 변조되는 상기 나노주름의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성을 실시간으로 증폭하여 초고분해분광을 측정하고 이미징하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 방법.

청구항 14

2차원 반도체 물질층이 위치하는 기판;

상기 2차원 반도체 물질층을 향해 배치되는 나노스케일 팁; 및

2차원 반도체 물질층의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나의 초고분해분광 측정 및 분석을 위한 장비;

를 포함하고,

상기 나노스케일 팁은, 전단력 (shear-force) AFM에 장착된 플라즈모닉 팁이고,

상기 나노스케일 팁은, 상기 2차원 반도체 물질층의 나노주름이 형성된 영역에 압력을 가하여 나노주름을 변형시키고, 실시간으로 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 모니터링하는 것인,

나노주름 광원의 제어 및 분석 시스템.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 나노주름 광원의 제어 및 분석 시스템은,

상기 나노주름 영역의 TEPL (tip-enhanced photoluminescence spectroscopy), TERS (tip-enhanced Raman spectroscopy) 및 TEEL (tip-enhanced electroluminescence) 중 적어도 하나를 측정하는 것인,
나노주름 광원의 제어 및 분석 시스템.

청구항 16

나노주름 영역을 갖는 2차원 반도체 물질층
을 포함하고,
상기 나노주름의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성이 초고분해분광에서 15 nm 이하의 분해능을 갖는 것인,
나노주름 광원.

청구항 17

제16항에 있어서,
상기 나노주름 광원은,
전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성을 능동적 제어가 가능하거나 또는 2차원 물질의 결정면(crystal face) 특성을 갖는 것인,
나노주름 광원.

청구항 18

나노주름 영역을 갖는 2차원 반도체 물질층을 포함하는 나노주름 광원;
을 포함하고,
상기 나노주름 광원은, 상기 나노주름의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성이 초고분해분광에서 15 nm 이하의 분해능을 갖는 것인,
나노 광소자.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법 및 나노주름 광원에 관한 것이며, 나노주름 광원의 제어 및 분석을 위한 시스템 및 나노 광소자에 더 관련될 수 있다.

배경 기술

[0002] 직접 밴드갭 MoS₂ 단일층 (monolayer)에서 새로운 광발광 (photoluminescence) 특성을 발견한 이후에 강한 쿨롱 상호작용 (strong coulomb interaction), 큰 스핀-오비탈 커플링 (large spin-orbit coupling) 및 밸리-선택적 이색성 (valley-selective dichroism)과 같은 증상화된 전이 금속 디칼코겐나이드 (transition metal dichalcogenides, TMD)의 물리적 특성에 대한 연구가 진행되어 왔다. 광전자 소자를 위한 플랫폼으로 활용 가능성이 높지만, TMD 소자로 사용화하기 위해서 해결해야하는 기술적 과제 및 문제점이 여전히 남아 있다.

[0003] 나노스케일 결함, 예를 들어, 결정립 (grain boundary), 가장자리 (edge) 및 주름의 존재는, TMD 결정의 2차원 특성이 이러한 국부적 결함 영역에서 전자, 포논(phonon), 광자 (photon), 엑시톤 (exciton)뿐만 아니라 원자와 격자 사이의 복잡한 상호 작용을 일으킬 수 있기에, 가장 중요한 문제중 하나이다. 특히, 주름은 대부분의 성장 및 전사된 TMD 단일층 (monolayer)에서 불가피한 구조적 변형 (structural deformation)이며, 재료 특성에서 공간적으로 균일하지 못한 문제를 유발시킬 수 있다. 즉, 구조적, 광학적, 화학적, 전자 특성이 2차원 물질

상에서 공간적으로 균일하지 못한 문제 (spatial heterogeneity)로 인하여 소자 상용화가 저해되고 있다.

[0004] 단일층 TMD의 발광/흡수 특성, 밴드갭 및 엑시톤 거동을 제어할 수 있다면 2차원 반도체의 뛰어난 물리적 특성과 결합하여 차세대 초소형/플렉서블 광전자소자로 응용 가능성이 높다. 최근에는 구조, 전기, 광학적 특성을 조절하는 변형제어공학 (strain-engineering)을 통해 대면적 성장 TMD를 상용화하기 위한 시도들이 활발히 진행되고 있지만, 나노 스케일에서의 능동제어 및 실시간 분석은 아직까지 과제로 남아있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명은, 상기 언급한 문제점을 해결하기 위해서, 나노주름의 우월한 광발광 특성을 국소적으로 측정할 수 있는 측정 시스템을 도입하여 나노주름에 압력을 가해 구조적 변형을 유도하고 이러한 변형에 의한 나노주름의 변형률 (strain), 밴드갭, 광발광 에너지 및 세기, 엑시톤 밀도 및 거동 등을 능동적 제어 및 실시간 모니터링 가능한 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법에 관한 것이다.

[0006] 본 발명은, 나노주름의 우월한 광발광 특성을 국소적으로 측정할 수 있는 측정 시스템을 도입하여 나노주름에 압력을 가해 구조적 변형을 유도하고 이러한 변형에 의한 나노주름 영역의 변형률 (strain), 밴드갭, 광발광 에너지 및 세기, 엑시톤 밀도 및 거동 등을 능동적 제어 및 실시간 모니터링 가능한, 나노주름 광원의 제어 및 분석 시스템에 관한 것이다.

[0007] 본 발명은, 본 발명에 의한 나노주름 광원의 제어 및 분석을 통해 2차원 물질 나노주름에 의한 우월한 나노광학 특성을 갖는 나노주름 광원을 제공하는 것이다.

[0008] 본 발명은, 본 발명에 의한 나노광원을 활용하여, 고성능 및 고휘도 나노 광소자를 제공하는 것이다.

[0009] 그러나, 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 이상에서 언급한 것들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 해당 분야 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 일 실시예에 따라, 2차원 반도체 물질층을 준비하는 단계; 상기 2차원 반도체 물질층 방향으로 나노스케일 팁(tip)을 위치시키는 단계; 상기 나노스케일 팁을 이용하여 상기 2차원 반도체 물질층의 나노주름이 형성된 영역을 관찰하는 단계; 및 상기 나노주름이 형성된 영역에 상기 나노스케일 팁으로 압력을 가하여 상기 나노주름을 변형시키는 단계;를 포함하는, 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법에 관한 것이다.

[0011] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 2차원 반도체 물질층은, 2차원 반도체 물질의 단일층인 것일 수 있다.

[0012] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 팁의 반경은, 15 nm 이하이고, 상기 팁은, Au, Ag, Al, Cu, Co, Cr, Pt, Pd, Rh, Ti 및 Ni로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함하는 것일 수 있다.

[0013] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노스케일 팁은, 전단력 (shear-force) AFM에 장착된 플라즈모닉 팁이고, 상기 플라즈모닉 팁은, TEPL (tip-enhanced photoluminescence spectroscopy), TERS (tip-enhanced Raman spectroscopy) 및 TEEL (tip-enhanced electroluminescence) 중 적어도 하나를 측정하는 것일 수 있다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름을 변형시키는 단계 중 실시간으로 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 모니터링하는 것일 수 있다.

[0015] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름 영역의 변형률, 밴드갭, 광발광 에너지 파장, 광발광 에너지 파장 세기, 엑시톤 거동 및 엑시톤 밀도 중 적어도 하나를 제어하는 것일 수 있다.

[0016] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 나노주름 구조의 가역적 변형을 유도하고, 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 능동적으로 제어하는 것일 수 있다.

[0017] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 영구적 변형을 유도하고, 2차원 물질의 결정면(crystal face) 특성으로 유도하는 것일 수 있다.

[0018] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름의 구조적 변형을 통해 상기

나노주름 중 적어도 일부 또는 전부를 제거하는 것일 수 있다.

