



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년01월05일

(11) 등록번호 10-2198720

(24) 등록일자 2020년12월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01L 31/0352 (2006.01) H01L 31/0224 (2006.01)

H01L 31/0296 (2006.01) H01L 31/0384 (2006.01)

H01L 31/18 (2006.01) H01L 31/20 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H01L 31/035227 (2013.01)

H01L 31/022425 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2020-0075194

(22) 출원일자 2020년06월19일

심사청구일자 2020년06월19일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020160149105 A*

KR1020200021623 A*

KR1020190129223 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

인천대학교 산학협력단

인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)

(72) 발명자

김준동

인천 연수구 송도과학로51번길 136 캐슬&해모로 204동 705호

모히트 쿠마

인천광역시 연수구 송도1동 아카데미로 119, 인천대학교 전기공학과

(74) 대리인

강정빈, 심찬, 송두현

전체 청구항 수 : 총 7 항

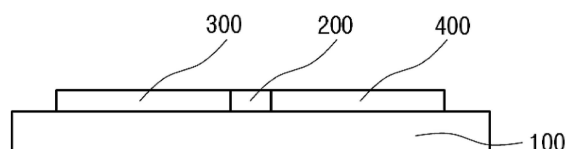
심사관 : 이규재

(54) 발명의 명칭 뉴로모픽 광 검출기 및 그 제조방법

(57) 요약

본 발명은 뉴로모픽 광 검출기 및 그 제조방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 산화아연의 나노핀(nanofin) 구조를 포함함으로써 광 입력에 대해 광전류를 출력으로 하며 신호의 통합 및 기억과 같은 바이오 뉴런 및 시냅스와 유사한 거동을 나타내는 뉴로모픽 광 검출기 및 그 제조방법에 관한 것이다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H01L 31/022483 (2013.01)

H01L 31/0296 (2013.01)

H01L 31/03845 (2013.01)

H01L 31/1812 (2013.01)

H01L 31/206 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	NRF-2019R1F1A1058949
과제번호	1711094991
부처명	미래창조과학부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	일반연구자사업
연구과제명	2차원 소재가 함입된 기능성 산화물 투명 태양전지
기 여 율	5/10
과제수행기관명	인천대학교
연구기간	2019.06.01 ~ 2020.05.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2020R1A2C100948011
과제번호	1711107490
부처명	한국연구재단
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	중견연구자 지원사업
연구과제명	고체형 반도체 투명 태양광 프레임 개발: 다기능 2D 활성층을 이용한 신개념 투명 태양전지 및 응용 기술
기 여 율	3/10
과제수행기관명	인천대학교
연구기간	2020.03.01 ~ 2023.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	NRF-2018R1D1A1B07049871
과제번호	1345281812
부처명	미래창조과학부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	일반연구자사업
연구과제명	신경 회로망 적용을위한 광전자 커플 링 저전력 투명한 저항성 스위칭 디바이스
기 여 율	2/10
과제수행기관명	인천대학교
연구기간	2019.03.01 ~ 2020.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

뉴로모픽 광 검출기로서,
기관 위에 배치되는 산화아연층;
상기 산화아연층의 일측에 배치되는 제1전극층; 및
상기 산화아연층의 타측에 배치되는 제2전극층; 을 포함하고,
상기 산화아연층은,
산화아연 나노핀 구조를 포함하고,
상기 산화아연 나노핀 구조는,
상기 일측 및 상기 타측 사이가 10nm 내지 10 μ m의 폭을 갖고, 상기 기관에 대해 수직 방향으로 성장하여 형성되는, 뉴로모픽 광 검출기.

청구항 2

청구항 1에 있어서,
상기 뉴로모픽 광 검출기는,
광 펄스 입력에 대해 상기 제1전극층 및 상기 제2전극층에 유도되는 광전류를 출력하는, 뉴로모픽 광 검출기.

청구항 3

삭제

청구항 4

청구항 1에 있어서,
상기 산화아연층은,
10 내지 1000nm의 두께를 갖는, 뉴로모픽 광 검출기.

청구항 5

청구항 1에 있어서,
상기 기관은 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)인, 뉴로모픽 광 검출기.

청구항 6

청구항 1에 있어서,
상기 제1전극층 및 상기 제2전극층은,

Ag, Al 및 ITO 중 1 이상을 포함하는, 뉴로모픽 광 검출기.

청구항 7

뉴로모픽 광 검출기의 제조방법으로서,

판 형태의 기판을 세척하는 단계;

상기 기판의 상면에 기설정된 패턴으로 제1전극층을 증착하는 단계;

상기 제1전극층 및 기판의 상면에 산화아연 나노핀 구조를 포함하는 산화아연층을 증착하는 단계;

상기 산화아연층의 상면에 제2전극층을 증착하는 단계;

및 상기 제1전극층의 상측에 형성된 산화아연층 및 제2전극층을 필링하는 단계; 를 포함하고,

상기 산화아연 나노핀 구조는,

상기 일측 및 상기 타측 사이가 10nm 내지 10 μ m의 폭을 갖고, 상기 기판에 대해 수직 방향으로 성장하여 형성되는, 뉴로모픽 광 검출기의 제조방법.

청구항 8

삭제

청구항 9

청구항 7에 있어서,

상기 제1전극층 및 상기 제2전극층을 증착하는 단계는,

DC 스퍼터링 공정에 의해 수행되는, 뉴로모픽 광 검출기의 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 뉴로모픽 광 검출기 및 그 제조방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 산화아연의 나노핀(nanofin) 구조를 포함함으로써 광 입력에 대해 광전류를 출력으로 하며 신호의 통합 및 기억과 같은 바이오 뉴런 및 시냅스와 유사한 거동을 나타내는 뉴로모픽 광 검출기 및 그 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 인간의 뇌 내에서의 시공간 정보 처리 프로세스는 광 입력을 갖는 뉴런과 시냅스의 공동 작업에 의해 수행된다. 따라서 향후의 인공 시각 및 정보 저장 시스템을 설계하기 위해서는 광 소자를 사용하여 이와 같은 신경기능을 모방할 필요가 있다.

[0005] 인간의 뇌의 기본 정보 처리 장치는 뉴런과 시냅스와 같은 상호 연결된 전기 흥분성 세포이다. 뉴런은 자극의 강도, 간격 및 반복 정도에 따라 누설 통합, 자동 발화 및 회복과 같은 특성을 나타낸다. 한편 시냅스는 단기 및 장기 기억과 같은 기억의 저장을 담당한다.

[0006] 서로 연결된 수많은 뉴런과 시냅스로 구성되는 마이크로-나노 스케일의 네트워크는 기억 저장과 같은 결합에 강하고 에너지 효율이 높은 정보 처리 플랫폼을 제공한다. 이와 같은 병렬 아키텍처는 종래의 폰 노이만 컴퓨터보다 더욱 뛰어난 컴퓨팅 시스템을 설계하기 위해 개발의 필요성이 있다.

