(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0008184
(43) 공개일자 2025년01월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
*H10F 30/21* (2025.01) *H10F 71/00* (2025.01)
(52) CPC특허분류
*H10F 30/289* (2025.01)
*H10F 71/00* (2025.01)
(21) 출원번호 10-2023-0088136
(22) 출원일자 2023년07월07일
심사청구일자 2023년07월07일

(71) 출원인
**경희대학교 산학협력단**
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
**강성준**
서울특별시 서초구 반포대로 275, 115동 2601호 (반포동,래미안퍼스티지아파트)
**정준형**
경기도 수원시 영통구 삼성로 11, 209동 802호 (신동, 래미안영통마크원 2단지)
(74) 대리인
**김종선, 이형석**

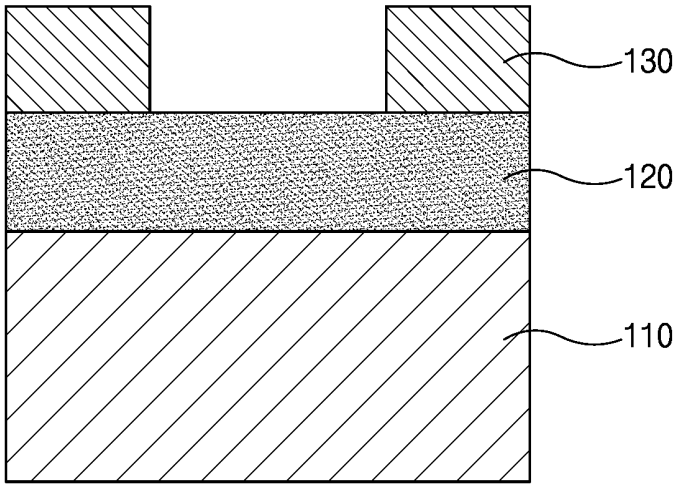
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 **광전자 시냅스 트랜지스터 및 그의 제조 방법**

## (57) 요 약

본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터는 바텀 게이트 구조의 기판, 기판 상에 배치되어 고투명 산화물 반도체에 카드뮴을 도핑하여 수직 확산 과정을 거쳐 형성된 혼합 구조의 박막인 활성층, 활성층 상에 이격되어 배치되는 소스-드레인 전극층을 포함한다. 이에 의해, 본 발명은 용액 공정을 통해 고투명 산화물 반도체에 카드뮴을 도핑함으로써 가시광 영역에서의 광-전자 변환 성능을 향상시킬 수 있다.

*대 표 도* - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

| | |
|---|---|
| 과제고유번호 | 1345350438 |
| 과제번호 | 2020R1A6A1A03048004 |
| 부처명 | 과학기술정보통신부 |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국연구재단 |
| 연구사업명 | 이공학학술연구기반구축 |
| 연구과제명 | 미래형 친환경 디스플레이 기술 연구 |
| 기 여 율 | 1/2 |
| 과제수행기관명 | 경희대학교(국제캠퍼스) |
| 연구기간 | 2020.06.01 ~ 2029.05.31 |

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

| | |
|---|---|
| 과제고유번호 | 1711182347 |
| 과제번호 | 2021R1A2C1009442 |
| 부처명 | 과학기술정보통신부 |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국연구재단 |
| 연구사업명 | 개인기초연구(과기정통부) |
| 연구과제명 | 고정밀 전자구조 제어를 통한 저에너지 광 감지용 고투명광센서 연구 |
| 기 여 율 | 1/2 |
| 과제수행기관명 | 경희대학교(국제캠퍼스) |
| 연구기간 | 2021.03.01 ~ 2024.02.29 |

# 명 세 서

## 청구범위

### 청구항 1

바텀 게이트 구조의 기판;

상기 기판 상에 배치되어 고투명 산화물 반도체에 카드뮴을 도핑하여 수직 확산 과정을 거쳐 형성된 혼합 구조의 박막인 활성층;

상기 활성층 상에 이격되어 배치되는 소스-드레인 전극층;을 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터.

### 청구항 2

제1항에 있어서,

상기 고투명 산화물 반도체는,

반도체는 ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO, ZnON 중 어느 하나로 이루어진 고투명 산화물 반도체인, 광전자 시냅스 트랜지스터.

### 청구항 3

제2항에 있어서,

상기 고투명 산화물 반도체는,

IGZO 인, 광전자 시냅스 트랜지스터.

### 청구항 4

바텀 게이트 구조의 기판 상에 활성층을 형성하는 단계; 및,

상기 활성층 상에 소스-드레인 금속층을 형성하는 단계;를 포함하며,

상기 활성층을 형성하는 단계는,

제1 용액을 코팅하고 어닐링하는 단계; 및,

상기 제1 용액이 어닐링된 박막 상에 제2 용액을 코팅하고 어닐링하는 단계;를 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

### 청구항 5

제4항에 있어서,

상기 제1 용액은,

ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO, ZnON 중 어느 하나로 이루어진 고투명 산화물 반도체 용액인, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

### 청구항 6

제5항에 있어서,

상기 제1 용액은,

IGZO 용액인, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

### 청구항 7

제6항에 있어서,

상기 제1 용액은,

질산인듐수화물(Indium nitrate hydrate)($In(NO_3)\cdot xH_2O$), 질산갈륨수화물(Gallium nitrate hydrate)($Ga(NO_3)_3\cdot xH_2O$), 질산아연육수화물(Zinc nitrate hexahydrate)($Zn(NO_3)_2\cdot 6H_2O$) 전구체와 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether)를 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

**청구항 8**

제6항에 있어서,

상기 제1 용액은,

상기 IGZO의 양이온 조성비(몰기준)는 In:Ga:Zn=6:1:2 인, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

**청구항 9**

제4항에 있어서,

상기 제2 용액은,

카드뮴(Cd) 용액인, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

**청구항 10**

제9항에 있어서,

상기 제2 용액은,

카드뮴(cadmium oxide, CdO) 전구체와 질산(nitric acid) 및 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether)를 포함하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

**청구항 11**

제10항에 있어서,

상기 제2 용액은,

상기 카드뮴(cadmium oxide, CdO) 전구체와 상기 질산(nitric acid)을 혼합하여 ($Cd(NO_3)_2$) 용액을 형성하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

**청구항 12**

제11항에 있어서,

상기 제2 용액은,

상기 ($Cd(NO_3)_2$) 용액을 상기 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether) 용매에 희석하여 $Cd(NO_3)$ 용액을 형성하는, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

**청구항 13**

제4항에 있어서,

상기 활성층 양이온의 조성비(몰기준)는 In:Ga:Zn:Cd = 6:1:2:1인, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

**청구항 14**

제4항에 있어서,

상기 제1 용액이 어닐링된 박막 상에 제2 용액을 코팅하고 어닐링하는 단계에서,

열처리 온도는 150 내지 350° C인, 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법.

**청구항 15**

제4항 내지 제14항 중 어느 한 항에 의해 제조된 광전자 시냅스 트랜지스터를 포함하는 전자장치.

## 발명의 설명

### 기 술 분 야

[0001] 본 발명은 광전자 시냅스 트랜지스터 및 그의 제조방법에 관한 것으로서, 특히, 용액 공정을 통해 고투명 산화물 반도체에 카드뮴을 도핑함으로써 가시광 영역에서의 광-전자 변환 성능을 향상시킬 수 있는 광전자 시냅스 트랜지스터 및 그의 제조방법에 관한 것이다.

### 배 경 기 술

[0002] 첨단 인공지능(AI) 및 사물인터넷(IoT) 기술에 대한 수요가 계속 증가함에 따라 뉴로모픽 장치에 대한 연구는 기존 폰 노이만 아키텍처 기반 컴퓨팅의 한계를 해결하기 위한 상당한 추진력을 얻고 있다. 데이터 저장과 처리가 분리되어 이루어지는 폰 노이만 구조와 달리 인간의 뇌는 뉴런과 시냅스를 통해 데이터 저장과 처리를 동시에 수행함으로써 전력 소모를 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있다. 최근에는 상변화 메모리, 멤리스터, 박막 트랜지스터(TFT) 등 다양한 인공 시냅스 구조가 개발되고 있다.

[0003] 특히, 전기신호를 기반으로 한 뉴로모픽 소자의 연구가 이루어지고 있으나, 이는 인터커넥트에서 발생하는 소비전력, 집적도 등의 해결해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로, 전기신호가 아닌 광신호를 통해 아날로그적인 전하 저장을 이룩하고자 하는 광전자 시냅스 소자에 대한 연구가 대두되고 있다.

[0004] 복잡한 회로 구성을 통해 아날로그적인 정보저장을 이룩한 기존의 실리콘 기반의 시냅틱 트랜지스터와는 달리, 양자점, 페로브스카이트, 유기물 반도체 등의 다양한 소재에서 발생하는 결함 상태, 전하 트래핑 등의 현상을 이용하여 단일 소자 내에서 아날로그적인 전하 저장을 이룩하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

[0005] 상술한 양자점, 페로브스카이트, 유기물 반도체 등은 소재 자체의 광전자 변환의 효율이 우수하나, 대기중의 공기/수분에 의한 소자의 성능 저하가 나타남에 따라 이러한 문제를 해결하기 위해, 비교적 대기중에서의 안정성이 뛰어난 산화물 반도체의 결함 상태를 이용하고자 하는 연구가 필요한 실정이다.

### 선행기술문헌

#### 특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 제10-2015-0072888호(2015.06.30.공개)

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 용액 공정을 통해 고투명 산화물 반도체에 카드뮴을 도핑함으로써 가시광 영역에서의 광-전자 변환 성능을 향상시킬 수 있는 광전자 시냅스 트랜지스터 및 그의 제조방법을 제공하는 것이다.

### 과제의 해결 수단

[0008] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터는 바텀 게이트 구조의 기판; 상기 기판 상에 배치되어 고투명 산화물 반도체에 카드뮴을 도핑하여 수직 확산 과정을 거쳐 형성된 혼합 구조의 박막인 활성층; 상기 활성층 상에 이격되어 배치되는 소스-드레인 전극층;을 포함할 수 있다.

