



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년12월06일

(11) 등록번호 10-2739195

(24) 등록일자 2024년12월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01L 31/18 (2006.01) G06N 3/067 (2006.01)

H01L 31/0224 (2006.01) H01L 31/09 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H01L 31/18 (2021.01)

G06N 3/067 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2024-0032547

(22) 출원일자 2024년03월07일

심사청구일자 2024년03월07일

(56) 선행기술조사문헌

CN116926677 A\*

KR1020220155699 A\*

\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

경상국립대학교 산학협력단

경상남도 진주시 진주대로 501 (가좌동)

(72) 발명자

박준홍

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

김형태

경상남도 창원시 성산구 안민안길 50, 106동 301호  
(천선동, 서광 파크빌 아파트)

이도현

경상남도 진주시 모덕로 222번길 3, 1층(상대동, 1층)

(74) 대리인

특허법인위솔

전체 청구항 수 : 총 6 항

심사관 : 배준석

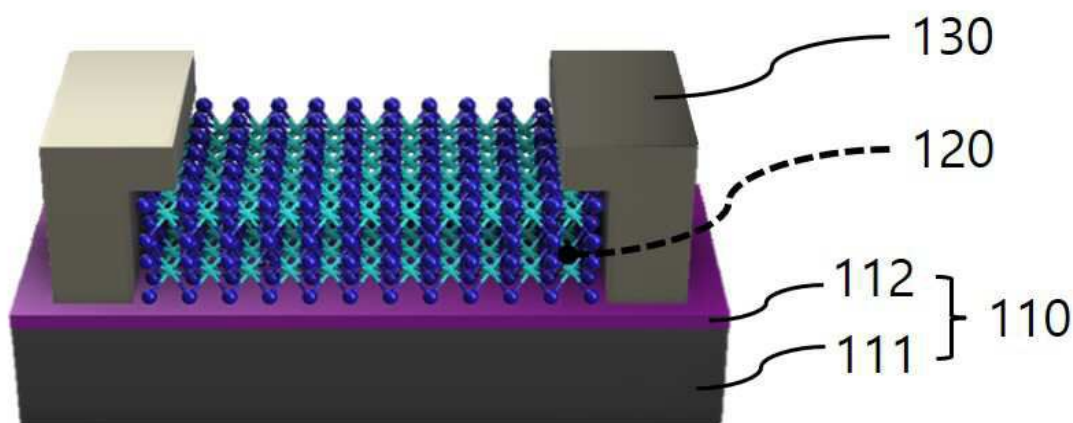
(54) 발명의 명칭 대면적 성장된 전이금속 디칼코게나이드를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자 및 이의 제조방법

## (57) 요약

본 발명의 바람직한 실시예에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 제조된 전이금속 디칼코게나이드 플레이크는 넓은 면적의 기판에 수 내지 수백 마이크로미터 스케일의 크기로 균일하고 고르게 성장될 수 있고, 이를 광감지층으로 이용한 광게이팅 소자는 광 자극에 의한 반응으로 AND, OR 및 합산 동작의 논리 연산이 가능하며, 저전력 게이팅 동작 반응이 가능한 효과가 있다.

대표도 - 도1

100 :



(52) CPC특허분류

*H01L 31/022408* (2013.01)

*H01L 31/09* (2013.01)

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  |                                              |
| 과제수행기관명     | 경상국립대학교 산학협력단                                |
| 연구기간        | 2024.01.01 ~ 2024.12.31                      |

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

광게이팅 소자의 제조방법에 있어서,

동일 공간 내에 서로 이격 배치되는 제1 가열로 및 제2 가열로를 준비하는 단계;

상기 제1 가열로 내에 칼코젠 물질을 포함하는 제1 전구물질을 위치시키고, 상기 제2 가열로 내에 전이금속 산화물로서 텅스텐 옥사이드( $WO_3$ ) 및 금속 할라이드염으로서 염화나트륨( $NaCl$ )이 혼합된 제2 전구물질 및 상기 제2 전구물질과 인접하도록 기판을 위치시키는 단계;

상기 제1 가열로 및 상기 제2 가열로 각각을 서로 다른 온도로 가열하고, 용융염 보조 열화학 기상 증착하여 상기 기판 상부에 적어도 하나 이상의 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 포함하는 광감지층을 형성하는 단계;

상기 광감지층에 적어도 둘 이상의 접합 부위를 형성하도록 소스 전극 및 드레인 전극을 증착하는 단계; 및

상기 기판 하부에 게이트 전극을 형성하는 단계;를 포함하고,

상기 전이금속 산화물 및 금속 할라이드염의 혼합 비율은 5:1 내지 7:1 중량비이고,

상기 광게이팅 소자는 상기 광감지층에 외부로부터 펄스 형태로 인가되는 광 전력과 상기 게이트 전극에 인가되는 양전압 또는 음전압의 조합에 따른 전류 특성을 도출하여 AND 또는 OR의 논리 연산을 수행하는 로직 소자인, 광게이팅 소자의 제조방법.

#### 청구항 2

삭제

#### 청구항 3

삭제

#### 청구항 4

삭제

#### 청구항 5

제1항에 있어서,

상기 광감지층을 형성하는 단계에서,

상기 제1 가열로의 온도는 500 °C 이상 700 °C 미만이고,

상기 제2 가열로의 온도는 700 °C 이상 900 °C 미만인, 광게이팅 소자의 제조방법.

#### 청구항 6

제1항에 있어서,

상기 전이금속 디칼코게나이드 플레이크는 단층 또는 2층 이상의 층상 형태인, 광게이팅 소자의 제조방법.

#### 청구항 7

제1항에 있어서,

상기 광감지층 내 포함되는 상기 전이금속 디칼코게나이드 플레이크의 평균 가로 길이는 10 내지 100  $\mu m$ 인, 광게이팅 소자의 제조방법.

## 청구항 8

제1항에 있어서,

상기 소스 전극 및 드레인 전극은 금속 또는 금속화합물을 포함하고,

상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Au, Ag 및 이들의 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함하는 금속 원소를 포함하는, 광게이팅 소자의 제조방법.

## 청구항 9

광게이팅 소자에 있어서,

기관 상부에 구비되고 적어도 하나 이상의 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 포함하며, 제1항 및 제5항 내지 제8항 중 선택되는 어느 하나의 제조방법으로 제조된 광감지층;

상기 광감지층 상에 구비되고 서로 이격되어 배치되는 소스 전극 및 드레인 전극; 및

상기 기관 하부에 구비되는 게이트 전극;을 포함하고,

상기 광게이팅 소자는 상기 광감지층에 외부로부터 펄스 형태로 인가되는 광 전력과 상기 게이트 전극에 인가되는 양전압 또는 음전압의 조합에 따른 전류 특성을 도출하여 AND 또는 OR의 논리 연산을 수행하는 로직 소자인, 광게이팅 소자.

## 청구항 10

삭제

## 청구항 11

삭제

## 청구항 12

삭제

## 청구항 13

삭제

## 청구항 14

삭제

## 청구항 15

삭제

## 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 발명은 광게이팅 소자에 관한 것으로, 자세하게는 전이금속 칼코게나이드를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자 및 이의 제조방법에 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 중

요성이 극대화되고 있다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0003] 본 발명은 상술한 문제를 해결하기 위하여 착안된 것으로, 광 자극에 의한 반응이 가능하며 뉴로모픽 특성을 나타내는 광감지층을 포함하는 광게이팅 소자 및 이의 제조방법을 제공할 수 있다.

### 과제의 해결 수단

[0004] 상기 기술적 과제를 달성하기 위해 본 발명의 바람직한 예에 따른 광게이팅 소자의 제조방법은, 동일 공간 내에 서로 이격 배치되는 제1가열로 및 제2가열로를 준비하는 단계; 상기 기술적 과제를 달성하기 위해 본 발명의 바람직한 예에 따른 광게이팅 소자의 제조방법은, 동일 공간 내에 서로 이격 배치되는 제1가열로 및 제2가열로를 준비하는 단계;

[0005] 상기 제1 가열로 내에 칼코겐 물질을 포함하는 제1 전구물질을 위치시키고, 상기 제2 가열로 내에 전이금속 산화물 및 금속 할라이드염이 혼합된 제2 전구물질 및 상기 제2 전구물질과 인접하도록 기판을 위치시키는 단계;

[0006] 상기 제1 가열로 및 상기 제2 가열로 각각을 서로 다른 온도로 가열하고, 용융염 보조 열화학 기상 증착하여 상기 기판 상에 적어도 하나 이상의 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 포함하는 광감지층을 형성하는 단계; 및

[0007] 상기 광감지층에 적어도 둘 이상의 접합 부위를 형성하도록 전극을 증착하는 단계;를 포함한다.

[0008] 상기 전이금속 산화물 및 금속 할라이드염의 혼합 비율은 4:1 내지 8:1 중량비일 수 있다.

[0009] 상기 금속 할라이드염은 화학식 AZ 또는 AZ<sub>2</sub>로 표시되고, 상기 A는 알칼리 금속 또는 알칼리 토금속이고, 상기 Z는 할로겐 원소일 수 있다.

[0010] 상기 금속 할라이드염은 NaCl, NaBr, KCl, KBr, LiCl, LiBr, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub>, CaB<sub>2</sub>, MgBr<sub>2</sub> 및 이들이 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0011] 상기 광감지층을 형성하는 단계에서, 상기 제1 가열로의 온도는 500 °C 이상 700 °C 미만이고, 상기 제2 가열로의 온도는 700 °C 이상 900 °C 미만일 수 있다.

[0012] 상기 전이금속 디칼코게나이드 플레이크는 단층 또는 2층 이상의 층상 형태일 수 있다.

[0013] 상기 전극은 금속 또는 금속화합물을 포함하고, 상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Au, Ag 및 이들의 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함하는 금속 원소를 포함할 수 있다.

[0014] 상기 기술적 과제를 달성하기 위해 본 발명의 바람직한 예에 따른 광게이팅 소자는, 기판 상에 구비되고 적어도 하나 이상의 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 포함하는 광감지층; 및 상기 광감지층 상에 구비되고 서로 이격되어 배치되는 복수개의 전극;을 포함한다.

[0015] 상기 소자는 외부로부터 펄스 형태로 인가되는 광 전력 및 게이트 전극에 인가되는 전압 중 적어도 하나의 변동에 따른 전류 특성을 도출하여 도출된 전류 특성으로 광 전력의 인가에 의해 AND, OR 및 합산 동작의 논리 연산을 수행하는 로직 소자일 수 있다.

[0016] 상기 소자는 외부로부터 펄스 형태로 인가되는 광 전력 및 게이트 전극에 인가되는 전압 중 적어도 하나의 변동에 따른 전류 특성을 도출하여 도출된 전류 특성으로 뉴런의 시냅틱 반응을 전기적으로 모사하는 시냅틱 특성을 갖는 인공 시냅스 소자일 수 있다.

[0017] 상기 뉴런의 시냅틱 반응은 펄스 형태로 인가되는 광 자극에 의한 학습(Potentiation) 및 망각(Depression) 반응을 포함할 수 있다.

[0018] 상기 전이금속 디칼코게나이드 플레이크는 단층 또는 2층 이상의 층상 형태일 수 있다.

[0019] 상기 광감지층 내 포함되는 상기 전이금속 디칼코게나이드 플레이크의 평균 가로 길이는 10 내지 100 μm일 수 있다.

[0020] 상기 전극은 금속 또는 금속화합물을 포함하고, 상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Au, Ag 및 이들의 조합

중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함하는 금속 원소를 포함할 수 있다.