- [0019] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름의 발광 특성을 상기 나노스케일 팁 높이에 따라 2단계 스위칭, 3단계 변조 또는 이 둘에 의해 조정하는 것일 수 있다.
- [0020] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노스케일 팁은, 시료와 충분히 멀리떨어진 원자현미경(AFM)의 기준 신호의 1 % 내지 100 % 미만에서 거리제어 및 압력을 가하고, 상기 나노스케일 팁은, 10 nm 이하의 단위로 수직 이동하여 상기 나노주름에 압력을 가하는 것일 수 있다.
- [0021] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름의 변형률을 30% 이하 내지 시분해 상으로 1 kHz 이하의 주파수로 국소적, 가역적으로 제어하는 것일 수 있다.
- [0022] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 변형률 변화에 의한 고속 변조되는 상기 나노주름의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성을 실시간으로 증폭하여 초고분해분광을 측정하고 이미징하는 것일 수 있다.
- [0023] 본 발명의 일 실시예에 따라, 2차원 반도체 물질층이 위치하는 기관; 상기 2차원 반도체 물질층을 향해 배치되는 나노스케일 팁; 및 2차원 반도체 물질층의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나의 초고분해분광 측정 및 분석을 위한 장비;를 포함하고, 상기 나노스케일 팁은, 전단력 (shear-force) AFM에 장착된 플라즈모닉 팁이고, 상기 나노스케일 팁은, 상기 2차원 반도체 물질층의 나노주름이 형성된 영역에 압력을 가하여 나노주름을 변형시키고, 실시간으로 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 모니터링하는 것인, 나노주름 광원의 제어 및 분석 시스템에 관한 것이다.
- [0024] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름 광원의 제어 및 분석 시스템은, 상기 나노주름 영역의 TEPL (tip-enhanced photoluminescence spectroscopy), TERS (tip-enhanced Raman spectroscopy) 및 TEEL (tip-enhanced electroluminescence) 중 적어도 하나를 측정하는 것일 수 있다.
- [0025] 본 발명의 일 실시예에 따라, 나노주름 영역을 갖는 2차원 반도체 물질층을 포함하고, 상기 나노주름의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성이 초고분해분광에서 15 nm 이하의 분해능을 갖는 것인, 나노주름 광원에 관한 것이다.
- [0026] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름 광원은, 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성을 능동적 제어가 가능하거나 또는 2차원 물질의 결정면 (crystal face) 특성을 갖는 것일 수 있다.
- [0027] 본 발명의 일 실시예에 따라, 나노주름 영역을 갖는 2차원 반도체 물질층을 포함하는 나노주름 광원;을 포함하고, 상기 나노주름 광원은, 상기 나노주름의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성이 초고분해분광에서 15 nm 이하의 분해능을 갖는 것인, 나노 광소자에 관한 것이다.

발명의 효과

- [0028] 본 발명은, 2차원 반도체 물질의 합성, 전사 공정 중에 자연스럽게 생성된 나노주름에 국소 압력을 가하여 스트레인을 풀어주는 원리를 통해 나노주름의 광학적 및/또는 전기적 특성을 역동적 및/또는 영구적으로 제어할 뿐만 아니라 초고분해능 분광법 및 이미징으로 실시간 모니터링할 수 있는 나노주름의 제어 및 분석 방법 및 시스템을 제공할 수 있다. 또한, 이를 이용하여 나노주름을 고휘도 나노광원으로 제조하고 활용할 수 있는 제조방법을 제공할 수 있다.
- [0029] 본 발명은, 발광특성이 우수한 나노주름을 활용하여, 광 집적 회로 (optical integrated circuits)를 위한 나노-광 스위치/멀티플렉서, 엑시톤 응축 소자 (exciton condensate devices), 광-발광 다이오드를 위한 밝은 나노광원 (bright nano-optical sources), 양자-나노 광자 소자 등의 나노 광소자를 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0030] 도 1은, 본 발명의 일 실시예에 따라, 초고분해능 TEPL 및 탐침-유도 제어 관련 실험 결과이며, (a) 632.8 nm He/Ne 레이저로 바닥 조명 광학을 사용하여 전단력 AFM을 기반으로 한 TEPL 스펙트로스코피 구성의 개략도이고, 삽입도 (왼쪽 상단): 나노 스케일에서 샘플의 다양한 공간 스펙트럼 정보를 제공하는 초고분해능 TEPL 이미징을 나타낸 것이다. (b) 평평한 파면을 사용하는 기존 TEPL에 비해 추가적인 신호 향상을 제공하는 TEPL의 파면 형성 효과에 대한 설명을 나타낸 것이다. (c) 강력한 TEPL 반응을 일으키는 Au 팁의 정점에서 주름진 WSe₂ 단일층의 플라즈몬-엑시톤 커플링을 예시적으로 나타낸 것이다. (d) 나노스케일에서 스트레인, 밴드갭 및 엑시톤 역학

을 제어하기 위한 나노주름의 팁 유도 나노 엔지니어링 공정을 예시적으로 나타낸 것이다. (e-f) 자연적으로 형성된 나노 스케일 주름을 나타내는 SiO₂ 기판에 전사된 단일층 MoS₂ 플레이크 및 WS₂ 필름의 AFM 지형 이미지이다(약어: BS (beam splitter), SLM (spatial light modulator), OL (objective lens), TF (tuning fork) 및 EF (edge filter)).

도 2는, 본 발명의 일 실시예에 따라, 팁과 샘플 사이의 거리 d가 20nm (far-field PL)에서 3nm (TEPL)까지 감소시켜 결정면 (a, crystal face) 및 주름 (b)에서 WSe₂ 단일층의 Evolving PL 스펙트럼을 나타낸 것으로, 3nm 갭에서 측정된 TEPL 스펙트럼은 파면 형성 효과 (wavefront shaping effect)를 나타낸다. (c) 주름에서 자연적으로 유도된 인장 변형률 (tensile strain)로 인한 밴드 갭 감소 및 상응하는 PL 적색 이동을 설명하는 주름진 WSe₂의 에너지 밴드 다이어그램에 대한 개략도이고, (d) 파면 형성 (wavefront) 동안 WSe₂ 결정의 TEPL 강도 evolving의 측정 결과이다.

도 3은, 본 발명의 일 실시예에 따라, (a) 전단력 AFM으로 측정된 WSe₂ 결정의 주름의 지형 및 (b) 서브 파장 스케일에서 PL 특성을 리졸빙 (resolving)하고, (a)에 표시된 주름의 지면 (G), 기울기 (S) 및 정점 (A)에서 측정된 TEPL 스펙트럼이다. (c) 초고분해능 TEPL 이미지 및 해당 주름의 AFM 지형 이미지이고, 피크 위치 (E), FWHM (선폭 Γ) 및 스펙트럼 통합 강도 ($\Delta I = 1.62 - 1.68$ eV displaying PL redshifted region 및 $\Delta I = 1.70 - 1.74$ eV displaying uninfluenced spectral region of PL redshift) 맵은 주름에서 뚜렷한 변화를 나타낸다. 측정 영역은 500 nm x 10 nm이며 5 nm 단위로 이동한다. (d) 나노 스케일에서 주름의 엑시톤 특성을 나타내는 구조 및 스펙트럼 정보의 선 추적이다. (e) 제한된 공간 해상도로 인해 주름의 광학적 특성을 리졸빙할 수 없는 동일한 주름에 대한 초고분해능 공초점 (hyperspectral confocal) PL 이미지이다. (f) 경사 영역에서 주름의 정점으로 엑시톤 깔때기 현상 (exciton funneling phenomenon)을 예시적으로 나타낸 것이며, 예상되는 인장 변형률 (tensile strain) 및 엑시톤 밀도 맵은, 초고분해능 TEPL 이미지의 상관 분석을 기반으로 주름 근처에 있다.

