



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0144540
(43) 공개일자 2022년10월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/383 (2006.01) H01L 21/02 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 21/383 (2013.01)
H01L 21/02568 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0050987
(22) 출원일자 2021년04월20일
심사청구일자 2021년04월20일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암
동5가)
(72) 발명자
김지현
서울특별시 강남구 도곡로93길 12, 205동 302호
박현익
서울특별시 성북구 안암로9가길 9-27, 301호
김중현
서울특별시 성북구 안암로 145
(74) 대리인
정은열, 김태훈

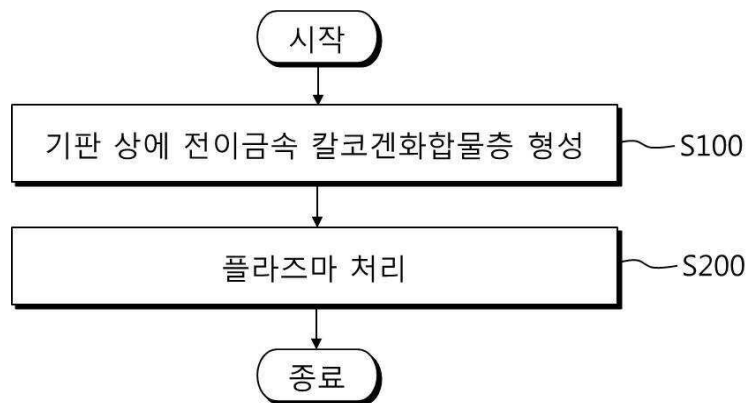
전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 발명의 명칭 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법

(57) 요약

본 발명은 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법에 관한 것으로, 본 발명의 일 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법은 기판 상에, 전이금속 칼코겐화합물을 성장 또는 전사시켜, 전이금속 칼코겐화합물층을 형성하는 단계(S100), 및 플라즈마 챔버 내에 전이금속 칼코겐화합물층을 배치하고, 진공 조건에서 플라즈마 발생 기체를 흘려주면서 플라즈마 처리하는 단계(S200)를 포함한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H01L 21/02612 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345313941
과제번호	2018R1D1A1A09083917
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(교육부)(R&D)
연구과제명	방사선 조사를 통한 hexagonal boron nitride 초박막의 물성제어 연구
기 여 율	1/2
과제수행기관명	고려대학교
연구기간	2020.03.01 ~ 2021.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415168352
과제번호	20202010100010
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	에너지수요관리핵심기술개발(에특)(R&D)
연구과제명	PFC 가스 대체용 Fluoro-ether 및 Fluoro-alcohol 계열 Precursor를 이용한 식각공
정 기술 개발	
기 여 율	1/2
과제수행기관명	아주대학교산학협력단
연구기간	2020.01.01 ~ 2020.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

(a) 기판 상에, 전이금속 칼코겐화합물을 성장 또는 전사시켜, 전이금속 칼코겐화합물층을 형성하는 단계; 및
(b) 플라즈마 챔버 내에 상기 전이금속 칼코겐화합물층을 배치하고, 진공 조건에서 플라즈마 발생 기체를 흘려 주면서 플라즈마 처리하는 단계;를 포함하는 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 (b) 단계에서, 상기 플라즈마 처리를 통해 발생한 이온이 상기 전이금속 칼코겐화합물층에 결함을 형성하여, 상기 전이금속 칼코겐화합물을 n형으로 도핑하는 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 플라즈마 발생 기체는, 아르곤(Ar)인 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 플라즈마 챔버는, RIE(Reactive Ion Etcher) 챔버이고,

상기 (b) 단계에서, 상기 아르곤을 50 sccm 이하로 흘려준 상태에서, 20W 이하의 전력을 인가하는 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 (a) 단계와, 상기 (b) 단계 사이에, 상기 전이금속 칼코겐화합물층의 상부 영역 중 일부에 패터닝된 보호층을 배치하는 단계;를 포함하여,

상기 보호층이 미배치된 영역에 대해서만 선택적으로 도핑하는 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 보호층은, 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal Boron Nitride, h-BN)로 이루어진 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법.

발명의 설명

기술분야

[0001] 본 발명은 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 플라즈마 처리를 통해 이차원 전이금속 칼코겐화합물을 n형으로 도핑하는 기술에 관한 것이다.