### 발명의 효과

- [0021] 상기와 같은 본 발명에 따르면, 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 제조된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트는 넓은 면적의 기판에 수 내지 수백 마이크로미터 스케일의 크기로 균일하고 고르게 성장될 수 있고, 이를 광감지층으로 이용한 광게이팅 소자는 광 자극에 의한 반응으로 AND, OR 및 합산 동작의 논리 연산이 가능하며, 저전력 시냅스 동작 반응이 가능한 효과가 있다.
- [0022] 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

- [0023] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 광게이팅 소자의 단면을 도시한 모식도이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착(CVD) 방법을 사용한 전이금속 디칼코게나이드 시트의 제조에 사용된 가열로의 모식도이다.
- 도 3은 본 발명의 제조에 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 전이금속 디칼코게나이드 플레이트가 성장된 기판의 (a) 광학 사진, 이의 (b) 광학 현미경(optical microscope) 이미지, (c) 열화학 기상 증착 시간에 따른 커버리지(%) 및 (d) 열화학 기상 증착으로 성장된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 X-선 광전자 분광법(XPS; X-ray photoelectron spectroscopy) 결과이다.
- 도 4는 본 발명의 실시예 1에 따른 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 (a) 원자힘 현미경(AFM; Atomic force microscopy) 결과, 이의 (c) 높이 프로파일, (b) 켈빈 프로브 힘 현미경(KPFM; Kelvin probe force microscopy) 이미지 및 이의 접촉 전위차(CPD; contact potential difference) 프로파일이다.
- 도 5는 본 발명의 제조에 1에 따라 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이트에 대한 (a) 단층(1L), 2층(2L), 3층(3L) 및 다층(Multi-L)의 전이금속 디칼코게나이드 플레이트에 대한 라만 분석, 단층의 전이금속 디칼코게나이드 플레이트에 대한 (b)  $E_{2g}^1$  진동 모드( $251\text{cm}^{-1}$ )에서 라만 강도 매핑(Raman intensity mapping)이며, (c) 층수에 따른 전이금속 디칼코게나이드 플레이트에 대한 광발광 분광법(PL; Photoluminescence) 결과이고, (d)  $\text{SiO}_2$  기판에 대한 단층 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 광발광 강도 매핑(PL intensity mapping) 결과이다.
- 도 6은 본 발명의 제조에 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 (a)  $\text{SiO}_2/\text{WSe}_2/\text{Pt}$  단면 층에 대한 고해상도 투과전자현미경(HRTEM; High resolution-transmission electron microscope) 및 (b) 이의 에너지 분산 X선 분석(EDS; Energy dispersive X-ray spectroscopy) 결과이다.
- 도 7은 본 발명의 제조에 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로  $2 \times 2$  인치 기판을 사용하여 합성된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 광학 사진 및 광발광 분광법(PL) 측정에 사용된 25개 부위를 표시한 것이다.
- 도 8은 제조에 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로  $2 \times 2$  인치 기판을 사용하여 합성된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트가 성장된 기판 내 25개 부위에서 수집된 (a) 평면 내 진동모드( $E_{2g}^1$ )와 평면 외 진동모드( $A_{1g}$ )에 해당하는 약  $250\text{cm}^{-1}$  및  $260\text{cm}^{-1}$  라만 결과 및 (b)  $\text{SiO}_2$  기판( $1.62\text{eV}$ )의 광발광 분광법(PL) 결과이다.
- 도 9는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이트를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자를 일반적인 백-게이트 전이금속 디칼코게나이드 전계 효과 트랜지스터(back-gated  $\text{WSe}_2$  FET)로 사용한 경우의 (a) 모식도 및 회로 도식도, (b) 일정한  $V_{DS}(1\text{V})$ 에서  $V_{BG}(-50\text{V} \sim +50\text{V})$  스위프(swipe)하여 측정된 p형 전송 특성 및 (c) 서로 다른 게이트 바이어스에서  $-10\text{V}$ 에서  $+10\text{V}$ 로 스위프(swipe)하는 출력 I-V 결과이다.

도 10은 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자에 405 nm 파장의 광 전력을 인가한 상태의 (a) 모식도 및 회로 도식도, (b) 서로 다른 광 게이트 전력 하에서 전송 특성 및 (c) 임계 광 전력 하에서 -10 V에서 +10 V까지  $V_{DS}$  스위프(swipe) 하에서 0.2~1.0 mW 범위의 다양한 광 게이트 전력 하에서 출력 I-V 결과이다.

도 11은 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 임계 광 전력 하에서 광 조사의 펄스 변조 하에서 동적 구동 모드, (b) 전기 게이팅과 라이트(light) 게이팅을 동시에 입력하는 단일 디바이스 기반 로직 동작 및 (c) 임계 광 파워에 대한 뇌에서 영감을 받은 시냅스 기능 모드이다.

도 12는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 405 nm 파장 및  $0.2 \sim 0.8 \text{ mW/cm}^2$  전력의 레이저 소스에서 발생하는 동적 광 응답 결과, (b) 1.4 Hz ~ 0.1 Hz 범위의 작동 주파수 스펙트럼에 걸친 광 응답 결과 및 (c) 응답 특성이다.

도 13는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 레이저의 각 전력에 대한 소자의 응답성 및 (b) 채널을 가로지르는 각각의 바이어스에 대한 특정 검출성 분석이다.

도 14는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자를 사용한 트랜지스터 로직에 관한 해석이다.

도 15는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 백 게이트 전기장의 포지티브 바이어스(positive bias) 하에서 펄스 수에 따른 흥분성 게이팅 후 거동(excitatory postsynaptic behavior), (b) 백 게이트 전기장의 네거티브 바이어스(negative bias) 하에서의 펄스 수에 따른 억제성 게이팅 후 거동(inhibitory postsynaptic behavior) 및 (c) 효율적인 전력 소비에 대한 게이팅 바이어스 필드(gated bias field)가 작고 없는 경우 최적화된 EPSC(excitatory postsynaptic current) 및 IPSC(inhibitory postsynaptic current) 특성 결과이다.

도 16은 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 펄스 지속 시간에 따른 EPDC 및 IPSC 특성 결과 및 (b) 소자의 PPF(Paired pulse facilitation) 및 PPD(Paired pulse depression) 특성 결과이다.

도 17은 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 최적화된 레이저 펄스를 사용하여 다양한 게이팅 전기장 하에서 정규화된 학습(Potentiation) 및 망각(Depression) 결과 및 (b) 비선형성 분석을 위한 정규화된 학습(Potentiation) 및 망각(Depression) 결과이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0024] 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.

[0025] 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.

[0026] 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.

[0028] 전이금속 디칼코게나이드를 광감지층으로 구비하는 광게이팅 소자

[0029] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 광게이팅 소자의 단면을 도시한 모식도이다.

[0030] 도 1을 참조하면, 광게이팅 소자(100, Light-Gated Transistors, LGT)는 기판(110) 상에 구비되고 과 2차원 반도체 물질을 포함하는 광감지층(120); 및 상기 광감지층(120) 상에 구비되고 서로 이격되어 배치되는 복수개의 전극(130);을 포함할 수 있다.

[0031] 기판(110)은 반도체 물질로서 실리콘, SOI(Silicon-on-insulator) 등의 반도체 기판을 사용할 수 있고, 구체적으로 표면에 수 내지 수백 나노미터 두께의 유전체층(112)이 형성된 실리콘 기판(111)을 사용할 수 있다. 또한, 탄화규소(SiC), 질화갈륨(GaN), 산화갈륨(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 등의 와이드 밴드갭 반도체 기판을 사용할 수도 있다. 기판(110)은 추가적으로 도펀트(dopant)에 의해 도핑된 것을 사용할 수도 있다.

[0032] 광감지층(120)은 인가된 광 신호가 인가되면 전기적 변화의 발생으로 반응하는 역할을 수행하는 층으로서 2차원 반도체 물질을 포함할 수 있다. 광감지층(120)은 근적외선, 가시광선 내지 자외선 파장을 포함하는 광 신호에 대한 반응이 가능한 광게이팅 소자의 광감지층으로 용이하게 사용될 수 있다.

[0033] 구체적으로, 2차원(2D) 반도체 물질은 단일 층 내에서 강한 공유결합을 이루고 있고 층과 층 사이에서는 상대적으로 작은 반데르발스 힘(Van der waals force)으로 결합된 구조를 가질 수 있다. 상기 2차원 반도체 물질은 일반적인 광전자 소자와는 달리 이의 직접 천이 성질을 이용하여 단일 물질만으로도 광전자 소자의 광감지층으로 바로 사용할 수 있어 소자의 구조가 간단한 장점이 있다.

[0034] 상기 2차원 반도체 물질은 광감지층(120) 내에서 층상 구조를 갖는 판형의 시트, 예컨대 플레이크 형태로 구비될 수 있고, 단층(monolayer) 또는 2층 이상의 복층(multilayer)인 층상 형태일 수 있다. 상기 2차원 반도체 물질은 벌크 또는 통상적인 두께의 박막 상태에서는 간접천이 특성을 나타내지만, 단일 층 또는 수 층 이내의 두께일 경우 직접천이 특성을 나타내며, 광반응성이 우수하며 투명하고 유연한 특성이 있어 광전자(optoelectronic) 소자로 유용히 적용될 수 있다.

[0035] 또한, 상기 2차원 반도체 물질은 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 벌크 물질과는 달리 탄도 수송 양상을 나타내며 이로 인해 고이동도, 고속, 저전력 반도체로 적용될 수 있다.

[0036] 게다가, 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.

[0037] 상기 2차원 반도체 물질은 전이금속 디칼코게나이드(TMD, Transition metal dichalcogenide)를 포함할 수 있다. 구체적으로, 상기 전이금속 디칼코게나이드는 화학식 MX<sub>2</sub>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 이들의 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함할 수 있고, X는 칼코겐(chalcogen) 원소로서 S, Se, Te 또는 이들의 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다. 구체적으로, 상기 전이금속 디칼코게나이드 물질은 MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, MoTe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>, WTe<sub>2</sub>, ZrS<sub>2</sub>, ZrSe<sub>2</sub>, HfS<sub>2</sub>, HfSe<sub>2</sub>, NbSe<sub>2</sub>, ReSe<sub>2</sub>, PdTe<sub>2</sub> 또는 이들의 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다. 더욱 구체적으로 상기 전이금속 디칼코게나이드 물질은 MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub> 또는 이들 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함할 수 있고, 일 구체예에서 WSe<sub>2</sub>를 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0038] 상기 2차원 반도체 물질의 결정 구조(crystal structure)는 전이 금속인 M과 칼코겐 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.

[0039] 특히, 상기 2차원 반도체 물질이 전이금속 디칼코게나이드 시트, 예컨대 전이금속 디칼코게나이드 플레이크로 구비되는 경우, 이의 평균 가로 길이가 수 내지 수백 마이크로미터 스케일의 크기인 것으로써, 예컨대 전이금속 디칼코게나이드 마이크로플레이크로 이해될 수 있다. 구체적으로, 상기 전이금속 디칼코게나이드 플레이크의 평

균 가로 길이는 10 내지 100  $\mu\text{m}$ , 일 구체예에서 50 내지 60  $\mu\text{m}$ 일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0040] 전극(130)은 금속 또는 금속화합물을 포함할 수 있다. 상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Au, Ag 및 이들의 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 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.

[0042] **전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 제조방법**

[0043] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착(CVD) 방법을 사용한 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 제조에 사용된 가열로의 모식도이다.

