

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)(11) 공개번호 10-2023-0060263
(43) 공개일자 2023년05월04일(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H10B 63/00 (2023.01) G06N 3/063 (2023.01)
H10N 70/00 (2023.01)(52) CPC특허분류
H10B 63/20 (2023.02)
G06N 3/063 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2021-0144789

(22) 출원일자 2021년10월27일

심사청구일자 2021년10월27일

(71) 출원인

인천대학교 산학협력단

인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)

(72) 발명자

김준동

인천광역시 연수구 컨벤시아대로130번길 32 (송도동, 송도자이하버뷰2단지아파트) 207동 1402호

BHATNAGAR, Priyanka

인천광역시 연수구 송도동 아카데미로 119, 인천대학교 전기공학과

파텔 말케시 쿠마르

인천광역시 연수구 송도동 아카데미로 119, 인천대학교 전기공학과

(74) 대리인

강정빈, 심찬, 송두현

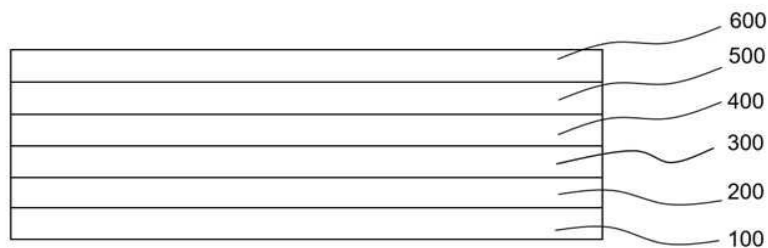
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리 및 그 제조방법

(57) 요약

본 발명은 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리 및 그 제조방법에 관한 것으로서, 메모리스트 및 뉴로모픽 특성을 가져 인체 시각 기능과 통각 기억 매커니즘을 재현하면서, 외부 전원 없이 자가 구동할 수 있고, 가시광 영역에서 높은 투명성을 가지는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리 및 그 제조방법에 관한 것이다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H10N 70/20 (2023.02)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711107490
과제번호	2020R1A2C100948011
부처명	과학기술정보통신부
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	8/10
과제수행기관명	인천대학교
연구기간	2020.03.01 ~ 2023.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711119637
과제번호	2020H1D3A2A02085884
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	해외고급과학자초빙(Brain Pool)사업
연구과제명	고성능 반도체 투명 태양광 에너지 시스템 및 순환 에너지 기술 개발
기 여 율	2/10
과제수행기관명	인천대학교
연구기간	2020.07.01 ~ 2022.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서,
유리기판;
상기 유리기판 위에 배치되는 FTO전극층;
상기 FTO전극층 위에 배치되는 ZnO박막층;
상기 ZnO박막층 위에 배치되는 NiO박막층; 및
상기 NiO박막층 위에 배치되는 AgNW전극층;을 포함하고
상기 AgNW전극층은 ZnO초박막전극층을 포함하는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

청구항 2

청구항 1에 있어서,
상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 저항스위칭 메모리 소자로서 순방향 바이어스 및 역방향 바이어스에서 상이한 저항 특성을 갖는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

청구항 3

청구항 1에 있어서,
상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 순방향의 셋 전압이 인가되었을 때 저저항 상태로 스위칭되고, 역방향의 리셋 전압이 인가되었을 때 고저항 상태로 스위칭되는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

청구항 4

청구항 1에 있어서,
상기 ZnO초박막전극층은 상기 AgNW전극층 일면에 증착함으로써 열 또는 바이어스 인가에 따른 상기 AgNW전극층의 변형을 방지하는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

청구항 5

청구항 1에 있어서,
상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 0.15 V 이하의 인가 바이어스에서도 응답 특성을 갖는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

청구항 6

청구항 1에 있어서,
상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 30 ms이하의 응답 시간을 갖는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

리.

