(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0082548
(43) 공개일자 2025년06월09일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/02 (2006.01) *C23C 16/30* (2006.01)
C23C 16/455 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 21/02573 (2013.01)
C23C 16/305 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0171003
(22) 출원일자 2023년11월30일
심사청구일자 2023년11월30일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
서울대학교산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
(72) 발명자
서준기
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
김성연
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
제일특허법인(유)

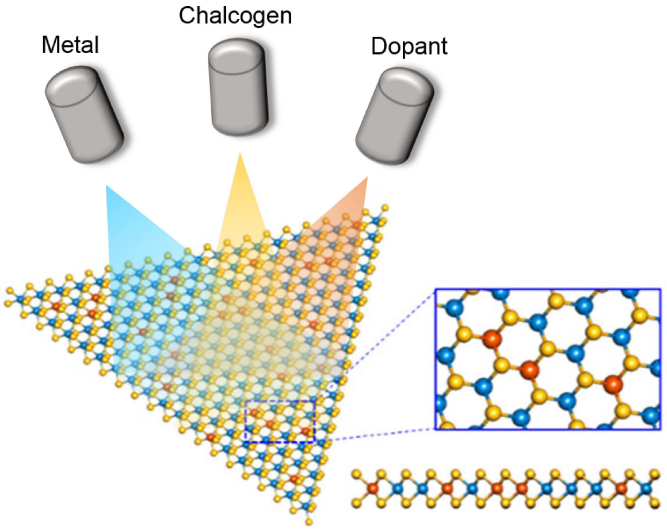
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 **펄싱 유기금속화학증착법 기반 이차원 소재의 농도/공간 제어 치환형 도핑 방법**

(57) 요 약

금속, 칼코겐 원소 및 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 조절하면서 유기금속화학증착법에 의해 도핑 박막을 형성하는 단계를 포함하는 도핑 방법은, 도핑 농도의 정밀 조절과 도핑 영역 조절에 용이하므로 광대역의 2차원 반도체 소자를 제조할 수 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
C23C 16/45523 (2013.01)
H01L 21/02568 (2013.01)
H01L 21/02587 (2013.01)
H01L 21/0262 (2013.01)
(72) 발명자
권재은
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이철호
서울특별시 관악구 관악로 1(신림동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711190636
과제번호 2020R1C1C1011219
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 개인기초연구(과기정통부)
연구과제명 지능형 열제어 회로 구현을 위한 비선형 및 방향성 열전달 소재 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 울산과학기술원
연구기간 2023.03.01 ~ 2024.02.29
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711196408
과제번호 00258309
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 차세대지능형반도체기술개발(소자)
연구과제명 웨이퍼 스케일, 원자층 제어 2차원 다층박막 기반의 BEOL 로직/메모리향 초저전압 스위칭 트랜지스터 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 서울대학교산학협력단
연구기간 2023.04.01 ~ 2023.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용하여 유기금속화학증착법(MOCVD)에 의해 도핑 박막을 형성하면서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 조절하는 단계를 포함하는, 도핑 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 펄스 형태로 조절하는, 도핑 방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중 적어도 하나는 유기기가 결합된 전구체의 형태로 유기금속화학증착법에 주입되는, 도핑 방법.

청구항 4

제 3 항에 있어서,

상기 전구체는 질량유량조절계(MFC)를 통해 유기금속화학증착법에 주입되는, 도핑 방법.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 금속은 Mo, W, Bi, Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Sr, Y, Zr, Nb, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In Sn, Sb, Ba, La, Hf, Ta, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb 및 Po로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종을 포함하고,

상기 칼코겐 원소는 S, Se 및 Te로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종을 포함하는, 도핑 방법.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 도펀트는 Nb, Mn, Ti, W, Zr, Mg, P, Ni, Al, Sn, V, Re, Ge, Si, B, Ga, In, Sb, Cr, Au, Na 및 Li로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종을 포함하는, 도핑 방법.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 도펀트는 치환형 도핑(substitutional doping)으로 도핑되는, 도핑 방법.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 도펀트의 주입 유량의 조절에 의해, 도핑 농도가 다르면서 공간적으로 분리된 영역들을 형성하는, 도핑 방법.

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 도핑 방법은

상기 도펀트를 주입하지 않는 미도핑 단계; 및

상기 도펀트를 일정 유량으로 주입하는 도핑 단계를

각각 1회 이상 포함하는, 도핑 방법.

청구항 10

제 8 항에 있어서,

상기 공간적으로 분리된 영역들은 각각 p형 반도체 및 n형 반도체의 특성을 나타내는, 도핑 방법.

청구항 11

제 1 항에 있어서,

상기 도핑 박막은 MX_2로 구성된 2차원 박막에 도펀트가 도핑된 것이고, 여기서 M은 전이금속이고, X는 칼코겐 원소인, 도핑 방법.

청구항 12

제 1 항에 있어서,

상기 도핑 박막은 5 nm 이하의 두께를 갖는, 도핑 방법.

청구항 13

제 1 항에 있어서,

상기 도핑 박막은

제 1 영역, 및

상기 제 1 영역과 도핑 농도가 다른 제 2 영역을 포함하고,

상기 제 1 영역과 상기 제 2 영역은 공간적으로 분리된, 도핑 방법.

청구항 14

기판을 준비하는 단계; 및

상기 기판 상에 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용하여 유기금속화학증착법(MOCVD)에 의해 도핑 박막을 형성하면서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 조절하는 단계를 포함하는, 도핑 박막의 제조방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 펄싱 유기금속화학증착법을 활용한 2차원 소재의 농도/구역 제어 정밀 도핑 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 2차원 반도체 소재는 원자층 단위의 두께를 가져 5 nm 이하의 초박막 두께의 반도체 소재를 필요로 하는 현재의 소자 미세화 기술동향에 적합하며, 우수한 전기적 특성을 갖고 있고, 현 실리콘 기반의 CMOS 기술과도 호환성이 뛰어나, 실리콘을 대체할 차세대 반도체 채널층 소재로서 각광받고 있다.

[0003] 그로 인해 기존의 실리콘 기반 기술에서 요구된 바와 같이, 2차원 소재 역시도 그의 고유의 전기적 물성을 조절할 수 있는 도핑 기술의 중요성이 대두된다. 그리고 도핑 농도를 고농도(수 내지 수십% 수준)부터 저농도 (0.0x 내지 0.x% 수준)까지 광대역의 범위로 자유롭게 도핑 농도를 조절하는 기술과 도핑 영역을 조절하는 기술의 필요성이 함께 강조된다.

[0004] 하지만, 기존의 실리콘 반도체에서 사용되던 도핑 기술은 이온 충돌이나 도펀트 확산으로 인해 2차원 소재의 5 nm 이하의 초박막 두께에서는 원치 않는 표면/격자 결함을 생성하여 적합하지 않다. 이로 인해, 2차원 소재에 맞는 도핑 방법들(intrinsic defect tailoring, intercalation, surface charge transfer 등)이 소개되었지만, 이들 방법은 모두 휘발성을 갖고 있어, 시간이 지났을 때 도핑농도가 달라지거나, 외부환경에 의해 쉽게 변화가 일어나기 때문에 안정적이고 비휘발성을 갖는 도핑 방법이 요구된다.

