



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0106068
(43) 공개일자 2019년09월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C01B 19/00 (2006.01) H01L 21/02 (2006.01)
H01L 21/285 (2006.01)
(52) CPC특허분류
C01B 19/007 (2013.01)
C01B 19/002 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0027002
(22) 출원일자 2018년03월07일
심사청구일자 2018년03월07일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
권순용
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
송승욱
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
전용준

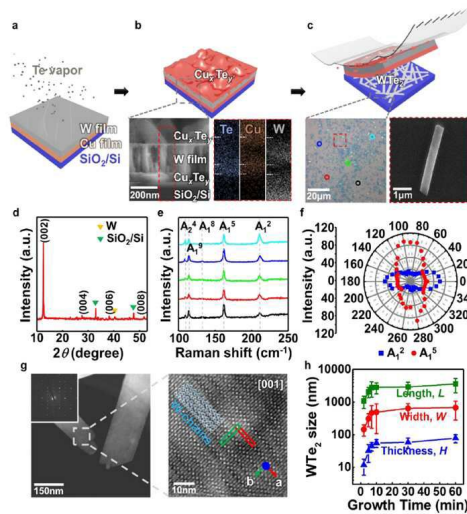
전체 청구항 수 : 총 12 항

(54) 발명의 명칭 일차원 전이금속 칼코젠 화합물 및 일차원 전이금속 칼코젠 화합물 배선, 및 이를 포함하는 전자 장치

(57) 요약

본 발명은, 크기 감소에 따라 저항 증가와 전류 유동 감소의 한계를 극복하는 전자 장치용 배선을 형성할 수 있는 일차원 전이금속 칼코젠 화합물을 제공한다. 본 발명의 일실시예에 따른 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은, 전이 금속과 칼코젠을 포함하고, 일축을 따라 연장된 이방성 일차원 구조를 가진다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

H01L 21/02485 (2013.01)

H01L 21/28568 (2013.01)

(72) 발명자

곽진성

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

김세양

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

조용수

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이중화

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711060680

부처명 과학기술정보통신부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 개인기초연구(미래부)

연구과제명 1D 전이금속 칼코젠 나노구조체/OD 무기물 양자점-2D 그래핀 이중구조 기반 고감도 가시광
선 응답 광·화학적 물분해 촉매 개발

기 여 율 1/2

주관기관 울산과학기술원

연구기간 2017.11.01 ~ 2018.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711060204

부처명 과학기술정보통신부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 나노·소재기술개발

연구과제명 초저전력 유연전자소자용 초미세 인터커넥트를 위한 일차원 전이금속 칼코젠 나노단결정
합성연구

기 여 율 1/2

주관기관 울산과학기술원

연구기간 2017.10.02 ~ 2018.06.30

명세서

청구범위

청구항 1

전이 금속과 칼코젠을 포함하고, 일축을 따라 연장된 이방성 일차원 구조를 가지는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 전이 금속은 장축을 따라서 지그재그 체인을 형성한 원자 배열을 가지고, 이에 따라 1T'-상을 형성하는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

0.1 nm 내지 50 nm 범위의 두께를 가지는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

100 nm 내지 200 nm 범위의 치유 길이를 가지는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

1 MA/cm^2 내지 211 MA/cm^2 범위의 항복전류밀도를 가지는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 6

청구항 1에 있어서,

600°C 내지 1200°C 의 항복 최대 온도를 가지는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 7

청구항 1에 있어서,

10 W/cm 내지 20 W/cm 범위의 채널 길이 당 평균 최대 입력 전력을 가지는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 8

청구항 1에 있어서,

상기 전이금속은 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo), 티타늄(Ti), 바나듐(V), 지르코늄(Zr), 니오븀(Nb), 텔루륨(Te), 하프늄(Hf), 탄탈륨(Ta), 레늄(Re), 코발트(Co), 니켈(Ni), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 이리듐(Ir), 및 백금(Pt) 중 적어도 어느 하나를 포함하는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 9

청구항 1에 있어서,

상기 칼코젠은 황(S), 셀레늄(Se), 및 텔루륨(Te) 중 적어도 어느 하나를 포함하는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 10

청구항 1에 있어서,

상기 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은 WTe_2 , $MoTe_2$, 및 $W_xMo_{1-x}Te_2$ (여기에서, $0 < x < 1$) 중 적어도 어느 하나를 포함하는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물.

청구항 11

청구항 1 내지 청구항 10 중 어느 한 항에 따른 일차원 전이금속 칼코젠 화합물을 포함하는, 일차원 전이금속 칼코젠 화합물 배선.

청구항 12

청구항 1 내지 청구항 10 중 어느 한 항에 따른 일차원 전이금속 칼코젠 화합물을 포함하는, 전자 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명의 기술적 사상은 일차원 전이금속 칼코젠 화합물 및 일차원 전이금속 칼코젠 화합물 배선, 및 이를 포함하는 전자 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 그래핀과 같은 2차원 평면형 물질은 높은 전기 전도성 등 전자 장치로의 적용을 위한 우수한 여러 가지 특성을 가지므로 연구개발이 활발하게 수행되고 있다. 그러나, 그래핀은 높이 방향으로의 전기 전도성이 낮은 한계를 가지므로, 이러한 한계를 극복하기 위한 대안적인 물질의 개발도 진행되고 있다. 상기 대안적인 물질로서 전이금속 칼코젠 화합물이 제시되고 있으나, 칼코젠이 산소에 대한 반응성이 높고, 기화가 쉽게 되어 전자 장치로의 응용이 어려운 한계가 있다.

[0003] 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법으로서, 스카치 테이프를 이용하는 등의 탑-다운(Top-down) 방식은 단결정 형성에 용이하지만, 균일성과 수율이 낮고, 대량 생산이 어렵다. 그러나, 증착 방식을 이용하는 바텀-업(Bottom-up) 방식은 대량 생산이 용이하나 단결정을 형성하기 어렵고, 높은 압력, 높은 온도 및 긴 시간을 요구하는 문제점이 있다. 특히, 텔루륨(Te)을 포함한 전이금속 칼코젠 화합물은 산소에 대한 반응성이 높고, 기화가 쉽게 되어 화학적양론비가 맞는(stoichiometric) 이텔루륨 전이금속 화합물의 바텀-업 합성 결과는 거의 얻어지지 못하고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 미국공개특허 US 2017/0114450 A

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명의 기술적 사상이 이루고자 하는 기술적 과제는 크기 감소에 따라 저항 증가와 전류 유동 감소의 한계를 극복하는 전자 장치용 배선을 형성할 수 있는 일차원 전이금속 칼코젠 화합물을 제공하는 것이다.

[0006] 본 발명의 기술적 사상이 이루고자 하는 기술적 과제는 크기 감소에 따라 저항 증가와 전류 유동 감소의 한계를 극복하는 전자 장치용 배선을 형성할 수 있는 일차원 전이금속 칼코젠 화합물 배선, 및 이를 포함하는 전자 장치를 제공하는 것이다.

[0007] 그러나 이러한 과제는 예시적인 것으로, 본 발명의 기술적 사상은 이에 한정되는 것은 아니다.

과제의 해결 수단

- [0008] 상기 기술적 과제를 달성하기 위한 본 발명의 기술적 사상에 따른 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은, 전이 금속과 칼코젠을 포함하고, 일축을 따라 연장된 이방성 일차원 구조를 가진다.
- [0009] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 전이 금속은 장축을 따라서 지그재그 체인을 형성한 원자 배열을 가지고, 이에 따라 1T'-상을 형성할 수 있다.
- [0010] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 0.1 nm 내지 50 nm 범위의 두께를 가질 수 있다.
- [0011] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 100 nm 내지 200 nm 범위의 치유 길이를 가질 수 있다.
- [0012] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 1 MA/cm^2 내지 211 MA/cm^2 범위의 항복전류밀도를 가질 수 있다.
- [0013] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 600°C 내지 1200°C 의 항복 최대 온도를 가질 수 있다.
- [0014] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 10 W/cm 내지 20 W/cm 범위의 채널 길이 당 평균 최대 입력 전력을 가질 수 있다.
- [0015] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 전이금속은 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo), 티타늄(Ti), 바나듐(V), 지르코늄(Zr), 니오븀(Nb), 텔루륨(Te), 하프늄(Hf), 탄탈륨(Ta), 레늄(Re), 코발트(Co), 니켈(Ni), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 이리듐(Ir), 및 백금(Pt) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0016] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 칼코젠은 황(S), 셀레늄(Se), 및 텔루륨(Te) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0017] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은 WTe_2 , MoTe_2 , 및 $\text{W}_x\text{Mo}_{1-x}\text{Te}_2$ (여기에서, $0 < x < 1$) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.
- [0018] 상기 기술적 과제를 달성하기 위한 본 발명의 기술적 사상에 따른 일차원 전이금속 칼코젠 화합물 배선은, 상술한 일차원 전이금속 칼코젠 화합물을 포함한다.
- [0019] 상기 기술적 과제를 달성하기 위한 본 발명의 기술적 사상에 따른 전자 장치는 상술한 일차원 전이금속 칼코젠 화합물을 포함한다.

발명의 효과

- [0020] 본 발명의 기술적 사상에 따른 전이금속 칼코젠 화합물은 일차원 나노 구조를 가지며, 현재까지 바텀-업 방식의 텔루륨 계열의 일차원 전이금속 칼코젠 화합물의 합성에 관한 보고는 전 세계적으로 전무한 실정이다. 본 발명의 기술적 사상에 전이금속 칼코젠 화합물은 저온에서 단시간에 합성이 가능하며, 불순물이나 결함이 최소화된 조성으로 조절 가능하여 고품위의 금속성 전이금속 칼코젠 화합물을 제공할 수 있다. 본 발명의 기술적 사상에 전이금속 칼코젠 화합물은 일차원 나노구조를 갖는 나노선:막대/나노벨트/나노튜브 등을 형성할 수 있고, 두 개의 공간축에서의 나노 크기의 치수, 높은 비표면적, 양자가둠효과 등으로 인해 기존의 2차원 전이금속 칼코젠 화합물에서는 발견할 수 없는 새로운 물리적 현상의 발견이 기대되어 미래 초저전력 정보소자에의 활용성의 확대가 크게 기대된다. 본 발명의 기술적 사상에 전이금속 칼코젠 화합물은 표시소자, 전자소자, 광전소자, 에너지소자, 태양전지 등과 같은 다양한 전자 장치에서 배선 등에 적용될 수 있고, 더 나아가 양자 상을 이용하는 차세대 전자소자, 스핀트로닉스에 기반한 차세대 자기소자, 고효율 열전 소자 및 상변이 메모리 소자 등의 차세대 초저전력 정보소자에의 높은 응용가능성이 기대된다.
- [0021] 상술한 본 발명의 효과들은 예시적으로 기재되었고, 이러한 효과들에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

도면의 간단한 설명

- [0022] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 방법을 나타낸다.
- 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물 및 그 특성들을 나타낸다.
- 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 대면적 성장에 따른 표면 미세구조를 나타낸다.

도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 표면 및 미세 구조 분석 결과를 나타낸다.

도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 라만 스펙트럼 분석 결과를 나타낸다.

도 6은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 투과전자현미경법을 통한 미세구조의 분석 결과를 나타낸다.

도 7은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 단계에서의 구성원소 분석 결과를 나타낸다.

도 8은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 낮은 전기장에서의 전기적 특성을 나타낸다.

도 9은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서 낮은 전기장에서의 전기적 특성을 나타낸다.

도 10은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서 접촉 저항을 나타낸다.

도 11은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서 높은 전기장에서의 전기적 특성을 나타낸다.

도 12는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 전기적 파괴 직후의 주사전자현미경 사진이다.

도 13은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 온도 의존성 전기적 특성을 나타낸다.

도 14는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서 높은 전기장에서의 전기적 특성 및 모델링을 통한 이론적 계산결과와의 비교결과를 나타낸다.

도 15는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서의 전기적 특성 및 다른 경쟁 물질과 비교한 특성을 나타낸다.

도 16은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 전류 응력 인가에 의한 파괴 시험 결과를 나타낸다.

도 17은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 특성을 다른 경쟁 물질들과 비교한 결과를 나타낸다.

도 18은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 캐리어 거동을 설명하는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 본 발명의 실시예들은 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명의 기술적 사상을 더욱 완전하게 설명하기 위하여 제공되는 것이며, 하기 실시예는 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 기술적 사상의 범위가 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다. 오히려, 이들 실시예는 본 개시를 더욱 충실하고 완전하게 하고, 당업자에게 본 발명의 기술적 사상을 완전하게 전달하기 위하여 제공되는 것이다. 본 명세서에서 동일한 부호는 시종 동일한 요소를 의미한다. 나아가, 도면에서의 다양한 요소와 영역은 개략적으로 그려진 것이다. 따라서, 본 발명의 기술적 사상은 첨부한 도면에 그려진 상대적인 크기나 간격에 의해 제한되지 않는다.

[0024] 본 발명의 기술적 사상에 따른 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은, 전이 금속과 칼코젠을 포함하고, 일축을 따라 연장된 이방성 일차원 구조를 가진다. 상기 전이 금속은 장축을 따라서 지그재그 체인을 형성한 원자 배열을 가지고, 이에 따라 1D-상을 형성할 수 있다. 상기 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은 0.1 nm 내지 50 nm 범위의 두께를 가질 수 있다. 상기 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은 100 nm 내지 200 nm 범위의 치유 길이를 가질 수 있다. 상기 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은 1 MA/cm^2 내지 211 MA/cm^2 범위의 항복전류밀도를 가질 수 있다. 상기 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은 600°C 내지 1200°C 의 항복 최대 온도를 가질 수 있다. 상기 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은 10 W/cm 내지 20 W/cm 범위의 채널 길이 당 평균 최대 입력 전력을 가질 수 있다.

[0025] 상기 전이금속은 텅스텐(W), 몰리브덴(Mo), 티타늄(Ti), 바나듐(V), 지르코늄(Zr), 니오븀(Nb), 텔루륨(Te), 하프늄(Hf), 탄탈륨(Ta), 레늄(Re), 코발트(Co), 니켈(Ni), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 이리듐(Ir), 및 백금(Pt) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다. 상기 칼코젠은 황(S), 셀레늄(Se), 및 텔루륨(Te) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다. 상기 일차원 전이금속 칼코젠 화합물은 WTe_2 , MoTe_2 , 및 $\text{W}_x\text{Mo}_{1-x}\text{Te}_2$ (여기에서, $0 < x < 1$) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

- [0026] 본 발명의 기술적 사상에 따른 일차원 전이금속 칼코젠 화합물 배선은, 상술한 일차원 전이금속 칼코젠 화합물을 포함한다. 본 발명의 기술적 사상에 따른 전자 장치는 상술한 일차원 전이금속 칼코젠 화합물을 포함한다.
- [0028] 2차원 전이금속 칼코지나이드계 소재는 그래핀과 구조적으로 유사하면서도 변조가능한 직접천이형 밴드갭 구조를 가지고 구조적 안정성을 지니면서도 높은 전하이동도와 우수한 광반응성을 갖는 등 초저전력 차세대 정보소자에의 응용에 매우 적합한 최첨단 신소재이다. 특히, Te 계열의 전이금속 칼코지나이드계 소재들의 경우, i) WTe_2 의 경우 60 Teslas, 0.53 K에서 13,000,000 % 수준의 매우 높은 불포화 자기저항(magnetoresistance, MR) 특성을 보유하고, ii) MoTe_2 의 경우 약 $4,000 \text{ cm}^2 \text{Vs}^{-1}$, WTe_2 의 경우 약 $10,000 \text{ cm}^2 \text{Vs}^{-1}$ 의 우수한 전하 이동을 가지며, iii) 고품위 단일층(monolayer) WTe_2 혹은 MoTe_2 박막에서의 2차원 위상절연체(topological insulator) 획득이 예측되며, iv) 조성변조 가능한 고품위 $(\text{W}_x\text{Mo}_{1-x})\text{Te}_2$ ($0 < x < 1$) 화합물 박막을 획득할 경우, 변조가능한 Weyl semimetal의 구현이 가능할 것으로 예측되는 등, 초전도성(superconductivity) 및 양자 스핀 홀 연구(quantum spin Hall effect) 등과 같은 전자기 양자물성 연구에 있어 우수한 플랫폼 소재군이 될 수 있다.
- [0029] 집적회로의 구성요소들이 나노 크기로 감소됨에 따라, 현재 사용되고 있는 구리계 배선들은 크기 감소에 따라 저항이 증가되고, 전류 유동 용량이 감소되는 등의 한계에 직면해 있다. 본 발명에서는, 다양한 주위 조건들에서, 단결정 WTe_2 나노 벨트들을 저온에서 합성하는 것과 나노 크기의 전기적 배선 테스트 구조들에 대한 낮은 전기장에서의 전기적 특성과 높은 전기장에서의 전기적 특성을 검토하였다. 일차원 열전달 모델과 벽법칙을 이용하여, 진공에서의 WTe_2 장치의 항복 또는 AlO_x 캡핑층을 가지는 WTe_2 장치의 항복은 줄 발열(Joule heating)에 대한 이상적인 패턴을 나타내고, WTe_2 나노 벨트들은 탄도 이송 거동을 보여준다. 높은 전기장에서의 전기적 측정들과 자기 발열 모델링을 통하여, WTe_2 나노 벨트들은 약 94 MA/cm^2 의 매우 높은 항복전류밀도를 나타낼 수 있고, 배선에 이용되는 경쟁 물질들 중에서 채널 길이 당 전력을 약 16.4 W/cm 으로 가장 높은 수준으로 지속할 수 있음을 보여준다. 본 발명의 결과로서, WTe_2 의 매우 우수한 전기적 강인성과 국부 배선으로서 미래의 가능한 응용처를 제공할 수 있다.
- [0030] 층 구조를 가지는 VI 족 전이금속 칼코젠 화합물(transition-metal dichalcogenide, TMD)로서, WTe_2 [1-3] 및 MoTe_2 [4,5] 등과 같은 금속 디텔라라이드(ditelluride)에 대한 관심이 증가되고 있고, 반도체 황화물과 셀렌화물(selenide) [6], 즉 $(\text{W}, \text{Mo})(\text{S}, \text{Se})_2$ 에 대하여 많은 연구 결과들이 있다. 금속 디텔라라이드는 2H-반도체 전이금속 칼코젠 화합물과는 다르게 뒤틀어진 1T-구조 (즉, 1T'-상)를 가지며, 구체적으로 원자가 지그재그로 배치된 금속 이량체들에 의한 따른 의사(quasi)-일차원 구조를 가진다. 이러한 금속간 결합들 중에서, 디텔라라이드는 이질적인 전자 밴드 구조를 가지므로 매우 다른 전자기 특성들을 가지게 된다 [1,7]. 이들은 불포화, 매우 크고 양의 자기 저항(MR)을 나타내며 [1,2], 및 위상적으로(topological) 제한된 상태들을 포함하는 유형-II 바일(Weyl) 페르미온들을 포함할 수 있다 [2,8]. 각변형(Out-of-plane) 반데르발스 결합들은 금속 디텔라라이드들을 나노 크기로 미세화시킬 수 있고, 키랄(chiral) 이례적으로 유도된 음의 자기 저항 [2] 및 밴드 갭 개방을 가지는 양자 스핀 홀 효과 [3,4] 등과 같은 새로운 물리적 현상을 발생시킨다. 또한, 금속 디텔라라이드는 고전류-운송 용량 [9] 및 2차원 반도체들에 대한 낮은 쇼트키(Schottky) 장벽 [10]을 가지므로, 낮은 차원의 금속-반도체 이중 구조들 또는 국부 배선을 형성할 수 있고, 미래의 나노 크기의 스핀트로닉스, 전자 장치, 및 광장치 응용들에 적용될 수 있다.
- [0031] 그러나, 대부분의 관찰되는 새로운 물리적 현상들은 기계적으로 박리된 샘플들에서 나타나며 [1,2,3,7,9,10], 이러한 현상들은 불균일하고, 대면적화에 어려움이 크다. 따라서, 실제의 장치의 응용처들에서, 전기적 항복 메커니즘을 이해함으로써 전류-운송 조건들에서 높은 신뢰성을 가지는 단결정 금속 디텔라라이드의 합성을 달성하는 것이 중요하다. 장치의 크기가 감소됨에 따라서, 벌크 장치들을 능가하도록 전류밀도가 증가되어도, 나노 장치들의 미세 구조는 실제의 전류 능력의 수명 범위에서는 더 이상 안정적이지 않는 한계가 있다 [11,12]. 반도체 국제 기술 로드맵 [13] 에 따르면 2028년 까지 대략 10.8 nm^2 의 단면적에서 최대 전류밀도(J_B)가 약 5.35 MA/cm^2 로 증가되도록, 상보적인 금속 산화물 반도체 기술에 예를 들어, 통상적인 배선 금속들이 (예를 들어, Cu, Al) 필요하다. 그러나, 이러한 통상적인 금속들이 최대 전류밀도를 지지하기에는 매우 어려우며, 그 이유는 전기적 능력에 의하여 유도된 줄 발열 및 결합 보완에 기인한 일렉트로마이그레이션이 장치의 성능을 저하시키

기 때문이다 [12,14,15]. 표면 산란과 결정립계 산란에 관계된 크기 효과들은, 저항의 지수함수적 증가에 의하여 나노 물질들 내에 고전류 주입을 방해한다 [12,14]. 따라서, 고전류 작동 동안 나노 크기의 디텔러라이드의 안정성에 대한 연구는 실제적 방식에서 중요할 뿐만 아니라, 종래의 금속들을 대체하는 나노 크기의 전기적 배선으로서 가능성을 가진다.

