



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년07월18일

(11) 등록번호 10-2686025

(24) 등록일자 2024년07월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01L 31/109 (2006.01) H01L 31/0224 (2006.01)

H01L 31/032 (2006.01) H01L 31/0352 (2006.01)

H01L 31/18 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H01L 31/109 (2013.01)

H01L 31/0224 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2023-0151914

(22) 출원일자 2023년11월06일

심사청구일자 2023년11월06일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020200140686 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

경상국립대학교산학협력단

경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)

(72) 발명자

박준홍

경상남도 진주시 내동로348번길 10, 115동 501호
(가좌동, 가좌그린빌주공아파트)

김형태

경상남도 창원시 성산구 안민안길 50, 106동 301호
(서광파크빌아파트)

(74) 대리인

특허법인위솔

전체 청구항 수 : 총 19 항

심사관 : 오규환

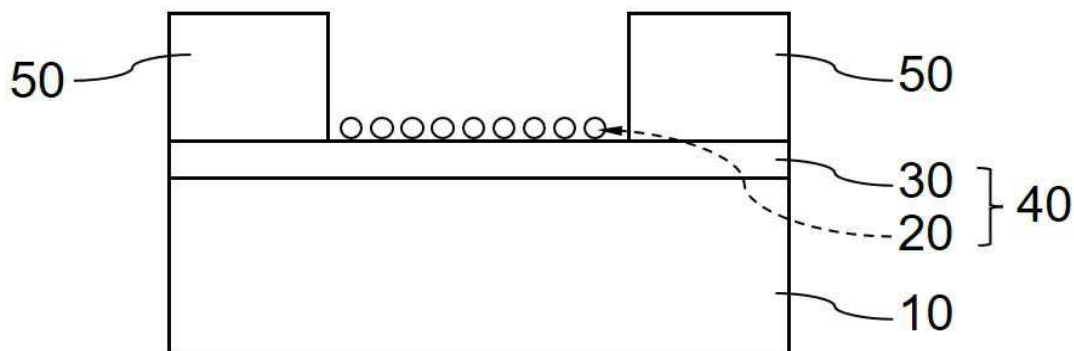
(54) 발명의 명칭 양자점-전이금속 디칼코게나이드 이중접합을 포함하는 광활성층을 구비하는 광전자 시냅스 소자

(57) 요약

본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자(Optoelectronic synapse device)는 근적외선 광 신호를 수용하는 무기계 양자점과 광 자극에 의해 시냅틱 특성을 나타내는 2차원 반도체 물질로서 전이금속 디칼코게나이드가 직접 접촉하여 이중접합을 형성하는 광활성층을 포함함으로써, 근적외선 파장대의 광 신호에 대한 시냅틱 반응이 가능한 효과가 있다. 따라서, 정확한 사물 인식을 위해서 가시광선 신호 뿐만 아니라 적외선 파장 신호에서도 민감하고 빠르게 반응하는 광 검출 특성과 함께, 적외선 파장의 광 반응(시각적 반응)에 의한 뉴로모픽 특성을 나타내는 인간의 시각-뇌기능 모사 기능을 단일 소자에서 구현함으로써 자율주행 모빌리티 분야에서 용이하게 적용될 수 있다.

대표도 - 도1

100:



(52) CPC특허분류

H01L 31/0324 (2013.01)

H01L 31/035218 (2013.01)

H01L 31/18 (2021.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711199790
과제번호	00275300
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	국가반도체연구실(NSL)핵심기술개발
연구과제명	상보형 나노시트 전계 효과 트랜지스터 적용의 반데르발스 접근법 활용 준이상적 계
면 제어 기술 개발	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경상국립대학교 산학협력단
연구기간	2023.08.01 ~ 2023.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

기판 상에 구비되고 무기계 양자점과 2차원 반도체 물질을 포함하는 광활성층; 및
상기 광활성층 상에 구비되고 서로 이격되어 배치되는 복수개의 전극;을 포함하되,
상기 무기계 양자점과 상기 2차원 반도체 물질은 직접 접촉하여 이중접합을 형성하고,
상기 무기계 양자점은 상기 2차원 반도체 물질과 이중접합이 형성되는 영역을 제외한 표면의 적어도 일부가 유기 리간드로 커버되는, 광전자 시냅스 소자.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 광활성층에서 수용 가능한 빛의 파장은 가시광선 내지 근적외선 파장 범위를 포함하는, 광전자 시냅스 소자.

청구항 3

제1항에 있어서,
상기 2차원 반도체 물질은 단층 또는 2층 이상의 복층의 층상형인, 광전자 시냅스 소자.

청구항 4

제1항에 있어서,
상기 2차원 반도체 물질은 전이금속 디칼코게나이드를 포함하는, 광전자 시냅스 소자.

청구항 5

제4항에 있어서,
상기 전이금속 디칼코게나이드는 화학식 MX_2 로 표시되고,
상기 M은 전이금속 원소로서 Mo, W, Nb, V, Ta, Ti, Zr, Hf, Tc, Re, Ru, Co, Pd, Pt, Cu, Ga, In, Sn, Ge, Pb 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하고,
상기 X는 칼코젠(chalcogen) 원소로서 S, Se, Te 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는, 광전자 시냅스 소자.

청구항 6

제4항에 있어서,
상기 전이금속 디칼코게나이드는 MoS_2 , $MoSe_2$, $MoTe_2$, WS_2 , WSe_2 , WTe_2 , ZrS_2 , $ZrSe_2$, HfS_2 , $HfSe_2$, $NbSe_2$, $ReSe_2$, $PdTe_2$ 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는, 광전자 시냅스 소자.

청구항 7

제1항에 있어서,
상기 무기계 양자점은 밴드갭이 1.2 eV 이하인, 광전자 시냅스 소자.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 무기계 양자점은 InAs, PbS, CdS, GaAs, InGaAs, InP, GaInP 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는, 광전자 시냅스 소자.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 전극은 금속 또는 금속화합물을 포함하고,

상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Cr/Au, Ag 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는 금속 원소를 포함하는, 광전자 시냅스 소자.

