(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0054705
(43) 공개일자 2019년05월22일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
C30B 29/46 (2006.01) *C30B 25/18* (2006.01)
C30B 25/22 (2006.01)
(52) CPC특허분류
C30B 29/46 (2013.01)
C30B 25/18 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0151580
(22) 출원일자 2017년11월14일
심사청구일자 2017년11월14일

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

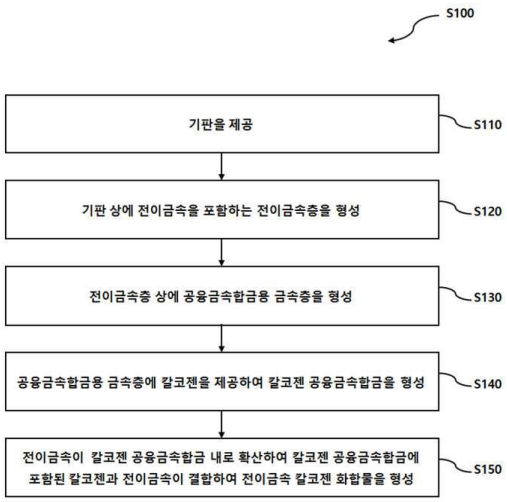
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 **전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법**

(57) 요 약

본 발명은, 산소에 대한 반응성이 낮고 기화가 방지되는 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법을 제공한다. 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법은, 기판을 제공하는 단계; 상기 기판 상에 전이금속을 포함하는 전이금속층을 형성하는 단계; 상기 전이금속층 상에 공융금속합금용 금속층을 형성하는 단계; 상기 공융금속합금용 금속층에 칼코젠을 제공하여 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계; 및 상기 전이금속이 상기 칼코젠 공융금속합금 내로 확산하여 상기 칼코젠 공융금속합금에 포함된 상기 칼코젠과 상기 전이금속이 결합하여 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계;를 포함한다.

대 표 도 - 도3



(52) CPC특허분류
C30B 25/22 (2013.01)
(72) 발명자
조용수
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
송승욱
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이종훈
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이종화
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

명 세 서

청구범위

청구항 1

기판을 제공하는 단계;

상기 기판 상에 전이금속을 포함하는 전이금속층을 형성하는 단계;

상기 전이금속층 상에 공융금속합금용 금속층을 형성하는 단계;

상기 공융금속합금용 금속층에 칼코젠을 제공하여 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계; 및

상기 전이금속이 상기 칼코젠 공융금속합금 내로 확산하여 상기 칼코젠 공융금속합금에 포함된 상기 칼코젠과 상기 전이금속이 결합하여 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계;

를 포함하는, 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 기판은 실리콘(Si), 실리콘 산화물(SiO_2) 및 알루미늄 산화물(Al_2O_3) 중 적어도 어느 하나를 포함하는, 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법.

청구항 3

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 하나 를 포함하는, 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 공융금속합금용 금속층은 구리(Cu), 니켈(Ni), 금(Au), 은(Ag), 및 팔라듐(Pd) 중 적어도 어느 하나를 포함하는, 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

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

청구항 6

청구항 1에 있어서,

상기 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계 및 상기 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계는 50 ℃ 내지 1200 ℃ 의 온도 범위에서 수행되는, 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법.

청구항 7

청구항 1에 있어서,

상기 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계 및 상기 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계는 300 ℃ 내지 500 ℃ 의 온도 범위에서 수행되는, 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법.

청구항 8

청구항 1에 있어서,

상기 전이금속 칼코젠 화합물은 일차원 구조를 가지는, 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법.

청구항 9

청구항 1에 있어서,

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

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명의 기술적 사상은 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[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)은 산소에 대한 반응성이 높고, 기화가 쉽게 되어 화학적양론비가 맞는(stoichiometric) 이텔루륨 전이금속 화합물의 바텀-업 합성 결과는 거의 연구되지 못하고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 한국특허공개번호 제10-2016-0127885호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명의 기술적 사상이 이루고자 하는 기술적 과제는 산소에 대한 반응성이 낮고 기화가 방지되는 화학양론적 비가 맞는 고품위 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법을 제공하는 것이다.

[0006] 그러나 이러한 과제는 예시적인 것으로, 본 발명의 기술적 사상은 이에 한정되는 것은 아니다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기 기술적 과제를 달성하기 위한 본 발명의 기술적 사상에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법은, 기판을 제공하는 단계; 상기 기판 상에 전이금속을 포함하는 전이금속층을 형성하는 단계; 상기 전이금속층 상에 공융금속합금용 금속층을 형성하는 단계; 상기 공융금속합금용 금속층에 칼코젠을 제공하여 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계; 및 상기 전이금속이 상기 칼코젠 공융금속합금 내로 확산하여 상기 칼코젠 공융금속합금에 포함된 상기 칼코젠과 상기 전이금속이 결합하여 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계;를 포함한다.

[0008] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 기판은 실리콘(Si), 실리콘 산화물(SiO_2) 및 알루미늄 산화물(Al_2O_3)

중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0009] 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 있으며, 이들의 합금상을 포함할 수 있다.

[0010] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 공융금속합금용 금속층은 구리(Cu), 니켈(Ni), 금(Au), 은(Ag), 및 팔라듐(Pd) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0011] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 칼코젠은 황(S), 셀레늄(Se), 및 텔루륨(Te) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0012] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계 및 상기 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계는 상기 공융금속합금용 금속층이 구리인 경우에는 300 ℃ 내지 500 ℃ 의 온도 범위에서 수행될 수 있으며, 상기 칼코젠 공융금속합금의 금속층 종류에 따라 50 ℃ 내지 1,200 ℃ 의 온도 범위에서 수행될 수 있다.

[0013] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 전이금속 칼코젠 화합물은 일차원 구조를 가질 수 있다.

[0014] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 전이금속 칼코젠 화합물은 WTe_2, $MoTe_2$, 및 $W_xMo_{1-x}Te_2$ (여기에서, $0<x<1$) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0015] 본 발명의 기술적 사상에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법은 액상의 칼코젠 공융금속합금을 이용하여, 석출공정(precipitation)을 통한 텔루륨계 1차원 단결정 나노 구조체의 전이금속 칼코젠 화합물을 제조할 수 있다. 본 발명에 따라, 기존의 바텀-업 방식에서 사용된 기상 증착법의 산화성 증가 및 증발 등의 한계를 극복할 수 있고, 전이금속 칼코젠 화합물 및 이종구조를 이용하여 차세대 정보소자의 구현을 이룰 수 있다.

[0016] 본 발명의 기술적 사상에 따른 전이금속 칼코젠 화합물은, 고순도, 화학량론비가 맞는 텔루륨계 전이금속 칼코젠 화합물의 단결정 나노구조체를 형성할 수 있고, 종래의 닫힌 계(closed system)에서의 매우 긴 반응시간, 고온에서의 기상반응에 의한 많은 결함을 가지는 벌크 구조체 형성 및 재현성 확보의 어려움 등과 같은 문제점을 해결할 수 있다.

[0017] 또한, 본 발명의 기술적 사상에 따른 전이금속 칼코젠 화합물은, 단결정 나노구조체의 형상 및 두께 조절, 화합물 나노구조체 합성, 조성 조절, 도판트(dopant)의 분포양상, 결함 및 계면 구조 등에 대한 정밀한 제어 등을 통해 우수한 물리적 특성들을 가지므로, 다양한 응용을 기대할 수 있다.

[0018] 상술한 본 발명의 효과들은 예시적으로 기재되었고, 이러한 효과들에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 화학 구조를 나타내는 모식도이다.

도 2은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 밴드 구조를 나타내는 그래프이다.

도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법(S100)을 설명하는 흐름도이다.

도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법을 설명하는 모식도이다.

도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에서 칼코젠 공융금속합금에 대한 상태도를 나타내는 그래프이다.

도 6 및 도 7은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물의 주사전자현미경 및 투과전자현미경 사진들이다.

도 8은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 조성 변화에 따른 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 X-선 회절패턴을 나타내는 그래프이다.

도 9는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 1차원 형상을 갖는 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 성장 시간에 따른 치수 변화를 나타내는 그래프이다.

도 10은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물의 두께에 따른 비저항의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 11은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 온도와 비저항의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 12는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 전기적 특성을 측정하기 위한 장치이다.

도 13은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 전기장과 전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 14는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 두께에 따른 비저항 및 전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 15는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 전기장과 전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 16은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 두께(H)와 항복전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 17은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 항복전류밀도와 비저항의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 18은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 인가 전력과 파괴 직전 온도의 관계를 나타내는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 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.

[0021] 본 발명의 기술적 사상은 1차원 구조의 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법을 제공하는 것으로서, 칼코젠 물질이, 특히 텔루륨(Te)이 산소와 반응성이 높은 문제와 기화가 쉽게 되는 문제를 해결하기 위하여, 액상의 공융금속합금(eutectic metal alloys)를 형성하여, 불순물과 결함이 최소화되고, 조성을 조절하면서, 나노 단결정으로 구성된 1차원 전이금속 칼코젠 화합물을 저온과 짧은 시간에 제조하는 것을 제공하는 것이다.

[0022] 전이금속 칼코젠 화합물(transition metal chalcogen compound)는 층상 구조(layered structure)를 갖는다는 측면에서 그래핀과 구조적으로 유사하지만, 변조가 가능한 직접 천이형 밴드갭 구조를 가지고 있어 구조적 안정성을 가지면서 동시에 높은 전하 이동도와 우수한 광반응성을 갖는 등의 특성을 보유하여, 초저전력 기반의 차세대 정보소자에의 응용에 매우 적합한 최첨단 신소재로 제안되고 있다. 특히, 텔루륨(Tellurium, Te)을 포함하는 전이금속 칼코젠 화합물은 매우 크고 포화되지 않는, 예를 들어 WTe_2 의 경우에는 60 테슬라 및 0.53 K에서 최대 13,000,000 % 까지의 자기 저항(magnetoresistance) 특성을 가지고, $MoTe_2$ 의 경우에는 최대 4,000 cm^2Vs^{-1}, WTe_2 의 경우에는 최대 10,000 cm^2Vs^{-1} 의 우수한 전하 이동도를 가지고, 높은 품질의 단일층(monolayer) WTe_2 혹은 $MoTe_2$ 박막에서의 2차원 위상 절연체(topological insulator)의 형성이 가능하며, 조성 변화가 가능한 높은 품질의 $(W_xMo_{1-x})Te_2$ (여기에서, $0<x<1$) 화합물 박막을 형성하는 경우, 변조가 가능한 바일 반금속(Weyl semimetal)을 구현할 수 있는 등의 특성을 제공할 수 있다. 이에 따라, 초전도성(superconductivity) 및 양자 스핀 홀 연구(quantum spin Hall effect) 등과 같은 전자기 양자물성 연구에 있

어 우수한 플랫폼 소재로서 응용될 수 있고, 또한 이러한 우수한 전자기 특성들에 기반하고 또한 다른 저차원 나노소재, 예를 들어 그래핀이나 BN와 같은 이차원 소재 등, 와의 이종구조 형성을 통해 양자 위상(quantum phase)를 이용하는 차세대 전자소자, 스핀트로닉스(spintronics)에 기반한 차세대 자기소자, 고효율 열전 소자(thermoelectric devices) 및 상변이 메모리 소자(phase change memory devices) 등의 차세대 초저전력 정보소자에의 높은 응용가능성이 예상된다.