[0032] 본 발명에서는, 전이금속 칼코젠 화합물로서, WTe_2 단결정들에 대하여, 다양한 환경에서의 전기적 항복 및 전류 운송 능력을 통하여, 낮은 전기장에서의 전기적 특성과 높은 전기장에서의 전기적 특성을 검토한다. 공정 합금의 도움으로 성장된 일차원 WTe_2 나노 벨트들은 단결정을 가지고, 화학양론적이고, 마이크로 크기 수준의 길이를 따라서 균일한 두께들을 가지며, 특히 두드러진 결함들을 가지지 않는다. 성장한 WTe_2 나노 벨트들은 약 94 MA/cm^2 의 항복전류밀도(J_B)를 나타내며, 이는 다른 경쟁 물질들에 비하여 매우 높다. 높은 전기장 하에서의 자기 발열은 일차원 전력 손실 모델을 이용하여 분석하였고, 상기 분석을 통하여, 진공 하에서 AlO_x 로 구성된 공기 차단층을 가지는 결정들은 전기적 항복이 발생하기 전에 WTe_2 의 이론적인 용융점에 도달할 수 있으며, 이는 주로 줄 발열에 의하여 전기적 항복이 발생하는 것으로 분석된다. 맥법칙을 이용한 분석은 결정들의 파괴 메커니즘이 동일함을 보여준다. 또한, 캐리어 산란 메커니즘 연구로부터, 산화효과가 없는 경우, 탄도 이송(ballistic transport)이 WTe_2 의 좁은 채널들 내에서도 지속됨을 알게 되었다. AlO_x 캡핑된 나노 벨트들은 고저항을 가짐에도 불구하고 큰 입력 전력을 견딜 수 있고, 따라서 WTe_2 배선의 더 높은 신뢰성을 구현하기 위하여는 일렉트로마이크레이션 경로를 억제하고 열발산을 증가할 필요가 있다. WTe_2 배선의 준비에 대한 본 발명의 전략이 다른 반데르발스 물질들에 비하여 높은 전기장 스위칭 동안 높은 전기적 강인성에 대하여 국부 배선으로서 물질을 적용할 수 있는 가능성을 보여준다.

[0033] 화학기상증착법(chemical vapor deposition, CVD)은 다양한 기판들 [5,6,16,17] 상에 다층의 전이금속 칼코젠 화합물을 성장시키기 위하여 적용될 수 있다. 그러나, 화학기상증착법을 이용하여 고품질 및 화학양론적인 WTe_2 층들을 형성하는 것은 해결되지 않는 문제점들이 있으며, 이는 성장 도중에 Te의 낮은 안정성, 낮은 활동도, 및 Te 혼합의 곤란성 때문이다 [5,17]. 본질적으로, 형성된 합성 박막들은 다결정일 수 있고, 따라서 결정립계가 박막들의 내재된 특성들을 저하시킬 수 있다 [5,16-18]. 이러한 문제점들은 WTe_2 의 내재된 전기적 특성들 및 캐리어-이송 용량을 저하할 수 있고, 특히 나노 크기의 경우에는 전자 산란 효과 및 무질서 효과들에 의하여 더 두드러질 수 있다 [19,20]. 이러한 문제점들을 극복하기 위하여, Cu_xTe_y 공정 합금을 도입하여, 화학양론적인 WTe_2 단결정들을 형성하도록 적절한 액상형 Te 과잉 주위 조건을 제공한다.

[0034] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 방법을 나타낸다. 도 1에서, (a)는 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 장치를 도시하고, (b)는 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 과정에서의 온도 조건을 도시하고, (c)는 구리와 텔루륨의 이원 상태도이고 [39], (d)는 형성된 전이금속 칼코젠 화합물을 포함하는 구조체에서의 원소 조성 분포를 도시한다.

[0035] 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물 및 그 특성들을 나타낸다. 도 2에서, (a), (b), 및 (c)는 상기 방법에 의한 WTe_2 의 형성과정을 나타내는 모식도이고, (d)는 WTe_2 의 X-선 회절 패턴이고, (e)는 (c)에서 표시된 지점에 대한 WTe_2 의 라만 스펙트럼이고, (f)는 WTe_2 의 A_1^2 및 A_1^5 에 대하여 분극된 라만 피크들의 이방성을 나타내는 그래프이고, (g)는 WTe_2 의 고해상도 투과전자현미경(HR-TEM) 사진들이고, 내부 사진은 상응하는 단결정의 부분영역전자범회절(SAED) 패턴이고, (h)는 성장 시간에 대한 WTe_2 의 크기 변화를 나타내는 그래프이다.

[0036] 도 1 및 도 2를 참조하면, 분말 기화와 유사한 장치를 이용하여 전이금속 칼코젠 화합물의 일례로서 WTe_2 를 성장시킨다. 특히, 본 발명의 기술적 사상은 Cu_xTe_y 공정 합금을 형성한 후 상기 공정 합금에 의하여 WTe_2 나노 벨트들이 성장되는 것에 유의한다.

[0037] 먼저, 도 2(a)에 도시된 바와 같은 W/Cu/SiO₂/Si 구조체를 준비한다. 구체적으로, Si/SiO₂ 상에 초고진공(UHV) 분위기에서 e-빔 증발기를 이용하여 고순도의 고상 구리 원료(99.99% Cu펠렛)로부터 Si/SiO₂ 상에 구리 박막(약 50 nm)을 증착함으로써, Cu/SiO₂/Si 구조체를 형성한다. 이어서, 최적화된 증착 조건들 하에서 직류 마그네트

론 스퍼터링 시스템을 이용하여, 상기 $\text{Cu/SiO}_2/\text{Si}$ 구조체 상에 20 nm 내지 200 nm 범위의 텅스텐(W) 층을 증착함으로써, $\text{W/Cu/SiO}_2/\text{Si}$ 구조체를 형성한다. 상기 $\text{W/Cu/SiO}_2/\text{Si}$ 구조체는 $\pm 5\%$ 미만의 균일성을 가질 수 있다.

[0038] 이어서, 도 1(a)에 도시된 바와 같이, 8 인치 수정관으로 구성된 퍼니스(tube furnace)의 중앙에 0.1 g의 텔루륨(Te) 분말 (Sigma-Aldrich, 99.5%)을 함유한 석영 보트를 장입한다. 상기 텔루륨 분말의 상측에 약 1 cm 상에 상기 $\text{W/Cu/SiO}_2/\text{Si}$ 구조체를 위치시킨다. 이를 바텀-업(bottom-up) 공정으로 지칭할 수 있다. 상기 $\text{W/Cu/SiO}_2/\text{Si}$ 구조체는 텅스텐 층이 텔루륨 분말과 마주보도록 위치시킨다.

[0039] 캐리어 가스로서 아르곤을 500 sccm으로 상기 퍼니스 내에 유입시키며, 도 1(b)와 같이 아르곤 가스는 온도 상승 영역, 온도 유지 영역, 및 온도 하강 영역에 걸쳐서 동일한 유량으로 유입시킨다. 온도를 약 500°C 로 상승시키고, 아르곤 분위기 하의 대기압에서 2분 내지 120분의 범위의 원하는 WTe_2 성장 시간 동안 반응물들을 가열한다. 0분의 반응시간은 상기 퍼니스의 온도가 500°C 에 도달하자마자 열원의 전원을 제거한 상태를 의미한다.

[0040] 도 2(b)에 도시된 바와 같이, 이러한 가열에 의하여, 구리와 텅스텐이 텔루르화된다. 구체적으로, 기상화된 Te가 구리와 반응하여 텅스텐층의 상측 및 하측에 공정계의 Cu_xTe_y 층이 형성되고, 또한, 상기 Cu_xTe_y 내부에 WTe_2 결정들이 형성된 구조체를 형성한다. 즉, 구조체는 $\text{Cu}_x\text{Te}_y/\text{W/Cu}_x\text{Te}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 의 구조를 가지게 된다. 성장을 종료한 후에, 퍼니스 덮개를 개방하여 상기 구조체를 상온으로 냉각한다.

[0041] 이어서, 도 2(c)에 도시된 바와 같이 "테이프-처리"에 의하여 Cu_xTe_y 를 제거한 후에 잔류된 WTe_2 결정들을 분석한다. "테이프처리" 방법을 이용하는 경우에는, 성장 직후의 구조체의 표면에 테이프를 부착하고, 테이프와 구조체 사이에 좋은 접착력을 위하여 수작업으로 압축력을 테이프에 인가할 수 있다. 구조체로부터 테이프를 벗겨내면, Si/SiO_2 기판으로부터 $\text{Cu}_x\text{Te}_y/\text{W/Cu}_x\text{Te}_y$ 구조를 제거할 수 있고, 기타의 반응 부산물을 완벽하게 제거할 수 있다. 이에 따라, WTe_2 는 Si/SiO_2 대상 기판 상에 잔류될 수 있다.

[0042] 대안적으로, Cu_xTe_y 의 제거는 식각에 의하여 수행될 수 있다. Cu_xTe_y 를 포함하는 Cu화합물들의 식각은 0.1 M 과황산암모늄(ammonium persulfate, APS) 용액 내에 합성 직후의 샘플을 약 1시간 정도 침지하여 수행한다. 식각된 샘플은 식각 잔류물을 제거하도록 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol, IPA)을 이용하여 세정하고, 이어서 탈이온수로 세정한다. 즉, WTe_2 이외의 다른 물질들은 Si/SiO_2 기판으로부터 제거될 수 있다.

[0043] 이하에서는 WTe_2 의 형성에 대하여 보다 상세하게 설명하기로 한다. 본 발명의 기술적 사상에 따르면, 공정 합금인 Cu_xTe_y 의 도움에 의하여, WTe_2 나노 벨트들이 SiO_2/Si 기판의 직접적으로 상측에 형성된다. 성장 온도로서 500°C 에서, 미리 형성된 $\text{W/Cu/SiO}_2/\text{Si}$ 는 Te 기체와 반응하고, 특히 구리와 텅스텐이 텔루르화되며, W 층에 인접한 상측과 하측에 액상의 Cu_xTe_y 공정 합금을 형성하게 된다. 도 1(c)에 도시된 바와 같이, 반응 온도 500°C 는 이원계의 공정 온도인 약 340°C 에 비하여 높으므로, Cu_xTe_y 는 액상 매트릭스로서 존재할 수 있다. 이러한 액상 Cu_xTe_y 는 하기와 같은 이유로서 WTe_2 의 빠른 합성을 가능하게 한다.

[0044] 첫번째는, 액상 Cu_xTe_y 로 존재하므로, Te 원자들은 기상보다는 액상으로 존재할 수 있고, 따라서 국부적으로 Te가 결핍되는 것을 방지할 수 있다. 또한, Te는 높은 증기압과 낮은 승화 온도를 가지므로, WTe_2 은 핵생성과 성장이 용이하게 된다. 두번째는, 공정 합금 Cu_xTe_y 이 액상으로 존재하므로, 원자들이 용이하게 이동할 수 있고, 따라서 구성원소들의 원자 확산 및 반응을 빠르게 할 수 있다. 예를 들어, W 원자들 또는 WTe_2 의사(quasi) 핵은 Cu_xTe_y 층과 W 층의 계면으로부터 Cu_xTe_y 매트릭스로 확산되고, 이에 따라 액상 Cu_xTe_y 내에서 WTe_2 나노 벨트들이 빠른 속도로 성장할 수 있다.

[0045] 본 발명에서, 액상형 Cu_xTe_y 가 W 층의 하측에 형성되므로, SiO_2/Si 기판의 직접적으로 상에 형성된다. 또한, 상부에서 주입되는 Te가 다결정 W 층의 결정립계를 통하여 Te의 원자 확산이 가능하게 된다. 도 2(b)의 좌측의 단면 주사전자현미경 사진에서 상측으로부터 하측으로 $\text{Cu}_x\text{Te}_y/\text{W/Cu}_x\text{Te}_y/\text{SiO}_2/\text{Si}$ 기판에 상응하여 구분된 구조가 명확하게 나타나고, 이러한 구조는 도 2(b)의 우측의 단면 EDS 맵에서도 확인되고, 도 1(d)의 원자 조성 분포로서도 확인된다. 이와 같이, WTe_2 의 합성에서의 Cu_xTe_y 의 기능을 고려하면, 공정 합금 저장부의 위치에 의하여 WTe_2 가 합성되는 위치를 결정할 수 있다. 또한, 상술한 테이프 처리에 의하여 Cu_xTe_y 및 부산물이 제거된

후에는, WTe_2 결정들이 SiO_2/Si 기판의 직접적으로 상층에 위치하도록 형성할 수 있다.

[0046] 미세 조직 분석은 하기와 같이 수행되었다. 구조체의 형상은 7 kV의 가속 전압에서 기록된 SEM (Hitachi S-4800) 사진들을 기반으로 분석하였다. EDS에 의한 조성 분석을 위하여, 약 1.7 keV (도 2f)에서의 W M-껍질 및 Si K-껍질 피크들의 중첩을 방지하도록 다른 기판 상에 결정들을 전사하고, 이러한 전사에서, 결정들을 이소프로필 알코올 내에서 초음파를 이용하여 분산시킨 후에, 열판에서 약 90°C 로 가열하여 다른 기판에 피펫을 이용하여 투입하였다. X-선 회절 패턴들은 Cu-K α 소스의 Bruker AXS D8 시스템을 이용하여 측정하였다. 원자힘 현미경 사진들은 탭핑 모드에서 동작하는 Bruker Dimension AFM 장치를 이용하여 기록하였다. 라만 스펙트럼은 주변 대기에서 약 1 μm 의 직경을 가지는 514.5 nm 레이저를 구비한 자체제작 시스템을 이용하여 측정한다. 분극 라만 스펙트럼을 위하여, 632.8 nm의 파장을 가지는 레이저 빔을 샘플에 조사하였다. 투과전자현미경 관찰을 위하여, EDS 분석을 위하여 채용된 방법을 이용하여 투과전자현미경 그리드 상에 WTe_2 를 전사하였다. 200 kV의 가속 전압에서 프로브-수차 보정기를 가지는 JEM-2100F 시스템을 이용하여 나노 벨트들의 여러 지점에서 고해상도 투과전자현미경 사진들 및 SAED 패턴들을 취득하였다. 상응하는 결과들은 각각 일치하였다.

[0047] 전기적 특성 측정은 하기와 같이 수행하였다. 두 개의 프로브 Ti/Au (80/10 nm) 전극들을 e-빔 리소그래피 (NBL-NB3)와 e-빔 증발기 (Temescal FC-2000)를 이용하여 구조체에 접촉시켰다. 장치를 준비하는 동안, 열화를 최소화하기 위하여 샘플이 공기에 노출될 때마다 PMMA 캡핑을 수행하였다. 그러나, 15분 미만의 공기 노출은 피할 수 없는 한계가 있었다. 접촉을 개선하도록 초고진공 분위기에서 300°C로 1 시간 동안 전극들을 열처리하였다. 일부 장치들에 있어서, 채널 산화를 방지하도록 3 nm 두께의 AlO_x 층을 원자층 증착법(ALD)을 이용하여 형성하였다. 구조체의 전기적 특성은 Keithley 4200-SCS 검출기를 가지는 극저온 프로브 스테이션(Lakeshore CRX-4K)을 이용하여 수행하였고, 실험 조건들에 따라 온도는 6.5K 내지 300K, 10^{-6} Torr 정도의 고진공 내지 대기압에서 실험을 수행하였다. 저항 샘플링 모드에서는, 전기적 전류밀도 (통상적으로, J_{ds} 는 약 4 MA/cm²)는 10초 마다 주입되었다. 장치들이 파괴될 때까지의 전기장 스위치에서는, 전압 스위치 속도는 10 mV/s 이었다. 본 발명에서 모든 전기적 측정들은, 무작위한 결정 방위로부터의 결과의 차이를 방지하도록, a-축을 따라서 교환된 금속간 원자를 이용하여 수행되었다.

[0048] 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 대면적 성장에 따른 표면 미세구조를 나타낸다. 도 3에서, (a)는 텔루르화 반응이 수행되기 전에 W/Cu/SiO₂/Si 구조체의 표면 사진이고, (b)는 텔루르화 반응이 수행된 직후의 Cu_xTe_y/W/Cu_xTe_y/SiO₂/Si의 표면 사진이고, (c)는 테이프 처리 후의 테이프에 접촉된 부분의 사진과 기판 상에 잔류된 부분의 표면 사진이고, (d)는 (c)에 원형으로 표시된 위치에 대한 테이프 처리 후의 WTe_2 를 포함하는 전이금속 칼코젠 화합물의 광학 현미경 사진들이다.

[0049] 도 3을 참조하면, 약 500°C에서 0분 내지 120분의 상대적으로 짧은 시간 동안에 W/Cu/SiO₂/Si 구조체의 텔루르화에 의하여 SiO₂/Si 기판의 상층에 고밀도를 가지는 WTe_2 결정들이 성장하였고, 이러한 WTe_2 결정이 균일한 분포를 나타내므로, 높은 공간 균일성을 가짐을 알 수 있다. 도 3(d)에서, WTe_2 나노 벨트들의 색상 차이는 두께 차이에 기인한다. 약 20 nm에 비하여 두꺼운 두께를 가지는 WTe_2 는 밝은 녹색으로 나타낸다.