청구항 10

실리콘 옥사이드 기판 상에 2차원 반도체 물질을 합성하는 단계;

상기 2차원 반도체 물질을 다른 반도체 기판 상에 습식 전사하여 2차원 반도체 물질층을 형성하는 단계;

상기 2차원 반도체 물질층 상의 일부에 서로 이격되어 배치되는 복수개의 금속층을 증착하여 전극층을 형성하는 단계; 및

상기 2차원 반도체 물질층 상의 다른 일부의 표면에 무기계 양자점 콜로이드 용액을 도포하고 코팅한 다음 리간드 용액을 도포하고 코팅 후 건조하여 광활성층을 형성하는 단계;를 포함하고,

상기 무기계 양자점과 상기 2차원 반도체 물질층은 직접 접촉하여 이중접합을 형성하고,

상기 리간드 용액은 유기 리간드와 유기용매가 혼합된 혼합용액으로서, 상기 유기 리간드 물질은 C1 내지 C8의 짧은 탄소 사슬 또는 고리를 구비하고, 티올(thiol)기, 아민(amine)기, 카르복시기(carboxylic acid) 및 이들의 조합 중 선택되는 어느 하나 이상의 작용기를 포함하고,

상기 무기계 양자점은 상기 2차원 반도체 물질과 이중접합이 형성되는 영역을 제외한 표면의 적어도 일부가 상기 유기 리간드로 커버되는, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 광활성층에서 수용 가능한 빛의 파장은 가시광선 내지 근적외선 파장 범위를 포함하는, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 12

제10항에 있어서,

상기 무기계 양자점은 밴드갭이 1.2 eV 이하인, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 13

제10항에 있어서,

상기 무기계 양자점은 InAs, PbS, CdS, GaAs, InGaAs, InP, GaInP 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 14

제10항에 있어서,

상기 2차원 반도체 물질은 전이금속 디칼코게나이드를 포함하는, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 전이금속 디칼코게나이드는 화학식 MX_2 로 표시되고,

상기 M은 전이금속 원소로서 Mo, W, Nb, V, Ta, Ti, Zr, Hf, Tc, Re, Ru, Co, Pd, Pt, Cu, Ga, In, Sn, Ge, Pb 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하고,

상기 X는 칼코젠(chalcogen) 원소로서 S, Se, Te 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 16

제10항에 있어서,

상기 2차원 반도체 물질층은 단층 또는 2층 이상의 복층인, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 17

삭제

청구항 18

삭제

청구항 19

제10항에 있어서,

상기 유기 리간드는 1,2-ethanedithiol(EDT), 3-mercaptopropionic acid(MPA), benzenedithiol(BZT) 등의 티올(thiol)계 리간드; ethylenediamine(EDA), ammonium thiocyanate (SCN) 등의 아민(amine)계 리간드; 및 이들 중 선택되는 적어도 둘 이상의 조합을 포함하는, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 20

제10항에 있어서,

상기 광활성층을 형성하는 단계는 상온에서 수행되는, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

청구항 21

제10항에 있어서,

상기 전극층은 금속 또는 금속화합물을 포함하고,

상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Cr/Au, Ag 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는 금속 원소를 포함하는, 광전자 시냅스 소자의 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 광전자 시냅스 소자에 관한 것으로, 자세하게는 양자점-전이금속 칼코게나이드 이중접합을 포함하는 광활성층을 구비하는 광전자 시냅스 소자에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 자율주행은 1970년대부터 연구가 시작되었으며 2010년대에 들어 딥러닝 기술의 발현과 함께 기술의 발전이 빠르게 이루어졌고 코로나 시기를 지나면서 자율주행 관련 기술이 더 빠르게 발전되고 있다. 미래 스마트 모빌리티 산업의 핵심 기술인 '인공지능'과 '안전'에 대응하기 위해서는 차량 전방의 차선 및 장애물등을 인지하는 감지 소자 기술과 인지/판단/제어/연산 등의 초고속 정보 처리를 수행하기 위해 인간 두뇌의 뉴런 구조와 동작과 같이 인지-지각-연산의 정보처리를 동시적인 병렬로 수행하는 뉴로모픽 기술을 탑재한 인공 신경망 처리장치의 중요성이 극대화되고 있다.

[0003] 현재 모빌리티(Mobility)의 위험회피 및 자율주행 기능은 위험체를 광신호(LiDAR, Light Detection and

Ranging) 또는 전자파(RADAR, Radio Detection and Ranging)를 통해 구동되고 있다. 그러나, LiDAR는 InGaAs 기반 900 nm 영역에 특화되어 있지만, 가시광선과의 중첩에 의한 인식률 저하가 발생하는 문제가 있다. 따라서, 일반 대기 환경에서 가시광선에 의한 혼선을 피하고 정확한 사물 인식을 위해서는 900 nm 이상의 적외선 파장 신호에 민감하고 빠르게 반응하는 광 검출 소자의 필요성 또한 증대되고 있다. 나아가, 승객과 화물의 안전을 보장하며 안정적 자율 운행을 구현하기 위해서는 위험인식-연산-판단-대응 등 일련의 과정이 초고속으로 진행되어야 하며, 또한 모빌리티 체계 구동의 효율화를 위해서는 이러한 일련의 과정이 저전력으로 구동되기 위하여 단일소자로 개발되어야 하는 필요성이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명은 상술한 문제를 해결하기 위하여 착안된 것으로, 정확한 사물 인식을 위하여 적외선 파장의 광 반응이 가능한 동시에 뉴로모픽 특성을 나타내는 광활성층을 포함하는 광전자 시냅스 소자 및 이의 제조방법을 제공할 수 있다.