[0008] 이를 위해 최근에는 뇌와 같은 기능을 인공적으로 모방하기 위한 연구 노력이 지속되고 있다. 예를 들어 모트 절연체, 레독스 메모리스트, 상변화 메모리스트 및 칼코게나이드 임계 스위치 등이 시냅스 연결을 위해 구현되어 왔다. 다만 이와 같은 접근법에 기초한 뉴로모픽 장치는 여전히 작동중의 비선형성, 노이즈 및 높은 작동 전압 등

의 문제로 인해 적용에 어려움을 겪고 있다.

[0010] 한편, 인간이 외부로부터 획득하는 정보의 약 70%가 시각에서 오기 때문에 전기 작동 소자에 비해 광 작동 소자를 디자인 하는 것 또한 중요하다. 또한 광 작동 소자는 직접적인 접촉 없이 동작할 수 있고, 높은 작동 영역을 구현하면서도 동작 중 발열 문제를 피할 수 있다.

[0012] 한편, 시각 시스템은 망막이 빛의 신호를 전기 펄스로 변환하는 매우 독특한 바이오 신경망으로서, 이는 광 검출 장치와 유사하다. 실제로, 인간 뇌의 시공간 정보는 신경망 내에서의 스파이크의 공간적 및 시간적 발생에 의해 해독된다. 따라서 이와 같은 거동을 모방하기 위해서는 장치가 직접 광학 입력을 받음과 동시에 공간 및 시간 도메인을 에몰레이션하고 단일 장치 내에서 처리 및 기억을 수행 할 수 있어야 한다. 종래의 시각 시스템에는 별도의 이미지 센서, 메모리 및 처리 장치가 포함되어 있기 때문에 대면적 장치에서의 통합 처리 및 전력 소비 측면에서 보다 복잡하고 심각한 문제를 야기한다.

[0013] 따라서 직접 광 펄스를 입력 받을 수 있고 동시에 메모리를 저장할 수 있는 바이오 뉴런의 거동과 동등한 거동을 나타낼 수 있는 광 검출기의 경우 뇌의 시공간 처리 과정을 모사하기에 효과적인 접근 방식이 될 수 있다. 그러나 많은 연구가 이루어지고 있는 인공 시냅스와 달리 인공 광 뉴런의 개발은 아직 미미한 상황이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0015] 본 발명은 산화아연의 나노핀(nanofin) 구조를 포함함으로써 광 입력에 대해 광전류를 출력으로 하며 신호의 통합 및 기억과 같은 바이오 뉴런 및 시냅스와 유사한 거동을 나타내는 뉴로모픽 광 검출기 및 그 제조방법을 제공하는 것을 그 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0017] 상기와 같은 과제를 해결하기 위하여 본 발명은 뉴로모픽 광 검출기로서, 기판 위에 배치되는 산화아연층; 상기 산화아연층의 일측에 배치되는 제1전극층; 및 상기 산화아연층의 타측에 배치되는 제2전극층; 을 포함하고, 상기 산화아연층은, 산화아연 나노핀 구조를 포함하는, 뉴로모픽 광 검출기를 제공한다.

[0018] 본 발명에서는, 상기 뉴로모픽 광 검출기는, 광 펄스 입력에 대해 상기 제1전극층 및 상기 제2전극층에 유도되는 광전류를 출력할 수 있다.

[0019] 본 발명에서는, 산화아연 나노핀 구조는, 10nm 내지 10 μ m의 폭을 갖고 상기 기판에 대해 수직 방향으로 성장하여 형성될 수 있다.

[0020] 본 발명에서는, 상기 산화아연층은, 10 내지 1000nm의 두께를 가질 수 있다.

[0021] 본 발명에서는, 상기 기판은 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET)일 수 있다.

[0022] 본 발명에서는, 상기 제1전극층 및 상기 제2전극층은, Ag, Al 및 ITO 중 1 이상을 포함할 수 있다.

[0024] 상기와 같은 과제를 해결하기 위하여 본 발명은 뉴로모픽 광 검출기의 제조방법으로서, 판 형태의 기판을 세척하는 단계; 상기 기판의 상면에 기설정된 패턴으로 제1전극층을 증착하는 단계; 상기 제1전극층 및 기판의 상면에 산화아연 나노핀 구조를 포함하는 산화아연층을 증착하는 단계; 상기 산화아연층의 상면에 제2전극층을 증착하는 단계; 및 상기 제1전극층의 상측에 형성된 산화아연층 및 제2전극층을 필링하는 단계; 를 포함하는, 뉴로모픽 광 검출기의 제조방법을 제공한다.

[0025] 본 발명에서는, 산화아연 나노핀 구조는, 10nm 내지 10 μ m의 폭을 갖고 상기 기판에 대해 수직 방향으로 성장하여 형성될 수 있다.

[0026] 본 발명에서는, 상기 제1전극층 및 상기 제2전극층을 증착하는 단계는, DC 스퍼터링 공정에 의해 수행될 수 있다.

발명의 효과

[0028] 본 발명의 일 실시예에 따르면 나노핀 구조를 갖는 산화아연층이 광 입력에 대해 광전류를 출력하여 광 검출기의 역할을 수행할 수 있다.