청구항 7

청구항 1에 있어서,

상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 3.95×10^5 이상의 신호 대 잡음비를 갖는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

청구항 8

청구항 1에 있어서,

상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 400 내지 800 nm의 파장의 범위를 갖는 광에 대하여 40 %이상의 광 투과율을 갖는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

청구항 9

청구항 1에 있어서,

상기 AgNW전극층은 10 내지 30 nm의 직경을 갖고,

상기 ZnO초박막전극층은 1 내지 500 nm의 두께 범위를 갖는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리.

청구항 10

뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 제조방법으로서,

유리기판을 준비하는 단계;

상기 유리기판 위에 FT0전극층을 배치하는 단계;

상기 FT0전극층 위에 ZnO박막층을 배치하는 단계;

상기 ZnO박막층 위에 NiO박막층을 배치하는 단계; 및

상기 NiO박막층 위에 AgNW전극층을 배치하는 단계;를 포함하고

상기 AgNW전극층은 ZnO초박막전극층을 포함하는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리 및 그 제조방법에 관한 것으로서, 멤리스터 및 뉴로모픽 특성을 가져 인체 시각 기능과 통각 기억 메커니즘을 재현하면서, 외부 전원 없이 자가 구동할 수 있고, 가시광 영역에서 높은 투명성을 가지는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리 및 그 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003]

시각이란 눈을 통해 사물의 크기, 모양, 색깔 등의 정보를 식별하고 인지할 수 있는 감각으로 인간이 생존하고 생활하는 데 있어서 가장 중요하고 발달된 감각 기능이다. 또한 시신경은 제2 뇌신경으로서 망막과 뇌 사이에 100 만개 이상의 신경세포다발로 구성되어 망막에서 받은 자극을 신호로 변환하여 뇌를 포함한 중추신경계로 시

각 정보를 전달한다.

[0004] 한편 이러한 시각의 상실 및 저하는 사고 또는 노화에 따른 수정체의 혼탁, 시신경 또는 망막의 손상 등과 같이 다양한 형태로 나타날 수 있다. 인체는 대부분의 외부 자극을 시각으로 인지하기에 이를 상실하였을 경우 일상 생활에서의 막대한 불편을 초래하여 삶의 질을 떨어뜨리고 각종 위험에 노출될 우려가 있다. 따라서 시각 신경이 상실되었을 경우에 생체 모방 전자장치를 삽입함으로써 인체의 시각 신경세포를 대체하기 위한 연구가 선행되고 있다.

[0005] 한편 통각이란 조직에 손상을 주거나 잠재적인 손상을 줄 정도의 강한 외부 자극에 대해 반응하는 감각이다. 통각 기억 메커니즘은 인체가 조직 세포를 손상시킬 우려가 있는 강한 외부 자극을 회피하거나 제거하는 등 적절한 방법으로 대응하게 함으로써 조직손상을 유발할 수 있는 외부의 위험요인으로부터 인체를 보호할 수 있게 한다. 일례로 시각의 경우 시신경을 파괴시킬 우려가 있거나 피부 질환을 일으킬 우려가 있는 강한 외부 시각 자극에 대해 인체는 통상적인 반응에 비해 빠르게 반응하여 외부 자극을 제거하거나 감소시켜 시신경을 포함한 인체를 보호하게 된다.

[0006] 상실한 시각 기능과 통각 기억 메커니즘을 구현하기 위한 방법으로 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템 및 설계가 제시되고 있다. 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템은 인간의 뇌를 모방한 인공지능을 반도체를 포함한 하드웨어로 구현한 것으로서 미래의 메모리 장치로 가장 유망한 분야로 제시되고 있다. 이상적인 형태의 하드웨어로 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템을 구현하는데 있어 재료의 가용성, 간단한 형태의 장치 구조 및 저전력 구동 등의 과제가 해결되어야 한다. 특히 인체의 뇌는 20 W 수준의 적은 전력만으로 막대한 양의 데이터를 처리함이 알려져 왔으며 이를 모방하기 위한 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템은 외부 전원없이 자가 발전하여 에너지 독립적이며 저전력으로 구동될 수 있어야 한다.