과제의 해결 수단

- [0005] 상기 기술적 과제를 달성하기 위해 본 발명의 바람직한 예에 따른 광전자 시냅스 소자는,
- [0006] 기판 상에 구비되고 무기계 양자점과 2차원 반도체 물질을 포함하는 광활성층; 및 상기 광활성층 상에 구비되고 서로 이격되어 배치되는 복수개의 전극;을 포함할 수 있다.
- [0007] 상기 무기계 양자점과 상기 2차원 반도체 물질은 직접 접촉하여 이중접합을 형성할 수 있다.
- [0008] 상기 광활성층에서 수용 가능한 빛의 파장은 가시광선 내지 근적외선 파장 범위를 포함할 수 있다.
- [0009] 상기 2차원 반도체 물질은 단층 또는 2층 이상의 복층의 층상형일 수 있다.
- [0010] 상기 2차원 반도체 물질은 전이금속 디칼코게나이드를 포함할 수 있다.
- [0011] 상기 전이금속 디칼코게나이드는 화학식 MX_2 로 표시되고,
- [0012] 상기 M은 전이금속 원소로서 Mo, W, Nb, V, Ta, Ti, Zr, Hf, Tc, Re, Ru, Co, Pd, Pt, Cu, Ga, In, Sn, Ge, Pb 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하고, 상기 X는 칼코젠(chalcogen) 원소로서 S, Se, Te 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함할 수 있다.
- [0013] 상기 전이금속 디칼코게나이드는 MoS_2 , $MoSe_2$, $MoTe_2$, WS_2 , WSe_2 , WTe_2 , ZrS_2 , $ZrSe_2$, HfS_2 , $HfSe_2$, $NbSe_2$, $ReSe_2$, $PdTe_2$ 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함할 수 있다.
- [0014] 상기 무기계 양자점은 밴드갭이 1.2 eV 이하일 수 있다.
- [0015] 상기 무기계 양자점은 InAs, PbS, CdS, GaAs, InGaAs, InP, GaInP 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는, 광전자 시냅스 소자.
- [0016] 상기 전극은 금속 또는 금속화합물을 포함하고, 상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Cr/Au, Ag 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는 금속 원소를 포함할 수 있다.
- [0017] 또한, 상기 기술적 과제를 달성하기 위해 본 발명의 바람직한 예에 따른 광전자 시냅스 소자의 제조방법은,
- [0018] 실리콘 옥사이드 기판 상에 2차원 반도체 물질을 합성하는 단계;
- [0019] 상기 2차원 반도체 물질을 다른 반도체 기판 상에 전사하여 2차원 반도체 물질층을 형성하는 단계;
- [0020] 상기 2차원 반도체 물질층 상의 일부에 서로 이격되어 배치되는 복수개의 금속층을 증착하여 전극층을 형성하는 단계; 및
- [0021] 상기 2차원 반도체 물질층 상의 다른 일부의 표면에 무기계 양자점 콜로이드 용액 및 리간드 용액을 도포하고 코팅 후 건조하여 광활성층을 형성하는 단계;를 포함할 수 있다.
- [0022] 상기 2차원 반도체 물질층은 단층 또는 2층 이상의 복층일 수 있다.

- [0023] 상기 전사 단계는 습식 전사(wet transfer)일 수 있다.
- [0024] 상기 리간드 용액은 유기 리간드와 유기용매가 혼합된 혼합용액으로서, 상기 유기 리간드 물질은 C1 내지 C8의 짧은 탄소 사슬 또는 고리를 구비하고, 티올(thiol)기, 아민(amine)기, 카르복시기(carboxylic acid) 및 이들의 조합 중 선택되는 어느 하나 이상의 작용기를 포함할 수 있다.
- [0025] 상기 유기 리간드는 1,2-ethanedithiol(EDT), 3-mercaptopropionic acid(MPA), benzenedithiol(BZT) 등의 티올(thiol)계 리간드; ethylenediamine(EDA), ammonium thiocyanate (SCN) 등의 아민(amine)계 리간드; 및 이들 중 선택되는 적어도 둘 이상의 조합을 포함할 수 있다.
- [0026] 상기 광활성층을 형성하는 단계는 상온에서 수행될 수 있다.

발명의 효과

- [0027] 상기와 같은 본 발명에 따르면, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자(Optoelectronic synapse device)는 근적외선 광 신호를 수용하는 무기계 양자점과 광 자극에 의해 시냅틱 특성을 나타내는 2차원 반도체 물질로서 전이금속 디칼코게나이드가 직접 접촉하여 이중접합을 형성하는 광활성층을 포함함으로써, 근적외선 파장대의 광 신호에 대한 시냅틱 반응이 가능한 효과가 있다. 따라서, 정확한 사물 인식을 위해서 가시광선 신호 뿐만 아니라 적외선 파장 신호에서도 민감하고 빠르게 반응하는 광 검출 특성과 함께, 적외선 파장의 광 반응(시각적 반응)에 의한 뉴로모픽 특성을 나타내는 인간의 시각-뇌기능 모사 기능을 단일 소자에서 구현할 수 있다.
- [0028] 본 발명의 효과는 이상에서 언급한 것으로 제한되지 않으며, 명세서 전반의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있으나 명시적으로 언급되지 않은 다른 효과들 역시 포함한다.

도면의 간단한 설명

- [0029] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자의 단면을 도시한 모식도이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 광신호 감지용 집적구조체의 광활성층에 포함된 무기계 양자점의 (a) 투과 전자현미경(TEM) 사진 및 (b) XRD 그래프이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자의 (a) 모식도, (b) 1060 nm 파장의 레이저 출력에 따른 반응도(Responsivity) 및 검출도(Detectivity), (c, d) I-V 그래프이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자의 (a, d) 펄스 수에 따른 컨덕턴스(Conductance), (b, c) PPF 인덱스, (e) 레이저 출력에 따른 양자점-2차원 반도체 이중접합 유무에 따른 비선형성(Nonlinearity), (f) 펄스 수에 따른 시냅스 가중치(synaptic weight)를 나타낸 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0030] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 상세히 설명한다. 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시 예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시 예에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 단지 본 실시 예들은 본 발명의 개시가 완전하도록 하고, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다. 명세서 전체에 걸쳐 동일 참조 부호는 동일 구성 요소를 지칭한다.
- [0031] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 공통적으로 이해될 수 있는 의미로 사용될 수 있을 것이다. 또 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 용어들은 명백하게 특별히 정의되어 있지 않는 한 이상적으로 또는 과도하게 해석되지 않는다. 본 명세서에서 사용된 용어는 실시 예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다.
- [0032] 명세서에서 사용되는 "포함한다 (comprises)" 및/또는 "포함하는 (comprising)"은 언급된 구성 요소, 단계, 동작 및/또는 소자는 하나 이상의 다른 구성 요소, 단계, 동작 및/또는 소자의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.
- [0034] 무기계 양자점-2차원 반도체 물질의 이중접합을 포함하는 광활성층을 구비하는 광전자 시냅스 소자