- [0029] 본 발명의 일 실시예에 따르면 복수의 광 입력에 대해 합산된 광전류를 출력하여 뉴런과 유사한 거동을 보여 뉴로모픽 장치로 사용될 수 있다.
- [0030] 본 발명의 일 실시예에 따르면 광 입력 후 광전류가 서서히 감소하여 뉴런의 누설과 유사한 거동을 보여 뉴로모픽 장치로 사용될 수 있다.
- [0031] 본 발명의 일 실시예에 따르면 복수의 광 입력에 의해 광 전류의 세기가 조절됨으로써 시냅스 가소성과 유사한 거동을 보여 뉴로모픽 장치로 사용될 수 있다.
- [0032] 본 발명의 일 실시예에 따르면 다양한 광 입력에 의해 단기 및 장기 기억과 같은 시냅스와 유사한 거동을 보여 뉴로모픽 장치로 사용될 수 있다.
- [0033] 본 발명의 일 실시예에 따르면 복수의 뉴로모픽 광 검출기의 배열을 통해 광 입력의 시공간 정보 처리를 수행할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0035] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 광 검출기의 구조를 개략적으로 도시한다.
- 도 2 내지 도 8은 뉴로모픽 광 검출기의 설계에 대한 사항들을 도시하는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0036] 다양한 실시예들 및/또는 양상들이 이제 도면들을 참조하여 개시된다. 하기 설명에서는 설명을 목적으로, 하나 이상의 양상들의 전반적 이해를 돕기 위해 다수의 구체적인 세부사항들이 개시된다. 그러나, 이러한 양상(들)은 이러한 구체적인 세부사항들 없이도 실행될 수 있다는 점 또한 본 발명의 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 인식될 수 있을 것이다. 이후의 기재 및 첨부된 도면들은 하나 이상의 양상들의 특정한 예시적인 양상들을 상세하게 기술한다. 하지만, 이러한 양상들은 예시적인 것이고 다양한 양상들의 원리들에서의 다양한 방법들 중 일부가 이용될 수 있으며, 기술되는 설명들은 그러한 양상들 및 그들의 균등물들을 모두 포함하고자 하는 의도이다.
- [0037] 본 명세서에서 사용되는 "실시예", "예", "양상", "예시" 등은 기술되는 임의의 양상 또는 설계가 다른 양상 또는 설계들보다 양호하다거나, 이점이 있는 것으로 해석되지 않을 수도 있다.
- [0038] 더불어, 용어 "또는"은 배타적 "또는"이 아니라 내포적 "또는"을 의미하는 것으로 의도된다. 즉, 달리 특정되지 않거나 문맥상 명확하지 않은 경우에, "X는 A 또는 B를 이용한다"는 자연적인 내포적 치환 중 하나를 의미하는 것으로 의도된다. 즉, X가 A를 이용하거나; X가 B를 이용하거나; 또는 X가 A 및 B 모두를 이용하는 경우, "X는 A 또는 B를 이용한다"가 이들 경우들 어느 것으로도 적용될 수 있다. 또한, 본 명세서에 사용된 "및/또는"이라는 용어는 열거된 관련 아이템들 중 하나 이상의 아이템의 가능한 모든 조합을 지칭하고 포함하는 것으로 이해되어야 한다.
- [0039] 또한, "포함한다" 및/또는 "포함하는"이라는 용어는, 해당 특징 및/또는 구성요소가 존재함을 의미하지만, 하나 이상의 다른 특징, 구성요소 및/또는 이들의 그룹의 존재 또는 추가를 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.
- [0040] 또한, 본 명세서에서 명백하게 다른 내용을 지시하지 않는 "한" 과, "상기" 와 같은 단수 표현들은 복수 표현들을 포함한다는 것이 이해될 수 있을 것이다.
- [0041] 또한, 제1, 제2 등과 같이 서수를 포함하는 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되지는 않는다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 발명의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. 및/또는 이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.
- [0042] 또한, 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야

한다.

- [0043] 또한, 본 발명의 실시예들에서, 별도로 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 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 발명의 실시예에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.
- [0045] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 광 검출기의 구조를 개략적으로 도시한다.
- [0046] 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 광 검출기는 기관(100) 위에 배치되는 산화아연층(200); 상기 산화아연층(200)의 일측에 배치되는 제1전극층(300); 및 상기 산화아연층(200)의 타측에 배치되는 제2전극층(400); 을 포함할 수 있다.
- [0047] 이와 같이 구성되는 본 발명의 일 실시예에 따른 상기 뉴로모픽 광 검출기는, 광 펄스 입력에 대해 상기 제1전극층 및 상기 제2전극층에 유도되는 광전류를 출력하게 된다.
- [0049] 이 때, 본 발명의 일 실시예에서 상기 산화아연층은, 산화아연 나노핀(nanofin) 구조를 포함하여 구성될 수 있다. 바람직하게는 상기 산화아연 나노핀 구조는, 10nm 내지 10 μ m의 폭을 갖고 상기 기관에 대해 수직 방향으로 성장하여 형성될 수 있다. 또한, 본 발명의 일 실시예에서 상기 산화아연층은, 바람직하게는 10 내지 1000nm의 두께를 가질 수 있다. 따라서 상기 산화아연 나노핀 구조는 10 내지 10 μ m의 폭과 10 내지 1000nm의 높이를 갖는 수직 정렬된 나노핀 구조일 수 있다. 더욱 바람직하게는, 상기 산화아연 나노핀 구조는, 10nm 내지 80nm의 폭을 갖고 상기 기관에 대해 수직 방향으로 성장하여 형성될 수 있고, 상기 산화아연층은, 50 내지 150nm의 두께를 가질 수 있다.
- [0050] 이와 같이 형성된 산화아연 나노핀 구조에 의해 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 광 검출기는 광 입력 펄스의 강도, 수 및 간격에 의해 다양한 출력을 나타내고, 시간 의존적인 출력 전류를 나타내 뉴런과 유사한 거동을 나타낸다.
- [0052] 바람직하게는 상기 제1전극층(300) 및 상기 제2전극층(400)은, Ag, Al 및 ITO 중 1 이상을 포함하여 구성될 수 있다.
- [0054] 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기의 제조방법은 판 형태의 기관을 세척하는 단계; 상기 기관의 상면에 기설정된 패턴으로 제1전극층을 증착하는 단계; 상기 제1전극층 및 기관의 상면에 산화아연 나노핀 구조를 포함하는 산화아연층을 증착하는 단계; 상기 산화아연층의 상면에 제2전극층을 증착하는 단계; 및 상기 제1전극층의 상측에 형성된 산화아연층 및 제2전극층을 필링하는 단계; 를 포함할 수 있다. 이와 같은 뉴로모픽 광 검출기의 제조방법에 대한 더욱 자세한 사항은 후술하도록 한다.
- [0056] 도 2 내지 도 8은 뉴로모픽 광 검출기의 설계에 대한 사항들을 도시하는 도면이다.
- [0058] 도 2의 (a)에 도시된 바와 같이 바이오 뉴런은 A_1 , A_2 등과 같이 하나 이상의 입력을 수신할 수 있으며 일반적으로 각각의 입력은 $C_1A_1 + C_2A_2 + \dots + C_nA_n$ 와 같이 표현되는 출력을 생성하기 위해 별도의 가중치가 부여된다. 여기서 C_1 , C_2 , $\dots$ C_n 은 0에서 1까지의 값을 포함하는 각 입력의 가중치 계수이다. 본 발명에서는 UV 펄스를 입력으로 하고, 2단자 사이의 광전류를 출력으로 하는 바이오 뉴런의 기본적인 기능을 모방한 간단한 광 검출기, 이른바 뉴로모픽 광 검출기를 제작하였다. 본 발명의 일 실시예에 따른 광 검출기는 서로 다른 입력, 예를 들어 P_1 , P_2 , $\dots$ P_n 에 의해 생성된 각각의 광전류 I_1 , I_2 , $\dots$ I_n 는 합산되어 출력을 생성할 수 있다. 여기서 I_1 , I_2 , $\dots$ I_n 은 각각 입력 P_1 , P_2 , $\dots$ P_n 에 의해 생성된 광전류의 크기이다. 특히, 광 도전성 물질을 통한 전류의 전달은 일련의 광 펄스에 의해 쉽게 변경될 수 있으며, 이와 같은 독특한 특성은 광 도전성 물질을 통해 뉴런 및 시냅스를 모방할 수 있도록 한다.
- [0060] 종래의 광 검출기와 달리, 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기는 시간 의존적 출력 전류를 나타내어야 하며, 이를 통해서 뉴런과 시냅스의 행동을 모방할 수 있게 된다.
- [0062] 도 2의 (c)에 도시된 바와 같이 이와 같은 뉴로모픽 광 검출기는 시간에 따라 광전류(I_p)를 누적할 수 있으므로 복수의 UV 입력을 가하면 I_p 가 점차 증가하고, I_p 가 임계 값을 초과하면 장치가 바이오 뉴런과 같이 출력을 발생시킨다. 임계값은 이와 같은 인공 뉴런이 사용되는 분야에 따라 정해질 수 있다. 실제로, 가해지는 펄스의 강도

및 간격에 대한 뉴로모픽 광 검출기의 출력 I_p 는 바이오 뉴런과 유사한 거동을 보이게 된다. 다른 한편으로, UV 입력이 없는 동안 I_p 는 점차적으로 감소하는데, 이는 바이오 뉴런의 누설 거동과 매우 유사하다. UV 조명에 의한 I_p 의 증가 및 감소는 각각 UV 유도 전자-정공 쌍의 생성 및 재조합 공정에 기인한다.