[0007] 따라서 상기와 같은 과제를 해결하여 자가 발전하여 에너지 독립적이면서, 인체의 시각 기능과 통각 기억 메커니즘을 구현한, 이상적인 형태의 뉴로모픽 소자에 대한 연구에 대한 필요성이 대두되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0009] (특허문헌 0001) 한국등록특허 10-1869337 B1 “황화주석 박막 및 그 형성 방법, 박막 태양전지 및 그 제조방법” (2016.4.27 등록)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명의 목적은 멤리스터 및 뉴로모픽 특성을 가져 인체 시각 기능과 통각 기억 메커니즘을 재현하면서, 외부 전원 없이 자가 구동할 수 있고, 가시광 영역에서 높은 투명성을 가지는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리 및 그 제조방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0012] 상기와 같은 과제를 해결하기 위하여 본 발명의 일 실시예는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서, 유리기판; 상기 유리기판 위에 FTO전극층; 상기 FTO전극층 위에 ZnO박막층; 상기 ZnO박막층 위에 NiO박막층; 및 상기 NiO박막층 위에 AgNW전극층;을 포함하고 상기 AgNW전극층은 ZnO초박막전극층을 포함하는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리를 제공한다.

[0013] 본 발명의 일 실시예에서는, 상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 저항스위칭 메모리 소자로서 순방향 바이어스 및 역방향 바이어스에서 상이한 저항 특성을 가질 수 있다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에서는, 상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 순방향의 셋 전압이 인가되었을 때 저항 상태로 스위칭되고, 역방향의 리셋 전압이 인가되었을 때 고저항 상태로 스위칭될 수 있다.

- [0015] 본 발명의 일 실시예에서는, 상기 ZnO초박막전극층은 상기 AgNW전극층 일면에 증착함으로써 열 또는 바이어스 인가에 따른 상기 AgNW전극층의 변형을 방지할 수 있다.
- [0016] 본 발명의 일 실시예에서는, 상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 0.15 V 이하의 인가 바이어스에서도 응답 특성을 가질 수 있다.
- [0017] 본 발명의 일 실시예에서는, 상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 30 ms이하의 응답 시간을 가질 수 있다.
- [0018] 본 발명의 일 실시예에서는, 상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 3.95×10^5 이상의 신호 대 잡음비를 가질 수 있다.
- [0019] 본 발명의 일 실시예에서는, 상기 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 400 내지 800 nm의 파장의 범위를 갖는 광에 대하여 40 %이상의 광투과율을 가질 수 있다.
- [0020] 본 발명의 일 실시예에서는, 상기 AgNW전극층은 10 내지 30 nm의 직경을 갖고, 상기 ZnO초박막전극층은 1 내지 500 nm의 두께 범위를 가질 수 있다.
- [0021] 상기와 같은 과정을 해결하기 위하여, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 제조방법으로서, 유리기판을 준비하는 단계; 상기 유리기판 위에 FTO전극층을 배치하는 단계; 상기 FTO전극층 위에 ZnO박막층을 배치하는 단계; 상기 ZnO박막층 위에 NiO박막층을 배치하는 단계; 및 상기 NiO박막층 위에 AgNW전극층을 배치하는 단계;를 포함하고 상기 AgNW전극층은 ZnO초박막전극층을 포함하는, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 제조방법을 제공한다.