[0009] 또한, 상기 고투명 산화물 반도체는, 반도체는 ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO, ZnON 중 어느 하나로 이루어진 고투명 산화물 반도체일 수 있다.

[0010] 바람직하게, 상기 고투명 산화물 반도체는, IGZO 일 수 있다.

[0011] 한편, 본 발명의 다른 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 방법은 바텀 게이트 구조의 기판 상에 활성층을 형성하는 단계; 및, 상기 활성층 상에 소스-드레인 금속층을 형성하는 단계;를 포함하며, 상기 활성층

을 형성하는 단계는, 제1 용액을 코팅하고 어닐링하는 단계; 및, 상기 제1 용액이 어닐링된 박막 상에 제2 용액을 코팅하고 어닐링하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0012] 또한, 상기 제1 용액은, ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO, ZnON 중 어느 하나로 이루어진 고투명 산화물 반도체 용액일 수 있다.

[0013] 바람직하게, 상기 제1 용액은, IGZO 용액일 수 있다.

[0014] 또한, 상기 제1 용액은, 질산인듐수화물(Indium nitrate hydrate)($In(NO_3)\cdot xH_2O$), 질산갈륨수화물(Gallium nitrate hydrate)($Ga(NO_3)_3\cdot xH_2O$), 질산아연육수화물(Zinc nitrate hexahydrate)($Zn(NO_3)_2\cdot 6H_2O$) 전구체와 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether)를 포함할 수 있다.

[0015] 또한, 상기 제1 용액은, 상기 IGZO의 양이온 조성비(몰기준)는 In:Ga:Zn=6:1:2 일 수 있다.

[0016] 또한, 상기 제2 용액은, 카드뮴(Cd) 용액일 수 있다.

[0017] 또한, 상기 제2 용액은, 카드뮴(cadmium oxide, CdO) 전구체와 질산(nitric acid) 및 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether)를 포함할 수 있다.

[0018] 또한, 상기 제2 용액은, 상기 카드뮴(cadmium oxide, CdO) 전구체와 상기 질산(nitric acid)을 혼합하여 ($Cd(NO_3)_2$) 용액을 형성할 수 있다.

[0019] 또한, 상기 제2 용액은, 상기 ($Cd(NO_3)_2$) 용액을 상기 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether) 용매에 희석하여 $Cd(NO_3)$ 용액을 형성할 수 있다.

[0020] 또한, 상기 활성층 양이온의 조성비(몰기준)는 In:Ga:Zn:Cd = 6:1:2:1일 수 있다.

[0021] 또한, 상기 제1 용액이 어닐링된 박막 상에 제2 용액을 코팅하고 어닐링하는 단계에서, 열처리 온도는 150 내지 350° C일 수 있다.

[0022] 한편, 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 전자소자는 상술한 방법에 의해 제조된 광전자 시냅스 트랜지스터를 포함할 수 있다.

## 발명의 효과

[0023] 상기와 같은 본 발명에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터 및 그의 제조방법은 용액 공정을 통해 고투명 산화물 반도체에 카드뮴을 도핑함으로써 가시광 영역에서의 광-전자 변환 성능을 향상시킬 수 있다.

[0024] 더불어, 산화물 반도체의 결함 상태를 이용하여 대기중에서의 안정성을 도모할 수 있다.

[0025] 나아가, 활성층의 밀도 증가를 통한 전기적 특성의 안정성을 확보할 수 있다.

## 도면의 간단한 설명

[0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터를 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조하는 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조공정을 개략적으로 나타내는 공정순서도이다.

도 4는 도 3의 (S250) 단계에서 형성된 활성층의 EDS 매핑 이미지이다.

도 5는 도 3의 (S260) 단계에서 활성층의 단면을 나타내는 투과전자현미경(HR-TEM) 이미지 및 EDS 라인 스캐닝 이미지이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 활성층의 XRD 패턴 및 XRR 스펙트럼을 나타나는 그래프이다.

도 7은 본 발명의 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 전기적 특성을 나타내는 그래프이다.

도 8 및 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 활성층의 광전자분광(XPS) 분석 결과를 나타내는 도면이다.

도 10은 본 발명의 비교예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 뉴모로픽 특성을 나타내는 도면이다.

도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 게이트 전압의 변화에 따른 녹색/청색 파장 판별성을 나타내는 그래프이다.

도 12는 본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터를 이용한 3×3 어레이에 녹색청색(GB)광 및 청색(B)광을 조사한 후 전도도를 나타내는 도면이다.

## *발명을 실시하기 위한 구체적인 내용*

[0027] 이하에서 본 발명의 기술적 사상을 명확화하기 위하여 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세하게 설명하도록 한다. 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 기능 또는 구성요소에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략할 것이다. 도면들 중 실질적으로 동일한 기능구성을 갖는 구성요소들에 대하여는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 동일한 참조번호들 및 부호들을 부여하였다. 설명의 편의를 위하여 필요한 경우에는 장치와 방법을 함께 서술하도록 한다.

[0028] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터를 나타내는 도면이다.

[0029] 도 1을 참조하면, 본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터는 바텀 게이트 구조의 트랜지스터로서, 기판(110) 상에 활성층(120)과 소스-드레인 전극층(130)이 적층된 구조를 포함할 수 있다.

[0030] 기판(110)은 게이트 역할로, 유리와 같이 투명한 재질로 이루어질 수 있다. 실시예에서, 기판(110)은 게이트 절연막과 게이트 전극을 포함하는 구조일 수 있다. 여기서, 게이트 절연막은 이산화규소($SiO_2$)와 같은 유전체로 이루어질 수 있으며, 투과도가 일정 수준 이상일 수 있다. 예를 들어, 기판(110)의 투과도는 90% 이상일 수 있다.

[0031] 활성층(120)은 고투명 산화물 반도체와 카드뮴(Cd)이 혼합된 구조의 박막일 수 있다. 즉, 활성층(120)은 용액 공정을 통해 고투명 산화물 반도체에 카드뮴을 도핑하여 형성된 혼합 구조의 박막일 수 있다.

[0032] 여기서, 산화물 반도체는 ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO, ZnON 중 어느 하나로 이루어진 고투명 산화물 반도체일 수 있으며, 전술한 물질들 중 둘 이상의 물질이 적층되어 이루어질 수도 있다. 바람직하게, 산화물 반도체는 IGZO 일 수 있다. 이러한 활성층(120)은 일정 수준 이상의 투과도를 가질 수 있다. 예를 들어, 활성층(120)의 투과도는 90% 이상일 수 있다.

[0033] 소스-드레인 전극층(130)은 100nm의 알루미늄으로 형성될 수 있다.

[0034] 이때, 소스-드레인 전극층(130)은 활성층(120)이 입사광에 노출되도록 상호 이격되어 형성될 수 있다.

[0035] 본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터는 활성층이 카드뮴(Cd)을 산화물 반도체에 수직 확산 과정을 거쳐 도핑하여 균일하게 혼합된 구조를 가짐으로써, 녹색/청색 영역의 가시광선을 선택적으로 자극할 수 있다.

[0036] 이에, 본 발명은 가시광선 자극을 사용하여 흥분성 시냅스후 전위(excitatory postsynaptic potential, EPSC), 쌍-펄스 촉진(paired-pulse facilitation, PPF), 단기 가소성(short-term potentiation, STP)에서 장기 가소성(long-term potentiation, LTP)으로의 전환을 포함한 장치의 기본적인 시냅스 특성을 발휘할 수 있다.

[0037] 또한, 본 발명은 차세대 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템을 위한 가시광선 광전자 시냅스 트랜지스터로 활용될 수 있다.

[0038] 또한, 본 발명을 이용하면, 가시광선을 흡수하여 전기신호로 바꿀 수 있는 투명한 광센서로 활용될 수 있다.

[0039] 결국, 본 발명은 투명 전자소자를 사용하는 다양한 분야에서 활용될 수 있다. 특히, 스마트 전자소자용 투명센서, 웨어러블 전자소자용 투명센서, 스마트 자동차용 투명센서, 로봇/드론 기술 등의 산업 분야에 활용될 수 있다.

[0040] 나아가, 본 발명은 스마트 빌딩 및 시스템의 산업 분야에도 활용될 수 있다.

[0042] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조하는 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

[0043] 도 1 및 도 2를 참조하면, 광전자 시냅스 트랜지스터를 제조하는 방법은 바텀 게이트 구조의 기판(110) 상에 제1 용액을 코팅하여 증착할 수 있다(S210). 여기서, 코팅 방법은 스핀-코팅을 이용할 수 있다.

[0044] 이때, 제1 용액은 산화물 반도체 용액일 수 있다. 여기서, 산화물 반도체 용액은 ZnO, IZO, IGZO, ZTO, IZATO, GIGO, ZnON 중 어느 하나로 이루어진 고투명 산화물 반도체 용액일 수 있으며, 전술한 물질들 중 둘 이상의 물질이 적층되어 이루어질 수도 있다. 바람직하게, 산화물 반도체 용액은 IGZO 용액일 수 있다. 이러한 제1 용액

인 IGZO는 질산인듐수화물(Indium nitrate hydrate)($In(NO_3)\cdot xH_2O$), 질산갈륨수화물(Gallium nitrate hydrate)($Ga(NO_3)_3\cdot xH_2O$), 질산아연육수화물(Zinc nitrate hexahydrate)($Zn(NO_3)_2\cdot 6H_2O$) 전구체와 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether)를 포함하는 용액일 수 있다.

[0045] 실시예에서, 제1 용액인 IGZO의 양이온 조성비(몰기준)는 In:Ga:Zn=6:1:2 일 수 있다.

[0046] 그리고, 어닐링을 수행한다(S220). 실시예에서, 기판(110) 상에 제1 용액이 코팅된 상태에서 350 ° C의 온도에서 열처리할 수 있다.

[0047] 이에, 제1 용액에 의한 산화물 반도체 박막이 형성될 수 있다.