- [0035] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자의 단면을 도시한 모식도이다.
- [0036] 도 1을 참조하면, 광전자 시냅스 소자(100)는 기판(10) 상에 구비되고 무기계 양자점(20)과 2차원 반도체 물질(30)을 포함하는 광활성층(40); 및 상기 광활성층(40) 상에 구비되고 서로 이격되어 배치되는 복수개의 전극(50);을 포함할 수 있다.
- [0037] 기판(10)은 반도체 물질로서 실리콘, SOI(Silicon-on-insulator) 등의 반도체 기판을 사용할 수 있다. 또한, 탄화규소(SiC), 질화갈륨(GaN), 산화갈륨(Ga₂O₃) 등의 와이드 밴드갭(WBG, wide bandgap)을 갖는 반도체 기판을 사용할 수도 있다. 기판(10)은 추가적으로 도펀트(dopant)에 의해 도핑된 것을 사용할 수도 있다.
- [0038] 전극(50)은 금속 또는 금속화합물을 포함할 수 있다. 상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Cr/Au, Ag 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는 금속 원소를 포함할 수 있으며, 금속 전극(metal electrode), 금속 배선(metal interconnection) 등의 전자소자용으로 적용되기에 적합한 종류의 금속 원소를 포함하는 종류의 것이 라면 비제한적으로 사용 가능하다.
- [0039] 광활성층(40)은 인가된 광 신호를 수용하는 광 수용층으로서 무기계 양자점(20)과 2차원 반도체 물질(30)을 포함할 수 있다. 특히, 광활성층(40)은 근적외선 광 신호를 수용하는 무기계 양자점(20)과 광 자극에 의해 시냅틱 특성을 나타내는 2차원 반도체 물질(30)은 직접 접촉하여 이중접합을 형성함으로써, 근적외선 파장을 포함하는 광 신호에 대한 반응이 가능한 광전자 시냅스 소자의 채널층으로 용이하게 사용될 수 있다.
- [0040] 구체적으로, 적외선 광신호가 광활성층(40)의 무기계 양자점(20)층에 조사될 시, 양자점의 가전자대에서 전도대로 전하가 여기되고, 여기된 전하는 양자점과 접촉하는 2차원 반도체 물질(30) 채널층으로 전송되어 반도체 채널층에 전류가 흐르게 될 수 있다. 이때, 전이 무기계 양자점(20)과 2차원 반도체 물질(30)의 계면에 일부분의 전하가 트랩/디트랩(trap/de-trap)되어, 반도체 채널의 전도도가 가역적으로 제어 가능할 수 있다. 이를 통해, 적외선 신호 인가에 따른 2차원 반도체 물질(30) 채널의 전도도를 제어하여, 트랩된 전하의 농도를 가변적으로 제어하여 적외선 자극에 대한 학습과 망각 특성이 구현이 수행될 수 있다. 특히, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자는 적외선 감응형의 0차원 물질(무기계 양자점(20))과 반도체 채널층의 2차원 반도체 물질(30)의 수직 이중 접합 구조를 채용함으로써 광(적외선) 감응층-반도체 채널층의 접합 계면에서의 전하 trap/de-trap 거동을 가역적으로 제어가 가능하고, 이중접합 구조를 형성하지 않은 단일 소재 기반 신경망 소자와 달리 더 높은 학습 능력 구현이 가능할 수 있다.
- [0042] 먼저, 무기계 양자점(20)은 광 신호, 예컨대 광 펄스에 대한 반응이 가능하며, 가시광선 내지 전체 근적외선 파장 영역, 예를 들어 380 nm 내지 1500 nm 파장 영역에서 빛을 흡수 및 방출이 가능한 물질 일 수 있다. 특히, 본 발명에 바람직한 예에 따른 무기계 양자점(20) 물질의 수용 가능한 파장 영역은 근적외선 파장 범위, 구체적으로 800 nm 내지 1500 nm, 더욱 구체적으로 900 내지 1200 nm 파장 범위를 포함할 수 있다.
- [0043] 무기계 양자점(20) 물질은 0차원(0D) 물질로서 나노 스케일 직경을 갖는 균질한 원형의 무기 입자이며, 0.1 내지 10 nm의 직경을 가질 수 있고, 구체적으로 0.5 내지 7 nm의 직경을 가질 수 있고, 더욱 구체적으로 1 내지 5 nm 직경을 가질 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.
- [0044] 또한, 본 발명의 바람직한 예에 따른 무기계 양자점(20) 물질은 근적외선(Near-Infrared) 영역의 빛을 흡수 및 발광하는 반도체 소재로서 밴드갭이 1.2 eV 이하인 물질일 수 있다. 무기계 양자점(20) 물질은, 예를 들어 InAs, PbS, CdS, GaAs, InGaAs, InP, GaInP 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함할 수 있고, 일 구체예에서 InAs를 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 특히, 무기계 양자점(20) 물질로서 InAs 양자점은 근적외선 파장 범위에서 광흡수 및 방출이 가능한 반도체 물질이면서 RoHS(Restriction of Hazardous Substances)를 준수하는 물질이며, 독성이 높은 중금속을 포함하는 납-칼코겐 이원 화합물(lead-chalcogenide) 양자점, 예를 들어 PdS, CdS 등을 용이하게 대체 가능한 물질일 수 있다. InAs 양자점은 n-type 특성을 주로 나타낼 수 있다.
- [0045] 또한, 무기계 양자점(20)은 전하 트랩 효과를 위한 부동태화를 위해 후술하는 유기 리간드 등으로 커버될 수 있다.
- [0046] 한편, 무기계 양자점(20)은 양자점의 효과적인 광 흡수능, 구체적으로 적외선 광 흡수능을 위해 추가적인 도핑 또는 합금화 될 수도 있고, 두 종류 이상의 무기계 양자점이 복합화될 수도 있으며, 효과적인 부동태화를 위해 코어-셸 구조로 제조될 수도 있다.
- [0048] 다음으로, 2차원(2D) 반도체 물질(30)은 단일 층 내에서 강한 공유결합을 이루고 있고 층과 층 사이에서는 상대

적으로 작은 반데르발스 힘(Van der waals force)으로 결합된 구조를 가질 수 있다. 2차원 반도체 물질(30)은 일반적인 광전자 소자와는 달리 이의 직접 전이 성질을 이용하여 단일 물질만으로도 광전자 소자의 채널층으로 바로 사용할 수 있어 소자의 구조가 간단한 장점이 있다.

[0049] 2차원 반도체 물질(30)은 광활성층(40) 내에서 층상 구조의 극초박막 또는 극초박 판형의 입자, 예컨대 플레이크 형태로 구비될 수 있고, 단층(monolayer) 또는 2층 이상의 복층(multilayer)으로 구비될 수 있다. 구체적으로는, 2차원 반도체 물질(30)은 수 층의 복층 구조로 구비될 수 있다. 2차원 반도체 물질(30)은 벌크 또는 통상적인 두께의 박막 상태에서는 간접전이 특성을 나타내지만, 단일 층 또는 수 층 이내의 두께일 경우 직접전이 특성을 나타내며, 광반응성이 우수하며 투명하고 유연한 특성이 있어 광전자(optoelectronic) 소자로 유용히 적용될 수 있다.

[0050] 또한, 2차원 반도체 물질(30)은 구성 원자 간에 매우 강한 공유결합을 유지하는 각 층들이 존재하고, 각 층 간 약한 반데르 발스 힘(Van der Waals force)에 의한 결합을 하는 층상구조를 가지고 있다. 층 바깥으로 뻗어 나오는 땀글링 본드(dangling bond)가 부재하고 원리적으로 구성 원자들과 이차원적인 상호작용만 하므로 캐리어 수송이 통상적인 박막이나 벌크와는 달리 탄도 수송 양상을 나타내며 이로 인해 고이동도, 고속, 저전력 반도체로 적용될 수 있다.

