



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2025년05월02일
(11) 등록번호 10-2802118
(24) 등록일자 2025년04월24일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H10F 30/222 (2025.01) G06N 3/063 (2023.01)
H10F 71/00 (2025.01)
- (52) CPC특허분류
H10F 30/222 (2025.01)
G06N 3/063 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2024-0061496
(22) 출원일자 2024년05월09일
심사청구일자 2024년05월09일
- (56) 선행기술조사문헌
KR1020230095532 A*
KR1020240124498 A
Awayiz, Muntadher Talib, and Evan T. Salim.
"Photo voltaic properties of Ag₂O/Si
heterojunction device: effect of substrate
conductivity." Materials Science Forum. Vol.
1002. Trans Tech Publications L*
Yu, Jingjing, et al. "High-performance
visible-blind ultraviolet photodetector based
on IGZO TFT coupled with p-n heterojunction."
ACS applied materials& interfaces 10.9
(2018): 8102-8109. 1부.*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

- (73) 특허권자
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경
희대학교 국제캠퍼스내)
- (72) 발명자
강성준
서울특별시 서초구 반포대로 275, 115동 2601호
(반포동, 래미안퍼스티지아파트)
- 정준형
경기도 수원시 영통구 삼성로 11, 209동 802호 (신
동, 래미안 영통마크원 2단지)
- (74) 대리인
김종선, 이형석

전체 청구항 수 : 총 9 항

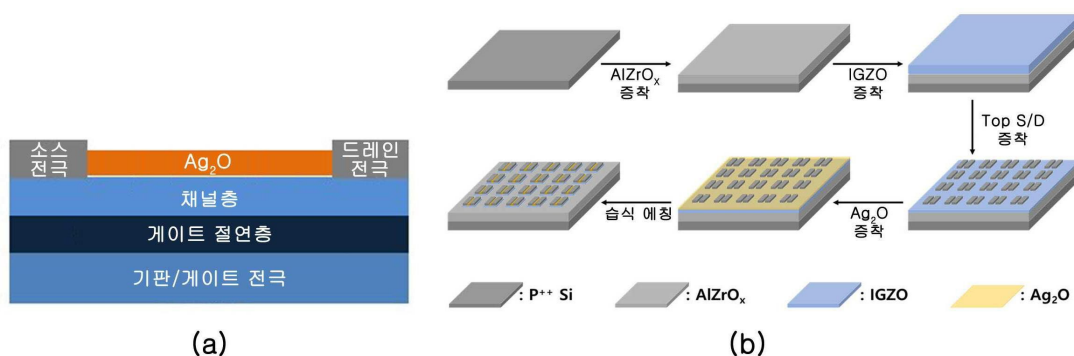
심사관 : 전병식

(54) 발명의 명칭 광전자 시냅스 트랜지스터 및 이의 제조방법

(57) 요약

본 발명은 바텀 게이트 구조의 기관; 상기 기관 상에 형성된 게이트 절연층; 상기 게이트 절연층 상에 형성된 고투명 산화물 채널층; 상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 이격하여 형성된 소스 전극 및 드레인 전극; 및 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 형성된 금속 산화물층을 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터를 개시한다. 본 발명에 의하면 대기 중 안정성을 지님과 동시에 자외선에서 적외선까지의 넓은 파장 영역대에서 고감도·고효율의 광응답 특성 및 높은 컨덕턴스 성능을 나타내는 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조할 수 있다.

대표도



(52) CPC특허분류

H10F 71/00 (2025.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345350438
과제번호	2020R1A6A1A03048004
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	대학중점연구소
연구과제명	미래형 친환경 디스플레이 기술 연구
과제수행기관명	경희대학교
연구기간	2020.06.01 ~ 2029.05.31

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

광전자 시냅스 트랜지스터에 있어서,

바텀 게이트 구조의 기관;

상기 기관 상에 형성된 게이트 절연층;

상기 게이트 절연층 상에 형성된 고투명 산화물 채널층;

상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 이격하여 형성된 소스 전극 및 드레인 전극; 및

상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 형성된 금속 산화물층;을 포함하고,

상기 게이트 절연층은, $AlZrO_x$, Al_2O_3 , $AlHfO_x$, ZrO_2 및 HfO_2 으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상의 물질을 포함하고,

상기 금속 산화물층은, 산화 은(Ag_2O)을 포함하는 것을 특징으로 하고,

상기 광전자 시냅스 트랜지스터는, 상기 고투명 산화물 채널층 및 상기 금속 산화물 층 사이에 형성된 상호 확산 층을 포함하는,

광전자 시냅스 트랜지스터.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 고투명 산화물 채널층은, ZnO , IZO , $IGZO$, ZTO , $IZATO$, $GIGO$ 및 $ZnON$ 로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 광전자 시냅스 트랜지스터는, 자외선 내지 적외선 파장 범위에서 광 반응을 나타내는, 광전자 시냅스 트랜지스터.

청구항 4

광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법에 있어서,

바텀 게이트 구조의 기관 상에 게이트 절연층을 형성하는 단계;

상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계;

상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 소스 전극 및 드레인 전극을 이격하여 형성하는 단계; 및

상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 금속 산화물 전구체 용액을 코팅하여 금속산화물층을 형성하는 단계;를 포함하고,

상기 게이트 절연층은, $AlZrO_x$, Al_2O_3 , $AlHfO_x$, ZrO_2 및 HfO_2 으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상의 물질을 포함하고,

상기 금속 산화물층은, 산화 은(Ag_2O)을 포함하는 것을 특징으로 하고,

상기 광전자 시냅스 트랜지스터는, 상기 고투명 산화물 채널층 및 상기 금속 산화물 층 사이에 형성된 상호 확산

산 층을 포함하는,
광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,
상기 고투명 산화물 용액은, ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO 및 ZnON로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

청구항 6

제4항에 있어서,
상기 고투명 산화물 용액은, IGZO 용액인, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

청구항 7

제4항에 있어서,
상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계는,
3000 내지 5000 rpm에서 10초 내지 30 초 간 수행되는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

청구항 8

제4항에 있어서,
상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계는,
어닐링을 수행하는 단계를 더 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,
상기 어닐링은, 300 내지 400 °C에서 30 분 내지 2 시간 동안 수행되는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

청구항 10

삭제

청구항 11

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 광전자 시냅스 트랜지스터 및 이의 제조방법에 관한 것으로, 보다 구체적으로, 간단한 용액공정을 통해 좁은 밴드갭을 가지는 산화 은을 고투명 산화물 반도체와 이중접합시킴으로써 자외선에서 적외선까지의 넓은 파장 영역대에서 광 반응 및 높은 컨덕턴스 성능을 나타내는 광전자 시냅스 트랜지스터 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 광 융합기술은, 차세대 기술로 대두되고 있는 웨어러블 기기, 스마트 전자소자 등과 함께 4 차 산업혁명 시대에 상품의 부가가치를 획기적으로 높이고, 신제품 및 서비스를 창출할 수 있는 핵심기술 중 하나로 주목받고 있다. 이러한 광 융합기술의 주요 분야로는 광 트랜지스터, LED, 광학렌즈, 광학설계, 광전자 뉴로모픽 소자 등이 있다.

[0003] 광전자 뉴로모픽 소자는 광 자극을 입력 신호로 사용하여 초고속 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템뿐만 아니라 시각적 사물 인식을 위한 생물학적 기능을 모사하는 이미지 인식 기술을 구현할 수 있다. 이러한 광전자 뉴로모픽 소자의 구현을 위해 산화물 반도체 기반의 광전자 뉴로모픽 소자는 파장 수용체 및 시각 피질을 모두 아우르는 인간의 복잡한 시각 시냅스 기능을 모방하기 위해 연구되고 있다. 특히, 광 트랜지스터, 광 다이오드, 광 레지스터 등을 포함한 광 검출기에 관한 연구에 상당한 관심이 집중되어 왔다. 이에 더하여, 인공지능, 사물인터넷 등의 전자 산업이 비약적으로 발전하면서 광 시냅스 소자의 정보 처리를 위한 입력 광신호의 양이 크게 증가했다. 이러한 입력 신호의 급증은 기존의 폰 노이만 구조 내에서 계산의 복잡성을 야기했다. 이에 따라, 광 수용체 및 광 시냅스의 기능을 동시에 모방하면서도, 대량의 광 데이터를 효율적으로 처리하기 위해 넓은 광 파장 영역대에서 광 특성을 보이면서도 높은 컨덕턴스 성능을 나타내는 광 뉴로모픽 소자의 개발이 요구되고 있다.

[0004] 산업이 발전함에 따라 로봇이나 자율주행 자동차와 같은 산업에서 활용되기 위해서는 적외선 영역까지 4 색 시각 시스템을 모방할 수 있어야 한다. 그러나 수많은 산화물 반도체는 넓은 밴드갭 특성으로 인해 자외선 영역에서 소자의 광응답 범위가 제한되는 문제가 있다. 이에 따라, 광응답 범위를 넓히기 위하여 대부분 결함 상태를 인위적으로 생성하는 데 초점을 맞추어 연구가 진행되었지만, 이는 자외선부터 가시광선 영역까지 4 색 시각계를 모방하는 결과를 낳았다. 이에 따라 좁은 밴드갭의 저차원 물질이 소재로 채택되고 있지만, 복잡한 증착 공정이나 대기 중에 존재하는 수분 및 산소에 취약한 특성 등으로 인해 여전히 극복해야하는 문제가 남아있다.

[0005] 따라서, 간단한 용액공정을 통해 좁은 밴드갭을 가지는 산화 은을 고투명 산화물 반도체와 이종접합시킴으로써 대기 중 안정성을 지님과 동시에 자외선에서 적외선까지의 넓은 파장 영역대에서 고감도·고효율의 광응답 특성 및 높은 컨덕턴스 성능을 나타내는 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조할 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0006] (비특허문헌 0001) 산화물 이종접합 기반 차세대 광트랜지스터 관련 연구 동향(한국전기전자재료학회, 2020.10.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 전술한 종래 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 간단한 용액공정을 통해 좁은 밴드갭을 가지는 산화 은을 고투명 산화물 반도체와 이종접합시킴으로써 대기 중 안정성을 지님과 동시에 자외선에서 적외선까지의 넓은 파장 영역대에서 고감도·고효율의 광응답 특성 및 높은 컨덕턴스 성능을 나타내는 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0008] 상술한 기술적 과제를 달성하기 위하여, 본 발명은 바텀 게이트 구조의 기판; 상기 기판 상에 형성된 게이트 절연층; 상기 게이트 절연층 상에 형성된 고투명 산화물 채널층; 상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 이격하여 형성된 소스 전극 및 드레인 전극; 및 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 형성된 금속 산화물층을 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터를 개시한다.

[0009] 여기서, 상기 고투명 산화물 채널층은, ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO 및 ZnON로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있다.

[0010] 여기서, 상기 금속 산화물층은, 산화 동, 산화 은, 산화 루테튬 및 산화 이리듐으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있다.

[0011] 여기서, 상기 금속 산화물층은, 산화 은(Ag₂O)을 포함하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0012] 여기서, 상기 광전자 시냅스 트랜지스터는, 자외선 내지 적외선 파장 범위에서 광 반응을 나타낼 수 있다.

[0013] 한편, 상술한 기술적 과제를 달성하기 위하여 본 발명은 바텀 게이트 구조의 기판 상에 게이트 절연층을 형성하는 단계; 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계; 상

기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 소스 전극 및 드레인 전극을 이격하여 형성하는 단계; 및 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 금속 산화물 용액을 코팅하여 금속산화물층을 형성하는 단계;를 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법을 추가로 개시한다.

- [0014] 여기서, 상기 고투명 산화물 용액은, ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO 및 ZnON로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있다.
- [0015] 여기서, 상기 고투명 산화물 용액은, IGZO 용액일 수 있다.
- [0016] 여기서, 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계는, 3000 내지 5000 rpm에서 10 초 내지 30 초 간 수행될 수 있다.
- [0017] 여기서, 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계는, 어닐링을 수행하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0018] 여기서, 상기 어닐링은, 300 내지 400 °C에서 30 분 내지 2 시간 동안 수행될 수 있다.

발명의 효과

- [0019] 개시된 기술은 다음의 효과를 가질 수 있다. 다만, 특정 실시예가 다음의 효과를 전부 포함하여야 한다거나 다음의 효과만을 포함하여야 한다는 의미는 아니므로, 개시된 기술의 권리범위는 이에 의하여 제한되는 것으로 이해되어서는 아니 될 것이다.
- [0020] 본 발명에 의하면, 간단한 용액공정을 통해 좁은 밴드갭을 가지는 산화 은을 고투명 산화물 반도체와 이중접합 시킴으로써 대기 중 안정성을 지님과 동시에 자외선에서 적외선까지의 넓은 파장 영역대에서 고감도·고효율의 광응답 특성 및 높은 컨덕턴스 성능을 나타내는 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0021] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 구조에 관한 것으로, (a) 광 트랜지스터의 구조도 및 (b) 광 트랜지스터를 제조하기 위한 개략도를 도시한 것이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 제조방법을 각 단계별 순서도로 도시한 것이다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터가 적용된 뉴로모픽 이미징 시스템 프로세스의 개략도를 도시한 것으로, (a) 기존 광 검출기 및 (b) 광 트랜지스터가 적용된 뉴로모픽 이미징 시스템이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막을 제조하기 위한 은 전구체 용액의 용매에 따른 안정성 평가 결과를 측정한 사진을 도시한 것으로, (a) DMSO, (b) 2-메톡시에탄올 및 (c) 에탄올을 용매로 사용한 은 전구체 용액의 측정결과이다.
- 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막을 제조하기 위한 은 전구체 용액의 농도에 따른 안정성 평가 결과를 측정한 사진을 도시한 것으로, (a) 0.05 M, (b) 0.1 M 및 (c) 0.2 M의 농도에서의 측정결과이다.
- 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 단면을 촬영한 HR-TEM 이미지 및 EDS 분석 그래프를 도시한 것이다.
- 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 각 원소별 EDS 분석 그래프를 도시한 것이다.
- 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막의 Ag 3d_{5/2}의 XPS 분석 그래프를 도시한 것으로, (a) 질소 글로브 박스 및 (b) 대기 환경에서 제조된 산화 은 박막이다.
- 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막의 투과율 분석 그래프이다.
- 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막의 타우 그래프(Tauc plot)를 도시한 것으로, (a) Ag₂O 및 (b) AgO 박막이다.
- 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 암전 및 다양한 파장의 광 조명에서의 전달곡선을 도시한 것이다.
- 도 12는 본 발명의 일 비교예에 따른 광 트랜지스터의 광 반응 특성 분석 그래프를 도시한 것으로, IGZO 광 트랜지스터의 (a) 광 트랜지스터 구조도, (b) 암전 및 다양한 파장의 광 조명에서의 전달곡선 및 (c) 게이트 바이

어스에 대한 광 트랜지스터의 감광도이다.