발명의 효과

- [0023] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 가시광 아래에서 높은 광투과율과 저항 스위칭 특성을 가지는 투명태양전지를 기초로 하여 제작함으로써 인체의 시각 기능과 통각 수용 매커니즘을 모방할 수 있다.
- [0024] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 저항스위칭 메모리소자로서 순방향 및 역방향 바이어스가 인가되었을 때 고저항에서 저저항 상태 또는 그 역으로 저항 스위칭이 발생할 수 있다.
- [0025] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 금속산화물 기반 투명태양전지를 자가 전원장치로 사용하여 별도의 외부 전원없이 자가 발전함으로써 저전력으로 구동되는 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템을 구현할 수 있다.
- [0026] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 AgNW전극층 일측에 ZnO초박막전극층을 증착함으로써 열 또는 바이어스 인가에 따른 AgNW전극층의 변형을 방지할 수 있다.
- [0027] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 400 - 800 nm의 파장을 갖는 광원 아래에서 40% 이상의 광 투과성을 가져 인체의 광수용체와 유사하게 시각 기능을 모방할 수 있다.
- [0028] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 0.15 V 이하의 인가 바이어스에서도 응답 특성을 갖고 30 ms이하의 응답 시간을 가져 인체의 통각 수용 매커니즘을 모방할 수 있다.
- [0029] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 3.95×10^5 이상의 높은 신호 대 잡음비를 가져 장치의 신뢰성을 증명할 수 있다.
- [0030] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 10 mW/cm^2 의 광도와 400 nm의 파장을 갖는 자외선 광원 아래에서 $838 \mu\text{A/cm}^2$ 의 단락전류밀도 및 482 mV의 개방전압을 출력하여 1.57 %의 전력변환효율을 가질 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0032] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 구조를 개략적으로 도시한다.
- 도 2는 인체의 시각 기능 및 통각 기억 매커니즘을 개략적으로 도시한다.
- 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 실측 이미지와 전기적 및 광학적 특성을 도시한다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 멤리스터 특성을 도시한다.
- 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 전류 특성을 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0033] 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.
- [0034] 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.
- [0035] 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.
- [0036] 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.
- [0037] 또한, 본 명세서에서 명백하게 다른 내용을 지시하지 않는 “한” 과, “상기” 와 같은 단수 표현들은 복수 표현들을 포함한다는 것이 이해될 수 있을 것이다.
- [0038] 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.
- [0039] 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.
- [0040] 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.

- [0042] 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 ZnO/NiO 이중접합 투명태양전지를 기초로 하여 제작할 수

있다. 이하에서는 설명의 편의성을 위하여 '본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리를 구성하는 ZnO/NiO 이중접합 투명태양전지'를 '본원 발명의 투명 광전지 메모리' 등으로 표현될 수 있다.

[0044] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 구조를 개략적으로 도시한다.

[0046] 도 1에서 도시된 바와 같이, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서, 유리기관(100); 상기 유리기관(100) 위에 FTO전극층(200); 상기 FTO전극층(200) 위에 ZnO박막층(300); 상기 ZnO박막층(300) 위에 NiO박막층(400); 및 상기 NiO박막층(400) 위에 AgNW전극층(500);을 포함하고 상기 AgNW전극층(500)은 ZnO초박막전극층(600)을 포함한다.

[0048] 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 인체의 시각 기능을 담당하는 광수용체와 통각 수용 메커니즘을 통해 조직 손상을 방지하는 통각수용체를 모방하는 뉴로모픽 시스템을 구현하기 위한 것이다. 따라서 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 가시 영역에서 높은 광투과율을 가져 인체의 광수용체를 모방할 수 있어야 하고, 멤리스터(memristor)특성을 가져 인체의 통각수용체를 모방할 수 있어야 하고, 상기 특성을 별도의 외부 전원없이 구동함으로써 에너지 독립을 실현해야 한다.

[0049] 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 상기의 특성을 갖는 투명태양전지를 기초로 하여 제작하였다. 구체적으로 본원 발명의 기초를 이루는 투명태양전지는 높은 광투과율과 전력변환효율을 갖는 것으로 증명된 바 있는 금속산화물을 기반으로 하여 제작하였다. 금속 산화물은 넓은 밴드갭, 큰 엑시톤 가둠 에너지(exciton binding energy), 비화학양론적(non-stoichiometric) 구조, 높은 안정성을 특징으로 하여 상기한 특성을 구현하기 가장 적합한 소재 중 하나이다. 또한 금속산화물의 이중접합 구조는 높은 밴드갭 에너지를 가져 단파장 자외선 광을 흡수하여 발전할 수 있고 가시광을 투과시켜 가시 영역에서 높은 투명성을 가질 수 있다.