[0044] 도 2를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 광게이팅 소자의 광감지층으로 사용된 용융염 보조 열화학 기상 증착(molten-salt-assisted thermal chemical vapor deposition) 방법을 사용한 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 제조는 먼저, 동일 공간 내에 서로 이격 배치되는 제1가열로 및 제2가열로를 준비하는 단계가 수행될 수 있다. 상기 제1 가열로와 상기 제2 가열로는 하나의 퀴즈 튜브(quartz tube)로 연결되어 있으며 양 말단을 통해 캐리어 가스(carrier gas)의 유동이 가능할 수 있다.

[0045] 그 다음, 상기 제1 가열로 내에 칼코겐 물질을 포함하는 제1 전구물질을 위치시킬 수 있다.

[0046] 상기 제1 전구물질은 칼코겐(chalcogen) 물질로서 예를 들어 S, Se, Te 또는 이들의 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다. 일 구체예에서 상기 제1 전구물질은 Se일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0047] 또한, 상기 제2 가열로 내에 상기 제1 전구물질과 일정 거리로 이격되도록 제2 전구물질을 위치시킬 수 있고, 상기 제2 전구물질과 인접하도록 기판을 위치시킬 수 있다.

[0048] 상기 제2 전구물질은 상기 제1 전구물질과 동일 공간 상에 위치하면서 일정 거리로 이격되어 배치될 수 있으며, 상기 이격 거리는 가열로 내에서 전구물질들이 휘발되어 증기 상태로 수송 가능한 거리로서, 구체적으로 1 내지 100 cm, 더욱 구체적으로 10 내지 70 cm, 20 내지 60 cm일 수 있고, 일 구체예에서 20 내지 40 cm일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0049] 상기 제2 전구물질은 상기 전이금속 산화물 및 금속 할라이드염을 포함하는 혼합물질일 수 있다.

[0050] 상기 전이금속 산화물은 상술한 전이금속 디칼코게나이드 물질(화학식  $\text{MX}_2$ )에서 나타낸 전이금속(M)과 산소 원자가 결합한 형태의 화합물로서 예컨대 화학식  $\text{M}_x\text{O}_y$ (이때, x 및 y는 정수)형태일 수 있다. 구체적으로, 상기 전이금속 산화물은 Mo, W, Nb, V, Ta, Ti, Zr, Hf, Tc, Re, Ru, Co, Pd, Pt, Cu, Ga, In, Sn, Ge, Pb 또는 이들 중 선택되는 적어도 어느 하나의 산화물을 의미할 수 있다. 예를 들어, 상기 전이금속 산화물은  $\text{MoO}$ ,  $\text{MoO}_2$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{MoO}_x$ ,  $\text{Mo}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mo}_2\text{O}_5$ ,  $\text{WO}$ ,  $\text{WO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{WO}_x$ ,  $\text{W}_2\text{O}_3$ ,  $\text{W}_2\text{O}_5$ ,  $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ ,  $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$ ,  $\text{W}_{24}\text{O}_{70}$ ,  $\text{W}_{25}\text{O}_{73}$ ,  $\text{W}_{40}\text{O}_{118}$ ,  $\text{NbO}$ ,  $\text{NbO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{VO}$ ,  $\text{VO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Zr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Zr}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Hf}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Hf}_2\text{O}_5$  등을 포함할 수 있다. 일 구체예에서, 상기 전이금속 산화물은  $\text{WO}_3$ 일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0051] 상기 금속 할라이드염은 전구체의 합성을 촉진하는 촉매 역할을 하며, 상기 금속 할라이드염과 혼합되는 전구체의 비율을 조절하여 성장 물질의 형태와 품질, 구체적으로 핵 밀도, 결정크기, 형태, 균질도 등을 제어할 수 있다. 구체적으로, 상기 금속 할라이드염은 열화학 기상 증착 방법에 적용될 시 증기압 상승을 통해 합성하고자 하는 물질의 반응 동역학을 향상시킬 수 있다. 더욱 구체적으로, 상기 금속 할라이드염은 상기 전이금속 산화물과 반응하여 낮은 녹는점을 가지면서 높은 증기압을 갖는 고휘발성 용융염(molten salt)을 형성할 수 있다. 이러한 용융염이 보조되어 수행되는 열화학 기상 증착 방법이 수행될 수 있다. 따라서, 상기 금속 할라이드염을 포함하는 방법으로 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법을 사용하는 것을 통해, 전구체로 전이금속 산화물만을 포함하는 일반적인 화학 기상 증착 방법보다 낮은 압력 및 온도에서 고품질의 전이금속 디칼코게나이드 플레이트를 성장시킬 수 있다.

[0052] 상기 금속 할라이드염은 화학식 AZ 또는  $\text{AZ}_2$ 로 표시될 수 있고, 이때 상기 A는 알칼리 금속 또는 알칼리 토금속이고, 상기 Z는 할로젠 원소일 수 있다. 예를 들어, 상기 금속 할라이드염은  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaBr}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KBr}$ ,  $\text{LiCl}$ ,  $\text{LiBr}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaBr}_2$ ,  $\text{MgBr}_2$  및 이들이 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다. 일 구체예에서, 상기 금속 할라이드염은  $\text{NaCl}$ 일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

- [0053] 상기 전이금속 산화물 및 상기 금속 할라이드염의 혼합을 통해 생성되는 후술하는 용융염을 사용한 열화학 기상 증착 방법은 상기 전이금속 산화물의 환원을 촉진함으로써 전이금속 디칼코게나이드의 성장 온도를 낮출 수 있다. 상기 전이금속 산화물 및 상기 금속 할라이드염의 혼합 비율은 4:1 내지 8:1 중량비, 구체적으로 5:1 내지 7:1 중량비일 수 있다. 상기 범위 내의 혼합 비율을 가질 경우 본 발명의 바람직한 제조방법으로 형성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크의 평균 가로 길이는 수 내지 수십 마이크로미터 수준으로 크며, 예를 들어 약 50 내지 60  $\mu\text{m}$ 로 성장할 수 있다. 이는 상기 금속 할라이드염의 혼합이 수행되지 않는 성장 방법보다 더 큰 크기로 균일하게 성장되는 것일 수 있다. 다만, 상기 범위를 벗어나도록 상기 전이금속 산화물 대비 상기 금속 할라이드염의 혼합비율이 증가하면 형성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크의 크기는 감소할 수 있다. 일 구체예에서, 상기 전이금속 산화물 및 상기 금속 할라이드염의 혼합 비율은 6:1 중량비일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.
- [0055] 그 다음, 상기 제1 가열로 및 상기 제2 가열로를 서로 다른 온도로 열화학 기상 증착하여 상기 기판 상에 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 포함하는 광감지층을 형성하는 단계가 수행될 그 다음, 상기 제1 가열로 및 상기 제2 가열로를 서로 다른 온도로 열화학 기상 증착하여 상기 기판 상에 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 포함하는 광감지층을 형성하는 단계가 수행될 수 있다.
- [0056] 상기 열화학 기상 증착 과정에서 상기 금속 할라이드염과 상기 전이금속 산화물의 반응으로 인해 중간 물질로서 용융염이 형성될 수 있다. 상기 용융염은 상기 전이금속 산화물의 환원을 촉진함으로써 전이금속 디칼코게나이드의 성장 온도를 낮출 수 있다. 이때 형성되는 용융염은 화학식  $A_aM_bO_c$ (이때, a, b 및 c는 정수)의 형태일 수 있다. 상기 용융염은 중간 물질로서 완전히 반응하여 제거될 수 있으며, 최종 물질로서 전이금속 디칼코게나이드 플레이크의 성장이 완료된 이후에는 남아있지 않는 물질일 수 있다. 상기 용융염의 보조가 수행되지 않을 경우 전이금속 디칼코게나이드의 합성이 원활히 수행되지 않을 수도 있다. 상기 용융염의 보조에 의한 열화학 기상 증착 방법을 통해 상술한 전이금속 디칼코게나이드 플레이크가 형성되는 기작은, 예를 들어 다음의 반응식 1 내지 반응식 3에 따라 설명될 수 있다.
- [0057] [반응식 1]
- [0058]  $2\text{WO}_3 (\text{s}) + 2\text{NaCl} (\text{s}) \rightarrow \text{WO}_2\text{Cl}_2 (\text{g}) + \text{Na}_2\text{WO}_4 (\text{l})$
- [0059] [반응식 2]
- [0060]  $\text{Na}_2\text{WO}_4 (\text{l}) + 2\text{H}_2\text{Se} (\text{g}) + \text{H}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{WSe}_2 (\text{s}) + 3\text{H}_2\text{O} (\text{g}) + \text{Na}_2\text{O} (\text{s})$
- [0061] [반응식 3]
- [0062]  $\text{WO}_2\text{Cl}_2 (\text{ads}) + 2\text{H}_2\text{Se} (\text{ads}) + \text{H}_2 (\text{g}) \rightarrow \text{WSe}_2 (\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{g}) + 2\text{HCl} (\text{g})$
- [0063] 먼저, 금속 할라이드염인 NaCl은 전이금속 산화물인  $\text{WO}_3$ 와 반응하여 기체 상태의  $\text{WO}_2\text{Cl}_2$ 를 형성하고 이와 동시에 낮은 녹는점을 가지면서 높은 증기압을 갖는 용융염으로서  $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 를 형성할 수 있다. 용융염  $\text{Na}_2\text{WO}_4$ 는 강한 휘발성을 갖는 물질로서 가열로 내에 기체 상태로 포화된 칼코겐 증기인  $\text{H}_2\text{Se}$ 와 반응하여 전이금속 디칼코게나이드로서  $\text{WSe}_2$ 를 형성할 수 있다. 또한,  $\text{WO}_2\text{Cl}_2$  및  $\text{H}_2\text{Se}$ 와 반응으로 인해  $\text{WSe}_2$ 가 형성될 수도 있다. 상기 금속 할라이드염을 포함함으로써 전구체로서 전이금속 산화물만을 포함하는 화학기상증착 방법 보다 낮은 압력 및 온도에서 고품질의 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 더 빠르게 성장시킬 수 있다.
- [0064] 또한, 상기 열화학 기상 증착 과정에서 성장 온도는 증착 과정, 결정 핵생성 및 물질의 성장 속도를 지배하며 합성되는 물질의 동역학에 직접적인 영향을 미칠 수 있고 박막층의 커버리지(coverage)를 변화시킬 수 있는 요인이다. 칼코겐 물질을 포함하는 제1 전구물질이 위치한 상기 제1 가열로의 가열 온도는 500  $^{\circ}\text{C}$  이상 700  $^{\circ}\text{C}$  미만일 수 있고, 일 구체예에서 600  $^{\circ}\text{C}$ 일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 또한, 전이금속 산화물 및 금속 할라이드염이 혼합된 제2 전구물질이 위치한 상기 제2 가열로의 온도는 700  $^{\circ}\text{C}$  이상 900  $^{\circ}\text{C}$  미만일 수 있고, 일 구체예에서 800  $^{\circ}\text{C}$ 일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.
- [0065] 상기 제1 가열로 및 상기 제2 가열로를 가열하여 열화학 기상 증착함으로써 형성된 전이금속 디칼코게나이드 플레이크는 상기 기판 상에 증착될 수 있으며, 증착 시간은 박막층의 커버리지(coverage)를 변화시킬 수 있는 요인이다. 상기 증착 시간이 증가할수록 상기 기판을 커버하는 범위(coverage)가 증가할 수 있다. 상기 증착 시간은 1 내지 10분일 수 있고, 구체적으로 3 내지 9분일 수 있고, 더욱 구체적으로 5 내지 8분일 수 있다. 상기 범

위 내의 증착 시간으로 열화학 기상 증착 공정이 수행될 시 상기 기판의 면적에 대하여 80 % 이상의 커버리지(coverage)를 가질 수 있다. 일 구체예에서, 상기 열화학 기상 증착 공정의 증착 시간은 7분일 수 있고, 이를 통해 제조되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 면적은 상기 기판의 면적에 대하여 90 % 이상의 커버리지(coverage)를 가질 수 있다.

