



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0030249
(43) 공개일자 2023년03월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 33/06 (2010.01) H01L 33/00 (2023.01)
B82Y 20/00 (2017.01)
(52) CPC특허분류
H01L 33/06 (2013.01)
H01L 33/002 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0112246
(22) 출원일자 2021년08월25일
심사청구일자 2021년08월25일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암
동5가)
(72) 발명자
이철호
서울특별시 성북구 화랑로48길 16, 115동 1102호
김윤석
서울특별시 중랑구 공릉로2길 39, 102동 803호
(74) 대리인
권성현, 유광철, 백두진, 강일신, 김정연

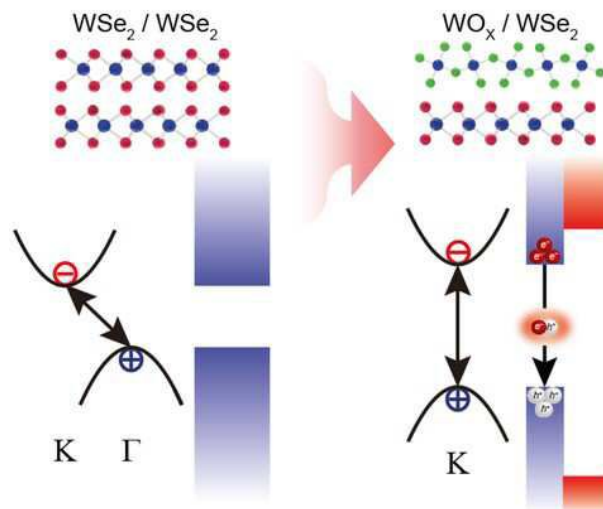
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 전이금속 칼코게나이드의 모노리식 밴드갭 제어에 의한 양자우물 구조 소자 제조 방법

(57) 요약

전이금속 칼코게나이드의 모노리식 밴드갭 제어를 통한 양자우물 구조 소자 제조 방법이 개시된다. 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자 제조 방법은: (a) 기판 상에 전이금속 칼코겐 화합물을 제공하여 복수개의 전이금속 칼코게나이드층이 적층된 다중층을 형성하는 단계; 및 (b) 상기 다중층 중의 상부층을 산화시켜 적어도 하나의 전이금속 칼코게나이드층 상에 전이금속 산화물층을 형성함으로써 양자우물 구조의 이중접합 구조를 생성하는 단계;를 포함한다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

H01L 33/005 (2013.01)

B82Y 20/00 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711135342
과제번호	2021M3H4A1A01079471
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	나노미래소재원천기술개발(R&D)
연구과제명	모노리식 집적가능한 원거리 변조도핑 기반의 초고이동도 원자층 반도체소자 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	고려대학교
연구기간	2021.05.10 ~ 2021.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

- (a) 기판 상에 전이금속 칼코겐 화합물을 제공하여 복수개의 전이금속 칼코게나이드층이 적층된 다중층을 형성하는 단계; 및
- (b) 상기 다중층 중의 상부층을 산화시켜 적어도 하나의 전이금속 칼코게나이드층 상에 전이금속 산화물층을 형성함으로써 양자우물 구조의 이중접합 구조를 생성하는 단계;를 포함하는 양자우물 구조 소자 제조 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 (b) 단계는 오존 또는 플라즈마 처리를 통한 모노리식 밴드갭 제어 공정에 의해 상기 양자우물 구조의 이중접합 구조를 생성하는 단계;를 포함하는 양자우물 구조 소자 제조 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 전이금속 칼코게나이드층은 엑시톤을 구속하여 발광하는 양자 우물층이고,

상기 전이금속 산화물층은 전자 또는 정공을 구속하여 광전하가 분리되지 않게 막아주는 양자 장벽층인, 양자우물 구조 소자 제조 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 (a) 단계는 상기 기판 상에 간접 천이 밴드갭을 가지는 다중층을 형성하는 단계를 포함하고,

상기 (b) 단계는 상기 다중층 중의 상부층 일부만 산화하여 직접 천이 밴드갭을 가지는 하부의 전이금속 칼코게나이드층과 상부의 전이금속 산화물층으로 이루어지는 단일 양자우물 구조를 구현하는 단계를 포함하는, 양자우물 구조 소자 제조 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 (a) 단계와 상기 (b) 단계를 반복 수행하여 상기 단일 양자우물 구조가 반복하여 형성된 다중 양자우물 구조를 구현하는 단계;를 더 포함하는, 양자우물 구조 소자 제조 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 전이금속 칼코겐 화합물은 전이금속(M)과 칼코겐 물질(X)의 화합물로서 화학식 M_aX_b (a, b는 각각 1 이상의 정수)로 구성되고,

상기 전이금속은 Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Tc, Re, Pd, Pt, In 및 Sn으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함하고,

상기 칼코겐 물질은 S, Se, 및 Te으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함하는, 양자우물 구조 소자 제조 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 양자우물 구조는 단일 양자우물 구조, 이중 양자우물 구조 및 삼중 양자우물 구조 중의 어느 하나인, 양자우물 구조 소자 제조 방법.