도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 게이트 절연층의 전기적 특성 그래프를 도시한 것으로, (a) 전류밀도-전기장 그래프 및 (b) 정전용량-주파수 그래프를 도시한 것이다.

도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 UPS 측정 기반 SEC 및 원자가 영역 스펙트럼 결과를 그래프로 도시한 것으로, (a) IGZO 층 및 (b) 산화 은(Ag₂O) 층이다.

도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 UPS 측정 및 타우 그래프 기반 UV-vis-NIR 파장 조명 하에서 광 트랜지스터의 작동 메커니즘을 도시한 모식도이다.

도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 UV-vis-NIR 파장 조명 하에서 게이트 바이어스에 대한 광 트랜지스터의 감광도 측정결과를 그래프로 도시한 것이다.

도 17은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 광응답 특성을 그래프로 도시한 것이다.

도 18은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 다양한 파장의 광 조명 하에서 EPSC 특성을 그래프로 도시한 것으로, (a) 830 nm 및 730 nm, (b) 635 nm 및 520 nm 및 (c) 450 nm 및 405 nm의 파장에서의 측정결과이다.

도 19는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 다양한 파장의 광 조명 하에서 PPF 특성을 그래프로 도시한 것이다.

도 20은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 각각 2, 8, 32, 128회 펄스일 때 다양한 파장의 광 조명 하에서 광 트랜지스터의 STP에서 LTP로의 전이 특성을 그래프로 도시한 것이다.

도 21은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 학습 시스템 특성을 그래프로 도시한 것으로, (a) 인간 시각 시스템의 학습-망각-재학습 행동의 개략도, (b) 다양한 파장의 광 조명 하에서 광 트랜지스터의 학습-망각-재학습 특성, (c) 개별 트랜지스터에서 측정된 학습 과정 후 광 트랜지스터의 정규화된 전류 스케일 및 (d) 50 초 후 망각 과정 이후 전류 스케일 및 (e) 3-4회 광 펄스 이후 재학습 특성이다.

도 22는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 컨덕턴스(전도도) 상태 특성을 그래프로 도시한 것으로, (a) 다양한 파장의 광 조명 및 512 회 입력 광 펄스 하에서 광 트랜지스터의 컨덕턴스 상태 및 (b) 고투명 산화물 반도체 기준 파장에 따른 컨덕턴스 상태의 수이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0022] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 구체적으로 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [0023] 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용한다. 제 1, 제 2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는 데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.
- [0024] 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제 1 구성요소는 제 2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제 2 구성요소도 제 1 구성요소로 명명될 수 있다. "및/또는" 이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.
- [0025] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미가 있다.
- [0026] 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미가 있는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않아야 한다.
- [0027] 본원 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함" 한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성 요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.
- [0028] 본 명세서에서 사용되는 정도의 용어 "약", "실질적으로" 등은 언급된 의미에 고유한 제조 및 물질 허용오차가

제시될 때 그 수치에서 또는 그 수치에 근접한 의미로 사용되고, 본원의 이해를 돕기 위해 정확하거나 절대적인 수치가 언급된 개시 내용을 비양심적인 침해자가 부당하게 이용하는 것을 방지하기 위해 사용된다. 또한, 본원 명세서 전체에서, "~ 하는 단계" 또는 "~의 단계"는 "~를 위한 단계"를 의미하지 않는다.

- [0029] 본원 명세서 전체에서, 마쿠시 형식의 표현에 포함된 "이들의 조합"의 용어는 마쿠시 형식의 표현에 기재된 구성 요소들로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상의 혼합 또는 조합을 의미하는 것으로서, 상기 구성 요소들로 이루어진 군에서 선택되는 하나 이상을 포함하는 것을 의미한다.
- [0031] 본 명세서에서는, 바텀 게이트 구조의 기판; 상기 기판 상에 형성된 게이트 절연층; 상기 게이트 절연층 상에 형성된 고투명 산화물 채널층; 상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 이격하여 형성된 소스 전극 및 드레인 전극; 및 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 형성된 금속 산화물층을 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터를 개시한다.
- [0032] 본 명세서 내에서, 광전자 시냅스 트랜지스터는 편의에 따라 광 트랜지스터로 칭해질 수 있다.
- [0033] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 구조에 관한 것으로, (a) 광 트랜지스터의 구조도 및 (b) 광 트랜지스터를 제조하기 위한 개략도를 도시한 것이다. 도 1을 참조하면, 본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터는, 바텀 게이트 구조의 기판; 상기 기판 상에 형성된 게이트 절연층; 상기 게이트 절연층 상에 형성된 고투명 산화물 채널층; 상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 이격하여 형성된 소스 전극 및 드레인 전극; 및 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 형성된 금속 산화물층을 포함하는 것을 확인할 수 있다.
- [0034] 상기 기판은, 실리콘(Si), 산화규소(SiO₂), 탄화규소(SiC), 게르마늄(Ge), 유리(glass), SOI(Silicon on Insulator), 폴리에틸렌테레프탈레이트(Polyethylene terephthalate, PET), 폴리에테르설폰(Polyether sulfone, PES), 폴리스티렌(Poly styrene, PS), 폴리카보네이트(Poly carbonate, PC), 폴리이미드(Polyimide, PI), 폴리에틸렌나프탈레이트(Poly ethylenenaphthalate, PEN) 및 폴리아릴레이트(Poly acrylate, PAR)으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0035] 상기 게이트 절연층은, 상기 바텀 게이트 구조의 기판과 상기 고투명 산화물 채널층 사이에 배치될 수 있다. 또한, 상기 게이트 절연층은 AlZrO_x, Al₂O₃, AlHfO_x, ZrO₂, HfO₂으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 구체적으로, 상기 게이트 절연층은 AlZrO_x를 포함하는 것이 바람직하다. 상기 게이트 절연층은 낮은 누설전류 및 이동성 이온 전하의 부재 특성을 나타냄으로써 상기 광 시냅스 트랜지스터의 광응답 특성에 있어서 상기 바텀 게이트 구조의 기판(게이트 전극)의 게이트 절연층으로부터 주입된 전하 캐리어의 직접적인 기여의 영향을 배제할 수 있는 효과를 가질 수 있다.
- [0036] 상기 고투명 산화물 채널층은 상기 게이트 절연층 상에 형성될 수 있다. 상기 채널층은 상기 소스 전극과 상기 드레인 전극을 전기적으로 연결하도록 형성될 수 있다.
- [0037] 상기 고투명 산화물 채널층은, ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO 및 ZnON로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 구체적으로, 상기 고투명 산화물 채널층은 비정질 IGZO(amorphous indium-galium-zinc-oxide)를 포함하는 것이 바람직하다. 비정질 IGZO는 높은 전하 이동도, 대면적화, 저온공정 호환성, 타 산화물 대비 높은 안정성 등으로 산화물 반도체의 대표적인 물질로 여겨져왔다. 그러나, 3.0 eV 이상의 큰 밴드갭으로 인해, 광 트랜지스터로 이용하는 데 제한이 있었다. 따라서 본 발명은 이러한 비정질 IGZO 채널층에 금속 산화물층으로 산화 은(Ag₂O) 박막을 이중접합시킴으로써 대기 중 수분 및 산소에 취약한 점과 넓은 밴드갭 특성을 산화 은(Ag₂O) 박막을 통해 개선함과 동시에 광 응답 특성까지 향상시킬 수 있는 광 트랜지스터를 제조하였다.
- [0038] 상기 고투명 산화물 채널층의 밴드갭은 상기 산화 은 박막의 밴드갭 보다 클 수 있다.
- [0039] 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극은 상기 고투명 산화물 채널층 상에 서로 이격되어 형성될 수 있다. 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극은 도전성 물질을 포함할 수 있다. 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극은 금속, 금속화합물 또는 전도성 유기고분자를 포함할 수 있다. 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극은 예시적으로, 금(Au), 은(Ag), 아연(Zn), 구리(Cu), 알루미늄(Al), 니켈(Ni), 인듐주석산화물(ITO), 카본나노튜브(carbon nano tube), 폴리머 등의 도전성 물질, 페이스트(paste) 또는 잉크(ink), 혹은 황화 텅스텐과 같은 투명 전극층으로 형성될 수 있다.

- [0040] 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극은 열 증착(thermal evaporation), 전자 빔 증착(E-beam evaporation), 스퍼터링(sputtering), 마이크로 콘택 프린팅(micro contact printing) 또는 나노 임프린팅(nano imprinting) 등의 공정에 의해 형성될 수 있다.
- [0041] 상기 금속 산화물층은, 산화 동, 산화 은, 산화 루테튬 및 산화 이리듐으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있다.
- [0042] 상기 금속 산화물층은, 산화 은(Ag_2O)을 포함하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0043] 상기 광전자 시냅스 트랜지스터는, 자외선 내지 적외선 파장 범위에서 광 반응을 나타낼 수 있다. 적외선 광을 감지하기 위한 광 트랜지스터의 동작 원리는 적외선 직접 흡수에 의해 발생하는 광전효과를 이용하는 방식이 가장 높은 광 감도를 보이는데, 이러한 광전효과 방식의 적외선 센서를 제조하기 위해서는 광 흡수 반도체의 밴드갭이 적외선의 광 에너지보다 낮아야 한다. 본 발명에서는 산화 은 중에서도 가장 안정하고, 1.4 eV의 좁은 밴드갭 에너지를 가지는 Ag_2O 박막을 제조하고 이를 광 트랜지스터에 적용함으로써 자외선에서 적외선까지 광 감지 영역대를 확장하였다.
- [0045] 한편, 본 명세서에는, 바텀 게이트 구조의 기판 상에 게이트 절연층을 형성하는 단계; 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계; 상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 소스 전극 및 드레인 전극을 이격하여 형성하는 단계; 및 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 금속 산화물 용액을 코팅하여 금속산화물층을 형성하는 단계;를 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법을 추가로 개시한다.
- [0046] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 제조방법을 각 단계별 순서도로 도시한 것이다. 도 2를 참조하면, 본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조방법은, 바텀 게이트 구조의 기판 상에 게이트 절연층을 형성하는 단계; 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계; 상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 소스 전극 및 드레인 전극을 이격하여 형성하는 단계; 및 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 금속 산화물 용액을 코팅하여 금속산화물층을 형성하는 단계;를 포함하는 것을 확인할 수 있다.
- [0047] 상기 바텀 게이트 구조의 기판 상에 게이트 절연층을 형성하는 단계 이전에, UV-오존 처리하는 단계를 더 포함할 수 있다. 상기 UV-오존 처리를 통해 기판을 친수성 표면으로 만들고, 남아있는 유기 잔류물을 제거할 수 있다.
- [0048] 상기 게이트 절연층은 AlZrO_x , Al_2O_3 , AlHfO_x , ZrO_2 , HfO_2 으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함하는 용액을 코팅하여 형성될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0049] 상기 게이트 절연층은, AlZrO_x 용액을 코팅하여 형성될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 상기 AlZrO_x 용액은, 각각 Al 전구체 용액과 Zr 전구체 용액을 1 : 1의 부피비율로 혼합하여 제조될 수 있다.
- [0050] 상기 AlZrO_x 용액의 농도는 0.1 내지 0.3 M일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 가령, 상기 AlZrO_x 용액의 농도가 0.1 M 미만일 경우, 낮은 누설전류 및 이동성 이온 전하의 부재 특성을 충분히 나타내지 못해 광 트랜지스터의 성능이 저하될 수 있는 문제점이 있다. 반대로, AlZrO_x 용액의 농도가 0.3 M을 초과할 경우, 게이트 절연층을 형성하기 위해 사용되는 AlZrO_x 용액의 효과 대비 비용이 증가하여 경제적 효율성이 떨어지는 문제가 발생할 수 있다.
- [0051] 상기 고투명 산화물 용액은, ZnO , IZO , IGZO , ZTO , IZATO , GIGO 및 ZnON 로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있다.
- [0052] 상기 고투명 산화물 용액은, IGZO 용액일 수 있다.
- [0053] 상기 IGZO 용액은, In:Ga:Zn 이 6:1:2의 부피비로 혼합될 수 있다. 일반적으로 IGZO 박막 제조를 위해 사용되는 IGZO 용액의 경우, In:Ga:Zn 이 5~8:1:1~2의 비율로 조성될 수 있다. 상기 IGZO 용액은 In:Ga:Zn 이 6:1:2의 부피비로 혼합됨에 따라, 고투명, 높은 전하 이동도, 대면적화, 저온공정 호환성, 타 산화물 대비 높은 안정성 등의 특성을 효과적으로 나타낼 수 있다.
- [0054] 본 발명에 있어서, 코팅은 스핀 코팅, 스프레이 코팅, 딥 코팅, 바 코팅 등을 포함할 수 있으나 이에 한정되는

것은 아니며, 이외에도 닥터블레이딩, 스퍼터링, 및 전기영동 등의 방법으로 수행될 수 있다. 구체적으로, 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계 및 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 금속 산화물 용액을 코팅하여 금속산화물층을 형성하는 단계에서 수행되는 상기 코팅은, 스펀코팅인 것이 바람직하다.

[0055] 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계는, 3000 내지 5000 rpm에서 10 초 내지 30 초 간 수행될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 구체적으로, 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계는, 3500 내지 4500 rpm에서 15 초 내지 25 초 간 수행될 수 있다. 상기 코팅(스핀코팅)을 3000 내지 5000 rpm에서 10 초 내지 30 초 간 수행함으로써 상기 고투명 산화물 용액을 도포하여 균일한 박막을 제조할 수 있다. 가령, 상기 코팅이 3000 rpm 및 10 초 미만으로 수행되는 경우, 상기 고투명 산화물 용액이 얇고 균일하게 도포되지 않아 박막의 성능이 떨어지는 문제점이 발생할 수 있다. 반대로, 상기 코팅이 5000 rpm 및 30 초를 초과하여 수행되는 경우, 상기 고투명 산화물 용액이 박막 중앙 표면에서 떨어져 나가고 불균일하게 도포되어 박막의 성능이 떨어지는 문제점이 발생할 수 있다.