[0066] 특히, 본 발명의 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법을 사용함으로써, 용융염에 의해 전이금속 산화물의 환원을 촉진함으로써 성장 온도를 낮추는 것이 가능하다. 또한, 전이금속 디칼코게나이드 플레이트는 유전체를 통한 정전기적 게이팅과, 광신호 인가의 광 게이팅을 동시에 구현할 수 있으므로 서로 다른 게이팅 방법을 조합하여 단일 소자에서 AND 와 OR 논리 연산 구현이 가능한 장점이 있다.

[0068] 그 다음, 상기 광감지층에 적어도 둘 이상의 접합 부위를 형성하도록 전극을 증착하는 단계가 수행될 수 있다.

[0069] 상기 전극은 금속 또는 금속화합물을 포함할 수 있다. 상기 금속 또는 금속화합물은 Ti, Ni, Au, Ag 및 이들의 조합 중 선택되는 적어도 어느 하나를 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.

[0070] 상기 전극을 증착하는 단계는 광감지층의 결함을 유도하지 않는 수준의 에너지가 인가되는 금속 박막의 증착 방법, 예를 들어 전자빔 증발기, 열 증발기, 스퍼터링 등의 방법을 비제한적으로 사용될 수 있다.

[0072] 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.

#### [0074] 제조예 1: 용융염 보조 열화학 기상 증착(CVD) 방법을 사용한 WSe<sub>2</sub>층 성장

[0075] 셀레늄(Se, > 99.5%) 분말 48 mg이 담긴 석영 보트를 1차 가열로에 배치하고, 텅스텐 옥사이드(WO<sub>3</sub>, 99.9%) 분말 24 mg 및 염화나트륨(NaCl, > 99.0%) 4 mg의 혼합분말이 담긴 석영 보트를 2차 가열로에 배치하였다. 한편, 300 nm 두께의 SiO<sub>2</sub> 절연층을 갖는 2.5 cm x 2.5 cm 크기의 실리콘 웨이퍼는 WO<sub>3</sub>/NaCl이 담긴 2차 가열로 내에 배치되었다. 두 석영보트가 이격되는 간격은 퀴츠 튜브(quartz tube) 내 34 cm로 최적화되었고, 퀴츠 튜브는 10<sup>-2</sup> Torr진공 상태로 만든 후 캐리어 가스로 Ar을 100 sccm으로 흘렸다. 이후, 1차 가열로 및 2차 가열로는 각각 10.9 °C/min 및 14.5 °C/min의 램프 속도로 가열되었다. 그 결과, Se이 담긴 1차 가열로의 온도가 600 °C, WO<sub>3</sub>/NaCl이 담긴 2차 가열로의 온도가 800 °C인 조건에서 WSe<sub>2</sub>가 성장되었으며, WSe<sub>2</sub> 성장 과정 동안 Ar 유량 100 sccm 및 H<sub>2</sub> 유량 20 sccm으로 7분간 유지하며 지속적으로 흘려주었다. 반응이 완료되고 가열로를 냉각시킨 후 용융염 보조 열화학 기상 증착법을 사용하여 복수 층의 WSe<sub>2</sub> 플레이트가 성장된 웨이퍼 기판을 수득하였다.

#### [0077] 제조예 2: 열화학 기상 증착(CVD) 방법을 사용한 WSe<sub>2</sub>층 성장

[0078] 텅스텐 옥사이드(WO<sub>3</sub>) 분말 및 염화나트륨(NaCl)의 혼합분말을 사용한 것 대신에 염화나트륨(NaCl)을 제외하고 텅스텐 옥사이드(WO<sub>3</sub>) 분말만 사용한 것을 제외하고는 제조예 1과 동일한 방법을 사용하여 WSe<sub>2</sub> 플레이트가 성장된 웨이퍼 기판을 수득하였다.

#### [0080] 실험예 1: 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 성장된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 물성 확인

[0082] 도 3은 본 발명의 제조예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 전이금속 디칼코게나이드 플레이트가 성장된 기판의 (a) 광학 사진, 이의 (b) 광학 현미경(optical microscope) 이미지, (c) 열화학 기상 증착 시간에 따른 커버리지(%) 및 (d) 열화학 기상 증착으로 성장된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 X-선 광전자 분광법(XPS; X-ray photoelectron spectroscopy) 결과이고, 도 4는 본 발명의 실시예 1에 따른 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 (a) 원자힘 현미경(AFM; Atomic force microscopy) 결과, 이의 (c) 높이 프로파일, (b) 켈빈 프로브 힘 현미경(KPFM; Kelvin probe force microscope) 이미지 및 이의 접촉 전위차(CPD; contact potential difference) 프로파일이다.

[0083] 도 3 내지 도 4를 참조하면, 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이트는 SiO<sub>2</sub>/Si 기판 상에서 균일하게 성장한 것을 확인할 수 있고 전이금속 산화물 및 금속 할라이드염이 혼합된 제2 전구물질을 구비하는 제2 가열로의 가열 온도가 800 °C이고, 증착 시간이 7 분일 때, 대략 95 %의 아주 높은 커버리지를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이의 결과는 제조된 전이금속 디칼코게나이드 물질이 2H 상을 유

지하면서 높은 커버리지를 나타내는 우수한 결과이다. 또한, 제조된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트는 표면이 거칠지 않고 매끄러우며 플레이트의 전 영역에 대하여 균일한 두께를 갖는 것을 확인할 수 있다. 프로파일 스캔을 통해 단층의 전이금속 디칼코게나이드 플레이트가 대략 0.7 nm의 두께를 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한, 2층, 3층 및 다층으로 구성된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트는 각각 1.5 nm, 2.2 nm 및 6.5 nm의 두께로 형성되었다. 나아가, 단층의 전이금속 디칼코게나이드 플레이트와 Si/SiO<sub>2</sub> 기판 사이의 일함수 차이는 대략 0.1 V 이었다.

[0085] 도 5는 본 발명의 제조에 1에 따라 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이트에 대한 (a) 단층(1L), 2층(2L), 3층(3L) 및 다층(Multi-L)의 전이금속 디칼코게나이드 플레이트에 대한 라만 분석, 단층의 전이금속 디칼코게나이드 플레이트에 대한 (b)  $E_{2g}^1$  진동 모드( $251\text{cm}^{-1}$ )에서 라만 강도 매핑(Raman intensity mapping)이며, (c) 층수에 따른 전이금속 디칼코게나이드 플레이트에 대한 광발광 분광법(PL; Photoluminescence) 결과이고, (d) SiO<sub>2</sub> 기판에 대한 단층 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 광발광 강도 매핑(PL intensity mapping) 결과이다.

[0086] 도 5a 및 도 5b를 참조하면, 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드(WSe<sub>2</sub>) 플레이트는 라만 분석을 통해 2H상의 결정구조를 확인하였다. 라만 스펙트럼은 평면 내 진동모드( $E_{2g}^1$ )와 평면 외 진동모드( $A_{1g}$ )에 해당하는 약  $250\text{ cm}^{-1}$  및  $260\text{ cm}^{-1}$ 에서 뚜렷한 피크를 나타내었다. 한편, 층간 상호 작용모드( $B_{2g}^1$ )에서 약  $304\text{ cm}^{-1}$ 에서 피크가 관찰되었으며 이를 통해 단층(1L로 표기) 샘플에서는 약  $304\text{ cm}^{-1}$ 에서 피크가 관찰되지 않으나 다층(2L, 3L 및 Multi-L로 표기) 샘플에 대하여는 해당 피크가 확인되는 것을 알 수 있다. 라만 강도 매핑(Raman intensity mapping) 결과를 통해  $E_{2g}^1$  진동 모드( $251\text{cm}^{-1}$ )에서 단층 WSe<sub>2</sub> 플레이트에 대한 라만 강도 맵에서는 전이금속 디칼코게나이드 플레이트 전체 면적에 걸쳐 라만 강도가 균일하게 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

[0087] 도 5c 및 도 5d를 참조하면, 광발광(PL) 결과를 통해 전이금속 디칼코게나이드 단층(Monolayer로 표기) 피크에 대해서는 높은 강도를 보이는 반면 복수층(Bilayer 및 Multilayer로 표기) 피크에 대해서는 층수가 증가할수록 피크의 강도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. SiO<sub>2</sub> 기판 상의 0.7 nm 단층 전이금속 디칼코게나이드(WSe<sub>2</sub>)에 대해서 PL 매핑 결과 균일한 강도를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

[0089] 도 6은 본 발명의 제조에 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 (a) SiO<sub>2</sub>/WSe<sub>2</sub>/Pt 단면 층에 대한 고해상도 투과전자현미경(HRTEM; High resolution-transmission electron microscope) 및 (b) 이의 에너지 분산 X선 분석(EDS; Energy dispersive X-ray spectroscopy) 결과이다.

[0090] 도 6을 참조하면, 본 발명의 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 형성된 SiO<sub>2</sub> 기판에 성장한 WSe<sub>2</sub>의 두께는 약 3 nm인 것을 확인할 수 있으며, 또한 해당 박막은 2차원 물질로서 균일하고 평평한 박막이 형성되었으며 TEM-EDS 원소 매핑 분석에서 불순물이 검출되지 않은 것을 확인할 수 있다.

[0092] 도 7은 본 발명의 제조에 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 2 x 2 인치 기판을 사용하여 합성된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트의 광학 사진 및 광발광 분광법(PL) 측정에 사용된 25개 부위를 표시한 것이고, 도 8은 제조에 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 2 x 2 인치 기판을 사용하여 합성된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트가 성장된 기판 내 25개 부위에서 수집된 (a) 평면 내 진동모드( $E_{2g}^1$ )와 평면 외 진동모드( $A_{1g}$ )에 해당하는 약  $250\text{ cm}^{-1}$  및  $260\text{ cm}^{-1}$  라만 결과 및 (b) SiO<sub>2</sub> 기판(1.62 eV)의 광발광 분광법(PL) 결과이다.