[0050] 또한 뉴로모픽 시스템의 외부 전원을 대체하는 방법에 있어 p-n접합, 벌크 광전지(bulk photovoltaic), 압전(piezoelectricity) 및 변전(flexoelectricity) 효과 등이 제시된 바 있다. 다양한 형태의 이중접합 금속산화물 및 전원 공급 방법에 대하여 본원 발명에서는 n형 ZnO/p형 NiO 이중접합 금속산화물을 기반으로 한 투명태양전지를 기초로 하여 시신경계와 유사하면서 에너지 독립을 실현할 수 있는 뉴로모픽 시스템을 구현하였다. ZnO/NiO 이중접합 투명태양전지는 가시 영역에서 60 %이상의 광 투명성을 가지면서 높은 전력변환효율을 가짐이 증명된 바 있다.

[0051] 또한 본원 발명의 투명 광전지 메모리가 저항 스위칭 특성을 가져 인체의 통각 기억 메커니즘과 유사하고 통각수용체를 대체할 수 있음을 증명하였다. 구체적으로 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 순방향 및 역방향 바이어스가 인가되었을 때 각각 상이한 저항 특성을 가지며 결과적으로 입사광에 반응하여 저항 상태가 변동된다.

[0052] 결과적으로 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 n형 ZnO/p형 NiO 이중접합 투명태양전지를 기초로 하여 제작함으로써 가시 영역에서 높은 광투명성을 가짐으로써 인체의 광수용체를 모방할 수 있고, 외부 전원없이 발전하여 에너지 독립을 실현할 수 있고, 멤리스터 및 저항 스위칭 특성을 가져 인체의 통각수용체를 모방할 수 있다.

[0054] 이하에서는 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 기초를 이루는 ZnO/NiO 이중접합 투명태양전지의 제조방법에 대하여 설명하도록 한다.

[0056] 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 기초를 이루는 ZnO/NiO 이중접합 투명태양전지는 유리 기관 상에 투명한 금속 산화물 층을 증착시켜 형성할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서는 스퍼터링 설비를 사용하여 FTO, ZnO, NiO 및 AgNW 층의 박막을 순차적으로 증착하였다. 모든 금속 산화물 막은 5 mTorr의 작동 압력에서 증착되었고, 기본 압력은 2×10^{-6} Torr이다. 불소 도핑된 산화 주석(FTO)이 코팅된 유리 기관을 아세톤, 메탄올 및 탈 이온수(DI) 수를 사용하여 10 분 동안 초음파 세정하였다. 초음파 세정 후 기관을 흐르는 N₂ 가스를 사용하여 건조시켰다.