배경기술

[0003] 이차원 물질은 한 층 내에서 원자들 간 공유결합으로 매우 강하게 결합되지만 그 층들은 서로 약하게 결합되어 층층이 쌓여있는 형태로 존재한다. 이러한 특징으로 인해 이차원 물질은 단일 층 또는 수 층의 극초박막으로 쉽게 박리된다. 대표적인 이차원 물질로서 그래핀이 있는데, 그래핀은 열적, 전기적 전도율, 전하 이동도, 기계적 강도 등이 우수하지만, 제로 밴드갭의 특성 때문에 반도체로 활용하기 부적합하고, 밴드갭을 증가시키기 위해 도핑, 미세구조 개질 등을 시도할 경우 이동도가 급격히 저하되는 등 우수한 반도체 특성을 얻는 데에 한계가 있다. 이에 새로운 이차원 반도체 물질에 대한 연구가 진행되었고, 그 결과 전이금속 칼코겐화합물(Transition Metal Dichalcogenides, TMD)이 최근 각광받고 있다.

[0004] 전이금속 칼코겐화합물은 MX_2 의 화학식으로 나타내는데, 여기서 M은 전이금속원소, X는 칼코겐 원소로서 서로 공유결합을 하고 있다. 전이금속 칼코겐화합물은 구성 원소에 따라 금속, 초전도, 또는 반도체 특성을 나타내며, 그 중 반도체 특성을 나타내는 물질로는 황화물, 셀렌화물, 텔루화물 등이다.

[0005] 수 원자층 두께의 전이금속 칼코겐 화합물 이차원 반도체 물질은 스위칭 소자 등에 활용하기에 적합한 밴드갭 에너지를 가지며, 높은 이동도와 우수한 광반응성, 그리고 dangling bond가 없다는 점, 구조적 안정성, 실리콘에 뒤지지 않는 고이동도, 직접천이 특성 등으로 인해 차세대 전자소자용, 더 나아가 실리콘 반도체 대체 소재로서의 가능성도 인정받고 있다. 이차원 반도체 물질을 기반으로 한 반도체 집적회로는 n형 반도체뿐만 아니라 p형 반도체를 필요로 하고, 특히 전이금속 칼코겐화합물은 우수한 특성에도 불구하고, 낮은 캐리어 농도와 높은 컨택 저항으로 인해 성능이 제한되므로 도핑이 필수적이다. 하기 선행기술문헌의 특허문헌에 개시된 바와 같이, 도핑된 전이금속 칼코겐화합물 박막은 반도체를 기반으로 하는 트랜지스터, 광학센서, 발광소자, 광검출기, 광자기 메모리 소자, 광축매, 평면 디스플레이, 태양전지 등에 사용 가능하다.

[0006] 이러한 이차원 반도체 물질을 도핑하기 위한 방법으로는, 화학물질을 이용하여 분극 현상을 유발시키는 방법, 전하 이동이 활발한 물질을 이차원 반도체 물질 위에 코팅하여 전자 혹은 정공을 이차원 반도체 물질로 이동시키는 방법, 이차원 반도체 물질 성장 시 불순물을 주입하는 방법 등이 있다.

[0007] 그러나 상기 도핑 방법을 이용해 이차원 반도체 물질을 도핑하는 경우, 이차원 반도체 물질의 선택적 도핑이 불가능하여 반도체 집적회로에 적용하기 곤란하다. 또한, 화학물질을 이용한 도핑은 화학물질과의 반응 때문에 소재가 손상될 수 있어, 특히 플렉시블 전자 소자 등에 적용이 어렵다.

[0008] 이에 종래 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법의 문제점을 해결하기 위한 방안이 절실히 요구되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0010] (특허문헌 0001) KR 10-1465211 B1

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명은 상술한 종래기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 본 발명의 일측면은 플라즈마 처리를 통해 전이금속 칼코겐화합물에 결함을 형성하여 n형 도핑하는 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법을 제공하는 데 있다.