[0064] 뉴로모픽 광 검출기를 제작하기 위해, 전하 수송에 있어서 결합이 결정적인 역할을 수행하는 산화아연(ZnO)을 사용하였다. 여기서 산화아연의 결합은 광 생성 전자-정공(e-h)쌍에 의해 채워짐으로써 원활한 전하 수송을 수행하거나 보다 높은 광전류를 초래할 수 있다. 실제로, 도 2의 (d)에 도시된 바와 같이 고정 측정 전압에서 조명 시간 및/또는 강도가 증가함에 따라, 산화아연층 내의 결합이 채워질 수 있고, 결과적으로 I_p 가 증가 된다. 다른 한편으로, I_p 의 느린 감소는 영구 광 전도성(Persistent Photo-conductivity, PPC)으로 알려진 산소 빈자리의 흡수 및 탈착에 기인한다.

[0066] 도 3의 (a)에는 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기의 개략도가 도시되어 있다. 본 발명의 일 실시예에서 뉴로모픽 광 검출기는 Al 및 Ag 전극 사이에 개재된 원자층증착된 ZnO "나노핀(nanofin)"을 함유한다.

[0068] 도 4에는 나노 핀에 기한 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기에 관한 내용이 도시되어 있다.

[0069] 도 4의 (a)를 참조하면 나노와이어 및 나노 핀의 기하학적 차이를 확인할 수 있다. 나노핀은 길이가 단면적에 비해 큰 형태로서, 와이어의 형태를 갖는 나노와이어와 달리 단면적에 비해 길이가 매우 짧아 판재 형태를 가지게 된다.

[0071] 도 4의 (b)에는 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기의 단면 회로도가 도시되어 있고, 도 4의 (c)에는 상기 뉴로모픽 광 검출기를 제조하기 위한 단계가 개략적으로 도시되어 있다. 도 4의 (b)를 참조하면 산화아연층은 단면이 'L'자 형태를 가지게 되고, 전극층은 상기 산화아연층의 양 측에 위치하게 된다. 도 4의 (c)를 참조하면 이와 같은 구조를 형성하기 위한 제조단계가 개략적으로 도시되어 있다. 우선 마스크를 통해 유리 기판 상에 금속 전극을 형성하고, 그 위에 산화아연층을 원자층증착을 통해 형성한다. 그 위에 다시 금속 전극을 형성한 뒤 도 4의 우측에 전극과 산화아연층이 겹쳐있는 곳을 테이프 펠링을 통해 제거하게 된다.

[0073] 이와 같은 나노핀의 배열에 의해 대규모로 제어된 장치 패턴을 설계할 수 있으며, 이는 실제로 여러 다른 뉴로모픽 장치에 사용될 수 있다. 도 5를 참조하면 이와 같은 뉴로모픽 광 검출기의 제조 방법의 효과를 확인하기 위해 Al / ZnO / Al, Ag / ZnO / Ag, Al / ZnO / Ag 및 IT0 / ZnO / IT0와 같은 다양한 유형의 대칭 또는 비대칭 전극을 사용하여 제조한 장치의 모습을 확인할 수 있다. 도 5의 (a) 원형 및 라인 패턴이 형성된 전극의 성장을 도시하고 있고, 도 5의 (b)는 원형 나노 핀의 사진을 도시한다. 이 중, 파란 디스크는 제작 실패한 장치이다. 도 5의 (c)는 원형 나노 핀의 개략도이고, 도 5의 (d)는 길이와 너비가 다른 수직 나노 핀을 성장시키기 위하여 사용되는 선 패턴이고, 도 5의 (e)는 수직으로 성장된 나노 핀의 개략도이다. 실제로, 제시된 방법에 의하면 원하는 영역에서 직사각형 또는 원형과 같은 장치의 형상 및 μm 에서 cm 까지의 스케일을 제어할 수 있다.

[0075] 이와 같은 ZnO 나노핀의 성장은 도 3의 (b)에 도시된 바와 같이 평면시 주사 전자 현미경(SEM)에 의해 확인되었다. 산화아연층은 약 80nm의 두께로서, 수직으로 배치된 Ag 및 Al 사이에 샌드위치와 같이 삽입되고 균일하게 밀집되어 있다. 이와 같은 산화아연층의 샌드위치 특성은 그림 도 3의 (c)에 도시된 것과 같이 에너지 분산형 X-선 분광법(EDS)으로 확인된다. 이는 장치에서 알루미늄(Al), 아연(Zn), 산소(O) 및 은(Ag) 원소의 분포를 보여준다. 원자층증착(ALD)에 의한 산화아연의 성장은 다양한 방법으로 확인되었다.

[0077] 도 3의 (d)에는 나노핀을 관통하는 전하 수송을 이해하기 위해 $-1.0\text{V} \sim +1.0\text{V}$ 의 전압 스캔 범위(램프 속도: 0.01V/s)에서 어두운 상태 및 UV조명(강도: 5mW/cm^2) 상태에서의 뉴로모픽 광 검출기의 일반적인 전류-전압($I-V$) 특성을 측정한 결과가 도시되어 있다. 어두운 조건 및 UV조명 조건에서 나타나는 대칭 곡선의 모양은 산화아연과 Al/Ag 사이의 옴 밴드 정렬이 형성됨을 나타낸다. 도 3의 (d)를 참조하면 어두운 조건에서 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기는 낮은 전류($+1.0\text{V}$ 에서 $1.12\mu\text{A}$)를 나타내며 UV조명 조건에서는 $96.46\mu\text{A}$ 로 증가합니다. 어두운 상태의 저항(R_{off})은 약 $1\text{M}\Omega$ 으로 나타났으며, UV조명(5mW/cm^2) 상태에서 R_{on} 은 약 $10.4\text{k}\Omega$ 까지 감소하여 최대 광 전류 스위칭 온/오프 비율 (I_p/I_{dark})이 약 10^2 로 나타났다. 실제로 산화아연층 내에서 UV조명으로 인해 e-h쌍이 생성되었고, 모든 측정 전압에 대해 I_p 가 증가하였다.