- [0057] 이어서, ZnO박막층(300)과 NiO박막층(400)은 스퍼터링 공정에 의해 증착되었다. FTO가 코팅된 유리 기판 위에 RF 마그네트론 스퍼터링(RF Magnetron Sputtering) 공정을 수행하여 ZnO박막층(300)을 증착하였다. 구체적으로, Zn(iTASCO, 순도 99.99%)의 타겟은 Ar 가스 (50 sccm) 가스가 흐르는 상태에서 300W로 구동되어 6.66 nm/min의 성장속도로 증착하였다. 이어서 ZnO박막층(300) 위에 반응성 스퍼터링 공정을 수행하여 NiO박막층(400)을 증착하였다. 구체적으로, Ni(iTASCO, 순도 99.99%)의 타겟은 Ar 가스 (20 sccm), O₂ 가스 (5 sccm)가 흐르는 상태에서 50W로 구동되어 2.5 nm/min의 성장속도로 증착하였다.
- [0058] 이어서, ZnO/NiO 이중접합부에 스핀 코팅공정을 수행하여 AgNW전극층(500)을 증착하였다. AgNW 잉크(Nanopyrix, South Korea)를 사용하여 스핀 코팅하였다. 100 도의 온도조건에서 1분간 열처리 공정을 수행하였다.
- [0059] 이어서, AgNW전극층(500)에 스퍼터링 공정을 수행하여 ZnO초박막전극층(600)을 증착함으로써 투명태양전지의 안정성을 보장하였다. ZnO초박막전극층(600)의 증착으로 열 또는 바이어스가 인가되었을 때 AgNW전극층(500)의 변형을 방지할 수 있다. ZnO초박막전극층(600)이 증착된 AgNW전극층(500)은 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol)을 사용하여 Cu 그리드 카본(Cu grid-carbon) 위에 분사되었고 질소 기류에서 건조되었다.
- [0060] 결과적으로 이와 같이 제조된 본 발명의 일 실시예에 따른 투명태양전지는 유리기판(100) / FTO전극층(200) / ZnO박막층(300) / NiO박막층(400) / AgNW전극층(500)의 구성을 갖고 AgNW전극층(500)은 ZnO초박막전극층(600)을 포함하고 있다.
- [0062] 상기의 방법을 통해 구현된 본원 발명의 기초를 이루는 투명태양전지는 400 nm파장과 10 mW/cm² 광도를 가지는 자외선 광원 아래에서 영역에서 60 %이상의 광 투과율을 가진다.
- [0063] 상기의 방법을 통해 구현된 본원 발명의 기초를 이루는 투명태양전지는 10 mW/cm²의 광도와 400 nm의 파장을 가지는 자외선 광원 아래에서 838 μ A/cm²의 단락전류밀도 및 482 mV의 개방전압을 출력하여 1.57 %의 전력변환효율을 가진다.
- [0064] 상기의 방법을 통해 구현된 본원 발명의 기초를 이루는 투명태양전지는 2.45의 다이오드 이상계수를 가져 광다이오드로서 동작한다.
- [0065] 상기의 방법을 통해 구현된 본원 발명의 기초를 이루는 투명태양전지는 -0.1 V의 낮은 바이어스에서도 응답 특성을 가진다.
- [0066] 상기의 방법을 통해 구현된 본원 발명의 기초를 이루는 투명태양전지는 20 ms의 빠른 응답시간을 가진다.
- [0068] 또한 본 발명의 일 실시예에 따른 투명태양전지는 1 이상의 측정장치를 이용하여 특성을 도출할 수 있다. 전계 방출주사전자현미경(FE-SEM, JEOL, JSM_7001F)을 사용하여 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 기초를 이루는 ZnO/NiO 이중접합 투명태양전지의 단면을 관찰했다. 환형 고각도 암시야(HAADF, High-angle annular dark field)와 에너지 분산형 X-선 분광법(energy-dispersive X-ray spectroscopy)을 사용하는 열전계 투과전자현미경(thermal field emission transmittance electron microscope) (FEI, TALOS F200X)을 사용하여 표본의 구조적 특성을 관찰했다. X선 회절 분석법(X-ray diffraction)을 사용하여 ZnO초박막전극층(600)의 결정특성을 관찰했다.
- [0069] 투명태양전지의 광학적 특성은 300 - 1400 nm의 파장을 갖는 광원 아래에서 분광 광도계(Shimadzu, UV-2600)로 분석할 수 있다.
- [0070] 투명태양전지의 전류-전압(I-V) 특성을 도출하기 위해 정전위기 및 정전류기(PGStat, WonA tech, Zive SP2)를 사용하였다.
- [0071] 100 mW/s의 스캔 속도를 가지는 선형 스위프 전압 측정 기법을 사용하여 조명 아래에서 투명태양전지의 특성을 도출하였다. 또한 이상계수(ideality factor)는 $(q/kT) \times (dV/d(\ln I))$ 의 식을 통해 도출할 수 있다. 여기서 (kT/q) 는 mV단위의 열 포텐셜이다.