[0012] 본 발명의 다른 측면은 전이금속 칼코겐화합물의 상부에 보호층을 형성하여 선택적인 영역에 대해서만 도핑이

가능한 전이금속 칼코겐 화합물 도핑 방법을 제공하고자 하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0014] 본 발명의 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법은 (a) 기판 상에, 전이금속 칼코겐화합물을 성장 또는 전사시켜, 전이금속 칼코겐화합물층을 형성하는 단계; 및 (b) 플라즈마 챔버 내에 상기 전이금속 칼코겐화합물층을 배치하고, 진공 조건에서 플라즈마 발생 기체를 흘려주면서 플라즈마 처리하는 단계;를 포함한다.
- [0015] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법에 있어서, 상기 (b) 단계에서, 상기 플라즈마 처리를 통해 발생한 이온이 상기 전이금속 칼코겐화합물층에 결합을 형성하여, 상기 전이금속 칼코겐화합물을 n형으로 도핑한다.
- [0016] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법에 있어서, 상기 플라즈마 발생 기체는, 아르곤(Ar)일 수 있다.
- [0017] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법에 있어서, 상기 플라즈마 챔버는, RIE(Reactive Ion Etcher) 챔버이고, 상기 (b) 단계에서, 상기 아르곤을 50 sccm 이하로 흘려준 상태에서, 20W 이하의 전력을 인가할 수 있다.
- [0018] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법에 있어서, 상기 (a) 단계와, 상기 (b) 단계 사이에, 상기 전이금속 칼코겐화합물층의 상부 영역 중 일부에 패터닝된 보호층을 배치하는 단계;를 포함하여, 상기 보호층이 미배치된 영역에 대해서만 선택적으로 도핑할 수 있다.
- [0019] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법에 있어서, 상기 보호층은, 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal Boron Nitride, h-BN)로 이루어질 수 있다.
- [0021] 본 발명의 특징 및 이점들은 첨부도면에 의거한 다음의 상세한 설명으로 더욱 명백해질 것이다.
- [0022] 이에 앞서 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이고 사전적인 의미로 해석되어서는 아니되며, 발명자가 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

발명의 효과

- [0024] 본 발명에 따르면, 전이금속 칼코겐화합물에 플라즈마 처리를 진행함으로써, 이온으로 하여금 전이금속 칼코겐화합물에 결합을 형성시켜 n형으로 도핑하므로, 본래 물성을 변화시키지 않고, 기존의 장비를 이용해 간단하게 전이금속 칼코겐화합물을 도핑할 수 있다.
- [0025] 또한, 전이금속 칼코겐화합물의 상부에 보호층을 배치하여, 선택적인 영역에 원하는 정도의 도핑이 가능하다.
- [0026] 나아가 이차원 전이금속 칼코겐화합물의 n형 도핑을 통해 트랜지스터의 제작을 가능하게 하고, 이와 더불어 p형 반도체와의 접합이나 p형 도핑 방법과 혼합하여 complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS), 태양전지, 다이오드 등의 제작에 도움을 주는 등 전이금속 칼코겐화합물의 산업적 용용에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

도면의 간단한 설명

- [0028] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법의 순서도이다.
- 도 2 내지 도 3은 본 발명의 다른 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법의 순서도이다.
- 도 4는 실시예의 Ar 플라즈마 처리 시간의 증가에 따른 WSe₂의 I-V transfer characteristic의 변화를 나타내는 그래프이다

도 5는 실시예의 h-BN이 전사된 WSe₂의 영역의 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM) 및 고속 푸리에 변환(fast fourier transform) 이미지이다.

도 6은 실시예의 h-BN이 전사되지 않은 WSe₂의 영역의 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM) 및 고속 푸리에 변환(fast fourier transform) 이미지이다.

도 7은 실시예의 Ar 플라즈마 처리 시간의 증가에 따른 h-BN, h-BN으로 보호된 WSe₂, 및 h-BN으로 보호되지 않은 WSe₂ 영역의 라만 스펙트라(Raman spectra)이다.

도 8은 실시예의 h-BN이 전사되지 않은 WSe₂의 영역 및 h-BN이 전사된 영역에 대한 KPFM data이다.