[0079] 또한, 도 3의 (d)를 참조하면 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기에 단일 UV 펄스(4mW/cm^2 , $\Delta t = 1\text{s}$)를 조사한 후

+0.6V에서 과도 광응답(I_p -t)을 측정하였다. UV조명이 가해지는 동안, I_p 는 급격히 증가하는 반면, 조명이 꺼진 후에는 점차적으로 감소하였고, 이는 각각 대역간 여기 및 e-h쌍의 재결합을 나타낸다. 이와 같은 결과는 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기가 단일 UV 펄스에 대한 특징적인 반응을 나타냄을 보여준다. 또한, 이 장치는 UV 조명 후 광전류 감소가 느리다는 것을 보여 주며, 이와 같은 현상은 산소 빈자리에 의한 전하 트래핑/디트래핑에 의한 것으로 추측된다. 산화아연 기반 소자에서 I_p 의 느린 감소는 UV의 반응에 의해 생성된 정공이 화학 흡착된 표면 산소와 $h^+ + O^{2-}(ad) = O_2(g)$ 와 같이 반응한다는 사실에 근거하여 설명된다. 그러나, UV에 의해 생성된 전자는 산화아연층에 남아있어 전기 전도도를 증가시킨다. 중요한 사실은, UV조명을 끈 후 I_p 의 감소가 뉴런의 누설 특성과 유사하다는 것이다.

[0081] 도 6을 참조하면 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기를 지배하는 역학을 이해하고 확인하기 위해 UV조명 전 후에 산화아연층에 대한 X선 광전자 분광법(XPS) 측정을 수행한 결과를 확인할 수 있다. 도 6의 (a)는 UV 조명 전 후의 산화아연의 XPS 스펙트럼이고, 도 6의 (b)는 UV 조명 전 후의 산소의 XPS 스펙트럼이다. UV 조명 후, 화학 흡착된 표면 산소와 관련된 XPS 피크(532.5eV)는 크게 감소하며, 이는 산소 빈자리와 관련된 전하 트래핑 사이트의 감소로 인한 것이다.

[0083] 또한, 도 3의 (e)에는 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기의 광 활성 특성을 확인하기 위해, 고정 조명 시간($\Delta t = 1s$)에서 펄스 UV 강도를 0.25 내지 5mW/cm²로 변화시키면서 측정한 I_p 가 도시되어 있다. I_p 의 크기는 UV 강도에 따라 선형적으로 증가하고, 이는 광 생성된 캐리어의 수가 증가함에 따른 것이다. 통계적으로 분석하기 위하여, 면적이 다른 복수의 뉴로모픽 광 검출기를 이용하여 측정을 수행하였고, 면적에 상관없이 대부분 유사한 동작을 보여주었다. 도 3의 (e)에 도시된 오차범위 표시 줄은 복수의 장치에서 수집 한 I_p 에 해당한다. 또한 하기 식과 같이 선형 동적 범위(LDR)가 계산될 수 있으며, 이는 5mW/cm²의 UV 조명 강도에서 40dB이다.

$$LDR = 20 \log \left(\frac{I_p}{I_{dark}} \right)$$

[0084]

[0086] 또한, 면적이 다른 다양한 뉴로모픽 광 검출기의 I_p 를 측정한 결과가 도 3의 (f)에 도시되어 있다. 흥미롭게도 I_p 는 장치 면적에 따라 증가하므로 장치를 필요 면적에 맞추어 설계하는 접근 방식을 따를 수 있다.

[0088] 바이오 뉴런은 연결된 시냅스에서 입력을 수집하고 임계값에 도달 한 경우 이를 통합하여 출력 신호를 생성한다. 반면, 수집한 입력이 임계값에 도달하지 않으면 신호가 소멸되며, 이는 메모리를 삭제와 유사하다. 누수 통합 및 발화와 같은 두 기능은 모두 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기를 사용하여 에뮬레이션 할 수 있다. 실제로, UV 조명을 가한 후 발생하는 I_p 의 감소는 바이오 뉴런의 막 전위의 '누설'과 망각의 주요 동적 특성에 상응한다. 이와 같은 감소 시간은 또한 메모리 스패를 결정하며 또한 출력을 발화한 후 장치를 재설정하는 데 유용하다.

[0090] 뉴런의 행동을 모방하기 위해, 크기가 비슷하고 다른 시간 간격을 갖는 두 개 이상의 스파이크 시퀀스가 장치에 가해진다고 가정한다. 이 경우 개별 스파이크에 해당하는 I_p 는 키르히호프의 법칙에 따라 물리적으로 합산되어 결과 출력을 생성한다. 따라서 도 7의 (a)에 도시된 바와 같이, 간격이 짧거나 강한 입력 펄스의 시퀀스는 임계값에 더욱 빨리 접근하여 발화를 발생시키게 된다. 또한, I_p 는 인간 뉴런의 이완 과정과 유사하게 점차 초기 상태로 감소하게 된다.

[0091] 따라서, 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기는 입력 펄스의 수 및/또는 간격을 변화시킴으로써 I_p 의 크기를 변조할 수 있다. 7의 (b) 및 (c)에는 UV 강도 및 펄스의 수 또는 간격 각각에 대한 I_p 의 크기가 도시되어 있다.

[0093] 도 7의 (b) 를 참조하면 높은 펄스 수($\Delta t = 0.1s$ 및 $\Delta d = 1s$) 및 높은 UV 강도에서 I_p 가 빠르게 증가한다. 또한 도 7의 (c)를 참조하면, I_p 는 UV 펄스의 Δd 를 줄임으로써 증가시킬 수 있다. 도 7의 (c)에서는 1 내지 10초 범위의 서로 다른 펄스 간격을 갖는 자극 트레인에 대한 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기의 응답을 보여준다. I_p 의 크기는 조명 펄스의 간격 및/또는 펄스 수에 따라 달라지게 된다. I_p 의 전반적인 변화는 각 자극 사이의 간격이 증가함에 따라 감소한다. 이와 같이 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기는 정해진 UV 강도에서 펄스 간격 및/또는 펄스의 수를 변경함으로써 I_p 의 수준을 변조 할 수 있으며, 여러 매개 변수를 조절함으로써 발화 임계값을 제어할

수 있도록 한다.

[0095] 만약 발화에 대한 임계 값이 $10\mu A$ 로 설정되는 경우, 임계 전류보다 높은 I_p 출력 I_w 가 펄스 수 및 펄스 간격에 대한 함수로서 각각 도 7의 (d) 및 (e)에 도시되어 있다. 적은 수의 펄스($n < 3$, $\Delta t = 0.2s$, $\Delta d = 3s$)의 경우 I_w 는 0에 가깝고 이는 발화 조건이 없음을 나타낸다. 반면, 그 보다 많은 수의 펄스에서 I_p 의 누적 특성으로 인해 I_w 는 0이 아니라 펄스 수가 증가함에 따라 증가한다. 또한, 도 7의 (e)에는 6 개의 변조 스파이킹 입력(강도 = $4mW/cm^2$, $\Delta t = 0.2s$)의 펄스 간격에 대한 함수로서 I_w 의 변화가 도시되어 있다. 도 7의 (d) 및 (e)를 참조하면 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기의 발화 특성은 펄스 수 및/또는 펄스 간격에 의해 조절 될 수 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 수치는 뉴로모픽 광 검출기의 임계값 특성이 적용되는 스파이크에 의해 조절될 수 있음을 나타낸다. 예를 들어, 6 개의 펄스(강도 = $4mW/cm^2$, $\Delta t = 0.2s$, $\Delta d = 9s$)는 임계값을 초과하는 전류를 생성할 수 없지만, 간격 Δd 를 6초로 줄이는 경우 임계값을 초과할 수 있다. 즉, 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기를 통해 바이오 뉴런과 매우 유사한 광전류의 통합을 수행 할 수 있기 때문에, 바이오 신경망에서의 시간 정보 처리를 모방 할 수 있는 가능성을 제공하게 된다.