[0005] 이에 맞는 방법으로 합성 과정에서 in-situ하게 도펀트를 2차원 소재 성장과정에서 함께 주입하여 도핑을 하는 치환형 도핑 방법(substitutional doping)이 각광을 받고 있으며, 상기 방법은 2차원 반도체 소재를 이루는 금속 원자를 도펀트로 치환함으로서 비휘발성의 안정적인 도핑 방법으로 주목받는다. 이러한 치환형 도핑을 하기 위해서는 합성 과정 내에서 도핑을 해야 하기 때문에, 화학 반응을 수반하는 화학기상증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD)이 주로 활용된다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0006] (비특허문헌 0001) ACS Nano 2019, 13, 10768-10775

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 일반적인 화학기상증착법(CVD)은 고체상의 파우더 전구체를 사용하여 합성과 도핑을 진행하는데, 합성 과정 내에서 전구체의 유량 조절이 어려워 광대역 범주의 도핑농도를 정밀하게 조절하기 어려운 문제가 있다. 뿐만 아니라 전구체들을 함께 반응챔버에 넣고 소재의 전체 합성 과정을 진행하기 때문에, 합성과정 중간에 관여하기 어렵고 도펀트 전구체들을 제어하지 못하여 도핑 영역 조절을 하기 어렵다.

[0008] 따라서 본 발명의 과제는 이러한 문제를 해결하기 위하여, 도핑 농도의 광대역 정밀 조절과 도핑 영역 조절을 하는 2차원 반도체 소재의 도핑 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 본 발명은 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용하여 유기금속화학증착법(MOCVD)에 의해 도핑 박막을 형성하면서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 조절하는 단계를

포함하는, 도핑 방법을 제공한다.

[0010] 또한 본 발명은 기판을 준비하는 단계; 및 상기 기판 상에 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용하여 유기금속화학증착법(MOCVD)에 의해 도핑 박막을 형성하면서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 조절하는 단계를 포함하는, 도핑 박막의 제조방법을 제공한다.

발명의 효과

[0011] 본 발명에 따르면, 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용한 유기금속화학증착법을 수행하는 중에 이들의 주입 유량을 조절하여, 도핑 농도와 영역이 in-situ로 조절된 2차원의 초박막을 효과적으로 제조할 수 있다.

[0012] 따라서 본 발명에 따른 방법을 이용하여 도핑 영역과 도핑 농도가 정밀하게 조절된 2차원 반도체 소재를 효과적으로 제공할 수 있다.

[0013]

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1은 본 발명의 일 구현예에 따른 도핑 방법을 모식적으로 나타낸 것이다.

도 2는 본 발명의 일 구현예에 따른 금속, 칼코겐 및 도펀트의 주입 방식을 나타낸다.

도 3은 본 발명의 일 구현예에 따라 도핑 농도가 다른 두 영역이 형성된 박막의 제조방법이다.

도 4는 실시예 1에서 V-도핑된 MoS_2 및 도핑 없이 순수한 MoS_2의 라만 스펙트럼이다.

도 5는 실시예 1에서 V-도핑된 MoS_2 및 도핑 없이 순수한 MoS_2의 XPS 스펙트럼이다.

도 6은 실시예 1에서 V-도핑된 MoS_2의 XPS 스펙트럼의 확대도이다.

도 7은 실시예 2에서 도핑 농도가 다른 두 영역이 형성된 2차원 소재의 SEM 이미지이다.

도 8은 실시예 2에서 도핑 농도가 다른 두 영역이 형성된 2차원 소재의 AFM 이미지이다.

도 9는 실시예 2에서 도핑 농도가 다른 두 영역이 형성된 2차원 소재의 EFM 이미지이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 이하 본 발명의 다양한 구현예와 실시예를 도면을 참고로 하여 구체적으로 설명한다.

[0016] 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략한다. 또한 도면에서의 각 구성요소들의 크기는 설명을 위하여 과장되거나 생략될 수 있으며, 실제로 적용되는 크기와 다를 수 있다.

[0017] 본 명세서에서 하나의 구성요소가 다른 구성요소의 상/하에 형성되거나 서로 연결 또는 결합된다는 기재는, 이들 구성요소 간에 직접 또는 또 다른 구성요소를 개재하여 간접적으로 형성, 연결 또는 결합되는 것을 모두 포함한다. 또한 각 구성요소의 상/하에 대한 기준은 대상을 관찰하는 방향에 따라 달라질 수 있는 것으로 이해하여야 한다.

[0018] 본 명세서에서 각 구성요소를 지칭하는 용어는 다른 구성요소들과 구별하기 위해 사용되는 것이며, 본 발명을 한정하려는 의도로 사용되는 것은 아니다. 또한 본 명세서에서 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한 복수의 표현을 포함한다.

[0019] 본 명세서에서 "포함"한다는 기재는 특정 특성, 영역, 단계, 공정, 요소 및/또는 성분을 구체화하기 위한 것이며, 특별히 반대되는 기재가 없는 한, 그 외 다른 특성, 영역, 단계, 공정, 요소 및/또는 성분의 존재나 부가를 제외시키는 것은 아니다.

[0020] 본 명세서에 기재되는 구성 요소의 크기, 물성 등을 한정하는 수치 범위에서, 상한값만 한정된 수치 범위와 하한값만 한정된 수치 범위가 별개로 예시되어 있을 경우에, 이들 상한값과 하한값이 조합된 수치 범위도 예시적 범위로서 포함되는 것으로 이해하여야 한다.

[0021]

[0022] **도핑 방법**

[0023] 도 1은 본 발명의 일 구현예에 따른 도핑 방법을 모식적으로 나타낸 것이다.

[0024] 도 1을 참조하여, 본 발명에 따른 도핑 방법은 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용하여 유기금속화학증착법(MOCVD)에 의해 도핑 박막을 형성하면서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 조절하는 단계를 포함한다.

[0025] 본 발명에서 사용되는 금속은 칼코겐 원소와 결합하여 박막을 형성할 수 있는 금속일 수 있으며, 예를 들어 상기 금속은 Mo, W, Bi, Mg, Al, Si, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Sr, Y, Zr, Nb, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In Sn, Sb, Ba, La, Hf, Ta, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb 및 Po로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0026] 일 구체예에 있어서, 상기 금속은 예를 들어 전이금속(transition metal) 및 전이후금속(post-transition metal) 중에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0027] 다른 구체예에 있어서, 상기 금속은 주기율표에서 3족 내지 12족에 속하는 d-블록의 금속 중에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0028] 또 다른 구체예에 있어서, 상기 금속은 전이금속 중에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0029] 또 다른 구체예에 있어서, 상기 금속은 몰리브데넘(Mo) 및 텅스텐(W) 중에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0030] 본 발명에서 사용되는 칼코겐 원소는 잘 알려진 바와 같이 S, Se 및 Te로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0031] 일 구체예에 있어서, 상기 칼코겐 원소는 황(S) 및 셀레늄(Se) 중에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0032] 본 발명에서 사용되는 도펀트는 칼코겐 원소와 결합되는 금속을 치환하여 p형 혹은 n형으로 전기적 물성 변화를 일으킬 수 있다.

[0033] 상기 도펀트로 사용될 수 있는 원소는 p형 또는 n형 반도체의 제조에 사용되는 도펀트라면 크게 제한되지 않으며, 예를 들어 상기 도펀트는 Nb, Mn, Ti, W, Zr, Mg, P, Ni, Al, Sn, V, Re, Ge, Si, B, Ga, In, Sb, Cr, Au, Na 및 Li로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0034] 일 구체예에 있어서, 상기 도펀트는 몰리브데넘(Mo)과 텅스텐(W)을 제외한 전이금속 및 전이후금속 중에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0035] 다른 구체예에 있어서, 상기 도펀트는 몰리브데넘(Mo)과 텅스텐(W)을 제외한 전이금속 중에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0036] 또 다른 구체예에 있어서, 상기 도펀트는 p형 도펀트 및 n형 도펀트 중에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다. 상기 n형 도펀트의 예로는 5족 원소를 들 수 있고, 상기 p형 도펀트의 예로는 7족 원소를 들 수 있다. 보다 구체적으로, 상기 n형 도펀트는 바나듐(V), 나이오븀(Nb) 및 탄탈럼(Ta)으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있고, 상기 p형 도펀트는 레늄(Re)을 포함할 수 있다.