도 9는 전이금속 칼코겐화합물을 플라즈마 처리를 통해 n형 도핑하여 제작한 CMOS 인버터, 및 그 성능 결과 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0029] 본 발명의 목적, 특정한 장점들 및 신규한 특징들은 첨부된 도면들과 연관되어지는 이하의 상세한 설명과 바람직한 실시예들로부터 더욱 명백해질 것이다. 본 명세서에서 각 도면의 구성요소들에 참조번호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 번호를 가지도록 하고 있음에 유의하여야 한다. 또한, "제1", "제2" 등의 용어는 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하기 위해 사용되는 것으로, 구성요소가 상기 용어들에 의해 제한되는 것은 아니다. 이하, 본 발명을 설명함에 있어서, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 관련된 공지 기술에 대한 상세한 설명은 생략한다.

[0030] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세히 설명하기로 한다.

[0032] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법의 순서도이다.

[0033] 도 1에 도시된 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법은 기판 상에, 전이금속 칼코겐화합물을 성장 또는 전사시켜, 전이금속 칼코겐화합물층을 형성하는 단계(S100), 및 플라즈마 챔버 내에 전이금속 칼코겐화합물층을 배치하고, 진공 조건에서 플라즈마 발생 기체를 흘려주면서 플라즈마 처리하는 단계(S200)를 포함한다.

[0035] 본 발명은 전이금속 칼코겐화합물을 도핑하는 방법에 관한 것이다. 전이금속 칼코겐화합물은 이차원 반도체 물질로서, MX₂의 화학식으로 나타내는데, 여기서 M은 전이금속원소, X는 칼코겐 원소로서 서로 공유결합을 하고 있고, 구성 원소에 따라 금속, 초전도, 또는 반도체 특성을 나타내며, 그 중 반도체 특성을 나타내는 물질로는 황화물, 셀렌화물, 텔루륨화물 등이 있다. MoSe₂, WSe₂, MoTe₂, MoS₂, WS₂ 등이 반도체 특성을 가지는 대표적인 전이금속 칼코겐화합물에 속한다. 전이금속 칼코겐화합물은 스위칭 소자 등에 활용하기에 적합한 밴드갭 에너지를 가지며, 높은 이동도와 우수한 광반응성, 그리고 dangling bond가 없다는 점, 구조적 안정성, 실리콘에 뒤지지 않는 고이동도, 직접천이 특성 등을 가지지만, 낮은 캐리어 농도와 높은 컨택 저항으로 인해 성능이 제한되므로 도핑이 필수적이다. 다만, 화학물질을 이용하여 분극 현상을 유발하거나, 전하 이동이 활발한 물질을 이차원 반도체 물질 위에 코팅하는 종래 도핑 방법 등의 경우에는 선택적 도핑이 불가능하고, 화학물질과의 반응으로 인한 소재 손상이 문제되는바, 이에 대한 해결방안으로서 본 발명이 안출되었다.

[0036] 구체적으로, 본 발명에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법은, 전이금속 칼코겐화합물층 형성 단계(S100), 및 플라즈마 처리 단계(S200)를 포함한다.

[0038] 전이금속 칼코겐화합물층 형성 단계(S100)는 기판 상에 전이금속 칼코겐화합물을 성장 또는 전사시켜 전이금속 칼코겐화합물층을 생성하는 공정이다. 전이금속 칼코겐화합물의 성장은 화학기상증착법(CVD), 플라즈마 화학기상증착법(PECVD), 원자층증착법(ALD) 등을 이용할 수 있으며, 전이금속 칼코겐화합물의 성장이 가능하지만 하면 특별한 제한은 없다. 전이금속 칼코겐화합물의 전사는 기계적 박리된 박막의 전사, 화학적 방법을 통한 전사 등으로 가능하며, 그 방식에 특별한 제한은 없다.