- [0072] 가시 영역에서의 광원의 광도를 보정하기 위하여 전력량계(KUSAM-MECO, KM-SPM-11)가 사용되었다.
- [0074] 바람직하게는, 상기 AgNW전극층(500)의 직경은 20 nm이다. 이와 같은 AgNW전극층(500)의 직경은 투명성과 전기 전도도에 따라 가변할 수 있으나, 위의 범위에서 투명성에 대한 저하를 최소화하면서, 양호한 전기 전도도를 가질 수 있다.
- [0076] 바람직하게는, 상기 ZnO초박막전극층(600)의 두께는 15 nm이다. 이와 같은 ZnO초박막전극층(600)의 두께는 투명성과 광전효율 조절 목적에 따라 가변할 수 있으나, 위의 범위에서 열 또는 바이어스 인가에 따른 AgNW전극층(500)의 변형을 방지할 수 있다.
- [0078] 도 2는 인체의 시각 기능 및 통각 기억 매커니즘을 개략적으로 도시한다.
- [0080] 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 인체의 시각 기능을 담당하는 광수용체와 통각 기억 매커니즘을 통해 조직 손상을 방지하는 통각수용체를 모방하는 뉴로모픽 시스템을 구현하기 위한 것이다. 따라서 이상적인 형태의 뉴로모픽 시스템을 구현하기 위해서 인체의 시각 기능과 통각 기억 매커니즘에 대한 이해가 선행되어야 한다.
- [0082] 도 2의 (a)는 인체의 시각 기능에 대한 원리를 도시하고 있다. 도 2의 (a)에 도시된 바와 같이 시신경은 제2 뇌신경으로서 망막과 뇌 사이에 100 만개 이상의 신경세포다발로 구성되어 망막에서 받은 자극을 신호로 변환하여 뇌를 포함한 중추신경계로 시각 정보를 전달한다. 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 입사광에 대한 광신호를 감지하고 가시 영역에서 높은 광투광율을 가져 인체의 시각 기능을 대체할 수 있다.
- [0083] 도 2의 (b)는 인체의 통각 기억 매커니즘에 대한 원리를 도시하고 있다. 인체의 통각수용체는 조직에 손상을 줄 우려가 있는 강한 외부 자극에 대해 통각을 느끼게 함으로써 외부자극을 회피하거나 제거하여 인체를 보호할 수 있게 한다. 일례로 시각에 있어서 안구 손상 또는 피부 질환을 일으킬 수 있는 강한 광에 대해서 인체의 신경계는 빠르게 반응하여 손상을 제거하거나 감소시켜 인체를 보호한다.
- [0084] 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 멤리스터 및 저항 스위칭 특성을 가져 인체의 통각 기억 매커니즘을 모방할 수 있다. 구체적으로 투명 광전지 메모리의 저항 특성은 인가된 바이어스에 대응하여 높은 저항에서 낮은 저항으로 또는 그 역으로 유도될 수 있다.
- [0085] 이는 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리가 자가 구동장치로서 복수의 매개변수로 구동되어 메모리 및 뉴로모픽 기능을 수행함을 고려할 때 이상적인 형태의 인공 광수용체 및 메모리를 구현하는 데 적합함을 의미한다.
- [0087] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 실측 이미지와 전기적 및 광학적 특성을 도시한다.
- [0089] 도 3의 (a), (b), (c) 및 (d)는 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리를 1 이상의 관측장치를 이용하여 촬영한 것이다.
- [0091] 도 3의 (a)는 전계방출주사전자현미경(FE-SEM, JEOL, JSM_7001F)을 사용하여 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 단면을 촬영하여 얻은 단면 SEM 이미지(cross-sectional SEM image)이다. 도 3의 (a)에 도시된 바와 같이 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 유리기판(100) / FTO전극층(200) / ZnO박막층(300) / NiO박막층(400) / AgNW전극층(500)의 구성을 갖고 AgNW전극층(500)은 ZnO초박막전극층(600)을 포함하고 있음을 확인할 수 있다.