[0037] 또 다른 구체예에 있어서, 상기 도펀트는 바나듐(V), 나이오븀(Nb), 탄탈럼(Ta) 및 레늄(Re)으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종을 포함할 수 있다.

[0038] 상기 예시된 도펀트들은 2차원 반도체 소재(예: 2차원 전이금속 디칼코게나이드)에서 치환형 도핑이 효과적으로 이루어질 수 있어 유리하다.

[0039] 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중 적어도 하나는 전구체의 형태로 유기금속화학증착법에 주입될 수 있다.

[0040] 일 구체예에 있어서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중 적어도 하나는 유기기(organic group)가 결합된 전구체의 형태로 유기금속화학증착법에 주입될 수 있다. 다른 구체예에 있어서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트는 모두 유기기가 결합된 전구체의 형태로 유기금속화학증착법에 주입될 수 있다. 상기 유기기는 예를 들어 탄소를 포함하는 그룹으로서, 카르보닐, 알콕사이드, 알킬, 알켄일, 사이클로알켄일 및 아렌

일로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종일 수 있다. 또한 상기 전구체는 유기기와 비슷한 기능을 하는 클로라이드기가 금속, 칼코겐 원소 또는 도펀트와 결합된 화합물일 수도 있다.

[0041] 본 발명의 일 구현예는 이와 같은 유기기 등이 결합되어 휘발성이 높은 전구체를 사용하며, 구체적으로 유기기 등이 결합된 기체상의 전구체를 사용할 수 있다. 이와 같이 기체상의 전구체를 사용함으로써 전구체의 주입 유량을 일정하고 균일하게 조절할 수 있다.

[0042] 상기 금속을 위한 전구체는 금속에 하나 이상의 유기기가 결합된 화합물일 수 있으며, 예를 들어 전이금속에 카르보닐, 알콕사이드, 알킬, 알켄일, 사이클로알켄일 및 아렌일로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 유기기가 결합된 화합물일 수 있다. 구체적인 예로서, 상기 금속을 위한 전구체는 $Mo(CO)_6$, $W(CO)_6$ 등을 포함할 수 있다.

[0043] 상기 칼코겐 원소를 위한 전구체는 칼코겐 원소에 하나 이상의 유기기가 결합된 화합물일 수 있으며, 예를 들어 칼코겐 원소에 카르보닐, 알콕사이드, 알킬, 알켄일, 사이클로알켄일 및 아렌일로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 유기기가 결합된 화합물일 수 있다. 구체적인 예로서, 상기 칼코겐 원소를 위한 전구체는 $(CH_3CH_2)_2S$, $(CH_3)_2Se$, $(CH_3)_2S$, $(CH_3CH_2)_2Se$ 등을 포함할 수 있다.

[0044] 상기 도펀트를 위한 전구체는 도펀트로 사용되는 금속에 하나 이상의 유기기가 결합된 화합물일 수 있으며, 예를 들어 도펀트로 사용되는 전이금속에 카르보닐, 알콕사이드, 알킬, 알켄일, 사이클로알켄일 및 아렌일로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 유기기가 결합된 화합물일 수 있다. 구체적인 예로서, 상기 도펀트를 위한 전구체는 도펀트로 사용되는 전이금속에 2개 내지 6개의 알콕사이드기 또는 카르보닐기가 결합된 구조를 가질 수 있다. 상기 알콕사이드기의 탄소수는 예를 들어 1 내지 6일 수 있다. 또한 상기 도펀트를 위한 전구체에서 중심 금속은 알콕사이드기 또는 카르보닐기 외에도 산소 원자와 추가로 이중 결합된 구조를 가질 수 있다. 아울러, 상기 도펀트를 위한 전구체는 도펀트로 사용되는 전이금속에 2 내지 6개의 클로라이드기가 결합된 구조를 가질 수도 있다.

[0045] 보다 구체적인 예로서, 상기 도펀트를 위한 전구체는 $VO(OCH_2CH_3)_3$, $VO(OCH(CH_3)_2)_3$, VCl_5, $Nb(OCH_2CH_3)_5$, $NbCl_5$, $Re_2(CO)_{10}$ $ReCl(CO)_5$, $Ta(OCH_2CH_3)_5$, $TaCl_5$ 등을 포함할 수 있다.

[0046] 상기 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트의 전구체들은 유기금속화학증착법(MOCVD)를 위한 반응 챔버로 주입된다.

[0047] 일 구현예에 따르면, 상기 전구체 중 적어도 하나는 주입 유량이 조절되며, 구체적으로 상기 전구체는 질량유량조절계(MFC)를 통해 유기금속화학증착법에 주입될 수 있다.

[0048] 질량유량조절계(MFC)는 유량을 정확하게 제어함으로써 고체와 액체상의 전구체가 기화된 화합물을 공정에 주입하는 장치로서, 주입될 화합물의 유량은 전압, 전류 또는 디지털 소스에 의해 전자적으로 설정될 수 있다. 질량유량조절계(MFC)를 통과하는 유량은 내부 센서에 의해 측정되며, 측정값은 최초 설정값과 비교되어 두 값이 동일해지도록 밸브가 유량을 조절할 수 있다.

[0049] 이와 같이, 본 발명에 사용되는 성분들은 유기금속 전구체(metal-organic precursor)와 같이 금속 또는 도펀트에 유기 리간드가 결합되거나 칼코겐 원소에 유기기가 결합된 형태로 반응 챔버에 주입될 수 있으며, 주입할 때는 기체상으로 유량은 모두 질량유량조절계(MFC)를 거쳐 유량이 sccm 단위로 일정하게 조절되며 주입될 수 있다.

[0050] 상기 주입 유량은 예를 들어 0 sccm 이상, 0.01 sccm 이상, 0.05 sccm 이상, 0.1 sccm 이상, 0.5 sccm 이상, 또는 1 sccm 이상일 수 있으며, 또한 100 sccm 이하, 10 sccm 이하, 5 sccm 이하, 또는 3 sccm 이하일 수 있으나, 이에 한정되지 않고 목적하는 박막 조성에 따라 적절히 조절할 수 있다.

[0051] 이와 같이 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트의 전구체들이 주입되는 시점과, 빈도수, 주기, 농도를 소프트웨어에 통해 사전에 설정할 수 있으며, 이를 통해 전구체들의 주입 유량을 일정하게 하거나 또는 변화시킬 수 있으며, 나아가 펄스 형태로 주입하는 방식도 가능하다. 일 구체예에 따르면, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 펄스 형태로 조절할 수 있다.

[0052] 또한 유기금속화학증착법(MOCVD)을 위한 공정에는 전구체 외에 운송 가스 및 환원 가스 중에서 적어도 1종이 더 주입될 수 있다. 상기 운송 가스로는 비활성 가스가 사용될 수 있고, 상기 환원 가스로는 수소 가스가 사용될 수 있다. 구체적인 예로서, 상기 운송 가스는 아르곤 가스(Ar) 및 수소(H_2) 중에서 적어도 1종을 포함할 수 있

다. 상기 아르곤 가스는 화학적 반응을 일으키지 않으면서 전구체를 운송할 수 있으며, 반응기 내부를 퍼징하여 불순물을 제거할 수 있다. 상기 수소 가스는 MOCVD 공정에서 환원제로 작용하여 재료의 증착을 촉진하고 가벼운 분자량으로 인해 전구체를 운송하는 역할도 할 수 있다.