[0056] 상기 게이트 절연층 상에 고투명 산화물 용액을 코팅하여 고투명 산화물 채널층을 형성하는 단계는, 어닐링을 수행하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0057] 상기 어닐링은, 300 내지 400 °C에서 30 분 내지 2 시간 동안 수행될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 가령, 상기 어닐링이 300 °C 및 30 분 미만으로 수행될 경우, 고투명 산화물 용액이 불균일 또는 불충분하게 결정화되거나, 박막의 어닐링이 제대로 수행되지 않아 박막의 치밀성이 떨어지는 문제가 발생할 수 있다. 반대로, 상기 어닐링이 400 °C 및 2 시간을 초과하여 수행될 경우, 상기 기판을 구성하는 재료 물질이 변질되는 문제가 발생할 수 있다.

[0058] 상기 금속 산화물 용액은, 은(Ag) 전구체를 용매에 첨가하여 제조될 수 있다. 구체적으로, 상기 금속 산화물 용액은, 은 전구체로써 질산 은(silver nitrate, AgNO_3)을 용매인 DMSO(dimethyl sulfoxide)에 첨가하여 제조되는 은 전구체 용액일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0059] 상기 은 전구체는, 수산화 은, 유기 은 염 및 무기 은 염으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상을 포함할 수 있으나 이에 한정되는 것은 아니며, 은 공급원으로써 상기 은 전구체 용액에 은을 공급할 수 있는 은 이 함유된 화합물이라면 모두 사용 가능하다. 상기 질산 은의 경우, 은의 질산염으로, 물에 잘 녹는 은 염이기 때문에 다양한 용도로 사용된다.

[0060] 상기 은 전구체 용액의 농도는, 0.01 내지 0.1 M일 수 있다. 구체적으로, 상기 은 전구체 용액의 농도는, 0.05 내지 0.1 M인 것이 바람직하다. 가령, 상기 은 전구체 용액의 농도가 0.01 M 미만일 경우, 박막에 형성되는 산화 은(Ag_2O)의 양이 부족하여 상기 산화 은 박막 및 이를 포함하는 광 트랜지스터가 좁은 밴드갭 특성 및 전 파장 영역대에서의 넓은 광 응답 특성을 나타내지 못하는 문제가 발생할 수 있다. 반대로, 상기 은 전구체 용액의 농도가 0.1 M을 초과할 경우, 용액의 불안정성으로 인해 단기간에 황변현상이 일어나는 문제가 발생할 수 있다. 상기 은 전구체 용액의 농도가 0.2 M 이상일 경우 장기적 안정성이 떨어져 일주일 이내에 황변현상이 발생할 수 있다. 또한 상기 은 전구체 용액의 농도가 0.2 M 이상일 경우 육안으로 확인할 수 있을 정도로 불균일한 박막이 형성되는 문제점이 발생할 수 있다. 이에 따라, 상기 은 전구체 용액의 농도는 0.1 M 이하로 조정되어야 한다.

[0061] 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 금속 산화물 용액을 코팅하여 금속산화물층을 형성하는 단계 이전에, 상기 기판을 오존으로 처리함으로써, 상기 금속 산화물 용액의 스펀 코팅을 위한 표면 에너지를 줄일 수 있다.

[0062] 상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 금속 산화물 용액을 코팅하여 금속산화물층을 형성하는 단계는, 어닐링하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0063] 상기 금속산화물층은, 산화 은(Ag_2O)을 포함할 수 있다.

[0064] 상기 어닐링은, 비활성 분위기에서 수행될 수 있다. 상기 어닐링은 산소가 부족한 조건에서 수행되어야 하는데, 이를 위해 질소 글로브 박스 내에서 어닐링을 수행하는 등 비활성 분위기를 조성할 수 있다. 상기 비활성 분위기 또는 산소 부족 조건에서 어닐링을 수행하는 이유는 Ag_0 가 아닌 Ag_2O 를 합성하기 위함이다. 은은 산소와 만나 반응할 때, Ag_0 및 Ag_2O 의 두 가지 상을 가질 수 있는 물질로, $\text{Ag} : \text{O} = 1 : 1$ 의 비율을 가지는 Ag_0 의 경우

3.0 eV 이상의 넓은 밴드갭을 가지는 반면, $\text{Ag} : \text{O} = 2 : 1$ 의 비율을 가지는 Ag_2O 는 1.4 eV 이내의 좁은 밴드갭을 가지는 특성이 있다. 어닐링 온도 및 시간을 동일하게 하였을 때, 대기 중과 같이 산소가 풍부한 환경에서는 Ag_2O 가 합성되는 반면, 질소 글로브 박스 내부와 같이 산소가 부족한 환경에서는 Ag_2O 가 합성된다. 본 발명에서는 좁은 밴드갭을 가지는 Ag_2O 를 합성하는 것을 목적으로 하기 때문에, 비활성 분위기를 조성하여 산소가 부족한 환경에서 어닐링을 수행하였다. 이러한 조건에서 좁은 밴드갭을 가지는 Ag_2O 를 합성하여 산화 은 박막을 제조하고, 이를 이중접합 광 트랜지스터에 적용함으로써 자외선에서 적외선까지 전 파장 영역대에 걸쳐 넓은 파장 범위에서 고감도·고효율의 광응답 특성을 나타내는 광 트랜지스터를 제조하였다.

- [0065] 상기 어닐링은, 180 내지 250 °C에서 수행될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 구체적으로, 상기 어닐링은, 200 내지 230 °C에서 수행되는 것이 바람직하다. 가령, 상기 어닐링이 180 °C 미만의 온도에서 수행될 경우, Ag_2O 가 불균일 또는 불충분하게 합성되거나, 박막의 어닐링이 제대로 수행되지 않아 박막의 치밀성이 떨어지는 문제가 발생할 수 있다. 반대로, 상기 어닐링이 250 °C를 초과하는 온도에서 수행될 경우, 상기 기판을 구성하는 재료 물질이 변질되는 문제가 발생할 수 있다.
- [0066] 상기 어닐링은, 30 분 내지 1 시간 동안 수행될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다. 구체적으로, 상기 어닐링은, 40 분 내지 50 분 동안 수행되는 것이 바람직하다. 가령, 상기 어닐링이 30 분 미만으로 수행될 경우, Ag_2O 가 불균일 또는 불충분하게 합성되거나, 박막의 어닐링이 제대로 수행되지 않아 박막의 치밀성이 떨어지는 문제가 발생할 수 있다. 반대로, 상기 어닐링이 1 시간을 초과하여 수행되는 경우, 상기 기판을 구성하는 재료 물질이 변질되는 문제가 발생할 수 있다.
- [0067] 상술한 바와 같이, 본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조방법은 간단한 용액공정을 통해 이루어지기 때문에 공정상 복잡함이 없어 공정을 단순화하고 경제적으로 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조할 수 있는 장점이 있다.
- [0069] 한편, 본 명세서는, 상술한 제조방법에 따라 제조되는 광전자 시냅스 트랜지스터를 포함하는 전자장치를 추가로 개시한다.
- [0070] 상기 전자장치는, 예시적으로 뉴로모픽 장치일 수 있다.
- [0071] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터가 적용된 뉴로모픽 이미징 시스템 프로세스의 개략도를 도시한 것으로, (a) 기존 광 검출기 및 (b) 광 트랜지스터가 적용된 뉴로모픽 이미징 시스템이다.
- [0072] 도 3a를 참조하면, 기존 광 검출기는 입사광의 전력 밀도에 비례하는 광전류를 생성하고, 이 광전류는 메모리 장치에 저장되는 것을 확인할 수 있다. 그런 다음 변환된 전기 신호가 중앙 처리 장치(CPU)를 포함하는 전기 신호 처리 장치로 전송된다. 최종 이미지 식별은 그래픽 처리 장치(GPU) 또는 뉴로모픽 칩과 같은 사후 신호 처리 장치에서 전하 트랩 플래시 메모리(CTF)의 동적 랜덤 액세스 메모리(DRAM)에 저장된 시냅스 가중치를 사용하여 진행될 수 있다. 그러나 이 과정에서 일련의 광범위한 단계로 인해 물체의 식별 속도가 저하될 수 있다. 또한 시냅스 가중치를 저장하는 메모리 장치로 DRAM을 활용하면, 누설 전류에 대응하기 위해 자주 리프래시 프로세스를 거쳐야 하기 때문에 상당한 전력 소비가 발생한다는 문제가 있다. CTF는 비휘발성 메모리 솔루션을 제공하여 DRAM과 관련된 휘발성 문제를 완화하지만, 저장된 데이터를 읽어내는 속도가 느려 순간적인 뉴로모픽 연산이 비효율적으로 이루어질 수 있다. 또한 이러한 칩 외 메모리 장치에 의존하면 에너지 효율이 제한되고 뉴로모픽 연산 중 지연시간이 길어질 수 있다. 따라서, 광검출기와 메모리 소자의 기능을 한 번에 실행할 수 있는 광전자 시냅스 트랜지스터가 연구되고 있다. 도 3b를 참조하면, 광전자 시냅스 트랜지스터가 적용된 뉴로모픽 이미징 시스템의 프로세스를 확인할 수 있다. 광전자 시냅스 트랜지스터는 입사광이 제거된 후 비휘발성 광전류인 지속성 광전도(PPC) 효과는 장기 강화(LTP)와 같은 신경 기능을 모방하는 데 사용될 수 있다. 광전자 시냅스 트랜지스터의 기억(메모리) 기능으로 인해 DRAM의 잦은 리프래시 및 CTF의 느린 읽기 속도 문제를 해결할 수 있다. 또한 광전자 시냅스 트랜지스터는 광 검출기와 메모리 기능을 동시에 수행할 수 있기 때문에 지연 시간이나 가우스 노이즈를 효율적으로 줄일 수 있어 순간적인 사물인식을 위한 뉴로모픽 연산이 빨라지고 배경 노이즈를 줄여 인식 정확도가 높아질 수 있다.
- [0073] 상기 광전자 시냅스 트랜지스터는 자외선 내지 적외선의 전 파장 영역에서 흥분성 시냅스 후 전류(excitatory post synaptic current, EPSC), 쌍펄스 촉진(paired-pulse facilitation, PPF), 장기 강화(long-term potentiation, LTP), 단기 강화(short-term potentiation, STP)와 같은 시냅스 기능을 모방할 수 있다.

- [0074] 또한, 상기 광전자 시냅스 트랜지스터는 단일 소자의 각 셀을 기준으로 자외선 내지 적외선 파장 범위에서 512 회 이하의 컨덕턴스 상태(conductance state)를 가질 수 있다.
- [0075] 이하, 첨부한 도면 및 실시예들을 참조하여 본 명세서가 청구하는 바에 대하여 더욱 자세히 설명한다. 다만, 본 명세서에서 제시하고 있는 도면 내지 실시예 등은 통상의 기술자에게 의하여 다양한 방식으로 변형되어 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 본 명세서의 기재사항은 본 발명을 특정 개시 형태에 한정되는 것이 아니고 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 균등물 내지 대체물을 포함하고 있는 것으로 보아야 한다. 또한, 첨부된 도면은 본 발명을 통상의 기술자로 하여금 더욱 정확하게 이해할 수 있도록 돕기 위하여 제시되는 것으로서 실제보다 과장되거나 축소되어 도시될 수 있다.
- [0077] {실시예 및 평가}
- [0078] <실시예>
- [0079] 실시예 1
- [0080] 1. 용액 준비
- [0081] 게이트 절연층에 사용되는 AlZrO_x 용액은 개별 Al 및 Zr 전구체 용액을 혼합하여 제조하였다. 질산 알루미늄 9 수화물($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, Sigma Aldrich) 0.7503 g을 2-메톡시에탄올 10 mL에 녹인 후 70 °C에서 1시간 동안 교반하여 투명하고 균질한 0.2 M Al 전구체 용액을 얻었다. 0.46246 g의 질산 지르코늄 수화물($\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, Alfa Aesar)을 먼저 탈이온수 0.5 mL와 질산(HNO_3 , 60 %, Daejung) 0.5 mL에 녹인 다음 투명한 용액이 될 때까지 초음파 처리했다. 이 용액을 9 mL의 2-메톡시에탄올에 추가로 용해하여 0.2 mM의 Zr 전구체 용액을 얻었다. Al 전구체 용액 및 Zr 전구체 용액을 1 : 1의 부피 비율로 혼합하여 0.2 M의 AlZrO_x 용액을 제조하였다.
- [0082] IGZO 용액은 0.1 M의 개별 In, Ga 및 Zn 전구체 용액을 혼합하여 준비했다. 질산인듐 수화물($\text{In}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, Alfa Aesar) 0.3008 g, 질산갈륨 수화물($\text{Ga}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, Sigma Aldrich) 0.2557 g 및 질산아연 6수화물($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Sigma Aldrich) 0.29749 g을 2-메톡시에탄올 10 mL에 녹인 후 70 °C에서 2 시간 동안 교반하여 각각 In, Ga 및 Zn 전구체 용액을 제조했다. 균일한 투명 용액을 만든 후, In, Ga 및 Zn 전구체 용액을 6 : 1 : 2의 부피 비율로 혼합하여 IGZO 용액을 제조하였다.
- [0083] 은 전구체 용액은 질산 은 0.1699 g과 디메틸 설펡사이드(DMSO) 10 mL를 혼합한 후 30 분 동안 격렬하게 교반하여 제조하였다.
- [0085] 2. 광전자 시냅스 트랜지스터(광 트랜지스터) 제작
- [0086] 봉소가 많이 도핑된 Si 웨이퍼를 이용하여 실리콘 기판 및 게이트 전극으로 사용하였다. Si 웨이퍼는 증류수, 아세톤 및 2-프로판올로 각각 15 분 동안 연속적으로 초음파 처리하였다. 초음파 처리 후 질소 가스를 분사한 뒤, 기판을 15 분 동안 UV-오존으로 처리하여 친수성 표면을 만들고, 남아있는 유기 잔류물을 제거했다. AlZrO_x 용액을 실리콘 기판에 4000 rpm으로 20 초 동안 스핀코팅한 다음 40 °C 핫플레이트 위에 5 분 동안 놓았다. 그 후, 핫플레이트의 온도를 40 °C/min⁻¹의 램핑 속도로 220 °C까지 올리고 5 분 동안 유지한 다음, AlZrO_x 가 코팅된 기판을 440 °C의 용광로로 옮겨 1 시간 동안 유지하여 게이트 절연층으로써 AlZrO_x 층을 형성하였다.
- [0087] 다음 단계로, AlZrO_x 층 위에 IGZO 용액을 4000 rpm에서 20 초 동안 스핀코팅한 다음 120 °C에서 5 분 동안 열처리하였다. 이 과정을 두 번 반복한 후에, 최종적으로 IGZO 층을 350 °C에서 1 시간 동안 대기 중에서 어닐링하여 고투명 산화물 채널층인 IGZO 층을 형성하였다.
- [0088] 이후, 100 nm의 알루미늄 소스 전극 및 드레인 전극을 금속 새도 마스크를 사용하여 증착 속도 4 Å · s⁻¹의 5 X 10⁻⁶ 토르에서 열 증발기를 통해 증착하였다. 채널 폭과 길이는 각각 1000 및 100 μm로 증착되었다.
- [0089] 소스 전극 및 드레인 전극 증착 후, 은 전구체 용액의 스핀코팅을 위한 표면 에너지를 줄이기 위해 20 분 동안 오존으로 처리하였다. 은 전구체 용액을 60 초 동안 6000 rpm으로 스핀코팅한 후 질소(N_2)가 채워진 글로브 박스에서 230 °C로 45 분 동안 어닐링하여 산화 은(Ag_2O) 층을 형성하였다.