[0050] 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 표면 및 미세 구조 분석 결과를 나타낸다. 도 4에서, (a)는 2 분 동안 성장한 WTe_2 나노 벨트의 원자힘 현미경 사진이고, (b)는 5 분 동안 성장한 WTe_2 나노 벨트의 원자힘 현미경 사진이고, (c)는 7 분 동안 성장한 WTe_2 나노 벨트의 원자힘 현미경 사진이고, (d)는 원자힘 현미경 사진들로부터 산출된 WTe_2 결정들의 평균 제곱근(R_q) 및 산술 평균 거칠기(R_a)를 나타내는 그래프이다.

[0051] 도 4를 참조하면, WTe_2 결정들은 벨트 형상을 가지는 이방성 일차원 형상을 나타내며, 이는 도 1(c)의 2 분 동안 성장된 WTe_2 결정의 광학 현미경 사진(좌측) 및 주사전자현미경 사진(우측)의 결과와도 일치한다. 또한, WTe_2 결정들은 평균 제곱근(R_q) 및 산술 평균 거칠기(R_a)가 WTe_2 의 내부 층간 거리 이하이므로, 상대적으로 평평한 표면과 균일한 두께를 가짐을 알 수 있다.

[0052] 다시 도 2(d) 및 도 2(e)를 참조하면, WTe_2 나노 벨트들은 X-선 회절 패턴과 라만 스펙트럼에서 예상된 모든 피

크 위치들을 나타낸다 [1,21]. 도 2(d)에서, X-선 회절 패턴은 구리와 관련된 피크를 나타내지 않으며, WTe_2 의 (002) 피크를 강하게 나타낸다. 도 2(e)는 광원으로서 514 nm 레이저를 사용하여 측정한 라만 스펙트럼이며, WTe_2 의 다섯 개의 구분된 진동 모드를 나타내며, 테이프 처리 후의 구조체에서 WTe_2 가 균일하게 분포됨을 알 수 있다.

[0053] 흥미로운 점은, 도 2(f)에 나타난 바와 같이, 산란광의 분극 방향에 평행인 입사각을 분극화하고, 632.8 nm의 여기 파장을 가지는 레이저로 측정하여 얻은 라만 스펙트럼을 분석하면, 분극된 각도들에 대하여 강한 의존성을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 하기의 도 5의 결과와도 일치한다.

[0054] 도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 라만 스펙트럼 분석 결과를 나타낸다. 도 5에서, (a)는 광원으로 632.8 nm 레이저를 이용하여 취득한 테이프 처리된 WTe_2 나노 벨트의 분극된 라만 스펙트럼 그래프이고, (b)는 WTe_2 의 A_1^2 및 A_1^5 에 대하여 분극된 라만 피크들의 이방성을 나타내는 그래프이고, (c)는 WTe_2 의 광학 현미경 사진이다.

[0055] 도 5(b)를 참조하면, 분극 각도들은 수평선을 기준으로 결정된다. 이와 같이, 분극된 각도들에 대하여 강한 의존성을 나타낸다. 또한, 도 5(c)를 참조하면, 분극된 라만 분석으로부터 광학 현미경을 이용하여 나노 벨트들의 가장 긴 방향을 용이하게 관찰할 수 있다. 광학 현미경 사진에서의 WTe_2 나노 벨트의 기울어진 각도에 상응하는 $\sim 23 \pm 90^\circ$ 의 분극된 각도들에 대하여 라만 스펙트럼의 최대 강도가 발생함을 알 수 있다.

[0056] 다시 도 2(g)를 참조하면, 고해상도 투과전자현미경 사진들로부터, WTe_2 나노 벨트들은 a-축을 따라서 연장된 모양을 가지는 1T'-상을 가지는 것으로 분석된다. 여기에서, 밝은 점 칼럼(a-축)은 나노 벨트의 장축 방향을 따라서 지그재그 체인을 형성한 W 원자 배열을 나타낸다.

[0057] 도 6은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 투과전자현미경법을 통한 미세구조의 분석 결과를 나타낸다. 도 6에서, (a)는 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 얻은 이중층 WTe_2 의 원자 구조의 모식도이고, (b)는 도 2(g)의 적색 사각형과 청색 사각형으로 각각 표시된 영역들의 선 강도 프로파일을 나타내는 그래프이고, (c)는 WTe_2 의 결정의 EDS 맵핑이고, (d)는 WTe_2 의 결정의 EDS 스펙트럼을 나타내는 그래프이다.

[0058] 도 6(a)를 참조하면, 황색원은 도 2(g)의 우측 사진의 예상된 밝은 원자 칼럼에 해당된다. 참고로, 도 2(g)의 우측 사진의 콘트라스트는 원자수에 비례하므로(약 $Z^{1.7}$), 무거운 원자 및 텅스텐 체인의 두꺼운 영역은 사진에서 밝게 나타나게 된다. WTe_2 단위 셀은 점선 박스로 표시되어 있다. 표시된 지점들 사이의 계산된 거리는 d_{12} 는 3.50 Å 이고, d_{13} 은 6.28 Å 이다.

[0059] 도 6(b)를 참조하면, 측정된 원자들 사이의 거리는 d_{12} 는 3.56 Å 이고, d_{13} 은 6.26 Å 으로 상기 계산치와 매우 가까운 수치들을 나타내었다. 따라서, 도 6(a)의 시뮬레이션 결과는 도 6(b)의 측정 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

[0060] 도 6(c)를 참조하면, WTe_2 결정은 나노 벨트를 가로질러 Te 원자와 W 원자가 각각 균일하게 분포됨을 알 수 있다. 또한, 두드러진 결합들을 가지지 않는 것이 확인되었고, 고품질의 WTe_2 결정이 형성됨을 알 수 있다.

[0061] 도 6(d)를 참조하면, W는 25.1 원자%(at%)이고 Te는 45.6 원자%로서 WTe_2 결정으로 주로 형성됨이 증명된다. 참고로, 금(Au)는 TEM 그리드로부터 측정된 수치이다.

[0062] 도 7은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 단계에서의 구성원소 분석 결과를 나타낸다. 도 7에서, (a) 및 (b)는 X-선 회절 패턴이고, (c)와 (d)는 EDS 그래프이다.

[0063] 도 7(a)를 참조하면, 60 분 동안 성장한 직후의 구조체에 대한 X-선 회절 패턴이 나타나 있고, WTe_2 결정에 해당하는 피크들과 함께 Te (100) 피크와 CuTe (002) 피크를 나타나 있다.

[0064] 도 7(b)를 참조하면, 흑색 실선으로 표시된 바와 같이, 테이프 처리에 의하여 부산물을 제거한 후에는 구리 또는 구리 합금에 관련된 피크들은 사라짐을 알 수 있다.

[0065] 도 7(c)를 참조하면, 성장 직후에서는 적색 실선으로 표시된 바와 같이 약 0.93 keV 및 약 8.04 keV의 구리 관련 피크들이 나타났으나, 테이프 처리 후에는 청색 실선으로 표시된 바와 같이 상기 구리 관련 피크들이 사라짐

을 알 수 있다. 또한, 3.77 keV에서의 Te 피크들과 8.40 keV에서의 W 피크들이 명확하게 구분되어 나타난다.

[0066] 도 7(d)를 참조하면, 서로 다른 30개의 테이프 처리된 WTe_2 결정들의 EDS 스펙트럼으로서, 상술한 바와 같이 0.93 keV 및 8.04 keV에서의 구리 피크들이 나타나지 않고, 3.77 keV에서의 Te 피크들과 8.40 keV에서의 W 피크들이 명확하게 나타난다.

[0067] 따라서, 도 7의 결과로서 알 수 있는 바와 같이, 테이프 처리를 수행한 후에는, 높은 수준의 화학양론을 가지는 WTe_2 결정이 형성되었음을 알 수 있고, 구리 등을 포함하는 부산물이 거의 완벽하게 제거됨을 알 수 있다.

[0068] 다시 도 2(h)를 참조하면, WTe_2 결정이 결정학적 방향에 따라서 매우 다른 성장 속도를 가짐을 알 수 있다. 2 분 동안 성장한 WTe_2 의 경우에, 평균 길이(L)는 1518 ± 541 nm, 평균 폭(W)은 145 ± 55 nm, 평균 두께(H)는 12.2 ± 6.6 nm 이었다. 성장하는 동안 Cu_xTe_y 액적 내에서 성장 종의 입사 플럭스의 공간 변동성이 거의 일정한 상수로서 가정하면, 다른 결정학적 방향들의 순응(accommodation) 계수들이 서로 다름에 따라 WTe_2 결정이 이방성으로 성장할 수 있고, 2차원 플레이트들을 대신하여 a-축을 따라 성장하는 일차원 나노 벨트들을 형성할 수 있다. 한편, 10 분 초과 시간 동안 성장한 WTe_2 결정들에서는 크기가 거의 변화되지 않았고, 이에 따라 성장한 Cu_xTe_y 매트릭스를 통하여 자기 제한적인 공정임을 의미한다.

[0069] 도 8은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 낮은 전기장에서의 전기적 특성을 나타낸다. 도 8에서, (a)는 전류-전기장 관계를 나타내는 그래프이고, (b)는 두께와 저항의 관계를 나타내는 그래프이고, (c)는 시간에 따른 저항 변화를 나타내는 그래프이다.

[0070] 도 8(a)를 참조하면, 진공 분위기에서 다른 채널 두께들을 가지는 두 개의 프로브 WTe_2 장치들의 전기장(F)에 대한 전류밀도(J) 특성들을 나타낸다. 전기장에 대하여 전류밀도는 선형 거동을 나타내며, 우수한 옴 접촉을 보여준다. 상기 WTe_2 장치들은 4 kV/cm 이하에서 $4.07 \pm 0.84 \text{ MA/cm}^2$ 수준의 높은 전류밀도를 지속하며, 이러한 경향은 박리된 WTe_2 플레이트들에서 얻은 값들에 비견할 만하고 [9], 이는 획득한 WTe_2 나노 벨트들이 고품질임을 나타낸다. 도 2(a)의 내부 사진은 두 개의 터미널 Au/Ti 접촉들을 가지고 a-축을 따라 형성된 WTe_2 채널의 원자힘 현미경 사진으로서, 채널 두께가 약 4.7 nm의 균일한 폭 및 두께를 가짐을 알 수 있다.

[0071] 도 8(b)를 참조하면, 0.3 V의 V_{ds} 에서 WTe_2 장치들의 채널 두께(H)에 따른 저항(ρ) 변화를 나타낸다. 상기 장치들은 진공 분위기, AlO_x 캡핑층, 및 공기 노출 분위기에 대하여 각각 측정되었다. 진공 분위기에서의 WTe_2 장치는 $1.62 \pm 0.85 \text{ m}\Omega \text{ cm}$ 의 낮은 저항을 가지며, 박리된 플레이트들에 비하여 약간 작다 [9,22]. 저항의 온도 의존성 전기적 특성은 결정의 고품질과 내재된 금속 거동을 나타내며, 이는 하기의 도 13을 참조한다. 이와 반대로, 공기 노출 분위기에서의 WTe_2 장치는 $3.09 \pm 1.5 \text{ m}\Omega \text{ cm}$ 의 높은 저항을 나타내었다. 이러한 높은 저항은 채널 열화에 기인할 수 있고, 그 이유는 하기의 도 9(b)에 도시된 바와 같이 공기 및 습기에 의하여 유도된 산화에 WTe_2 채널이 취약하기 때문이다 [19,20]. 또한, 그래프들은 진공 분위기에서 약 $4.2 \mu\Omega \text{ cm/nm}$ 의 양의 기울기를 나타내고, 공기 노출 분위기에서는 약 $21.5 \mu\Omega \text{ cm/nm}$ 의 양의 기울기를 나타내며, 이러한 양의 기울기는 내부 저항(R_{intra})이 존재함을 의미한다. 도 8(b)의 내부 도면은 층의 개수(n)의 함수로서 저항이 증가됨을 설명하는 저항 네트워크 모델을 나타낸다.

[0072] 이러한 공기에 의한 열화를 방지하도록 WTe_2 장치들에 3 nm 두께의 AlO_x 캡핑층을 형성하였다. 그러나, AlO_x -캡핑된 샘플들의 측정된 저항은 $3.54 \pm 2.35 \text{ m}\Omega \text{ cm}$ 으로 나타났다. 원자층증착법(ALD)에 의하여 AlO_x 캡핑층의 형성 공정을 위한 준비에서 피할 수 없는 공기 노출(약 15 분 이내) 또는 높은 접촉 저항(R_c)이 이러한 높은 저항을 발생시키는 것으로 분석되며, 도 9(c) 및 도 10에 나타나 있다. 그럼에도 불구하고, 내재된 전기적 특성들을 지속하기 위하여는 공기 차단층의 형성은 WTe_2 에 필수적이다.

[0073] 도 8(c)를 참조하면, 진공 분위기, AlO_x 캡핑층, 및 공기 노출 분위기에 대한 시간에 따른 실시간 저항변화($\Delta R/R_0$)를 나타낸다. 진공 분위기와 AlO_x 캡핑층을 가지는 경우와 비교하여, 공기 노출 분위기에서는 저항이 시간에 따라 급증함을 알 수 있다. 도 8(c)의 내부 도면은 공기 노출 분위기에서의 WTe_2 장치에서 시간에 따른 전

류(I_{ds})의 변화를 나타내며, 전류는 시간에 따라 감소되며, 상측 도면은 선형적 근사이고, 하측 도면은 지수적 근사를 나타낸다.

[0074] 도 9은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서 낮은 전기장에서의 전기적 특성을 나타낸다. 도 9에서, (a)는 열처리 전과 후의 두께에 대한 저항의 관계를 나타내는 그래프이고, (b)는 공기 노출에 따른 X-선 광전자 분광 스펙트럼의 변화를 나타내는 그래프이고, (c)는 분위기에 따른 두께에 대한 저항의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0075] 도 9(a)를 참조하면, 약 4 kV/cm 수준의 낮은 전기장에서 WTe_2 장치에 두께에 따른 열처리 효과가 나타나 있다. 상기 열처리는 300℃ 에서 1 시간 동안 초고진공 분위기에서 수행하였다. 열처리를 수행한 후에는 저항이 감소되며, 두께가 두꺼울수록 저항의 감소가 더 크게 나타난다. 두께와 저항과의 관계는 열처리 전과 후 모두 선형 거동을 나타내며, 이에 따라 WTe_2 장치가 모든 두께에 대하여 우수한 오믹 접촉을 가짐을 알 수 있다.

[0076] 도 9(b)를 참조하면, 공기 노출 전의 원형 WTe_2 ("pristine"으로 표시됨)과 공기 노출 후의 WTe_2 ("air-exposed"로 표시됨)의 광전자 스펙트럼은 Te의 3d 코어 영역을 나타낸다. 공기 노출 후에는 Te-O 결합에 해당되는 스펙트럼이 나타나므로, 공기 및 습기에 의하여 유도된 산화에 WTe_2 이 취약함을 알 수 있다.

[0077] 도 9(c)를 참조하면, 채널 크기(L/W)에 의존한 두 터미널 사이의 저항으로부터 두께(H)에 대한 정규화된 접촉 저항(R_c)을 나타낸다. 상기 접촉 저항들은 저항 특성이 분위기에 영향을 받을 수 있다. 두 터미널 사이의 접촉 저항들은 하기의 식으로 추출될 수 있다 [40]. 즉, 채널 두께 (H)에 의하여 L/W에 대한 정규화된 저항(R)의 그래프를 이용하여 접촉 저항(R_c)을 하기의 식 1을 이용하여 계산할 수 있다.

[0078] [식 1]

$$R = \rho_{int} \frac{L}{W} + 2R_c$$

[0079]

[0080] 여기에서, ρ_{int} 는 층간 저항, L 은 채널 길이, 및 W 는 채널 폭, R_c 는 접촉 저항이다.

[0081] 도 10은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서 접촉 저항을 나타낸다. 도 10에서, (a)와 (b)는 공기 노출 분위기의 그래프들이고, (c)와 (d)는 AlO_x 캡핑층을 포함하는 경우의 그래프들이고, (e)와 (f)는 진공 분위기의 그래프들이다.

[0082] 도 10에서, 저항이 두께 의존성 거동을 나타내므로, 접촉 저항은 채널 두께 (H)에 의하여 정규화되었다. 각각의 그래프에 접촉 저항 R_c 이 표시되어 있다. 대략적으로, 진공 분위기의 경우는 8 nm 내지 16 nm 범위의 두께를 가지는 경우에 접촉 저항이 약 300 Ω 으로 나타났고, 반면 공기 노출 분위기의 경우는 접촉 저항이 약 1500 Ω 으로 2 배 내지 5 배 높은 접촉 저항을 가지는 것으로 나타났다. 진공 분위기의 경우의 접촉 저항은 단결정이고 박리된 WTe_2 플레이트들의 접촉 저항인 대략 1,000 Ω 내지 2,000 Ω [9] 에 비하여 3 배 내지 6 배 작은 값을 나타낸다. 이러한 결과는 채널과 전극들 사이의 계면에서 반데르발스 간극에 의하여 형성되는 것을 극복하기 위한 캐리어들의 포텐셜 장벽을 가지는 상측 접촉보다는 실험된 나노 벨트들의 일차원 형상을 이용한 모서리 접촉에 기인한다.

[0083] WTe_2 장치들에서의 공기 차단성의 중요성을 $V_{ds} = 0.3$ V에서 시간의 함수로서 저항을 측정하여 검토하였다. 공기 노출 분위기의 WTe_2 장치는 시간에 따라 저항이 급증하였으나, 반면, 진공 분위기의 WTe_2 장치 및 AlO_x 캡핑층을 가지는 WTe_2 장치는 경우는 이와 다르게 저항의 증가가 크지 않았고, 이는 도 8(c)에 도시된 바와 같다. 전류(I_{ds})의 열화 속도는 하기의 식 2로 나타낼 수 있다.