[0053] 상기 유기금속화학증착법(MOCVD)에서 공정 온도는 예를 들어 200℃ 이상, 300℃ 이상, 400℃ 이상, 또는 500℃ 이상일 수 있고, 또한 900℃ 이하, 800℃ 이하, 700℃ 이상 또는 600℃ 이하일 수 있다. 일 구체예에 있어서, 상기 유기금속화학증착법(MOCVD)을 위한 반응 온도는 500℃ 내지 800℃일 수 있다.

[0054] 반응 챔버에 주입된 전구체들은 고온에서 분해되어 유기기가 분리되고 금속 및 칼코겐 원소가 결합되면서 이 중 일부 금속은 도펀트로 치환되어 도핑 박막을 형성할 수 있다.

[0055] 상기 유기금속화학증착법(MOCVD)에서 공정 압력은 예를 들어 1 Torr 이상, 3 Torr 이상 또는 5 Torr 이상일 수 있고, 또한 50 Torr 이하, 30 Torr 이하, 20 Torr 이하 또는 10 Torr 이하일 수 있다. 일 구체예로서 상기 유기금속화학증착법(MOCVD)에서 공정 압력은 1 Torr 내지 10 Torr일 수 있다.

[0056] 상기 유기금속화학증착법(MOCVD)에서 공정 시간은 예를 들어 1시간 이상, 2시간 이상, 3시간 이상, 또는 4시간 이상일 수 있고, 또한 10시간 이하, 8시간 이하, 7시간 이하, 또는 6시간 이하일 수 있다. 일 구체예로서, 상기 유기금속화학증착법(MOCVD)에서 공정 시간은 1시간 내지 10시간, 또는 3시간 내지 7시간일 수 있다.

[0057] 상기 도핑 박막은 일반적으로 사용되는 산화물 기판, 예를 들어 SiO_2, Al_2O_3, HfO_2 등의 산화물을 포함하는 기판 상에 증착될 수 있다.

[0058] 일 구현예에 따르면, 본 발명에 따른 도핑 방법은 상기 도펀트의 주입 유량을 조절하는 단계를 포함한다. 이와 같이 상기 도펀트의 주입 유량의 조절에 의해 도핑 농도가 다르면서 공간적으로 분리된 영역들을 형성할 수 있다.

[0059] 도 2는 본 발명의 일 구현예에 따른 금속, 칼코겐 및 도펀트의 주입 방식을 나타낸다. 도 2를 보면 금속 및 칼코겐은 일정한 유량으로 주입되지만 도펀트의 주입 유량은 펄스 형태로 조절되고 있다.

[0060] 일 구현예에 따르면 도펀트는 기체상의 전구체 형태로 주입되며 질량유량조절계(MFC)에 의해 주입되는 시점과, 빈도수, 주기, 농도가 사전에 설정될 수 있다.

[0061] 예를 들어, 상기 도핑 방법은 상기 도펀트를 주입하지 않는 미도핑 단계; 및 상기 도펀트를 일정 유량으로 주입하는 도핑 단계를 각각 1회 이상 포함할 수 있다. 다른 예로서, 상기 도핑 방법은 상기 도펀트를 주입하지 않는 미도핑 단계 및 상기 도펀트를 일정 유량으로 주입하는 도핑 단계를 각각 2회 이상 포함할 수 있다.

[0062] 이에 따라, 도펀트가 주입되지 않는 미도핑 단계에서 박막이 성장할 때에는 도핑이 되지 않은 박막이 일정 영역 성장하고, 반면 도펀트가 주입되는 도핑 단계에서 박막이 성장할 때에는 도핑된 박막 영역이 성장할 수 있다.

[0063] 이에 따라 일 구현예에 따른 도핑 박막은 제 1 영역, 및 상기 제 1 영역과 도핑 농도가 다른 제 2 영역을 포함하고, 상기 제 1 영역과 상기 제 2 영역은 공간적으로 분리될 수 있다. 다른 구현예에 따른 도핑 박막은 상기 제 1 영역 및 상기 제 2 영역과 공간적으로 분리되고 상기 제 1 영역 또는 상기 제 2 영역과 도핑 농도가 다른 제 3 영역을 더 포함할 수 있다.

[0064] 도 3은 본 발명의 일 구현예에 따라 도핑 농도가 다른 두 영역이 형성된 박막을 제조하는 방법을 나타낸다. 도 3을 참조하여, 전이금속(Mo, W) 및 칼코겐(S, Se)만 주입하고 도펀트를 주입하지 않는 미도핑 단계에서는 단일층의 전이금속 디칼코게나이드(TMD) 박막(가운데 삼각형의 미도핑 영역)이 합성된다. 이후 도펀트를 주입하는 도핑 단계에서는 전이금속(Mo, W)이 도펀트로 치환되어 칼코겐 원소와 결합된 도핑 영역(외곽 삼각형 영역)이 합성된다.

[0065] 일 구체예에 따르면, 상기 도핑 방법은 상기 도펀트를 주입하지 않는 미도핑 단계; 및 상기 도펀트를 일정 유량으로 주입하는 도핑 단계를 순차적으로 포함할 수 있다.

[0066] 다른 구체예에 따르면, 상기 도핑 방법은 상기 도펀트를 주입하는 미도핑 단계; 및 상기 도펀트를 일정 유량으로 주입하는 도핑 단계를 하나의 사이클로 하여, 이를 반복 사이클로 포함할 수 있다.

[0067] 일 구체예에 있어서, 상기 공간적으로 분리된 영역들은 각각 p형 반도체 및 n형 반도체의 특성을 나타낼 수 있다. 이에 따라 본 발명의 일 구체예에 따르면 단일 박막 내에서도 도핑 농도가 서로 다른 영역이 공간적으로 분리된 p-n 접합 소재를 in-situ로 구현할 수 있다.

[0068] 상기 도핑 박막의 두께는 100 nm 이하, 50 nm 이하, 또는 10 nm 이하일 수 있다. 구체적으로, 상기 도핑 박막은 5 nm 이하의 두께를 가질 수 있고, 이에 따라 단일 원자층 수준의 2차원 박막을 얻을 수 있다. 보다 구체적으로, 상기 도핑 박막의 두께는 0.1 nm 내지 5 nm, 0.5 nm 내지 5 nm, 또는 1 nm 내지 5 nm일 수 있다.

[0069] 상기 도핑 박막은 2차원의 전이금속 디칼코게나이드(transition-metal dichalcogenides, TMD)의 도핑 박막일 수 있다. 전이금속 디칼코게나이드(TMD)는 하나의 전이금속 원자에 두개의 칼코겐 원자가 공유 결합을 하는 층상 구조이며, 2차원 소재 중 그래핀과 더불어 가장 대중적인 전자 소재로 활용될 수 있다.

[0070] 일 구체예에 있어서, 상기 도핑 박막은 MX_2로 구성된 2차원 박막에 도펀트가 도핑된 것이고, 여기서 M은 전이금속이고, X는 칼코겐 원소일 수 있다.

[0071] 도 1에서 보듯이, 상기 도펀트는 치환형 도핑(substitutional doping)으로 도핑될 수 있다. 구체적으로, MX_2로 구성된 2차원 박막에서 일부 M 원자가 도펀트로 치환된 구조를 가질 수 있다.

[0072] 이와 같이 본 발명에 따르면, 전이금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용한 유기금속화학증착법을 수행하는 중에 이들의 주입 유량을 조절하여, 치환형 도핑 영역이 in-situ로 조절된 2차원 전이금속 디칼코게나이드(TMD) 박막을 효과적으로 제조할 수 있다.