[0048] 이어, 제1 용액이 어닐링된 상태인 산화물 반도체 박막 상에 제2 용액을 코팅하여 도핑할 수 있다(S230). 여기서, 코팅 방법은 스핀-코팅을 이용할 수 있다.

[0049] 여기서, 제2 용액은 카드뮴(Cd)일 수 있다. 바람직하게, 제2 용액은 카드뮴(cadmium oxide, CdO) 전구체와 질산(nitric acid) 및 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether)를 포함하는 용액일 수 있다.

[0050] 즉, 산화물 반도체 박막 상에 카드뮴을 스핀 코팅을 통해 도핑할 수 있다.

[0051] 그리고, 어닐링을 수행한다(S240). 이에, 산화물 반도체 박막 내부로 카드뮴을 확산시킬 수 있다. 이때, 열처리 온도는 150 내지 350° C일 수 있다. 실시예에서, 제1 용액이 어닐링된 상태인 산화물 반도체 박막 상에 제2 용액인 카드뮴이 도핑된 상태에서 300° C의 온도에서 열처리할 수 있다.

[0052] 이에, 산화물 반도체 박막 상에 카드뮴이 도핑된 활성층(120)이 형성될 수 있다. 즉, 산화물 반도체와 카드뮴이 균일하게 혼합된 구조의 활성층(120)이 형성될 수 있다. 실시예에서, 활성층(120) 양이온의 조성비(몰기준)는 In:Ga:Zn:Cd = 6:1:2:1일 수 있다.

[0053] 이로써, 기판(110) 상에 활성층(120)이 형성되어 배치된다(S250).

[0054] 그리고, 활성층(120) 상에 소스-드레인 전극층(130)을 증착하여 형성한다(S260).

[0056] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 공정을 개략적으로 나타내는 공정순서도이다.

[0057] 도 2 및 도 3을 참조하여, 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 제조 공정을 설명한다. 구체적으로, 활성층(120)의 제조 공정을 중심으로 설명한다.

[0058] 실시예로, 먼저, 활성층(120)의 제1 용액(201)을 마련한다.

[0059] 제1 용액(201)은 고투명 산화물 반도체인 IGZO 용액으로, 질산인듐수화물(Indium nitrate hydrate)($In(NO_3)\cdot xH_2O$), 질산갈륨수화물(Gallium nitrate hydrate)($Ga(NO_3)_3\cdot xH_2O$), 질산아연육수화물(Zinc nitrate hexahydrate)($Zn(NO_3)_2\cdot 6H_2O$) 전구체와 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether)를 포함한다. 이때, IGZO의 양이온 조성비(몰기준)는 In:Ga:Zn=6:1:2 일 수 있다.

[0060] 즉, 질산인듐수화물(Indium nitrate hydrate)($In(NO_3)\cdot xH_2O$), 질산갈륨수화물(Gallium nitrate hydrate)($Ga(NO_3)_3\cdot xH_2O$), 질산아연육수화물(Zinc nitrate hexahydrate)($Zn(NO_3)_2\cdot 6H_2O$) 을 몰비 6:1:2로 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르에 용해시킨 후 46μL의 질산을 첨가하여 투명한 제1 용액인 IGZO 용액을 마련하였다. 총 몰비가 0.1M의 IGZO 용액을 3 시간 동안 격렬하게 교반하고, 사용 전에 24 시간을 유지하였다.

[0061] 그리고, 제2 용액(203)을 마련한다.

[0062] 제2 용액(203)은 카드뮴(cadmium oxide, CdO) 전구체와 질산(nitric acid) 및 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether)를 포함한다.

[0063] 한편, 제2 용액은 카드뮴(cadmium oxide, CdO) 전구체와 질산(nitric acid)을 혼합하여 $CdO_{(s)} + HNO_{3(aq)} \rightarrow Cd(NO_3)_{2(aq)} + H_2O_{(aq)}$의 반응을 통해 ($Cd(NO_3)_2$) 용액이 형성될 수 있다. 그리고, ($Cd(NO_3)_2$) 용액을 에틸렌 글리

콜 모노메틸 에테르(ethylene glycol monomethyl ether) 용매에 희석하여 $Cd(NO_3)$ 용액을 형성할 수 있다.

[0064] 즉, 0.0428 g의 카드뮴(cadmium oxide, CdO)분말을 10 mL의 에틸렌 글리콜 모노메틸 에테르에 용해시킨 후, 0.2 mL의 질산을 첨가하여 제2 용액(203)인 카드뮴(CdO)을 마련하였다. 이때, 총 몰비가 0.03 M의 카드뮴(CdO) 용액을 균질한 투명 용액이 얻어질 때까지 교반하였다. 제1 용액(201) 및 제2 용액(203)은 코팅 전에 0.2 μm PTFE 멤브레인 필터를 사용하여 필터링하였다.

[0065] (S210) 단계에서, 기판(110) 상에 제1 용액(201)을 스핀 코팅하여 증착하는 공정을 수행한다. 이때, 기판(110)은 Si 웨이퍼에 100nm의 두께로 성장된 $SiO_2$ 기판을 각각 15분 동안 탈이온수, 아세톤 및 IPA로 초음파 처리하였다. 초음파 처리 후, 기판(110)을 $N_2$ 가스에 의해 불어 넣은 다음, 20분 동안 UV-오존 처리하여 친수성 표면을 얻고 기판(110) 상의 유기 잔류 물을 제거하였다. 이후, 기판(110) 상에 제1 용액(201)을 4000 rpm에서 20초 동안 스핀 코팅하였다.

[0066] (S220) 단계에서, 제1 용액(201)이 코팅된 기판(110)에 대하여 어닐링 공정을 수행한다. 이때, 핫 플레이트를 이용하여 350° C에서 1시간 동안 열처리하였다.

[0067] (S230) 단계에서, 어닐링된 IGZO 박막 상에 제2 용액(203)을 스핀 코팅하여 도핑하는 공정을 수행한다. 즉, IGZO 박막 상에 제2 용액(203)을 4000 rpm에서 30초 동안 스핀 코팅하였다.

[0068] (S240) 단계에서, IGZO 박막 상에 제2 용액(203)이 확산(diffusion)되도록 어닐링 공정을 수행한다. 여기서, 열처리 온도는 150 내지 350° C일 수 있다. 이때, 다양한 실시예로 핫 플레이트를 이용하여 200, 250, 및 300 ° C에서 1시간 동안 열처리하였다. 즉, 실시예1은 200° C에서 어닐링된 활성층(IGZO:Cd200)이고, 실시예2는 250° C에서 어닐링된 활성층(IGZO:Cd250)이며, 실시예3은 300° C에서 어닐링된 활성층(IGZO:Cd300)이다.

[0069] (S250) 단계에서, 기판(110) 상에 IGZO 박막에 카드뮴이 도핑되어 균일하게 혼합된 구조(IGZO:Cd)의 활성층(120)이 형성되었다. 이때, 활성층(120) 양이온의 조성비(몰기준)는 In:Ga:Zn:Cd=6:1:2:1일 수 있다.

[0070] (S260) 단계에서, 활성층(120) 상에 소스-드레인 금속층(130)을 형성하는 공정을 수행한다. 소스-드레인 전극층(130)은 금속 섀도우 마스크를 사용하여 3 Å/s의 속도로 열 증발하여 100nm 알루미늄(Al) 전극층(130)을 형성한다. 이때, 채널 길이와 너비는 각각 100㎛와 1000㎛일 수 있다.

[0072] 도 4는 도 3의 (S250) 단계에서 형성된 활성층의 EDS 매핑 이미지이고, 도 5는 도 3의 (S260) 단계에서 활성층의 단면을 나타내는 투과전자현미경(HR-TEM) 이미지 및 EDS 라인 스캐닝 이미지이다.

[0073] 도 3 및 도 4를 참조하면, 활성층(120)내 카드뮴(Cd)의 균일한 분포를 확인하기 위한 EDS 매핑 이미지(mapping image)를 나타내며, IGZO 박막에 수직 확산(vertical diffusion)과정으로 균일하게 카드뮴(Cd) 도핑이 진행되었음을 확인할 수 있다.

[0074] 도 3 및 도 5를 참조하면, (a)는 활성층(120)의 두께 및 카드뮴(Cd)의 조성비 확인을 위한 단면(cross-section)을 투과전자현미경(HR-TEM)으로 분석한 이미지를 나타내고, (b)는 활성층(120) 내 EDS 라인 스캐닝 이미지(line scanning data)를 나타낸다. 이와 같이, 각각 300° C에서 어닐링된 활성층(IGZO:Cd, 120)은 비정질 IGZO의 ~8nm로의 Cd의 균질한 확산은 EDS 라인 스캐닝 및 EDS 매핑 이미지에서 확인되었다.

[0076] 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 활성층의 XRD 패턴 및 XRR 스펙트럼을 나타나는 그래프이다.

[0077] 도 3 및 도 6을 참조하면, (S240) 단계에서, 제2 용액(203)을 IGZO 박막 상에 스핀 코팅한 후, 다양한 온도(200, 250, 300° C)에서 어닐링하였다. 이때, 어닐링 온도에 따른 활성층(IGZO:Cd, 120)의 XRD 패턴 및 XRR 스펙트럼을 비교하였다. 이는, 카드뮴(Cd) 도펀트가 활성층(IGZO:Cd, 120)의 비정질 특성에 영향을 미치는지 여부를 확인하기 위함이다.

[0078] (a)는 IGZO의 XRD 패턴과 200, 250 및 300° C에서 어닐링된 활성층(IGZO:Cd, 120)을 나타낸다. 카드뮴(Cd)의 도핑 및 어닐링 온도에 관계없이, 모든 박막은 대표적인 카드뮴(CdO) 상 없이 비정질 특성을 나타내었고, 이는 카드뮴(Cd)이 카드뮴(Cd)의 응집 없이 IGZO 박막 내로 균일하게 확산되어 카드뮴(CdO)을 형성하였음을 나타낸다. 즉, XRD 분석을 통해 카드뮴(Cd)의 도핑 여부 및 열처리 여부에 관계없이 활성층(IGZO:Cd, 120)이 비

정질임을 확인할 수 있다.