[0084] [식 2]

$$I_{ds}(t) = A - Bt + Cexp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

[0085]

- [0086] 근사된 파라미터들은 $A = 257.9 \mu A$ (약 $3.82 MA/cm^2$), $B = 0.23 nA/sec$ (약 $34 A/cm^2$), $C = 9.51 kA$ (약 $0.14 MA/cm^2$), 및 $\gamma = 1,522$ 초이고, R-제곱은 0.9982 으로 나타났다. 이러한 파라미터들의 선형적 근사 및 지수적 근사가 도 8(c)의 내부 도면으로 나타난다. 준비된 WTe_2 는 하기의 도 18을 참조하여 설명하는 바와 같이 전자를 주 캐리어로 가지므로, 전류의 지수적 감소는 산소와 습기와 같은 분자 흡수에 의하여 순간적이고 가역적인 p-형 도핑에 의한 것으로 분석되며, 이는 다른 반데르발스 물질들에서도 관찰된다 [24,25]. 그러나, 도 9(b)의 X-선 광전자 분광 분석에서 알 수 있는 바와 같이, 공기에 의하여 발생한 산화는 채널의 수축에 의하여 전류의 비가역적이고 선형적인 감소를 야기하며, 이에 따라 전류의 영구적인 열화를 발생시키고, 특히 WTe_2 나노 벨트들에서 매우 빠르다. 상술한 방법에 따라 전기적 데이터를 근사하면, 전류의 영구적인 열화는 본 발명의 기술적 사상에 따른 WTe_2 나노 벨트들의 속도가 약 $34 A/cm^2 \cdot s$ 으로서 매우 빠르게 나타나며, 이러한 속도는 구리의 약 $0.62 nA/cm^2 \cdot s$ [23] 및 포스포린(phosphorene)의 약 $0.55 mA/cm^2 \cdot s$ [24] 에 비하여 높고, 맥신(MXene)의 약 $1.8 kA/cm^2 \cdot s$ [25] 에 비하여 낮다. 따라서, 내재된 전기적 특성들을 지속하기 위하여는 WTe_2 에 공기 차단이 필수적인 것으로 분석된다.
- [0087] 이하에서는, 높은 전기장에서의 WTe_2 장치의 전기적 특성들을 검토하기로 한다. 전기장을 증가시키면서 WTe_2 장치들이 파괴될 때까지 전기장 스위프(sweep)를 수행하여 특성들을 측정하였다.
- [0088] 도 11은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서 높은 전기장에서의 전기적 특성을 나타낸다. 도 11에서, (a)는 전류-전기장 관계를 나타내는 그래프이고, (b)는 파괴 후의 주사전자현미경 사진 및 EDS 그래프이고, (c)는 채널 두께에 따른 항복전류밀도를 나타내는 그래프이고, (d)는 면적에 대한 입력 전력을 나타내는 그래프이고, (e)는 항복 최대 온도를 나타내는 그래프이다.
- [0089] 도 11(a)를 참조하면, WTe_2 배선의 전류밀도(J)에 대한 전기장 (F)을 나타낸다. 전기장이 증가되어 파괴되는 경우에, 전류밀도의 급격한 감소를 나타낸다. WTe_2 장치들의 전류 운송 용량은 전기장이 증가됨에 따라 항복전류밀도(J_B)까지 증가되고, 전기장이 더 증가되면 WTe_2 장치들의 파괴에 의해 급격하게 감소된다. 상기 그래프의 역 기울기(reciprocal slope)로 표시되는 저항(ρ)은 전류가 증가됨에 따라 약간 작아진다. 이러한 경향은 하기의 도 12(a)에 나타난 바와 같이, 온도가 실온까지 증가되면서 저항이 감소되는 경향과 유사하며, 전기적 항복에 도달하기까지 줄 발열이 이루어지는 증거가 된다. 전류가 많이 흐르게 되면, 전기적으로 유도된 줄 발열은 통상적으로 장치들에 응력을 주고, 결과적으로 온도가 증가되고, 원자 변위에 의하여 파괴된다.
- [0090] 도 11(b)를 참조하면, WTe_2 배선에서 적색원 영역과는 달리 청색원 영역에서는 공극이 형성됨을 알 수 있다. 이러한 공극에서는 EDS 스펙트럼에서 Te 결핍이 나타나게 된다. 높은 전기장 영역에서의 스위프 이후의 채널을 따라서 형성되는 나노 크기의 공극들에 의하여, 전기적으로 접촉하는 영역에서가 아니라 WTe_2 나노 벨트들을 따라서 파괴가 발생한다. 도 11(b)의 내부 사진으로 나타나 있는 후방 산란 전자(BSE) 모드 주사전자현미경 사진 [16]과 EDS 스펙트럼으로부터, 채널 영역에서, 공극이 W 원자들을 수용하며 Te은 제거됨을 알 수 있다. Te의 증착이 약 $400^\circ C$ 에서 시작되므로, 상대적으로 용이한 것을 고려하면, 전기적 항복은 Te 원자들의 원자 이동에 의하여 강한 영향을 받는 것으로 분석된다.
- [0091] 도 12는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 전기적 파괴 직후의 주사전자현미경 사진이다. 도 12에서, (a)는 AlO_x 캡핑층을 포함하는 경우이고, (b)는 공기 노출 분위기의 경우이다.
- [0092] 도 12를 참조하면, 파괴 지점(failure point)이 전극이 아닌 채널에서 발생하므로, 전기적 항복이 WTe_2 채널에서 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과는 도 11(b)의 결과와 일치한다.
- [0093] 다시 도 11(c)를 참조하면, 진공 분위기, 공기 노출 분위기, AlO_x 캡핑층을 포함하는 경우에 대하여, 채널 두께(H)에 대한 장치들의 항복전류밀도(J_B)가 나타나 있다. 실선은 일차원 열발산 모델로부터 산출된 이상적인 항복전류밀도를 나타낸다. 계산에 사용한 파라미터들은 W는 $130 nm$, L은 $400 nm$, g는 $2.35 W/mK$, 및 ρ_B 는 $0.8 m\Omega cm$ 이며, 이러한 값들의 두께(H) $10 nm$ 이하의 채널을 갖는 샘플들에서 획득한 평균값이다. 두께가 $10 nm$ 미만의 몇 개의 층으로 구성된 WTe_2 장치들에서 $40 MA/cm^2$ 이상의 높은 항복전류밀도(J_B)가 측정된다. 특히

3.8 nm 두께의 5 층으로 구성된 장치에서 약 94 MA/cm^2 의 높은 항복전류밀도(J_B)가 측정된다. 직경과 관련된 나노 와이어들의 항복전류밀도(J_B)의 연구와 유사하게, 상기 장치들은 두께에 의존하는 전류 운송 능력을 가짐을 알 수 있다 [26,27]. 항복전류밀도(J_B)를 두께(H)의 함수로서 근사하면, 하기의 식 3과 식 4와 같은 일차원 열 발산 모델을 따르게 된다 [9,15,28].

[식 3]

$$P_B = g(T_B - T_0)L$$

[식 4]

$$J_B = \left[\frac{g(T_B - T_0)}{\rho_B H W} \right]^{\frac{1}{2}} \propto H^{-\frac{1}{2}}$$

여기에서, P_B 는 줄 발열에 의한 채널 내로 유동하는 입력 전력, g 는 기판과 전극이 접촉된 단위 길이당 채널의 열전도도이고, T_B 는 항복에서 줄 발열에 의하여 유도된 항복 최대 온도이고, T_0 는 실온(약 300K)이고, ρ_B 과 L 과 직전의 저항이다.

식 3과 식 4는 금속 전극들 내로의 측방향 이송으로부터는 어떠한 기여도 없으며, 이는 장치들이 채널 길이(L)에 비하여 약 110 nm 수준의 매우 짧은 치유 길이(L_H)를 가지며, 이에 따라 열은 기판에 수직하여 주로 이송되기 때문으로 분석된다.

도 11(d)를 참조하면, 진공 분위기, 공기 노출 분위기, AlO_x 캡핑층을 포함하는 경우에 대하여, 전기적 파괴 직전에 WTe_2 채널에 인가된 입력 전력(P_B)을 나타낸다. 이러한 입력 전력은 기판에 대한 채널 접촉 면적($(WL)^{1/2}$)의 함수로 나타낼 수 있다.

도 11(e)를 참조하면, 진공 분위기, 공기 노출 분위기, AlO_x 캡핑층을 포함하는 경우에 대하여, 순수한 줄 발열 메커니즘에 따라 추출된 항복 최대 온도(T_B)를 나타낸다. 진공 분위기 및 AlO_x 캡핑층을 포함하는 경우 WTe_2 채널은 녹는점에 가까운 항복 최대 온도를 가지는 것으로 측정되며, 이는 순수한 줄열 방출에 의한 것임을 알 수 있다.

도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 온도 의존성 전기적 특성을 나타낸다. 도 13에서, (a)는 온도에 대한 저항의 변화를 나타내는 그래프이고, (b)는 온도에 대한 저항의 변화를 나타내는 아레니우스 그래프이고, (c)는 온도에 대한 활성화 에너지를 내는 그래프이다.

도 13(a)를 참조하면, WTe_2 장치들의 온도 의존성 저항(ρ)이 다른 채널 두께를 가지는 경우에 대하여 나타내 있다. 두께(H)가 15 nm 이하의 상대적으로 얇은 WTe_2 경우에는 온도가 감소됨에 따라 저항이 증가된다. 저항 온도 계수(temperature coefficient of resistivity, TCR, $d\rho/dT$)이 양의 값을 가짐을 의미한다 [41]. 이는 통상적인 앤더슨(Anderson) 국부화 효과를 나타낸다 [42].

도 13(b)를 참조하면, 도 13(a)를 이용한 아레니우스 그래프로 변경한 그래프이다. 무질서 포텐셜, 즉 열활성화 에너지(E_a)는 아레니우스 식($R = \exp(E_a/k_B T)$)에 저항값을 투입하여 측정할 수 있다. 여기에서, k_B 는 볼츠만 상수이고, E_a 는 열활성화 에너지이며 국부화된 상태에서의 페르미 수준(E_f)과 이동도 모서리(E_c)사이의 에너지이다 [29,43]. 두께(H)가 15 nm 이하의 상대적으로 얇은 WTe_2 채널에 대한 양의 활성화 에너지는 고온 영역에서 절연 거동을 나타낸다. 온도가 293 K에서 약 25 meV인 열 에너지 $k_B T$ 에 비하여 다 작다. 반면, 음의 활성화 에너지는(E_a)는 저온에서 나타나며, 금속 특성을 표시한다.

도 13(c)를 참조하면, 감소된 활성화 에너지($W = -d(\ln R)/d(\ln T)$)는 온도의 함수로서 모든 온도에 대하여 양

의 기울기를 가지며, 금속 전하(charge) 이송의 신호로서 분석된다 [29,44]. 장치들은 제조 공정에서 공기에 노출될 수 있다고 하여도, 무시할 수 있는 무질서 효과를 가지므로, 4.7 nm 두께의 WTe₂에서는 내재된 금속 특성이 유지될 수 있음을 알 수 있다.

[0106] 이하에서는, 상술한 일차원 열발산 모델을 보다 상세하게 설명하기로 한다.

[0107] 상술한 식 3과 식 4를 다시 참조하면, 열전도도(g)가 높으면, 항복까지의 입력 전력(P_B)이 높아지고 J가 높아지며, 기판에 접촉하는 채널의 접촉 면적(WX L)에 크게 영향을 받는다. 이것은 도 11(e)에서 알 수 있는 바와 같이, 접촉 면적을 통한 SiO₂/Si 기판 내로 빠른 열전달은 채널의 전체적인 열전도도에 기여하기 때문이다. 상세하게는, 열전도도는 산화층 내의 열 저항(R_{ox}), SiO₂에서 Si으로의 열저항(R_{si}), 및 채널과 산화층의 계면에서의 접촉 열저항의 병렬 조합이 되며, 하기의 식 5와 같다. 여기에서, R_{cox}는 WTe₂의 경우에는 약 10⁻⁸ m² KW⁻¹이다 [9].

[0108] [식 5]

$$\frac{1}{g} = \frac{R_{Cox} + R_{ox} + R_{si}}{W} = \frac{R_{Cox}}{W} + \left\{ \frac{\pi k_{ox}}{\ln\left[6\left(\frac{t_{ox}}{W} + 1\right)\right]} + \frac{k_{ox}}{t_{ox}} W \right\}^{-1} + \frac{1}{2k_{si}} \left(\frac{L}{W_{eff}} \right)^2$$

[0109]

[0110] 여기에서, t_{ox}는 SiO₂의 두께, W_{eff}는 대략 W + 2t_{ox}이고, 프린징 효과에 의한 SiO₂/Si 계면에서의 가열 영역의 유효 폭 [28], k_{ox}는 산화층의 열전도도로서 온도(T_{ox})가 약 (T_B + T₀)/2인 경우에 ln(T_{ox}^{0.52})-1.687로 나타내며, k_{si}는 24,000/T₀으로 실리콘의 열전도도이고, 여기에서, T₀는 장치의 실온이다.

[0111] 결론적으로, 열전도도(g)는 장치 채널의 크기 요소에 의존하며, 도 14(c)에 나타난 바와 같이 열전도도는 채널 형상 인수 (W/L)^{1/2}에 비례한다. 열전도도에 대한 계산은 두께(H)를 포함하지 않으며, 이는 나노 두께의 채널이 열 싱크로서의 기판과 잘 접촉하는 한, 수직 방향으로 동일한 온도 분포를 가정하기 때문이다.

[0112] 상술한 일차원 열발산 모델은 채널 및 금속 접촉 사이에 계면에서의 접촉 열 저항(R_T)의 효과를 포함하지 않으며, 이는 채널이 충분히 길어서 대부분의 열을 측방향보다는 수직 방향으로 방사하기 때문이다. 예를 들어, 유한 접촉 열 저항(R_T)을 가지는 열 전도 공식은 하기의 식 6과 같다.

[0113] [식 6]

$$J_B = \left[\frac{g(T_B - T_0)}{\rho_B H W} \times \frac{\cosh\left(\frac{L}{2L_H}\right) + gL_H R_T \sinh\left(\frac{L}{2L_H}\right)}{\cosh\left(\frac{L}{2L_H}\right) + gL_H R_T \sinh\left(\frac{L}{2L_H}\right) - 1} \right]^{1/2}$$

[0114]

[0115] 여기에서, L_H는 채널을 따르는 열 치유 길이로서, (k_{eff}/g)^{1/2}로 표시된다. R_T=[L_{thm}/(k_mt_m(W+2L_{thm}))]으로 표시되고, 여기에서, k_{eff}는 k_{channel}과 k_{cap}(H_{cap}/H)의 합이다. L_{thm}은 금속 접촉들 내로의 열발산의 열 치유 길이로서, (k_mt_{ox}t_m/k_{ox})^{1/2}으로 나타난다. k_m은 금속 접촉의 열전도도이다. t_m은 접촉 두께이다. 채널 길이(L)가 L_H에 비하여 매우 큰 경우에는 상기 식은 하기의 식 7과 같이 된다.

[0116] [식 7]

$$J_B = \left[\frac{g(T_B - T_0)}{\rho_B H W} \right]^m$$

[0117]

[0118] 여기에서, x >> 1인 경우 sinh(x) = cosh(x) = exp(x)/2이 된다. 따라서, 길이가 긴 장치에서는(즉, L >> L_H), 열 전도도의 R_T 효과는 무시할 수 있고, 열은 하층의 SiO₂를 수직으로 통하여 전달된다.

- [0119] 도 14는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서 높은 전기장에서의 전기적 특성 및 모델링을 통한 이론적 계산결과와의 비교결과를 나타낸다. 도 14에서, (a)는 두께에 대한 항복전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이고, (b)는 층 수에 따른 항복전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이고, (c)는 채널 형상 인수 및 주위 분위기에 대한 열전도도를 나타내는 그래프이고, (d)는 채널 형상 인수 및 주위 분위기에 대한 치유 길이를 나타내는 그래프이다.
- [0120] 도 14(a)를 참조하면, 채널 두께(H)의 함수로서의 실험 수치와 계산 수치의 항복전류밀도(J_B)의 비교되어 나타나 있다. 얇은 WTe_2 에 대한 상술한 일차원 열발산 모델 및 평균 파라미터들이 항복전류밀도(J_B)의 측정에 사용되었다. 다결정(poly crystal)의 경우에는 열 전도도를 Wiedemann-Franz 법칙인 $k/\sigma \propto T$ 을 이용하여 전기 전도도(σ)로부터 산출하여 0.8 W/(mK) 로 산출된다 [17, 45].
- [0121] 도 14(b)를 참조하면, 단결정 WTe_2 및 다결정 WTe_2 에 대한 이상적인 항복전류밀도(J_B)는 층 수에 의존됨을 알 수 있다. 몇 개의 층들 내에서 음의 밴드 갭이 지속되는 경우에는 항복전류밀도(J_B)가 211 MA/cm^2 에 도달할 수 있다.
- [0122] 도 14(c)를 참조하면, 채널 형상 인수($(W/L)^{1/2}$)에 대한 열전도도(g)의 관계를 표시한다. 실선으로 표시한 바와 같이, 열전도도와 채널 형상 인수는 선형 관계가 있음을 알 수 있다.
- [0123] 도 14(d)를 참조하면, 본 발명의 기술적 사상에 따른 WTe_2 장치들의 치유 길이(L_H)는 평균적으로 110 nm 으로 나타났다.
- [0124] 본 발명의 WTe_2 장치들에서, 채널을 통하여 측방향 열 유동(k_{channel})은 a-축을 따라서 WTe_2 에서 약 9.03 W/(m K) [48] 이며, 캐핑층을 통한 열 유동(k_{cap})은 AlO_x 에 대하여 약 4 W/(m K) [9], 상기 열 유동들의 병렬적인 기여를 고려하면, 평균 치유 길이(L_H)는 도 14(d)에 나타난 바와 같이 110 nm 로 측정되었다. 계산된 치유 길이(L_H)는 100 nm 내지 200 nm 범위로서, 그래핀과 유사하다 [28]. 본 발명의 장치들의 채널 길이가 치유 길이(L_H)에 비하여 적어도 3 배 정도 크므로, 일차원 열발산 모델의 간략화된 식인 도 7을 사용할 수 있다.
- [0125] 상술한 바와 같이, WTe_2 의 이상적인 항복전류밀도(J_B)가 식 4를 이용하여 계산되고 제시되었다. 본 발명에서 얻은 항복전류밀도(J_B)는 도 11(c) 및 도 14(a)의 계산과 잘 일치한다. 금속 거동이 지속되는 경우에는, 단일 층 WTe_2 의 항복전류밀도(J_B)가 도 14(b)에 나타난 바와 같이, 이론적으로 211 MA/cm^2 에 도달할 수 있다. 그러나, 양자 스핀 홀 효과에 의한 밴드 갭 개방이 3 층 미만의 박막 층에서 발생할 수 있고 [3,4], 따라서, 본 실시예에서 획득한 5 층의 WTe_2 에서 얻은 항복전류밀도(J_B) 값이 실제 실험상으로 구현할 수 있는 최대치일 수 있다. 내재된 금속 거동은 무시할 수 있는 무질서 효과와 함께 4.7 nm 두께의 WTe_2 에서 지속됨에 유의하여야 하며, 이는 도 13(c)의 결과와 같다 [29]. 또한, 열전도도(g)가 증가됨에 따라 입력 전력($P_B = I_B^2(R_B - R_C)$)이 증가되고, 또한 항복까지의 전류밀도(J)가 증가되고, 또한 기판에 접촉한 채널의 접촉 면적(WL)에 크게 영향을 받는다. 도 11(d) 및 도 14(c)로부터 알 수 있는 바와 같이, SiO_2/Si 기판 내로 접촉 영역을 통한 빠른 열전달이 채널의 전체 열전도도에 영향을 주기 때문이다.
- [0126] 장치들의 입력 전력(P_B)은 분위기에 따라 달라질 수 있다. 공기 노출 분위기에서의 WTe_2 장치의 경우에 비하여, 진공 분위기에서의 WTe_2 장치와 AlO_x 캐핑층을 가지는 WTe_2 장치는 더 높은 평균 입력 전력(P_B)을 나타내며, 도 11(d)에 더 높은 기울기로 나타나 있다. 전력 지속 능력이 공기 노출에 의하여 열화될 수 있고, 특히 더 넓은 면적의 채널에서 두드러질 수 있다. 이러한 효과를 분석하기 위하여, 식 4를 이용하여 항복 최대 온도(T_B)를 산출하고, 항복 최대 온도(T_B)의 경향을 입력 전력(P_B)을 변화시켜 분석하여 도 11(e)에 나타내었다. 항복 최대 온도(T_B)는, 공기 노출 분위기의 경우에는 $664 \pm 71^\circ\text{C}$, AlO_x 캐핑층을 포함한 경우에는 $1155 \pm 118^\circ\text{C}$, 진공 분위기의 경우에는 $1,001 \pm 49^\circ\text{C}$ 이었다. 진공 분위기와 캐핑층을 가지는 장치의 항복 최대 온도(T_B)는 WTe_2 의 용융점인 약 1020°C 에 근접할 수 있다 [30]. AlO_x 캐핑층을 가지는 WTe_2 장치가 용융점에 비하여 더 높은 항복 최대 온도(T_B)를 가지는 것은 더 높은 접촉 저항에 의하여 영향받는 것으로 분석되며, 도 10(c)를 참조한다.