[0073]

[0074] **도핑 박막의 제조 방법**

[0075] 또한 본 발명은 앞서 설명한 도핑 방법을 이용하여 도핑 박막을 제조하는 방법을 제공한다.

[0076] 본 발명의 일 구현예에 따른 도핑 박막의 제조방법은 기판을 준비하는 단계; 및 상기 기판 상에 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용하여 유기금속화학증착법(MOCVD)에 의해 도핑 박막을 형성하면서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 조절하는 단계를 포함한다.

[0077] 먼저 도핑 박막이 증착될 기판을 준비한다.

[0078] 상기 기판은 도핑 박막을 형성하기 위한 베이스로서, 소재 면에서 특별하게 한정되지 않으나, 예를 들어 실리콘, 유리, 플라스틱, 금속 호일 등이 가능하다. 상기 기판의 두께는 특별히 한정되지 않으며, 예를 들어 0.01 mm 이상, 0.1 mm 이상, 0.5 mm 이상 또는 1 mm 이상일 수 있으며, 또한 10 mm 이하, 5 mm 이하, 3 mm 이하 또는 2 mm 이하일 수 있다.

[0079] 상기 기판은 표면에 절연막을 추가로 포함할 수 있다. 상기 절연막은 기판 상에 형성되어 기판과 반도체층 및 전극을 절연시키는 역할을 한다. 상기 절연막은 일반적인 반도체 공정에서 사용되는 절연 물질을 포함할 수 있다. 예를 들어, 상기 절연막은 산화실리콘(SiO_2), 산화하프늄(HfO_2), 산화알루미늄(Al_2O_3), 산화지르코늄(ZrO_2) 및 질화실리콘(Si_3N_4)로 이루어진 군에서 선택되는 절연체 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0080] 상기 절연막은 진공 증착법, 화학 기상 증착법, 물리 기상 증착법, 원자층 증착법, 유기금속 화학 증착법, 플라즈마 화학 증착법, 분자선 성장법, 수소화물 기상 성장법, 스퍼터링, 스핀 코팅, 딥 코팅 등의 방법을 이용하여 형성될 수 있다. 상기 절연막의 두께는 10 nm 이상, 20 nm 이상, 30 nm 이상 또는 50 nm 이상일 수 있고, 또한 500 nm 이하, 300 nm 이하, 200 nm 이하 또는 100 nm 이하일 수 있다. 일례로서, 상기 절연막의 두께는 50 nm 내지 200 nm일 수 있다.

[0081] 이후 상기 기판 상에 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트를 이용하여 유기금속화학증착법(MOCVD)에 의해 도핑 박막을 형성하면서, 상기 금속, 상기 칼코겐 원소 및 상기 도펀트 중에서 적어도 하나의 주입 유량을 조절한다.

[0082] 상기 유기금속화학증착법의 공정 조건과, 이에 사용되는 금속, 칼코겐 원소 및 도펀트의 종류, 및 이들의 주입 유량의 조절 방법에 대한 구체적인 내용은 앞서 설명한 바와 같다.

[0083] 이와 같은 유기금속화학증착 단계를 거치면 기판 상에 도핑 박막을 얻을 수 있다. 이에 따라 본 발명은 기판 및 상기 기판 상에 형성된 도핑 박막을 포함하는 반도체 소자를 제공할 수 있다. 상기 기판 상에 형성된 도핑 박막의 두께는 예를 들어 5 nm 이하로서 단일 원자층 수준의 2차원 박막일 수 있다.

[0084] 본 발명에 따르면, 도핑 농도의 광대역 정밀 조절과 도핑 영역 조절에 용이하도록 기체상의 유기금속 전구체를 활용한 유기금속화학증착법(MOCVD)을 활용하여 2차원 반도체 소재 도핑이 가능하다.

[0085] 특히, 이러한 기체상의 전구체의 합성 과정 동안 질량유량조절계(MFC)를 활용하여 정밀하게 전구체 유량을 조절함으로써, 2차원 반도체 소재의 도핑 농도를 고농도부터 저농도까지 광대역의 범주로 정밀 조절할 수 있다.

[0086] 이에 따라 본 발명은 기존의 고체상 전구체를 활용한 써멀 CVD의 불균일한 치환 도핑 및 2차원 소재 사이즈 제한을 개선하고, 웨이퍼 단위의 대면적 2차원 소재에서 균일한 도핑 농도 및 전기적 물성 변화를 구현하여, 비휘발성의 안정적이고 균일한 박막을 증착할 수 있다.

[0087] 또한 웨이퍼 단위에서 균일 농도의 치환형 도핑을 2차원 소재 합성 과정 내에 진행함으로써, 웨이퍼 단위의 대면적 n형 혹은 p형의 전기적 물성 조절이 가능한 2차원 박막을 균일하게 증착할 수 있다. 이렇게 증착한 박막은 매우 얇은 박막 두께를 가짐에도 높은 결정성과 웨이퍼 전면적에서 도핑 농도와 전기적 물성이 균일할 수 있다. 바람직하게는 본 발명에서 제안하는 펄싱 유기금속화학증착법을 통한 2차원 소재 치환형 도핑법에 의해 원치 않는 표면/격자 결함을 최소화하고, 외부 환경에서도 비휘발성의 안정적인 도핑 박막을 보장할 수 있다.

[0088] 이와 같이 본 발명은 차세대 반도체 소재의 도핑 기술로서, 반도체, 디스플레이 등의 분야에서 고성능, 저전력 신소자 개발에 직접 활용될 수 있다.

[0089] 이하 실시예를 통해 본 발명을 보다 구체적으로 설명한다. 단 이들 실시예로 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

[0090]

[0091] **참고예 1: 순수한(pristine) MoS_2 2차원 박막의 제조**

[0092] 단계 1) Hot-wall MOCVD 장비를 사용하여 SiO_2/Si 기판과 NaCl block (촉매제)를 로딩하였다. 기판 로딩 후, 약 10^{-1} Torr까지 진공상태를 만든 후, Ar 비활성 가스만을 주입하며 기판이 놓여있는 석영튜브(반응챔버)를 550℃의 공정온도까지 튜브 전기로(tube furnace)를 이용하여 승온하였다. 이때의 승온속도는 15℃/min이었다.

[0093] 단계 2) 550℃의 공정온도가 형성되면 Mo 전구체로서 $Mo(CO)_6$ 및 S 전구체로서 $(CH_3CH_2)_2S$를 Ar, H_2 가스와 함께 반응챔버에 주입하였다. 이때 이들 가스 모두는 질량유량조절계(MFC)를 통해 일정하게 그 유량을 조절하면서 주입하였다. 구체적으로 Mo 전구체는 1 sccm 유량으로, S는 0.5 sccm, Ar은 350 sccm, H_2는 2 sccm의 유량으로 주입하였다. 이들 가스는 모두 동시에 주입하였으며, 이때 반응챔버의 공정압력을 2.5 Torr를 유지하였다. 그리고 550℃의 공정온도를 유지한 상태로 6시간의 공정시간 동안 상기 전구체와 운송 가스들을 일정하게 주입하였으며 로딩된 기판 위에서 순수한(pristine) MoS_2의 합성을 진행하였다.

[0094] 그리고 공정시간이 끝나면 Mo 전구체, S 전구체, H_2 가스의 주입을 멈추고, 오로지 Ar 가스만을 주입하였으며, 튜브 전기로를 열어서 550℃의 공정온도를 상온까지 서서히 식혔다.