[0097] 한편, 시냅스 가중치와 같은 시냅스의 기본 요소는 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^+ 이온군의 농도에 의해 조절 될 수 있다. 본 발명의 산화아연 기반 뉴로모픽 광 검출기는 PPC와 같은 광 유도 된 시냅스 기능을 모방하였다. 일반적으로, 인간 뇌의 학습 및 기억 기능의 기원은 시냅스 가소성의 경험에 따른 변화에 의한 것으로 여겨지며, 상기 시냅스 가소성은 뉴런의 활동에 의해 변경 될 수 있다. 따라서, 광 유도에 의한 뇌와 유사한 기억 저장을 구현하기 위해 도 8의 (a)에 도시된 바와 같이 상이한 수의 펄스에 대해 I_p 를 측정하였다. 종래의 메모리 기술과는 달리, 사람의 기억은 기억의 잔류 시간에 따라 단기 및 장기 메모리의 두 가지 유형으로 분류된다.

[0098] 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기는 광자 감지, 신호 통합을 통한 신호 처리 및 메모리 장치의 기능을 동시에 나타낼 수 있기 때문에, 연관 메모리를 통한 패턴 인식을 수행할 수 있는 장치의 배열을 구성하였다. 도 8의 (b)에 도시된 바와 같이, 시공간 처리 및 학습 기능을 확인하기 위해 ITO 전극을 포함하는 16 개의 뉴로모픽 광 검출기의 배열이 사용되었다. 이러한 산화물 기반 뉴로모픽 광 검출기는 가시광 영역에서 높은 투과율을 보여 주며, 특히 투명 광전자 장치를 설계하는 데 유용하다.

[0100] 적절한 이미지의 처리를 위해서는 광 강도에 대한 반응을 요구한다. 또한 시공간 패턴을 인식하기 위해 시냅스 가중치가 순차적으로 연관될 필요가 있다. 이러한 조건을 만족하기 위해 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기 어레이는 직접적인 광 입력을 감지하는 광 센서로 작동함과 동시에, 학습 규칙에 따라 시냅스 가중치를 조정하는 처리 장치로 작동한다. 도 8의 (c)에는 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기 어레이의 사진이 도시되어 있다. 도 8의 (d) 및 (e)를 참조하면 본 발명의 뉴로모픽 광 검출기 어레이는 상이한 강도의 UV 스파이크 정보에 동시에 노출된다. 도 8의 (d)에는 $8mW/cm^2$ 의 강도의 UV 입력이 도시되어 있고, 도 8의 (e)에는 $2mW/cm^2$ 의 강도의 UV 입력이 도시되어 있다. 이와 같은 광 입력의 후 400초가 경과한 뒤 광 입력의 공간적 합산에 의해 생성 된 출력을 측정하였고, 측정 결과가 도 8의 (f)에 도시되어 있다.

[0102] 측정 결과, 저장도의 누적은 고강도보다 낮은 결과를 유도한다. 이와 같은 광 스파이크의 조합 의존적인 메모리 저장 동작은 필터링 후 정보를 선택적으로 저장하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 고강도 및 저장도의 UV는 임계값 등과 같은 상하 필터로 설정될 수 있다. 실제로, $4mW/cm^2$ 이상에 의해 생성된 I_p 는 논리 회로에서와 같이 '1'로 정의되며, 그 이하에 의해서는 논리 회로의 '0'과 같이 출력이 생성되지 않았다. 따라서 이와 같은 강도를 선택 강도라고 한다. 이와 같은 디지털 출력은 인간 뇌와 유사한 메모리 저장 과정에서 중요한 역할을 하며, 뉴로모픽 광 검출기의 임계 값 속성은 선택적 메모리를 저장하는 데 사용될 수 있다.

[0104] 이하에서는 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 광 검출기의 제조방법에 대하여 설명하도록 한다.

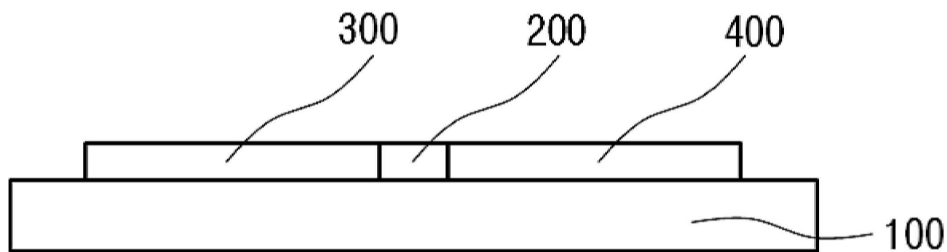
[0106] 본 발명의 일 실시예에서 기관으로 사용되는 폴리에틸렌 테레프탈레이트는 아세톤, 메탄올 및 탈 이온수(DI)에 의해 초음파로 순차적으로 세정되었다.

[0107] 산화아연층은 증착에서는 도징 펄스들 사이에서 챔버를 퍼지 하는데 사용되는 수송 전구체로서 유량 50sccm의 질소 가스를 사용하였다. 디에틸아연과 H_2O 모두 세척 시간은 10 초로 설정되었다. 산화아연층의 증착은 $150^\circ C$ 에서 수행되었다. 사이클 수는 320이며, 이와 같은 반복을 통해 원하는 두께를 생성하였다.