- [0090] 마지막으로 기존의 포토리소그래피와 회석된 황산을 사용한 습식 에칭을 통해 디바이스를 패터닝했다. AlZrO_x 게이트 절연체를 특성화하기 위해 $\text{p-Si}/\text{AlZrO}_x/\text{Al}$ 금속 절연체-금속(MIM) 구조가 제작되었다.
- [0091] 이를 통해, 질산 은을 DMSO에 용해한 은 전구체 용액 0.1 M을 고투명 산화물 채널층인 IGZO 층 위에 코팅하고 질소 글로브 박스 내에서 어닐링을 수행하여 산화 은(Ag_2O) 박막(산화 은(Ag_2O) 코팅층) 및 이를 포함하는 광 트랜지스터를 제작하였다(이하, "실시예 1"이라고 함).
- [0093] **3. 특성화**
- [0094] 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은(Ag_2O) 박막 및 이를 포함하는 광 트랜지스터의 특성화는 다음과 같은 방법을 통해 이루어졌다. 광전자 특성은 다양한 파장(830, 780, 635, 520, 450 및 405nm)의 단색 레이저 다이오드(Thorlabs)를 사용하여 암전 상태의 박스에서 반도체 파라미터 분석기(HP 4145B)와 프로브 스테이션을 사용하여 측정하였다. AlZrO_x 필름의 주파수 대비 커패시턴스(정전용량)는, Agilent 4284 LCR 미터를 사용하여 측정하였다. HR-TEM은 JEM-2100F 시스템을 사용하여 소자의 구조를 확인하였다. 투과율 스펙트럼은 UV-vis 분광기(Cary 100, Agilent)를 사용하여 측정하였다. XPS 및 UPS 측정은 각각 $\text{Al-K}\alpha$ (1486.6 eV) 소스 및 He-I (21.22 eV) 라인 소스가 있는 Nexsa(Thermo Fisher)를 사용하여 $\sim 1 \times 10^{-9}$ torr 압력의 초고진공 챔버에서 수행되었다. UPS 측정 시에는 -10 V의 샘플 바이어스가 적용되었다.
- [0096] **실시예 2**
- [0097] 은 전구체 용액의 농도를 0.05 M로 제조한 것을 제외하고, 실시예 1과 동일하게 하여, 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은(Ag_2O) 박막 및 이를 포함하는 광 트랜지스터를 제작하였다(이하, "실시예 2"라고 함).
- [0099] **비교예 1**
- [0100] 은 전구체 용액의 제조과정에서, 용매로 2-메톡시에탄올을 사용하여 0.1 M 은 전구체 용액을 제조한 것을 제외하고, 실시예 1과 동일하게 하여, 산화 은(Ag_2O) 박막 및 이를 포함하는 광 트랜지스터를 제작하였다(이하, "비교예 1"이라고 함).
- [0102] **비교예 2**
- [0103] 은 전구체 용액의 제조과정에서, 용매로 에탄올을 사용하여 0.1 M 은 전구체 용액을 제조한 것을 제외하고, 실시예 1과 동일하게 하여, 산화 은(Ag_2O) 박막 및 이를 포함하는 광 트랜지스터를 제작하였다(이하, "비교예 2"라고 함).
- [0105] **비교예 3**
- [0106] 은 전구체 용액의 농도를 0.2 M로 제조한 것을 제외하고, 실시예 1과 동일하게 하여, 산화 은(Ag_2O) 박막 및 이를 포함하는 광 트랜지스터를 제작하였다(이하, "비교예 3"이라고 함).
- [0108] **비교예 4**
- [0109] 은 전구체 용액을 스핀코팅한 후 대기 중에서 230 °C로 45 분 동안 어닐링한 것을 제외하고, 실시예 1과 동일하게 하여, 산화 은(Ag_2O) 박막 및 이를 포함하는 광 트랜지스터를 제작하였다(이하, "비교예 4"라고 함).
- [0111] **비교예 5**
- [0112] 은 전구체 용액을 스핀코팅하지 않은 것을 제외하고, 실시예 1과 동일하게 하여, IGZO 박막 및 이를 포함하는 광 트랜지스터를 제작하였다(이하, "비교예 5"라고 함).
- [0114] **<평가>**
- [0115] **1. 은 전구체 용액의 용매에 따른 안정성 평가**
- [0116] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막을 제조하기 위한 은 전구체 용액의 용매에 따른 안정성 평가 결과를 측정한 사진을 도시한 것으로, (a) DMSO, (b) 2-메톡시에탄올 및 (c) 에탄올을 용매로 사용한 은 전구체 용액의 측정결과이다.
- [0117] 도 4를 참조하면, 널리 사용하는 유기용매들을 은 전구체 용액의 용매로 사용하였을 때, DMSO를 용매로 사용한

실시에 1을 제외하고는, 5 일이 지난 시점부터 황변현상이 발생한 것을 확인할 수 있다. 2-메톡시에탄올을 용매로 사용한 비교예 1 및 에탄올을 용매로 사용한 비교예 2는 용액 제조 후 5 일이 지난 시점부터 황변현상이 발생하였다. 이는 용액의 불안정성을 의미하며, 이러한 결과를 통해 DMSO가 산화 은(Ag_2O) 형성에 최적화된 용매임을 확인할 수 있었다.

[0119] **2. 은 전구체 용액의 농도에 따른 안정성 평가**

[0120] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막을 제조하기 위한 은 전구체 용액의 농도에 따른 안정성 평가 결과를 측정한 사진을 도시한 것으로, (a) 0.05 M, (b) 0.1 M 및 (c) 0.2 M의 농도에서의 측정결과이다.

[0121] 도 5를 참조하면, 비교예 3은 용액 제조 후 5 일이 지난 시점부터 황변현상이 발생한 데 반해, 실시예 1 및 실시예 2는 황변현상이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. 즉, 은 전구체 용액에 있어서, 0.1 M의 농도까지는 5 일이 지난 후에도 투명하게 유지되어 안정성을 보이나, 0.2 M 이상의 농도범위에서는 용액이 불안정성을 띠게 됨을 의미한다. 이를 통해 은 전구체 용액의 농도는 0.2 M 미만으로 제조되어야 하고, 구체적으로는 0.1 M 이하의 농도로 제조되어야 용액의 안정성이 확보된다는 사실을 확인할 수 있다.

[0123] **3. 이중접합 광 트랜지스터의 구조 및 필름(박막) 특성화 평가**

[0124] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 단면을 촬영한 HR-TEM 이미지 및 EDS 분석 그래프를 도시한 것이다.

[0125] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 각 원소별 EDS 분석 그래프를 도시한 것이다.

[0126] 도 6을 참조하면, 단면 HR-TEM 이미지에서 SiO_2 실리콘 층(4 nm) 및 AlZrO_x 층(11 nm)은 명확하게 식별되지만, IGZO 층 및 Ag_2O 층은 이미지 상으로 명확하게 식별되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 EDS 분석을 수행한 결과, IGZO 층과 Ag_2O 층 사이에 상호 확산 층이 형성된 것으로 나타났다. 도 3b의 제조 공정을 고려할 때, Ag_2O 층의 어닐링 공정 중에 확산이 이루어졌음을 추정할 수 있다. 이러한 Ag_2O 층의 어닐링 공정을 통한 IGZO 층과 Ag_2O 층 사이 상호확산층이 형성됨으로써 IGZO의 높은 전하 이동도, 대면적화, 저온공정 호환성, 타 산화물 대비 높은 안정성 등의 장점과 산화 은(Ag_2O)의 좁은 밴드갭 특성을 모두 지니는 광 트랜지스터가 제조되었다.

[0127] 도 7을 참조하면, 보다 구체적으로 O, Zr, Al, In, Ga, Zn 및 Ag의 EDS 라인 스펙트럼을 확인할 수 있다.

[0128] 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막 제조에 있어서, 산화 은 박막의 화학량론을 세심하게 조정하는 것이 중요하게 고려되었다.

[0129] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막의 Ag $3d_{5/2}$ 의 XPS 분석 그래프를 도시한 것으로, (a) 질소 글로브 박스 및 (b) 대기 환경에서 제조된 산화 은 박막이다.

[0130] 도 8을 참조하면, 은 전구체 용액 코팅 후 어닐링 공정에서의 산소 조건이 미치는 영향을 명확하게 확인하기 위해 제조한 비교예 4에는 넓은 밴드갭을 나타내는 AgO가 다량 형성된 것을 확인할 수 있다. 구체적으로, 각각 질소 글로브 박스 내부 및 대기 조건에서 제조된 실시예 1 및 비교예 4의 XPS 스펙트럼을 면밀하게 검토한 결과, 비교예 4는 넓은 밴드갭을 나타내는 AgO가 형성되고, 실시예 1은 좁은 밴드갭을 나타내는 Ag_2O 가 형성된 것을 확인할 수 있다.

[0131] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막의 투과율 분석 그래프이다.

[0132] 도 9를 참조하면, UV-vis 분광기를 사용하여 투과율 스펙트럼을 측정한 결과, 질소 글로브 박스 내에서 어닐링한 실시예 1에 Ag_2O 가 형성된 것을 추가적으로 확인할 수 있다. 실시예 1의 산화 은 박막은 830 nm 파장부터 투과율이 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 Ag_2O 박막의 좁은 밴드갭 특성을 나타낸다.

[0133] 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막의 타우 그래프(Tauc plot)를 도시한 것으로, (a) Ag_2O 및 (b) AgO 박막이다.

[0134] 도 10a 및 도 10b를 참조하면, 실시예 1의 Ag_2O 의 광학 밴드갭은 1.4 eV로 나타나고, 비교예 4의 AgO의 광학 밴

드갭은 3.3 eV를 나타냄으로써 이전에 보고된 Ag_2O 및 AgO 의 밴드갭 특성과 일치하는 것을 확인할 수 있다.

[0135] 이에 따라, 산화 은(Ag_2O) 박막의 제조 공정은 질소 글로브 박스에서와 같이 산소가 부족한 조건에서 수행되어야 함을 확인할 수 있다.

[0136] 본 발명의 일 실시예에 따른 산화 은 박막 제조에 있어서, 이러한 산화 은 박막의 화학량론의 미묘한 제어는 적외선 영역에서 최적의 성능을 발휘하도록 산화 은 박막의 광학적 특성을 조정하는 데 중추적인 역할을 했다.

[0138] 4. 광 트랜지스터의 광반응 특성 평가

[0139] 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 암전 및 다양한 파장의 광 조명에서의 전달곡선을 도시한 것이다.

[0140] 도 11을 참조하면, 실시예 1의 암전 및 830, 780, 635, 520, 450 및 405 nm 파장에서의 전달곡선을 확인할 수 있다. 도 11 및 도 12을 얻기 위하여, $4.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 의 광 출력 밀도를 가지는 입사 레이저로 측정을 수행하였다.

[0141] 도 12는 본 발명의 일 비교예에 따른 광 트랜지스터의 광 반응 특성 분석 그래프를 도시한 것으로, IGZO 광 트랜지스터의 (a) 광 트랜지스터 구조도, (b) 암전 및 다양한 파장의 광 조명에서의 전달곡선 및 (c) 게이트 바이어스에 대한 광 트랜지스터의 감광도이다.

[0142] 도 11 및 도 12b를 참조하면, 전달곡선을 측정하는 동안 실시예 1의 게이트 바이어스(V_g)는 0.5 V의 일정한 드레인 바이어스(V_d)에서 -1 내지 1 V로 스위칭되었다. 원자가 전자를 전도에 따라 여기시키에는 광자 에너지가 충분하지 않아 830 내지 520 nm 파장의 빛에 노출되었을 때 광반응 특성을 나타내지 않았던 IGZO 광 트랜지스터인 비교예 5와 비교하였을 때, 실시예 1은 830 nm 파장의 빛에 노출되었을 때 전달곡선이 왼쪽으로 상향 이동하는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 소자가 특정파장의 빛에 노출되었을 때 이를 감지한다는 것을 의미하며, 이러한 경향은 입사 광자 에너지가 증가함에 따라 더욱 뚜렷하게 나타나 최대 405 nm까지 진행되었다.

[0143] 도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 게이트 절연층의 전기적 특성 그래프를 도시한 것으로, (a) 전류밀도-전기장 그래프 및 (b) 정전용량-주파수 그래프를 도시한 것이다.