청구항 8

제1항 내지 제7항 중 어느 한 항의 양자우물 구조 소자 제조 방법에 의해 제조되는 양자우물 구조 소자로서,

이종접합 구조의 단일 양자우물 구조가 반복하여 형성된 다중 양자우물 구조를 가지며,

상기 단일 양자우물 구조는:

상기 기판 상에 형성되는 상기 적어도 하나의 전이금속 칼코게나이드층; 및

상기 전이금속 칼코게나이드층 상에 형성되는 전이금속 산화물층;을 포함하는 양자우물 구조 소자.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 전이금속 칼코게나이드층은 전이금속(M)과 칼코겐 물질(X)의 화합물로서 화학식 M_aX_b (a, b는 각각 1 이상의 정수)로 구성되고,

상기 전이금속은 Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Tc, Re, Pd, Pt, In 및 Sn으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함하고,

상기 칼코겐 물질은 S, Se, 및 Te으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함하는, 양자우물 구조 소자.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 다중 양자우물 구조는 이중 양자우물 구조 또는 삼중 양자우물 구조인, 양자우물 구조 소자.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 전이금속 칼코게나이드(transition metal chalcogenides)의 모노리식 밴드갭(monolithic bandgap) 제어에 의한 양자우물 구조 소자 제조 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 효율적인 광소자를 구현하기 위해서는 이종접합 간의 밴드갭 정렬이 매우 중요하다. 광전소자에 많이 쓰이는 대표적인 밴드 정렬 방식은 전하를 구속시켜 효율적인 엑시톤 형성을 구현하는 type-I 밴드 정렬 방식과, 전하를 분리시켜 효율적인 광전류를 생성하는 type-II 밴드 정렬 방식으로 나눌 수 있다. type-I의 경우 고효율 발광소자에, type-II의 경우 수광소자에 필수적인 요소이다. 많이 보고되고 있는 이차원 재료 중 전이금속 칼코겐 화합물(Transition metal chalcogenides)은 광역대의 밴드갭, 높은 빛-물질 간 상호작용 등 우수한 광특성을 보이고 있어 광소자 응용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 300~500 meV에 육박하는 높은 엑시톤 결합 에너지, 단층에서 나타나는 직접 천이 밴드갭의 특성은 높은 발광 효율을 확보할 수 있어 단층 이차원 재료 기반의 발광소자들이 많이 연구되고 있다.

[0003] 상기와 같이 전이금속 칼코겐 화합물의 우수한 광특성을 차용하여 p-n 다이오드, 스플릿-게이트(Split-gate) 기반의 발광소자들이 보고되었으나, 다층 구조에서는 간접 천이 밴드갭으로 바뀌는 특성으로 인해 높은 발광효율을 구현하기에 어려움이 존재한다. 추가로 발광 효율을 극대화하기 위해서는 엑시톤을 구속시킬 수 있는 type-I, 즉 양자 우물 밴드 구조의 구현이 필수적이지만, 전이금속 칼코겐 화합물의 밴드 정렬은 type-II 밴드 정렬이 우세하기 때문에 양자 우물 구조를 구현하는데 한계가 존재한다. 기존에 보고된 양자 우물 구조 기반 발광소자의 경우, 이차원 물질 중 절연체의 성질을 가지고 있는 h-BN을 적층하여 구현한 보고가 있으나, 이는 이중

물질을 적층하는 과정에서 이물질이 함입되면서 발광 효율을 저하시킬 수 있기 때문에 새로운 방법이 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0004] 본 발명은 상기한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 전이금속 칼코게나이드의 모노리식 밴드갭 제어에 의한 양자우물 구조 소자 제조 방법을 제공하기 위한 것이다.
- [0005] 또한, 본 발명은 오존 또는 플라즈마 처리를 이용한 모노리식 밴드갭 제어 공정을 통해 이상적인 계면을 가지는 양자 우물 구조의 이중접합을 구현하여 엑시톤 구속효과를 실현할 수 있는 양자우물 구조 소자 제조 방법을 제공하기 위한 것이다.
- [0006] 또한, 본 발명은 오존 또는 플라즈마 처리를 통한 모노리식 밴드갭 제어 공정을 반복하여 다중 양자 우물 구조를 구현함으로써 발광층간의 비동조화를 유발하여 활성부피를 증가시키고 발광 강도를 증대시킬 수 있는 양자우물 구조 소자 제조 방법을 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

- [0007] 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자 제조 방법은: (a) 기판 상에 전이금속 칼코겐 화합물을 제공하여 복수개의 전이금속 칼코게나이드층이 적층된 다중층을 형성하는 단계; 및 (b) 상기 다중층 중의 상부층을 산화시켜 적어도 하나의 전이금속 칼코게나이드층 상에 전이금속 산화물층을 형성함으로써 양자우물 구조의 이중접합 구조를 생성하는 단계;를 포함한다.
- [0008] 상기 (b) 단계는 오존 또는 플라즈마 처리를 통한 모노리식 밴드갭 제어 공정에 의해 상기 양자우물 구조의 이중접합 구조를 생성하는 단계;를 포함할 수 있다.
- [0009] 상기 전이금속 칼코게나이드층은 엑시톤을 구속하여 발광하는 양자 우물층이고, 상기 전이금속 산화물층은 전자 또는 정공을 구속하여 광전하가 분리되지 않게 막아주는 양자 장벽층일 수 있다.
- [0010] 상기 (a) 단계는 상기 기판 상에 간접 천이 밴드갭을 가지는 이중층을 형성하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 (b) 단계는 상기 이중층 중의 상부층만 산화하여 직접 천이 밴드갭을 가지는 단일층의 전이금속 칼코게나이드층과 단일층의 전이금속 산화물층의 단일 양자우물 구조를 구현하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0011] 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자 제조 방법은: 상기 (a) 단계와 상기 (b) 단계를 반복 수행하여 상기 단일 양자우물 구조가 반복하여 적층된 다중 양자우물 구조를 구현하는 단계;를 더 포함할 수 있다.
- [0012] 상기 전이금속 칼코겐 화합물은 전이금속(M)과 칼코겐 물질(X)의 화합물로서 화학식 M_aX_b 로 구성될 수 있다. 상기 전이금속은 Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Tc, Re, Pd, Pt, In, 및 Sn으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함할 수 있다. 상기 칼코겐 물질은 S, Se, 및 Te으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함할 수 있다.
- [0013] 상기 양자우물 구조는 단일 양자우물 구조, 이중 양자우물 구조 및 삼중 양자우물 구조 중의 어느 하나일 수 있다.
- [0014] 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자는 상기 양자우물 구조 소자 제조 방법에 의해 제조된 양자우물 구조 소자로서, 이중접합 구조의 단일 양자우물 구조가 반복하여 적층된 다중 양자우물 구조를 가지며, 상기 단일 양자우물 구조는 상기 기판 상에 형성되는 상기 적어도 하나의 전이금속 칼코게나이드층; 및 상기 전이금속 칼코게나이드층 상에 형성되는 전이금속 산화물층;을 포함한다.
- [0015] 상기 전이금속 칼코게나이드층은 전이금속(M)과 칼코겐 물질(X)의 화합물로서 화학식 M_aX_b 로 구성될 수 있다. 상기 전이금속은 Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Tc, Re, Pd, Pt, In, 및 Sn으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함할 수 있다. 상기 칼코겐 물질은 S, Se, 및 Te으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0016] 본 발명의 실시예에 의하면, 상기한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 전이금속 칼코게나이드의 모