도 4는, 본 발명의 일 실시예에 따라, WSe₂ 단일층의 주름 구조에 대한 지형 이미지 (a) 및 라인 프로파일 (b)을 나타내고, 선 프로파일은, (a)에 표시된 점선에서 파생되고, 파란색 원은 팁으로 누르는 지점을 나타낸다. (c) AFM 팁-포스 엔지니어링 (AFM tip-force engineering)을 통한 주름의 나노광 기계적 제어 공정을 예시적으로 나타낸 것이다. Au 팁으로 주름을 눌렀다 놓으면 나노스케일에서 인장 변형률 (tensile strain), 밴드갭 및 PL 에너지를 가역적으로 제어할 수 있다. (d) 팁을 점진적으로 눌렀다 해제하는 동안 측정된 주름의 TEPL 스펙트럼이며, 이는 나노 스케일 변형률 제어 (nanoscale strain control)에 의해 가역적 PL 에너지 이동을 나타낸다. 약 10 nm의 깊이를 갖는 주름을 압착 및 해제하는 동안 측정된 TEPL 스펙트럼에 대한 (e) 피크 에너지 이동 및 (f) 피크 강도 변화를 나타낸 것이다. 압착 및 해제 과정에서 팁의 깊이는 초기 값의 90 % 내지 50 % 범위의 전단력 AFM(shear-force AFM)에서 설정값 제어에 의해 조절된다.

도 5는, 본 발명의 일 실시예에 따라, (a) 주름 정점에서 팁으로 인한 국소 압력을 시뮬레이션하기 위한 Au 팁 및 WSe₂ 주름의 모델이고, 다양한 가압 높이 (d_p (pressing depth)= 2, 4, 6 및 10 nm)에서 Au 팁이 눌렀다가 풀어줄 때, 주름 정점에 가해지는 계산된 국부적 압력 (b) 및 힘 (c)을 나타낸 것이다. (d-e) 팁 상호 작용 제어에 의한 나노 스케일 변형 엔지니어링 (nanoscale strain engineering)으로 주름의 시계열 TEPL 응답을 나타낸 것이다. d) 팁의 이진 압축 깊이를 사용하여 방출 에너지 및 강도에 대한 스위칭 모드 시연 (밝고 낮은 에너지 방출의 경우 $d_p = 0$ nm, 어둡고 높은 에너지 방출의 경우 $d_p = 10$ nm)을 나타낸 것이고, e) 3 개의 이산 레벨 ($d_p = 0, 5$ nm 및 10 nm)을 갖는 변조 모드의 시연을 나타낸 것이다 (검은 점선은 주름 방출의 전환 및 변조 동안 TEPL 응답의 피크 에너지를 나타낸다.). (d) 및 (e)의 TEPL 스펙트럼에서 파생된 피크 에너지 이동 (f, g) 및 TEPL 강도 (I_{PL}) 변화 (h, i)에 관련 시계열을 나타낸 것이다.

도 6은, 본 발명의 일 실시예에 따라, (a) 3.282 ° A (0 %), 3.285 ° A (0.1 %) 및 3.288 ° A (0.2 %)의 격자 상수에서 단일층 WSe₂의 HSE06 밴드 구조, (b) K-포인트에서 3 개의 슬래브 구조의 직접적인 최소 에너지 갭, (c) 모델 BSE 방법으로 계산된 유전 함수 E의 가상 부분, (d) HSE06 밴드 갭 및 (e) 1차 엑시톤 피크 에너지 대 변형률 (strain)을 나타낸 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

이하 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들을 상세히 설명한다. 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지

기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략할 것이다. 또한, 본 명세서에서 사용되는 용어들은 본 발명의 바람직한 실시예를 적절히 표현하기 위해 사용된 용어들이므로, 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 본 발명이 속하는 분야의 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 본 용어들에 대한 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

- [0032] 명세서 전체에서, 어떤 부재가 다른 부재 "상에" 위치하고 있다고 할 때, 이는 어떤 부재가 다른 부재에 접해 있는 경우뿐 아니라 두 부재 사이에 또 다른 부재가 존재하는 경우도 포함한다.
- [0033] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성 요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.
- [0034] 이하, 본 발명의 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법, 나노주름 광원의 제어 및 분석을 위한 시스템 및 나노주름 광원 및 그 활용에 대하여 실시예 및 도면을 참조하여 구체적으로 설명하도록 한다. 그러나, 본 발명이 이러한 실시예 및 도면에 제한되는 것은 아니다.
- [0035] 본 발명은, 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법에 관한 것으로, 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 방법은, 대면적 2차원 반도체 물질에서 불가피하게 발생하여 결함으로만 여겨지던 나노주름에 나노스케일의 국소 압력을 가해 스트레인을 풀어주는 원리를 통해 나노주름을 고휘도 나노광원으로 구현하고, 실시간 및 공간 특성화를 통해 나노스케일에서 동적 제어 및/또는 영구적 제어가 가능한 나노주름의 제어 및 분석 방법을 제공하는 것이다.
- [0036] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법은, 2차원 반도체 물질층을 준비하는 단계; 2차원 반도체 물질층 방향으로 나노스케일 팁을 위치시키는 단계; 나노스케일 팁을 이용하여 상기 2차원 반도체 물질층의 나노주름이 형성된 영역을 관찰하는 단계; 및 나노주름이 형성된 영역에 상기 나노스케일 팁으로 압력을 가하여 상기 나노주름을 변형시키는 단계;를 포함할 수 있다.
- [0037] 본 발명의 일 실시예에 따라, 2차원 반도체 물질층을 준비하는 단계는, 성장된 또는 전사된 2차원 반도체 물질의 단일층 필름을 준비하고, 상기 2차원 반도체 물질은, 저차원 양자물질을 포함하고, 전이금속 디칼코게나이드(TMD), 2차원 그래핀(환원 그래핀, 산화 그래핀, 질소, 황 등의 헤테로 원소 치환된 그래핀 등) 등일 수 있으나, 이에 제한되지 않는다.
- [0038] 본 발명의 일 예로, 상기 2차원 반도체 물질층은, 직경 수nm를 갖는 면적에서 1인치, 또는 2인치 이상의 대면적일 수 있다. 상기 2차원 반도체 물질층은, 적어도 일부분 또는 전체에 걸쳐 규칙적, 불규칙적 또는 국소적으로 나노주름이 분포할 수 있다.
- [0039] 본 발명의 일 실시예에 따라, 2차원 반도체 물질층 방향으로 나노스케일 팁을 위치시키는 단계는, 상기 2차원 반도체 물질층에 수직 및/또는 수평 방향으로 나노스케일 팁을 위치시키는 것으로, 상기 나노스케일 팁은, 나노주름에 나노스케일의 국소 압력을 가하여 나노주름의 스트레인을 풀어주는 원리를 통해 구조적, 광학적, 화학적 및/또는 전자 특성을 제어하고, 실시간으로 초고분해 나노분광법 및 이미징할 수 있다. 상기 나노스케일 팁은, 플라스모닉 팁이고, 상기 플라스모닉 팁은, 초고분해 나노분광법 및 이미징이 가능하고, 나노주름의 우월한 광발광 특성을 국소적으로 측정할 수 있는 장치에 장착될 수 있다. 예를 들어, 전단력(shear-force) AFM일 수 있다.
- [0040] 본 발명의 일 예로, 상기 팁은, 15 nm 이하; 12 nm 이하; 또는 10 nm 이하의 반경을 갖고, 상기 팁은, Au, Ag, Al, Cu, Co, Cr, Pt, Pd, Rh, Ti 및 Ni로 이루어진 군에서 선택된 1종 이상을 포함할 수 있다.
- [0041] 본 발명의 일 실시예에 따라, 나노스케일 팁을 이용하여 상기 2차원 반도체 물질층의 나노주름이 형성된 영역을 관찰하는 단계는, 나노주름의 위치, 나노주름의 높이, 분포 정도 등을 관찰하여 다음 단계를 위한 나노스케일 팁에 의한 나노주름의 변형 공정을 준비할 수 있다.
- [0042] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름이 형성된 영역에 상기 나노스케일 팁으로 압력을 가하여 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성을 제어하고, 실시간 모니터링하여 고성능 및 고휘도의 나노광원을 유도하고, 나노광원의 물리적 특성 변화를 정밀하게 제어할 수 있다.
- [0043] 본 발명의 일 예로, 상기 나노주름을 변형시키는 단계 중 실시간으로 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및/또는 광학적 특성을 모니터링할 수 있다. 상기 나노주름의 가역적 구조적 변형을 유도하여 나노주름 영역의 밴드갭, 광발광 에너지 파장, 광발광 에너지 파장 세기, 엑시톤 거동 및 엑시톤 밀도 등을 능동적으로 제어하며 실시간으로 모니터링할 수 있다. 예를 들어, 상기 나노주름 영역의 변형을 변화에 의한 고속 변조되는 상기 나노주름