[0023] 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 화학 구조를 나타내는 모식도이다.

[0024] 도 1을 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물은 1T, 2H, 3R 등과 같은 화학 구조를 가질 수 있다. 칼코젠 물질로서 황(S)이나 셀레늄(Se)을 포함하는 경우에는, 2H 구조를 안정상으로 가지는 것이 일반적이며, 반도체 성질을 가지게 된다. 반면, 칼코젠 물질로서 텔루륨(Te)을 가지는 경우에는 1T' 구조를 안정상으로 가지며, 금속 성질을 가지게 된다.

[0025] 전이금속 칼코젠 화합물은 전이금속(IV족 내지 X족)과 칼코젠 원자(S, Se, 또는 Te)의 종류에 따라 약 40 가지 이상 존재하지만, 현재까지 연구로는 기계적 박리법(mechanical exfoliation)으로 획득한 플레이크(flake) 샘플이거나 또는 벌크 결정에서 획득한 샘플들이며, 높은 품질의 전이금속 칼코젠 화합물의 나노 구조체의 직접적인 합성은 연구되지 못하는 실정이다. 특히, 1T' 구조를 안정상으로 가지는 텔루륨(Te)을 포함하는 전이금속 칼코젠 화합물은 결정 구조의 이방성으로 인하여 기계적 박리법을 이용하여도 마이크로 크기 이상 수준의 박막의 획득이 용이하지 않아 그 물성조차도 매우 제한적으로 알려져 있다.

[0026] 특히, 텔루륨(Te)을 포함하는 전이금속 칼코젠 화합물의 경우에는, 황(S)이나 셀레늄(Se)을 포함하는 전이금속 칼코젠 화합물에 비하여, 전이금속과 텔루륨 원자들 간의 반응성이 낮고 형성 엔탈피가 높으며, 또한 텔루륨 원자 자체의 매우 높은 평형증기압과 공기 중의 산소와의 매우 높은 반응성 등으로 인해 기존의 기상 증착법을 이용하여서는 높은 품질의 소재 합성이 매우 어렵다. 따라서, 현재까지는 텔루륨 계열 고품위 전이금속 칼코젠 화합물 나노소재 합성에 관한 관련 보고가 전세계적으로 거의 전무한 실정이며, 차세대 정보소자 구현을 위한 전이금속 칼코젠 화합물 나노소재의 도핑(doping) 및 이종구조(heterostructure) 구현은 물론 $(W_xMo_{1-x})Te_2$ (여기에서, 0<x<1) 과 같은 화합물 합성에 관한 실험적 결과 또한 전세계적으로 전무한 실정이다. 또한 기상증착법을 이용하여 텔루륨 계열 전이금속 칼코젠 화합물 나노소재 합성에 성공한다고 해도, 그래핀 및 황이나 셀레늄 계열 전이금속 칼코젠 화합물에 관한 선행연구에서 알 수 있듯이 다결정(polycrystalline) 형태의 결정립 및 결함들(defects)이 다수 포함된 박막의 형성이 불가결하여 차후 해당소재의 물성연구 및 소자응용연구에 한계가 있다.

[0027] 특히, 나노 와이어, 나노 벨트, 나노 튜브 등과 같은 1차원 나노 구조를 갖는 전이금속 칼코젠 화합물은 두 개의 공간축에서의 나노 크기의 치수, 높은 비표면적, 양자가둠효과(quantum confinement effect) 등으로 인해 기존의 2차원 나노 구조의 전이금속 칼코젠 화합물에서는 발견할 수 없는 새로운 물리적 현상의 발견이 기대되어 미래 초저전력 정보소자에의 활용성의 확대가 가능할 것으로 보인다.

[0028] 도 2은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 밴드 구조를 나타내는 그래프이다.

[0029] 도 2를 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물은 2차원 구조(2H)를 가지는 경우와 비교하여 1차원 구조(1T, 1T')를 가지는 경우 다양한 밴드 갭을 제공할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있다.

[0030] 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법(S100)을 설명하는 흐름도이다.

[0031] 도 3을 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법(S100)은, 기판을 제공하는 단계(S110); 상기 기판 상에 전이금속을 포함하는 전이금속층을 형성하는 단계(S120); 상기 전이금속층 상에 공융금속합금용 금속층을 형성하는 단계(S130); 상기 공융금속합금용 금속층에 칼코젠을 제공하여 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계(S140); 및 상기 전이금속이 상기 칼코젠 공융금속합금 내로 확산하여 상기 칼코젠 공융금속합금에 포함된 상기 칼코젠과 상기 전이금속이 결합하여 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계(S150);를 포함한다.

[0032] 상기 기판은 결정질 물질이나 비결정질 물질을 포함할 수 있고, 예를 들어 실리콘(Si), 실리콘 산화물(SiO_2), 및 알루미늄 산화물(Al_2O_3) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다. 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 있으며, 이

들의 합금상을 포함할 수 있다. 상기 공융금속합금용 금속층은 구리(Cu), 니켈(Ni), 금(Au), 은(Ag), 및 팔라듐(Pd) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있으며, 이들의 합금상을 포함할 수 있다. 상기 칼코젠은 황(S), 셀레늄(Se), 및 텔루륨(Te) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0033] 상기 전이금속층을 형성하는 단계와 상기 공융금속합금용 금속층을 형성하는 단계는 각각 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD), 저압 CVD(Low Pressure CVD, LPCVD), 플라즈마 강화 CVD(Plasma Enhanced CVD, PECVD), 원자층 증착법(Atomic Layer Deposition, ALD), 또는 스퍼터링(sputtering) 등을 이용하여 수행할 수 있다.

[0034] 상기 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계 및 상기 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계는 상기 공융금속합금용 금속층의 종류에 따라 다양한 온도 범위에서 수행될 수 있고, 예를 들어 50 ℃ 내지 1,200 ℃ 의 온도 범위에서 수행될 수 있다. 예를 들어, 상기 공융금속합금용 금속층이 구리인 경우에는 300 ℃ 내지 500 ℃ 의 온도 범위에서 수행될 수 있다. 상기 온도 범위는 공융금속합금을 형성하는 온도 범위에 해당되며, 상기 전이금속이 상기 칼코젠 공융금속합금 내로 확산을 가능하게 하는 온도 범위에 해당된다. 또한, 상기 칼코젠 공융금속합금을 형성하는 단계 및 상기 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 단계는 1분 내지 1시간 범위에서 수행될 수 있고, 예를 들어 10분 정도에서 수행될 수 있다.

[0035] 이와 같이 형성한 상기 전이금속 칼코젠 화합물은 일차원 구조를 가질 수 있다. 또한, 상기 전이금속 칼코젠 화합물은 WTe_2, $MoTe_2$, 및 $W_xMo_{1-x}Te_2$ (여기에서, 0<x<1) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0036] 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법을 설명하는 모식도이다.

[0037] 도 4를 참조하면, 실리콘 산화물(SiO_2)/실리콘(Si) 기판 상에 상기 전이금속층으로서 텅스텐(W)층을 형성하고, 상기 텅스텐층 상에 상기 공융금속합금층으로서 구리(Cu)층을 형성한다. 상기 텅스텐층을 대신하여 몰리브덴층을 형성하는 경우도 본 발명의 기술적 사상에 포함되며, 텅스텐/몰리브텐 다층박막을 형성하는 경우도 본 발명의 기술적 사상에 포함된다. 또한, 상기 구리층을 대신하여 니켈층, 금층, 은층, 팔라듐층, 또는 구리-니켈과 같은 다양한 합금층을 형성하는 경우도 본 발명의 기술적 사상에 포함되며, 이 외의 촉매용 금속 및 합금층을 포함할 수 있다. 이어서, 상기 칼코젠으로서, 텔루륨을 기체 상태로서 제공하여 상기 구리층의 구리와 상기 텔루륨이 반응하여 상기 칼코젠 공융금속합금으로서 Cu_xTe_y 을 형성한다. 여기에서, "x"와 "y"는 구리와 텔루륨의 조성에 따라 변화될 수 있다. 또한, 상기 텔루륨을 대신하여 황 또는 셀레늄을 이용하는 경우도 본 발명의 기술적 사상에 포함된다. 이어서, 상기 텅스텐이 상기 칼코젠 공융금속합금 내로 확산하여 상기 칼코젠 공융금속합금에 포함된 상기 텔루륨과 상기 텅스텐이 반응하여 나노 벨트(nanobelt) 형상의 나노 구조체의 전이금속 칼코젠 화합물을 형성한다. 이러한 전이금속 칼코젠 화합물은, 예를 들어 WTe_2, $MoTe_2$, $W_xMo_{1-x}Te_2$ 일 수 있다.

[0038] 여기에서, 상기 전이금속 칼코젠 화합물을 형성하는 과정에서, 구리 등의 물질과 텔루륨과 같은 칼코젠 물질을 액상의 칼코젠 공융금속합금을 형성하고, 이에 따라 상기 칼코젠 물질이 산소와 반응하거나 기화되는 것을 방지할 수 있다. 상기 칼코젠 물질은 상술한 바와 같이 황, 셀레늄, 및 텔루륨을 이용할 수 있고, 텔루륨의 경우가 가장 우수한 특성을 가짐을 확인하였다. 또한, 상기 전이금속은 모든 종류의 전이금속을 이용할 수 있고, 텅스텐 및 몰리브덴의 경우가 가장 우수한 특성을 가짐을 확인하였다. 또한 텅스텐/몰리브덴 다층박막을 도입한 경우, 조성조절이 가능한 $W_xMo_{1-x}Te_2$ 을 형성함을 확인하였다.

[0039] 도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에서 칼코젠 공융금속합금에 대한 상태도를 나타내는 그래프이다.

[0040] 도 5를 참조하면, 상기 칼코젠 공융금속합금으로서 구리와 텔루륨의 상태도(phase diagram)가 나타나있다. 상기 상태도에서, 텔루륨의 함량이 많은 Cu_xTe_y (copper telluride)는 반응공정 중 유동성있는 액체 방울(liquid droplet) 형태로서 존재하게 된다. 이러한 특성은 비록 상온에서 구리/텅스텐 계는 서로 혼합되지 않는 비혼합계(immiscible system)로 나타나지만, 구리의 용융점(melting temperature)에서는 표면 근처에서 구리와 텅스텐 간 혼합이 되는 현상과 유사한 효과를 Cu_xTe_y/W 계 또는 Cu_xTe_y/Mo 계에서 나타나게 한다. 뿐만 아니라 상온에서 증착된 텅스텐 또는 몰리브덴 박막은 다수의 점 결함, 선 결함, 격자결함 및 기공 결함 같은 많은 결함들이 가지게 된다. 이러한 결함들에 의하여 텅스텐 또는 몰리브덴의 용융온도보다 매우 낮은 온도에서도 Cu_xTe_y/W 계면 또는 Cu_xTe_y/Mo 계면에서 상호확산(intermixing) 층을 형성하게 되고, 이에 따라 Cu_xTe_y 기반 액체 방울 내에서의 텅스텐-텔루륨 결정 또는 몰리브덴-텔루륨 결정이 석출되어, 고순도, 화학량론적비가 맞는 텔루륨 계열

의 단결정 1차원 전이금속 칼코젠 화합물 나노구조체가 성장할 수 있다. 이와 더불어, 전이금속 칼코젠 화합물은 댕글링 결합(dangling bond)이 없는 표면특성을 가지므로, 표면/계면 에너지의 최소화를 위한 자기조립 현상에 기반한 고방위 방향을 가지는 나노 구조체가 성장할 수 있다.