따라서, 진공 분위기의 경우와 AlO_x 캡핑층을 가지는 경우의 WTe_2 장치는 거의 줄 발열 메커니즘에 의하여만 파괴될 수 있는 것으로 분석된다. 그러나, 공기 노출 분위기의 WTe_2 장치가 가지는 낮은 항복 최대 온도(T_B)는 자기 발열에 의한 탠덤(tandem)으로 활성화된 다른 파괴 모드를 나타낸다.

[0127] 일차원 열발산 공식과 표면 산란에 대한 퍼크-손드하이머(Fuchs-Sondheimer, F-S) 모델을 이용하여 채널의 단면적(HW)의 함수로서 항복전류밀도(J_B)를 계산하였다. 전자-나노 벨트 산란에 대한 F-S 모델을 이용한 저항 변화는 식 8과 같다.

[0128] [식 8]

$$\rho_{FS} = \rho_0 \left[2Cl_0 (1-p) \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{W} \right) \right]$$

[0129]

[0130] 여기에서, ρ_0 는 벌크 저항, C는 사각형에 대하여 상수로서 약 1.2이고, l_0 는 전자의 벌크 내의 평균 자유 경로, p 는 전자 산란 운동과 관련된 반사(specularity) 파라미터로서, 추가적인 저항 증가가 없는 순수한 산란에서는 $p = 1$ 이고, 확산형 산란에서는 $p = 0$ 이다.

[0131] 두께 의존성 저항 거동을 고려하면, 마티에센(Matthiessen)의 법칙을 이용하여 전체 저항 변화를 식 9 및 식 10과 같이 얻을 수 있다.

[0132] [식 9]

$$\rho = \rho_{FS} + \rho_H$$

[0133]

[0134] [식 10]

$$\rho = \rho_0 \left[2Cl_0 (1-p) \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{W} \right) \right] + \frac{d\rho}{dH} H$$

[0135]

[0136] 여기에서, F-S 모델의 계산에 이용된 파라미터들은 W는 250 nm, L은 500 nm, 및 ρ_0 는 2 mΩ cm 이다. 전자의 평균 자유 경로(l_0)는 W/4로 가정하였다. 종래의 배선 물질로서 구리는 평균 자유 경로(l_0)가 약 40 nm 이다 [14]. 최종적으로, 항복전류밀도(J_B)를 얻기 위하여, 식 10의 ρ 를 식 4에 투입하고 평균 파라미터들을 사용하여 식 11을 얻을 수 있다.

[0137] [식 11]

$$J_B = \left[\frac{g(T_B - T_0)}{\rho_0 \left[2Cl_0 (1-p) \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{W} \right) \right] HW + \frac{d\rho}{dH} H^2 W} \right]^{\frac{1}{2}}$$

[0138]

[0139] 이어서, 전기적 항복 메커니즘을 식 4의 변형된 형태로서 멱법칙(power law)으로 식 12를 이용하여 분석하였다.

[0140] [식 12]

$$J_B \propto \rho_B^{-m}$$

[0141]

[0142] 여기에서, m 은 이상적인 줄 발열의 경우 0.5이고, 결합-유도된 일렉트로마이크레이션의 경우 0.5 이상이며, 자기 가열에 의한 항복 속도를 나타낼 수 있다 [15,31].

[0143] 도 15는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 다양한 분위기에서의 전기적 특성 및 다른 경쟁 물질과 비교한 특성을 나타낸다. 도 15에서, (a)는 저항에 대한 항복전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이고, (b)는 채널 단면적에 대한 항복전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이고, (c)는 다양한 배선 경쟁 물질의 저항에

대한 항복전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이고, (d)는 다양한 배선 경쟁 물질의 입력 전력을 나타내는 그래프이다.

[0144] 도 15(a)를 참조하면, 진공 분위기, AlO_x 캡핑층을 가지는 경우 및 공기 노출 분위기 하에서의 WTe_2 배선의 저항 (ρ_B)에 대한 항복전류밀도(J_B)의 관계를 나타낸다. 각각의 조건에 대하여 식 12의 멍법칙($J_B = k \rho_B^{-m}$)을 이용하여 추출되었고, 파괴까지 줄 발열 속도를 제시하는 유용한 신호이다. AlO_x 캡핑된 경우에는, m 은 0.52 로 가장 낮게 나타났다. 공기 차단에 의한 일렉트로마이그레이션(즉, 표면 확산)이 억제됨에 따라, 높은 바이어스 하에서도 하기의 도 16에서 설명하는 바와 같이, 채널이 높은 강인성을 가짐을 알 수 있다. 공기 노출 분위기의 경우에는, m 값이 0.87 으로 가장 높게 나타났고, 결합-유도된 일렉트로마이그레이션은 내재된 내구성에 비하여 더 빠른 파괴를 야기함을 알 수 있다.

[0145] 도 15(b)를 참조하면, 채널의 단면적(WH)에 대한 항복전류밀도(J_B)의 관계는 공기 노출 분위기의 WTe_2 에서의 이송 시의 모서리 산란에 의한 크기 효과를 나타낸다. 이상적인 일차원 열발산 모델은 회색 실선으로 표시되고, 산란 모델을 이용한 계산은 밝은 청색 실선으로 표시되어 있다. 계산에 사용된 파라미터들은 W 는 200 nm, L 은 500 nm, p 는 0.85, 및 l_0 는 $W/4$ 이다. 전류 운송 용량에 대한 공기 노출의 효과가 채널의 단면적(WH)의 함수로서 표면 산란 모델에 의하여 분석되었다. 두께 의존성 저항 거동을 고려하여, 전자-나노 벨트 모서리 산란에 대한 퍼크-손드하이머(Fuchs-Sondheimer) 모델 [32,33]을 이용하여 일차원 열전달 모델을 상술한 바와 같이 재 계산하였고, 청색 실선으로 도시되어 있다. 여기에서, 일부의 공기 노출된 장치들은 회색 실선으로 표시된 이상적인 일차원 모델로부터 무작위하게 이탈되지만, 청색 실선으로 표시된 모서리 산란에 의하여 크기 효과를 야기한다. 산화는 나노 물질의 모서리로부터 일반적으로 시작되므로, 의사(quasi)-일차원 금속 결합들을 따른 캐리어 이송이 주위 공기 하에서 특히 모서리에서 더 확산될 수 있다. 이에 따라, 좁은 채널들을 따라서 모서리 산란으로부터 저하되지 않고 높은 항복전류밀도(J_B)를 유지하도록 공기를 차단할 필요가 있다. 그러나, 진공 분위기의 장치들의 항복전류밀도(J_B)는 단면적(WH)이 약 250 nm^2 로 감소됨에 따른 심각한 표면 산란을 나타내지 않으며, 회색 실선의 이상적인 일차원 모델을 이용한 계산 결과와 일치한다. 탑-다운 공정들에 의하여 준비된 WTe_2 플레이크들과는 다르게 [9,22,34,35], 본 발명의 WTe_2 나노 벨트들은 포함된 금속 이량체들을 따라서 확산 거동 보다는 탄도 이송을 나타낼 수 있다. 이는 본 발명의 WTe_2 나노 벨트들 내에서 가혹한 식각 [22,34] 및 무작위한 결정 방위 [9,35] 등에 의한 열화된 모서리들이 존재하지 않기 때문이며, 후방 산란에 의한 전류 유동의 저하를 방지한다. 땀글링(dangling) 결합이 없고, 매끄러운 반데르발스 표면은 표면 상의 캐리어들의 탄성 반사(reflection)를 야기한다 [12,14,32]. 또한, WTe_2 의 단결정 특성은 결정립계(GB) 산란을 방지하고, 전도 용량 감소의 중요한 메커니즘이다. 이러한 무시할 수 있는 산란 효과들은 고전류-운송 용량을 허용하면서 저항의 증가를 제어할 수 있음을 의미한다. WTe_2 내의 낮은 노이즈(noisy) 금속 결합들을 따른 캐리어 이송은 전기적 응력에 대하여 높은 내구성을 제공할 수 있다고 분석되고, 의사(quasi)-일차원 반데르발스 물질, $TaSe_3$ 에 대한 최근 연구 결과와 같다 [36].

[0146] 도 15(c)를 참조하면, 저항을 고려한 다양한 경쟁 물질들의 최대 전류밀도(J_B)가 표시되어 있다. 본 발명의 실시예에 따른 WTe_2 는 상대적으로 고저항에서도 약 94 MA/cm^2 의 높은 전류밀도(J_B)를 나타낸다. 다른 경쟁 물질들과 비교하면, 본 발명의 WTe_2 는 항복전류밀도(J_B)에 대하여 국부 배선으로서 많은 장점이 있다. 본 발명의 WTe_2 의 항복전류밀도(J_B)는 약 94 MA/cm^2 이므로, 수 MA/cm^2 의 구리에 비하여 높고 [23], 약 37 MA/cm^2 의 $TaSe_2$ [37], 약 32 MA/cm^2 의 $TaSe_3$ [14], 약 1.7 MA/cm^2 의 TiS_3 [38] 과 같은 다른 반데르발스 나노 물질들에 비하여도 더 높다. 본 발명의 WTe_2 의 항복전류밀도 수치는 그래핀과 가깝다. 참고로, 기계적으로-박리된 몇 개의 층을 가지는 그래핀(FL-Gr)은 수백 MA/cm^2 의 항복전류밀도를 가지며 [15], 화학기상증착법으로 성장한 다층층 그래핀(ML-Gr)은 대략 40 MA/cm^2 내외의 항복전류밀도를 가진다[31]. 이들은 다른 반데르발스 물질들에 비하여 더 높은 J_B 를 가지는 알려진 물질이다. WTe_2 결정들 내의 높은 항복전류밀도(J_B)는 다른 반데르발스 물질들과 비교하여 약 $1 \text{ m}\Omega \text{ cm}$ 수준의 높은 저항에도 특유한 특성이고, 전기적 응력에 대한 높은 강성을 나타낸다.

- [0147] 도 15(d)를 참조하면, 공기 중에서 견딜 수 있는 다른 경쟁 채널 물질들에 대한 채널 길이 당 평균 최대 입력 전력(P_B/L)을 나타낸다. 본 발명의 기술적 사상에 따른 WTe_2 장치들은 바이어스 스위프 동안에 파괴에 대한 가장 높은 전기적 강인성을 나타낸다. 고전압 스위프 하에서의 물질들의 신뢰성을 비교하기 위하여, 채널 길이 당 평균 최대 입력 전력($P_B/L = J_B^2 \rho HW$)을 측정하였다. 이는 물질이 항복에 대하여 견딜 수 있는 정도를 나타낸다. 이러한 채널 길이 당 평균 최대 입력 전력은 줄 발열에 대한 강도를 평가할 수 있으며, 그 이유는 식 3과 식 4의 항복 최대 온도(T_B) 및 열전도도(g)의 기여를 포함하기 때문이다. 중요한 점은, WTe_2 나노 벨트들은 16.4 W/cm의 채널 길이 당 평균 최대 입력 전력(P_B/L)을 가지며, 배선 경쟁 물질들 중에서 가장 높게 나타난다. 또한, 약 13.1 W/cm의 기계적으로 박리된 FL-Gr [15]와 약 9.6 W/cm의 CVD-성장한 ML-Gr [31]에 비하여도 더 높다. 이러한 결과는 전기적 항복에 대한 WTe_2 의 우수한 강인성을 나타내며, 특히 하기의 도 17(a)의 산소 과잉 조건하에서 항복 최대 온도(T_B)는 진공 분위기에서는 약 1001°C 이고, 공기 노출 분위기에서는 약 664°C 를 나타내므로, 약 600°C의 그래핀 [31], 약 450°C의 TiS_3 [38]과 비교하여 높은 항복 최대 온도(T_B)를 가진다. 채널의 크기 차이는 효과가 크기 않다고 하여도, 특히 열전도도(g) 값이 각각의 물질의 R_{Cox} 에 의하여 영향을 받는 것을 고려하면, 열전도도(g)는 채널 형상 인수 $(W/L)^{1/2}$ 에 비례하므로, 열 전달에 대한 용량의 변화를 유도할 수 있고, 이는 하기의 도 17(b)의 결과와 같다. 참고로, 다결정 구리는 높은 용융 온도(T_m)에도 불구하고, 낮은 P_B/L 를 가지며, 전기적 파괴가 결정립계(GB) 마이그레이션에 의하여 주로 발생하고 자기 발열에 의하여 발생하는 것은 아니다. 따라서, WTe_2 나노 벨트들의 결정립계가 없는 특성은 전기적 신뢰성 증가에 크게 도움을 주는 것으로 분석된다.
- [0148] 도 16은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 전류 응력 인가에 의한 파괴 시험 결과를 나타낸다. 도 16에서, (a)는 시간에 따른 저항 변화를 나타내는 그래프이고, (b)는 전압에 대한 전류의 변화를 나타내는 그래프이고, (c)와 (d)는 파괴 후의 미세 구조를 나타내는 주사전자현미경 사진들이다.
- [0149] 도 16(a)를 참조하면, 일렉트로마이그레이션을 억제하기 위한 공기 차단 필요성을 검증할 수 있다. 0.3 V의 직류 바이어스에서 측정된 응력 시간의 함수로서 공기 노출 분위기 및 캡핑된 WTe_2 장치들의 저항 변화($(R-R_0)/R_0$)가 나타나 있다. 공기 노출 분위기의 경우에는, 저항의 급격한 증가가 발생하고, 이는 파괴가 발생한 것을 나타낸다.
- [0150] 도 16(b)를 참조하면, 전류 응력을 인가하기 전에 전체적으로 옴릭 거동이 유지됨을 알 수 있다. 또한, 12 시간 동안 전류 응력을 인가한 후에도 전체적으로 옴릭 거동을 나타낸다.
- [0151] 도 16(c)를 참조하면, 공기 노출 분위기의 WTe_2 장치는 채널의 심각한 열화가 발생함을 알 수 있다.
- [0152] 도 16(d)를 참조하면, AlO_x 캡핑된 WTe_2 장치는 12 시간 동안의 높은 바이어스 응력을 인가한 후에도 열화되지 않고, 유지됨을 알 수 있다.
- [0153] 따라서, 높은 저항 특성에도 불구하고 높은 항복 최대 온도(T_B)와 입력 전력(P_B)을 얻기 위하여 AlO_x 캡핑층을 하기와 같은 세가지 이유로서 도입할 필요가 있다. 첫째로, 캡핑층은 AlO_x 이 증착된 후에는 채널의 산화가 진행되는 것을 억제하고, 공기 또는 물 분자의 흡수에 대한 환경적 안정성을 허용한다. 둘째로, 채널의 접촉된 전극 내로의 열전달 속도는 AlO_x 층 때문에 증가되지만, 치유 길이(L_H)에 비하여 긴 채널 길이(L)을 가지는 채널에서는 기판을 수직으로 통하여 열전달이 주로 발생하므로, 영향이 상대적으로 적다. 셋째로, 캡핑층은 표면 확산을 통한 일렉트로마이그레이션을 억제하며, 채널의 용융 온도에 가까워져 파괴되기 까지 순수한 줄 발열을 야기한다. 벌크 내에서의 원자이동이 용이하지 않음을 고려하면, 3 nm 두께의 AlO_x 층은 표면 확산의 차단 중으로서 일렉트로마이그레이션을 효과적으로 방지할 수 있다.
- [0154] 도 17은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 특성을 다른 경쟁 물질들과 비교한 결과를 나타낸다. (a)는 항복 최대 온도(T_B)이고, (b)는 채널 지수이다.
- [0155] 도 17(a)를 참조하면, 본 발명의 기술적 사상에 따른 WTe_2 , 그래핀(Gr) [28], 및 TiS_3 [38]의 항복에서의 항복 최대 온도(T_B)의 비교되어 있다. $TaSe_2$ 및 $TaSe_3$ 과 같은 탄탈륨 셀렌화물(tantalum selenide) [46] 및 구리

(Cu) [47]의 경우에는 전압 스위치에 의한 항복 최대 온도(T_B)의 정보가 없어 용융 온도 (T_{melt}) 가 표시되어 있다. 다른 경쟁 물질들과 비교하면, WTe_2 는 전기적 항복에 대한 높은 내구성을 가짐을 알 수 있다.

[0156] 도 17(b)를 참조하면, 열전도도(g)에 선형적으로 영향을 주는 채널 형상 인수 $(W/L)^{1/2}$ 의 비교하였다. $(W/L)^{1/2}$ 는 몇 개의 층을 가지는 경우에 대한 각각의 참조 문헌을 이용하여 계산되었고, FL-Gr [28], ML- Gr [31], $TaSe_2$ [37], $TaSe_3$ [14], TiS_3 [38] 및 Cu [23] 이다. 본 발명의 기술적 사상에 따른 WTe_2 는 채널 형상 인수의 영향이 가장 크게 나타났다.

[0157] 도 18은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 캐리어 거동을 설명하는 그래프이다.

[0158] 도 18을 참조하면, 본 발명의 기술적 사상에 따른 WTe_2 는 상온에서의 WTe_2 FET의 n-형 거동을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 정전기적 힘이 커짐에 따라 전도도가 증가되므로, 테이프 처리된 WTe_2 나노 벨트들의 주된 캐리어가 전자임을 알 수 있으며, 높게 도핑된 p-Si를 이용하여 후문 전압을 인가하였다. 장치가 전자가 주 캐리어라고 하여도, 게이트 의존성은 매우 작으며 이는 반도체와 비교하여 반금속 WTe_2 는 네거티브 밴드 갭을 가지기 때문이다.

[0159] 정리하면, 다양한 주위 조건들에서 바텀-업(bottom-up) 공정을 통하여 얻은 단결정 WTe_2 나노 벨트들의 낮은 전 기장에서의 전기적 특성과 높은 전기장에서의 전기적 특성을 검토하였다. 일차원 열발산 모델 및 먹법칙을 이용하여, 진공 분위기에서의 WTe_2 장치 및 AlO_x 캡핑층을 가지는 WTe_2 장치의 항복은 줄 발열에 대한 이상적인 거 동을 나타내었고, 모서리 산란은 억제되고, 결합-유도된 일렉트로마이그레이션은 공기 중에서도 억제되었다. WTe_2 플레이크들과는 반대로, 탑-다운 공정에 의하여 준비된 본 발명의 WTe_2 나노 벨트들은 의사(quasi)-일차원 원자 금속간 체인들을 따른 탄도 이송 거동을 나타내었고, 이는 가혹한 식각 및 무작위한 결정 방위에 의한 열 화된 모서리가 존재하지 않고, 탭글링 결합이 없고, 매끈한 반데르발스 표면을 가지는 단결정 특성에 기인한 것 으로 분석된다. 이에 따라, WTe_2 나노 벨트들은, 종래의 배선 금속들 및 다른 전이금속 칼코젠 화합물들과 비 교하여, 약 94 MA/cm^2 의 높은 항복전류밀도(J_B)를 나타내었고, 다른 배선 경쟁 물질들 중에서 16.4 W/cm 의 가 장 높은 채널 길이 당 평균 최대 입력 전력(P_B/L)을 나타내었다. 본 발명의 결과들은 WTe_2 가 나노 크기의 전기 적 배선 분야 뿐만 아니라 신뢰성을 가지는 나노 전자장치를 구동하는 고 전력 분야에 적용될 수 있음을 나타낸 다.