[0095]

[0096] **실시예 1: V-도핑된 MoS_2 2차원 박막의 제조**

[0097] 상기 참고예 1의 단계 1 및 2의 절차를 동일하게 반복하되, 단계 2에서 550℃의 공정온도가 형성되었을 때 Ar, H_2 가스와 함께 Mo 전구체로서 $Mo(CO)_6$, 및 S 전구체로서 $(CH_3CH_2)_2S$, 및 V 전구체로서 $VO(OCH_2CH_3)_3$를 동시에 주입하였다. V 전구체 역시 MFC를 통해 일정하게 그 유량을 조절하여 주입하였으며, 이때의 유량은 0.05 sccm이었다. 이후 공정시간이 끝나면 Mo, S, V 전구체의 주입을 멈추고 오로지 Ar 비활성 가스만을 주입하며 식혔다.

[0098]

[0099] **시험예 1: 2차원 박막의 분석**

[0100] 상기 비교예 및 실시예에서 제조한 박막을 아래와 같이 시험하였다.

[0101]

[0102] (1) 라만 분석

[0103] 상기 실시예 1에서 얻은 V-도핑된 MoS_2 박막 및 참고예 1에서 얻은 순수한 MoS_2 박막에 대해 라만 분석을 수행하여 그 결과를 도 4에 나타내었다. 구체적으로, 라만 분석 장치는 공초점 라만(Confocal Raman) 장비를 사용하였

으며, 라만 분석에서 2 mW의 레이저 빔을 0.5초 동안 투과하여 그 빛 에너지가 격자 구조에 따라서 산란되어 반사되는 빛 에너지를 빛 파장에 따라 분석하였다.

[0104]

[0105] (2) XPS 분석

[0106] 상기 실시예 1에서 얻은 V-도핑된 MoS_2 박막 및 참고예 1에서 얻은 순수한 MoS_2 박막에 대해 XPS 분석을 수행하여 그 결과를 도 5에 나타내었다. 또한 실시예 1에서 얻은 V-도핑된 MoS_2 박막의 XPS 스펙트럼의 확대도를 도 6에 나타내었다. 구체적으로, XPS 분석 장치는 X선 광전자 분광기(장비명: ESCALAB 250XI)를 사용하였으며, 단색(monochromated) AI-Kα 에너지 소스를 이용하여 1 cm x 1 cm의 시편에 광원을 조사하고 이로 인한 시편 물질의 결합 에너지를 측정하였다.

[0107]

[0108] 도 4의 라만 스펙트럼에서 노란색 박스를 친 부분에서 보듯이, 도핑이 되어 있지 않은 순수한 MoS_2에서 관측되지 않는 피크들이 V-도핑된 MoS_2에서는 관측되었으며, 피크 위치는 기존의 V-도핑된 MoS_2의 라만 스펙트럼 레퍼런스와 일치하였다.

[0109] 도 5의 XPS 스펙트럼을 보면, 도핑되지 않은 순수한 MoS_2 박막에서는 V 원소의 XPS 피크가 발견되지 않았고, V 원소의 전구체($VO(OCH_2CH_3)_3$)를 함께 주입하여 V-도핑된 MoS_2 박막에서는 V 원소의 XPS 피크가 관측되었으며, 이를 확대하였을 때 도 6의 XPS 스펙트럼처럼 관측되었다. 관측된 피크의 위치는 V 원소의 피크 위치 레퍼런스와 일치하였다.

[0110]

[0111] **실시예 2: MoS_2/V-도핑된 MoS_2 이종접합 2차원 박막의 제조**

[0112] 상기 참고예 1의 단계 1 및 2의 절차를 반복하되, 단계 2에서 550℃의 공정온도가 형성되었을 때 4시간의 공정시간 동안 Mo 전구체, S 전구체, Ar 및 H_2 가스를 주입하면서 순수한 MoS_2 영역(도 7의 가운데 어두운 색상 영역)을 성장시켰다. 그리고 이후 4시간 동안 Mo 전구체, S 전구체, H_2 및 Ar 가스와 함께 0.3 sccm의 유량으로 V 전구체를 주입함으로써 V-도핑된 MoS_2 영역(도 7에서 외곽에 색상이 좀 더 연한 영역)을 바깥쪽에 성장시켰다. 공정이 완료되면 Ar 비활성 가스를 제외한 나머지 모든 가스 주입을 멈추고 튜브 전기로(tube furnace)를 열고 온도를 천천히 식혔다.

[0113]

[0114] **시험예 2: 2차원 박막의 분석**

[0115] 상기 실시예 2에서 얻은 V-도핑 구역이 조절된 MoS_2 박막을 분석하였다.

[0116]

[0117] (1) SEM

[0118] 상기 실시예 2에서 얻은 V-도핑 구역이 조절된 MoS_2 박막을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하여 그 이미지를 도 7에 나타내었다. 구체적으로, 전자빔을 시편에 주사하여 그로 인해 방출되는 전자로 시편의 표면 모폴로지 분석을 할 수 있는 장비인 저온전계방출형 주사전자현미경을 사용하였으며, 측정에 사용한 전자빔은 10kV, 7mA로 조절하였다.

[0119]

[0120] (2) AFM

[0121] 상기 실시예 2에서 얻은 V-도핑 구역이 조절된 MoS_2 박막을 원자힘 현미경(AFM)으로 관찰하여 그 이미지를 도 8에 나타내었다. 구체적으로, 나노-마이크로 시편 측정용으로 제작된 탐침을 시료 표면에 가져갔을 때 생기는 원자 간의 상호 작용력 및 두께를 측정하는 AFM 장치를 이용하여, 시편의 표면을 관찰하고 시료의 표면을 nm 단위

이하 수준으로 3차원적 형상을 분석하였다.

[0122]

[0123] (3) EFM

[0124] 상기 실시예 2에서 얻은 V-도핑 구역이 조절된 MoS_2 박막을 정전기력 현미경(EFM)으로 관찰하여 그 이미지를 도 9에 나타내었다. 구체적으로, 정전기력을 조사하여 캔틸레버가 진동하여 비접촉식으로 전도성 물질의 전위차를 측정하는 EFM 장치를 이용하여, 캔틸레버의 진동 및 위상과 정전기력 변화로 도핑 구역과 미도핑 구역에서 생기는 전위차를 구분하였다.

[0125]

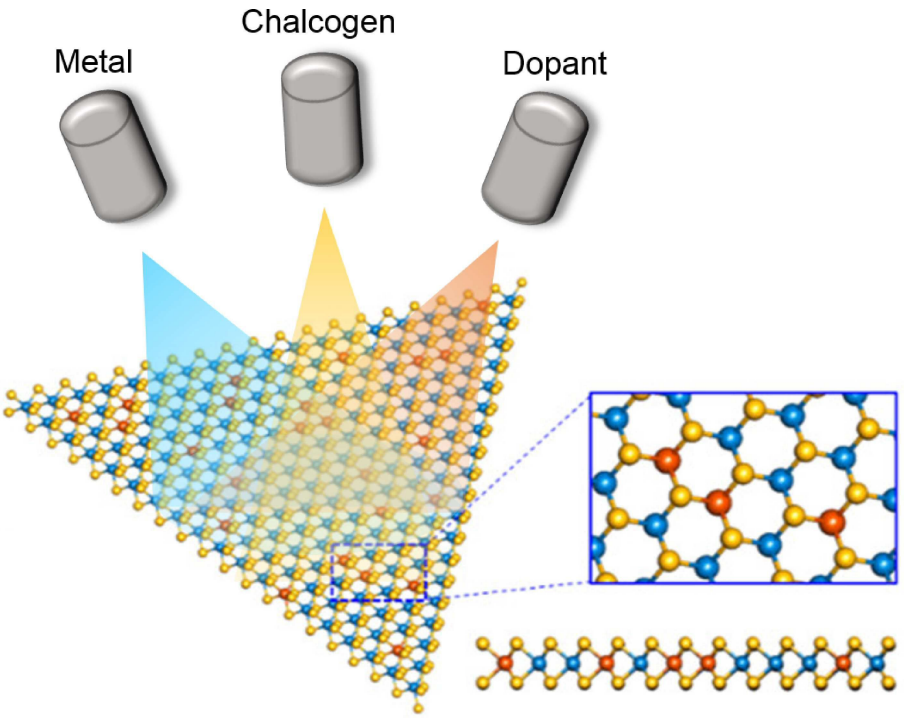
[0126] 도 7의 SEM 이미지를 보면, 삼각형으로 성장된 MoS_2의 가운데 부분과 바깥 부분에 색상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 여기서 가운데 부분은 도핑이 되지 않은 영역이며, 바깥 부분은 도핑이 된 영역이다. 이와 같이 pulse-MOCVD 방식을 통해 도핑 구역을 조절할 수 있음을 확인하였다.