[0041] 이와 더불어, 종래에는 텅스텐이나 몰리브덴의 박막 표면에서의 자연적인 산화 현상에 따른 산화층의 형성으로 텅스텐-텔루륨 사이 또는 몰리브덴-텔루륨 사이의 반응이 저하되어 텅스텐-텔루륨 결정 또는 몰리브덴-텔루륨 결정의 형성이 어려웠으나, 칼코젠 공융금속합금이 텅스텐 또는 몰리브덴의 고상 소스의 산화를 방지하는 보호막의 기능을 수행함의 예측할 수 있다.

[0042] 도 6 및 도 7은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물의 주사전자현미경 및 투과전자현미경 사진들이다.

[0043] 도 6 및 도 7을 참조하면, 약 500℃ 이하의 온도에서 약 10 분의 공정 시간 동안 형성한 WTe_2 의 전이금속 칼코젠 화합물이 나타나 있다. 칼코젠 공융금속합금을 이용하는 경우, 전이금속 칼코젠 화합물이 나노 벨트 형상의 1차원 나노 구조체로서 형성되었다.

[0044] 도 8은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 조성 변화에 따른 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 X-선 회절패턴을 나타내는 그래프이다.

[0045] 도 8을 참조하면, $(W_xMo_{1-x})Te_2$ 에 대한 X-선 회절패턴이 나타나 있다. MoTe(x=0 인 경우)로부터 WTe(x=1 인 경우)로 변화하여도 최대 피크가 명확하게 나타나므로 결정성이 우수함을 알 수 있다. 또한, 텅스텐의 함량이 증가함에 따라 최대 피크의 브래그 각도가 감소되었으나, 감소 정도는 몰리브덴과 텅스텐의 함량에 따라 선형 비례관계를 나타내는 것으로 분석된다. 따라서, 본 발명의 기술적 사상에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법은 $(W_xMo_{1-x})Te_2$ 에 대하여 몰리브덴과 텅스텐을 다양한 조성 비율로서 함유한 전이금속 칼코젠 화합물을 형성할 수 있다. 또한, 상기 전이금속 칼코젠 화합물은 불순물이나 결함이 최소화된 나노 단결정을 형성함을 알 수 있다.

[0046] 텔루륨계 전이금속 칼코젠 화합물을 이용한 차세대 초저전력 정보소자 응용성 확대를 위해서는 필수적인 중요 기술적 요소로서, 도핑 기술, (W, Mo) 원소들이 섞인 $(W_xMo_{1-x})Te_2$ 화합물 성장기술 및 화합물 내에 텅스텐/몰리브덴 비율 조절에 따른 물리적 특성의 제어 기술이 개발되어야 한다. 그러나, 종래의 전이금속 칼코젠 화합물 성장방법으로는 이러한 개발을 이룰 수 없었지만, 본 발명의 기술적 사상에 따르면, 고함량 텔루륨 구리(또는 니켈)에 대한 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법을 제공하여 상기 개발이 용이하게 실현 가능할 것으로 기대된다. 예를 들어, 선증착된 텅스텐 또는 몰리브덴 박막 위에 도핑하고자 하는 이질 원소를 전자빔 증착이나 스퍼터링 등을 이용하여 증착하거나 텅스텐과 몰리브덴을 교차 증착방법을 통해 텅스텐/몰리브덴 다층 박막을 형성하여, 성장 공정 시 유동성 구리-텔루륨 공융금속합금 또는 니켈-텔루륨 공융금속합금 기지 내에 주입되는 반응원소들을 조절 및 제어함으로서, 이에 따라 도핑된 텔루륨계 전이금속 칼코젠 화합물이 성장되거나, 텅스텐과 몰리브덴이 섞인 $(W_xMo_{1-x})Te_2$ 화합물이 성장될 수 있다. 뿐만 아니라 텅스텐/몰리브덴 다층박막의 각각의 텅스텐이나 몰리브덴 박막의 두께 조절을 통하여 전이금속 칼코젠 화합물 내의 텅스텐/몰리브덴의 비율을 제어할 수 있다.

[0047] 도 9는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 1차원 형상을 갖는 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 성장 시간에 따른 치수 변화를 나타내는 그래프이다.

[0048] 도 9를 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 반응 시작 후 10분까지는 성장이 촉진되어 두께(thickness), 폭(width), 및 길이(length) 모두 급격하게 증가하였다. 반응 시간이 10분이 경과된 후에는 두께, 폭, 및 길이 모두 거의 변화하지 않았다. 따라서, 10분 정도의 매우 짧은 반응 시간으로 전이금속 칼코젠 화합물을 형성할 수 있음을 알 수 있다.

[0049] 도 10은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물의 두께에 따른 비저항의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0050] 도 10을 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 전이금속 칼코젠 화합물의 두께가 4.7 nm, 15 nm, 및 27 nm로 증가함에 따라 비저항이 증가하였다. 또한, 온도에 대하여는 거의 동일한 수치를 나타내었으나, 두께가 얇으면 (4.7 nm의 경우임) 온도가 증가됨에 따라 비저항이 다소 감소되는 경향을 나타내었고, 두께가 두꺼우면 (27 nm의 경우임) 온도가 증가됨에 따라 비저항이 다소 증가되는 경향을

나타내었다.

[0051] 도 11은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 온도와 비저항의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0052] 도 11을 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 4.7 nm 두께의 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 온도에 따른 저항 값의 변화는 두 개의 특징적인 선형 관계를 나타내며, 고온에서는 Ea가 6.3 meV인 선형 관계, 저온에서는 Ea가 -0.76 meV인 선형관계를 나타내었다.

[0053] 도 12는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 전기적 특성을 측정하기 위한 장치이다.

[0054] 도 12를 참조하면, 1차원 전이금속 칼코젠 화합물(WTe_2 나노 벨트)로 구성된 4 개의 전극을 은/구리의 금속과 접촉시키고, 4점 측정을 통한 전류와 전압을 측정하여 전기적 특성들을 측정하였다.

[0055] 이하에서는, 낮은 전기장을 인가한 경우의 전기적 특성 결과를 도 13 및 도 14을 참조하여 설명하기로 한다.

[0056] 도 13은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 전기장과 전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0057] 도 13을 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 모든 경우에 대하여 전기장이 증가함에 따라 전류밀도가 증가하였다. 그러나, 상기 전이금속 칼코젠 화합물이 9.7 nm의 두께를 가지는 경우, 기울기가 가장 크게 나타났고, 13 nm, 15 nm, 및 48 nm로 상기 전이금속 칼코젠 화합물의 두께가 증가됨에 따라 기울기는 감소되었다. 두께 9.7 nm에 비하여 작은 4.7 nm 두께인 경우의 기울기는 13 nm 두께인 경우의 기울기와 거의 유사한 크기로 나타났다.

[0058] 도 14는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 두께에 따른 비저항 및 전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0059] 도 14를 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 상기 전이금속 칼코젠 화합물의 두께에 대하여 비저항과 전류밀도는 거의 변화되지 않음을 알 수 있다. 다만, 상기 두께가 20 nm를 초과하는 경우에는 전류밀도는 다소 감소하는 경향이 있고, 비저항은 다소 증가되는 경향이 나타났다.

[0060] 이하에서는, 높은 전기장을 인가한 경우의 전기적 특성 결과를 도 15 내지 도 18을 참조하여 설명하기로 한다.

[0061] 도 15는 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 전기장과 전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0062] 도 15를 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 전기장이 증가함에 따라 전류밀도가 증가하지만, 일정한 지점에서 전류밀도가 급격하게 저하되는 항복 현상이 발생한다. 상기 전이금속 칼코젠 화합물의 두께가 4.5 nm의 결과와 13 nm 의 결과를 비교하면, 두 경우 모두 공기 노출된 경우이며, 상기 두께가 작을수록, 상기 항복 지점이 높은 전기장과 높은 전류밀도에서 나타난다. 또한, 공기 노출(air exposure)되고 두께 13 nm인 결과와 덮개층 장착(capped)되고 두께 15 nm와 비교하면, 덮개층이 장착된 경우에 상기 항복 지점이 높은 전기장과 높은 전류밀도에서 나타난다. 또한, 공기 노출된 두께 4.5 nm인 전이금속 칼코젠 화합물의 경우, 최대 100 MA/cm^2에 가까운 매우 높은 항복전류밀도 값을 나타내는데 이는 현 구리 기반 전기배선 소재의 항복전류밀도에 비해 10 배 이상 우수한 값으로 추후 해당소재의 전자소자 내 전기배선으로의 높은 응용가능성을 가짐을 나타낸다.

[0063] 도 16은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 두께(H)와 항복전류밀도의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0064] 도 16을 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 전이금속 칼코젠 화합물의 두께가 감소할수록 항복전류밀도가 증가됨을 알 수 있다. 공기 노출(air exposure), 덮개층 장착(capped), 진공(vacuum) 사이의 차이는 거의 나타나지 않고 유사한 경향을 나타내었다. 전류밀도와 전이금속 칼코젠 화합물의 높이와의 관계는 하기의 관계식 1로 나타낼 수 있다.

[0065] <관계식 1>

[0066] $J_B = C\ H^{-0.5}$

[0067] (여기에서, J_B 는 항복전류밀도, H는 전이금속 칼코젠 화합물의 두께, C는 상수임)

[0068] 도 17은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 항복전류밀도와 비저항의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0069] 도 17을 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 항복전류밀도와 비저항과의 관계는 하기의 관계식 2로 나타낼 수 있다.

[0070] <관계식 2>

[0071] $J_B = C\ \rho^{-m}$

[0072] (여기에서, J_B 는 항복전류밀도, ρ는 비저항, C는 상수임)

[0073] 상기 관계식 2에서 지수 "m"은 공기 노출의 경우는 0.93, 덮개층 장착의 경우는 0.61, 진공의 경우는 0.55로 나타난다. 상기 "m" 수치의 크기에 따라 공기 노출의 경우에는 덮개층 장착 또는 진공의 경우에 비하여 파괴가 빨리 발생됨을 알 수 있다. 또한, 덮개층 장착의 경우는 진공의 경우에 비하여 파괴가 빠르게 발생한다.

[0074] 도 18은 본 발명의 일실시예에 따른 전이금속 칼코젠 화합물의 제조 방법에 의하여 형성된 전이금속 칼코젠 화합물에 대한 인가 전력과 파괴 직전 온도의 관계를 나타내는 그래프이다.

[0075] 도 18을 참조하면, 전이금속 칼코젠 화합물로서 WTe_2 나노 벨트에 대한 결과가 나타나 있다. 인가 전력(P)과 파괴 직전 온도(T_{max})의 관계는 하기의 관계식 3으로 나타낼 수 있다.