[0051] 게다가, 2차원 반도체 물질(30)은 균질한 표면 특성으로 인해 다양한 소재와 이종 접합이 가능하며, 이를 통해 접합 구조 형태의 시냅스 소자에 적용이 가능할 수 있다. 특히, 2차원 반도체 물질(30)은 원자 스케일 수준으로 얇은 층상 구조로 인해 극미량의 광학적 자극에도 민감한 광전자 반응이 가능한 장점이 있으므로, 펄스 형태의 광학적 자극 인가에도 민감하게 반응함으로써 전도도가 증가하는 학습 능력 및 전기적 자극에 의한 망각 특성 구현이 발현될 수 있다.

[0052] 2차원 반도체 물질(30)은 전이금속 디칼코게나이드(TMD, Transition metal dichalcogenide)를 포함할 수 있다. 구체적으로, 상기 전이금속 디칼코게나이드 물질은 화학식 MX_2 로 나타낼 수 있고, 여기서 M은 전이금속 원소로서 예를 들어 Mo, W, Nb, V, Ta, Ti, Zr, Hf, Tc, Re, Ru, Co, Pd, Pt, Cu, Ga, In, Sn, Ge, Pb 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함할 수 있고, X는 칼코젠(chalcogen) 원소로서 S, Se, Te 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함할 수 있다. 구체적으로, 상기 전이금속 디칼코게나이드 물질은 MoS_2 , $MoSe_2$, $MoTe_2$, WS_2 , WSe_2 , WTe_2 , ZrS_2 , $ZrSe_2$, HfS_2 , $HfSe_2$, $NbSe_2$, $ReSe_2$, $PdTe_2$ 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함할 수 있다. 더욱 구체적으로 상기 전이금속 디칼코게나이드 물질은 MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 , WSe_2 또는 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함할 수 있고, 일 구체예에서 WSe_2 를 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0053] 상기 전이금속 디칼코게나이드 물질의 결정 구조(crystal structure)는 전이 금속인 M과 칼코젠 원소인 X간에 공유결합을 하고 있고, 이를 기반으로 평면 방향으로 육방(hexagonal) 구조를 가질 수 있다. 추가적인 상변화 단계 내지 도핑 단계를 통해 결정 구조를 변이하는 것 또한 가능할 수 있다.

[0055] 무기계 양자점-2차원 반도체 물질의 이종접합을 포함하는 광활성층을 구비하는 광전자 시냅스 소자의 제조방법

[0056] 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자의 제조방법은, 먼저 실리콘 옥사이드 기판 상에 2차원 반도체 물질을 준비하는 단계가 수행될 수 있다.

[0057] 상기 2차원 반도체 물질을 준비하는 단계는 구체적으로 화학기상증착(CVD; Chemical Vapor Deposition) 방법을 사용할 수 있다. 이는 복수개, 예컨대 두 개의 가열 구역이 구비된 화학기상증착 장비 내에 전구체 물질이 담긴 석영 보트를 일정 간격으로 설정하고 가열함으로써 실리콘 옥사이드 기판의 표면 상에 상기 2차원 반도체 물질이 성장 또는 증착되는 것을 의미할 수 있다. 다만, 상기 2차원 반도체 물질을 준비하는 단계는 상술한 방법으로 제한되는 것은 아니며, 목적하는 바에 따라 당업자가 적절히 실험 조건을 조정하거나 가공하여 원하는 물성 혹은 결정의 2차원 반도체 물질을 제조할 수 있다.

[0058] 다음으로, 상기 2차원 반도체 물질을 다른 반도체 기판 상에 전사하여 2차원 반도체 물질층을 형성하는 단계가 수행될 수 있다. 상기 반도체 기판은 실리콘, SOI(Silicon-on-insulator) 등의 반도체 기판으로서 상술한 벌크 절연체인 실리콘 옥사이드 기판과는 다른 기판으로 사용될 수 있다. 또한, 탄화규소(SiC), 질화갈륨(GaN), 산화갈륨(Ga_2O_3) 등의 와이드 밴드갭(WBG, Wide bandgap)을 갖는 반도체 기판을 사용할 수도 있다. 상기 반도체 기판은 추가적으로 도펀트(dopant)에 의해 도핑된 것을 사용할 수도 있다.

[0059] 상기 2차원 반도체 물질층은 상기 반도체 기판과 직접적으로 접촉하여 반데르발스 힘(vdW, van der Waals

force)에 의한 반데르발스 접합을 형성할 수 있다. 구체적으로, 상기 반도체 기판 표면의 실리콘 격자와 상기 2차원 반도체 물질층 간의 접합은 반데르발스 힘에 의한 결합으로 형성될 수 있다. 각 층의 원자들은 서로 교차되어 혼합 내지 침투되지 않으면서 각 계면이 물리적으로 뚜렷이 구분되어 있도록 하는 갭, 즉 상기 반도체 기판과 상기 2차원 반도체 물질층 사이에 반데르발스 갭(van der Waals gap)을 형성하는 것일 수 있다. 특히 상기 2차원 반도체 물질층의 제조 과정에서, 구체적으로 전사(transfer) 공정, 더욱 구체적으로 습식 전사(wet transfer) 공정의 적용으로 표면의 물리적 손상이 최소화되면서 균등한(uniform) 두께의 박막이 형성될 수 있다. 또한, 반데르발스 접합으로 형성된 상기 2차원 반도체 물질층이 구비됨으로써 상기 반도체 기판 표면의 반응성이 높은 땀글링 본드(dangling bond)가 제거되고 기판 고유 물성이 보존될 수 있으므로 고성능 소자의 구현에 유리하게 적용될 수 있다.

[0060] 이후, 상기 2차원 반도체 물질층 상의 일부에 서로 이격되어 배치되는 복수개의 금속층을 증착하여 전극층을 형성하는 단계가 수행될 수 있다. 상기 금속층은 금속 또는 금속화합물을 포함할 수 있다. 예를 들어, 도 1을 다시 참조하면, 2차원 반도체 물질(30) 층의 양측에 금속 전극(50)을 형성하고, 금속 전극(50)이 형성되지 않는 개구부에는 후술하는 무기계 양자점(20)이 형성될 수 있다. 상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Cr/Au, Ag 및 이들 중 선택되는 둘 이상의 조합을 포함하는 금속 원소를 포함할 수 있으며, 금속 전극(metal electrode), 금속 배선(metal interconnection) 등의 전자소자용으로 적용되기에 적합한 종류의 금속 원소를 포함하는 종류의 것이라면 비제한적으로 사용 가능하다.