노리식 밴드갭 제어에 의한 양자우물 구조 소자 제조 방법이 제공된다.

[0017] 본 발명의 실시예에 의하면, 오존 또는 플라즈마 처리를 통한 모노리식 밴드갭 제어 공정을 활용하여 이상적인 계면을 가지는 양자 우물 구조의 이중접합을 구현하여 엑시톤 구속효과를 실현할 수 있다.

[0018] 또한, 본 발명의 실시예에 의하면, 오존 또는 플라즈마 처리를 통한 모노리식 밴드갭 제어 공정을 반복하여 다중 양자 우물 구조를 구현함으로써 발광층간의 비동조화를 유발하여 활성 부피를 증가시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1 및 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자 제조 방법을 보여주는 모식도이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 모노리식 기반 밴드갭 제어 공정의 모식도이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따라 제조된 단일 양자우물 구조 소자의 밴드 구조를 나타낸 개념도이다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따라 제조된 다중 양자우물 구조 소자의 모식도이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 다중 양자우물 구조 소자의 현미경 이미지이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 다중 양자우물 구조 소자의 밴드 구조를 나타낸 개념도이다.

도 8은 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자의 제조 과정을 나타낸 개념도이다.

도 9는 본 발명의 실시예에 따라 제조된 양자우물 구조 소자의 광학 이미지와 광발광 맵의 예시도이다.

도 10은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 양자우물 구조 소자의 발광 강도를 나타낸 그래프이다.

도 11은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 양자우물 구조 소자의 광발광 세기 및 반치전폭의 히스토그램이다.

도 12는 본 발명의 실시예에 따라 제조된 삼중 양자우물 구조 소자의 여기 세기에 따른 300 K 에서의 광발광 스펙트럼 변화를 나타낸 도면이다.

도 13은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 양자우물 구조 소자의 여기강도에 따른 저주파 라만 스펙트럼과 고주파 라만 스펙트럼을 나타낸 도면이다.

도 14는 본 발명의 실시예에 따라 제작된 단일 양자우물 구조 소자의 온도에 따른 광발광 스펙트럼 변화를 나타낸 그래프이다.

도 15는 본 발명의 실시예에 따라 제작된 양자우물 구조 소자의 온도에 따른 중성 엑시톤 에너지와 누적 세기를 나타낸 그래프이다.

도 16은 본 발명의 실시예에 따라 제작된 삼중 양자우물 구조 소자의 300 K 온도에서의 감쇄 시간에 따른 광발광 세기 변화를 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 이하에서는 본 발명의 구체적인 실시예들에 대하여 도면을 참조하여 상세히 설명한다. 아울러 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략한다. 본 발명의 실시예들은 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명을 더욱 완전하게 설명하기 위하여 제공되는 것이며, 하기 실시예는 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다. 오히려, 이들 실시예는 본 개시를 더욱 충실하고 완전하게 하고, 당업자에게 본 발명의 사상을 완전하게 전달하기 위하여 제공되는 것이다.

[0021] 또한, 이하의 도면에서 각 구성은 설명의 편의 및 명확성을 위하여 과장된 것이며, 도면 상에서 동일 부호는 동일한 요소를 지칭한다. 본 명세서에서 사용된 용어는 특정 실시예를 설명하기 위하여 사용되며, 본 발명을 제한하기 위한 것이 아니다. 본 명세서에서 사용된 바와 같이, 단수 형태는 문맥상 다른 경우를 분명히 지적하는 것이 아니라면, 복수의 형태를 포함할 수 있다.