의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성을 실시간으로 증폭하여 초고분해분광 측정 및 이미징하여 실시간으로 분석 및 모니터링할 수 있다. 예를 들어, 상기 초고분해분광 및 이미징은, 플라즈모닉 팁이 장착된 전단력 (shear-force) AFM은, TEPL (tip-enhanced photoluminescence spectroscopy), TERS (tip-enhanced Raman spectroscopy) 및 TEEL (tip-enhanced electroluminescence) 중 적어도 하나에 의한 초고분해 나노분광법 및 이미징을 측정할 수 있다. 즉, 초고분해 TEPL 나노 분광법 및 이미징을 사용하여 WSe_2 단층에서 자연적으로 형성된 나노 스케일 주름의 상관된 구조적 및 광학적 특성을 실시간으로 확인하고, 나노주름의 정점에서 유도된 단축 인장 변형에 관련하여, 주름의 변형된 전자 특성 및 엑시톤 거동을 실시간으로 확인할 수 있다.

[0044] 본 발명의 일 예로, 상기 나노주름을 변형시키는 단계에서 상기 팁의 높이는, 최초 높이에서 0 nm 이하; 10 nm 이하; 8 nm 이하; 또는 5 nm 이하의 단위(초(s) 또는 분(m))로 점진적으로 상기 나노주름에 접근하여 압력을 가하거나 멀어져서 나노스케일 방식으로 엔지니어링할 수 있다. 이는 정밀한 팁 제어를 통해 나노 국부영역에서 2차원 반도체 물질의 정밀하게 엔지니어링하고, 고성능 나노광원의 구현이 도움을 줄 수 있다. 예를 들어, 상기 나노스케일 팁은, 최초 높이 원자현미경 기준 신호의 1 % 내지 100 % 미만; 10 % 내지 95 %; 또는 20 % 내지 90 %에서 압력을 가하고, 상기 나노스케일 팁은, 10 nm 이하의 단위로 수직 이동하여 상기 나노주름에 압력을 가하거나 압력의 일부분 또는 전체를 해제할 수 있다. 예를 들어, 상기 나노스케일 팁의 최초 높이는 팁과 나노주름 간의 거리가 20 nm 이하 및 5 nm 이상이다.

[0045] 본 발명의 일 예로, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름의 변형률을 30% 이하 및/또는 시분해 상으로 1 kHz 이하의 주파수로 반복적, 체계적, 국소적, 가역적 및/또는 영구적으로 제어할 수 있다.

[0046] 본 발명의 일 예로, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 나노주름의 구조적, 전기적 및/또는 광학적 특성을 상기 팁의 높이에 따라 1단계 이상 스위칭 및/또는 1단계 이상 변조할 수 있다. 예를 들어, 나노주름 광원의 발광 파장과 강도를 상기 팁의 높이의 10 nm 이하에서 2단계로 스위칭 및/또는 3단계로 변조하여 원하는 또는 고휘도의 나노광원을 구현하여 나노광소자의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 시간과 공간에서 프로그래밍 가능한 스위칭 및 변조 모드를 시연하여 나노주름의 동적 나노 방출 제어를 보다 체계적으로 설정할 수 있다.

[0047] 본 발명의 일 예로, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나의 가역적 변형을 유도하고, 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나의 능동적 제어가 가능한 나노주름 광원을 구현할 수 있다.

[0048] 본 발명의 일 예로, 상기 나노주름을 변형시키는 단계는, 상기 나노주름의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나를 영구적 변형을 유도할 수 있다. 예를 들어, 팁으로 국소 압력을 가해 변형률, 구조적, 광학적, 화학적 및/또는 전자 특성을 영구적으로 변화시킬 수 있고, 상기 나노주름의 구조적 변형을 통해 상기 나노주름 중 적어도 일부 또는 전부를 제거할 수 있고, 이는 나노주름에 팁으로 압력을 가하여 주름을 평평하게 펼쳐서 제거할 수 있다. 또한, 2차원 물질의 나노주름을 영구적 제거를 통해 2차원 물질의 결정면(crystal face) 특성을 갖는 나노광원을 형성할 수 있다. 이러한 영구적 변형에 의해서 2차원 물질의 균일하지 못한 문제 (spatial heterogeneity)를 감소 또는 없애 주는 효과를 획득하는데 유리하고, 고성능 2차원 물질 기반의 나노광원 및 나노 광소자를 구현할 수 있다.

[0049] 본 발명은, 나노주름 광원의 제어 및 분석시스템에 관한 것으로, 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 시스템은, 2차원 반도체 물질층이 위치하는 기관; 2차원 반도체 물질층의 구조적, 전기적 및 광학적 특성 중 적어도 하나의 초고분해분광 측정 및 분석을 위한 장비; 를 포함할 수 있다. 즉, 상기 시스템은, 본 발명에 의한 나노주름 광원의 제어 및 분석 방법을 적용하고, 팁이 가하는 압력에 의해 나노주름 광원의 다양한 특성들, 예를 들어 변형률 (strain), 밴드갭, 엑시톤 거동 등을 제어하고 그에 따른 구조, 전기, 광학적 특성을 실시간으로 초고분해 측정 및 분석하여 모니터링하고, 고휘도의 나노광원을 구현할 수 있다. 예를 들어, 플라즈모닉 팁으로 단일층 반도체의 나노주름에 압력을 가해 변형률 (strain), 밴드갭, 엑시톤 거동 등을 능동적으로 제어 및 실시간 관찰하는 시스템을 제공하고, 정밀한 원자힘 팁 제어를 통해 나노 국부영역에서 TMD 단층의 여기 특성을 완전히 가역적인 방식으로 엔지니어링할 뿐만 아니라 시간과 공간에서 프로그래밍 가능한 스위칭 및 변조 모드를 시연하여 주름의 동적 나노 방출 제어를 위한 보다 체계적인 플랫폼을 제시할 수 있다. 나노주름의 구조적, 광학적 및/또는 전기적 특성을 제어 및 분석할 수 있는 나노 현미경뿐만 아니라 약 15 nm 이하의 분해능을 갖는 고휘도 나노주름 광원을 구현할 수 있는 제조 장치로 활용할 수 있다.