[0160] 본 발명의 기술적 사상에 따른 전이금속 칼코젠 화합물은 일차원 나노 구조를 가지며, 현재까지 바텀-업 방식의 텔루르 계열의 일차원 전이금속 칼코젠 화합물의 합성에 관한 보고는 전 세계적으로 전무한 실정이다. 본 발명 의 기술적 사상에 전이금속 칼코젠 화합물은 저온에서 단시간에 합성이 가능하며, 불순물이나 결합이 최소화된 조성으로 조절 가능하여 고품위의 금속성 전이금속 칼코젠 화합물을 제공할 수 있다. 본 발명의 기술적 사상에 전이금속 칼코젠 화합물은 일차원 나노구조를 갖는 나노선:막대(nanowire:rod)/나노벨트(nanobelt)/나노튜브 (nanotube) 등을 형성할 수 있고, 두 개의 공간축에서의 나노 크기의 치수, 높은 비표면적, 양자가둠효과 (quantum confinement effect) 등으로 인해 기존의 2차원 전이금속 칼코젠 화합물에서는 발견할 수 없는 새로운 물리적 현상의 발견이 기대되어 미래 초저전력 정보소자의 활용성의 확대가 크게 기대된다. 본 발명의 기술 적 사상에 전이금속 칼코젠 화합물은 표시소자, 전자소자, 광전소자, 에너지소자, 태양전지 등과 같은 다양한 전자 장치에서 배선 등에 적용될 수 있고, 더 나아가 양자 상(quantumphase)을 이용하는 차세대 전자소자, 스핀 트로닉스(spintronics)에 기반한 차세대 자기소자, 고효율 열전 소자(thermoelectric devices) 및 상변이 메모 리 소자(phase change memory devices) 등의 차세대 초저전력 정보소자의 높은 응용가능성이 기대된다.

[0161] 이상에서 설명한 본 발명의 기술적 사상이 기술한 실시예 및 첨부된 도면에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 여러 가지 치환, 변형 및 변경이 가능하다는 것은, 본 발명의 기술적 사상이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 있어 명백할 것이다.

[0162] 참조문헌

[0163] 1. Ali, M. N. et al. Large, non-saturating magnetoresistance in WTe_2 . Nature 514, 205- 208, (2014).

[0164] 2. Wang, Y. J. et al. Gate-tunable negative longitudinal magnetoresistance in the predicted type-II

Weyl semimetal WTe_2 . *Nat. Commun.* 7, 13142 (2016).

- [0165] 3. Qian, X. F., Liu, J. W., Fu, L. & Li, J. Quantumspin Hall effect in two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Science* 346, 1344-1347 (2014).
- [0166] 4. Keum, D. H. et al. Bandgap opening in few-layered monoclinic MoTe_2 . *Nat. Phys.* 11, 482-486, (2015).
- [0167] 5. Zhou, J. et al. Large-area and high-quality 2D transition metal telluride. *Adv. Mater.* 29, 1603471 (2017).
- [0168] 6. Manzeli, S., Ovchinnikov, D., Pasquier, D., Yazyev, O. V. & Kis, A. 2D transition metal dichalcogenides. *Nat. Rev. Mater.* 2, 17033 (2017).
- [0169] 7. Das, P. K. et al. Layer-dependent quantumcooperation of electron and hole states in the anomalous semimetal WTe_2 . *Nat. Commun.* 7, 10847 (2016).
- [0170] 8. Soluyanov, A. A. et al. Type-II Weyl semimetals. *Nature* 527, 495-498 (2015).
- [0171] 9. Mleczko, M. J. et al. High currentdensity and low thermal conductivity of atomically thin semimetallic WTe_2 . *ACS Nano* 10, 7507-7514 (2016).
- [0172] 10. Cho, S. et al. Phase patterning for ohmic homojunction contact in MoTe_2 . *Science* 349, 625-628 (2015).
- [0173] 11. Tu, K. N. Reliability challenges in 3D IC packaging technology. *Microelectron. Reliab.* 51, 517-523 (2011).
- [0174] 12. Jiang, J. K. et al. Intercalation doped multilayer-graphene-nanoribbonsfor next- generation interconnects. *Nano. Lett.* 17, 1482-1488 (2017).
- [0175] 13. Wilson, L. International technology roadmap for semiconductors (ITRS). (Semiconductor Industry Association: Washington, DC, 2013).
- [0176] 14. Stolyarov, M. A. et al. Breakdown currentdensity in h-BN-capped quasi-1D TaSe_3 metallic nanowires: prospects of interconnect applications. *Nanoscale* 8, 15774-15782 (2016).
- [0177] 15. Murali, R., Yang, Y. X., Brenner, K., Beck, T. & Meindl, J. D. Breakdown currentdensity of graphene nanoribbons. *Appl. Phys. Lett.* 94, 243114 (2009).
- [0178] 16. Kim, S.-Y. et al. Substantialimprovements of long-term stability in encapsulation-free WS_2 using highly interacting graphene substrate. *2D Mater.* 4, 011007 (2017).
- [0179] 17. Zhou, Y. et al. Direct synthesis of large-scale WTe_2 thin films with low thermal conductivity. *Adv. Funct. Mater.* 27, 1605928 (2017).
- [0180] 18. Kwak J. et al. Oxidation behavior of graphene-coated copper at intrinsic graphene defects of different origins. *Nat. Commun.* 8, 1549 (2017).
- [0181] 19. Liu, W. L. et al. Effect of aging-induced disorder on the quantumtransport properties of few-layer WTe_2 . *2D Mater.* 4, 011011 (2017).
- [0182] 20. Ye, F. et al. Environmental instability and degradation of single- and few-Layer WTe_2 nanosheets in ambient conditions. *Small* 12, 5802-5808 (2016).
- [0183] 21. Kim, M. et al., Determination of the thickness and orientation of few-layer tungstentelluride using polarized Raman spectroscopy. *2D Mater.* 3, 034004 (2016).
- [0184] 22. Zhang, F., Lee, C.-H., Robinson, J. A. & Appenzeller, J. Exploration of channel width scaling and edge states in transition metal dichalcogenides. *Nano Res.* <https://doi.org/10.1007/s12274-017-1794-x>

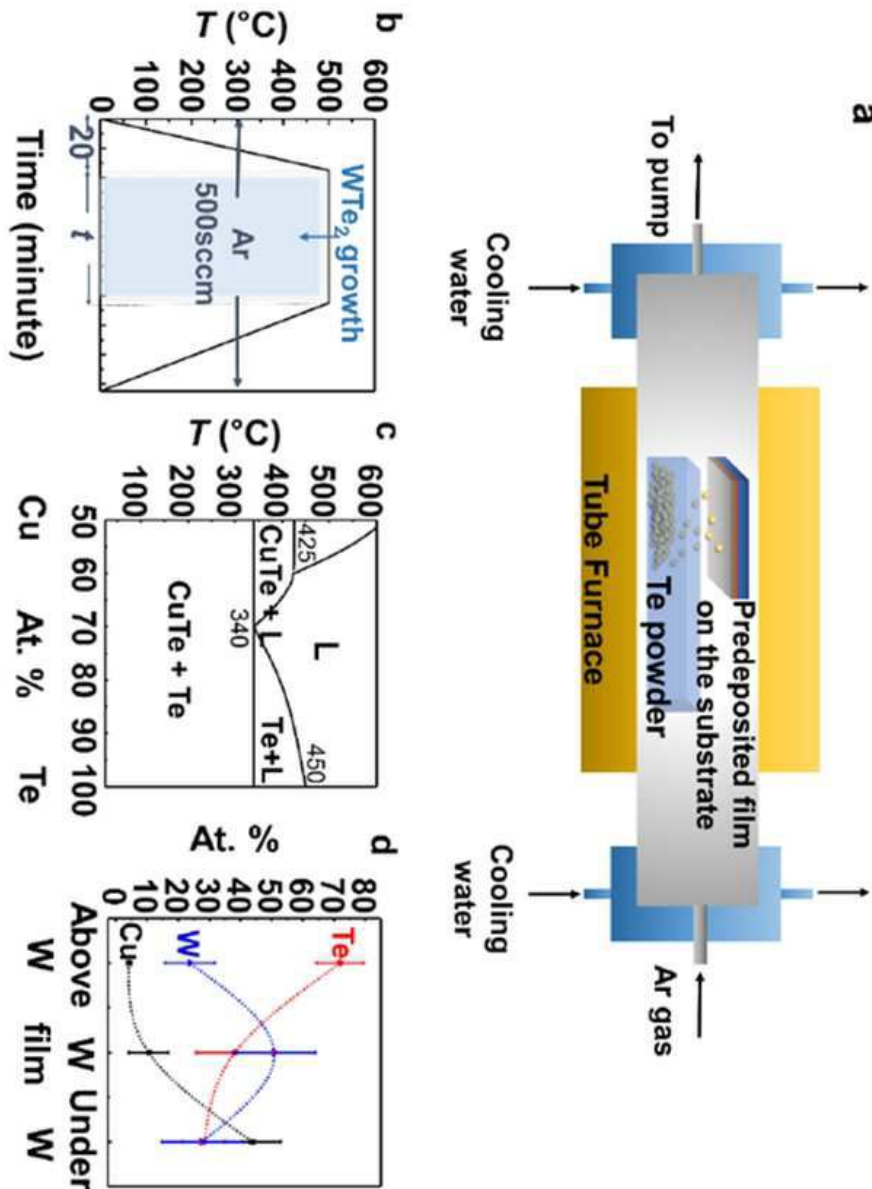
(2017).

- [0185] 23. Rathmell, A. R. & Wiley, B. J. The synthesis and coating of long, thin copper nanowires to make flexible, transparent conducting films on plastic substrates. *Adv. Mater.* 23, 4798-4803 (2011).
- [0186] 24. Island, J. O., Steele, G. A., van der Zant, H. S. J. & Castellanos-Gomez, A. Environmental instability of few-layer black phosphorus. *2D Mater.* 2, 011002 (2015).
- [0187] 25. Lipatov, A. et al. Effect of synthesis on quality, electronic properties and environmental stability of individual monolayer Ti_3C_2 MXene flakes. *Adv. Electron. Mater.* 2, 1600255 (2016).
- [0188] 26. Karim, S., Maaz, K., Ali, G. & Ensinger, W. Diameter dependent failure current density of gold nanowires. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, 185403 (2009).
- [0189] 27. Cornelius, T. W. et al. Burnout current density of bismuth nanowires. *J. Appl. Phys.* 103, 103713 (2008).
- [0190] 28. Behnam, A. et al. Transport in nanoribbon interconnects obtained from graphene grown by chemical vapor deposition. *Nano Lett.* 12, 4424-4430 (2012).
- [0191] 29. Menon, R., Yoon, C. O., Moses, D., Heeger, A. J. & Cao, Y. Transport in polyaniline near the critical regime of the metal-insulator-transition. *Phys. Rev. B* 48, 17685- 17694 (1993).
- [0192] 30. Brown, B. E, Crystal structures of WTe_2 and high-temperature MoTe_2 . *Acta. Crystallogr.* 20, 268-274 (1966).
- [0193] 31. Lee, K. J., Chandrakasan, A. P. & Kong, J. Breakdown current density of CVD-grown multilayergraphene interconnects. *IEEE Elect. Dev. Lett.* 32, 557-559 (2011).
- [0194] 32. Steinhogel, W., Schindler, G., Steinlesberger, G. & Engelhardt, M. Size-dependent resistivity of metallic wires in the mesoscopic range. *Phys. Rev. B* 66, 075414 (2002).
- [0195] 33. W. Steinhogel, G. S., G. Steinlesberger, M. Traving, M. Engelhardt. Scaling laws for the resistivity increase of sub-100nm interconnects. (Simulation of Semiconductor Processes and Devices, SISPAD. International Conference on Boston, MA, USA, 27- 30 2003).
- [0196] 34. Sui, Y., Low, T., Lundstrom, M. & Appenzeller, J. Signatures of disorder in the minimum conductivity of graphene. *Nano Lett.* 11, 1319-1322 (2011).
- [0197] 35. Liu, H. et al. Phosphorene: an unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility. *ACS Nano* 8, 4033-4041, (2014).
- [0198] 36. Liu, G. X. et al. Low-frequency electronic noise in quasi-1D TaSe_3 van der Waals nanowires. *Nano Lett.* 17, 377-383 (2017).
- [0199] 37. Neal, A. T., Du, Y. C., Liu, H. & Ye, P. D. D. Two-dimensional TaSe_2 metallic crystals: spin-orbit scattering length and breakdown current density. *ACS Nano* 8, 9137-9142 (2014).
- [0200] 38. Molina-Mendoza, A. J. et al. High current density electrical breakdown of TiS_3 nanoribbon-based field-effect transistors. *Adv. Funct. Mater.* 27, 1605647 (2017).
- [0201] 39. Pashinkin, A. S. & Fedorov, V. A. Phase equilibria in the system. *Inorg. Mater.* 39, 539-554 (2003).
- [0202] 40. Fei, Z. Y. et al. Edge conduction in monolayer WTe_2 . *Nat. Phys.* 13, 677-682 (2017).
- [0203] 41. Doty, R. C., Yu, H. B., Shih, C. K. & Korgel, B. A. Temperature-dependent electron transport through silver nanocrystal superlattices. *J. Phys. Chem. B* 105, 8291-8296 (2001).
- [0204] 42. Wang, L. et al. Tuning magnetotransport in a compensated semimetal at the atomic scale. *Nat. Commun.* 6, 8892 (2015).

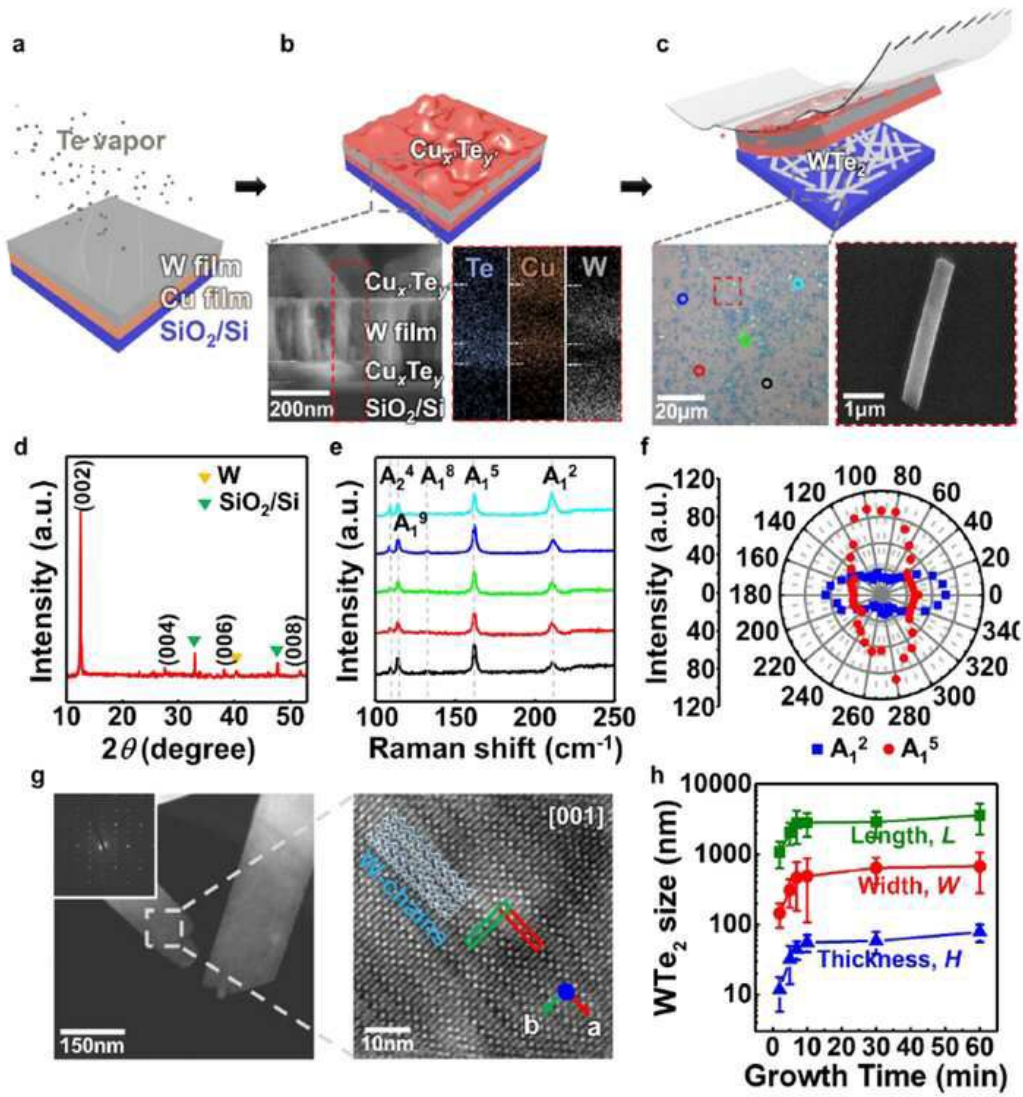
- [0205] 43. Pasek, M., Orso, G. & Delande, D. Anderson localization of ultracold atoms: Where is the mobility edge? Phys. Rev. Lett. 118, 170403 (2017).
- [0206] 44. Halim, J. et al. Synthesis and characterization of 2D molybdenum carbide (MXene). Adv. Funct. Mater. 26, 3118-3127 (2016).
- [0207] 45. Chester, G. V. & Thellung, A. Law of Wiedemann and Franz. Proc. Phys. Soc. 77, 1005-1013 (1961).
- [0208] 46. Revolinsky, E., Brown, B. E., Beerntse, D. J. & Armitage, C. H. Selenide and telluride systems of niobium and tantalum. J. Less-Common Met. 8, 63-72, (1965).
- [0209] 47. Delogu, F. Structural and energetic properties of unsupported Cunanoparticles from room temperature to the melting point: Molecular dynamics simulations. Phys. Rev. B 72, 205418 (2005).
- [0210] 48. Liu, G., Sun, H. Y., Zhou, J., Li, Q. F. & Wan, X.-G. First-principles study of lattice thermal conductivity of Td-WTe₂. New J. Phys. 18, 033017 (2016).