[0022] 도 1 및 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자 제조 방법을 보여주는 모식도이다. 먼저 도 1을 참조하면, 기판(10) 상에 전이금속 칼코겐 화합물을 증착, 전사 등의 방식으로 제공하여 복수개의 전이금속 칼코게나이드층이 적층된 다중층(20)을 형성한다. 기판(10)은 실리콘 기판, 사파이어 기판, 반도체 기판, 유리 기판, 유연 기판 등으로 구현될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

- [0023] 기판(10) 상에 제공되는 전이금속 칼코겐 화합물은 전이금속(M)과 칼코겐 물질(X)의 화합물로서 화학식 M_aX_b (a, b는 각각 1 이상의 정수)로 구성될 수 있다. 전이금속(M)은 4~7족의 금속으로, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Mo, W, Tc, Re, Pd, Pt, In, 및 Sn으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함할 수 있다. 칼코겐 물질(X)은 S, Se, 및 Te으로 이루어진 군에서 선택되는 적어도 1종의 물질을 포함할 수 있다.
- [0024] 도 1에서 기판(10) 상에 형성되는 전이금속 칼코게나이드 다중층(20)은 간접 천이 밴드갭을 가지는 이중층으로 구현되어 있으나, 삼중층 이상으로 구현될 수도 있다. 다중층(20)은 기판(10) 상에 형성되는 하부층(22)과, 하부층(22) 상에 형성되는 상부층(24)을 포함할 수 있다. 하부층(22)과 상부층(24)은 동일한 전이금속 칼코겐 화합물로 구성될 수 있다.
- [0025] 기판(10) 상에 전이금속 칼코게나이드 다중층(20)이 형성되면, 도 2에 도시된 바와 같이, 다중층(20) 중 상부층(24)을 산화시켜 적어도 하나의 전이금속 칼코게나이드층(하부층, 22) 상에 직접 천이 밴드갭을 가지는 단일층의 전이금속 산화물층(34)을 형성함으로써, 전이금속 칼코게나이드층(32)과 단일층의 전이금속 산화물층(34)으로 이루어지는 단일 양자우물 구조의 이중접합 구조를 생성할 수 있다.
- [0026] 이때, 상부층(24)의 산화는 오존 처리 또는 산소 플라즈마 처리를 통한 모노리식 밴드갭 제어 공정에 의해 수행될 수 있다. 특히 오존 처리를 이용할 경우 층 단위의 산화 및 산화 균일도를 정밀하게 조절할 수 있다. 모노리식 밴드갭 제어 공정에 의해 상부층(24)은 결정질(crystalline) 전이금속 칼코게나이드에서 비정질(amorphous) 전이금속 산화물로의 구조적 위상 변화가 유발된다.
- [0027] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 모노리식 기반 밴드갭 제어 공정의 모식도이다. 도 4는 본 발명의 실시예에 따라 제조된 단일 양자우물 구조 소자의 밴드 구조를 나타낸 개념도이다. 도 1 내지 도 4를 참조하면, 다중층(20)의 하부층(22)에 해당하는 전이금속 칼코게나이드층(32)은 엑시톤을 구속하여 발광하는 양자 우물층에 해당하며, 오존 또는 플라즈마 처리를 통한 모노리식 밴드갭 제어 공정에 의해 생성되는 전이금속 산화물층(34)은 전자 또는 정공을 구속하여 광전하가 분리되지 않게 막아주는 양자 장벽층에 해당한다.
- [0028] 도 3에서, 전이금속 칼코게나이드층(32)은 WSe_2 물질로 이루어져 있으며, 전이금속 산화물층(34)은 오존을 이용한 모노리식 기반 밴드갭 제어 공정을 통해 구현된 WO_x 물질로 이루어져 있다. WO_x/WSe_2 는 양자 우물 구조의 이중접합으로, WSe_2 와 WO_x 에서 생성된 광전하 및 엑시톤을 WSe_2 층 안에 구속시켜 엑시톤 구속효과를 증가시킬 수 있다.
- [0029] 이때 WSe_2 는 생성된 광전하를 구속하는 양자 우물층, WO_x 는 광전하가 분리되지 않게 막아주는 양자 장벽층의 역할을 담당한다. 이러한 공정을 이용할 경우, 간접 천이 밴드갭을 가지고 있는 이중층 WSe_2 을 단일층만 산화하여 직접 천이 밴드갭을 가지는 단일층 WSe_2 와 WO_x 의 단일 양자우물 구조를 구현할 수 있다.
- [0030] 도 5는 본 발명의 실시예에 따라 제조된 다중 양자우물 구조 소자의 모식도이다. 도 6은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 다중 양자우물 구조 소자의 현미경 이미지이다. 도 7은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 다중 양자우물 구조 소자의 밴드 구조를 나타낸 개념도이다.
- [0031] 도 1, 도 2, 도 5 내지 도 7을 참조하면, 도 1 및 도 2에 도시된 바와 같은 과정을 통해 단일 양자우물 구조를 생성하는 과정을 반복적으로 수행하여, 도 5 및 도 6에 도시된 바와 같이 단일 양자우물 구조(30)가 반복하여 적층된 다중 양자우물 구조(40)의 소자를 제조할 수 있다.
- [0032] 이와 같이, 단일 양자 우물을 단위 구조로 이용하여 다중 우물 구조의 소자를 구현할 수 있으며, 이를 통해 엑시톤 결합 확률을 높여 발광효율을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라, 발광층인 WSe_2 간의 상호작용을 저해하여 발광 부피를 극대화시킬 수 있다.
- [0033] 도 8은 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자의 제조 과정을 나타낸 개념도이다. 본 발명의 실시예에 따른 양자우물 구조 소자를 제조하여 성능을 검증하는 실험을 하였다. 층별 산화 공정을 위해 UV-오존 처리 장비 내에서 100°C , 1시간동안 오존 처리를 하였다.
- [0034] 이후, 제조된 샘플의 접착력을 증가시키기 위해 목표로 하는 플레이크 위에 Poly(Methyl Methacrylate) (PMMA)를 스핀 코팅하고, 지지대로 쓰이는 Polydimethylsiloxane (PDMS)와의 접착력을 증가시키기 위해 PPC(Polypropylene carbonate)를 스핀 코팅한 후, 기판에서 분리하고자 하는 부분을 제외한 다른 곳을 제거하였다.