[0127] 도 8에서 좌측의 AFM 이미지(Height) 및 도 9에서 좌측의 EFM 이미지(Height)를 보면 성장된 MoS_2의 높이가 모두 동일한 것을 알 수 있다. 반면, 도 8에서 우측의 AFM 이미지(Phase) 및 도 9에서 우측의 EFM 이미지(Potential)를 보면 외곽 부분이 가운데 부분과 다르게 색상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

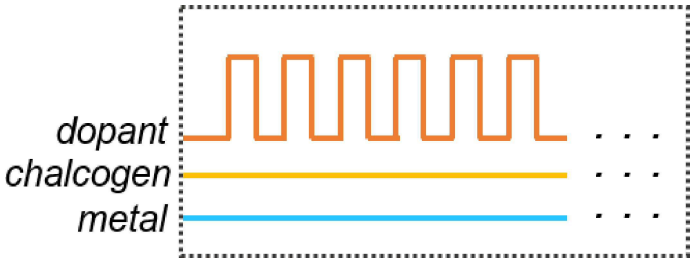
[0128] 이로서 같은 MoS_2 박막 내에서도 도핑 구역 조절에 따라 도핑이 되지 않은 가운데 영역과 도핑이 진행된 바깥 영역이 다른 분석 이미지를 가지는 것을 확인할 수 있다.

도면

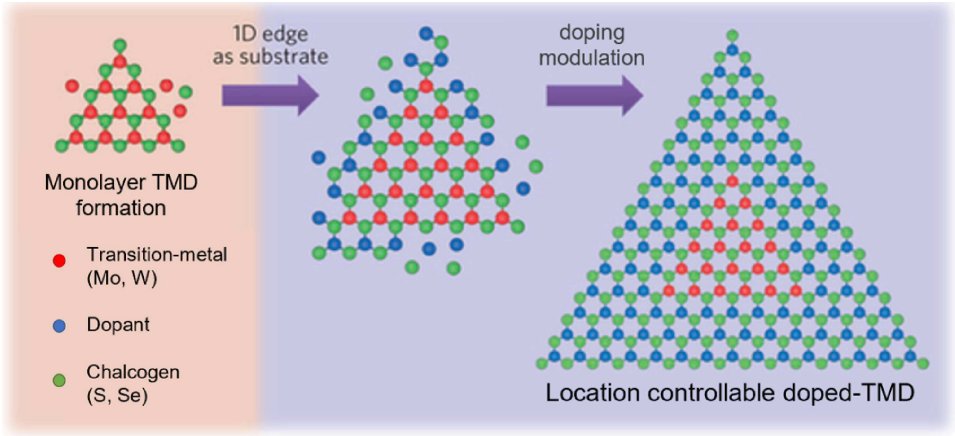
도면1



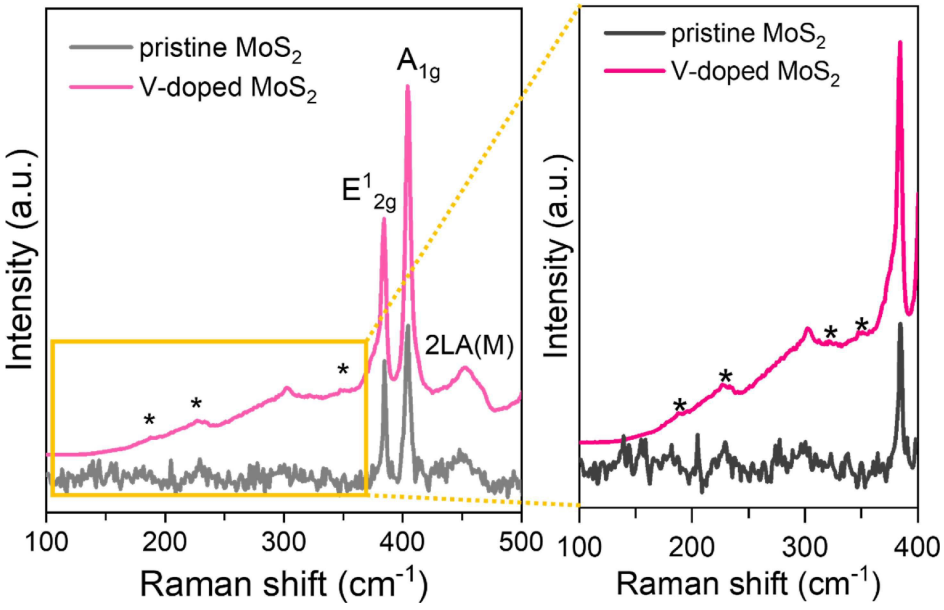
도면2


dopant
chalcogen
metal

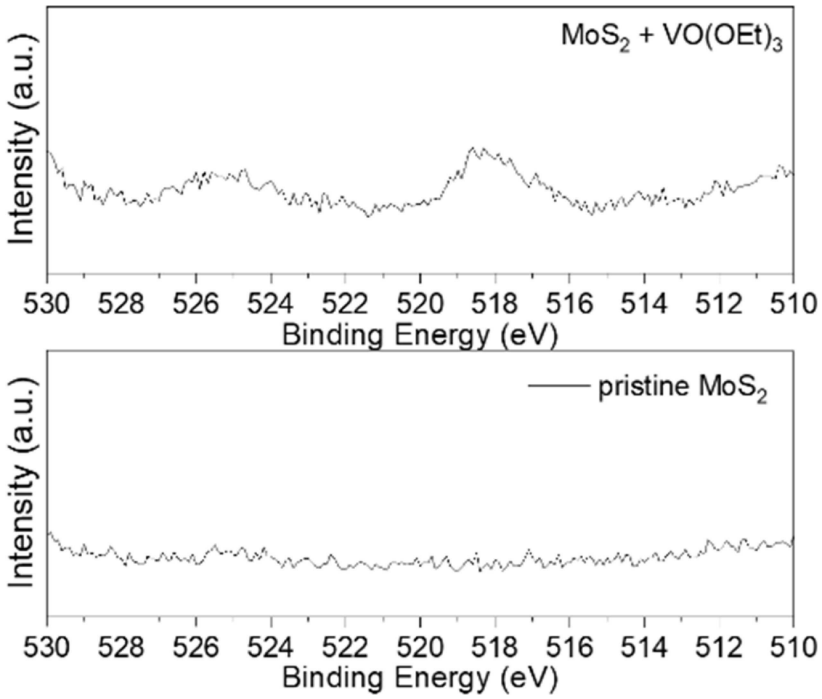
도면3


1D edge
as substrate
doping
modulation
Monolayer TMD
formation
Transition-metal
(Mo, W)
Dopant
Chalcogen
(S, Se)
Location controllable doped-TMD