- [0040] 플라즈마 처리 단계(S200)는 플라즈마를 이용하여 전이금속 칼코겐화합물을 도핑하는 공정이다. 여기서, 전이금속 칼코겐화합물층이 형성된 기판을 플라즈마 챔버 내에 배치하고, 진공 조건에서 플라즈마 기체를 흘려주면서 플라즈마 처리를 실행한다. 플라즈마는 물질을 구성하고 있는 입자들의 내부에너지 크기에 따라 고체, 액체, 기체에 이어 제4의 물질 상태라고 불린다. 기체 상태에 있는 원자 또는 분자에 전기적으로 에너지를 가하게 되면 전기적으로 양의 전하로 구성된 핵과 그 둘레에 분포되어 있던 전자가 분리되어 이온과 전자로 구성된 기체상태가 된다. 초고온 상태에서 만들어진 플라즈마에서 분자는 완전히 해리되어 원자상태가 되고 원자에 구속되어 있던 모든 전자들이 전자 궤도를 자유 전자로 이탈하게 되어 이온과 전자로 이루어진 기체상태가 되지만, 플라즈마의 온도가 높지 않은 경우에는 불완전하게 해리된 분자, 불완전하게 이온화된 이온분자 또는 이온원자 등으로 반응성이 높은 화학종(Radical)들이 생긴다. 즉 저온 플라즈마 경우에는 이온 및 전자를 포함하여 매우 다양한 화학종들로 복잡하게 구성되어 있어 활용 가능한 분야가 매우 넓어지고 있다. 이러한 플라즈마 처리는 주로 식각에 이용되고 있는데, 본 발명에서는 플라즈마 처리를 통해 전이금속 칼코겐화합물을 도핑하고자 한다. 여기서, 플라즈마 처리를 통해 발생한 이온이 전이금속 칼코겐화합물층에 결합을 형성하게 되는데, 이로써 전이금속 칼코겐화합물이 n형으로 도핑되게 된다.
- [0041] 플라즈마 챔버는 플라즈마를 생성할 수 있는 챔버로서, RIE(Reactive Ion Etcher) 챔버를 사용할 수 있으나, 반드시 이에 한정되는 것은 아니다. 플라즈마 기체로는 아르곤(Ar), 수소(H) 등을 이용할 수 있지만, 반드시 이에 한정되는 것은 아니고 이온이 발생하여 전이금속 칼코겐화합물에 결합을 형성할 수 있기만 하면 그 종류에 특별한 제한이 없다.
- [0042] 플라즈마 처리의 일례로, RIE(Reactive Ion Etcher) 챔버 내에 전이금속 칼코겐화합물층이 형성된 기판을 위치시킨 후, 진공 상태에서 아르곤을 50 sccm 이하로 흘려주고, 20W 이하의 전력을 인가하여 플라즈마 처리를 진행할 수 있다.
- [0044] 도 2 내지 도 3은 본 발명의 다른 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법의 순서도이다.
- [0045] 도 2 내지 도 3을 참고로, 본 발명의 다른 실시예에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법은, 전술한 전이금속 칼코겐화합물층 형성 단계(S100), 및 플라즈마 처리 단계(S200) 사이에, 보호층 형성 단계(S150)를 추가적으로 실행할 수 있다.
- [0046] 보호층 형성 단계(S150)에서는 전이금속 칼코겐화합물층의 상부 영역 중 일부에 패터닝된 보호층을 배치한다. 보호층은 플라즈마 처리를 통해 생성된 이온과 전이금속 칼코겐화합물층의 접촉을 차단한다. 따라서, 보호층이 배치된 전이금속 칼코겐화합물층의 영역에서는 이온에 의한 결합이 발생하지 않아 n형 도핑이 이루어지지 않는다. 결국, 전이금속 칼코겐화합물층의 전 영역 중 도핑이 필요한 일부 영역만 노출되도록, 패터닝된 보호층을 형성함으로써, 선택적 영역에 대해서만 도핑을 실시할 수 있다.
- [0047] 보호층은 헥사고날 보론 나이트라이드(hexagonal Boron Nitride, h-BN)로 이루어질 수 있다. 다만, 반드시 보호층의 소재가 h-BN으로 한정되는 것은 아니고, 포토레지스트, 전자빔 레지스트를 사용할 수도 있다.
- [0049] 종합적으로, 본 발명에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법에 따르면, 전이금속 칼코겐화합물에 플라즈마 처리를 진행함으로써, 이온으로 하여금 전이금속 칼코겐화합물에 결합을 형성시켜 n형으로 도핑하므로, 본래 물성을 변화시키지 않고, 기존의 장비를 이용해 간단하게 전이금속 칼코겐화합물을 도핑할 수 있다. 또한, 전이금속 칼코겐화합물의 상부에 보호층을 배치하여, 선택적인 영역에 원하는 정도의 도핑이 가능하다. 나아가 이차원 전이금속 칼코겐화합물의 n형 도핑을 통해 트랜지스터의 제작을 가능하게 하고, 이와 더불어 p형 반도체와의 접합이나 p형 도핑 방법과 혼합하여 complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS), 태양전지, 다이오드 등의 제작에 도움을 주는 등 전이금속 칼코겐화합물의 산업적 용용에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
- [0051] 이하에서는 구체적인 실시예를 통해 본 발명을 보다 상세하게 설명한다.