[0061] 상기 2차원 반도체 물질층 상의 다른 일부의 표면, 상술한 개구부에 무기계 양자점 콜로이드 용액 및 리간드 용액을 도포하고 코팅 후 건조하여 광활성층을 형성하는 단계를 포함할 수 있다.

[0062] 상기 무기계 양자점은 상술한 무기계 양자점-2차원 반도체 물질의 이중접합을 포함하는 광활성층을 구비하는 광전자 시냅스 소자에서 사용한 무기계 양자점(20)과 동일한 것일 수 있다.

[0063] 상기 리간드 용액은 유기 리간드와 유기용매가 혼합된 혼합용액일 수 있다. 상기 유기 리간드는 상기 무기계 양자점의 효과적인 부동태화를 위해 C1 내지 C8의 짧은 탄소 사슬 또는 고리를 구비하고, 티올(thiol)기, 아민(amine)기, 카르복시기(carboxylic acid) 및 이들의 조합 중 선택되는 어느 하나 이상의 작용기를 포함할 수 있다. 구체적으로, 상기 유기 리간드는 1,2-ethanedithiol(EDT), 3-mercaptopropionic acid(MPA), benzenedithiol(BZT) 등의 티올(thiol)계 리간드; ethylenediamine(EDA), ammonium thiocyanate (SCN) 등의 아민(amine)계 리간드; 및 이들 중 선택되는 적어도 둘 이상의 조합을 포함할 수 있다. 일 구체예에서 상기 유기 리간드는 1,2-ethanedithiol(EDT)을 사용할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0064] 상기 광활성층은 근적외선 파장 빛에 대한 반응이 가능한 광전자 소자의 채널층으로서 상기 무기계 양자점과 상기 2차원 반도체 물질이 직접 접촉하여 형성되는 이중접합을 포함할 수 있다. 상기 2차원 반도체 물질은 균질한 표면 특성으로 인해 상기 무기계 양자점과 이중 접합이 용이하며, 이를 통해 0차원(0D)-2차원(2D) 물질 접합 구조 형태의 시냅스 소자에 적용이 가능할 수 있다. 특히, 상기 2차원 반도체 물질은 원자 스케일 수준으로 얇은 층상 구조로 인해 극미량의 광학적 자극에도 민감한 광전자 반응이 가능한 장점이 있으므로, 펄스 형태의 광학적 자극 인가에도 민감하게 반응함으로써 전도도가 증가하는 학습 능력 및 전기적 자극에 의한 망각 특성 구현이 발현될 수 있다.

[0066] 이하, 본 발명을 실시 예 및 비교 예를 이용하여 더욱 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 하기의 실시 예 및 비교 예는 본 발명의 예증을 위한 것으로, 본 발명의 범위가 이에 국한되는 것은 아니다.

[0068] **제조예: WSe₂ 합성단계**

[0069] 텅스텐 디셀레나이드(WSe₂)를 합성하기 위하여 2개의 가열 구역(heating zone)이 구비된 화학기상증착(CVD; Chemical Vapor Deposition) 장비를 사용한다. 먼저, 기판으로 실리콘 옥사이드(SiO₂)를 사용하고, 셀레늄(Se, 99.5 % Sigma-Aldrich) 분말 480 mg이 담긴 석영 보트를 1차 가열로에 배치하고, NaCl(99 %, Sigma-Aldrich) 40 mg 및 텅스텐 옥사이드(WO₃, 99.9 %, Sigma-Aldrich) 240 mg 혼합분말이 담긴 석영 보트를 2차 가열로에 배치하였다. 이후, 두 석영보트의 간격은 34 cm로 설정한 상태로 1차 가열로에서 온도 상승 속도 10.9 °C/min 및 성장 온도 600 °C로, 2차 가열로에서 14.5 °C/min 및 성장 온도 600 °C로 하여 Se 및 WO₃/NaCl를 성장시켰다. 합성 단계에서, 캐리어 가스로 Ar 및 H₂ 가스의 유량은 각각 100 sccm 및 20 sccm이고, 합성이 완료된 이후 자연적인 냉각을 통해 최종적으로 두께가 약 50 내지 70 nm인 다층(multilayer)의 플레이크(flake) 형태인 WSe₂

층을 수득하였다.

[0071] 실시예: QD/WSe₂ 이중접합을 광활성층으로 포함하는 광전자 시냅스 소자 제조

[0072] 상기 제조예 1의 방법으로 제조된 WSe₂를 광활성층으로서 사용하기 위해 실리콘/실리콘 옥사이드(Si/SiO₂) 기판 상으로 전사(transfer)되었다. 이후, 금속 전극을 형성하기 위해 전자빔 증발법(e-beam evaporator)을 사용하여 니켈(Ni) 50 nm를 증착하였다. 이로써 서로 이격되고 WSe₂ 상에 적층된 복수개의 전극층, 즉 WSe₂/Ni 계면을 갖는 금속(Ni) 전극을 제조하였다. 그 다음, 상기 금속 전극이 형성되지 않은 개구부의 WSe₂ 광활성층 상에 InAs 양자점 콜로이드 용액을 도포하고 30초간 2,000 rpm 조건으로 스핀 코팅(spin coating)한 후, 리간드 용액 EDT(1,2-ethane dithiol)을 떨어뜨리고 30초 방치하였다. 이후, 30초간 2,000 rpm으로 회전한 후 아세토니트릴(acetonitrile) 용액을 도포하는 과정(5초간 2,000 rpm)을 2회 반복하였다. 마지막으로 30초간 2,000 rpm 회전한 후 진공 상태에서 150 °C 30분 조건으로 베이킹하였다.

[0074] 비교예: WSe₂을 광신호 수용부로 포함하는 광전자 시냅스 소자 제조

[0075] WSe₂ 광활성층 상에 InAs 양자점 콜로이드 용액을 도포하지 않은 것을 제외하고는 상기 실시예와 동일하게 광전자 시냅스 소자를 제조하였다.

[0076] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 광신호 감지용 집적구조체의 광활성층에 포함된 무기계 양자점의 (a) 투과 전자현미경(TEM) 사진 및 (b) XRD 그래프이다.

[0077] 도 2를 참조하면, 무기계 양자점 InAs를 광활성층으로 적용하기 위해 대략 3 내지 4 nm의 직경을 갖는 균일한 원형의 입자는 콜로이드 형태의 용액으로 준비되는 것을 확인할 수 있다.