도면

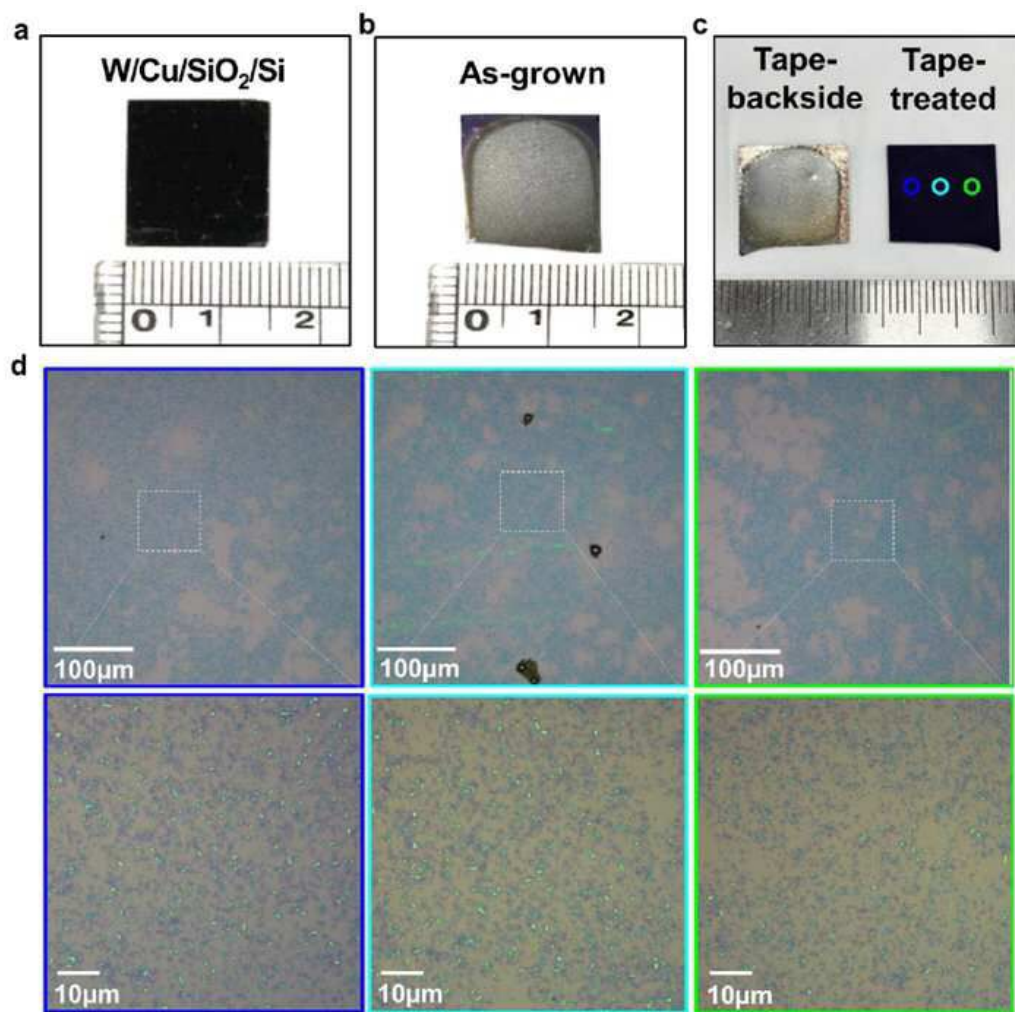
도면1



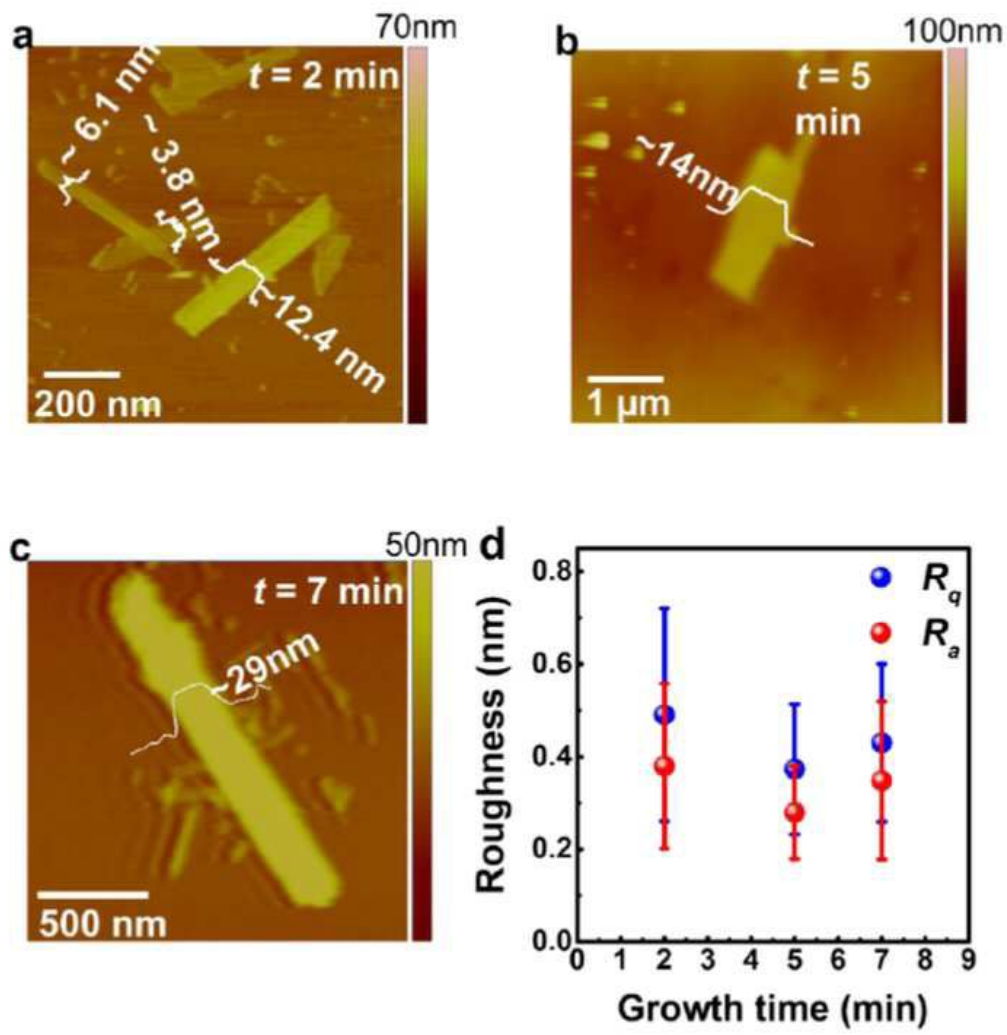
도면2



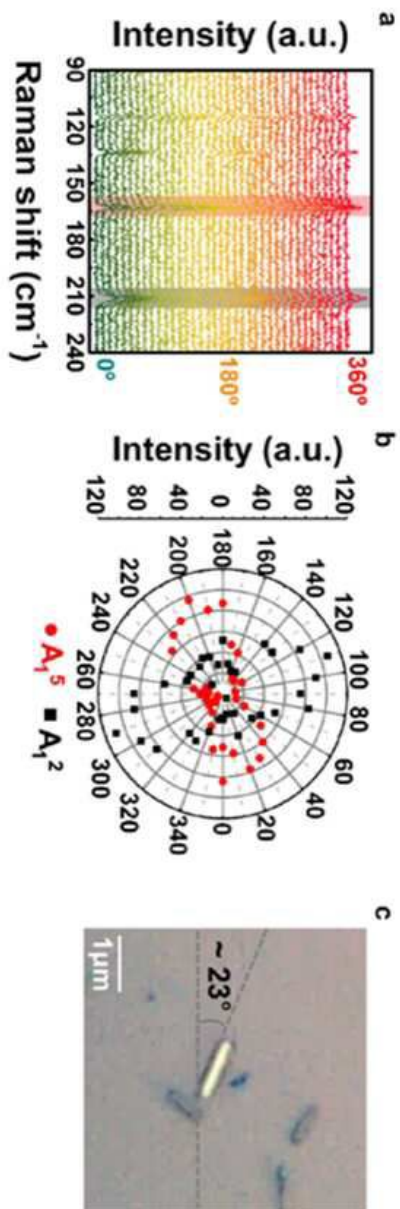
도면3



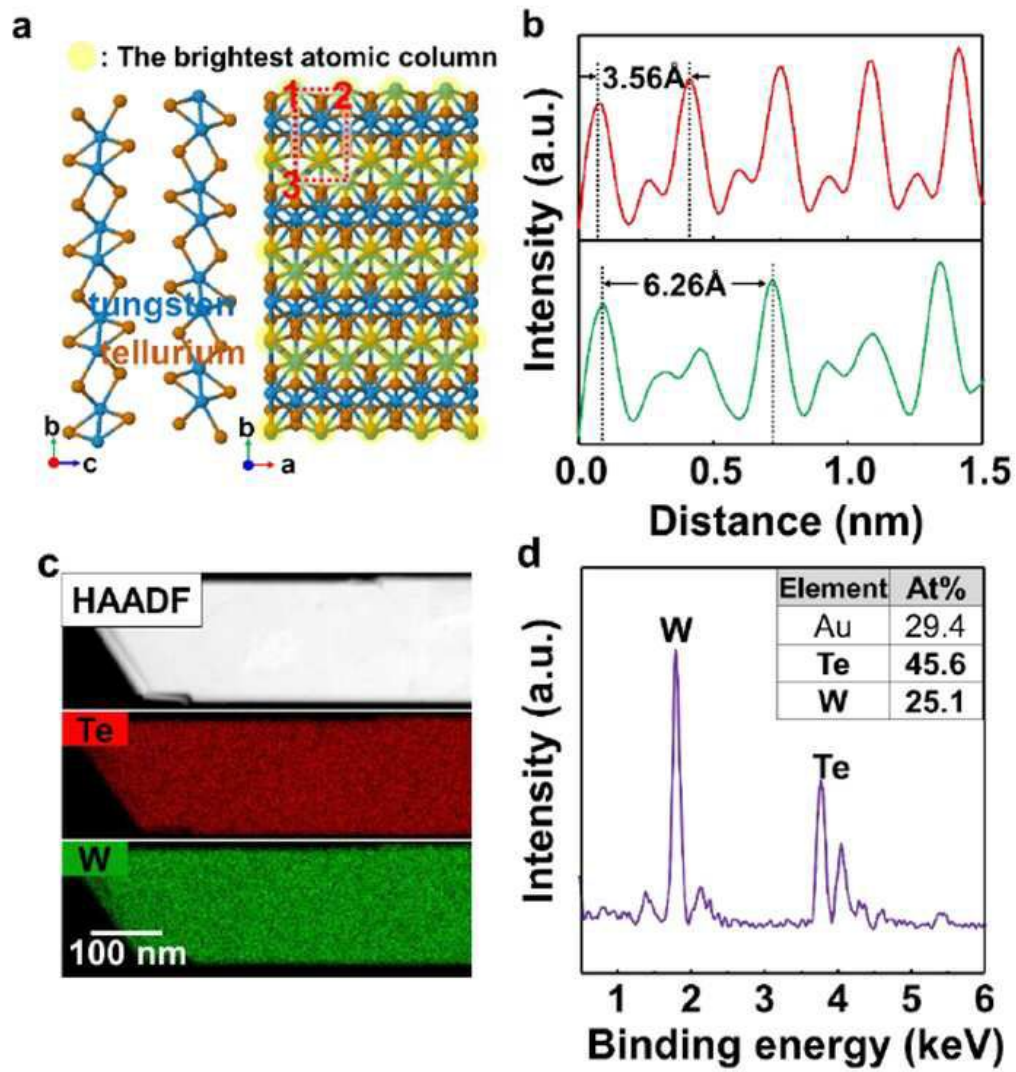
도면4



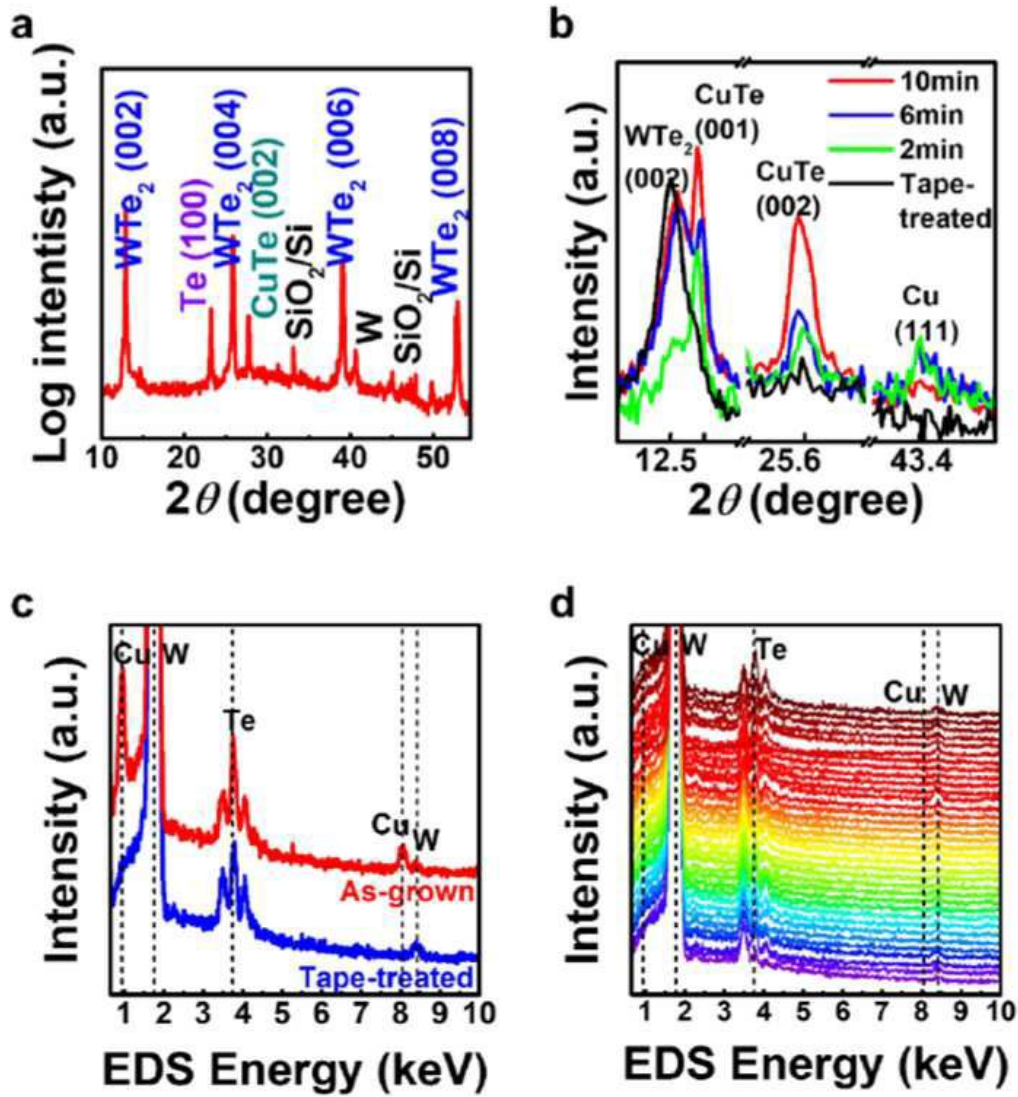
도면5



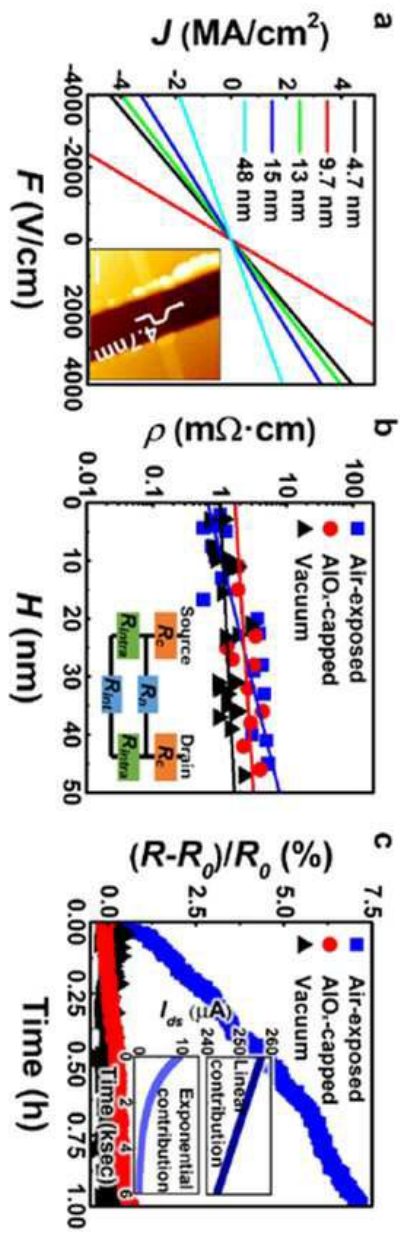
도면6



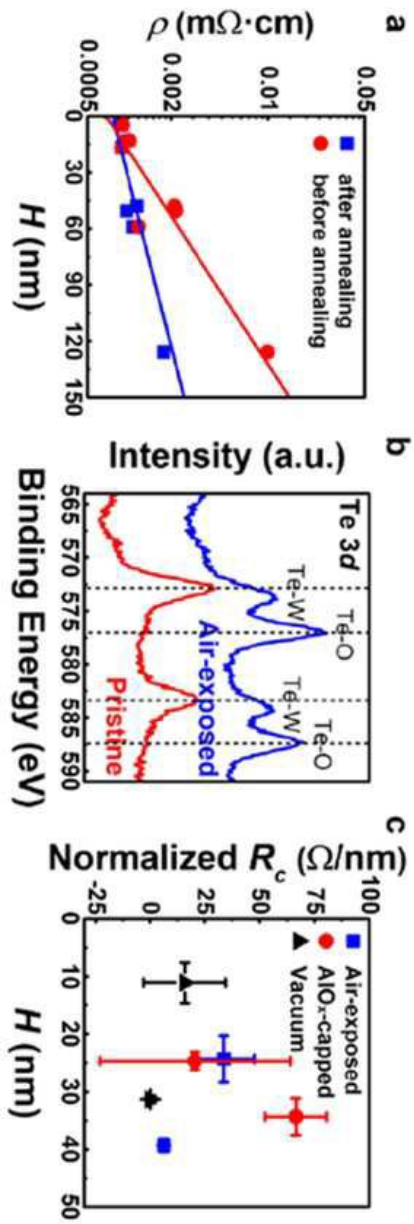
도면7



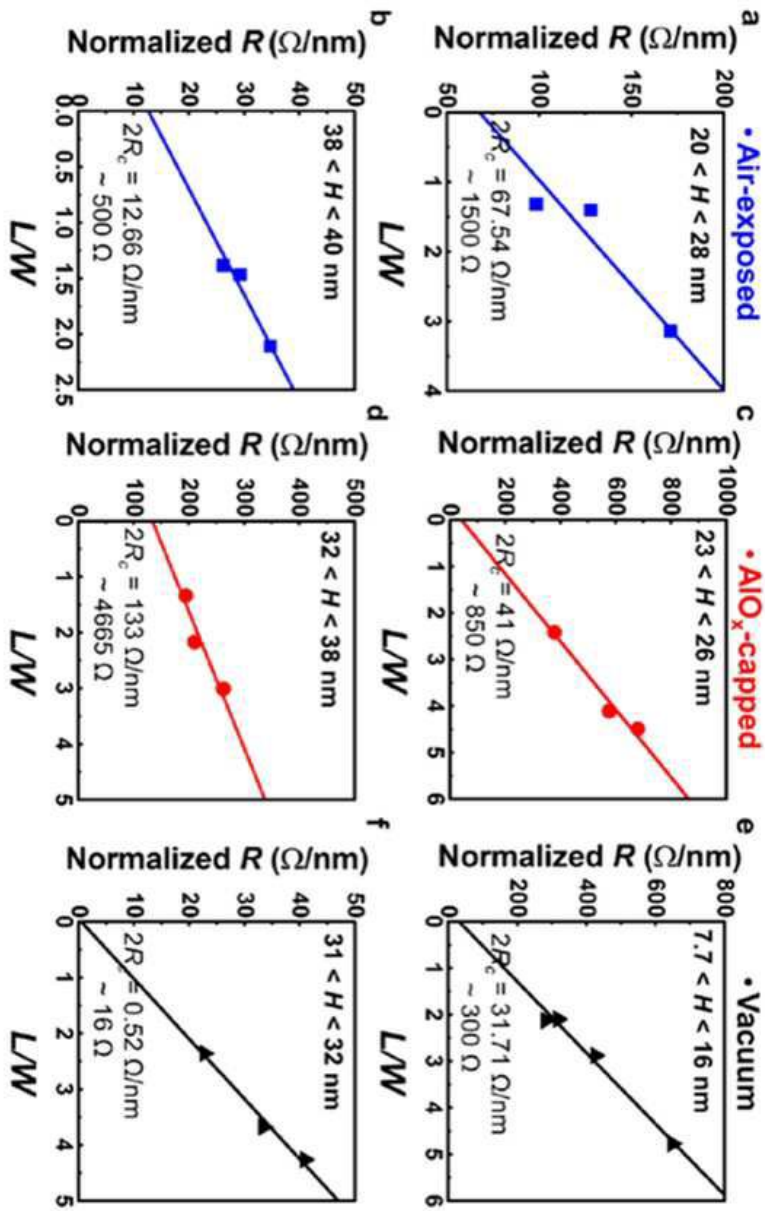