[0093] 도 7 및 도 8을 참조하면, 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성된 전이금속 디칼코게나이드 플레이트가 성장된 기판 내 25개 부위 전부에서 WSe<sub>2</sub>과 일치하는 균일한 라만 및 광발광 분석 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 넓은 면적의 2 x 2 인치 기판을 사용하여도 기판 내 전면적에서 균일하고 품질이 고른 특성의 전이금속 디칼코게나이드 플레이트를 성장시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

- [0095] **실시예 1: 용융염 보조 열화학 기상 증착(CVD) 방법을 사용하여 제조된 WSe<sub>2</sub> 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자**
- [0096] 제조예 1의 방법으로 제조된 WSe<sub>2</sub>층이 성장된 웨이퍼 기판을 광감지층으로 사용하고, 이후 상기 기판 상에 금속 전극을 형성하기 위해 전자빔 증발법(e-beam evaporator)을 사용하여 니켈(Ni) 50 nm를 증착하였다. 이로써 서로 이격되고 WSe<sub>2</sub> 상에 적층된 복수개의 전극층, 즉 WSe<sub>2</sub>/Ni계면을 제조하여 용융염 보조 열화학 기상 증착(CVD) 방법을 사용하여 제조된 WSe<sub>2</sub> 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자를 제조하였다.
- [0098] **실험예 2: 소자의 전기적 특성 측정**
- [0099] 본 발명의 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 전기적 특성은 주변 조건의 암실에서 프로브 시스템(4200A-SCs, Keithley) 반도체 파라미터 분석기를 사용하여 측정되었다. 라만 스펙트럼은 532 nm 레이저와 6.1 mW의 입사 레이저 파워가 있는 라만 분광기(DXR2xi, Thermo Fisher Scientific)를 사용하여 주변 압력 하에서 실온에서 얻었고 50 내지 3500 cm<sup>-1</sup> 범위의 스펙트럼을 얻었다. 광게이팅 소자 및 켈빈 프로브 이미지의 30 μm x 30 μm 영역의 지형은 비접촉 및 SKPM(Scanning Kelvin Probe Microscopy) 모드에서 원자력 현미경(MFD-3D Origin AFM, Oxford Instruments)을 사용하여 수집되었다. 푸리에변환 적외선분광기(FT-IR; Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 스펙트럼은 실온에서 FR-IR 분광기(Thermo Fisher(IS50))를 사용하여 얻었다. X선 광전자 분광법(XPS) 분석은 XPS ThermoFisher Nexsa G2 표면 분석 시스템을 사용하였다. 광발광 분광기는 PL(Nanobase) 기기를 사용하여 실온에서 얻었고 단면 높이 프로파일은 TEM FEI Themis-Z 기기를 사용하여 측정되었다.
- [0101] 도 9는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자를 일반적인 백-게이트 전이금속 디칼코게나이드 전계 효과 트랜지스터(back-gated FET)로 사용한 경우의 (a) 모식도 및 회로 도식도, (b) 일정한 V<sub>DS</sub>(1 V)에서 V<sub>BG</sub>(-50 V ~ +50 V) 스위프(swipe)하여 측정된 p형 전송 특성 및 (c) 서로 다른 게이트 바이어스에서 -10 V에서 +10 V로 스위프(swipe)하는 출력 I-V 결과이다.
- [0102] 도 10은 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자에 405 nm 파장의 광 전력을 인가한 상태의 (a) 모식도 및 회로 도식도, (b) 서로 다른 광 게이트 전력 하에서 전송 특성 및 (c) 임계 광 전력 하에서 -10 V에서 +10 V까지 V<sub>DS</sub> 스위프(swipe) 하에서 0.2~1.0 mW 범위의 다양한 광 게이트 전력 하에서 출력 I-V 결과이다.
- [0103] 도 9 내지 10을 참조하면, 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자는 전기 게이팅 및 라이트(light) 게이팅 시 FET 및 LGT 모드 둘 다에서 구동이 가능한 것을 확인할 수 있다. 도 9를 참조하면, 일정한 V<sub>DS</sub> = 1 V에서 백 게이트 스와이프 V<sub>BG</sub>를 -50 V에서 +50 V까지 사용하는 WSe<sub>2</sub> 기반 백-게이트 트랜지스터 장치에서 p형 전송 특성이 측정되었다. FET 장치는 상단 게이트 전압이 92.35 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>이고 양극성 거동을 갖는 p형 우세 구동 특성의 홀 이동성을 나타낸다. 도 10을 참조하면, 동일한 소자에 대해서 같이 광 전력에 의해 광 게이팅될 수 있다. 광 게이트가 조명됨에 따라 광-생성 전하 캐리어(photo-generated charge carriers)는 광-민감 영역(light-sensitive region)의 전도도를 변조할 수 있으며, 이는 차례로 트랜지스터의 전기적 거동을 변조하게 된다. 광-게이트 트랜지스터의 출력 특성은 출력 전류 또는 전압과 입력 광 강도, 파장 또는 기타 관련 파라미터들에 의해 조절될 수 있다. 광-게이트된 트랜지스터는 높은 감도 및 빠른 응답 시간을 나타내며, 다른 출력의 광 전력은 다중 'ON' 상태를 제공할 수 있다. 따라서, 본 발명의 소자는 전기 신호 처리와 광 감지 모두가 가능한 장치로 구동 가능한 통합 소자로서 사용될 수 있다.
- [0105] 도 11은 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 임계 광 전력 하에서 광 조사의 펄스 변조 하에서 동적 구동 모드, (b) 전기 게이팅과 라이트(light) 게이팅을 동시에 입력하는 단일 디바이스 기반 로직 동작 및 (c) 임계 광 파워에 대한 뇌에서 영감을 받은 시냅스 기능 모드이다.
- [0106] 도 11을 참조하면, 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자(LGT)는 광 반응 및 시냅스 후 전류의 발생을 유도

하는 능력을 나타낼 수 있다. LGT 소자에서의 시냅스 가중치는 인가된 자극의 파워, 지속 시간 및 주파수를 포함한 다양한 파라미터들에 복잡하게 연결된다. 파워와 관련하여, 상이한 상태들 사이의 임의의 전송이 발생하기 위해, 특정 임계 에너지 장벽을 초과하는 것이 중요한데, 이 현상은 신호 강도가 연속적인 축삭(axons)들 사이의 시냅스들의 형성을 가능하게 하기 위해 특정 임계치를 초과해야 하는 생물학적 뉴런에서의 현상과 유사하다. 마찬가지로, 고체 상태 시냅스 디바이스에서, 자극이 본질적으로 전기적, 광학적, 또는 화학적인지에 관계없이 효과적인 작동 및 상태 전이를 위해 임계치를 초과하는 강도를 나타내야 한다. 광학 자극이 존재하지 않을 때, 장치는 응답하지 않고 남아 관찰 가능한 출력을 초래하지 않는다. 그러나 임계 값 아래로 떨어지는 비교적 낮은 강도의 광학 자극이 적용될 때, 그것은 캐리어 기반 광 응답을 트리거(trigger)하며, 이러한 응답은 검출 가능하지만 상당한 시냅스 가중치를 설정하기에 불충분하다. 반면, 자극 강도가 임계 장벽( $P_{th}$ 로 표시)을 초과할 때, 변환이 발생한다. 일반적인 광 응답은 0이 아닌 시냅스 가중치를 특징으로 하는 시냅스 응답으로 진화한다. 이러한 전이는 단기 메모리와 유사한 정보를 저장하고 처리하는 장치의 능력을 의미한다. 특히, 레이저 파워 레벨이 0.2 내지 0.8 mW 범위 내에서 변화할 때(도 10을 다시 참조), LGT 소자는 0의 시냅스 가중치를 나타내며, 각각 각각과 일치하는 거동을 나타낸다. 그러나, 레이저 자극 강도가 1 mW를 초과할 때, 그것은 0이 아닌 시냅스 가중치로 완료되어, 각각 거동에서 단기 메모리와 유사한 상태로의 전이를 겪는다. 이러한 기능의 변화는 LGT가 정보 처리 및 저장에 탁월할 수 있는, 특히 감각 메모리 시스템의 맥락에서 광검출기 및 전자 시냅스 장치 모두로 응용될 수 있다.

[0108] 도 12는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 405 nm 파장 및 0.2 ~ 0.8 mW/cm<sup>2</sup> 전력의 레이저 소스에서 발생하는 동적 광 응답 결과, (b) 1.4 Hz ~ 0.1 Hz 범위의 작동 주파수 스펙트럼에 걸친 광 응답 결과 및 (c) 응답 특성이다.

[0109] 도 12를 참조하면, WSe<sub>2</sub> LGT 장치의 빛 유도 동적 구동 특성은 어두운 조건과 레이저(405 nm) 조명에서 동적 광 반응을 평가하였다. 도 12a는 광 소스 전력 범위에 걸쳐 게이트 전압이 0일 때 시간적 광 반응이 0.2 mW에서 0.8 mW에 걸쳐 표시된다. 측정된 응답은 각 전력 수준에서 여러 번의 연속적인 ON/OFF 사이클에 대해 일관되고 재현 가능한 상태로 유지되었다. 이러한 안정성과 반복성은 LGT 동적 응답의 강력한 성능을 나타내며, 높은 감도를 더욱 강조합니다. 또한 LGT 장치는 빠른 1.4Hz에서 낮은 0.1Hz에 이르는 광범위한 작동 주파수 스펙트럼에서 탁월한 광 응답성을 보였다. 다양한 전력 수준과 주파수에서 관찰된 놀라운 광검출 성능은 다양한 광통신 장치에 적합하다는 것을 의미한다. 각 광신호 주파수의 상승 시간은 약 60 ms인 반면 감쇠 시간은 약 50 ms로, 빠른 응답 특성을 나타낸다. 이는 광범위한 작동 주파수에서 높은 감도, 사이클링 안정성 및 적용 가능성을 특징으로 하는 LGT 기반 광검출 소자의 뛰어난 성능을 나타낸다. 이러한 속성으로 인해 다양한 광통신 및 감지 소자로 응용될 수 있다.

[0111] 도 13는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 레이저의 각 전력에 대한 소자의 응답성 및 (b) 채널을 가로지르는 각각의 바이어스에 대한 특정 검출성 분석이다.

[0112] 도 13을 참조하면, 반응성(R)은 입사된 광력에 대한 검출기의 민감도를 정량화하는 중요한 매개변수이다. 검출기의 활성 표면에 충돌하는 광력( $P_0$ )의 양에 대한 검출기 내에서 흡수된 광자의 결과로 발생하는 광전류( $I_{ph}$ )의 비율로 정확하게 계산된다. 이 매개변수는 들어오는 광자를 전류로 변환하는 광검출기의 성능 특성에 대한 귀중한 통찰력을 제공하는 기본 척도이다. 응답성(R; Responsivity) 및 비검출성( $D^*$ ; Detectivity)은 LGT 장치의 광검출기 성능을 평가하기 위한 파라미터로 하기 식 1 및 2로 표시될 수 있다.

[0113] [식 1]

$$R(\lambda) = EQE \frac{\lambda q}{hc} = \frac{I_{ph}}{P_0}$$

[0114]

[0115] [식 2]

$$D^* = \frac{R(\lambda)}{\sqrt{2qJ_{dark}}} [cmHz^{1/2} W^{-1}]$$

[0116]

[0117] 여기서,  $\lambda$ 는 파장,  $q$ 는 전자의 전하,  $h$ 는 플랑크 상수,  $c$ 는 진공 중의 빛의 속도이고,  $D^*$  비검출도,  $J_{dark}$ 는 암 전류 밀도이다.

[0118]

본 발명의 광게이팅 소자는 응답성(Responsivity) 및 비검출성(Detectivity) 측면에서 특히 0.2 mW 광전원을 사용할 때 가장 높았으며 이때 각각의 값은 응답성이 약 40  $\mu A/W$  및 비검출성이 약  $3.16 \times 10^9 cmHz^{0.5} W^{-1}$ 이다. 그러나 이러한 성능 메트릭은 광학 전력이 이 임계값을 초과하여 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타난다. 이러한 응답성 및 비검출성의 감소를 통해 광 게이팅 소자 내에 특정 트랩 상태가 존재함을 알 수 있다. 이러한 이상적인 동작과의 편차는 광 게이팅 소자의 트랩 상태 및 전하 캐리어 추출의 제한과 같은 비 이상적 특성이 존재함을 나타낸다.

[0120]

도 14는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자를 사용한 트랜지스터 로직에 관한 해석이다.