- [0035] 증류수와 1:1 비율로 희석시킨 불산 용액을 이용하여 습식 식각 공정을 진행하여, PMMA/PPC 필름을 불산 용액 표면 위로 띄웠다. 불산 용액에 띄워져 있는 PMMA/PPC 필름을 떼내기 위해 금으로 코팅된 더미 기판을 사용하여 증류수가 들어있는 용기로 옮겨 불산 용액을 제거하였다.
- [0036] 그리고, 금이 코팅된 더미 기판을 이용하여 빈 SiO_2/Si 기판에 PMMA/PPC 필름을 옮기고, PMMA/PPC 필름 위에 PDMS를 올린 상태에서 증류수 위에 띄운 후, 띄운 PDMS/PMMA/PPC 블록을 슬라이드 글래스 위에 올렸다. 이러한 과정에서 준비한 슬라이드 글래스와 PDMS/PMMA/PPC를 정밀 적층을 위해 정밀 조절장치에 삽입하고, 현미경을 통해 적층하고자 하는 영역에 정렬 후 적층하였으며, PMMA/PPC를 유기 용매에 의해 제거하였다. 상술한 과정을 반복하여 단일 양자우물 구조 소자가 적층된 다중 양자우물 구조 소자(이중 양자우물 구조, 삼중 양자우물 구조)를 제조하였다.
- [0037] 도 9는 본 발명의 실시예에 따라 제조된 양자우물 구조 소자의 광학 이미지와 광발광 맵의 예시도이다. 도 10은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 양자우물 구조 소자의 발광 강도를 나타낸 그래프이다. 도 11은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 양자우물 구조 소자의 광발광 세기 및 반치전폭(FWHM; full width half maximum)의 히스토그램이다. 도 9에서 스케일바는 $10\ \mu\text{m}$ 길이다.
- [0038] 도 9 내지 도 11에서, 'SQW'는 단일 양자우물 구조 소자(검정 또는 회색으로 도시), 'DQWs'는 이중 양자우물 구조 소자(적색으로 도시), 'TQWs'는 삼중 양자우물 구조 소자(청색으로 도시)를 나타낸다. 도 9 내지 도 11을 참조하면, 양자우물의 개수가 증가할수록 발광 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 다중 양자우물의 개수 증가에 따라 반치전폭이 증가하지 않는 것으로부터 다중 양자우물의 제조 과정에서 특별한 구조적 결함이 발생하지 않음을 의미한다.
- [0039] 도 12는 본 발명의 실시예에 따라 제조된 삼중 양자우물 구조 소자의 여기세기에 따른 300 K에서의 광발광 스펙트럼 변화를 나타낸 도면이다. 도 12에서 여기 세기(excitation power)은 $0.09\ \mu\text{W}$ 에서 $120\ \mu\text{W}$ 로 변화되었다. 삽도는 여기 세기에 따른 광발광 강도를 나타낸 로그 스케일 그래프이다. 삼중 양자우물 구조 소자는 지수 인자(exponent factor) α 값이 순수 WSe_2 단일층 보다 높은 0.96으로 측정되었으며, 이는 다중 양자 우물 구조에서 밴드-밴드 전이가 억제된 표면 재결합(suppressed surface recombination)에 지배적임을 의미한다.
- [0040] 도 13은 본 발명의 실시예에 따라 제조된 양자우물 구조 소자의 여기강도에 따른 저주파 라만 스펙트럼과 고주파 라만 스펙트럼을 나타낸 도면이다. 도 13에서, 검정으로 도시된 'SQW'는 단일 양자우물 구조 소자의 라만 스펙트럼, 적색으로 도시된 'DQWs'는 이중 양자우물 구조 소자의 라만 스펙트럼, 청색으로 도시된 'TQWs'는 삼중 양자우물 구조 소자의 라만 스펙트럼이다.
- [0041] 저주파수 라만 스펙트럼에서, $20\ \text{cm}^{-1}$ 피크는 단일층에서 두드러지는 레이저-유도 공명 효과에 기인하는 것이다. 어떠한 소자에서도 인접한 단일층들 간에 동조화 거동(coupling behavior)을 나타내는 층간 진동 모드(interlayer vibration mode)는 관찰되지 않는다.
- [0042] 고주파 라만 스펙트럼에서, $250\ \text{cm}^{-1}$ 주위의 E_{2g}^1 모드와 A_{1g} 모드, 그리고 $260\ \text{cm}^{-1}$ 에서의 2LA(M) 모드를 포함하여 단일층 특성 피크의 변이는 발생하지 않으며, 추가적인 피크도 발생하지 않는다. 이는 다중 양자구조 소자에서 각 WSe_2 층이 단일층의 특성을 유지하며, 다중 적층(multiple stacking) 중에 도핑 및 응력이 유발되지 않음을 의미한다.
- [0043] 도 14는 본 발명의 실시예에 따라 제작된 단일 양자우물 구조 소자의 온도에 따른 광발광 스펙트럼 변화를 나타낸 그래프이다. 도 14에서 적색 점선은 중성 엑시톤의 피크 변이를 나타낸다. 중성 엑시톤의 피크는 ' X_0 '로 표기되어 있으며, 결함 매개 국부적 피크(defect-mediated localized peak)는 'Loc'로 표기되어 있다. 온도가 감소함에 따라, 중성 엑시톤 피크(X_0)는 일정하게 유지되었다. 국소 결함 상태와 관련된 넓은 광발광 피크($\sim 1.66\ \text{eV}$)는 100 K 이하에서 나타났으며, 온도 감소에 따라 증가하였다. 저온(4 K)과 상온 간의 누적 광발광 세기의 비율인 내부 양자 효율 값을 측정한 결과, 순수 단일층과 양자 우물 구조 소자의 IQE 값은 각각 39.7%, 40.1%로 측정되었다.
- [0044] 도 15는 본 발명의 실시예에 따라 제작된 양자우물 구조 소자의 온도에 따른 중성 엑시톤 에너지와 누적 세기를 나타낸 그래프이다. 도 15의 상부 그래프는 중성 엑시톤의 온도에 따른 광발광 피크 포인트이고, 하부 그래프는 온도에 따른 누적 세기이다. 도 15의 상부 그래프에 도시된 흑색선은 수정 바르쉬니 방정식(modified Varshni equation)에 따른 추세선이고, 하부 그래프에 도시된 흑색선은 아레니우스 방정식(Arrhenius equation)에 따른