- [0053] 실시예: WSe₂에 대한 Ar 플라즈마 처리
- [0054] 도 3을 참고로, 기판 상에 소스 전극 및 드레인 전극을 서로 이격시켜 배치하고, 소스 전극, 드레인 전극, 및 그 전극 사이의 기판의 일면에 WSe₂가 접촉되도록 배치시킨 후, WSe₂의 중심 영역에 h-BN을 전사하였다. 그 다음 RIE(Reactive Ion Etcher) 챔버 내에서 5, 10, 15, 20 초로 처리 시간을 달리하여 WSe₂에 대한 플라즈마 처리를 실행하였다. 플라즈마 처리는 챔버 내에 진공 분위기를 조성하고 아르곤을 0 ~ 50 sccm 조건으로 흘려준 상태에서, 0 ~ 20 W의 파워를 가해주었다.
- [0056] 평가예 1: 전류-전압 특성 분석
- [0057] 플라즈마 처리 전의 as-fabricated 상태의 WSe₂, 및 실시예에 따라 플라즈마 처리된 WSe₂ 영역(h-BN이 전사되지 않은 영역)에 대해, Ar 플라즈마 처리 시간에 따른 전류-전압 특성(I-V transfer characteristic)을 분석하고, 그 결과를 도 4에 나타냈다. 도 4는 Ar 플라즈마 처리 시간의 증가에 따른 WSe₂의 I-V transfer characteristic의 변화를 나타내는 그래프이다.
- [0058] 도 4를 참고로, 플라즈마 처리 전의 as-fabricated 상태의 WSe₂는 p-dominant한 ambipolar 특성을 띄고 있는 반면, 플라즈마 처리 후에는 n형 도핑된 특성을 보였다.
- [0060] 평가예 2: 투과전자현미경 및 고속 푸리에 변환 이미지 분석
- [0061] 실시예에 따라 h-BN이 전사된 WSe₂의 영역과 전사되지 않은 WSe₂의 영역을 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM)과 고속 푸리에 변환(fast fourier transform)을 이용해 관찰하였다. 도 5는 실시예의 h-BN이 전사된 WSe₂의 영역의 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM) 및 고속 푸리에 변환(fast fourier transform) 이미지이고, 도 6은 실시예의 h-BN이 전사되지 않은 WSe₂의 영역의 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM) 및 고속 푸리에 변환(fast fourier transform) 이미지이다.
- [0062] 도 5를 참고로, h-BN이 전사된 WSe₂의 영역에서는, 플라즈마 처리 전의 전형적인 WSe₂의 격자구조가 관찰되었는 바, h-BN으로 인해 플라즈마 처리가 되지 않았음을 알 수 있다.
- [0063] 반면, 도 6을 참고로, h-BN이 전사되지 WSe₂의 영역에서는 플라즈마 처리로 인한 WSe₂의 격자구조의 deformation을 관찰할 수 있으며, Ar 플라즈마로 인해 효과적으로 defect을 생성할 수 있다는 것을 보였다.
- [0065] 평가예 3: 라만 스펙트럼 분석
- [0066] 실시예에 따른 h-BN, h-BN으로 보호된 WSe₂, 및 h-BN으로 보호되지 않은 WSe₂ 영역 각각에 대해 라만분광기(Raman spectroscopy)를 이용해 얻은 라만 스펙트럼을 분석하였다. 도 7은 실시예의 Ar 플라즈마 처리 시간의 증가에 따른 h-BN, h-BN으로 보호된 WSe₂, 및 h-BN으로 보호되지 않은 WSe₂ 영역의 라만 스펙트라(Raman spectra)이다.
- [0067] 도 7을 참고로, E_{2g}¹, B_{2g}¹ 피크(peak)들은 WSe₂의 전형적인 피크를 나타낸다. h-BN과 h-BN으로 보호된 WSe₂의 경우, 플라즈마 처리에 의한 변화가 관찰되지 않았다. 이는 플라즈마에 의한 결함(damage)이 없다는 것을 나타낸다. 반면, h-BN으로 보호되지 않은 WSe₂는 플라즈마 처리의 시간이 증가함에 따라 라만 스펙트럼의 피크들이 감소하는 결과가 관찰되었다. 이로써 플라즈마 처리에 의해 WSe₂에 결함이 생성된다는 것과 h-BN을 이용한 선택적 인 도핑이 된다는 것을 알 수 있다.
- [0069] 평가예 4: 표면전위 분석
- [0070] 실시예에 따른 h-BN이 전사되지 않은 WSe₂의 영역 및 h-BN이 전사된 영역에 대해 켈빈 프로브 현미경(KPFM)을