[0121]

도 14a를 참조하면, 전력 5 mW의 광 게이트를 IN-1로, +5 V의 전기 게이트를 IN-2로 사용하는 일련의 입력을 시연하고 AND 로직을 출력할 수 있다. 도 14b를 참조하면, 전력 5 mW의 광 게이트를 IN-1로, -5 V의 전기 게이트를 IN-2로 직렬 출력을 제공하는 경우 논리를 시연하고 OR 로직을 출력할 수 있다. 도 14c 및 도 14d를 참조하면, LGT와 증폭 응답은 단일 A와 신호 B의 응답을 합산하여  $A + B$ 가 생성되는 합산 동작을 출력할 수 있다. 여기서 전력 5 mW의 레이저 광 게이트는 IN-A로 사용되고 전력 1 mW의 LED 게이트는 IN-B로 사용되었다. 입력 데이터는 검은색/파란색으로 표시하고, 장치의 출력 로직 기능은 빨간색으로 표시되었다.

[0123]

도 15는 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 백 게이트 전기장의 포지티브 바이어스(positive bias) 하에서 펄스 수에 따른 흥분성 게이팅 후 거동(excitatory postsynaptic behavior), (b) 백 게이트 전기장의 네거티브 바이어스(negative bias) 하에서의 펄스 수에 따른 억제성 게이팅 후 거동(inhibitory postsynaptic behavior) 및 (c) 효율적인 전력 소비에 대한 게이트 바이어스 필드(gated bias field)가 작고 없는 경우 최적화된 EPSC(excitatory postsynaptic current) 및 IPSC(inhibitory postsynaptic current) 특성 결과이다.

[0124]

도 15a 내지 도 15c를 참조하면, 소스 주파수 1Hz에서 작동하는 1 mW의 전력을 가진 405 nm 파장의 레이저 자극을 인가하여 레이저 게이팅 파워(laser gating power)가 임계 전압(threshold power)을 초과할 때 광게이팅 소자의 시냅틱 특성(synaptic characteristics)을 확인할 수 있다. 소스-드레인 전압( $V_{DS}$ )은 1.0 V의 일정한 값으로 유지된 반면, 백-게이트 전압( $V_{BG}$ )은 흥분성 게이팅 후 전류(EPSC)에 대해 10 V, 20 V 및 30 V에 걸쳐 변경되었다. 억제성 게이팅 후 전류(IPSC)의 경우  $V_{BG}$ 는 -10 V, -20 V 및 -30 V로 조정되었다.  $WSe_2$  기반의 광감지층은 p형 반도체 특성으로 인해 백 게이트 전위가 증가하면 게이팅 가중치 전송 강도가 감소한다. 본 발명에 따른 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자는 백-게이트 필드의 극성과 크기 모두의 영향을 받는 펄스 자극 기반 학습(도 15a) 및 망각(도 15b) 역학에 따라 EPSC 및 IPSC 동작의 점진적인 진행을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 특히, 백-게이트 필드가 클수록 EPSC와 IPSC 모두에 대한 게이팅 응답이 조기에 포화되는 것으로 미루어보아, 본 발명에 따른 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자는 백-게이트 필드가 없는 경우에도 학습 동작을 나타낼 수 있는 능력을 보여주며, 도 15c와 같이  $V_{BG} = -5$  V와 같이  $V_{BG}$ 에 적용되는 매우 작은 음의 극성의 망각 동작을 표시하도록 조정할 수 있다.  $V_{BG} = 0$  V에서는 광범위한 컨덕턴스 상태가 관찰되어 포화에 도달할 때까지 확장된다. 이는 더 낮은 전력 수준에서 소자를 효율적으로 작동할 수 있으며 에너지 소비가 감소된 시냅틱 동작으로 구동됨을 보여줄 수 있다.

[0126]

도 16은 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 펄스 지속 시간에 따른 EPDC 및 IPSC 특성 결과 및 (b) 소자의 PPF(Paired pulse facilitation) 및 PPD(Paired pulse depression) 특성 결과이고, 도 17은 본 발명의 실시예 1에 따른 용융염 보조 열화학 기상 증착 방법으로 합성되는 전이금속 디칼코게나이드 플레이크를 광감지

층으로 포함하는 광게이팅 소자의 (a) 최적화된 레이저 펄스를 사용하여 다양한 게이트 전기장 하에서 정규화된 학습(Potentiation) 및 망각(Depression) 결과 및 (b) 비선형성 분석을 위한 정규화된 학습(Potentiation) 및 망각(Depression) 결과이다.

[0127] 도 16 및 도 17을 참조하면, 펄스 레이저 자극에 의해 유도된 흥분성 게이팅 후 전류(EPSC)와 억제성 게이팅 후 전류(IPSC)는 각각 10 V 및 -10 V의 일정한 백게이트 전압( $V_{BG}$ )에서 수행되었으며 레이저 펄스 지속 시간이 50 ms에서 550 ms까지 증가함에 따라 EPSC 및 IPSC 응답은 점진적인 포화 추세를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 동작은 신경망 내 정보 처리에서 중요한 역할을 하는 생물학적 뉴런에서 관찰 가능한 단기 촉진(PPF; Paired pulse facilitation) 및 단기 억제(PPD; Paired pulse depression) 메커니즘과 유사한 것으로, 특히 두 번째 레이저 펄스에 대한 반응에 의해 유도된 EPSC는 첫 번째 펄스에 대한 반응보다 더 큰 것을 확인할 수 있으며, 반대로 IPSC는 첫 번째 레이저 펄스에 비해 두 번째 레이저 펄스에 대한 반응이 감소한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 생물학적 시스템에서 시냅틱 반응으로 알려진 특성과 일치하며, 시냅틱 특성 및 이의 기능에 대한 적합성을 나타내는 결과로 이해될 수 있다.

[0129] 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.

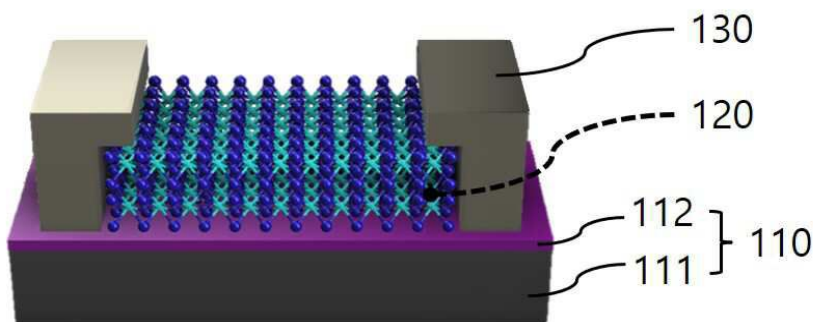
### 부호의 설명

- [0130] 100: 광게이팅 소자  
110: 기판  
111: 실리콘  
112: 절연층  
120: 광감지층  
130: 전극

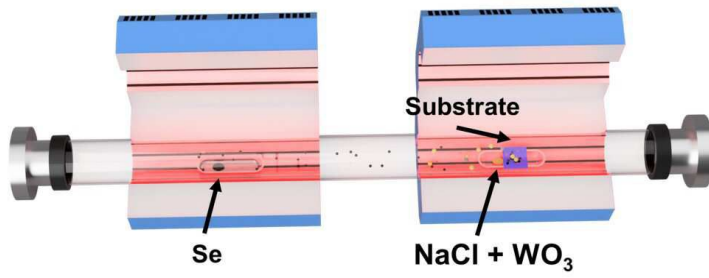
### 도면

#### 도면1

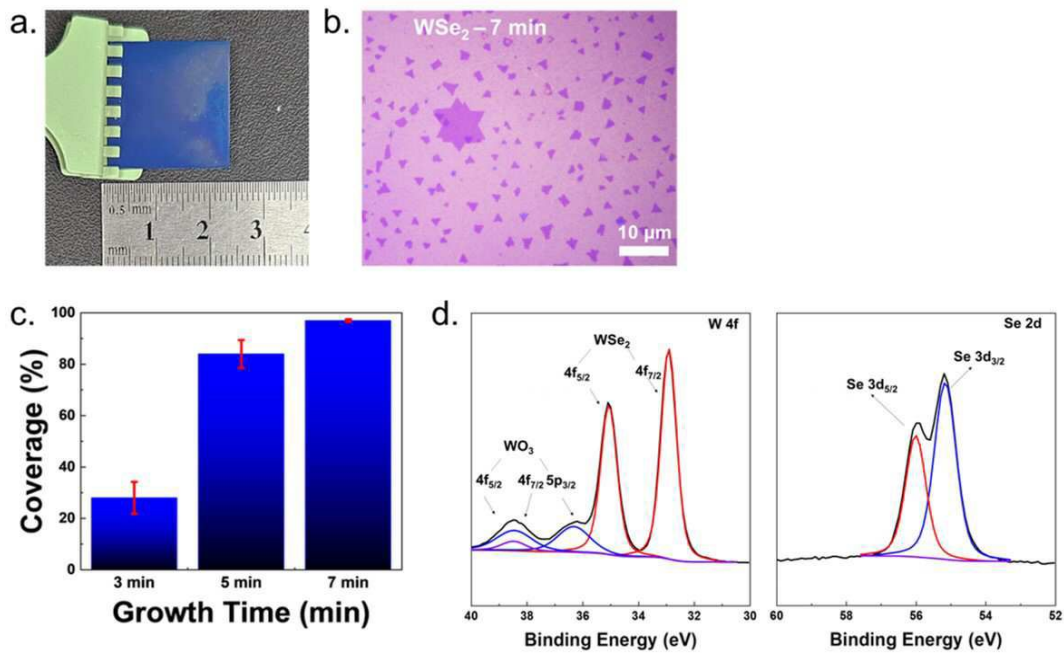
100 :