추세선이다.

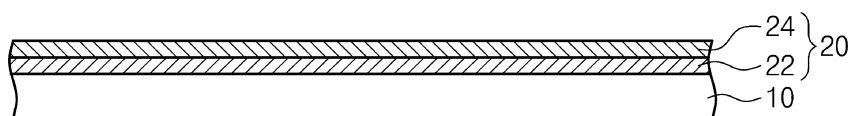
- [0045] 가우시안 근사에 의해 추출된 중성 엑시톤 피크 위치의 변화는 반도체 밴드갭의 온도 의존성을 기술하는 수정 바르쉬니 방정식을 잘 따르는 것으로 나타났다. 단일 채널 아레니우스 방정식을 이용하여 엑시톤 결합 에너지를 예측한 결과, 단일 양자우물 구조 소자의 엑시톤 결합 에너지는 III-V 반도체 양자 우물 구조 소자의 엑시톤 결합 에너지 보다 높은 193 meV로 측정되었다. 이러한 높은 엑시톤 결합 에너지는 모노리식 방법으로 제조된 다중 양자 우물 구조의 효과적인 엑시톤 구속에 기인하는 것이다.
- [0046] 도 16은 본 발명의 실시예에 따라 제작된 삼중 양자우물 구조 소자의 300 K 온도에서의 감쇄 시간에 따른 광발광 세기 변화를 나타낸 그래프이다. 도 16의 검정 세모와 적색선은 순수 WSe₂ 단일층에 대한 광발광 세기와 이중 지수 감쇠(bi-exponential decay) 추세 곡선이고, 청색 원과 보라색 선은 삼중 양자우물 구조 소자에 대한 광발광 세기와 단일 지수 감쇠(single-exponential decay) 추세 곡선이다.
- [0047] 순수 WSe₂ 단일층의 경우, 느린 감쇠 프로세스와 빠른 감쇠 프로세스에 대해 추출된 수명은 각각 669 ps, 179 ps로 측정되었다. 본 발명의 실시예에 따라 제작된 삼중 양자 우물 구조 소자의 경우, WSe₂ 다중 양자 우물 층들의 효과적인 엑시톤 구속 및 WO_x 양자 장벽층들의 표면 재결합 억제에 의해 170 ps의 짧은 방사 수명을 나타냈다.
- [0048] 상술한 바와 같은 본 발명의 실시예에 따른 전이금속 칼코게나이드의 모노리식 밴드갭 제어를 통한 양자우물 구조 소자 제조 방법은 투명, 유연 디스플레이 소자의 제조에 활용될 수 있으며, 유연, 투명 특성을 가지는 소재를 사용하는 웨어러블 및 모바일 전자기기 등의 다양한 제품에 응용될 수 있다.
- [0049] 이상 본 발명의 구체적인 실시 형태를 설명하였으나, 이는 예시에 불과한 것으로서, 본 발명은 이에 한정되지 않는 것이며, 본 명세서에 개시된 기초 사상에 따르는 최광의 범위를 갖는 것으로 해석되어야 한다. 당업자는 개시된 실시형태들을 조합, 치환하여 적시되지 않은 형상의 패턴을 실시할 수 있으나, 이 역시 본 발명의 범위를 벗어나지 않는 것이다. 이외에도 당업자는 본 명세서에 기초하여 개시된 실시형태를 용이하게 변경 또는 변형할 수 있으며, 이러한 변경 또는 변형도 본 발명의 권리범위에 속함은 명백하다.

부호의 설명

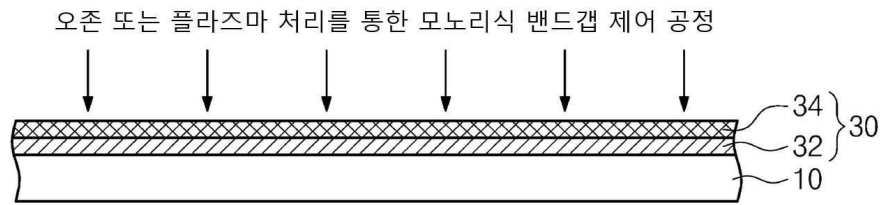
- [0050] 10: 기판
20: 전이금속 칼코게나이드 다중층
22: 하부층
24: 상부층
30: 단일 양자우물 구조
32: 전이금속 칼코게나이드층
34: 전이금속 산화물층
40: 다중 양자우물 구조