[0079] 한편, 카드뮴(Cd)은 수직 확산 과정에 의해 IGZO 박막에 도핑되기 때문에, 카드뮴(Cd) 도펀트가 활성층(IGZO:Cd, 120)의 밀도에 영향을 미칠 수 있음을 확인하고자 200, 250, 300° C에서 어닐링된 IGZO, 활성층(IGZO:Cd) 및 10% 내지 30%의 일반적인 용액 공정에 의한 카드뮴(Cd)이 도핑된 IGZO 박막의 X선 반사 측정법(XRR) 스펙트럼을 측정하여 다양한 실시예에 따른 활성층(IGZO:Cd, 120)의 밀도를 비교하였다.

[0080] (b)에서, 다양한 실시예에 따른 활성층(IGZO:Cd)은 임계각의 이동이 더 높은 것으로 나타났으며, 이는 활성층의 밀도의 향상을 나타낸다. (c)와 같이, 확산 도핑된 활성층(IGZO:Cd)과 비교하면, 일반적인 용액 공정에 의한 카드뮴(Cd)으로 도핑된 IGZO 박막은 임계각의 음의 이동을 나타내어 IGZO 박막의 밀도가 감소했음을 나타낸다. 즉, 본 발명의 실시예와 같이 확산(Diffusion)을 통해 도핑을 진행했을 때의 박막의 밀도 증가가 전기적 특성의 향상에 기여함을 확인할 수 있었다.

[0081] 이러한, 활성층(IGZO:Cd, 120)은 카드뮴(Cd)이 n형 도펀트로 작용함에 따라 전기적 특성이 카드뮴이 혼합되지 않은 산화물 반도체의 전기적 특성에 비해 크게 향상되었음을 확인할 수 있다.

[0082] 한편, (e)와 같이, 200, 250, 300° C에서 어닐링된 IGZO, 활성층(IGZO:Cd)은 전기적 특성이 향상되었으나, (f)와 같이, 100와 500° C에서 어닐링된 활성층(IGZO:Cd)은 전기적 특성이 향상되지 않았음을 확인할 수 있었다.

[0084] 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 전기적 특성을 나타내는 그래프이다.

[0085] 도 7을 참조하면, (a) 내지 (d)는 본 발명에 따른 비교예1(IGZO), 실시예1(IGZO:Cd200), 실시예2(IGZO:Cd250), 및 실시예3(IGZO:Cd300)의 광전자 시냅스 트랜지스터에 대하여 각각 다양한 파장대의 가시광 영역 대한 광감지 특성을 측정한 곡선이다. 여기서, 비교예1(IGZO)는 카드뮴이 도핑되지 않은 IGZO 박막을 적용한 트랜지스터이다.

[0086] 광감지 특성은 반도체 파라미터 분석기(HP 4145 B) 및 주변 조건에서 다양한 파장의 노광(λ = 635, 520, 450 및 405nm) 하에서 프로브 스테이션을 사용하여 특성화되었다.

[0087] (a) 내지 (d)는 비교예1, 실시예1, 실시예2, 실시예3의 전달 특성을 나타낸다. 게이트 바이어스(VG)는 10V의 일정한 드레인 바이어스(VD)에서 -30V에서 30V로 스윕되었다. 전계 효과 이동도(μsat), 온-오프 전류비(Ion/Ioff), 임계 이하 스윙(S/S) 및 임계 전압(VT)과 같은 전기적 특성을 (표 1)에 나타내었다.

*표 1*

[0088]

| | mobility [$cm^2/V \cdot s$] | on/off ratio | S/S [mV/dec] | $V_T$ [V] |
|---|---|---|---|---|
| IGZO | 1.05 | 1.44 e7 | 448 | 6.08 |
| IGZO:Cd200 | 4.69 | 4.99 e7 | 356 | 6.04 |
| IGZO:Cd250 | 6.4 | 6.59 e7 | 334 | 6 |
| IGZO:Cd300 | 8.18 | 1.24 e8 | 287 | 5 |

[0089] (표 1)에 도시된 바와 같이, 전기적 특성은 Cd 확산의 어닐링 온도가 증가함에 따라 점차 증가하였다.

[0090] 실시예3은 전계 효과 이동도(μsat)와 온-오프 전류비(Ion/Ioff)가 각각 8.18 $cm^2 \cdot Vs$ 및 $1.24 \times 10^8$ 이다. 또한, 비교예1의 트랜지스터(TFT)와 비교하면, 모든 실시예는 520 nm 광 파장 조명 하에서 광감지 특성을 나타내었다.

[0091] 광감도 및 광반응성과 같은 상세한 광반응 매개변수를 계산하여 광감지 트랜지스터의 성능을 정밀하게 조사했다.

[0092] 각각 520 및 450 nm 파장 광 조명 하에서 비교예1, 실시예1 내지 실시예3의 감광도 값을 나타낸다. 감광도는 (수학식1)에 의해 산출될 수 있다.

[0093] (수학식 1)

$$Photosensitivity = \frac{I_{photo} - I_{dark}}{I_{dark}}$$

[0094]

[0095] 여기서, Iphoto 와 Idark는 각각 조명 하에서 전류를 나타내고, 조명이 없는 전류를 나타낸다. 비교예1은 520nm 파장의 광 조명 하에서 무시할 수 있는 감광성을 보인 반면, 실시예1 내지 실시예3은 ~$1\times10^{7}$의 높은 감광도 값을 나타내었다.

[0096] 450nm 파장 광 조명의 경우, 실시예3은 비교예1에 비해 더 높은 감광도 값을 나타내었다.

[0097] 비교예1, 실시예1 내지 실시예3의 감반응도 값은 (수학식2)에 의해 산출될 수 있다.

[0098] (수학식 2)

$$Photoresponsivity = \frac{(I_{total} - I_{dark})A_{pt}}{P/A_{pd}} = \frac{J_{ph}}{P}$$

[0099]

[0100] 여기서, Itotal은 트랜지스터의 총 전류이고, Idark는 어둠(dark)의 흐름이고, P는 입사광의 힘을 의미한다. pt는 채널 너비와 두께의 곱이고, pd는 레이저 소스의 스폿 크기이고, Jph는 광전류 밀도이다.

[0101] 실시예1은 520nm 파장의 빛에서 약간 더 높은 광반응성 값을 보였다. 그러나 바람직한 실시예로, 높은 광학 및 전기적 성능이 모두 필요한 트랜지스터 구조를 가지고 있기 때문에 실시예3에 대한 다양한 입사 전력 밀도에서 광응답률 값을 산출하였다. 이에, 실시예3는 520 및 450 nm 파장의 광 조명에서 각각 57.78 및 1066 A/W의 최대 광응답성을 보였다. 또한, 모든 결합 에너지는 285eV에서 참조된 C1s 피크로 보정되었다.

[0103] 도 8 및 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 활성층의 광전자분광(XPS) 분석 결과를 나타내는 도면이다.

[0104] 도 8을 참조하면, 본 발명에 따른 비교예1(IGZO), 실시예1(IGZO:Cd200), 실시예2(IGZO:Cd250), 및 실시예3(IGZO:Cd300)의 광전자 시냅스 트랜지스터의 산소공석(oxygen vacancy)의 변화 관찰을 위한 O1s의 X-선 광전자 분광분석 데이터를 나타낸다. 이는, 가시광선 영역에서의 광반응 향상의 원인 파악을 위함이다. 산소공석은 활성층(IGZO:Cd)의 카드뮴의 도핑에 따라 크게 향상됨을 확인할 수 있었다.

[0105] (a) 내지 (d)는 각각 비교예1, 실시예1, 실시예2 및 실시예3의 O1s XPS 스펙트럼을 나타낸다. ~529 eV 및 ~530 eV의 결합 에너지를 중심으로 하는 피크는 각각 금속-산소 및 산소공석의 결합 에너지를 나타낸다.

[0106] ~532 및 ~532.9 eV의 결합 에너지를 중심으로 한 피크는 각각 기판에서 흡수된 산소종과 O-Si를 나타냅니다. 이후 약간의 양의 Si2s 피크가 관찰되었다. $SiO_2$ 위의 얇은 IGZO 및 IGZO:Cd 층으로 인해 O-Si 관련 피크의 일부를 무시하여 O1s XPS 스펙트럼의 면적 비율을 얻었다. 비교예1은 약 ~19%의 소량의 산소 공석을 나타내었는데, 이는 가시광선 파장 조명 하에서 광전류를 발생시키기에 불충분하다. 그러나 실시예1 내지 실시예3은 약 ~25%의 훨씬 더 높은 산소 공석을 나타내어 가시광선 파장 조명 하에서 광전류를 생성했다.

[0107] 도 9를 참조하면, (a) 내지 (d)는 각각 비교예1, 실시예1, 실시예2, 실시예3의 카드뮴(Cd) $3d_{5/2}$ XPS 스펙트럼을 나타낸다. 카드뮴(Cd) 3d 피크는 비교예1의 활성층으로부터 관찰되지 않았다.

[0108] 그러나, 실시예에 따른 활성층(IGZO:Cd)의 경우, 약간 비대칭 피크가 관찰되었고, 2개의 피크로 디콘볼루션되었다. 낮은 결합 에너지를 중심으로 한 피크는 Cd-O 결합을 나타내고, 높은 결합 에너지를 중심으로 한 피크는 $Cd(OH)_2$의 형태로 Cd를 나타낸다.

[0109] 실시예1의 활성층(IGZO:Cd200)에서 다량의 $Cd(OH)_2$ 피크가 관찰되었고, 어닐링 온도가 증가함에 따라 더욱 낮아지는 것으로 나타났다. 비정질 IGZO의 전도 메커니즘이 양이온의 5s 오비탈의 중첩에 의한 전자의 침투라는 점을 고려할 때, In과 유사한 전자 구성을 갖는 수직 확산 Cd 도펀트는 Cd와 In이 유사한 전자 구성을 갖기 때문에 IGZO 박막의 여과(percolation) 확률 향상에 기여한다고 볼 수 있다.