[0144] 도 13a를 참조하면, 제작된 AlZrO_x 게이트 절연층의 1 MV/cm 에서의 항복 전계 및 누설전류 밀도는 각각 $4 \text{ MV} \cdot \text{cm}^{-1}$ 및 $2.8 \times 10^{-10} \text{ A}$ 인 것을 확인할 수 있다. 또한, 도 13b를 참조하면, $553 \text{ nF} \cdot \text{cm}^{-2}$ 의 주파수 독립적인 고면적 정전용량은 게이트 절연층에 이동성 이온 전하가 없음을 확인할 수 있다. 누설전류가 낮고, 게이트 절연층에 이동성 이온 전하가 없기 때문에 실시예 1의 광응답 특성은 게이트 전극의 게이트 절연층으로부터 주입된 전하 캐리어의 직접적인 기여에 영향을 받지 않는다. 이를 기반으로, 이하의 도 14 및 도 15에 도시된 바와 같이 UPS를 측정하여 실시예 1의 작동 메커니즘을 확인하였다.

[0145] 도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 UPS 측정 기반 SEC 및 원자가 영역 스펙트럼 결과를 그래프로 도시한 것으로, (a) IGZO 층 및 (b) 산화 은(Ag_2O) 층이다.

[0146] 도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 UPS 측정 및 타우 그래프 기반 UV-vis-NIR 파장 조명 하에서 광 트랜지스터의 작동 메커니즘을 도시한 모식도이다.

[0147] 도 14를 참조하면, 실시예 1의 IGZO 층 및 산화 은(Ag_2O) 층의 일함수 값은 각각 3.31 및 4.17 eV로, 원자가 밴드 최대값(VBM)은 각각 2.01 및 0.6 eV인 것을 확인할 수 있다.

[0148] 도 15를 참조하면, 도 14 및 도 10를 바탕으로 한 실시예 1의 계면 에너지 밴드 다이어그램 및 작동 메커니즘 모식도를 통해 확인할 수 있다. 도 12에 나타나있듯 830 nm 파장의 빛의 광자 에너지는 IGZO 층에서 광전류를 생성하기에 충분하지 않기 때문에, 광전류는 주로 vis-NIR(가시광선-근적외선) 파장의 조명 하에서 산화 은(Ag_2O) 층으로부터 생성된 것을 확인할 수 있다. 그러나 450 및 405 nm 파장의 조명 아래에서는 IGZO 층 및 산화 은(Ag_2O) 층 모두 광전류를 생성하여 채널 전류에 기여하는 것으로 확인되었다.

[0149] 도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 UV-vis-NIR 파장 조명 하에서 게이트 바이어스에 대한 광 트랜지스터의 감광도 측정결과를 그래프로 도시한 것이다.

[0150] 도 16을 참조하면, vis-NIR 조명 아래에서 게이트 바이어스에 대한 실시예 1의 감광도를 확인할 수 있다. 도

12c에 도시되어있는 비교예 5의 감광도와 비교했을 때, 도 16에 도시되어있는 실시예 1의 감광도는 산화 은(Ag_2O) 층의 좁은 밴드갭이 추가되어 게이트 바이어스와 관계없이 전체 UV-vis-NIR 파장 영역대에서 높은 감광도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한, 감광도 값은 입사광의 파장에 관계없이 게이트 바이어스(V_G) = -0.25 V까지 증가하다가, V_G = -0.25 V 이상에서는 감소하기 시작한다. 광 트랜지스터가 오프(OFF) 상태인 V_G = -0.25 V 이하에서는 생성된 광전류가 채널 전류에 주로 기여하여 감광도가 증가하는 것으로 추정할 수 있다. 그러나 광 트랜지스터가 온(ON) 상태일 때는 채널 전류가 주로 전기장의 영향을 받아 감광도가 감소한다.

[0151] 도 17은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 광응답 특성을 그래프로 도시한 것이다.

[0152] 도 17을 참조하면, 비교예 5 및 실시예 1의 계산된 광반응 값을 확인할 수 있다. 도 17을 참조하면, 상기 전달 곡선과 일관되게, 산화 은(Ag_2O) 층이 추가되면 830 nm 파장의 조명 아래에서 $651 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$ 의 전체 UV-vis-NIR 파장 영역대에서 매우 향상된 광반응 값을 보이는 것을 확인할 수 있다.

[0153] 이에 따라, 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터는 단일 소자 내에서 자외선 내지 적외선 파장을 모두 감지하여 우수한 광반응 및 광감지 특성을 지니는 것을 확인할 수 있다.

[0155] 5. 광 트랜지스터의 학습 특성 평가

[0156] 상기 평가 결과들을 바탕으로 다양한 파장 영역에서 흥분성 시냅스 후 전류(excitatory post synaptic current, EPSC), 쌍펄스 촉진(paired-pulse facilitation, PPF), 장기 강화(long-term potentiation, LTP), 단기 강화(short-term potentiation, STP)와 같은 시냅스 기능을 특성화하였다.

[0157] 인간 생체 시스템에서, 두 뉴런 사이의 연결을 시냅스라고 하며, 이때 시냅스를 형성하는 두 뉴런을 시냅스 전 뉴런 및 시냅스 후 뉴런이라고 한다.

[0158] 시냅스 전 뉴런에서 방출되는 신경전달물질은 외부 신호가 시냅스 전 뉴런을 자극할 때 시냅스 후 전류를 생성하게 된다. 인간의 시냅스와 유사하게 외부의 빛 신호가 광 트랜지스터를 자극하면 광 생성 전하 캐리어가 드레인 전류에 기여하게 되는데, 이를 EPSC라고 한다. 또한 비정질 산화물 반도체의 PPC 효과는 PPF와 같은 인간 시냅스 기능을 모방할 수 있고, STP에서 LTP로의 전환 또한 모방할 수 있다.

[0159] 도 18은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 다양한 파장의 광 조명 하에서 EPSC 특성을 그래프로 도시한 것으로, (a) 830 nm 및 730 nm, (b) 635 nm 및 520 nm 및 (c) 450 nm 및 405 nm의 파장에서의 측정결과이다.

[0160] 도 18을 참조하면, 실시예 1에 대하여, 두개의 연속적인 파장 별로, 830 nm 및 730 nm, 635 nm 및 520 nm, 450 nm 및 405 nm의 파장 펄스에서의 EPSC 특성을 확인할 수 있다. 전체 파장에 대한 각 펄스의 입사 광 출력 밀도는 $4.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 펄스 폭 및 펄스 간격은 각각 0.5 초였다. 실시예 1은 전체 파장 영역에서 명확한 EPSC 동작을 보이는 것을 확인하였다. 또한 첫번째 입력 광 자극에서 발생하는 EPSC에 비해 연속적인 두번째 펄스의 경우 전체 파장 영역에서 더 높은 EPSC를 생성했는데, 이는 첫번째 입력 광 자극에서 기억된 정보에 기인한다. 따라서, 펄스 간격이 증가함에 따라 두번째 EPSC는 낮아질 수 있으며, 이는 입력 정보가 덜 중요해졌음을 나타낸다. 도 18의 EPSC 거동을 살펴보면, 빛을 비출 경우 EPSC가 증가하고, 비출 빛을 제거했을 때는 EPSC가 감소하며, 이때 빛을 제거하는 시점에 EPSC가 즉각적으로 빛을 비추기 전의 초기 상태로 돌아가는 것이 아니라 점진적으로 감소하는 형태를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 인간의 생체 시스템에서, 시냅스 전 뉴런에 자극이 가해지면 시냅스에서 화학물질이 발생하여 시냅스 후 뉴런으로 흘러가고, 이때 두 뉴런의 전위 차가 발생하며, 또한 자극이 제거되고 나서 막전위가 서서히 초기 값으로 돌아오는 인간의 시냅스 구동원리와 일치한다.

[0161] 또한, 도 18에 도시된 바와 같이 외부 자극을 연속으로 가하게 되면 EPSC가 점진적으로 증가하는데, 이때 첫번째 외부 신호에 의한 EPSC와 두번째 외부 신호에 의한 EPSC의 비율을 PPF하고 하며 이러한 PPF 특성을 도 19를 통해 확인할 수 있다.

[0162] 도 19는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 다양한 파장의 광 조명 하에서 PPF 특성을 그래프로 도시한 것이다.

[0163] 도 19를 참조하면, 전체 파장에 대한 각 펄스의 입사 광 출력 밀도는 $4.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 펄스 폭 및 펄스 간격은 각각 0.5 초일 때, 830 nm, 730 nm, 635 nm, 520 nm, 450 nm 및 405 nm 파장 광 펄스 하에서 펄스 간격에 대한 실시예 1의 PPF 값을 확인할 수 있다. 인간의 시냅스와 같이, 실시예 1은 전체 파장 영역에서 펄스 간격이 증가

함에 따라 PPF 값이 감소하는 것으로 나타났다.

- [0164] 도 20은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 각각 2, 8, 32, 128 회 펄스일 때 다양한 파장의 광 조명 하에서 광 트랜지스터의 STP에서 LTP로의 전이 특성을 그래프로 도시한 것이다.
- [0165] 도 20을 참조하면, 인간의 시냅스와 같이, 실시예 1은 펄스 수를 2 개에서 128 개로 늘렸을 때 전체 파장 광 펄스에서 STP에서 LTP로의 전이 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다.
- [0166] 시냅스 트랜지스터의 주요 장점은 단일 트랜지스터 내에서 기억 및 재학습 기능을 수행할 수 있어 추가 메모리 장치가 필요하지 않다는 점이다. 이러한 측면은 뉴로모픽 하드웨어 연구의 주요 목표와도 일치한다. 결과적으로 기억 및 재학습의 중추적인 기능은 시냅스 트랜지스터의 효율성에 중요한 역할을 한다. 이러한 시냅스 트랜지스터의 효율성과 관련하여, 도 21을 통해 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 학습 시스템 특성을 평가하였다.
- [0167] 도 21은 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 학습 시스템 특성을 그래프로 도시한 것으로, (a) 인간 시각 시스템의 학습-망각-재학습 행동의 개략도, (b) 다양한 파장의 광 조명 하에서 광 트랜지스터의 학습-망각-재학습 특성, (c) 개별 트랜지스터에서 측정된 학습 과정 후 광 트랜지스터의 정규화된 전류 스케일 및 (d) 50 초 후 망각 과정 이후 전류 스케일 및 (e) 3-4 회 광 펄스 이후 재학습 특성이다.
- [0168] 도 21a를 참조하면, 일련의 광 입력 펄스가 사람의 눈에 들어오면 인간의 뇌는 관련 이미지를 기억하는 과정을 거치는 것을 확인할 수 있다. 입력 광 펄스가 제거되면, 인간의 뇌는 이전에 기억했던 이미지를 서서히 잊어버리기 시작하는데, 이를 장기 약화(long-term depression, LTD)라고 한다. 그러나, 사람의 눈에 광 펄스를 반복적으로 주입하면 뇌는 저장된 기억 정보를 활용하여 처음에 주입된 펄스에 비해 훨씬 적은 수의 광 펄스를 사용하여 이미지를 인식할 수 있다. 이러한 인간 시각 시스템을 모방하기 위해 뉴로모픽 시냅스 소자에서도 학습-망각-재학습의 시냅스 모방 특성을 나타낸다. 뉴로모픽은 여러 번의 외부 자극이 가해질 경우, 시냅스 전위 차가 초기 값으로 되돌아오는 데 오랜 시간이 걸린다. 이때 초기 상태에서 외부 자극을 인가하는 과정을 '학습'이라고 하고, 오랜 시간을 거쳐 초기 값을 되돌아오는 과정을 '망각'이라고 하며, 이후 특정 자극을 재인가했을 때 학습 상태로 되돌아가는 과정을 '재학습'이라고 한다.
- [0169] 도 21b를 참조하면, UV-vis-NIR 파장 펄스 하에서 실시예 1의 학습-망각-재학습 특성을 확인할 수 있다. 학습 과정은 830 nm, 730 nm, 635 nm, 520 nm, 450 nm 및 405 nm 파장의 1 Hz 광 펄스를 $4.5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 의 전력 밀도로 20 회(20 펄스) 주기적으로 조사하는 방식으로 진행되었다. 전류는 입력 광 펄스 수에 따라 20 회까지 점진적으로 증가하였으며, 이는 도 20에 도시되어 있는 LTP 특성과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 광 펄스를 제거한 후 광 전류는 시간이 지남에 따라 점차 감소하여 최대 50 초까지 장기 기억(long-term memory, LTM) 특성을 보였으나, 두번째 입력 광 펄스를 실시예 1에 비추자 3-4 회의 펄스만으로 1차 조사되었을 때 20 회에서의 전류 값을 얻음으로써 빠른 재학습 과정을 보이는 것을 확인할 수 있다.
- [0170] 도 21c 내지 도 21e를 참조하면, 각각 도 21b에서의 학습-망각-재학습에 해당하는 이미지를 확인할 수 있다. 실시예 1은 830 nm, 730 nm, 635 nm, 520 nm, 450 nm 및 405 nm 파장에서 학습된 전류 값과 비교하여 50 초 후에 각각 44.6, 54.6, 34.0, 40.0, 32.1, 59.5 %의 전류 값을 유지하였다. 그러나 학습된 전류 값에 도달하는 데에는 3-4 회의 펄스만이 필요하였으며, 이는 실시예 1이 기억 및 재학습 특성을 모두 수행할 수 있음을 나타낸다.
- [0171] 즉, 실시예 1은 자외선 내지 적외선 영역의 파장을 20 회 인가하는 학습, 50 초의 망각, 이후 각 파장을 4 회 인가하는 재학습을 통해 인간의 학습-망각-재학습 특성을 모방할 수 있음을 확인하였다.
- [0173] **6. 광 트랜지스터의 컨덕턴스 상태(conductance state) 평가**
- [0174] 본 연구에서는, 소자의 기본적인 시냅스 기능 외에도 외부 광 펄스를 통해 광범위한 컨덕턴스 상태를 달성하는데 중점을 두었다. 정밀한 뉴로모픽 연산을 위해서는 전위 강화 시 선형성, 컨덕턴스 상태의 수 등 다양한 요소를 고려해야한다. 최근 광전자 시냅스 트랜지스터에 대한 연구는 주로 산소 공극 변조를 통해 감지 범위를 확장하거나 광 출력 밀도가 낮은 단색 파장 펄스 하에서 감도를 향상시키는 데 집중되어 있다. 그러나 시냅스 동작을 확실하게 모방하기 위해서는 의도적으로 많은 수의 컨덕턴스 상태를 추구할 필요가 있다. 여기서 컨덕턴스 상태란, 외부 자극에 따른 각각의 EPSC를 하나의 상태(state)라고 칭하며, 이러한 상태(state)를 얼마나 많이 확보할 수 있는지의 여부가 뉴로모픽 컴퓨팅의 정확도와 밀접하게 관련된다.
- [0175] 도 22는 본 발명의 일 실시예에 따른 광 트랜지스터의 컨덕턴스(전도도) 상태 특성을 그래프로 도시한 것으로,

(a) 다양한 파장의 광 조명 및 512 회 입력 광 펄스 하에서 광 트랜지스터의 컨덕턴스 상태 및 (b) 고투명 산화물 반도체 기준 파장에 따른 컨덕턴스 상태의 수이다.