활용하여 표면전위를 측정하고, 그 결과를 도 8에 나타냈다. 도 8은 실시예의 h-BN이 전사되지 않은 WSe₂의 영역 및 h-BN이 전사된 영역에 대한 KPFM data로서, 플라즈마 처리된 WSe₂과 처리되지 않은 WSe₂의 potential 차이를 나타낸다.

[0071] 도 8을 참고로, CPD(Contact potential difference)를 통해, 중앙 부분의 Ar 플라즈마 처리를 진행한 WSe₂ 영역이 플라즈마 처리가 되지 않은 양측 WSe₂ 영역에 비해 180 mV의 전위(potential)가 증가된 것을 확인할 수 있으며, 이는 n형 도핑이 되었다는 결과를 보여준다.

[0073] 평가예 5: CMOS 인버터 제작 및 성능 평가

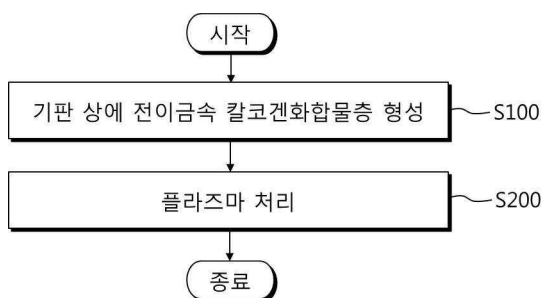
[0074] 도 9는 전이금속 칼코겐화합물을 플라즈마 처리를 통해 n형 도핑하여 제작한 CMOS 인버터, 및 그 성능 결과 그래프이다. 본 발명에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법을 이용해 n형 도핑된 전이금속 칼코겐화합물과 p형 반도체와의 접합을 이용하여 CMOS 인버터(complimentary metal-oxide-semiconductor inverter)를 제작하였다. 도 9를 참고로, V_{IN}-V_{OUT}(voltage transfer characteristics)에서 확실한 스위칭 거동(switching behavior)이 관찰되었는데, 본 발명에 따른 전이금속 칼코겐화합물 도핑 방법이 CMOS, 태양전지, 다이오드 등의 제작에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[0076] 본 발명을 구체적인 실시예를 통하여 상세히 설명하였으나, 이는 본 발명을 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 발명은 이에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상 내에서 당 분야의 통상의 지식을 가진 자에 의해 그 변형이나 개량이 가능함이 명백하다.

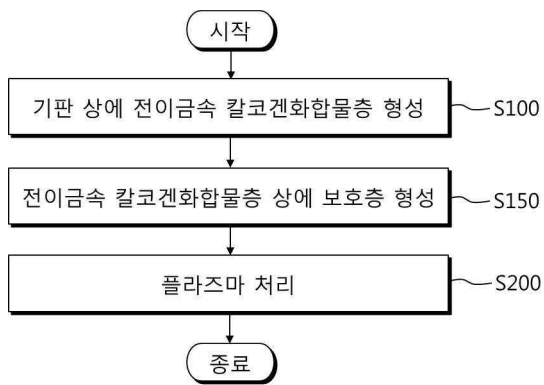
[0077] 본 발명의 단순한 변형 내지 변경은 모두 본 발명의 영역에 속한 것으로 본 발명의 구체적인 보호 범위는 첨부된 특허청구범위에 의하여 명확해질 것이다.