도면

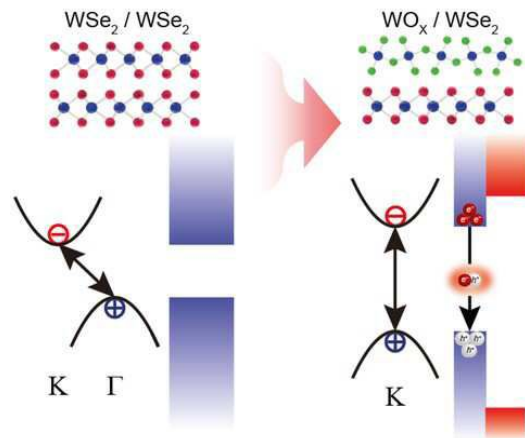
도면1



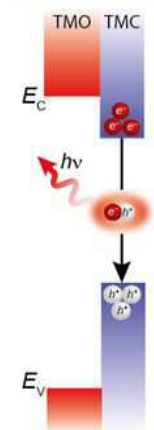
도면2



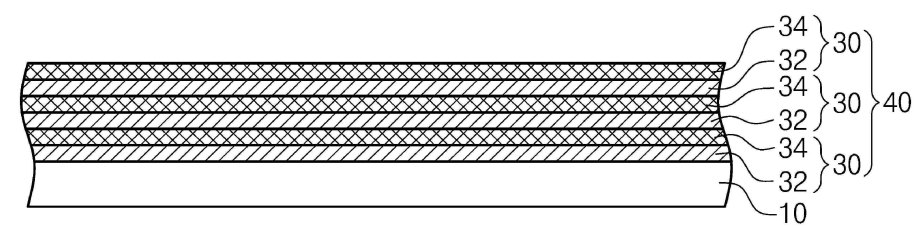
도면3



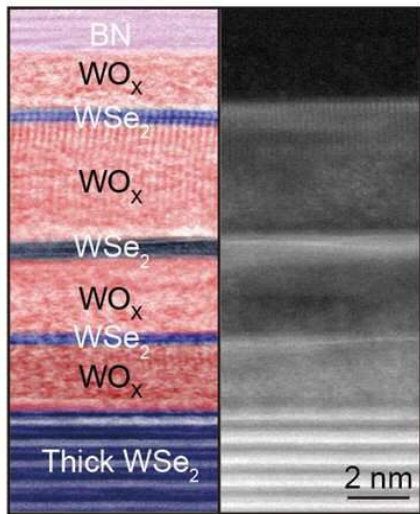
도면4



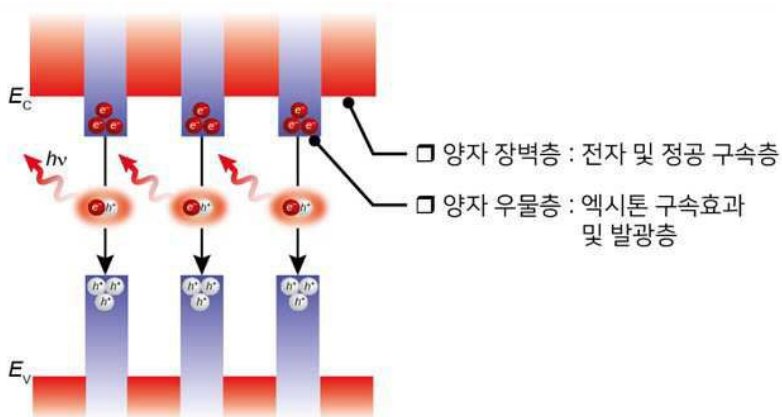
도면5



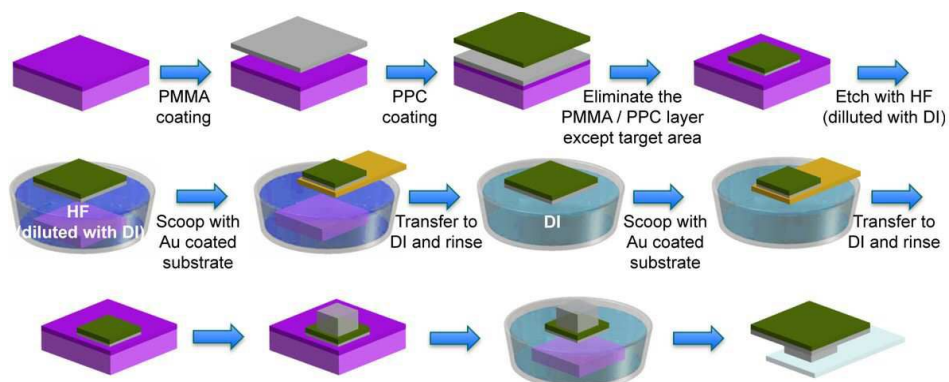
도면6



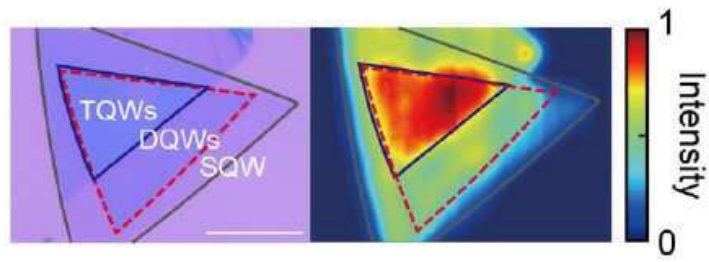