[0176] 도 22a를 참조하면, 실시예 1의 멀티레벨 컨덕턴스 상태를 평가하는 데 사용된 측정 시스템의 개략도를 확인할 수 있다. 실시예 1의 멀티레벨 컨덕턴스 상태 평가는 830 nm, 730 nm, 635 nm, 520 nm, 450 nm 및 405 nm 펄스에서 펄스 폭 및 펄스 간격을 각각 0.5 초로 하여 수행되었다. 단색 파장을 방출하는 레이저 다이오드에서 나오는 조명의 주기성은 함수 발생기에 의해 조절되었고, 실시예 1은 512 회 이상의 광 펄스에 주기적으로 조명되었다.

[0177] 도 22b를 참조하면, 실시예 1이 광범위한 파장 영역에서 512 회의 많은 컨덕턴스 상태를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 기존의 고투명 산화물 반도체에 대한 일부 연구의 경우 256 회를 넘어 512 회, 1024 회의 컨덕턴스를 확보한 결과 있었으나, 이는 단일 파장에 국한되어 있는 한계가 있었다. 반면, 실시예 1은 고투명 산화물 및 산화 은(Ag_2O)의 이중접합을 통해 단일 소자 내에서 자외선 내지 적외선의 전 파장 영역에 대해 512 개의 컨덕턴스 상태를 확보하였다.

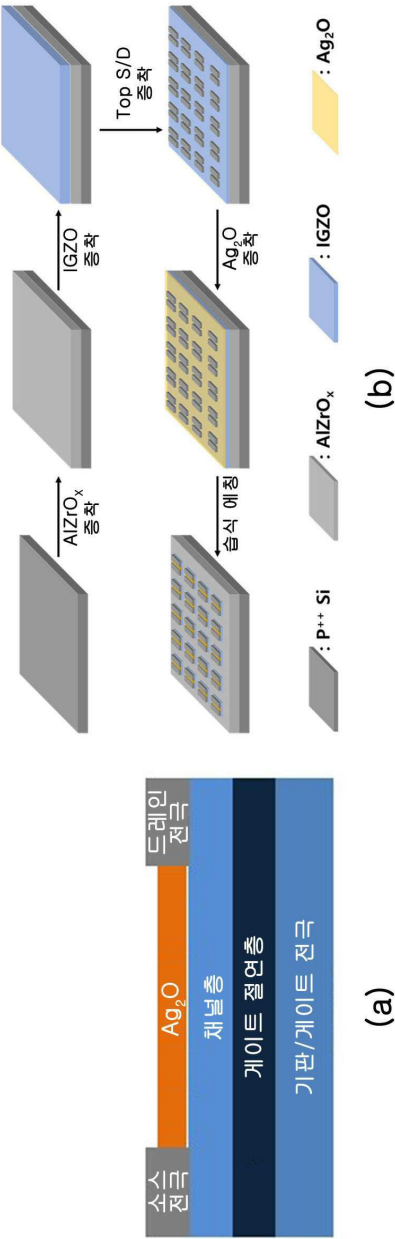
[0179] 본 발명에 의하면, 간단한 용액공정을 통해 좁은 밴드갭을 가지는 산화 은을 고투명 산화물 반도체와 이중접합 시킴으로써 대기 중 안정성을 지님과 동시에 자외선에서 적외선까지의 넓은 파장 영역대에서 고감도·고효율의 광응답 특성 및 높은 컨덕턴스 성능을 나타내는 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조할 수 있다.

[0180] 전술한 본원의 설명은 예시를 위한 것이며, 본원이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본원의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 쉽게 변형이 가능하다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 예를 들어, 단일형으로 설명되어 있는 각 구성 요소는 분산되어 실시될 수도 있으며, 마찬가지로 분산된 것으로 설명되어 있는 구성 요소들도 결합된 형태로 실시될 수 있다.

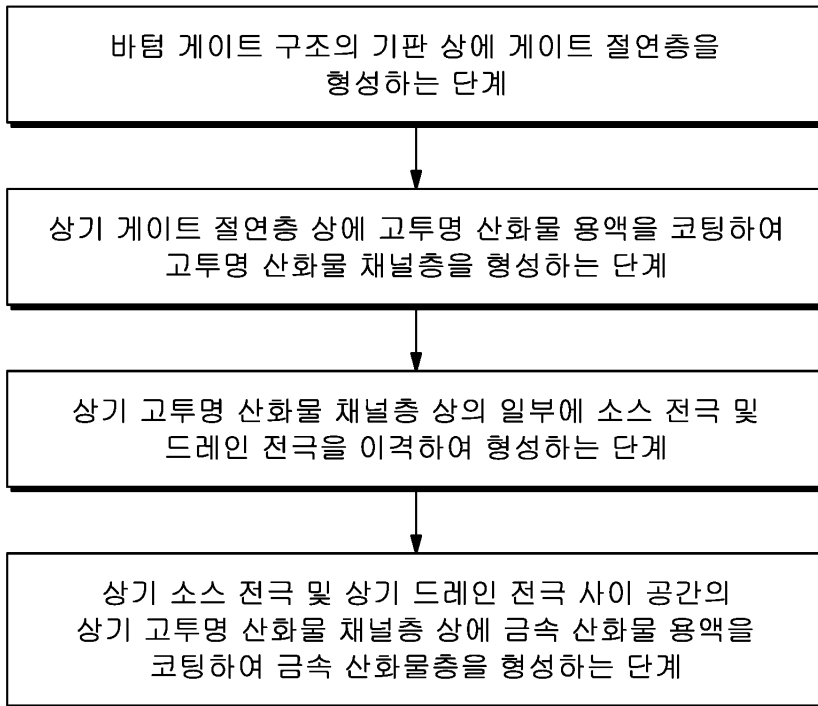
[0181] 본원의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 청구범위에 의하여 나타내어지며, 청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본원의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