[0076] <관계식 3>

[0077] $T_{max} = T_0 + P/gL$

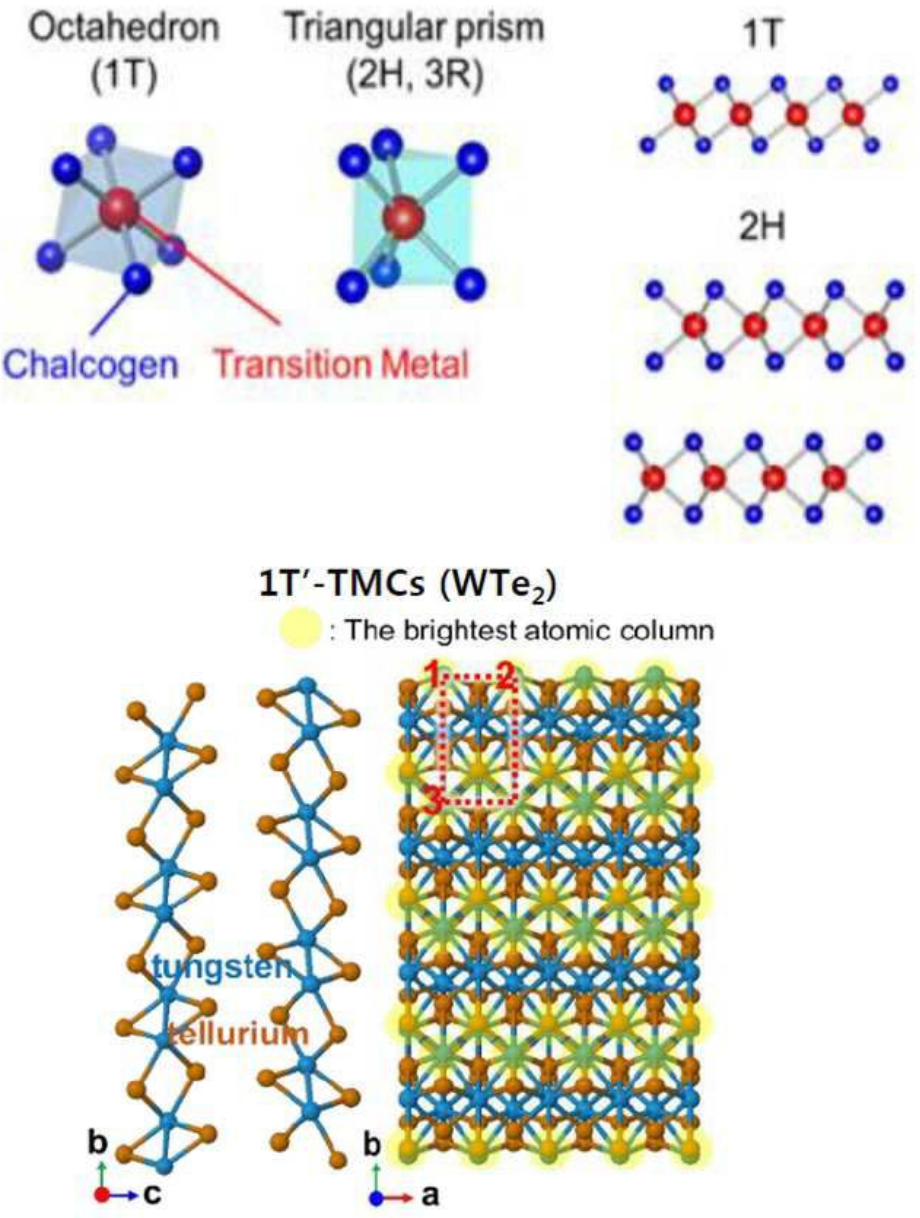
[0078] (여기에서, T_{max} 는 파괴 직전 온도, P는 인가전력, g는 열전달계수, L은 나노 벨트의 길이임)

[0079] 상기 관계식 3은 공기 노출, 덮개층 장착, 진공의 경우 모두에 적용될 수 있다.

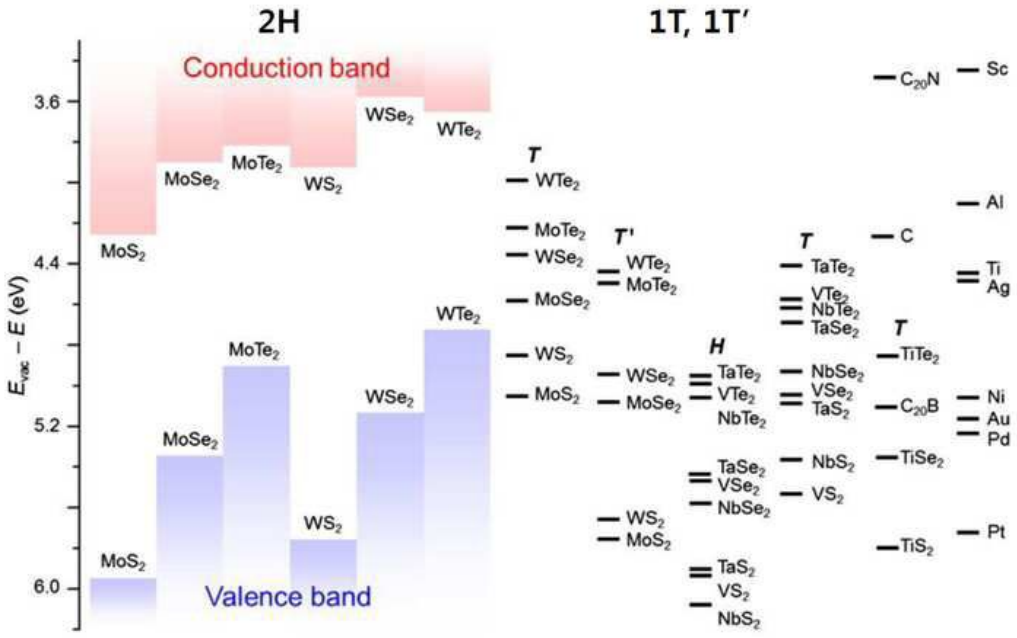
[0081] 이상에서 설명한 본 발명의 기술적 사상이 전술한 실시예 및 첨부된 도면에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 여러 가지 치환, 변형 및 변경이 가능하다는 것은, 본 발명의 기술적 사상이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 있어 명백할 것이다.

도면

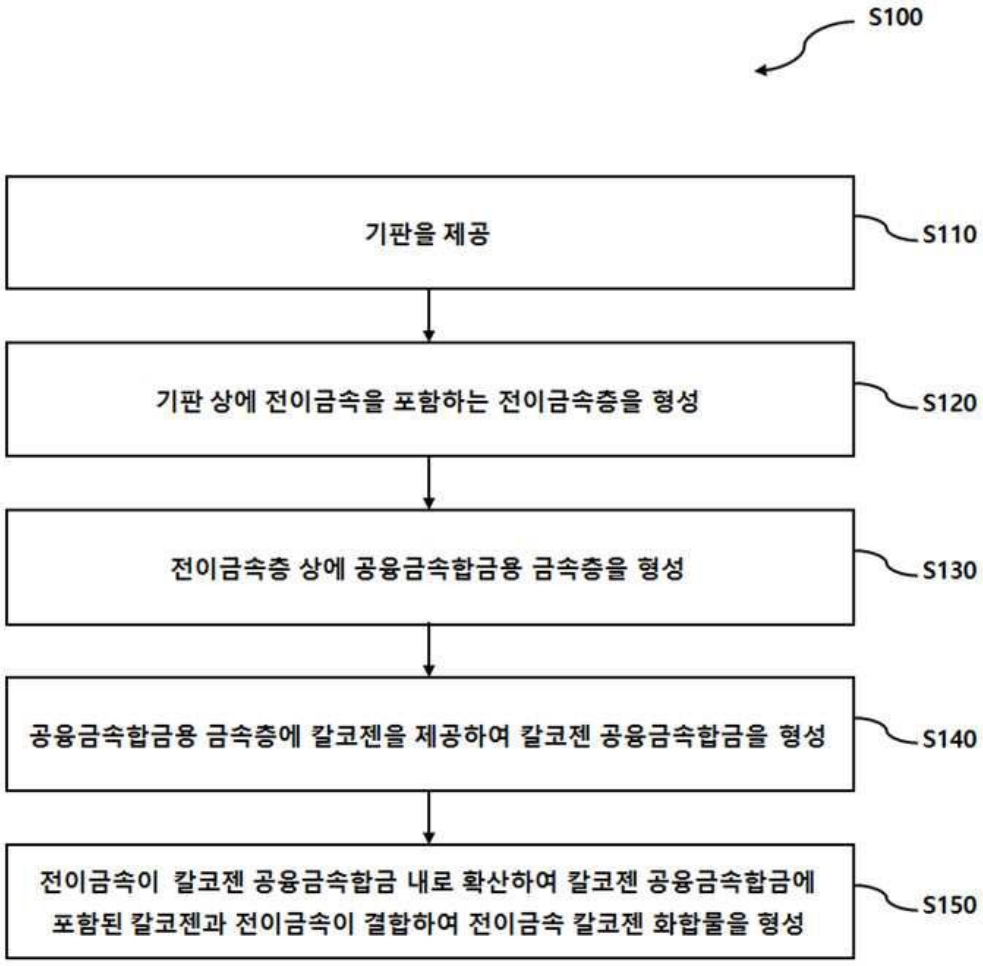
도면1


Octahedron
(1T)
Triangular prism
(2H, 3R)
Chalcogen
Transition Metal
1T
2H
1T′-TMCs (WTe_2)
: The brightest atomic column
1
2
3
tungsten
tellurium
b
c
b
a

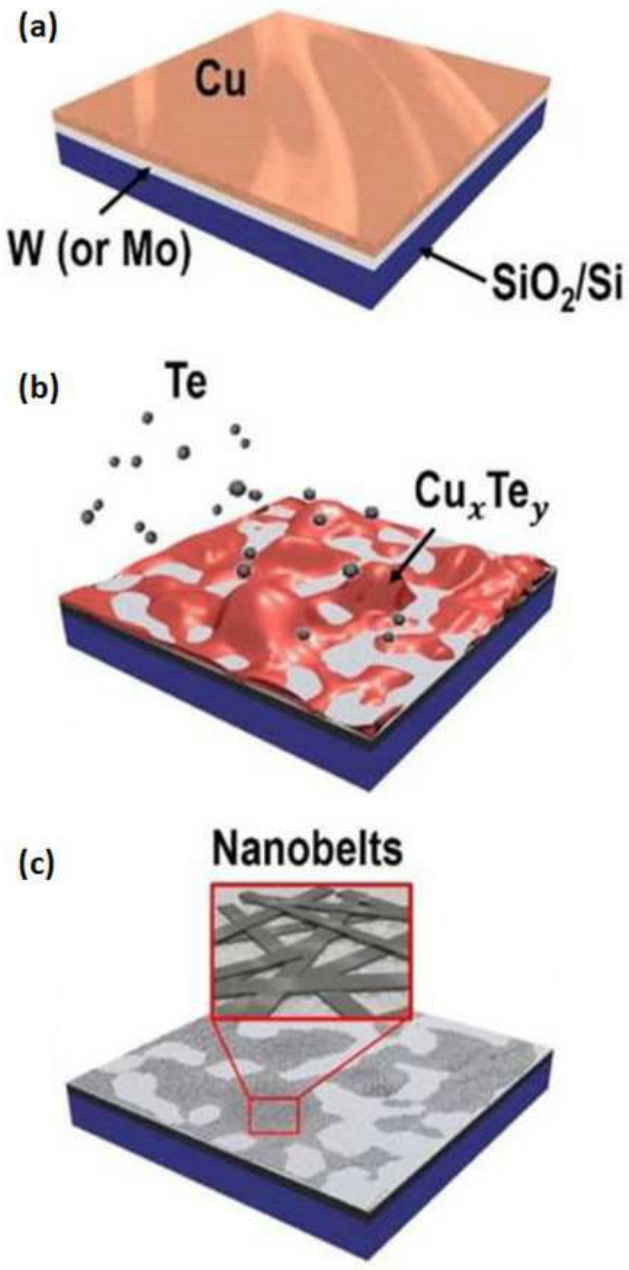
도면2


2H
1T, 1T′
Conduction band
Valence band
$E_{vac} - E$ (eV)
3.6
4.4
5.2
6.0
MoS_2
$MoSe_2$
$MoTe_2$
WS_2
WSe_2
WTe_2
T
T′
H
$TaTe_2$
VTe_2
$NbTe_2$
$TaSe_2$
VSe_2
$NbSe_2$
TaS_2
VS_2
NbS_2
$TiTe_2$
$TiSe_2$
TiS_2
$C_{20}N$
$C_{20}B$
C
Sc
Al
Ti
Ag
Ni
Au
Pd
Pt