[0050] 본 발명의 일 예로, 상기 나노스케일 팁은, 전단력 (shear-force) AFM에 장착된 플라즈모닉 팁이고, 상기 나노스케일 팁은, 상기 2차원 반도체 물질층의 나노주름이 형성된 영역에 압력을 가하여 나노주름을 변형시키고, 실

시간으로 상기 나노주름의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성을 모니터링할 수 있다.

- [0051] 본 발명의 일 예로, 상기 나노주름 광원의 제어 및 분석 시스템은, 상기 나노주름 영역의 TEPL (tip-enhanced photoluminescence spectroscopy), TERS (tip-enhanced Raman spectroscopy) 및 TEEL (tip-enhanced electroluminescence) 중 적어도 하나를 측정하고, 이미징할 수 있다.
- [0052] 본 발명은, 나노주름 광원에 관한 것으로, 본 발명의 일 실시예에 따라, 2차원 반도체 물질의 합성, 전자 (transfer) 등의 과정에서 자연적으로 또는 불가피하게 발생하는 나노주름을 고휘도 나노 광원으로 활용할 수 있다.
- [0053] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노광원은, 나노주름 영역을 갖는 2차원 반도체 물질층을 포함하고, 상기 나노광원은, 본 발명에 의한 방법 및 시스템을 이용하여, 2차원 반도체 물질의 나노주름에 나노스케일의 국소 압력을 가해 스트레인을 풀어주는 원리를 통해 엑시톤 및/또는 발광특성 등과 같이 구조적, 광학적, 화학적, 전자 특성이 제어된 나노광원일 수 있다. 즉, 상기 나노광원은, 나노스케일의 국소 압력을 가해 스트레인을 풀어주는 원리를 통해 엑시톤 및 발광 특성 제어가 가능할 수 있다.
- [0054] 본 발명의 일 예로, 상기 나노광원은, 나노주름의 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성이 초고분해능광에서 약 15 nm 이하; 12 nm 이하; 10 nm 이하; 또는 8 nm 이하의 분해능으로 제어된 것일 수 있다.
- [0055] 본 발명의 일 예로, 상기 나노주름은, 전기적, 광학적 또는 이 둘의 특성을 능동적 제어가 가능하거나 및/또는 영구적으로 제어된 것으로, 예를 들어, 2차원 물질의 나노주름 중 적어도 일부 또는 전체가 퍼진 2차원 물질의 결정면 (crystal face) 특성을 포함할 수 있다.
- [0056] 본 발명은, 본 발명에 의한 나노주름 광원을 포함하는 나노 광소자에 관한 것으로, 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노주름 광원은, 본 발명에 의한 방법 및/또는 시스템에 의해 유도되거나 제어된 나노주름 영역을 갖는 2차원 반도체 물질층을 포함할 수 있다. 예를 들어, 상기 나노주름 광원은, 전이금속 디칼코게나이드 (TMD) 단일층의 밴드 갭, 흡수 및 방출 에너지, 광 발광 (PL) 양자 수율, 엑시톤 수송 및 에너지 전달이 조정되거나 조정 가능성이 있는 초박형 광소자 또는 광소자 장치에 활용될 수 있다.
- [0057] 본 발명의 일 실시예에 따라, 상기 나노 광소자는, 나노주름 광원을 적용할 수 있는 광소자라면 제한 없이 적용될 수 있으며, 예를 들어, 광 집적 회로 (optical integrated circuits)를 위한 나노-광 스위치/멀티플렉서, 엑시톤 응축 소자 (exciton condensate devices) 및 광-발광 다이오드를 위한 밝은 나노 광원 (bright nano-optical sources), 양자-나노 광자 소자 등의 나노 광소자일 수 있다.
- [0058] 이하, 실시예를 통하여 본 발명을 더욱 상세하게 설명하고자 하나, 하기의 실시예는 단지 설명의 목적을 위한 것이며, 본 발명의 범위를 한정하고자 하는 것은 아니다.
- [0059] 실시예
- [0060] 도 1에 나타난 바와 같이, 플라즈모닉 Au-팁 (Au tip (apex radius: 약 15 nm))이 장착된 전단력 AFM (shear-force AFM) 기반으로 하여 TEPL 스펙트로스코피를 이용하여 단일층 WSe₂ 플레이트의 나노주름에 나노스케일의 팁으로 국소 압력을 가해 스트레인을 풀어주는 원리를 통해 광학적 및 전기적, 예를 들어, 엑시톤 및 발광 특성의 제어 및 실시간 분석을 실시하였다. 그 결과는 도 1 내지 도 6에 나타내었다.
- [0061] **초고분해능 TEPL 및 탐침-유도 제어**
- [0062] 도 1은, 본 발명의 일 실시예에 따라, 초고분해능 TEPL 및 탐침-유도 제어 관련 실험 결과이며, (a) 632.8 nm He/Ne 레이저로 바닥 조명 광학을 사용하여 전단력 AFM을 기반으로 한 TEPL 스펙트로스코피 구성의 개략도이고, 삽입도 (왼쪽 상단): 나노 스케일에서 샘플의 다양한 공간 스펙트럼 정보를 제공하는 초고분해능 TEPL 이미징을 나타낸 것이다.
- [0063] (b) 평평한 표면을 사용하는 기존 TEPL에 비해 추가적인 신호 향상을 제공하는 표면 형성 효과에 대한 설명을 나타낸 것이다.
- [0064] (c) 강력한 TEPL 반응을 일으키는 Au 팁의 정점에서 주름진 WSe₂ 단일층의 플라즈몬-엑시톤 커플링을 예시적으로 나타낸 것이다.
- [0065] (d) 나노스케일에서 스트레인, 밴드갭 및 엑시톤 역학을 제어하기 위한 나노주름의 팁 유도 나노 엔지니어링 공정을 예시적으로 나타낸 것이다.