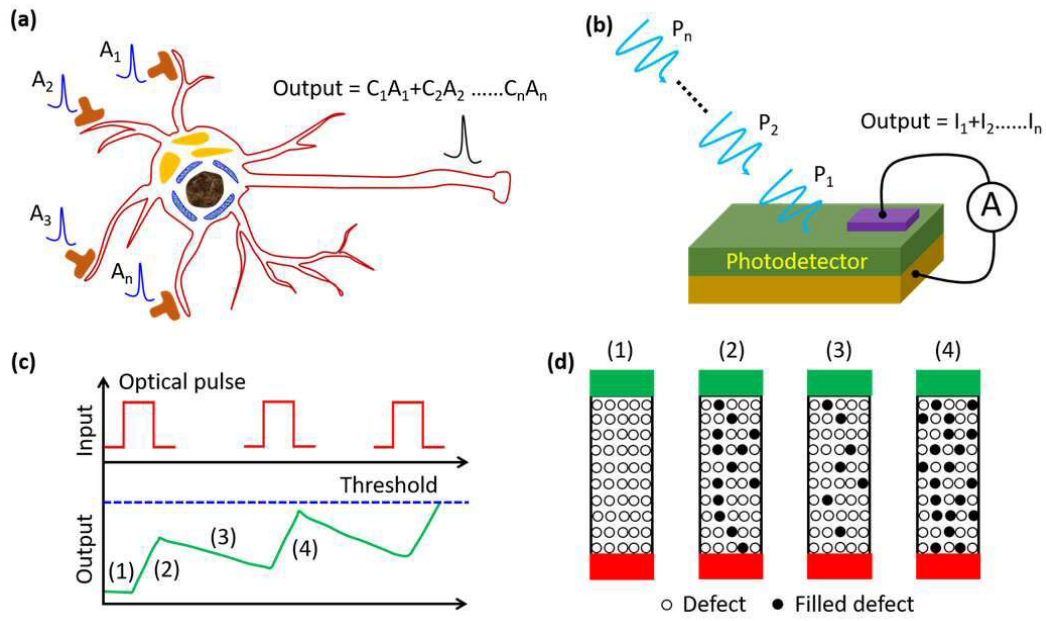
- [0108] Ag 및 Al의 증착은 50 sccm의 Ar 가스 유동하에 DC 300W의 전력에서 초 순수(99.99%) Ag 및 Al 타겟을 사용하는 DC 스퍼터링 공정에 의해 수행되었다.
- [0110] 본 발명의 일 실시예에 따르면 나노핀 구조를 갖는 산화아연층이 광 입력에 대해 광전류를 출력하여 광 검출기의 역할을 수행할 수 있다.
- [0111] 본 발명의 일 실시예에 따르면 복수의 광 입력에 대해 합산된 광전류를 출력하여 뉴런과 유사한 거동을 보여 뉴로모픽 장치로 사용될 수 있다.
- [0112] 본 발명의 일 실시예에 따르면 광 입력 후 광전류가 서서히 감소하여 뉴런의 누설과 유사한 거동을 보여 뉴로모픽 장치로 사용될 수 있다.
- [0113] 본 발명의 일 실시예에 따르면 복수의 광 입력에 의해 광 전류의 세기가 조절됨으로써 시냅스 가소성과 유사한 거동을 보여 뉴로모픽 장치로 사용될 수 있다.
- [0114] 본 발명의 일 실시예에 따르면 다양한 광 입력에 의해 단기 및 장기 기억과 같은 시냅스와 유사한 거동을 보여 뉴로모픽 장치로 사용될 수 있다.
- [0115] 본 발명의 일 실시예에 따르면 복수의 뉴로모픽 광 검출기의 배열을 통해 광 입력의 시공간 정보 처리를 수행할 수 있다.
- [0117] 제시된 실시예들에 대한 설명은 임의의 본 발명의 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 본 발명을 이용하거나 또는 실시할 수 있도록 제공된다. 이러한 실시예들에 대한 다양한 변형들은 본 발명의 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명백할 것이며, 여기에 정의된 일반적인 원리들은 본 발명의 범위를 벗어남이 없이 다른 실시예들에 적용될 수 있다. 그리하여, 본 발명은 여기에 제시된 실시예들로 한정되는 것이 아니라, 여기에 제시된 원리들 및 신규한 특징들과 일관되는 최광의의 범위에서 해석되어야 할 것이다.