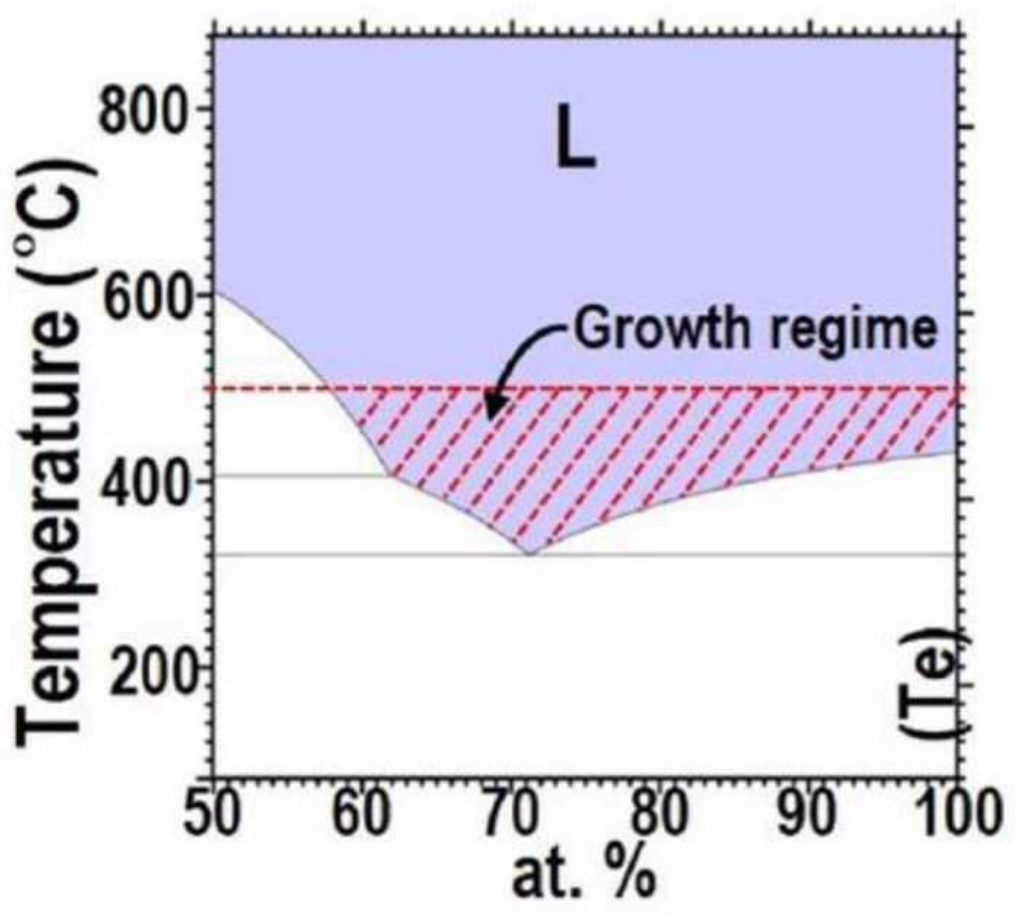
도면3


S100
기판을 제공
S110
기판 상에 전이금속을 포함하는 전이금속층을 형성
S120
전이금속층 상에 공융금속합금용 금속층을 형성
S130
공융금속합금용 금속층에 칼코젠을 제공하여 칼코젠 공융금속합금을 형성
S140
전이금속이 칼코젠 공융금속합금 내로 확산하여 칼코젠 공융금속합금에 포함된 칼코젠과 전이금속이 결합하여 전이금속 칼코젠 화합물을 형성
S150

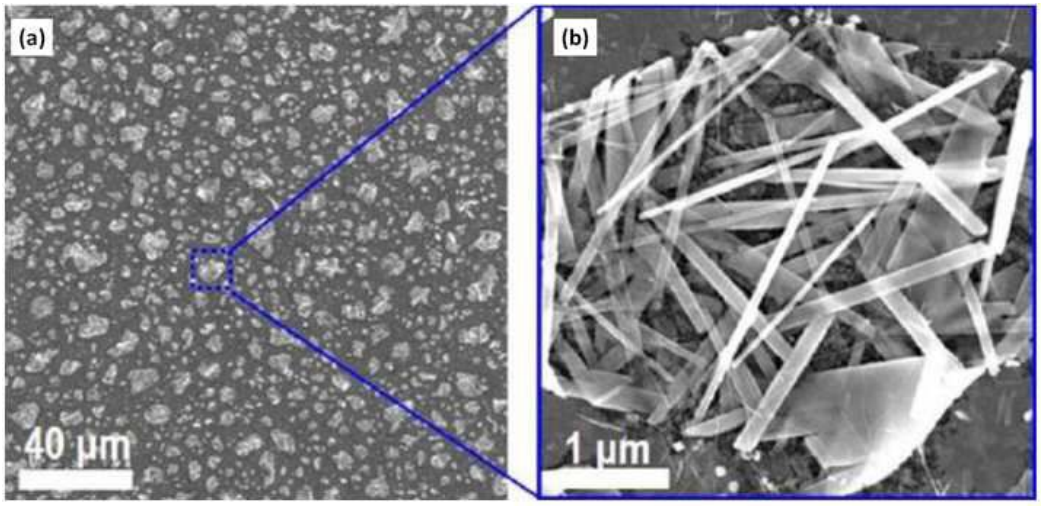
도면4



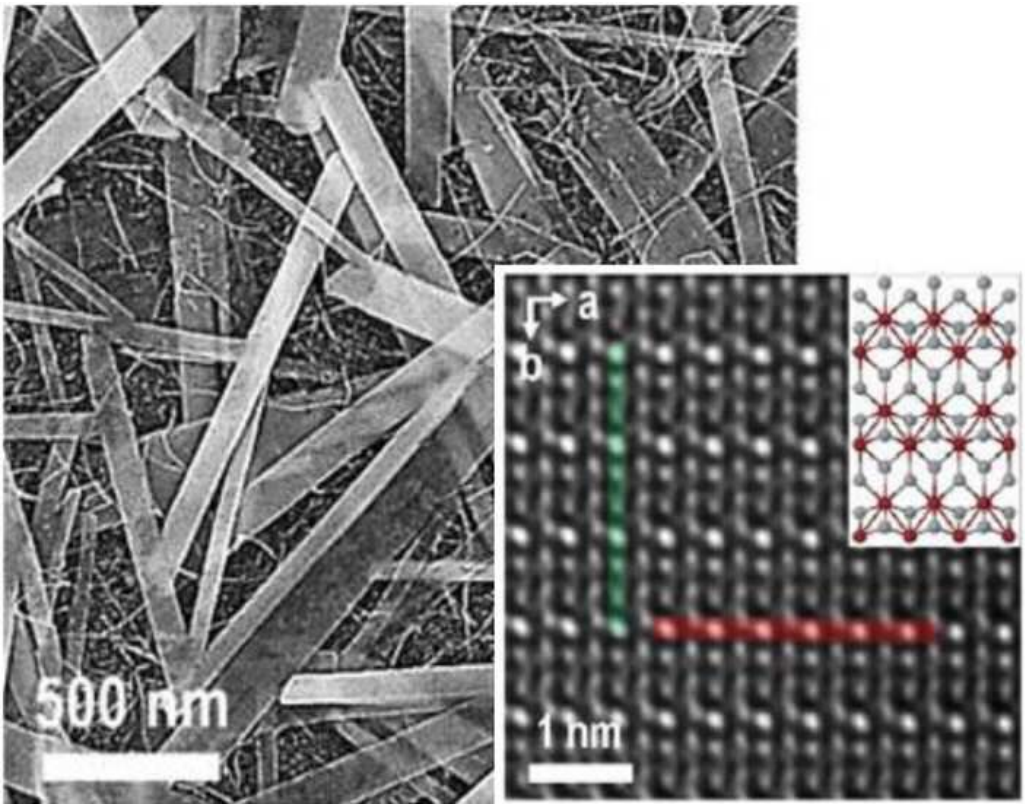
도면5


L
Growth regime
Temperature (°C)
800
600
400
200
50
60
70
80
90
100
at. %
(Te)