- [0066] (e-f) 자연적으로 형성된 나노 스케일 주름을 나타내는 SiO₂ 기판에 전사된 단일층 MoS₂ 플레이크 및 WS₂ 필름의 AFM 지형 이미지이다(약어: BS (beam splitter), SLM (spatial light modulator), OL (objective lens), TF (tuning fork) 및 EF (edge filter)).
- [0067] **나노스케일 주름의 엑시톤 특성의 분광학적 분석**
- [0068] 도 2는, 본 발명의 일 실시예에 따라, 팁과 샘플 사이의 거리 d가 20nm (far-field PL)에서 3nm (TEPL)까지 감소시켜 결정면 (a, crystal face) 및 주름 (b)에서 WSe₂ 단층의 Evolving PL 스펙트럼을 나타낸 것으로, 3nm 겹에서 측정된 TEPL 스펙트럼은 파면 형성 효과 (wavefront shaping effect)를 나타낸다.
- [0069] (c) 주름에서 자연적으로 유도된 인장 변형률 (tensile strain)로 인한 밴드 갭 감소 및 상응하는 PL 적색 이동을 설명하는 주름진 WSe₂의 에너지 밴드 다이어그램에 대한 개략도이고, d) 파면 형성 (wavefront) 동안 WSe₂ 결정의 TEPL 강도 evolving의 측정 결과이다.
- [0070] **나노스케일 주름의 엑시톤 특성의 스파티오 분광학적 분석(Spatio-spectroscopic investigations)**
- [0071] 도 3은, 본 발명의 일 실시예에 따라, (a) 전단력 AFM으로 측정된 WSe₂ 결정의 주름의 지형 및 (b) 서브 파장 스케일에서 PL 특성을 리졸빙 (resolving)하고, (a)에 표시된 주름의 지면 (G), 기울기 (S) 및 정점 (A)에서 측정된 TEPL 스펙트럼이다.
- [0072] (c) 초고분해능 TEPL 이미지 및 해당 주름의 AFM 지형 이미지이고, 피크 위치 (E), FWHM (선폭 Γ) 및 스펙트럼 통합 강도 ($\Delta I = 1.62 - 1.68$ eV displaying PL redshifted region 및 $\Delta I = 1.70 - 1.74$ eV displaying uninfluenced spectral region of PL redshift) 맵은 주름에서 뚜렷한 변화를 나타낸다. 측정 영역은 500 nm x 10 nm이며 5 nm 단위로 이동한다.
- [0073] (d) 나노 스케일에서 주름의 엑시톤 특성을 나타내는 구조 및 스펙트럼 정보의 선 추적이다.
- [0074] (e) 제한된 공간 해상도로 인해 주름의 광학적 특성을 리졸빙할 수 없는 동일한 주름에 대한 초고분해능 공초점 (hyperspectral confocal) PL 이미지이다.
- [0075] (f) 경사 영역에서 주름의 정점으로 엑시톤 깔때기 현상 (exciton funneling phenomenon)을 예시적으로 나타낸 것이며, 예상되는 인장 변형률 (tensile strain) 및 엑시톤 밀도 맵은, 초고분해능 TEPL 이미지의 상관 분석을 기반으로 주름 근처에 있다.
- [0076] **나노스케일 주름의 팁-유도 나노 엔지니어링**
- [0077] 도 4는, 본 발명의 일 실시예에 따라, WSe₂ 단일층의 주름 구조에 대한 지형 이미지 (a) 및 라인 프로파일 (b)을 나타내고, 선 프로파일은, (a)에 표시된 점선에서 파생되고, 파란색 원은 팁으로 누르는 지점을 나타낸다.
- [0078] (c) AFM 팁-포스 엔지니어링 (AFM tip-force engineering)을 통한 주름의 나노광 기계적 제어 공정을 예시적으로 나타낸 것이다. Au 팁으로 주름을 눌렀다 놓으면 나노스케일에서 인장 변형률 (tensile strain), 밴드갭 및 PL 에너지를 가역적으로 제어할 수 있다.
- [0079] (d) 팁을 점진적으로 눌렀다 해제하는 동안 측정된 주름의 TEPL 스펙트럼이며, 이는 나노 스케일 변형률 제어 (nanoscale strain control)에 의해 가역적 PL 에너지 이동을 나타낸다. 약 10 nm의 깊이를 갖는 주름을 압착 및 해제하는 동안 측정된 TEPL 스펙트럼에 대한 (e) 피크 에너지 이동 및 (f) 피크 강도 변화를 나타낸 것이다. 압착 및 해제 과정에서 팁의 깊이는 초기 값의 90 % 내지 50 % 범위의 전단력 AFM(shear-force AFM)에서 설정값 제어에 의해 조절된다.
- [0080] 도 5는, 본 발명의 일 실시예에 따라, (a) 주름 정점에서 팁으로 인한 국소 압력을 시뮬레이션하기 위한 Au 팁 및 WSe₂ 주름의 모델이고, 다양한 가압 높이 (d_p (pressing depth)= 2, 4, 6 및 10 nm)에서 Au 팁이 눌렀다가 풀어줄 때, 주름 정점에 가해지는 계산된 국부적 압력 (b) 및 힘 (c)을 나타낸 것이다. d_p 에 따라 약 2 GPa 내지 약 10 GPa 범위의 팁 끝단 영역에서 최대 압력으로 계산되고, 팁-유도된 국부적 힘은 최대 약 0.4 pN으로 계산된다.
- [0081] (d-e) 팁 상호 작용 제어에 의한 나노 스케일 변형 엔지니어링(nanoscale strain engineering)으로 주름의 시계열 TEPL 응답을 나타낸 것이다. d) 팁의 이진 압축 깊이를 사용하여 방출 에너지 및 강도에 대한 스위칭 모드

시연 (밝고 낮은 에너지 방출의 경우 $d_p = 0$ nm, 어둡고 높은 에너지 방출의 경우 $d_p = 10$ nm)을 나타낸 것이고, e) 3 개의 이산 레벨 ($d_p = 0, 5$ nm 및 10 nm)을 갖는 변조 모드의 시연을 나타낸 것이다 (검은 점선은 주름 방출의 전환 및 변조 동안 TEPL 응답의 피크 에너지를 나타낸다.). (d) 및 (e)의 TEPL 스펙트럼에서 파생된 피크 에너지 이동 (f, g) 및 TEPL 강도 (I_{PL}) 변화 (h, i)에 관련 시계열을 나타낸 것이다.

[0082] 나노-광전기 소자 적용 가능성을 확인하기 위해서 주름 발광의 스위칭 및 변조 모드를 나타낸 것으로, 스위칭 모드는, 2 단계 가압 깊이 ($d_p = 0$ nm and 10 nm)를 사용하고, 변조 모드는, 3 단계 이산 레벨 ($d_p = 0, 5$ nm 및 10 nm) 중 하나로 압축 깊이를 변화시켰다. 스위칭과 변조의 주파수는, shear-force feedback에서 quartz tuning fork sensor의 설정 시간에 의해서 결정된 약 1 kHz 만큼 높이 달성될 수 있다.

[0083] **나노 스케일 주름에서 유도된 인장 변형률의 이론적 정량화**

[0084] 도 6은, 본 발명의 일 실시예에 따라, (a) 3.282° A (0%), 3.285° A (0.1%) 및 3.288° A (0.2%)의 격자 상수에서 단일층 WSe_2 의 HSE06 밴드 구조, (b) K-포인트에서 3 개의 슬래브 구조의 직접적인 최소 에너지 갭, (c) 모델 BSE 방법으로 계산된 유전 함수 E 의 가상 부분, (d) HSE06 밴드 갭 및 (e) 1차 엑시톤 피크 에너지 대 변형률 (strain)을 나타낸 것이다.

[0085] 도 1 내지 도 6을 결과에서, 본 발명은, 초고분해 탐침-증강 PL (TEPL, hyperspectral adaptive tip-enhanced PL) 분광법을 사용하여 나노 분광 특성의 실시간 조사와 함께 WSe_2 단층에서 자연적으로 형성된 주름의 동적 나노기계적 변형 엔지니어링을 확인할 수 있다.

[0086] 본 발명은, 주름 정점에서 유도된 인장 변형률에 의한 변조된-나노-엑시톤 특성(예를 들어, 엑시톤 깔대기 현상 (exciton funneling)에 의한 양자 수율의 증가, 약 10 meV까지 PL 에너지의 감소 및 채구성된 전자 밴드대역구조에 의한 TEPL 스펙트럼의 대칭 변화를 나타내는 15 nm 공간 해상도를 갖는, 초고분해 TEPL 나노-이미징 (hyperspectral TEPL nano-imaging)을 통해 나노스케일 주름을 특성화할 수 있다.

[0087] 또한, 본 발명은, 원자힘 팁 제어를 통해 주름 정점에 압력을 가하고 해제하여 국부적 변형을 역동적으로 엔지니어링할 수 있고, 이러한 나노 기계적 변형 공학을 통해 본 발명은, 가역적 방식 (reversible fashion)으로 나노 스케일에서 엑시톤 역학 및 방출 특성을 조정할 수 있습니다.