[0110] 한편, 금속 산화물 박막 내의 금속 수산화물 복합체는 결함 상태로 작용하여 전기적 특성의 저하를 초래하는 것

으로 널리 알려져 있다. 따라서 실시예3의 활성층(IGZO:Cd300)의 가장 높은 전기적 특성은 Cd-O 결합량이 가장 많기 때문이라고 볼 수 있다.

[0111] 즉, 가시광선에 의해 자극된 광전류 생성은 본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터가 EPSC, PPF 지수 및 LTP에서 STP로의 전환과 같은 인간 시각 시스템을 에뮬레이트하도록 유도할 수 있다.

[0113] 도 10은 본 발명의 실시예와 비교예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 뉴모로픽 특성을 나타내는 도면이다.

[0114] 도 10을 참조하면, 비교예1과 최적의 실시예에 대한 트랜지스터의 흥분성 시냅스 후 전류(excitatory post-synaptic current, EPSC) 거동을 나타낸다.

[0115] (a)와 같이, 비교예1(IGZO)은 450nm 파장 광 펄스에서 약간의 EPSC만 나타냈, 실시예(IGZO:Cd300)는 520nm 및 450nm 파장 광 자극 모두에서 신뢰할 수 있는 EPSC 값을 나타냈다.

[0116] (b)는 520 및 450 nm 파장의 광에 의해 펄스된 비교예1(IGZO) 및 실시예(IGZO:Cd300)의 PPF를 나타낸다. 비교예1(IGZO)는 실시예(IGZO:Cd300)에 비해 연속적인 450nm 파장 광 자극 하에서 더 낮은 PPF 값을 나타냈고, 520nm 파장 광 자극에도 반응하지 않았음을 분명히 알 수 있다.

[0117] 본 발명의 목적은 IGZO 광감지 트랜지스터의 응답 범위를 더 긴 파장 영역으로 넓히는 것이었기 때문에 PPF 및 STP에서 LTP로의 전이와 같은 추가 생체 모방 특성을 실시예(IGZO:Cd300)에서 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

[0118] (c)는 (수학식 3)을 통해 산출된 520 및 450 nm 파장 하에서 0.5 내지 5 s의 다양한 펄스 하에서 IGZO:Cd300 포토트랜지스터의 PPF 값을 나타낸다;

[0119] (수학식 3)

$$PPF\ (\%) = 100 \times \frac{A_2}{A_1}$$

[0120]

[0121] 여기서, $A_1$ 및 $A_2$는 각각 제 1 및 제 2 입사광 펄스에서의 EPSC 값을 나타낸다. 인간의 시각 시스템에서, 외부 자극의 짧은 펄스 간격은 더 큰 펄스 간격을 갖는 정보보다는 들어오는 정보가 기억되는 것이 중요하다는 것을 나타낸다. 따라서, PPF 값은 펄스 간격이 증가함에 따라 감쇠해야 한다.

[0122] (c)에서, 실시예(IGZO:Cd300)는 펄스 간격이 증가함에 따라 PPF 값의 감쇠 특성을 나타내었다. 그리고, (수학식 4)와 같이 쌍지수 함수에 따라 감쇠하는 PPF 곡선을 디콘볼루션하였다.

[0123] (수학식 4)

$$Y = 1 + \left\{C_1 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right)\right\} + \left\{C_2 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right)\right\}$$

[0124]

[0125] 여기서, Y는 PPF 인덱스이고, t는 두 펄스 사이의 간격 시간이고, $C_1$ 및 $C_2$는 각각 빠른 붕괴 단계 및 느린 붕괴 단계의 초기 촉진 크기에 대응하며, $\tau_1$ 및 $\tau_2$는 각각 빠른 붕괴 단계 및 느린 붕괴 단계의 이완 시간을 나타낸다.

[0126] 실시예(IGZO:Cd300)는 520 및 450 nm 파장 광 조명에서 각각 0.48 / 0.62 및 13.63 / 35.93 s의 $\tau_1$및 $\tau_2$값을 보여 생물학적 시냅스와 유사함을 알 수 있다.

[0127] 한편, 펄스 간격에 해당하는 입력 자극을 암기하는 것의 중요성 외에도 펄스 수에 해당하는 메모리 기능은 인간의 신경계를 모방하는데 고려되어야 한다. 또한 다른 색상을 인식하는 것은 인간의 신경계를 모방하는 것으로 간주되어야 한다.

[0128] 따라서, 도 11에서와 같이 본 발명은 0.5Hz의 주기적인 광 자극 하에서 게이트 전압을 변조하여 녹색/청색 인식 가능한 STP에서 LTP로의 전환을 측정했다.

[0130] 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 광전자 시냅스 트랜지스터의 게이트 전압의 변화에 따른 녹색/청색 파장 판별성을 나타내는 그래프이다.

[0131] 도 10 및 도 11을 참조하면, (a) 내지 (d)는 VG=-5 V 하에서 실시예(IGZO:Cd300)의 STP에서 LTP로의 전환 특성을 나타낸다.

[0132] STP에서 LTP로의 전환은 520nm 및 450nm 파장 광 펄스 모두에서 펄스 수가 5배를 초과할 때 표시되었으며, 이는 (a)와 (b)와 같이, 실시예가 녹색 및 청색 광 파장 모두에 의해 자극될 수 있음을 나타낸다.

[0133] 그러나 (c)와 같이, 펄스 수에 관계없이 VG=-15V에서 입력 광 신호가 조명되었을 때 녹색 조명 하에서는 전류가 발생하지 않았으며, (d)와 같이, 청색광 조명 하에서 STP에서 LTP로의 전환만 보여주었기 때문에 B(파란색) 모드로 언급되었다.

[0134] 이러한 광전기적 특성의 향상을 바탕으로, 해당 소재가 광뉴로모픽 소자의 기본적인 특성(EPSC, PPF, STP-LTP transition)을 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다.

[0135] 특히, 게이트 전압을 통해 채널의 전도도 조절이 가능하다는 점을 활용하여 녹색/청색 빛의 신호를 구별해낼 수 있음을 확인할 수 있으며, 광뉴로모픽 트랜지스터로서 활용이 가능함을 증명할 수 있다.

[0137] 도 12는 본 발명의 광전자 시냅스 트랜지스터를 이용한 3×3 어레이에 녹색청색(GB)광 및 청색(B)광을 조사한 후 전도도를 나타내는 도면이다.

[0138] 도 11 및 도 12를 참조하면, 도 11과 같이 언급한 색 인식 가능성에 따라, 3×3 이미지 어레이는 (a)와 (b)와 같이 GB 모드 및 B 모드에서 주기적 520 및 450 nm 파장 조명 하에서 시연되었다.

[0139] (a)와 같이, 녹색광은 주기적으로 "T"자 모양으로 조명되고 나머지 영역은 주기적으로 청색광이 조명되는 GB 모드에서, 0.1nA 미만의 초기 상태 전류는 인식할 수 없는 영역으로 생각할 수 있는 조명이 없는 전류를 나타낸다. 입력 광 신호의 반복은 녹색 및 청색광 모두에 대해 20회 동안 진행되었다. 펄스 수가 최대 20배 증가함에 따라 녹색 또는 청색광이 조명된 영역의 전류는 각각 ~$5\times10^{-10}$ 및 ~$1\times10^{-7}$A까지 증가했으며, 전류는 전류 스케일이 겹치지 않고 100초 이상 유지되어 GB 모드에서 녹색과 청색광을 명확하게 구별할 수 있음을 나타낸다.

[0140] 또한, (b)와 같이, 청색광이 "H"자 모양으로 조명되고 나머지 영역은 녹색광으로 조명되는 B 모드에서, 청색광 조명 영역에서만 전류 증가가 표시되어, 실시예가 청색광을 성공적으로 인식할 수 있음을 나타낸다. 청색광 자극 20배 후 전류는 ~$7\times10^{-9}$A까지 증가했으며, 전류도 100초 이상 유지되는 반면, 녹색광이 켜진 영역은 인식할 수 없는 영역으로 유지되었다.

[0141] 이로써, 본 발명은 녹색/청색광의 신호를 구별해낼 수 있음을 바탕으로, 20 회의 녹색/적색 파장 입사 이후 100초가 넘는 시간동안 전도도를 유지할 수 있는 것을 확인하였으며, 시냅스 모방 소자로서의 기능을 할 수 있음을 알 수 있다.

[0142] 결국, 본 발명은 차세대 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템을 위한 가시광선 광전자 시냅스 트랜지스터로 활용될 수 있으며, 이러한 광전자 시냅스 트랜지스터를 포함하는 전자소자를 제공할 수 있다.

[0143] 특히, 스마트 전자소자, 웨어러블 전자소자, 스마트 자동차, 로봇/드론 및 스마트 빌딩 등의 산업 분야에 활용될 수 있다.