도면

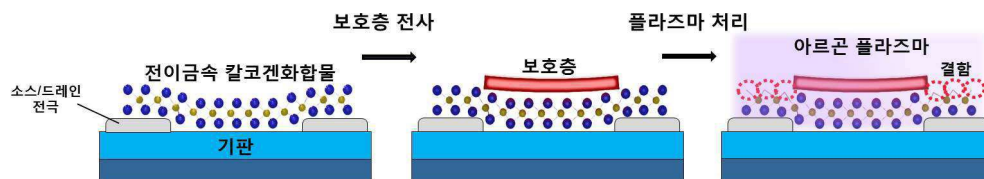
도면1



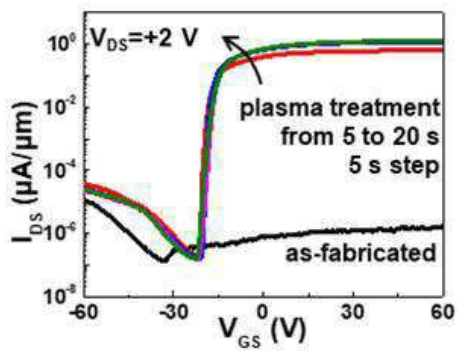
도면2



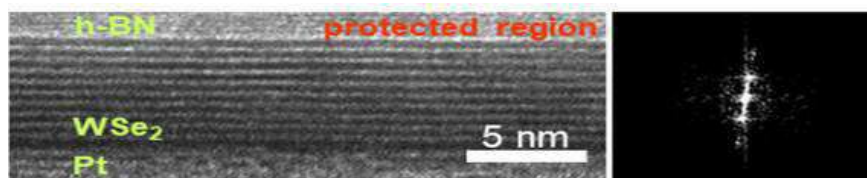
도면3



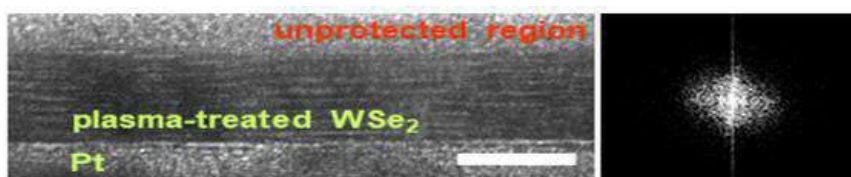
도면4



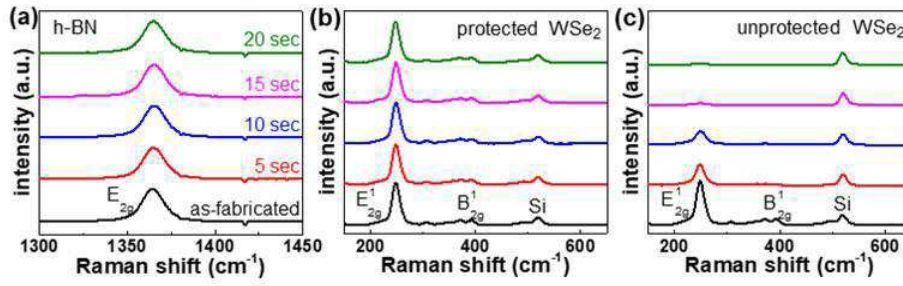
도면5



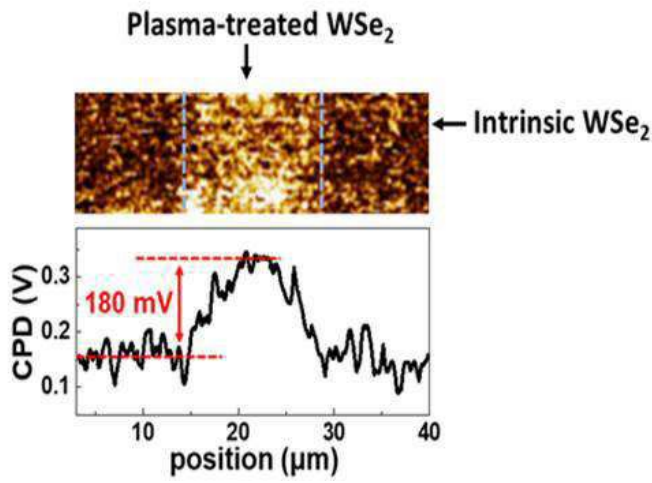
도면6



도면7



도면8



도면9