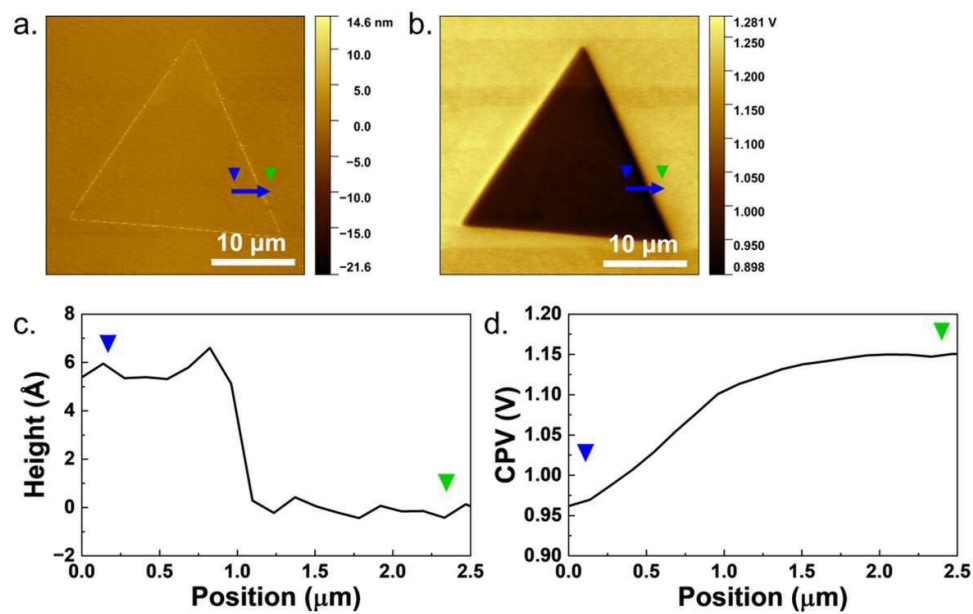
도면2



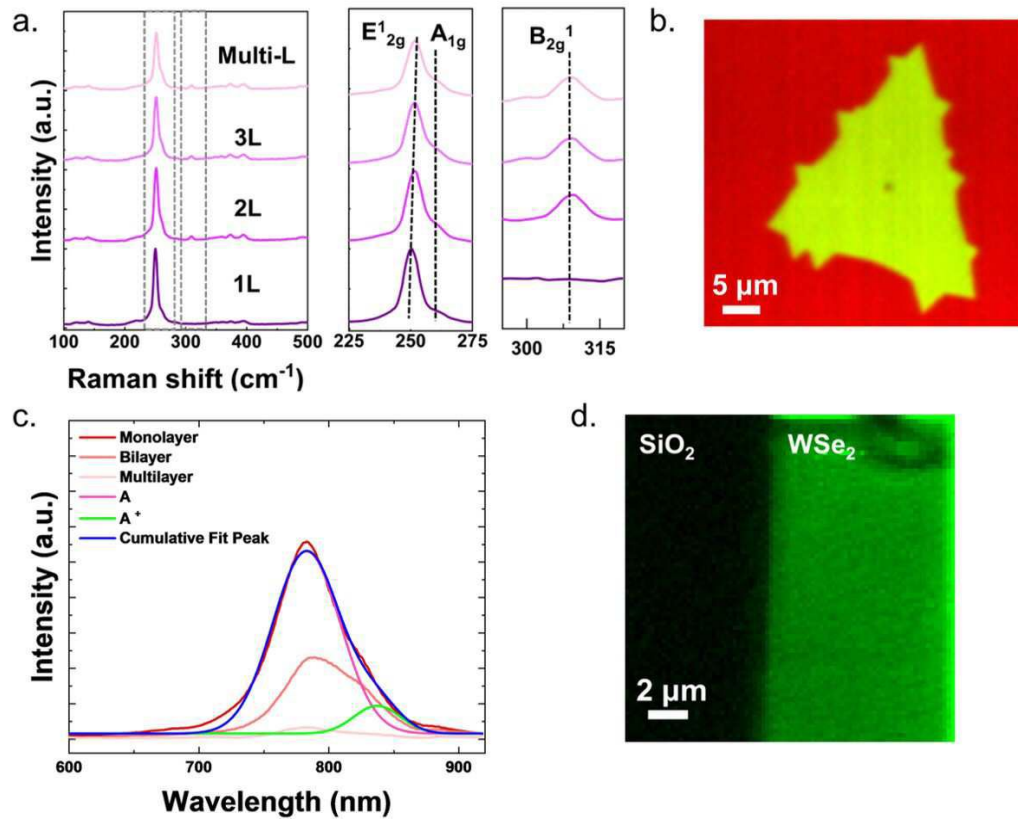
도면3



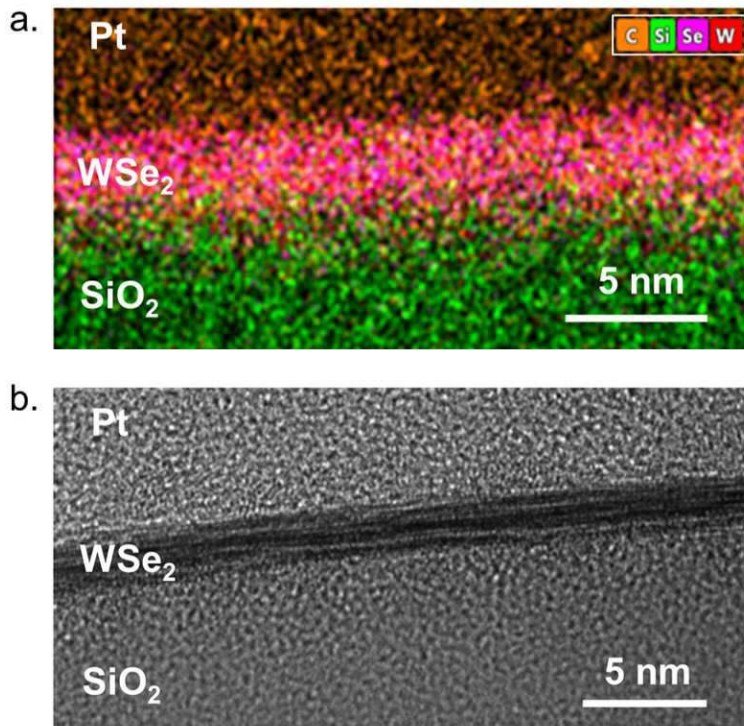
도면4



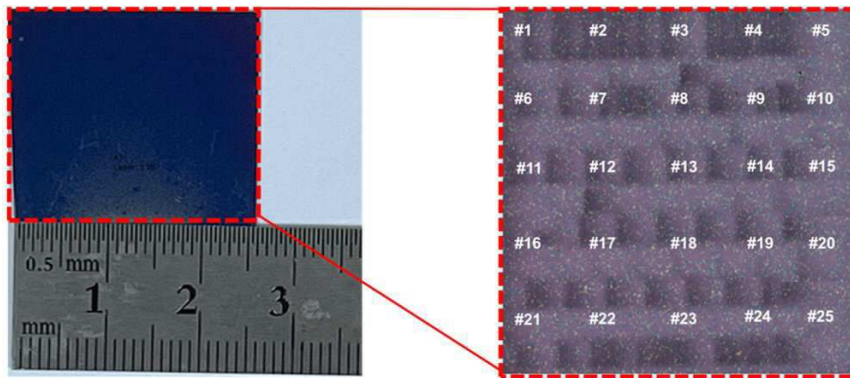
도면5



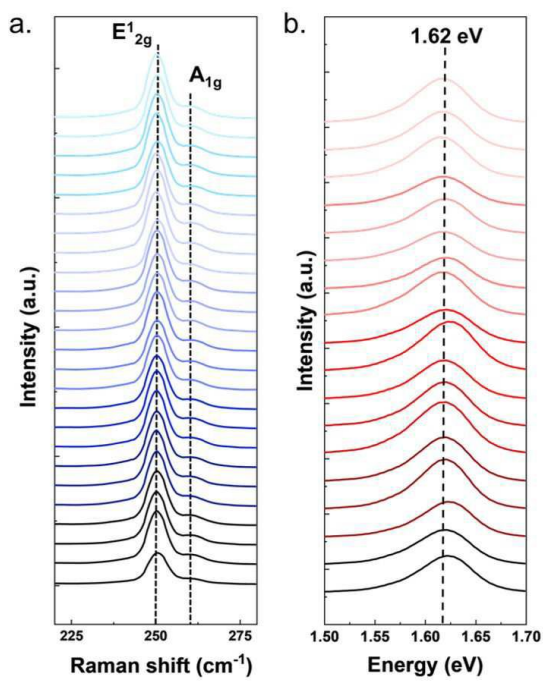
도면6



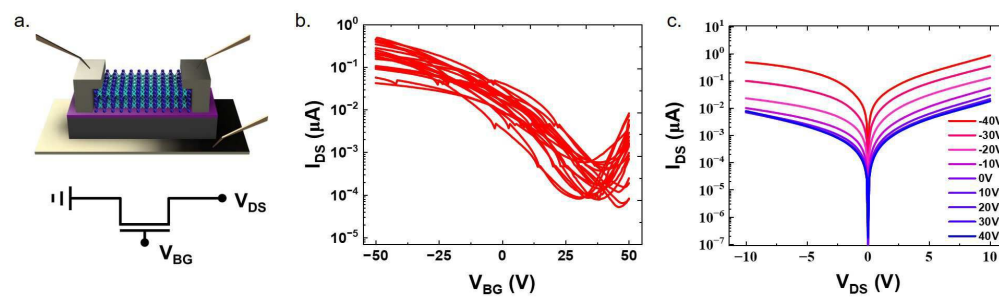
도면7



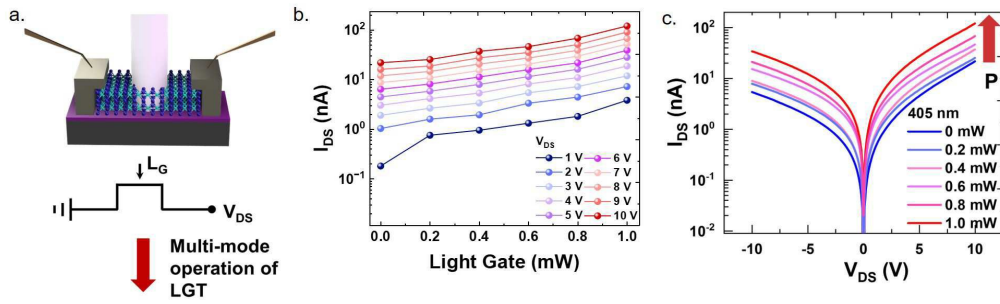