[0144] 지금까지 본 발명에 대하여 도면에 도시된 바람직한 실시예들을 중심으로 상세히 살펴보았다. 이러한 실시예들은 이 발명을 한정하려는 것이 아니라 예시적인 것에 불과하며, 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 한다. 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 전술한 설명이 아니라 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해서 정해져야 할 것이다. 비록 본 명세서에 특정한 용어들이 사용되었으나 이는 단지 본 발명의 개념을 설명하기 위한 목적에서 사용된 것이지 의미한정이나 특허청구범위에 기재된 본 발명의 범위를 제한하기 위하여 사용된 것은 아니다. 본 발명의 각 단계는 반드시 기재된 순서대로 수행되어야 할 필요는 없고, 병렬적, 선택적 또는 개별적으로 수행될 수 있다. 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 본질적인 기술사상에서 벗어나지 않는 범위에서 다양한 변형 형태 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 균등물은 현재 공지된 균등물뿐만 아니라 장래에 개발될 균등물 즉 구조와 무

관하게 동일한 기능을 수행하도록 발명된 모든 구성요소를 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

## 부호의 설명

[0145] 110: 기판

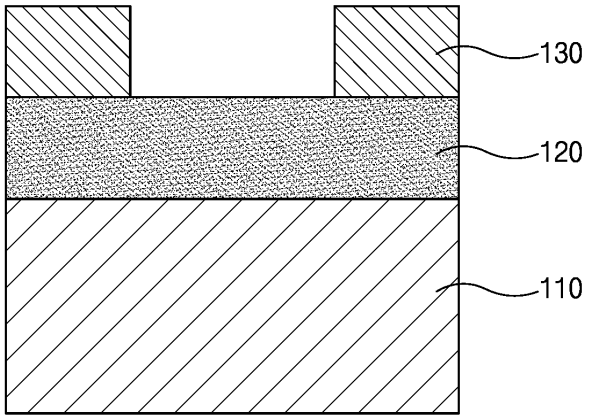
120: 활성층

201: 제1 용액 203: 제2 용액

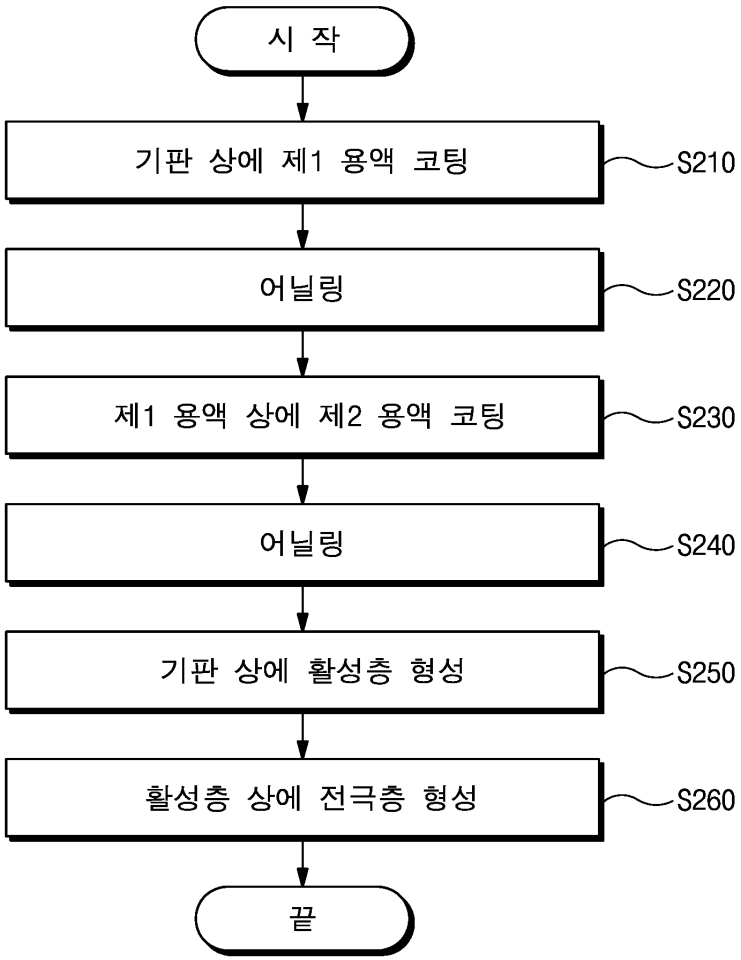
130: 소드-드레인 전극층

## 도면

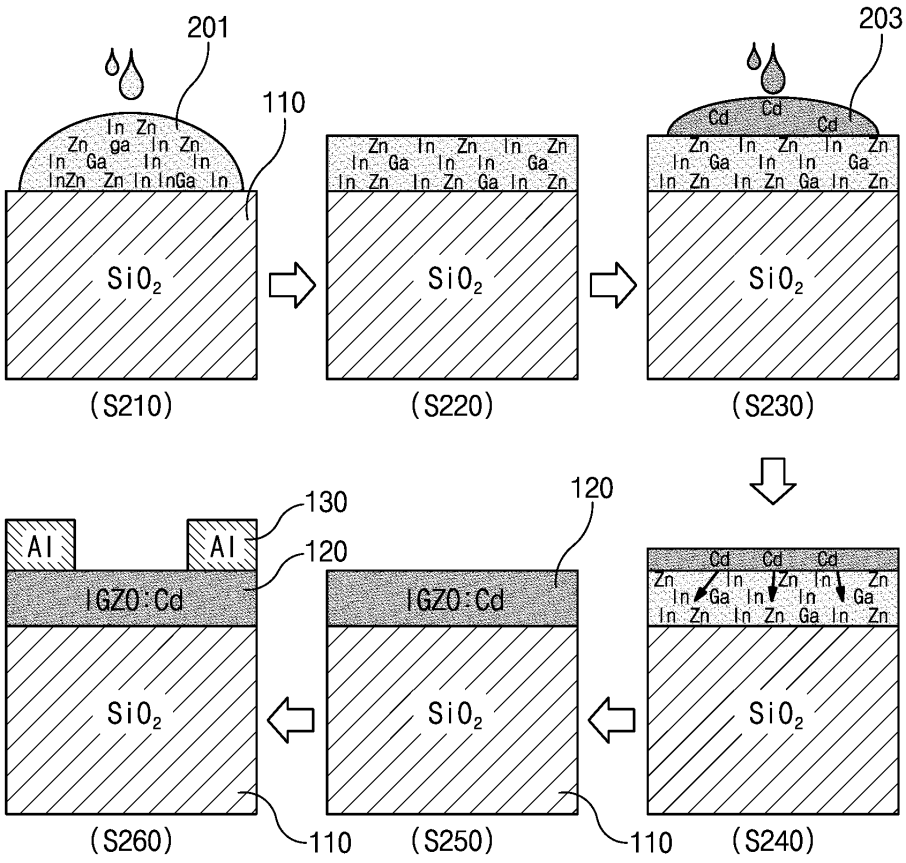
### 도면1



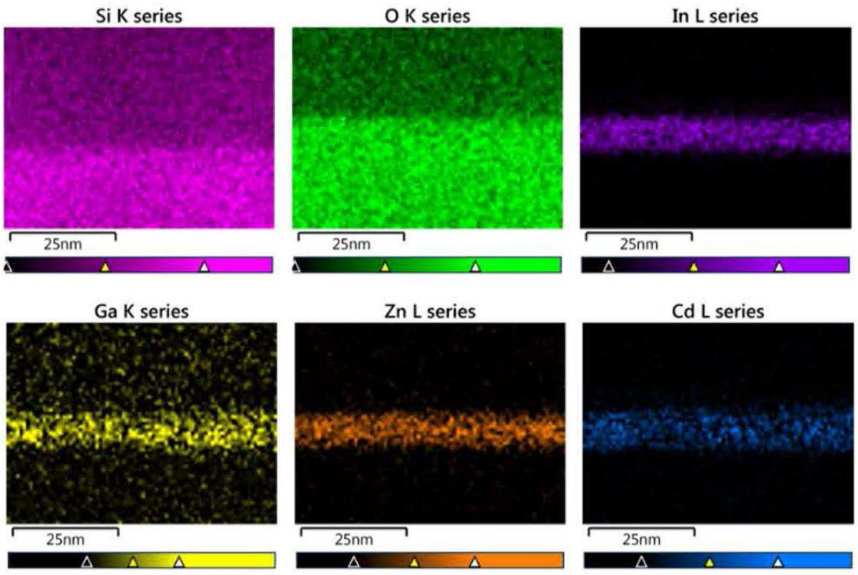
도면2


시 작
기판 상에 제1 용액 코팅
S210
어닐링
S220
제1 용액 상에 제2 용액 코팅
S230
어닐링
S240
기판 상에 활성층 형성
S250
활성층 상에 전극층 형성
S260
끝

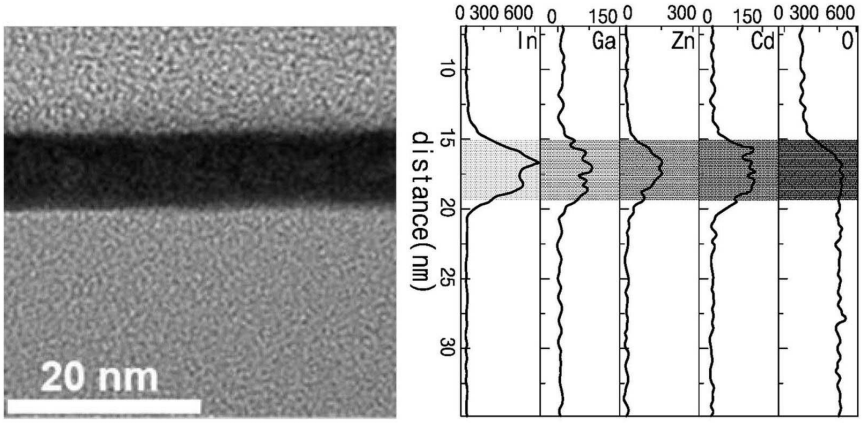
도면3


201
110
203
Cd
In Zn
Zn ga In Zn
In Ga In In
InZn Zn In InGa In
Zn In Zn In Zn
In Ga In In Ga
In Zn In Zn Ga In Zn
SiO2
(S210)
(S220)
(S230)
130
120
Al
Al
IGZO:Cd
(S260)
(S250)
(S240)
110