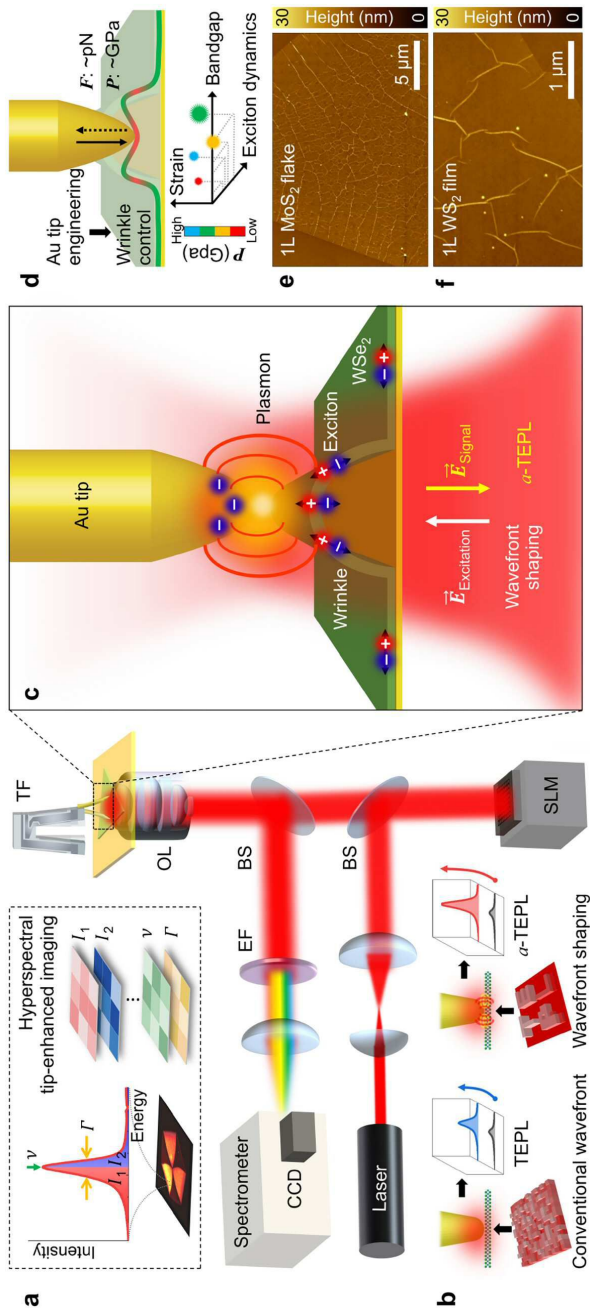
[0088] 더욱이, 본 발명은, 나노주름을 제거하거나 영구적으로 변형시켜 결정면 특성으로 유도하고, 본 발명은, 원자적으로 얇은 반도체에서 견고하고 조정 가능한 초소형 나노 광원에 대한 새로운 전략을 제공하는 주름 발광 (wrinkle emission)의 체계적인 스위칭 및 변조 플랫폼을 제공할 수 있다.

[0089] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다. 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

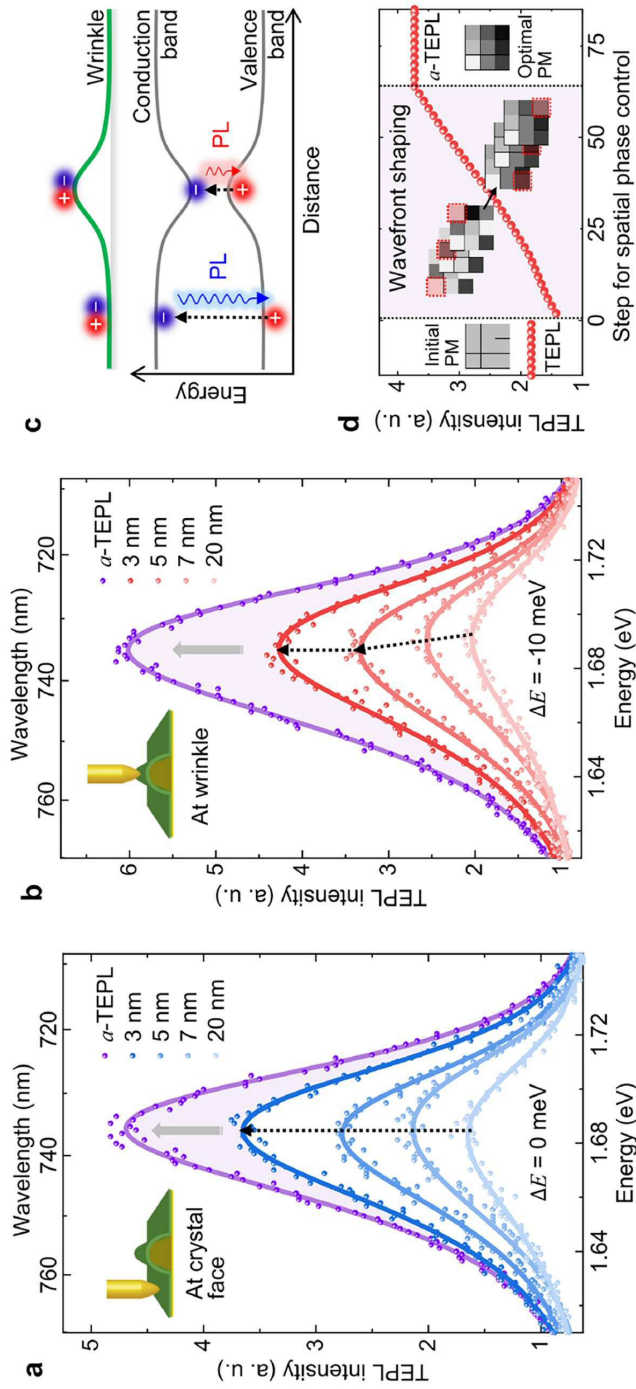
[0090] 본 발명은, 한국연구재단의 지원에 따른 개인기초연구(과기정통부)(R&D)(저차원 반도체 나노분광 특성 제어를 위한 능동형 나노스코피 개발, 1711114959, 2020R1C1C1011301, 2020.03.01 ~ 2021.02.28)에 관련된 것이다. 또한, 본 발명은, 한국연구재단의 지원에 따른 연구교류지원사업(양자)(2차원 반데르발스 이종접합 물질의 밸리트로닉 양자 광원 연구, 2.200103.01, 2020.01.01 ~ 2021.12.31)에 관련된 것이다.