[0079] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자의 (a) 모식도, (b) 1060 nm 파장의 레이저 출력에 따른 반응성(Responsivity) 및 검출도(Detectivity) 및 (c, d) I-V 그래프이다.

[0080] 도 3을 참조하면, 광전자 시냅스 소자의 광활성층에 1060 nm 파장의 적외선 레이저를 인가한 후, 소자의 OFF 영역에서의 전류가 증가되어 반응성(Responsivity) 및 검출도(Detectivity)를 확인한 결과, 적외선 자극에 대한 암전류 특성 강화를 확인할 수 있다.

[0082] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자의 (a, d) 펄스 수에 따른 컨덕턴스(Conductance), (b, c) PPF 인덱스, (e) 레이저 출력에 따른 양자점-2차원 반도체 이중접합 유무에 따른 비선형성(Nonlinearity), (f) 펄스 수에 따른 시냅스 가중치(synaptic weight)를 나타낸 결과이다.

[0083] 도 4를 참조하면, 광전자 시냅스 소자의 광활성층에 1060 nm 파장의 적외선 레이저를 인가함에 따라 학습(potential)과 망각(depression) 특성이 구현되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 스파이크 타이밍 의존적 가소성(STDP), EPSC, IPSC, PPF 및 전력 소비가 적은 정보의 망각 특성을 구현하여, 뉴로모픽 기술을 구현할 수 있음을 확인할 수 있다. 나아가, 본 발명의 광전자 시냅스 소자는 단일 소자에서 신호 인식-처리-연산이 가능한 인센서 컴퓨팅 소자 가능성을 확인할 수 있다.

[0084] 프로브 스테이션(Probe station (M5VC, MS TECH)) 및 레이저 발진기를 통해, Transfer 및 Output 특성을 측정하였다. 이때, 기존 P type 특성의 WSe₂ 소자 대비 InAs/WSe₂ 소자에서 N타입의 특성이 나오는 것을 확인하였다. 1060 nm 파장 하에서 반응성(Responsivity) 및 검출도(Detectivity) 조사 결과, 각각 2.2 A/W 및 9.0×10^{10} Jones 가 측정되었다. 이후 Single Pulse 조사 시 비교예(WSe₂로 표시) 대비 광 반응 전류(Photo response current)는 약 60 % 향상된 응답 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

[0085] InAs/WSe₂ 이중접합 구조를 통해 인간의 망막을 모방한 시각 센서의 사용 가능성을 확인하기 위해 뉴로모픽(Neuromorphic) 특성을 측정하였다. 405 nm 및 1060 nm의 가시광선 및 적외선 레이저(Laser) 파장을 사용하여 0.5 Hz의 frequency를 통해 각각 0.5, 1, 2, 3 mW 및 5, 10, 15 mW에서 100회 펄스를 반복했을 때, 각각 학습(Potential) 및 망각(Depression) 특성이 발현되었고 이를 기반으로 비선형성(Nonlinearity) 특성 분석 결과 기존 WSe₂ 소자 대비 5 % 증가한 것을 확인하였다. 또한 PPF(Paired pulse facilitation) 및 PPD(Paired pulse depression)의 발현을 통해 신경 모방의 가능성을 확인하였다.

[0087] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 소자의 (a) 모식도, (b) 광 ON/OFF에 따른 IV 그래프 및 (c) 광 펄스 인가에 따라 학습(potential)과 망각(depression) 특성을 측정한 그래프이다.

[0088] 도 5를 참조하면, 적외선 파장 (1060 nm)의 빛을 펄스 자극 인가에 따라 시냅스 소자의 광감도 및 가소성 향상

을 확인할 수 있다. 본 발명의 광전자 시냅스 소자에 가시광선을 pulse 형태로 인가 후 전도도가 펄스 인가에 따라 증가하였으며, 이후 백 게이트(back gate)를 통한 전기적 망각(depression)을 시험하여 시냅스 소자의 가소성을 관측하였다. 따라서, 본 발명의 광전자 시냅스 소자는 빛 자극에 의한 시각적 반응과 함께 뉴로모픽 특성을 함께 확인함으로써 시각-뇌기능 모사 기술 특성을 구현 가능함을 확인할 수 있다.

[0090]

이상 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시 예들을 설명하였지만, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명이 그 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시 예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다.

부호의 설명

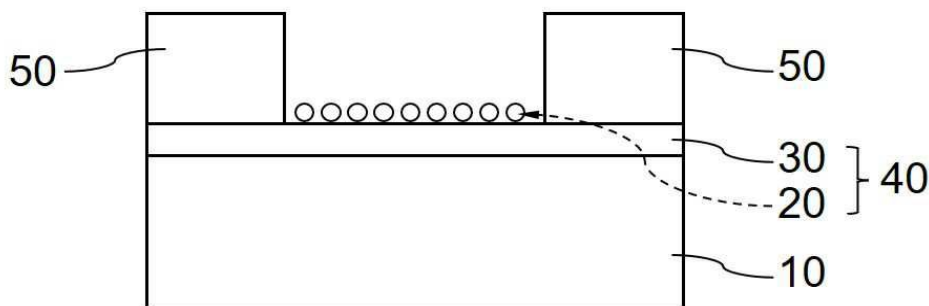
[0092]