도면

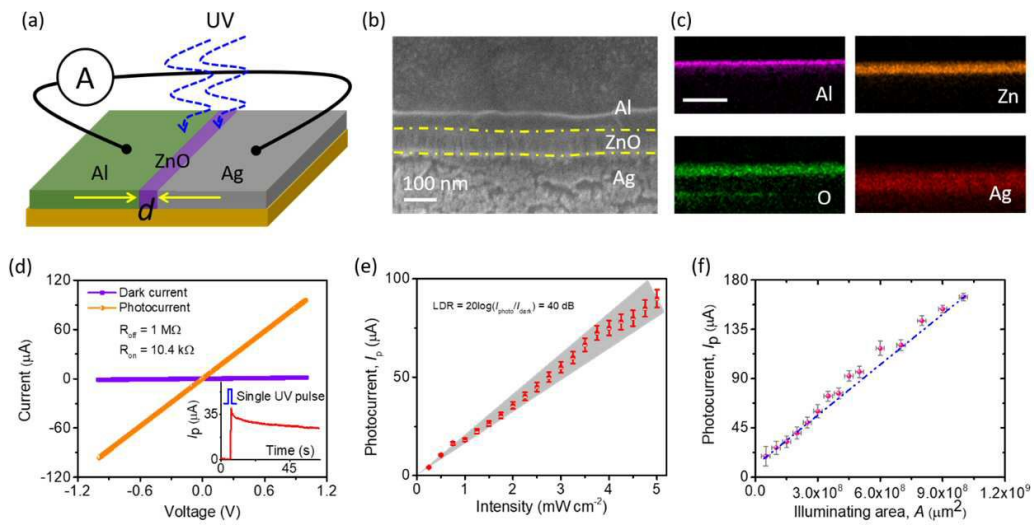
도면1



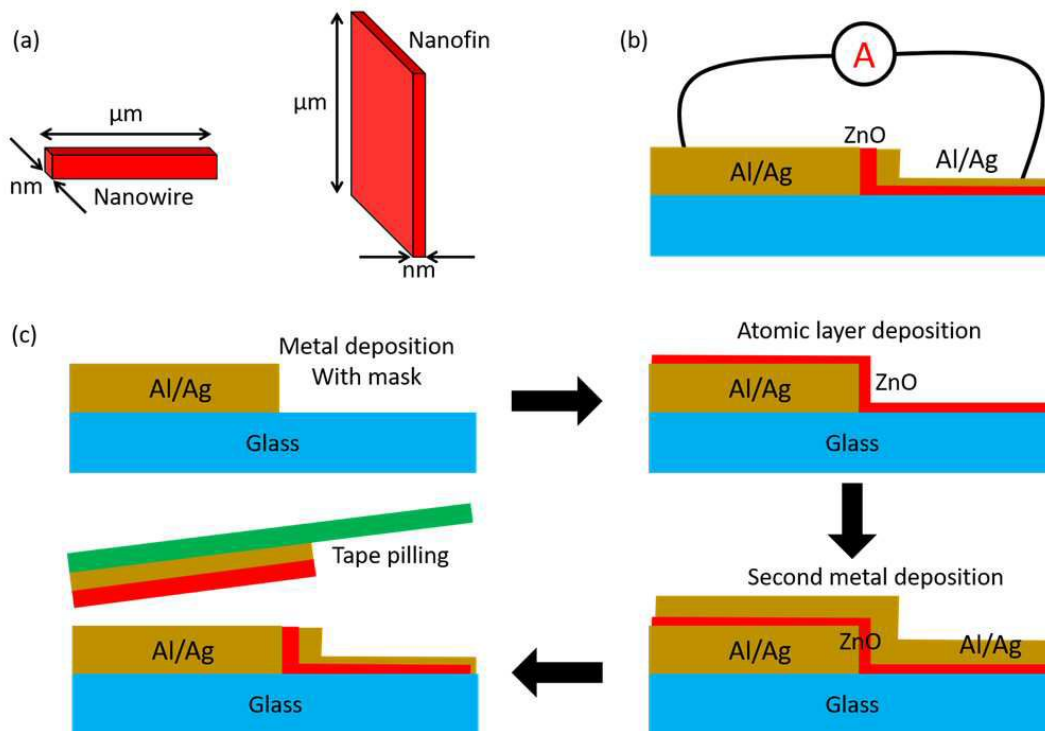
도면2



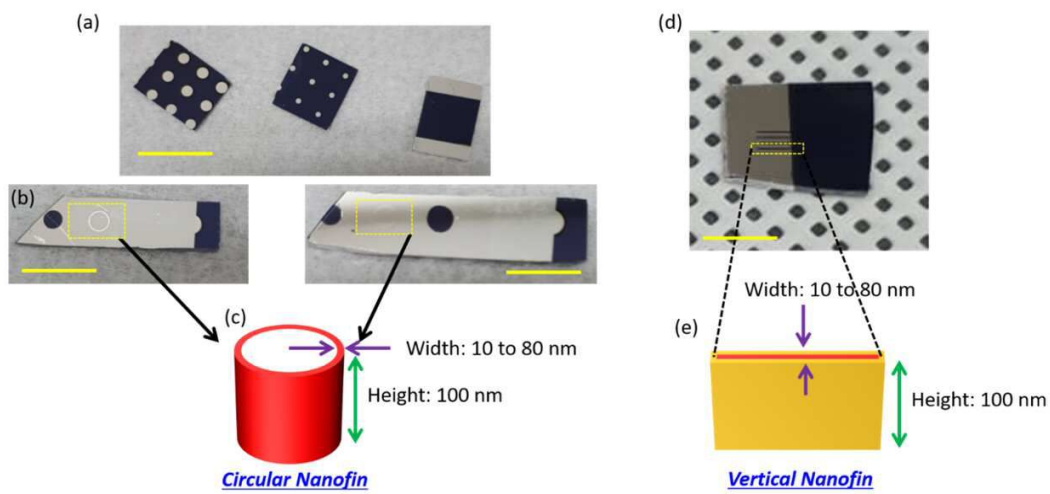
도면3



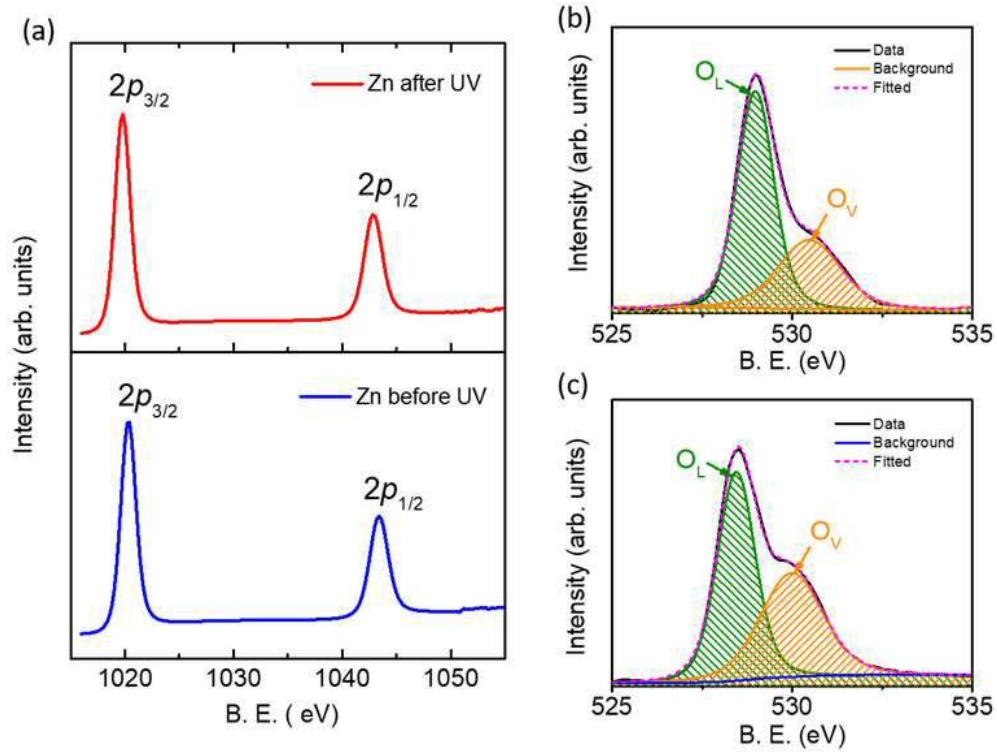
도면4



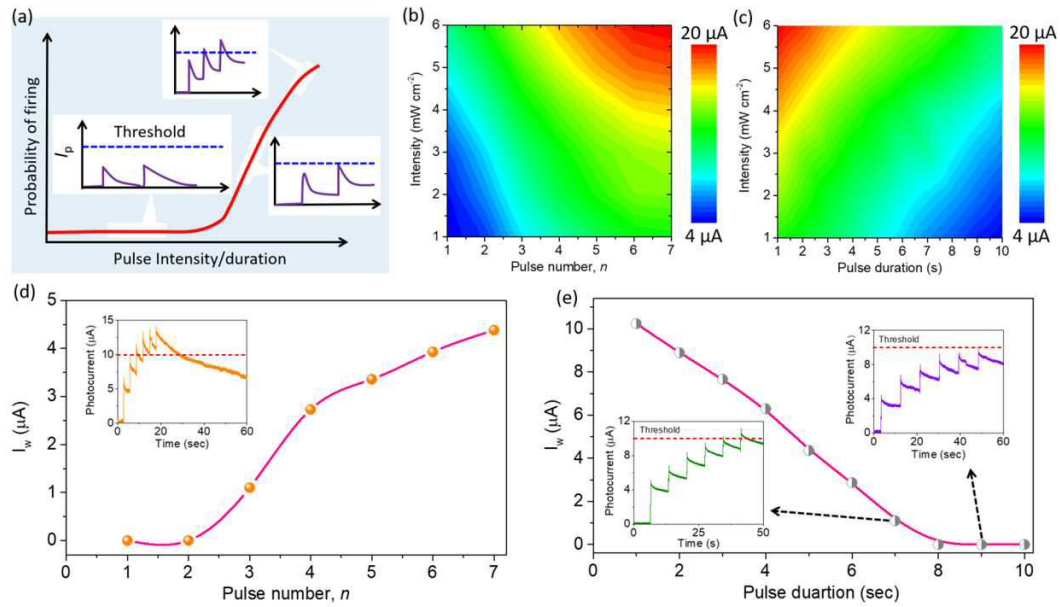
도면5



도면6



도면7



도면8