도면

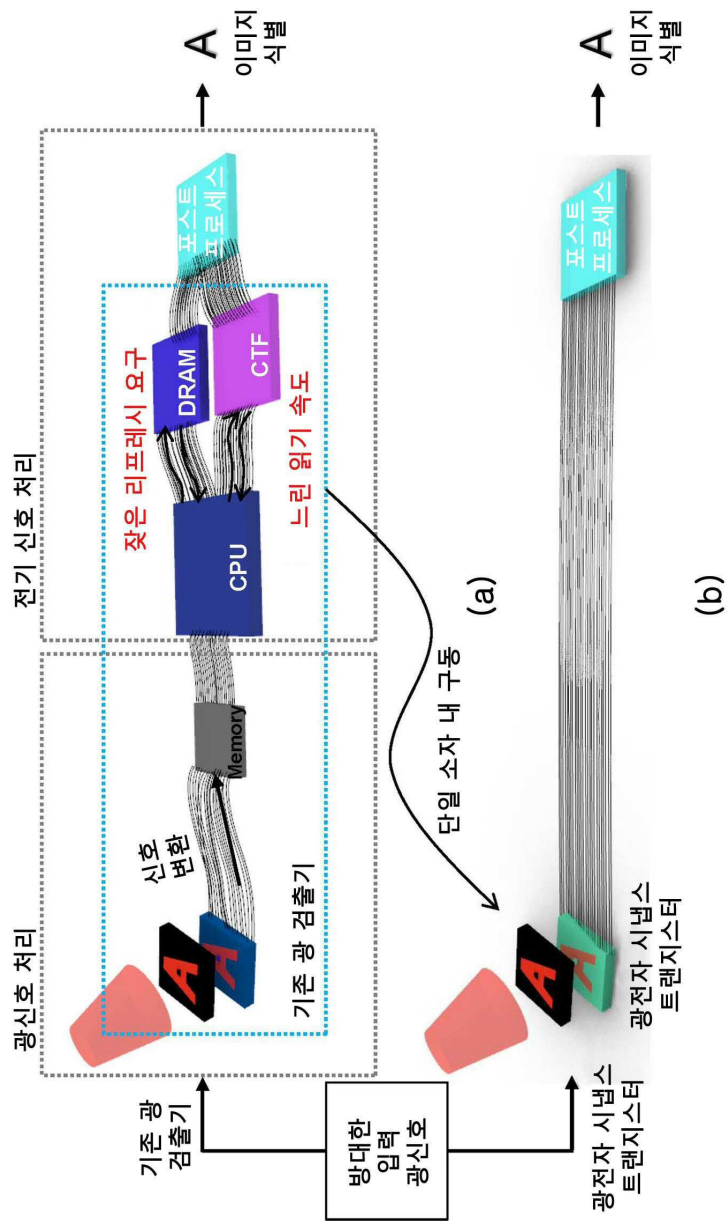
도면1



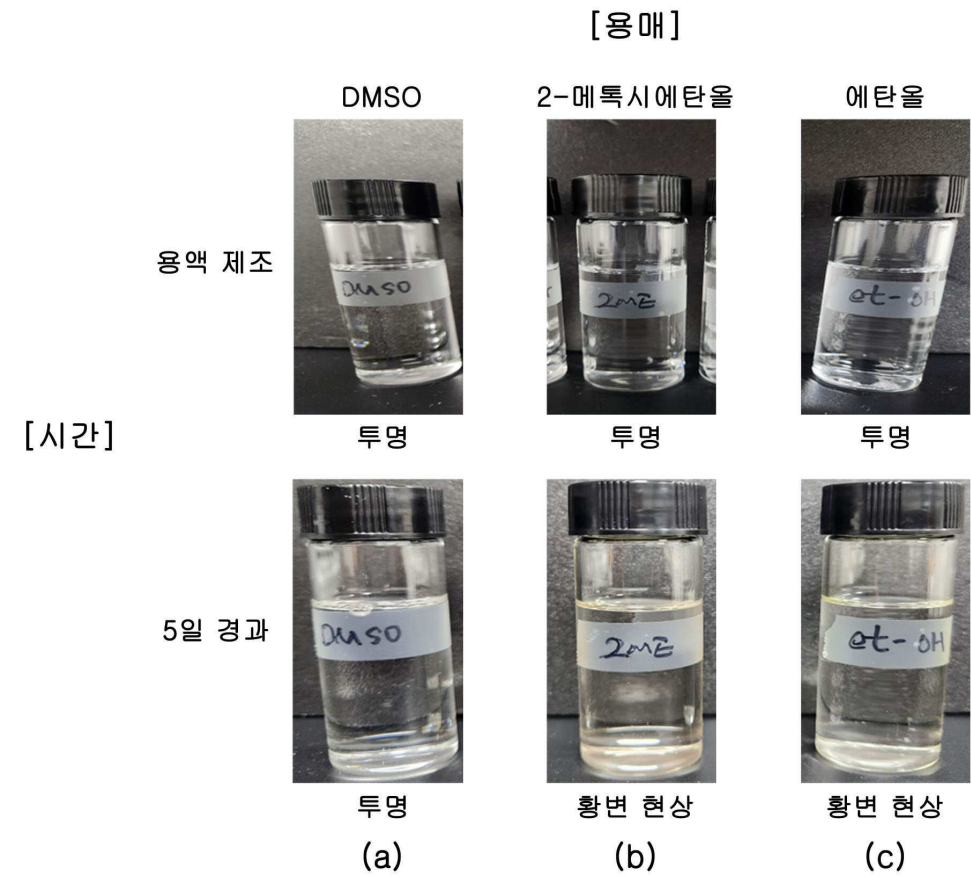
도면2



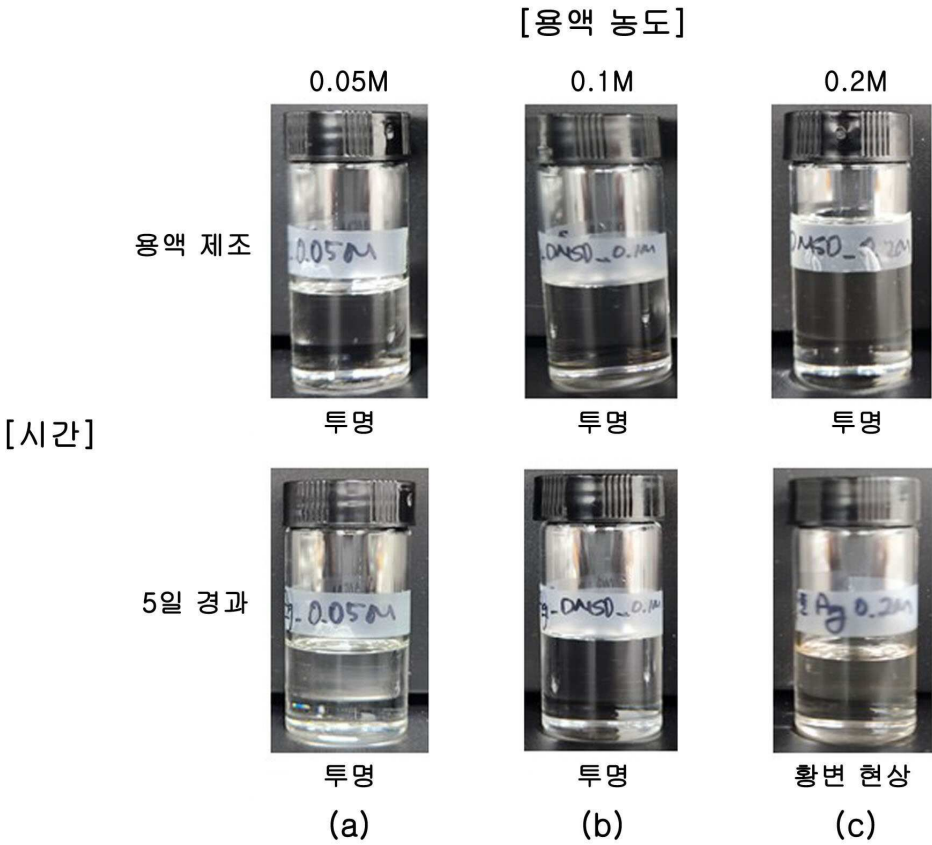
도면3



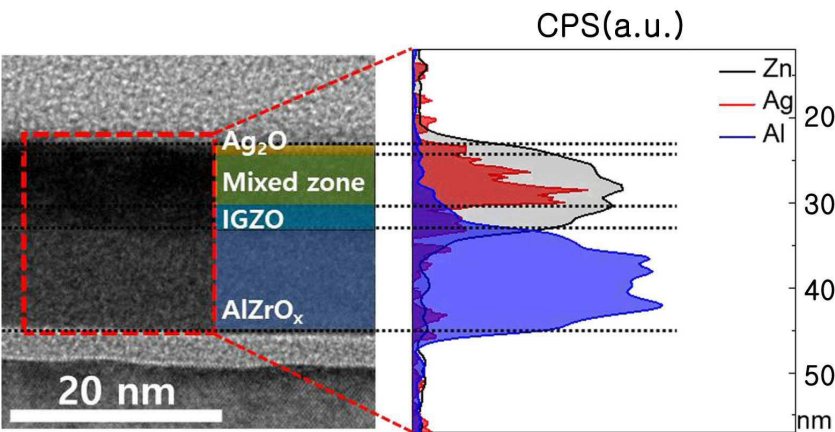
도면4



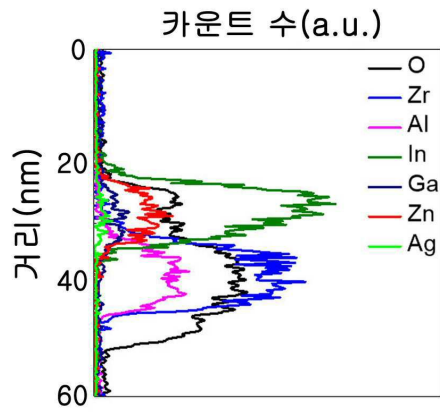
도면5



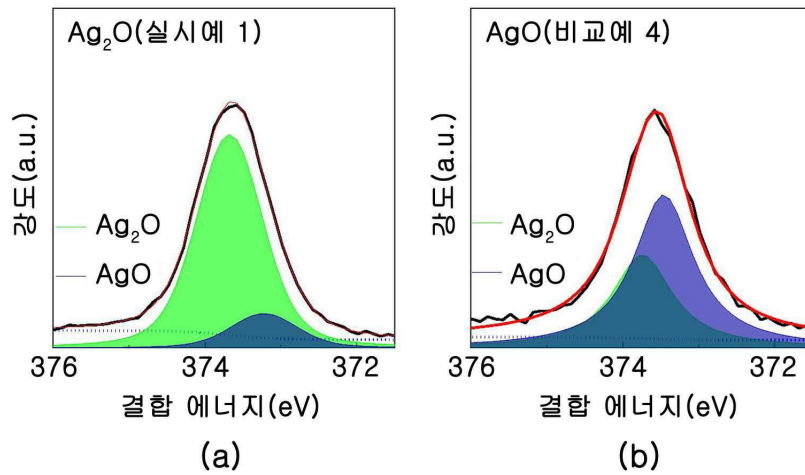
도면6



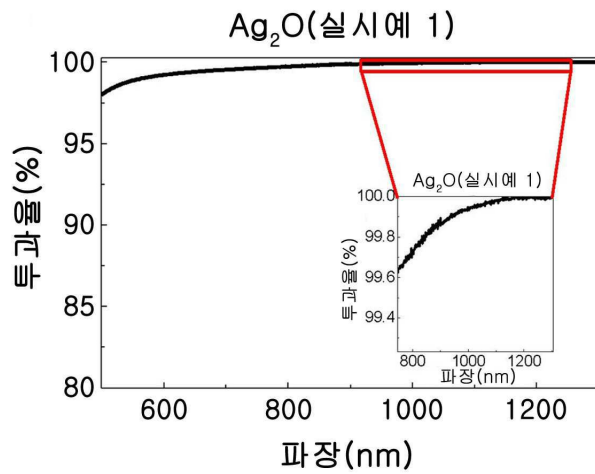
도면7



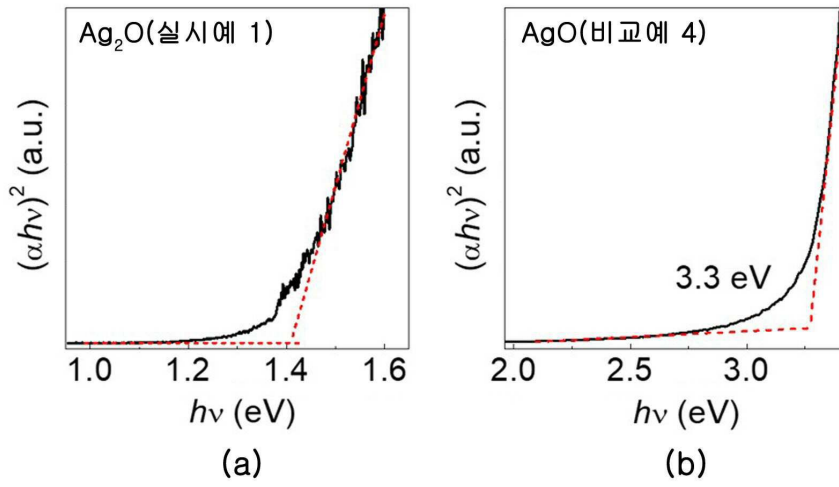
도면8



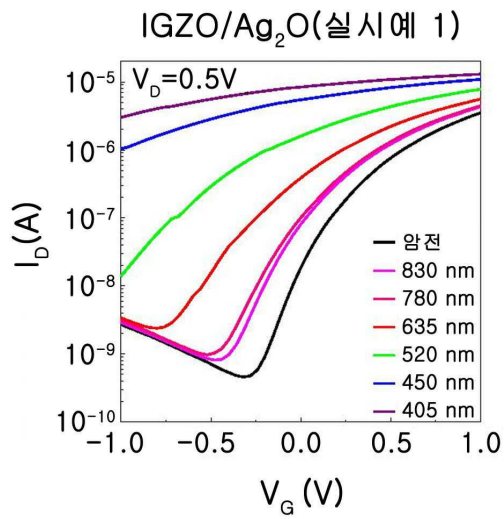
도면9



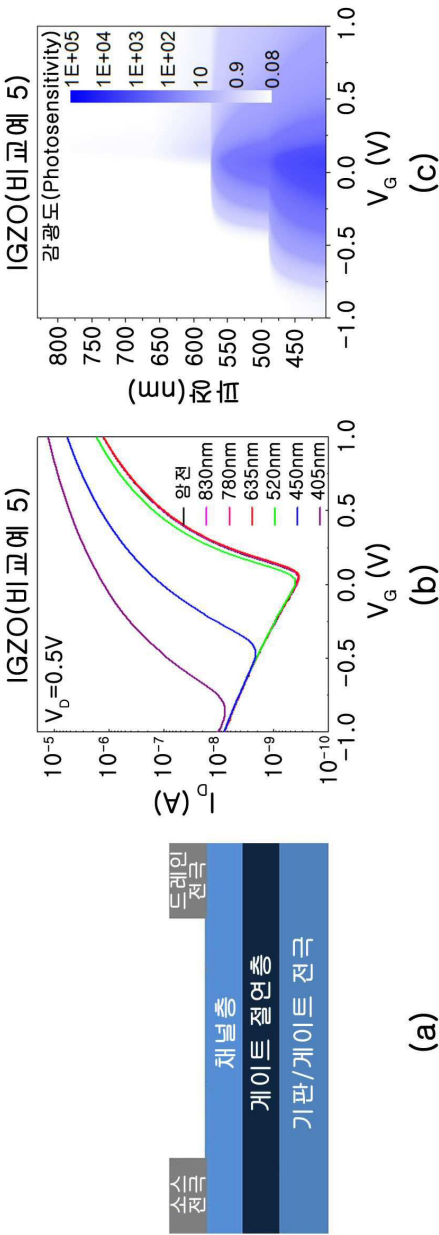
도면10



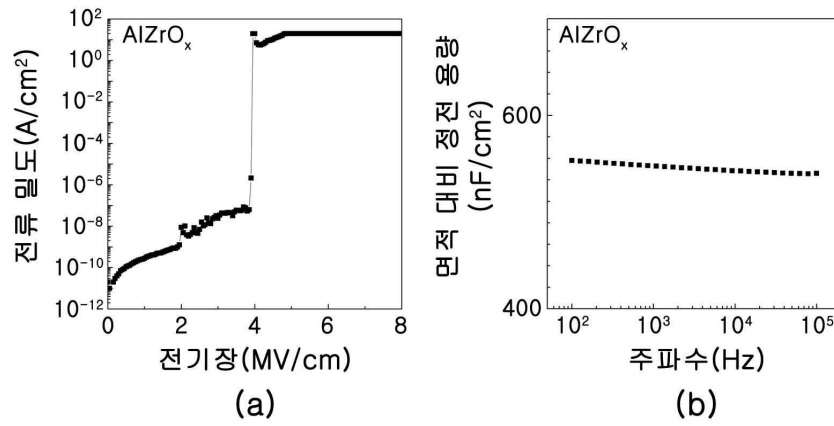
도면11



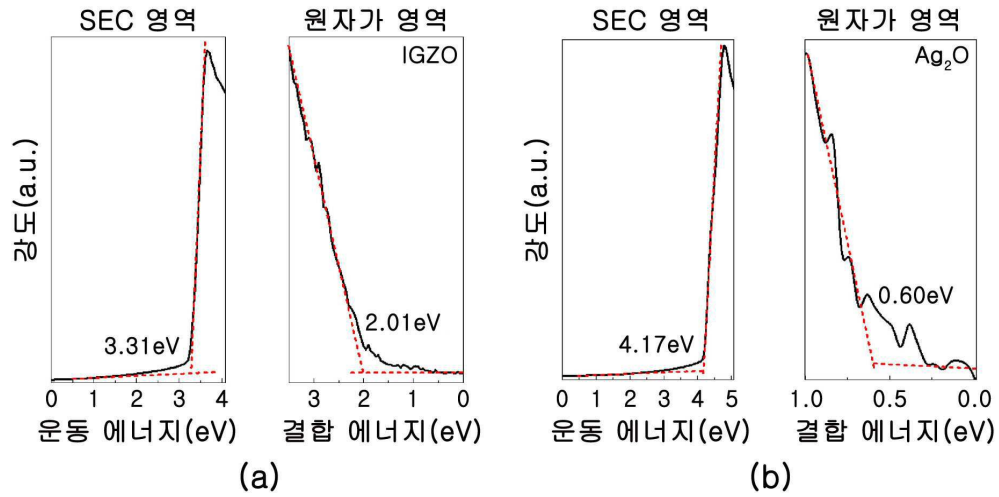
도면12



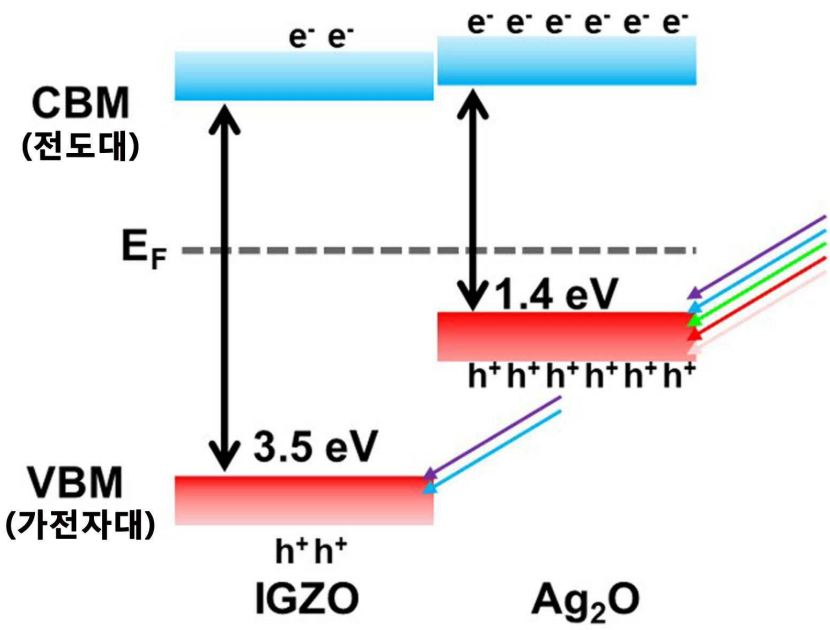
도면13



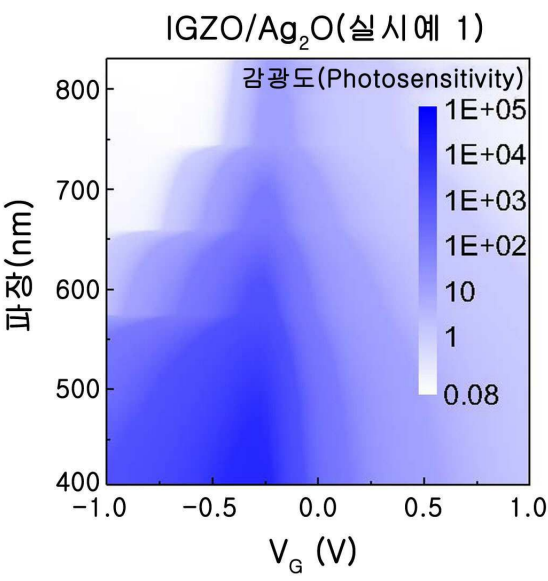
도면14



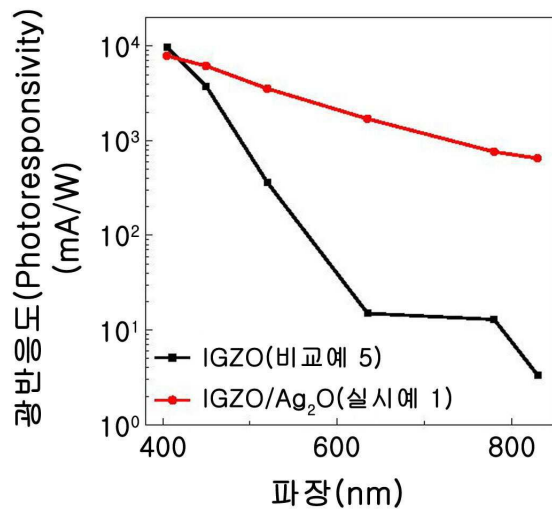
도면15



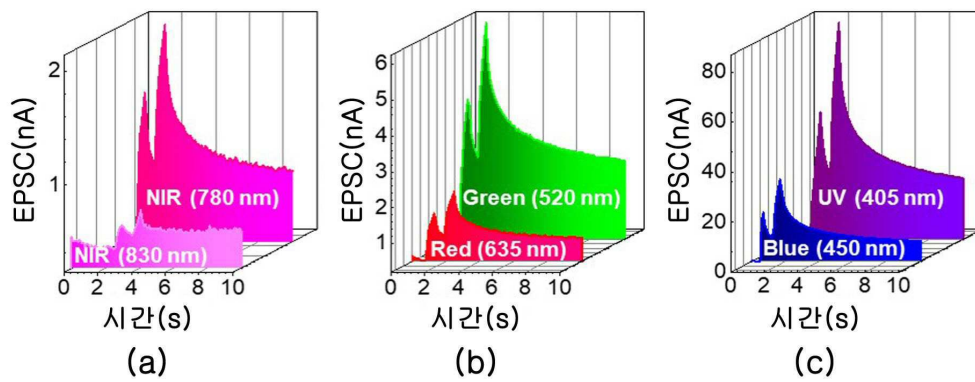
도면16



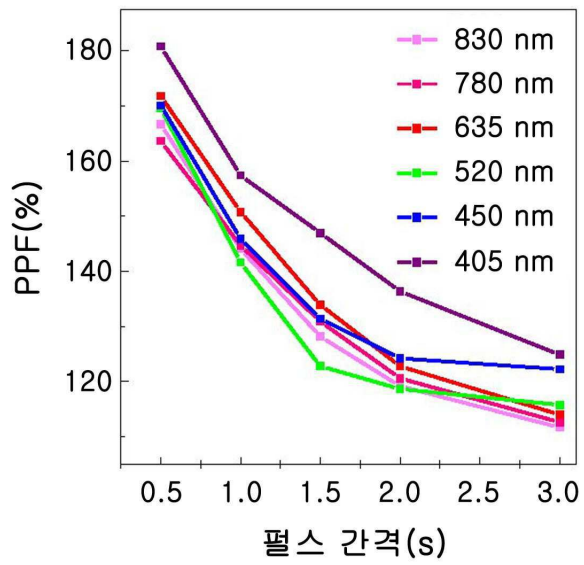
도면17



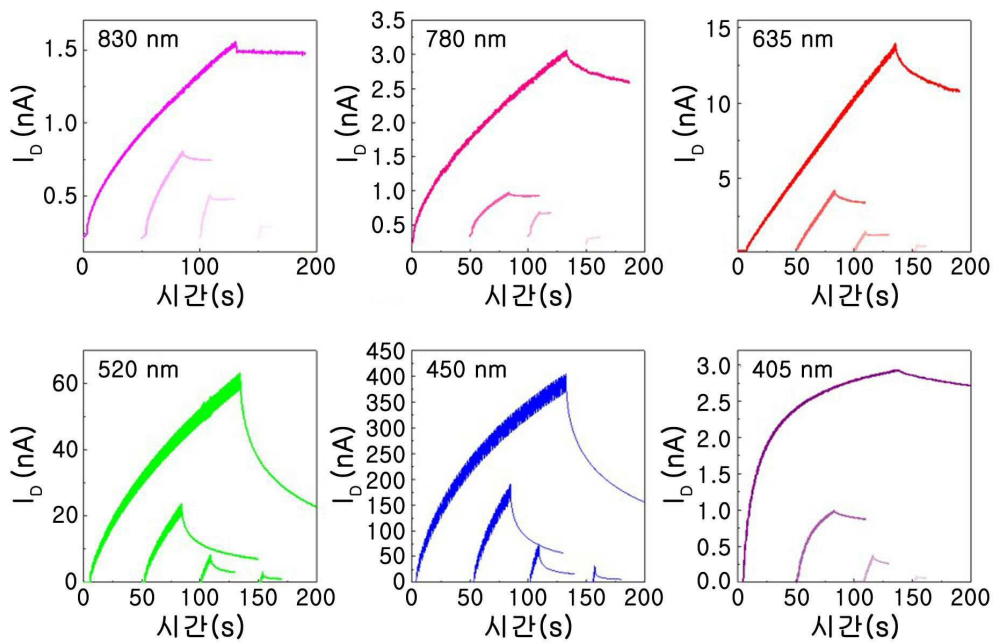
도면18



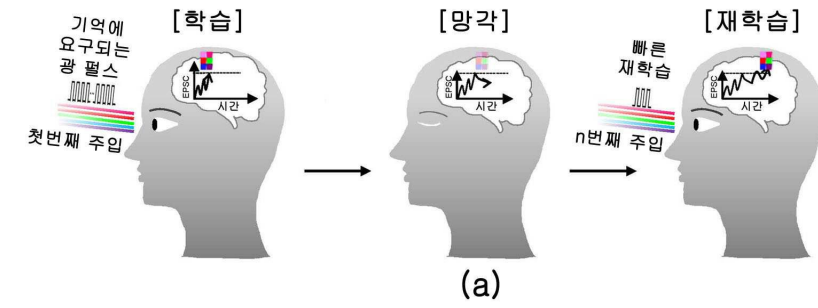
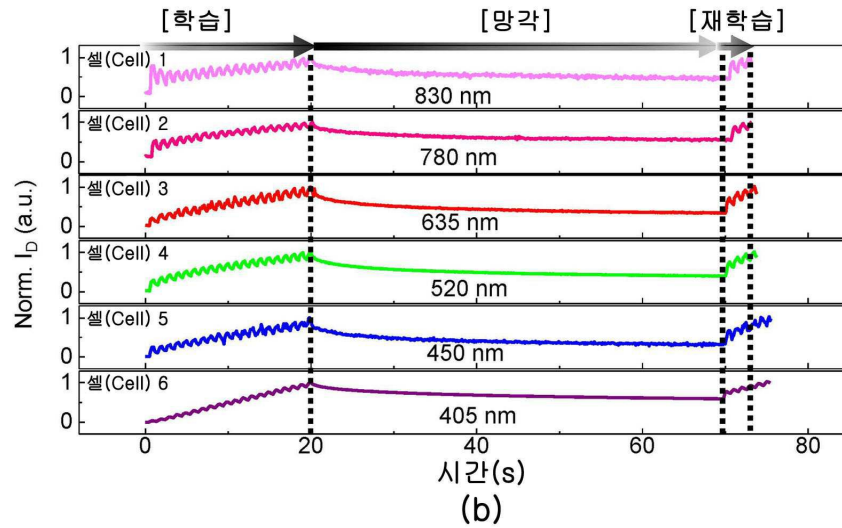
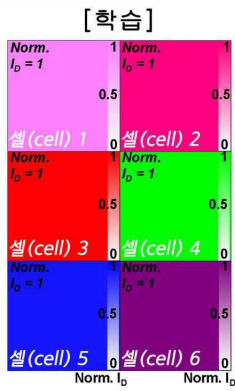
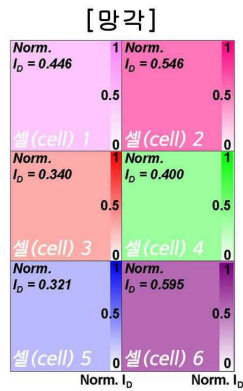
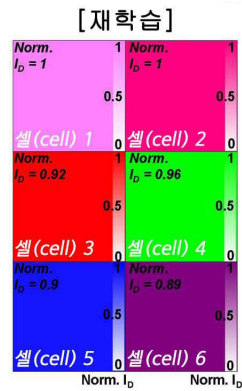