100: 광전자 시냅스 소자, 10: 기판, 20: 무기계 양자점, 30: 2차원 반도체 물질, 40: 광활성층, 50: 전극

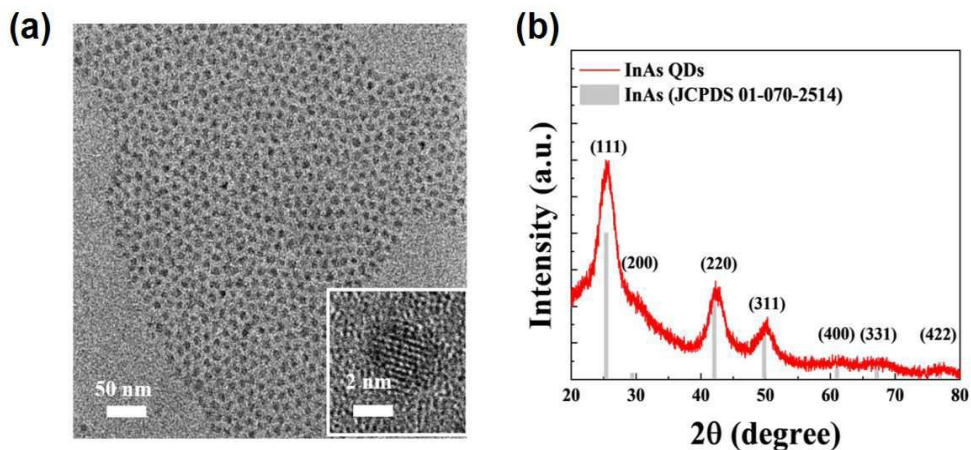
도면

도면1

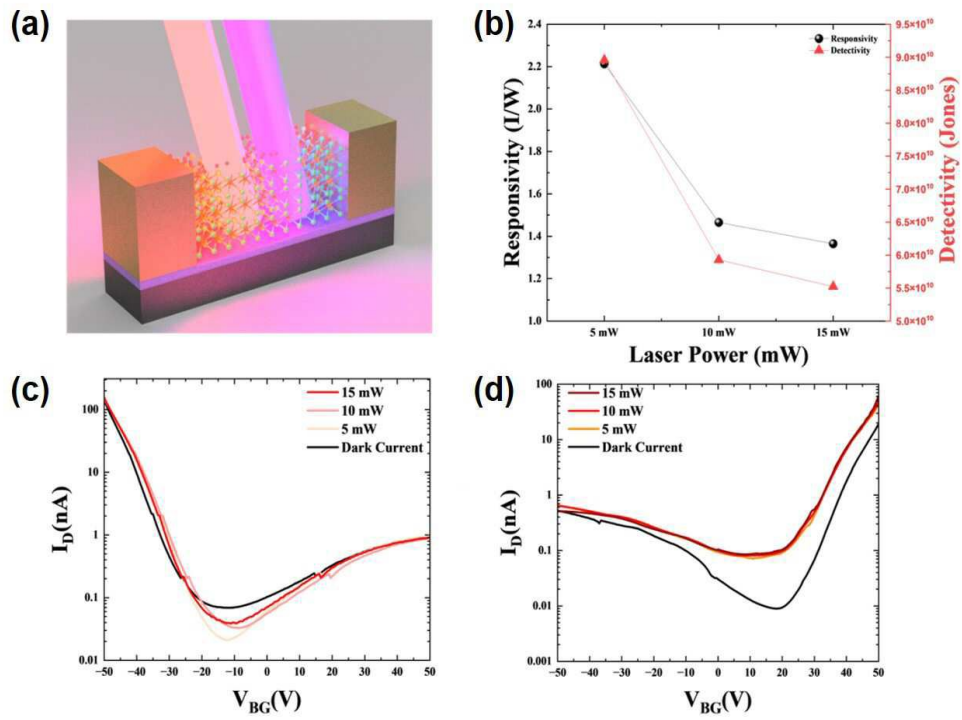
100:



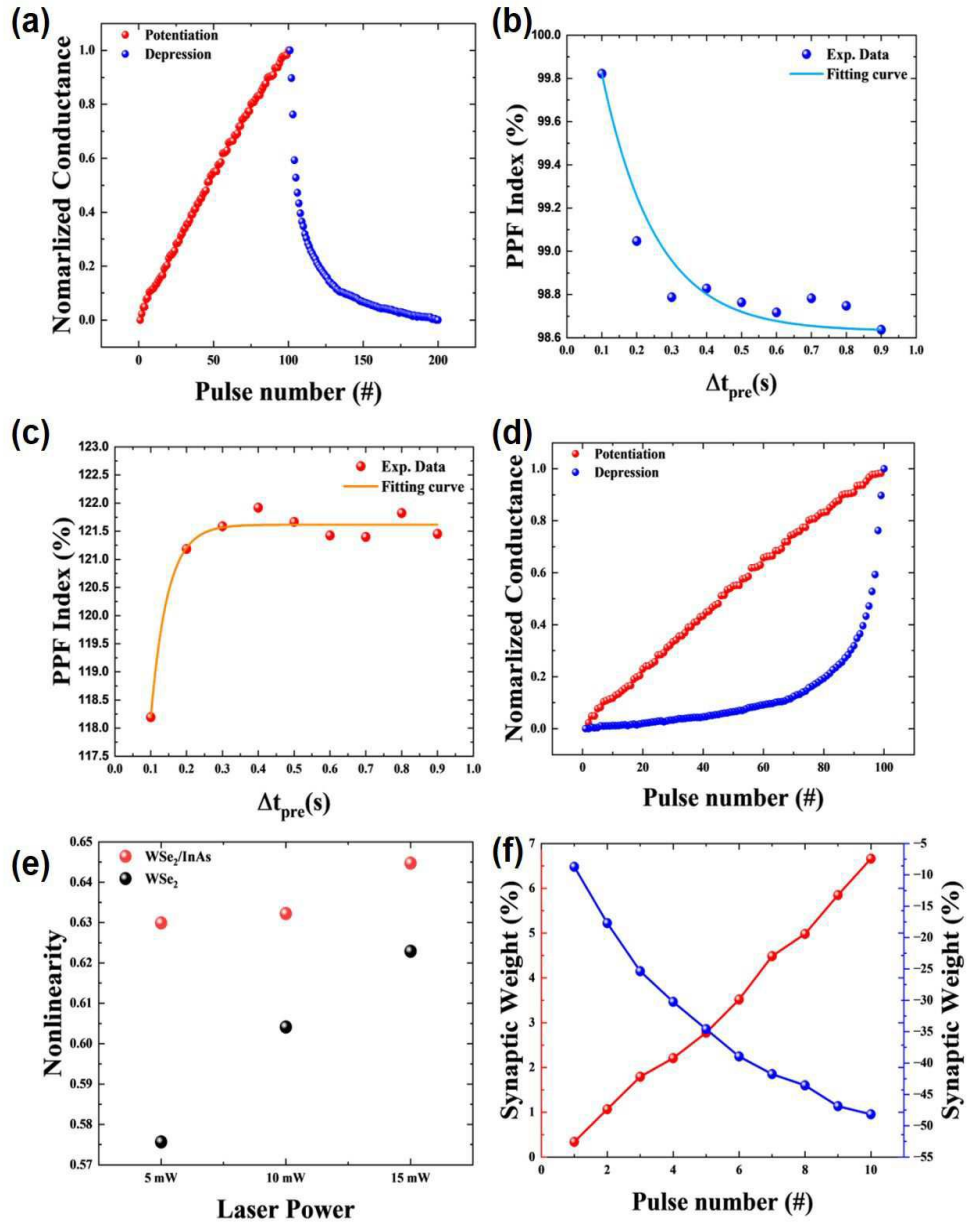
도면2



도면3



도면4



도면5