도면

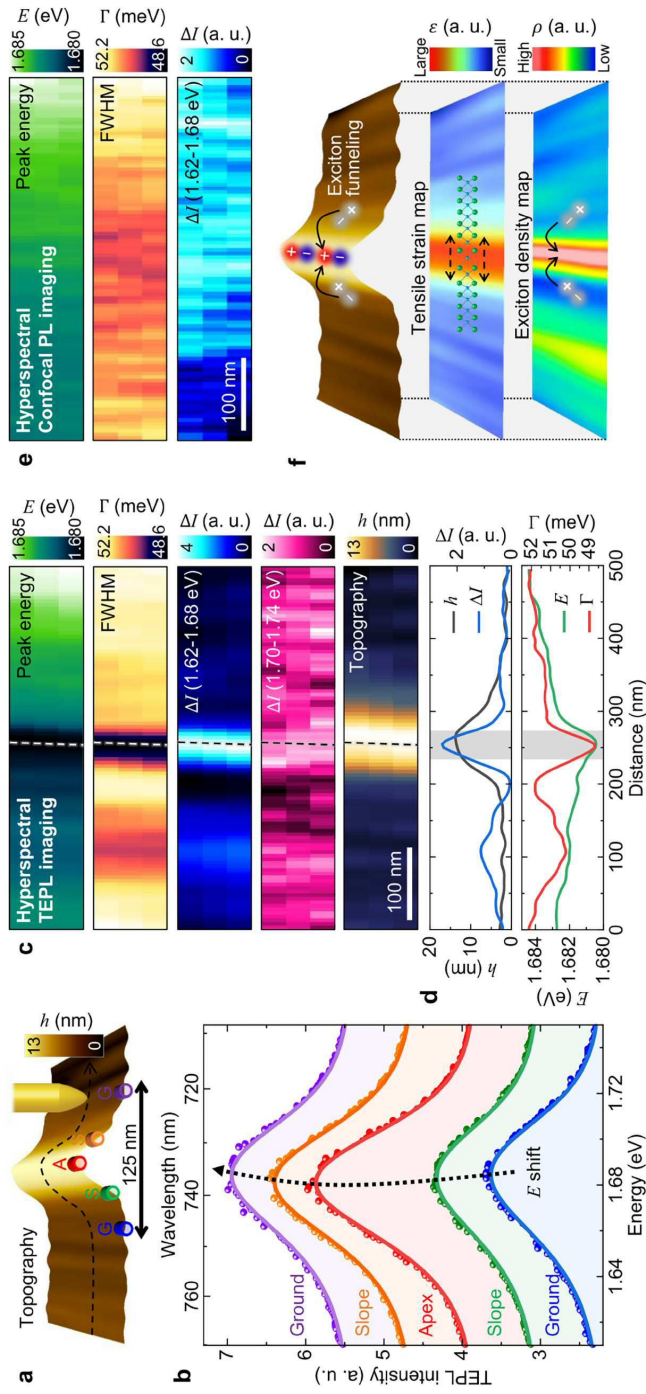
도면1



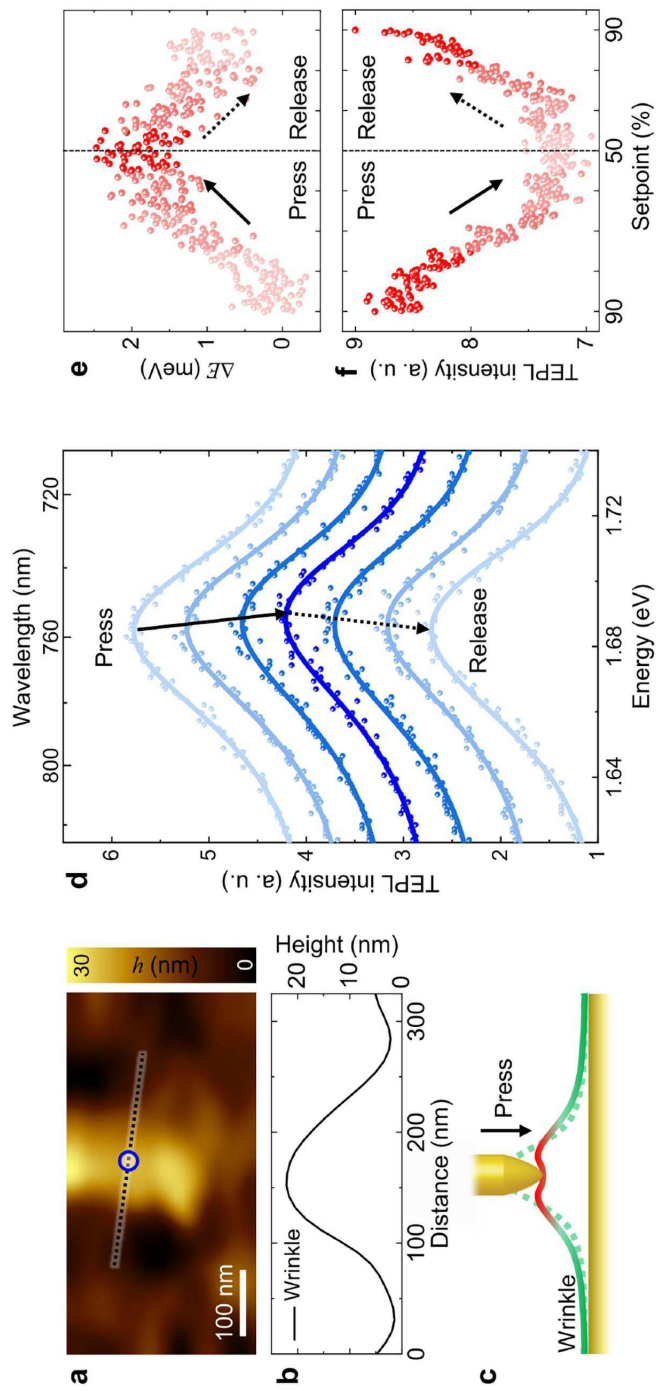
도면2



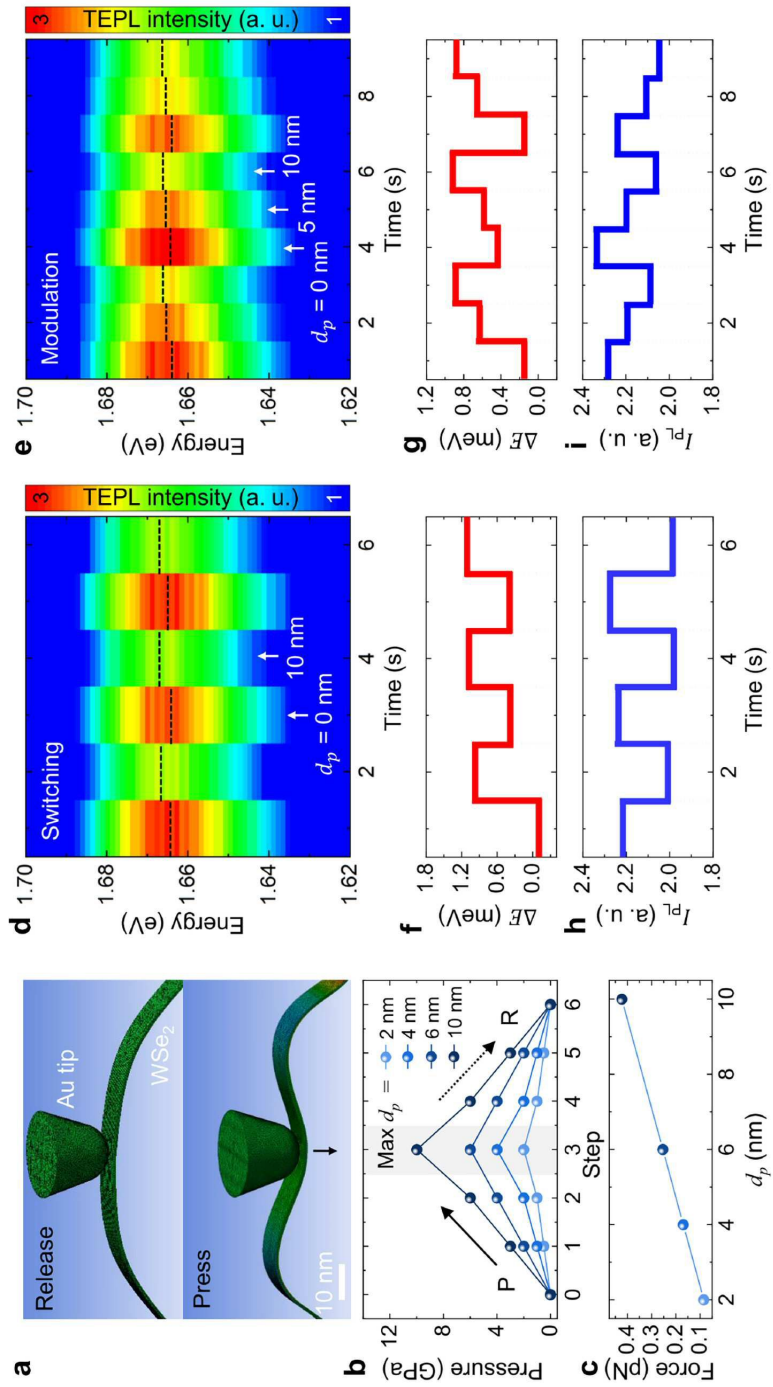
도면3



도면4



도면5



도면6