도면19



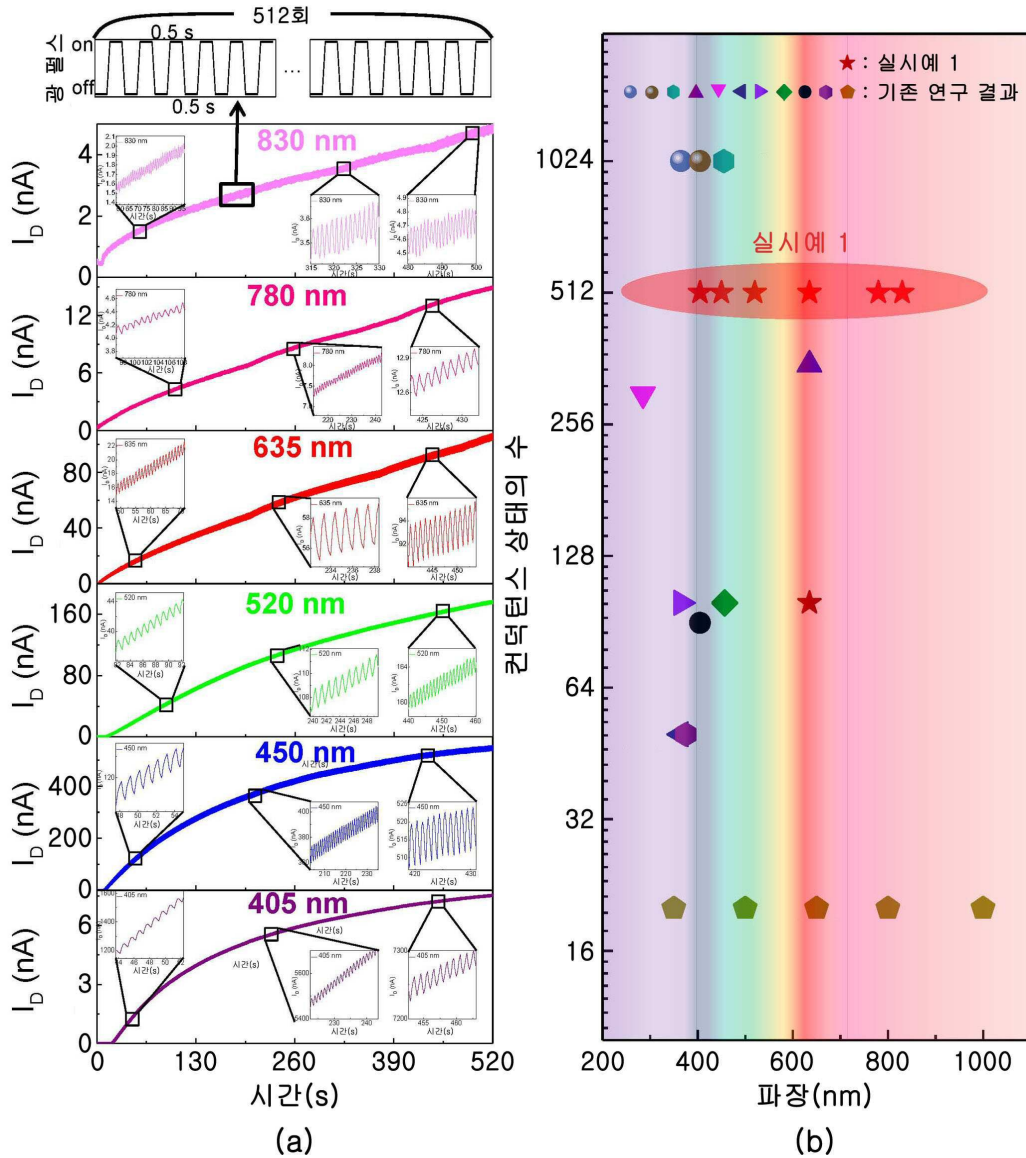
도면20



도면21



도면22



【심사관 직권보정사항】

【직권보정 1】

【보정항목】 청구범위

【보정세부항목】 청구항 1

【변경전】

광전자 시냅스 트랜지스터에 있어서,

바텀 게이트 구조의 기판;

상기 기판 상에 형성된 게이트 절연층;

상기 게이트 절연층 상에 형성된 고투명 산화물 채널층;

상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 이격하여 형성된 소스 전극 및 드레인 전극; 및

상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 형성된 금속 산화물;층을 포함하고,

상기 게이트 절연층은, AlZrO_x , Al_2O_3 , AlHfO_x , ZrO_2 및 HfO_2 으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상

의 물질을 포함하고,

상기 금속 산화물층은, 산화 은(Ag_2O)을 포함하는 것을 특징으로 하고,

상기 광전자 시냅스 트랜지스터는, 상기 고투명 산화물 채널층 및 상기 금속 산화물 층 사이에 형성된 상호 확산 층을 포함하는,

광전자 시냅스 트랜지스터.

【변경후】

광전자 시냅스 트랜지스터에 있어서,

바텀 게이트 구조의 기판;

상기 기판 상에 형성된 게이트 절연층;

상기 게이트 절연층 상에 형성된 고투명 산화물 채널층;

상기 고투명 산화물 채널층 상의 일부에 이격하여 형성된 소스 전극 및 드레인 전극; 및

상기 소스 전극 및 상기 드레인 전극 사이 공간의 상기 고투명 산화물 채널층 상에 형성된 금속 산화물층;을 포함하고,

상기 게이트 절연층은, AlZrO_x , Al_2O_3 , AlHfO_x , ZrO_2 및 HfO_2 으로 이루어진 군으로부터 선택되는 어느 하나 이상의 물질을 포함하고,

상기 금속 산화물층은, 산화 은(Ag_2O)을 포함하는 것을 특징으로 하고,

상기 광전자 시냅스 트랜지스터는, 상기 고투명 산화물 채널층 및 상기 금속 산화물 층 사이에 형성된 상호 확산 층을 포함하는,

광전자 시냅스 트랜지스터.