도면8



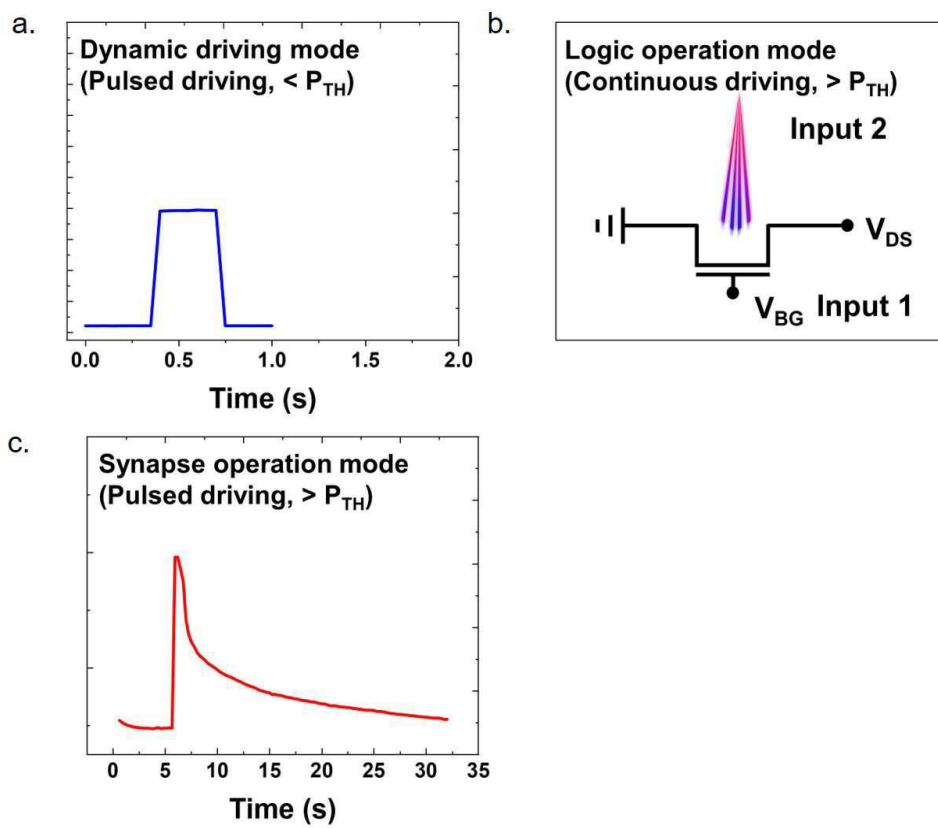
도면9



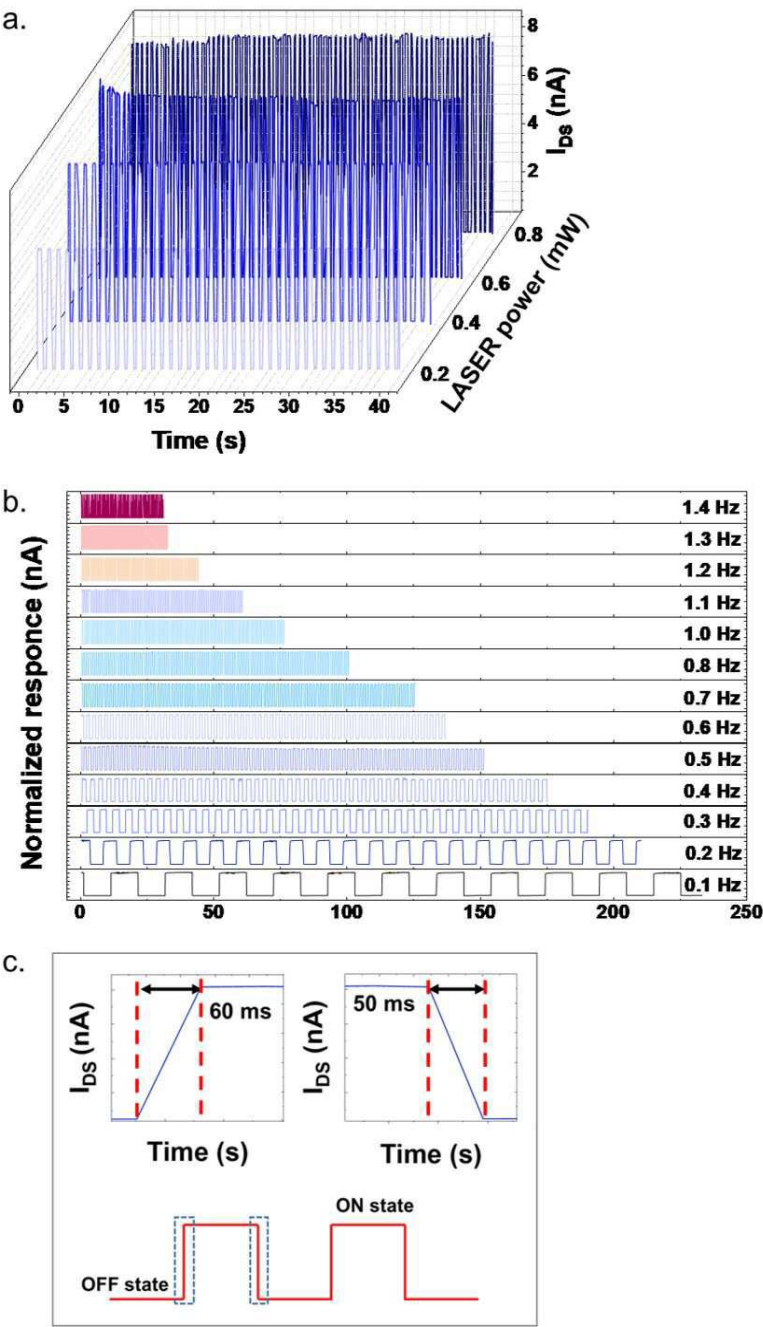
도면10



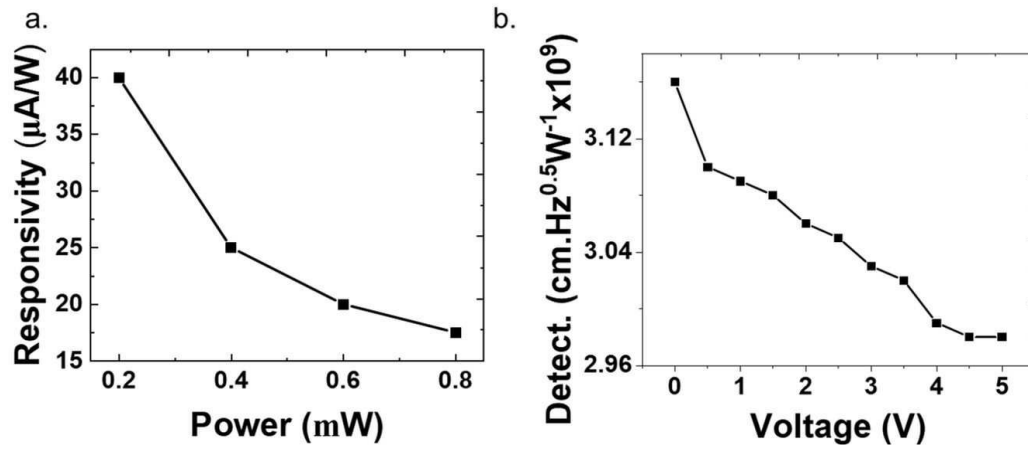
도면11



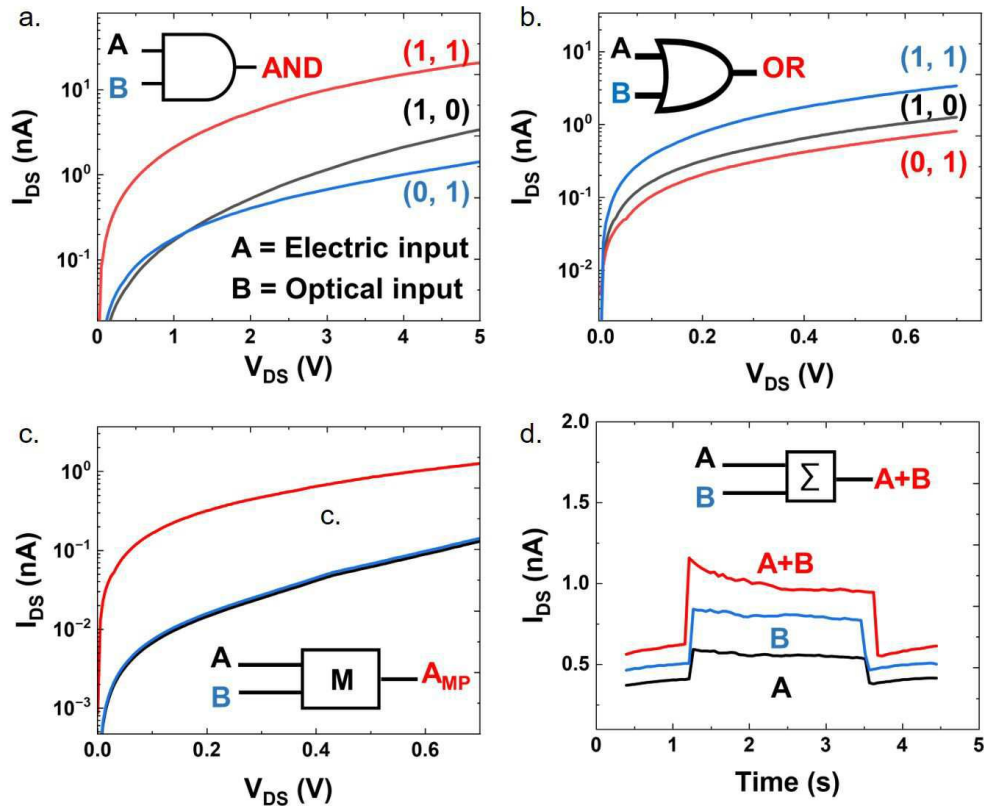
도면12



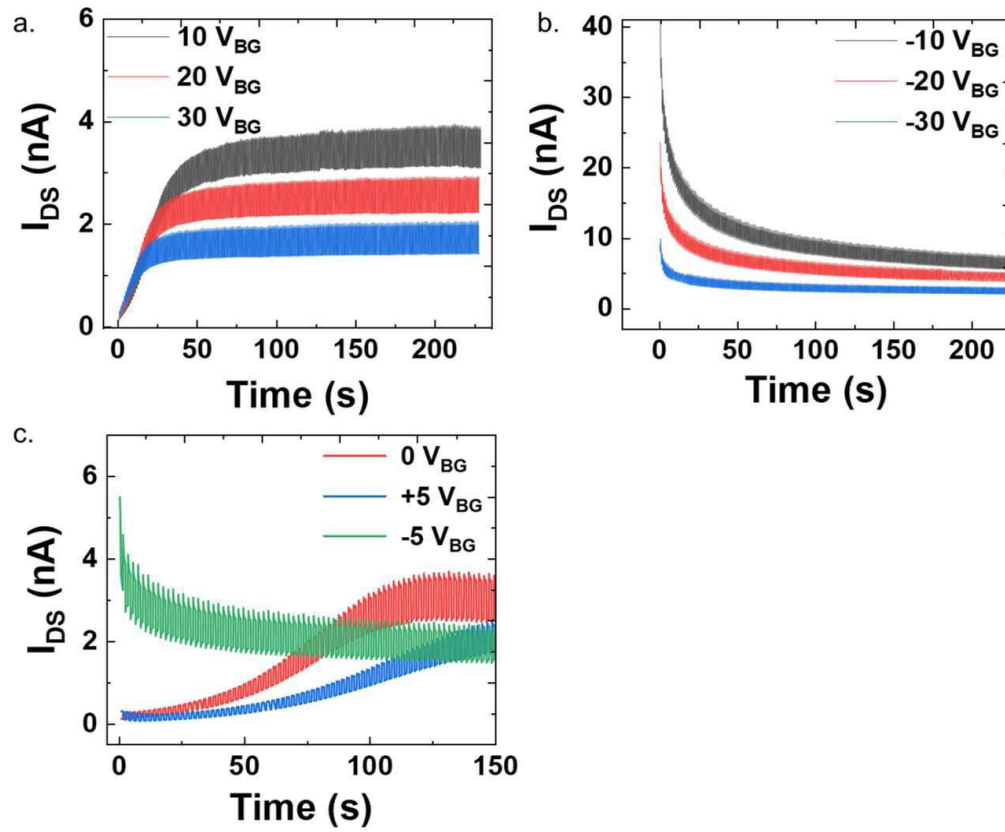
도면13



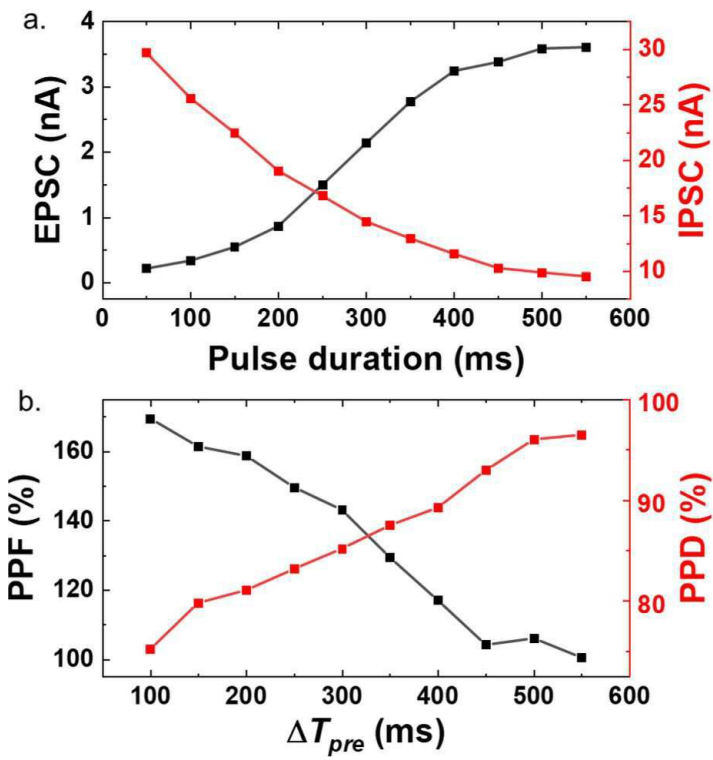
도면14



도면15



도면16



도면17