도면7



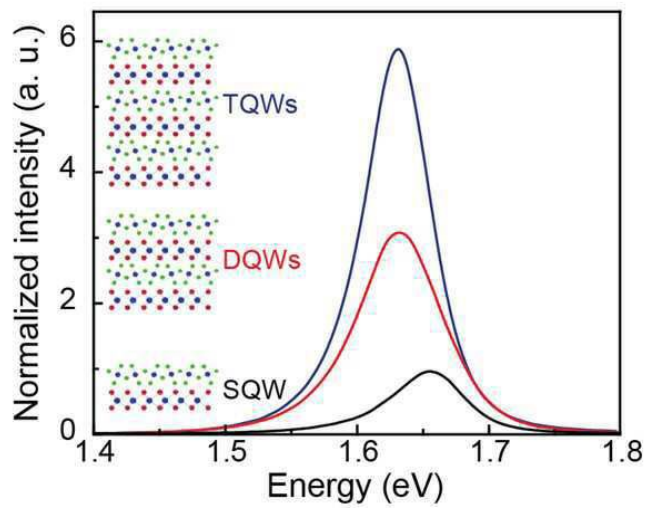
도면8



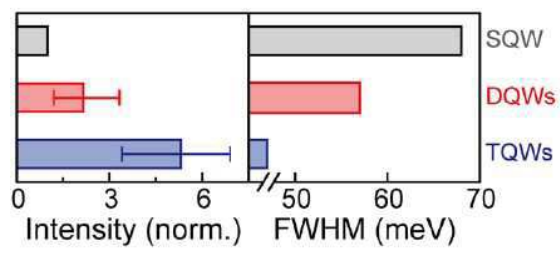
도면9



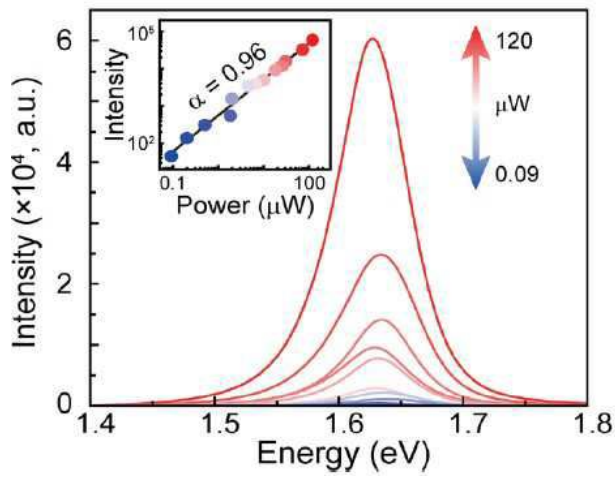
도면10



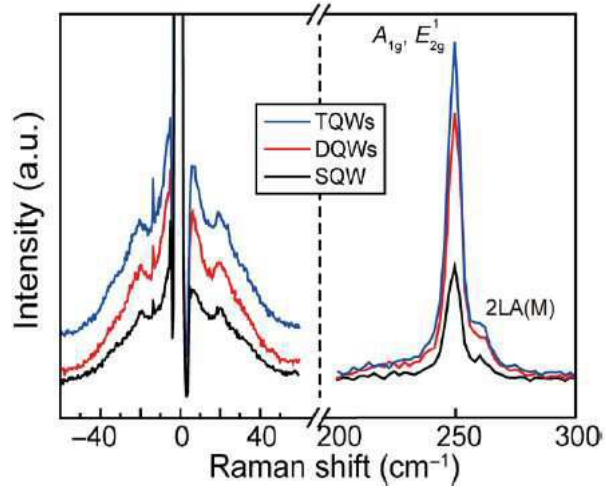
도면11



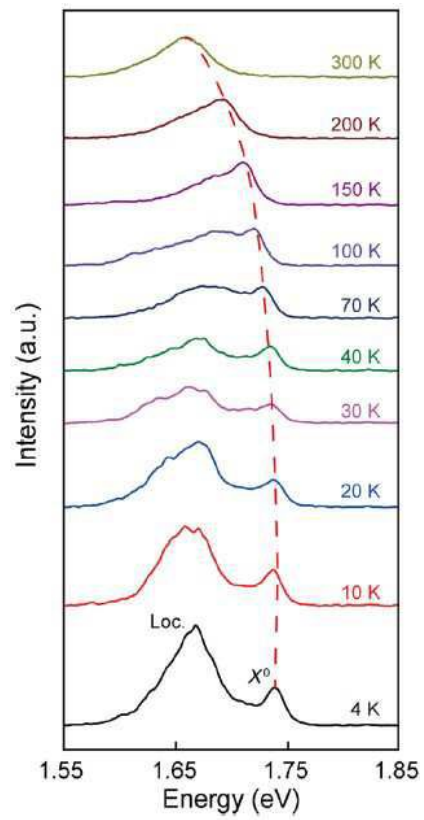
도면12



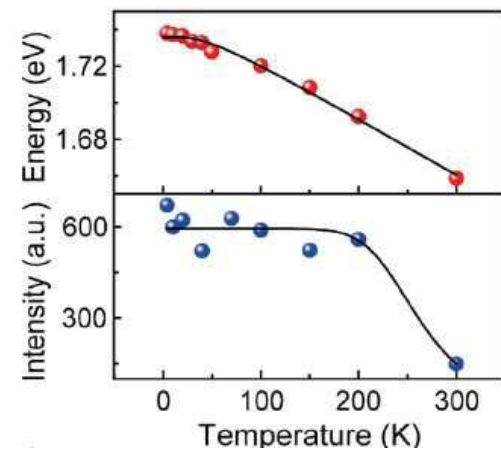
도면13



도면14



도면15



도면16