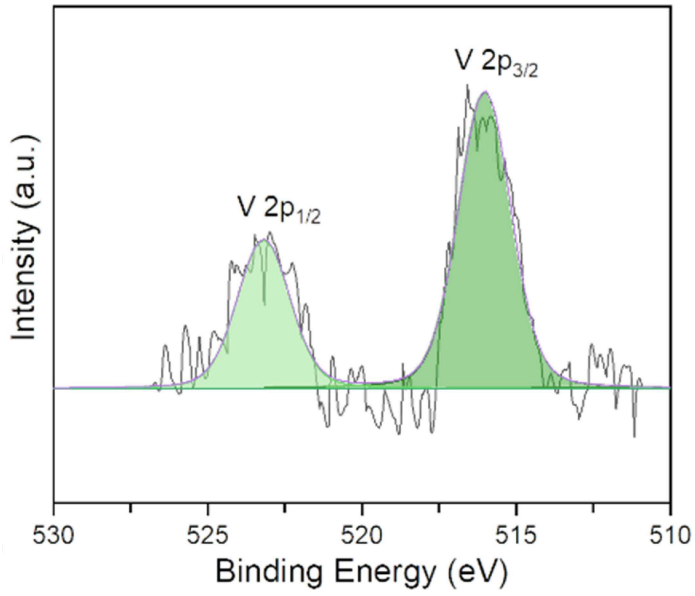
도면4


pristine MoS2
V-doped MoS2
A1g
E12g
2LA(M)
Intensity (a.u.)
Raman shift (cm-1)
100
200
300
400
500

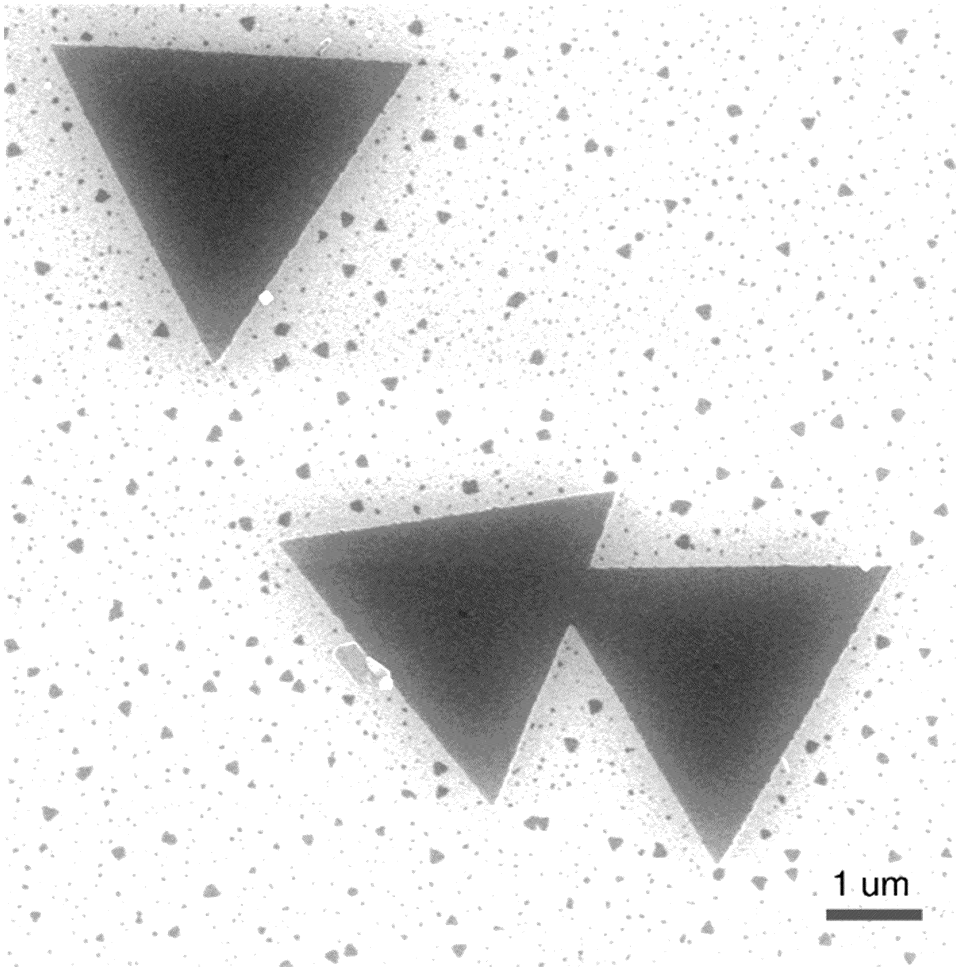
도면5


MoS2 + VO(OEt)3
Intensity (a.u.)
530 528 526 524 522 520 518 516 514 512 510
Binding Energy (eV)
pristine MoS2
Intensity (a.u.)
530 528 526 524 522 520 518 516 514 512 510
Binding Energy (eV)

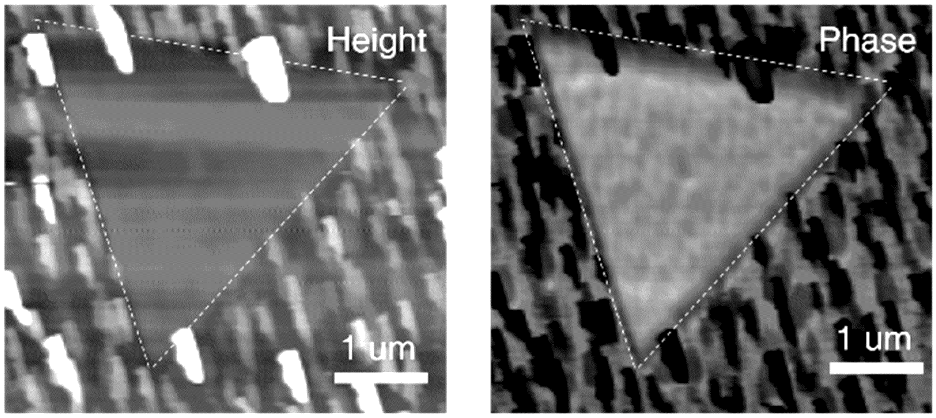
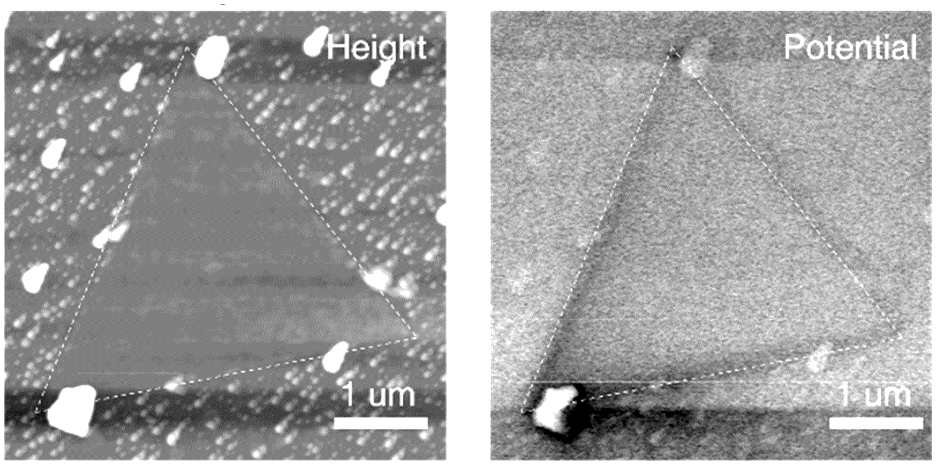
도면6


V 2p3/2
V 2p1/2
Intensity (a.u.)
530 525 520 515 510
Binding Energy (eV)

도면7



도면8



도면9