도면4

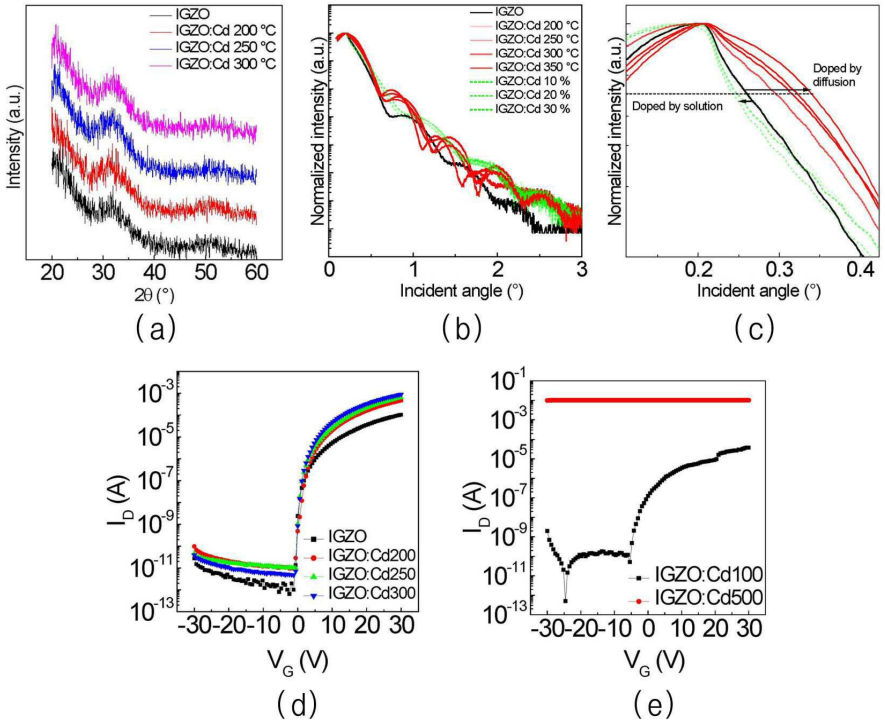

Si K series
O K series
In L series
Ga K series
Zn L series
Cd L series
25nm

도면5




(a) (b)

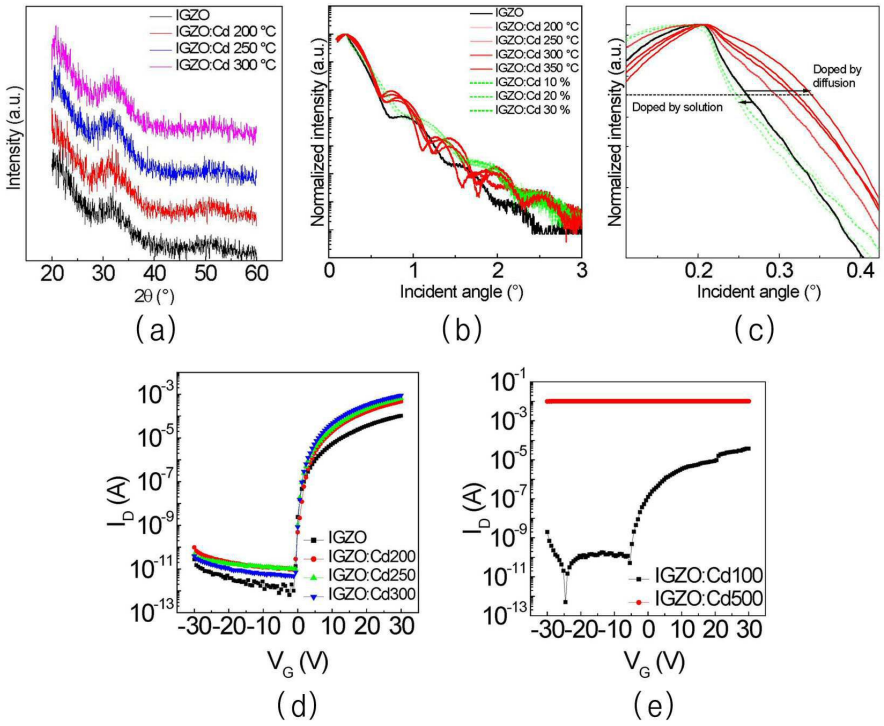
도면6



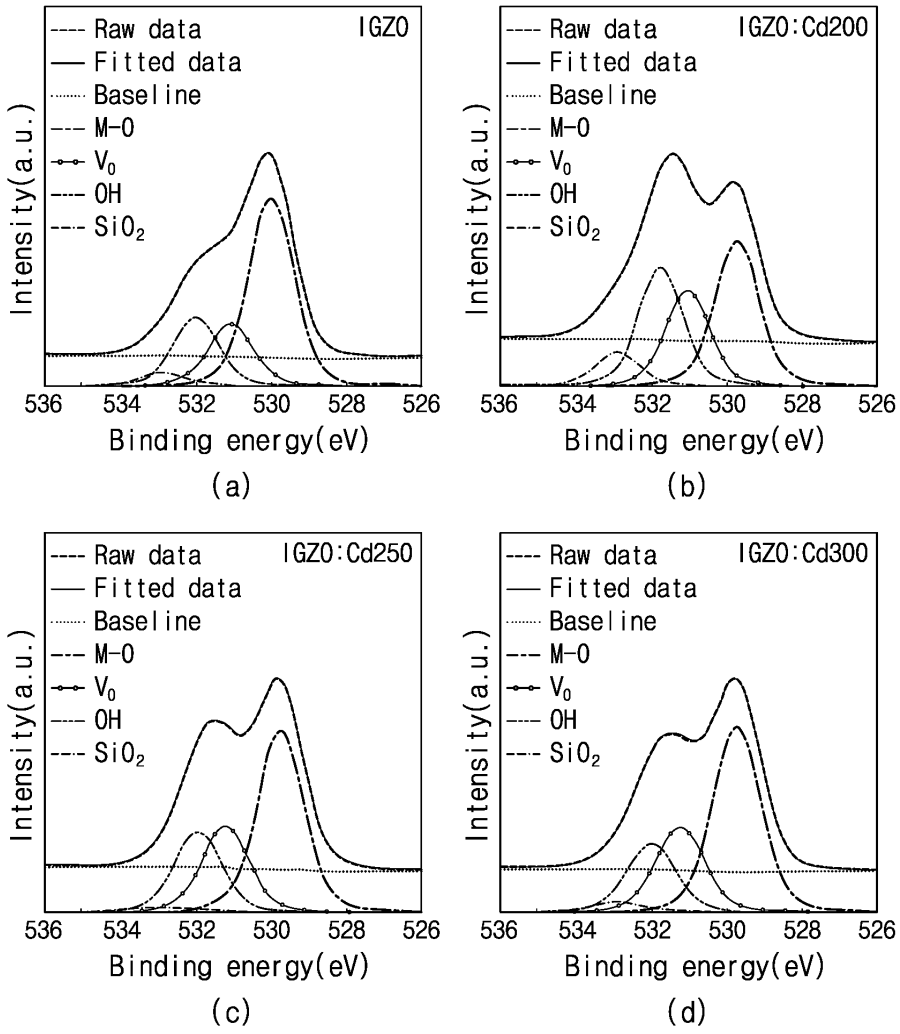

(a) (b) (c)

(d) (e)

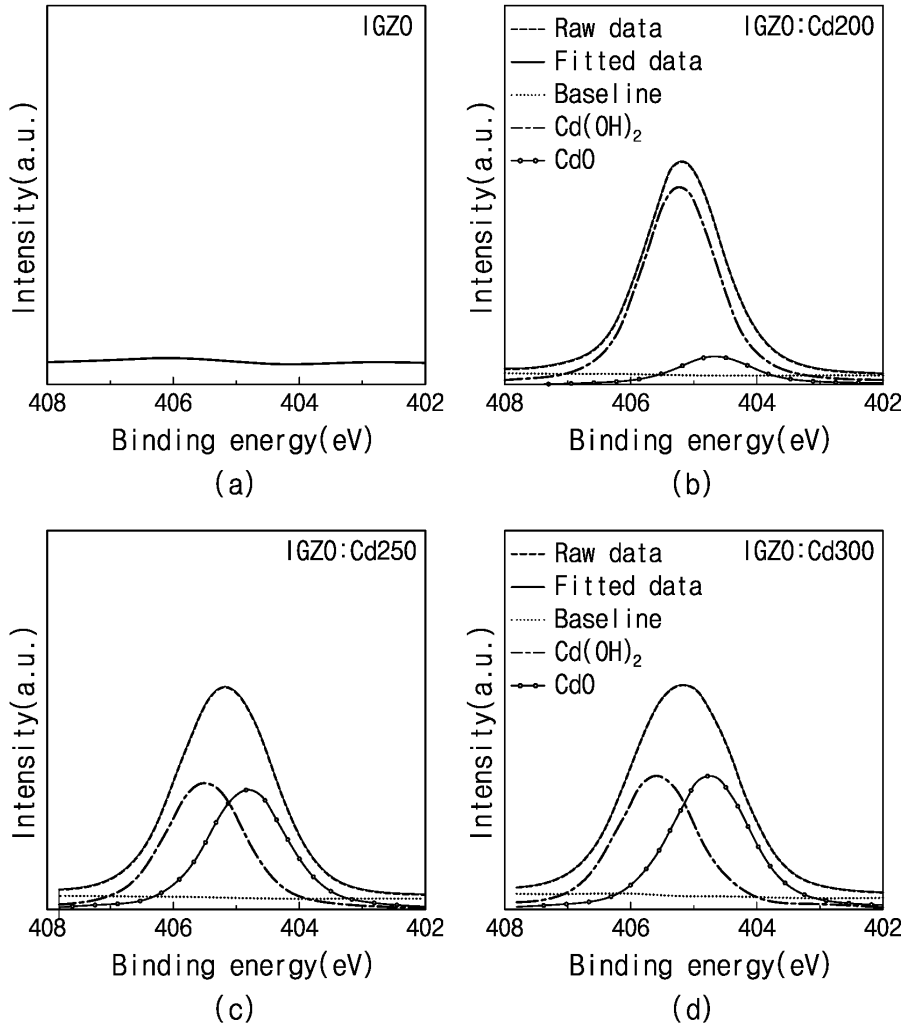
도면7


IGZO
IGZO:Cd 200 °C
IGZO:Cd 250 °C
IGZO:Cd 300 °C
Intensity (a.u.)
2θ (°)
(a)
IGZO
IGZO:Cd 200 °C
IGZO:Cd 250 °C
IGZO:Cd 300 °C
IGZO:Cd 350 °C
IGZO:Cd 10 %
IGZO:Cd 20 %
IGZO:Cd 30 %
Normalized intensity (a.u.)
Incident angle (°)
(b)
Doped by diffusion
Doped by solution
Normalized intensity (a.u.)
Incident angle (°)
(c)
$I_D$ (A)
IGZO
IGZO:Cd200
IGZO:Cd250
IGZO:Cd300
$V_G$ (V)
(d)
$I_D$ (A)
IGZO:Cd100
IGZO:Cd500
$V_G$ (V)
(e)