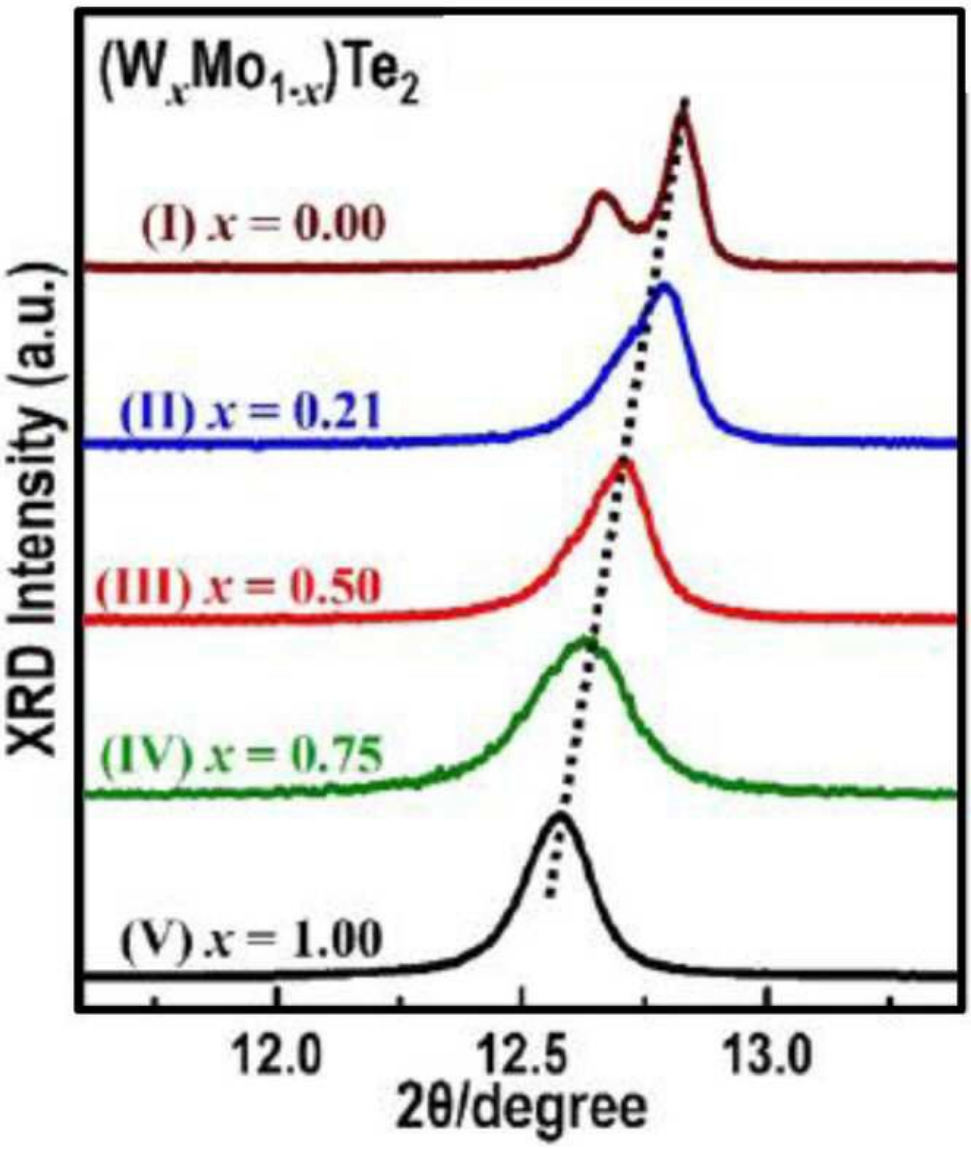
도면6


(a)
40 μm
(b)
1 μm

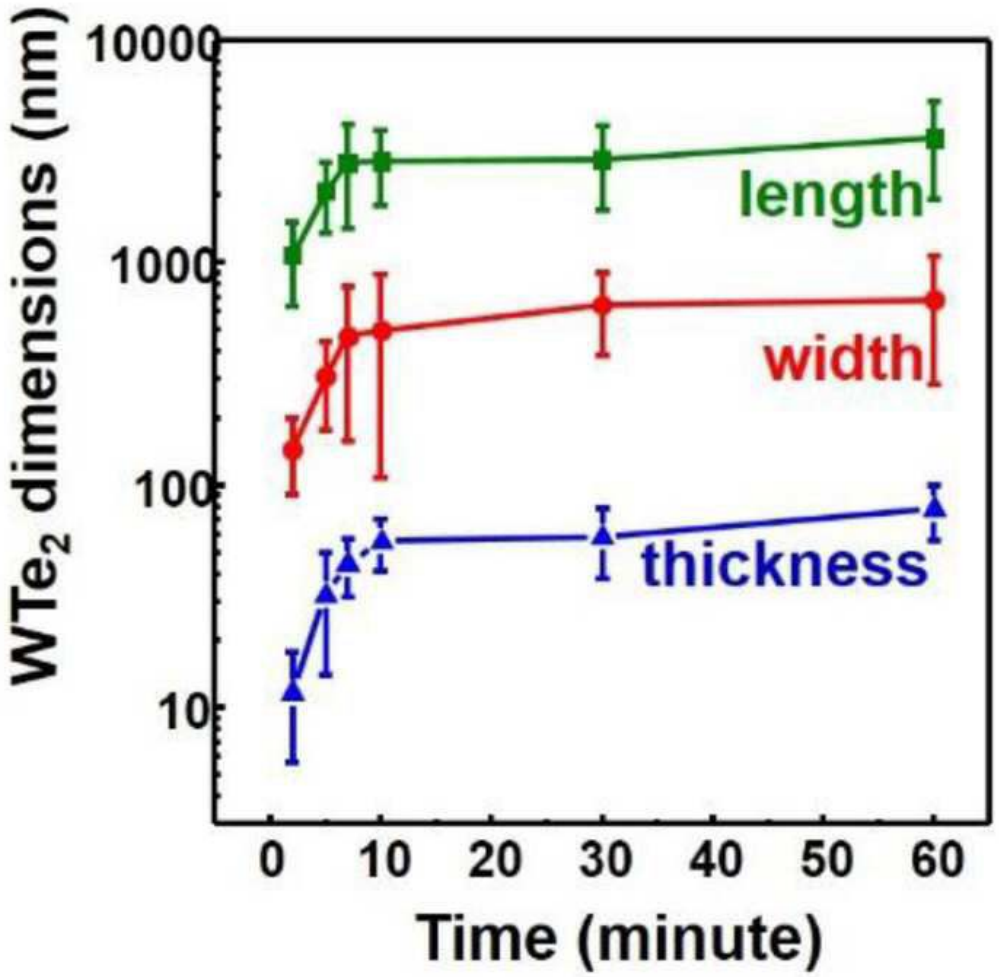
도면7



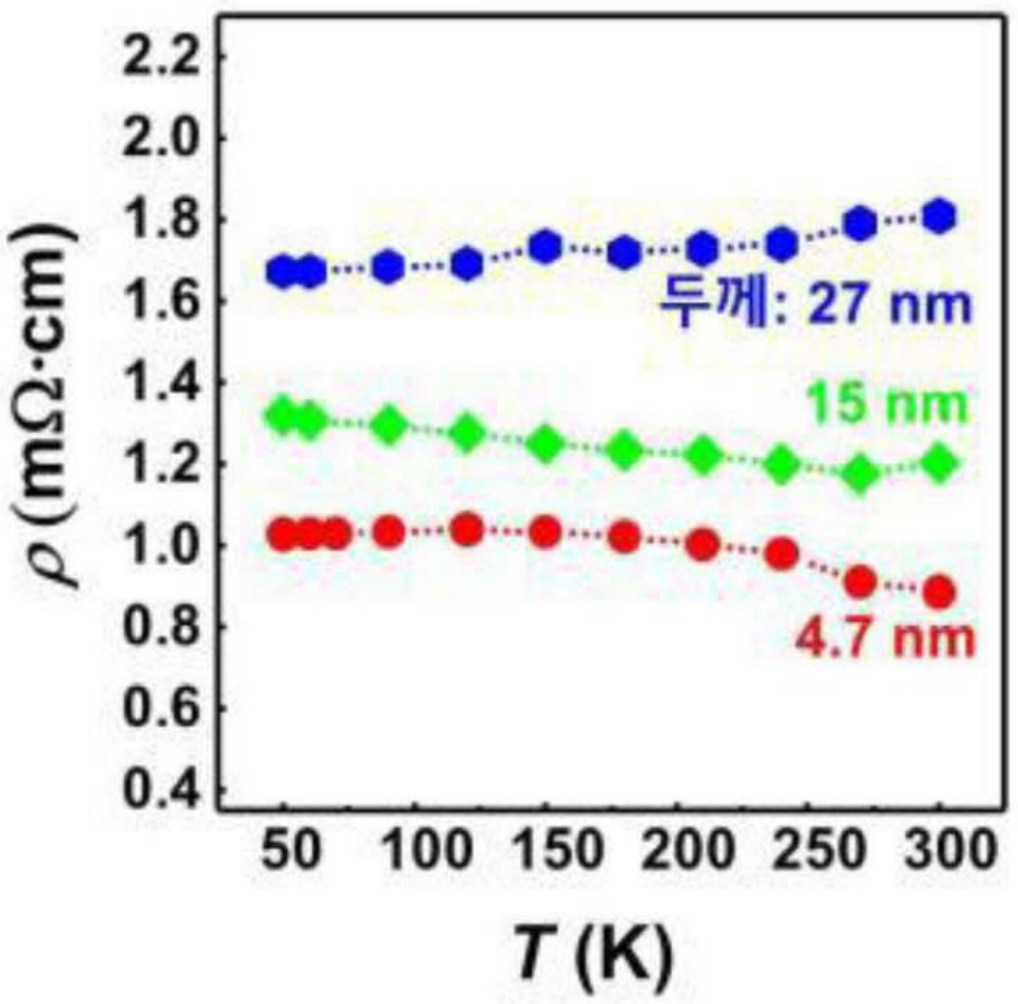
도면8


(W$_x$Mo$_{1-x}$)Te$_2$
(I) x = 0.00
(II) x = 0.21
(III) x = 0.50
(IV) x = 0.75
(V) x = 1.00
XRD Intensity (a.u.)
12.0
12.5
13.0
2θ/degree

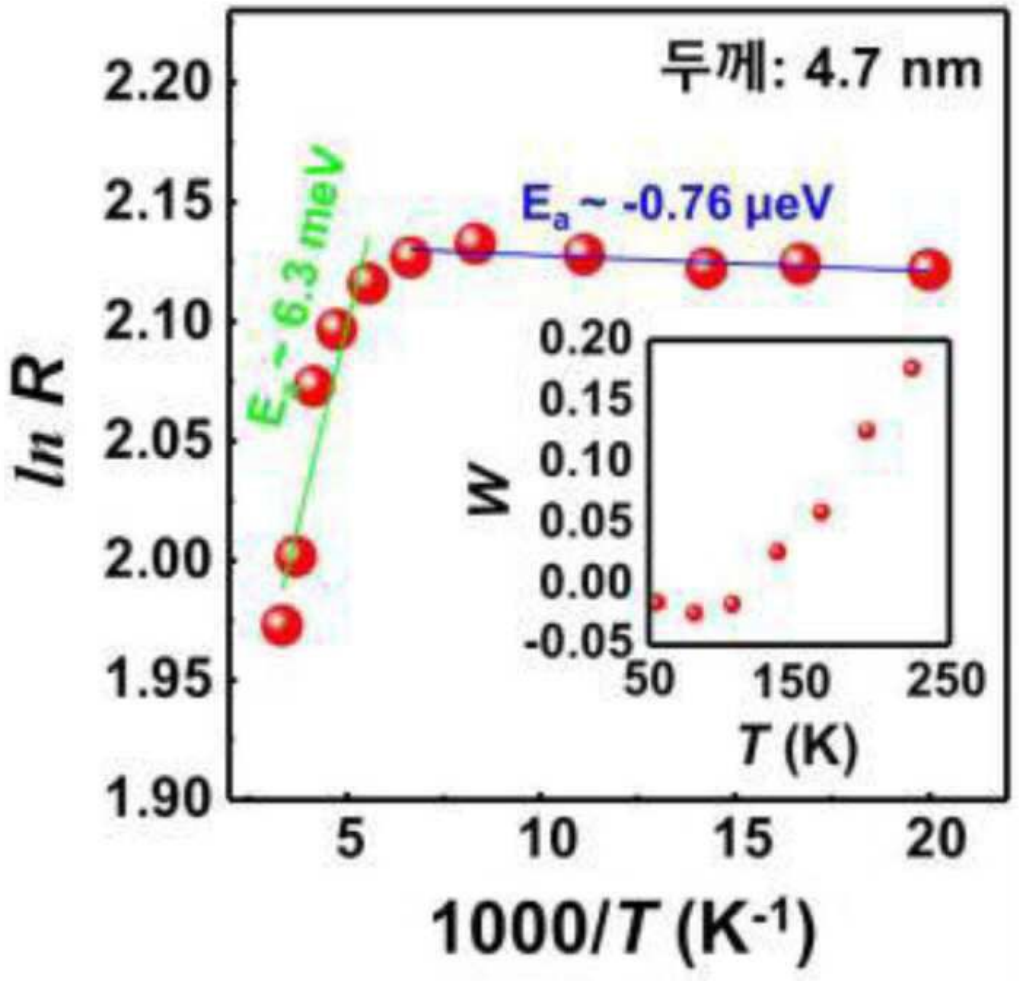
도면9


WTe2 dimensions (nm)
10000
1000
100
10
length
width
thickness
0
10
20
30
40
50
60
Time (minute)