도면8



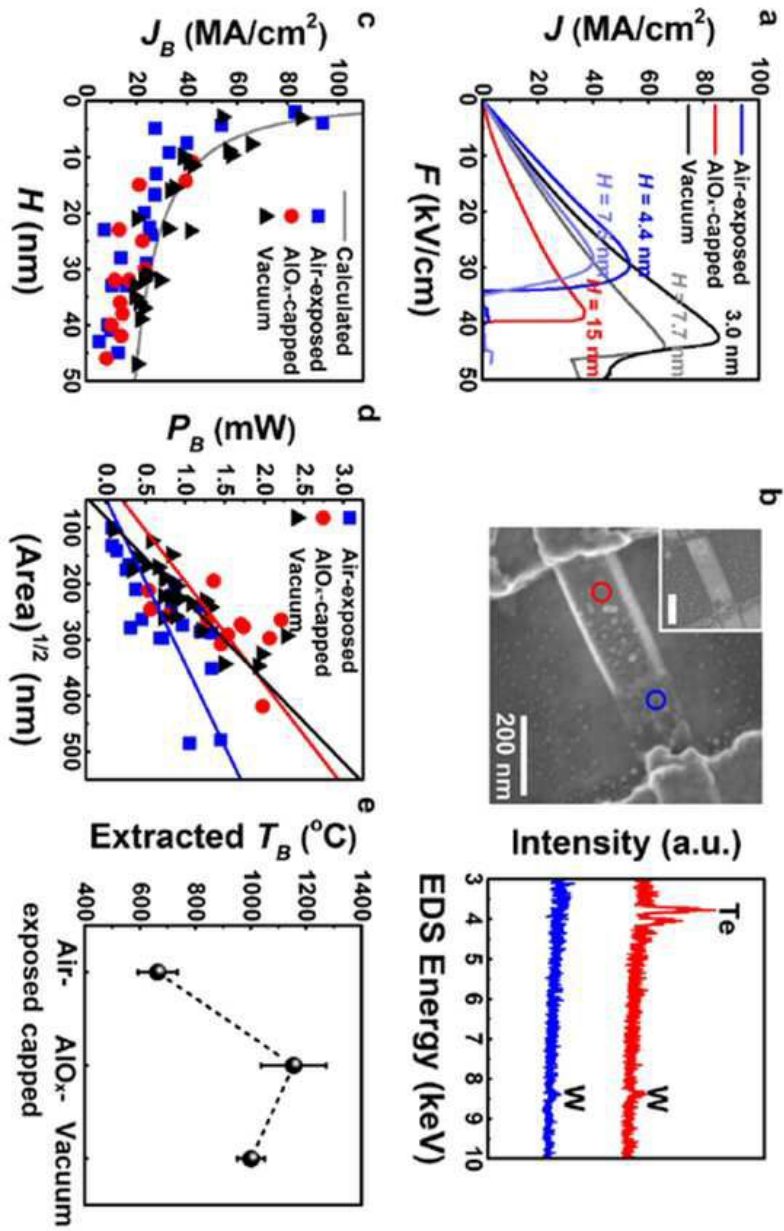
도면9



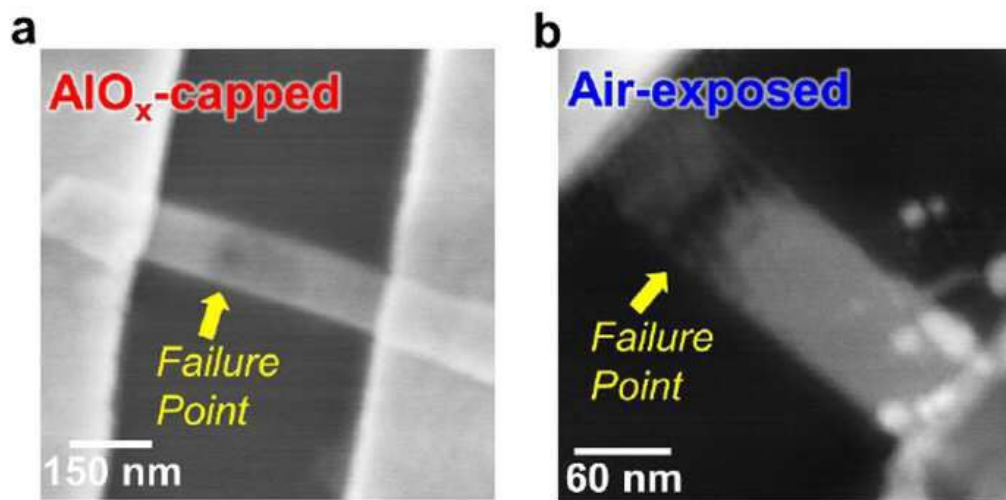
도면10



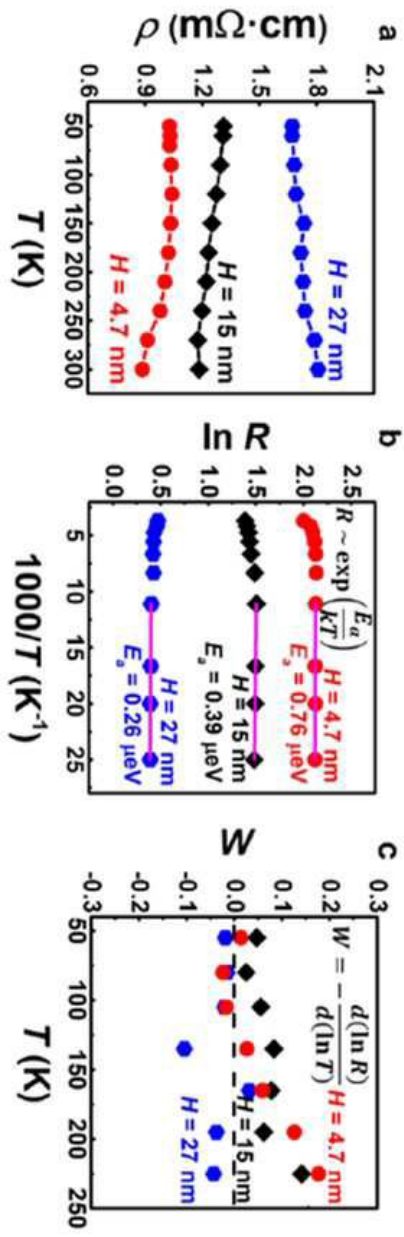
도면11



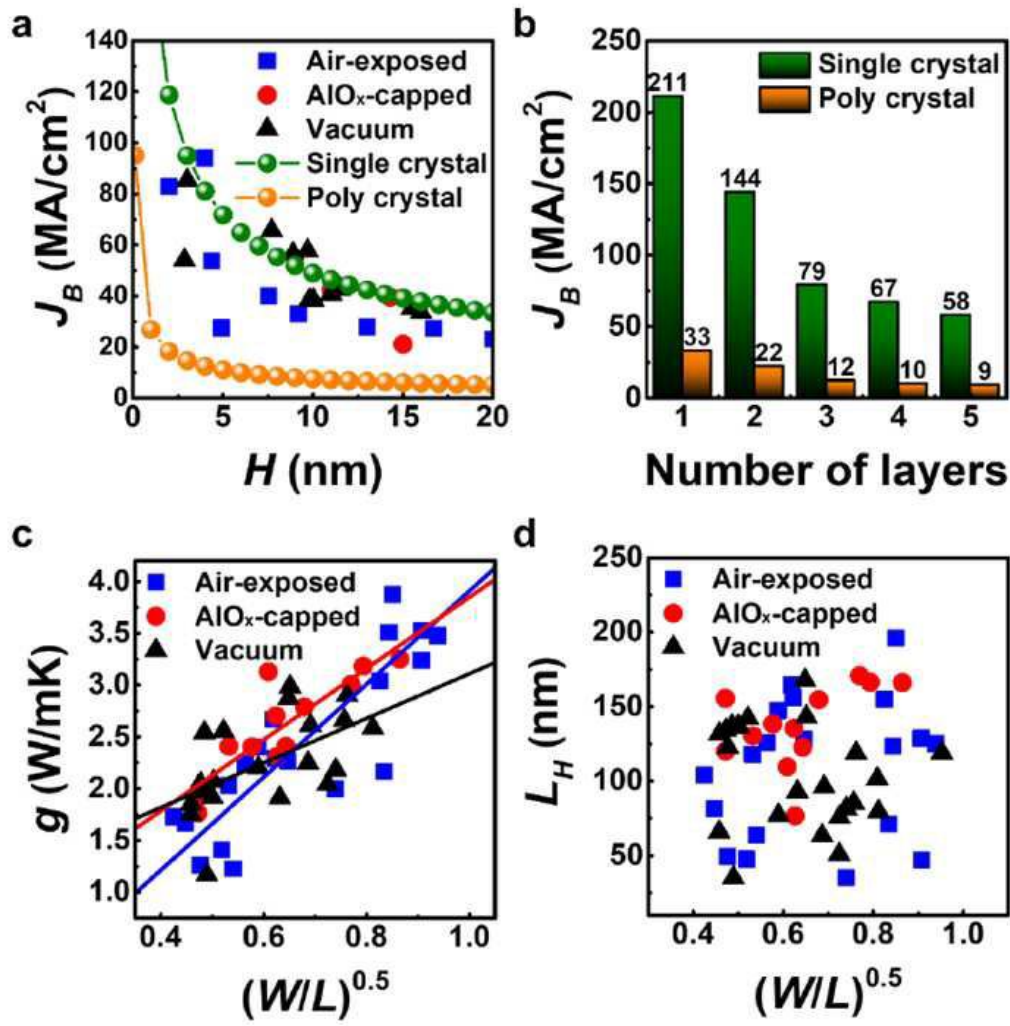
도면12



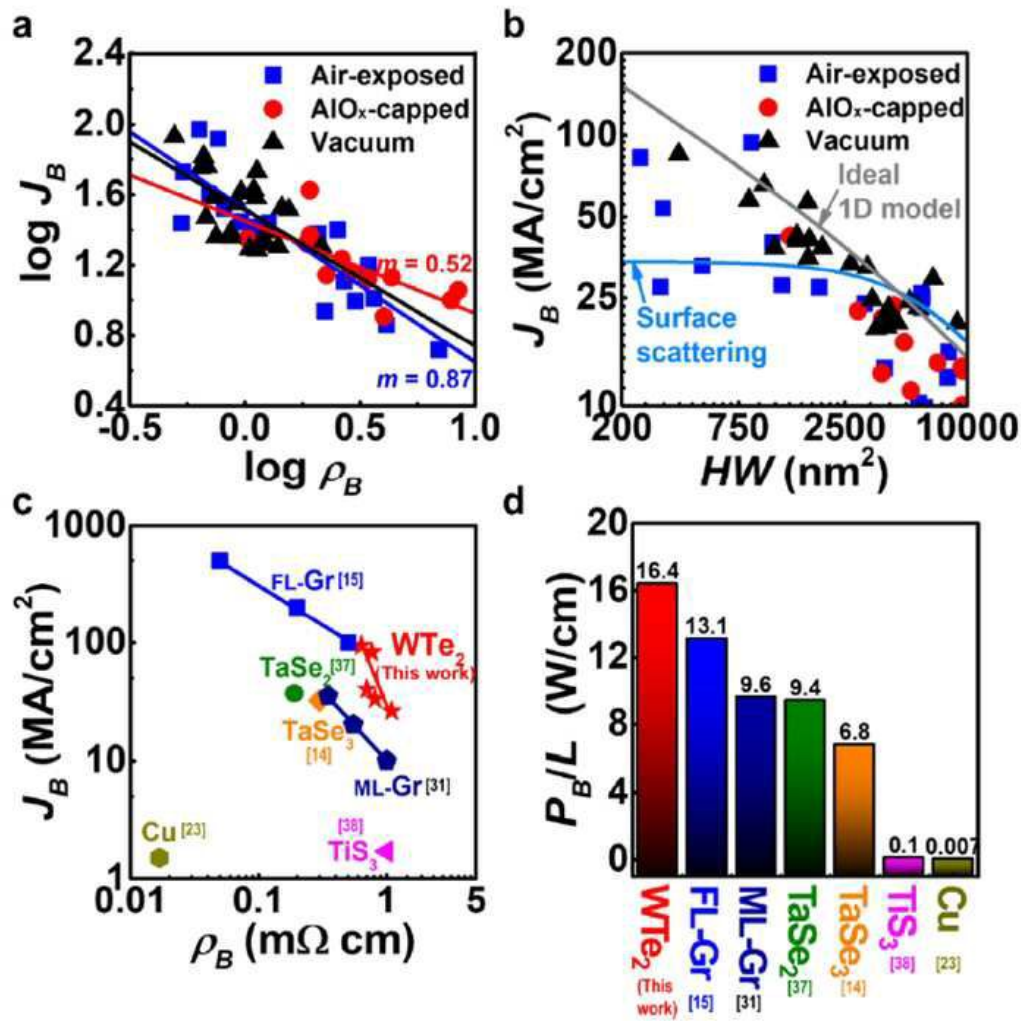
도면13



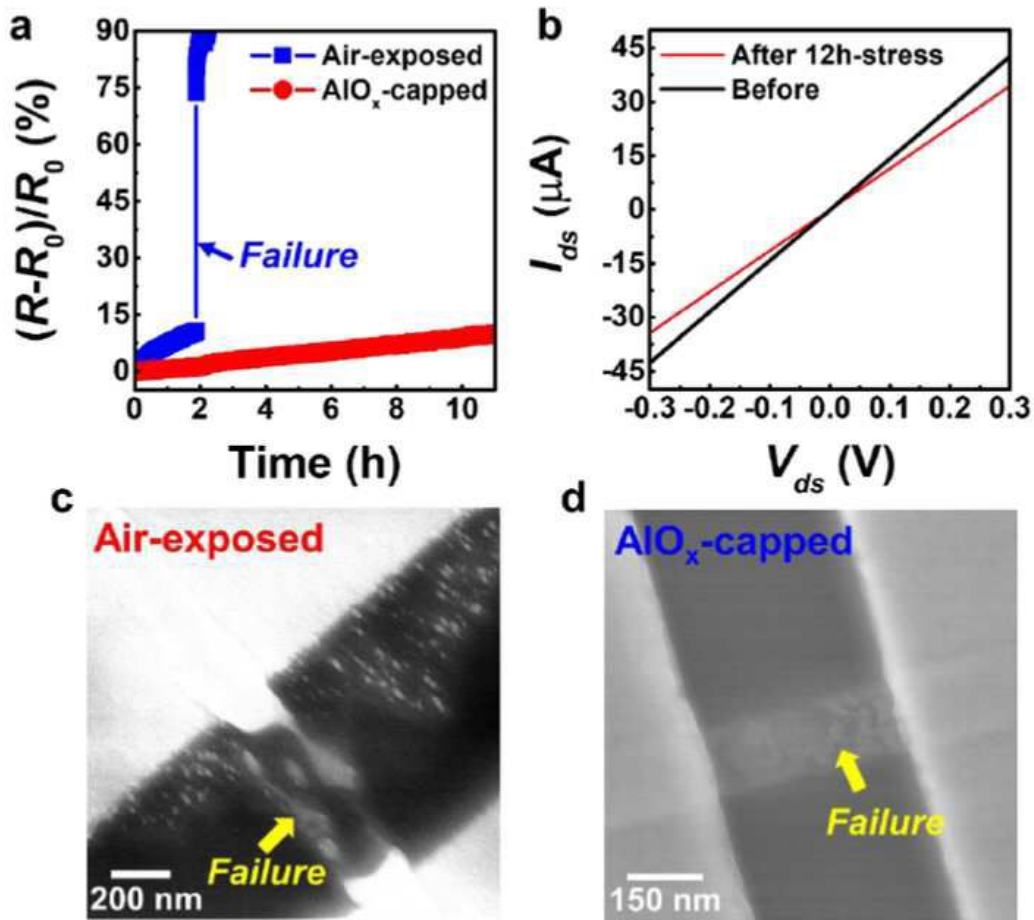
도면14



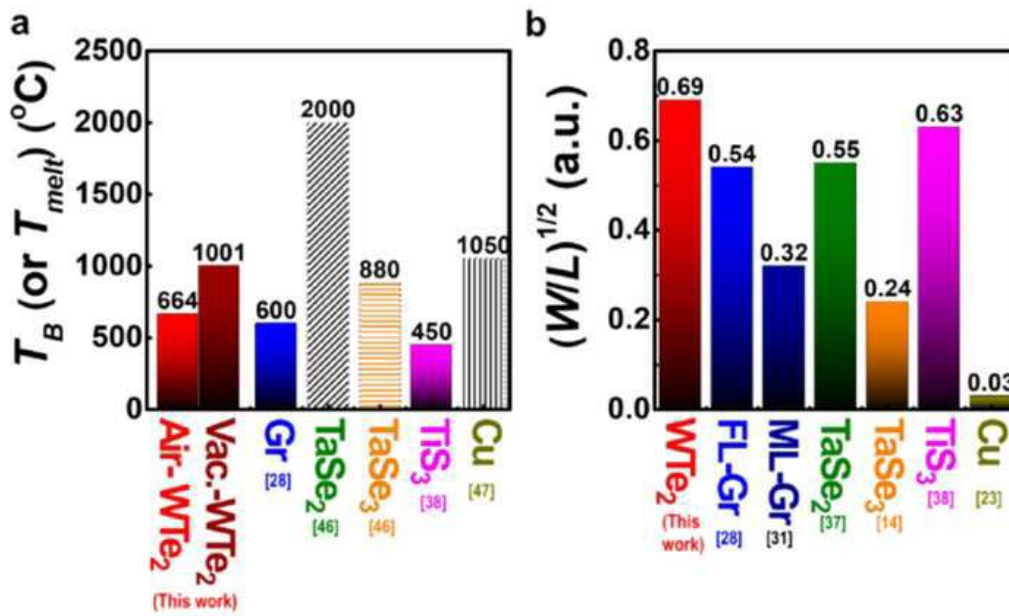
도면15



도면16



도면17



도면18