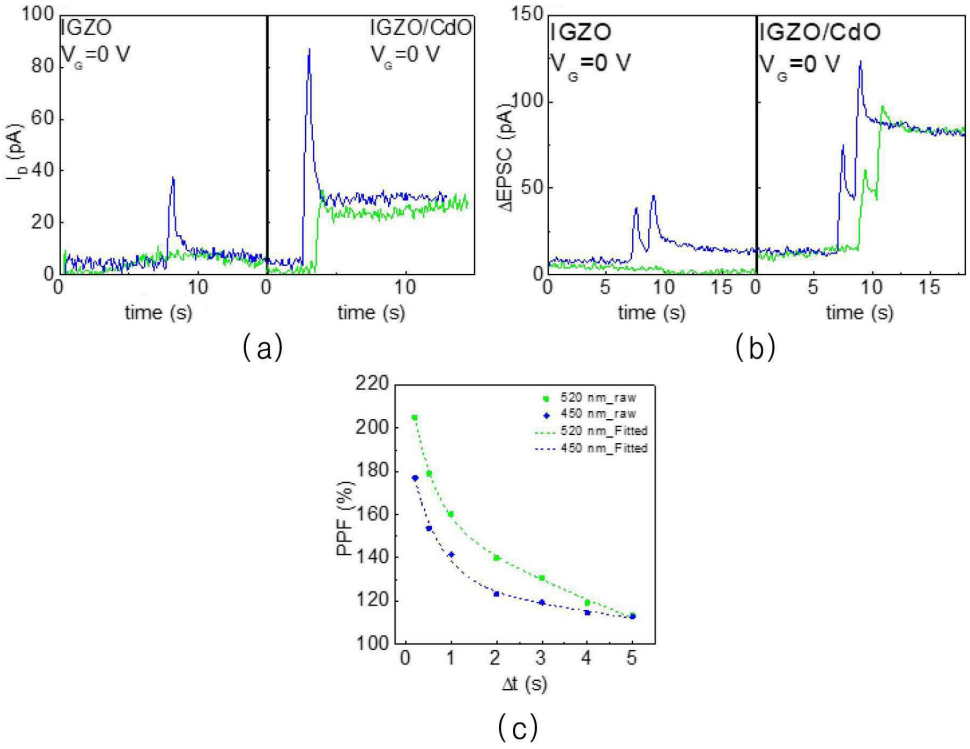
도면8


Raw data
Fitted data
Baseline
M-O
$V_O$
OH
$SiO_2$
IGZO
IGZO:Cd200
IGZO:Cd250
IGZO:Cd300
Intensity(a.u.)
536 534 532 530 528 526
Binding energy(eV)
(a)
(b)
(c)
(d)

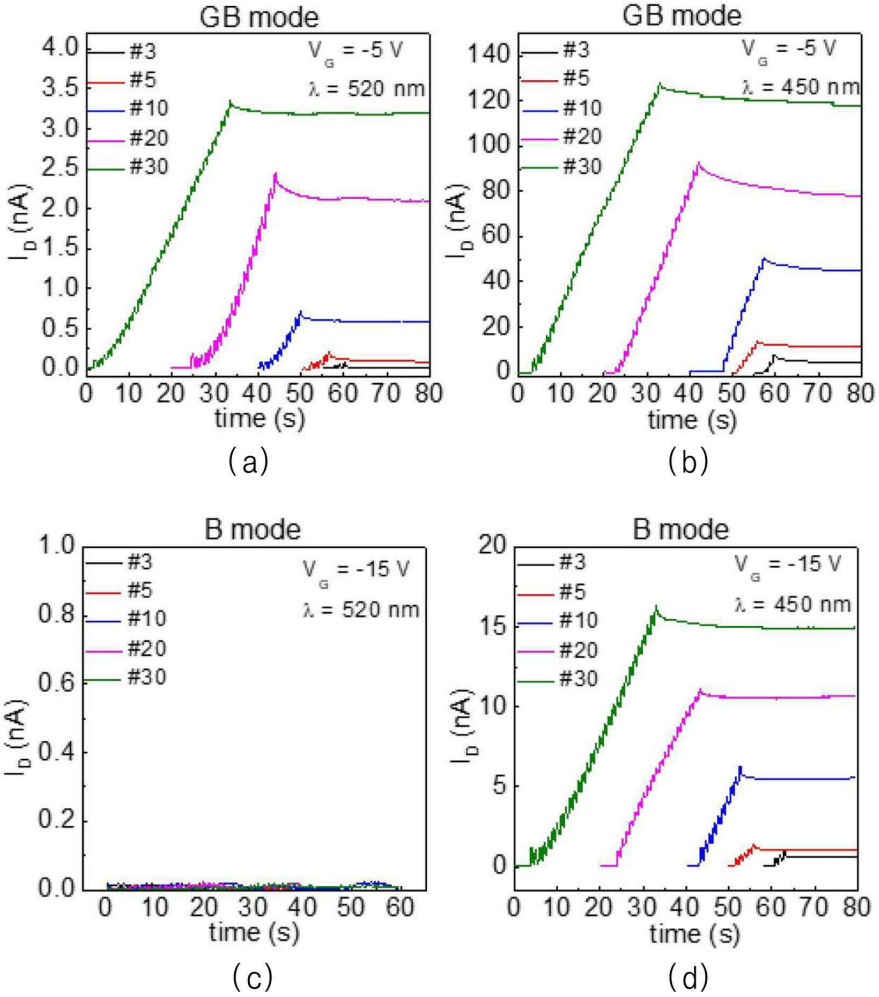
도면9


IGZO
Intensity(a.u.)
408
406
404
402
Binding energy(eV)
(a)
Raw data
Fitted data
Baseline
Cd(OH)2
CdO
IGZO:Cd200
Intensity(a.u.)
408
406
404
402
Binding energy(eV)
(b)
IGZO:Cd250
Intensity(a.u.)
408
406
404
402
Binding energy(eV)
(c)
Raw data
Fitted data
Baseline
Cd(OH)2
CdO
IGZO:Cd300
Intensity(a.u.)
408
406
404
402
Binding energy(eV)
(d)

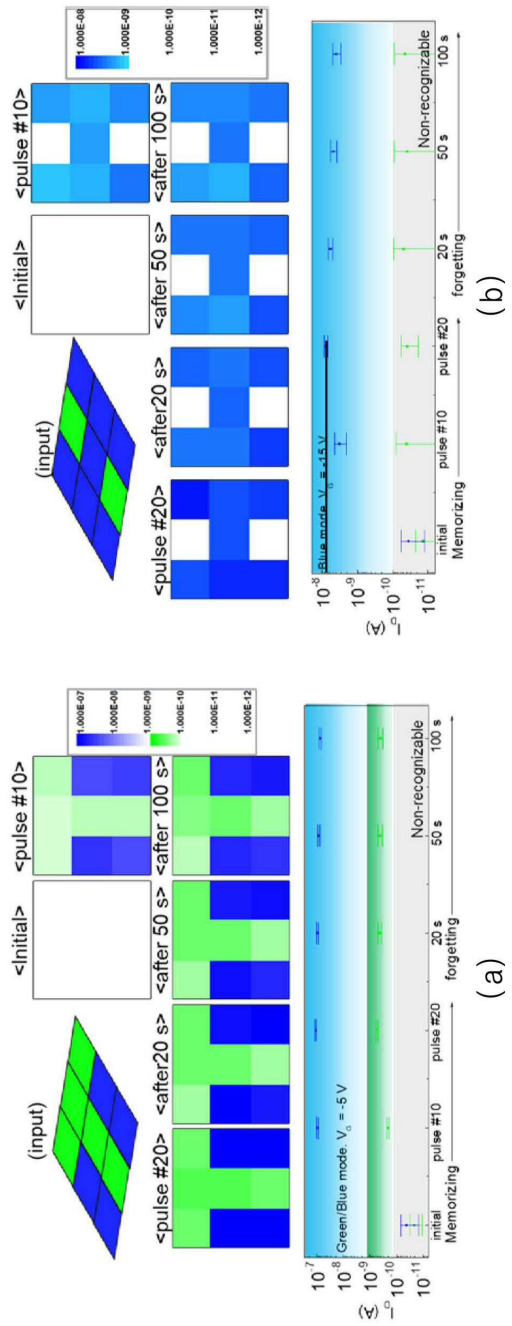
도면10


IGZO
V_G=0 V
IGZO/CdO
V_G=0 V
I_D (pA)
time (s)
time (s)
(a)
IGZO
V_G=0 V
IGZO/CdO
V_G=0 V
ΔEPSC (pA)
time (s)
time (s)
(b)
520 nm_raw
450 nm_raw
520 nm_Fitted
450 nm_Fitted
PPF (%)
Δt (s)
(c)

도면11


GB mode
V_G = -5 V
λ = 520 nm
#3
#5
#10
#20
#30
I_D (nA)
time (s)
(a)
GB mode
V_G = -5 V
λ = 450 nm
#3
#5
#10
#20
#30
I_D (nA)
time (s)
(b)
B mode
V_G = -15 V
λ = 520 nm
#3
#5
#10
#20
#30
I_D (nA)
time (s)
(c)
B mode
V_G = -15 V
λ = 450 nm
#3
#5
#10
#20
#30
I_D (nA)
time (s)
(d)

도면12


(input)
<Initial>
<pulse #20>
<after20 s>
<after 50 s>
<pulse #10>
<after 100 s>
1.000E-07
1.000E-08
1.000E-09
1.000E-10
1.000E-11
1.000E-12
Green/Blue mode, V_d = -5 V
Non-recognizable
initial
pulse #10
pulse #20
20 s
50 s
100 s
Memorizing
forgetting
(a)
Blue mode, V_d = +5 V
(b)