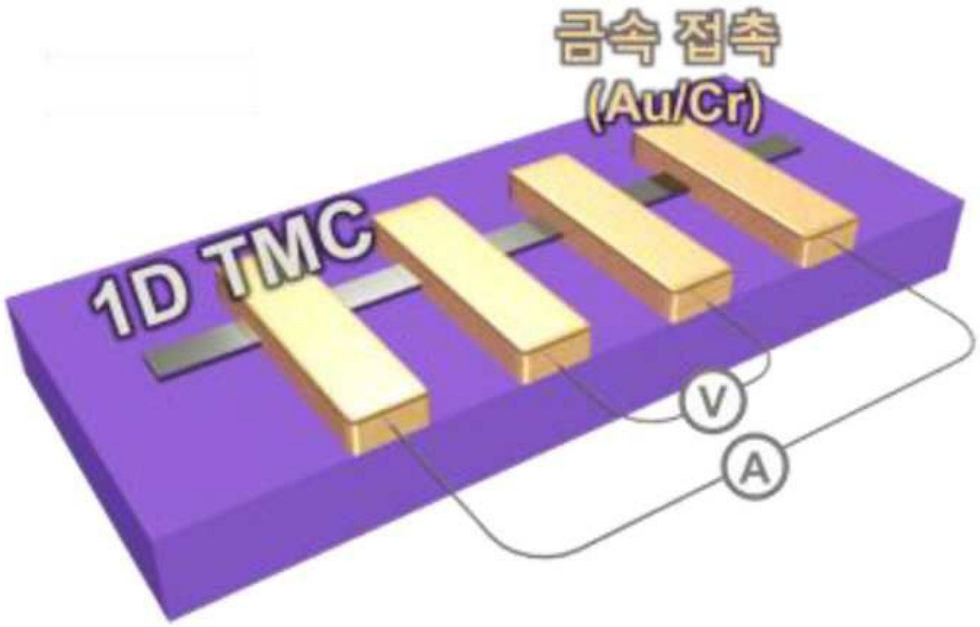
도면10


2.2
2.0
1.8
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
ρ (mΩ·cm)
50
100
150
200
250
300
T (K)
두께: 27 nm
15 nm
4.7 nm

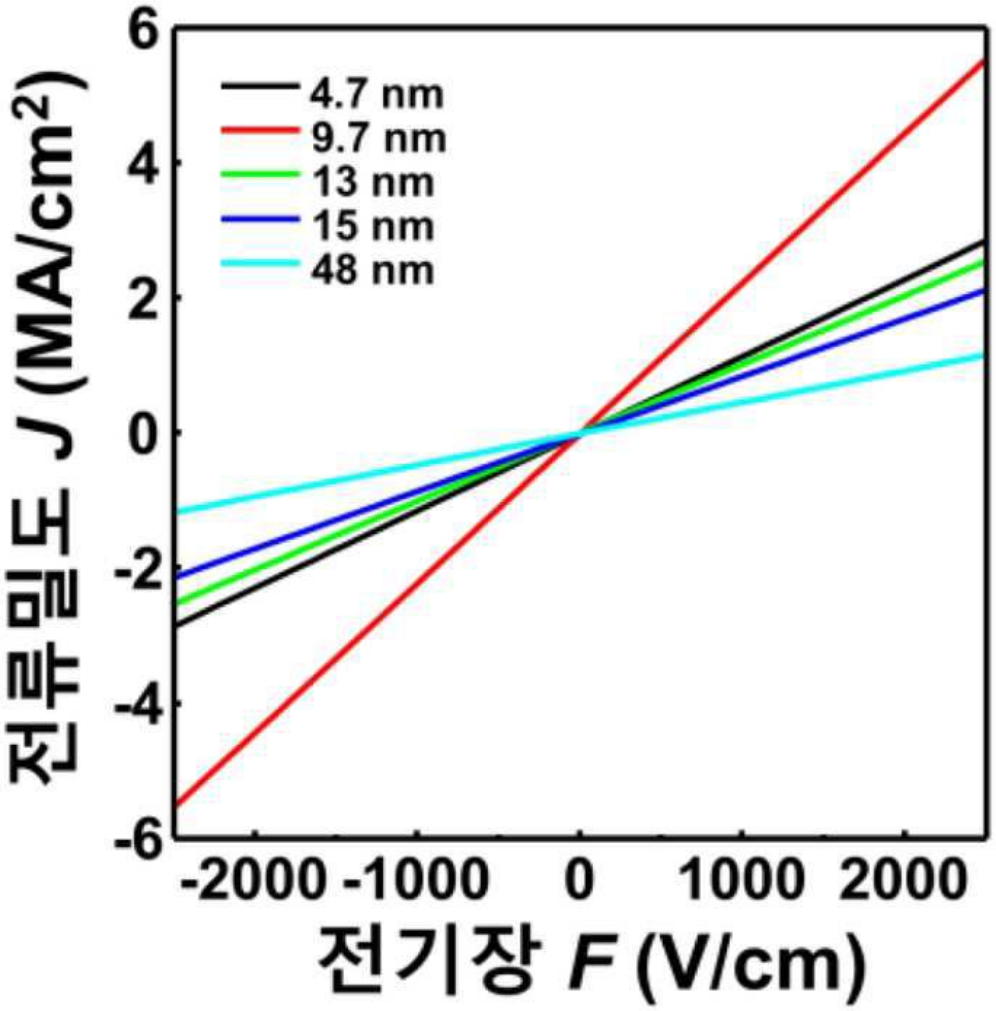
도면11


두께: 4.7 nm
E_a ~ -0.76 μeV
E_a ~ 6.3 meV
ln R
2.20
2.15
2.10
2.05
2.00
1.95
1.90
5
10
15
20
1000/T (K^{-1})
W
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
-0.05
50
150
250
T (K)

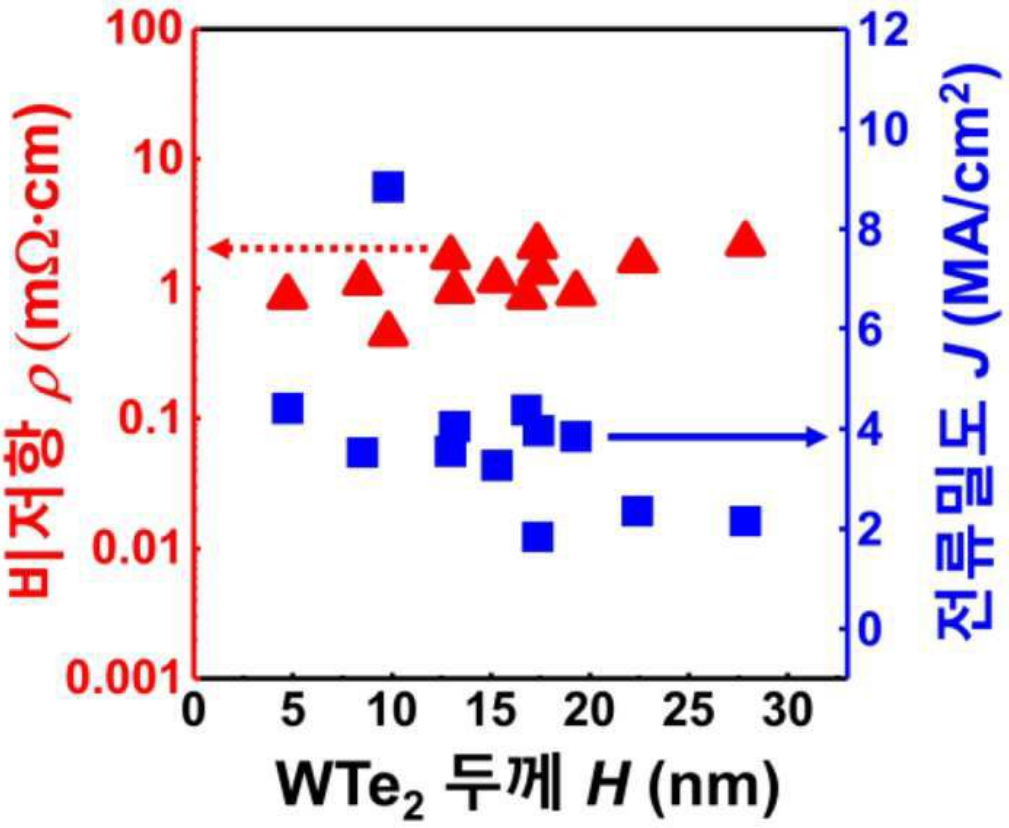
도면12


금속 접촉
(Au/Cr)
1D TMC
V
A

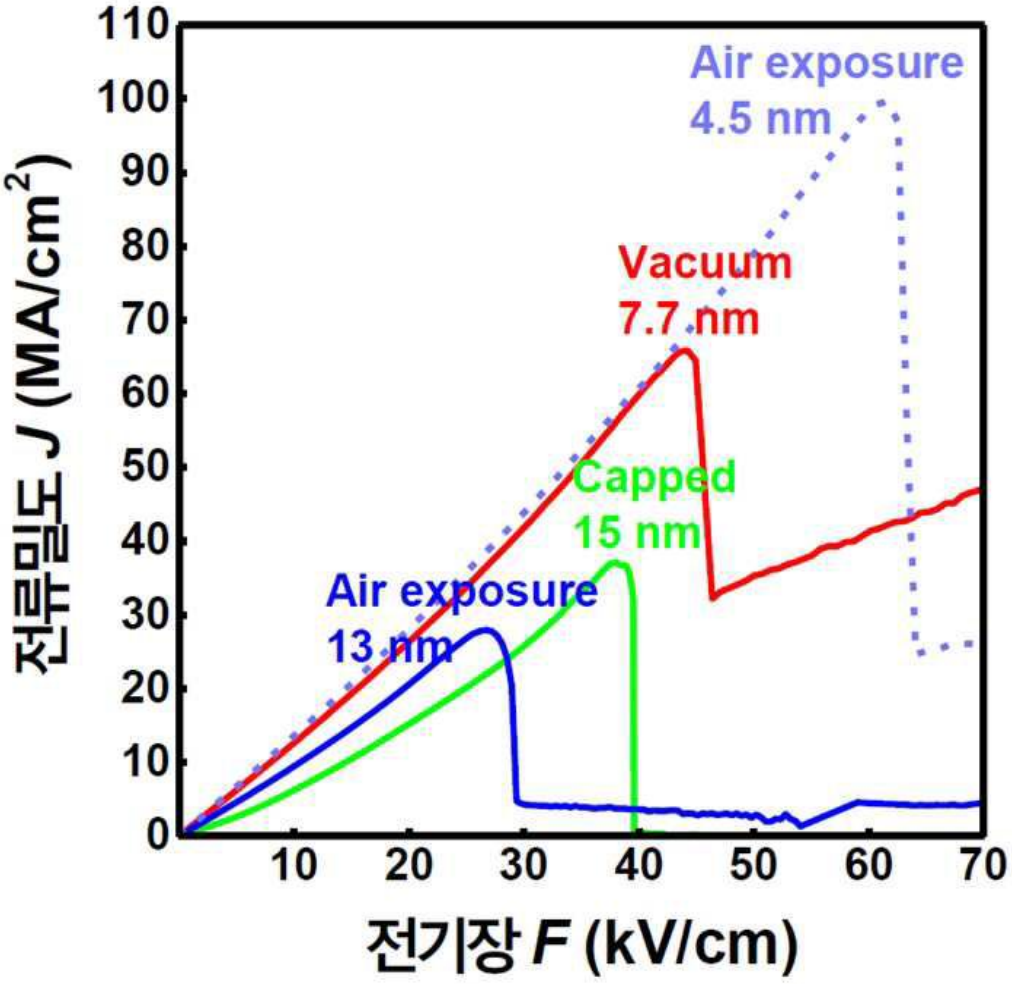
도면13


4.7 nm
9.7 nm
13 nm
15 nm
48 nm
전류밀도 J (MA/cm²)
6
4
2
0
-2
-4
-6
-2000
-1000
0
1000
2000
전기장 F (V/cm)

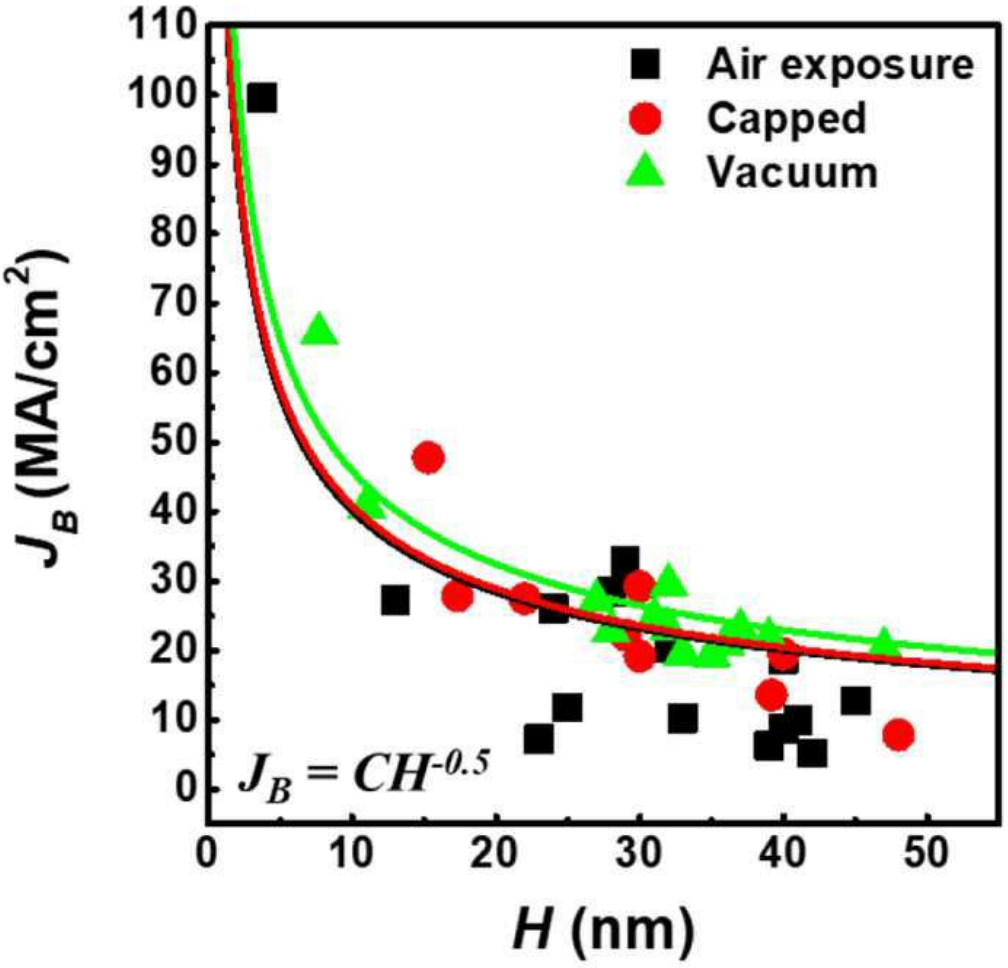
도면14


100
10
1
0.1
0.01
0.001
비저항 ρ (mΩ·cm)
12
10
8
6
4
2
0
전류밀도 J (MA/cm²)
0
5
10
15
20
25
30
WTe2 두께 H (nm)

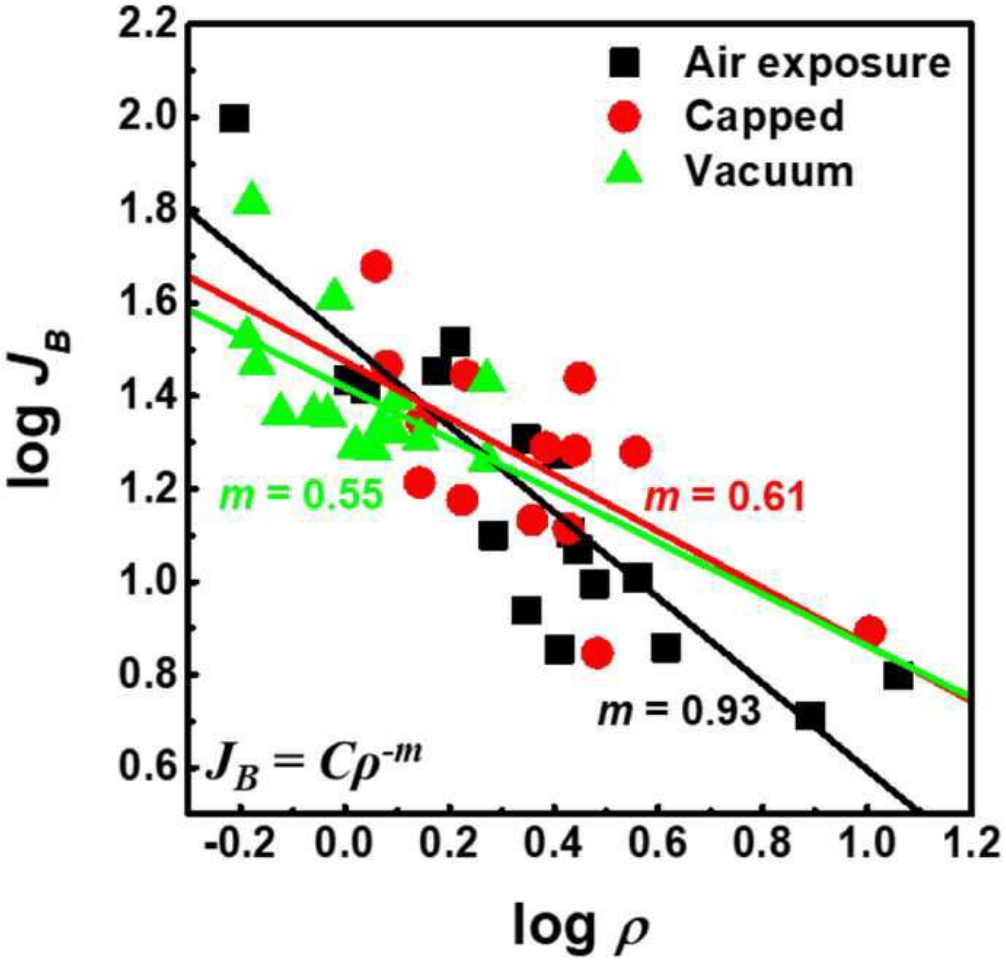
도면15


Air exposure
4.5 nm
Vacuum
7.7 nm
Capped
15 nm
Air exposure
13 nm
전류밀도 J (MA/cm²)
전기장 F (kV/cm)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
10
20
30
40
50
60
70

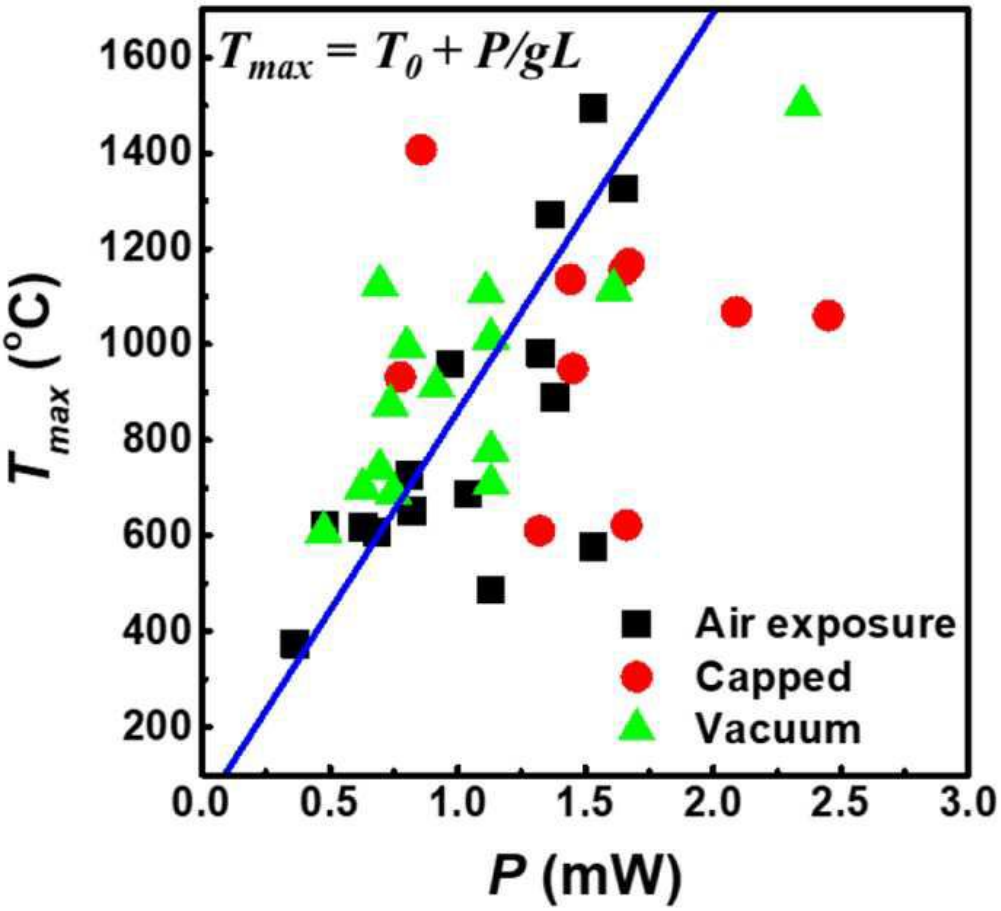
도면16


Air exposure
Capped
Vacuum
$J_B = CH^{-0.5}$
J_B (MA/cm^2)
H (nm)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110

도면17


Air exposure
Capped
Vacuum
m = 0.55
m = 0.61
m = 0.93
$J_B = C\rho^{-m}$
log J_B
log ρ
2.2
2.0
1.8
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
-0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2

도면18


$T_{max} = T_0 + P/gL$
T_{max} (°C)
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
P (mW)
Air exposure
Capped
Vacuum