- [0092] 구체적으로 도 1에서 상술한 바와 같이 하부 전극은 불소 도핑된 산화 주석(FTO)이 코팅된 유리 기판으로 구성 하였고 상부 전극은 은나노 와이어(AgNW)로 구성하였다. 양 전극은 투명전극으로서 가시 영역에서 높은 광투과율을 가지면서 우수한 전기 전도도를 가짐이 증명된 바 있다. 또한 은나노 와이어(AgNW)는 입사광이 ZnO/NiO 이중접합부에 효율적으로 전파되도록 네트워크를 형성할 수 있다.
- [0093] 또한 n형-ZnO/p형-NiO 이중접합부는 입사광에 대하여 전기장을 형성하여 자가 발전할 수 있고 가시 영역에서 높은 광 투과율을 가진다. 구체적으로 광 에너지가 높은 자외선 광을 흡수하여 발전할 수 있고 가시 영역 광을 투과시켜 시계를 확보할 수 있다. 이러한 광학적 특성 및 전기적 특성을 고려했을 때 n형-ZnO/p형-NiO 이중접합부를 포함하는 투명태양전지가 인체의 시신경계를 모방하면서 자가발전할 수 있는 뉴로모픽 시스템을 구현하기 위한 가장 적합한 형태의 투명태양전지일 수 있다.
- [0094] 또한 도 3의 (a)의 오른쪽 이미지는 ZnO초박막전극층(600)이 증착된 AgNW전극층(500)을 확대하여 촬영한 것이다. 도 1에서 상술한 바와 같이 ZnO초박막전극층(600)은 열 또는 바이어스 인가에 따른 AgNW전극층(500)의 변형을 방지하고 보호할 수 있다.
- [0096] 도 3의 (b), (c), (d)는 환형 고각도 암시야(HAADF, High-angle annular dark field)와 에너지 분산형 X-선 분광법(energy-dispersive X-ray spectroscopy)을 사용하는 열전계 투과전자현미경(thermal field emission transmittance electron microscope) (FEI, TALOS F200X)을 사용하여 60 nm 스케일로 촬영된 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 원소 매핑도이다.
- [0097] 도 3의 (b)에 도시된 바와 같이 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 AgNW전극층(500)에 ZnO초박막전극층(600)이 균일하게 증착되어 있음을 확인할 수 있다. 구체적으로 AgNW전극층(500)의 직경은 20 nm이고, ZnO초박막전극층(600)의 두께는 15 nm이다.
- [0098] 도 3의 (c) 및 (d)는 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 AgNW전극층(500)의 원소 분포도를 도시한 것이다. 도 3의 (c) 및 (d)에 도시된 바와 같이 ZnO초박막전극층(600)을 포함하는 AgNW전극층(500)에 Zn, Ag 및 O의 원소가 일관되게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.
- [0100] 도 3의 (e)는 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 광학 특성 및 실구현 모습이다. 상술한 바와 같이 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 가시 영역에서 광투과율이 우수한 유리, FTO, ZnO, NiO, AgNW 등으로 구성함으로써 가시 영역에서 높은 광투과율을 확보할 수 있다. 구체적으로 도 3의 (e)에 도시된 바와 같이 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 400 내지 800 nm의 파장의 범위를 갖는 광에 대하여 60 %이상의 광투과율을 가질 수 있다. 이러한 높은 광투과율은 본원 발명의 투명 광전지 메모리가 시각 응용 장치에 광범위하게 활용될 수 있음을 시사하고 있다.
- [0102] 도 3의 (f), (g) 및 표 1은 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 온도에 따른 전류-전압(I-V) 특성을 도시한 것이다. 조명 아래에서 투명 광전지 메모리의 전류-전압(I-V) 특성을 도출하기 위해 정전위기 및 정전류기(PGStat, WonA tech, Zive SP2)를 사용하였다.
- [0104] 하기의 표 1은 상기한 1 이상의 측정장치를 사용하여 측정한 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 전기적 및 광학적 특성을 도시한 것이다.

표 1

Parameter	Value	Unit
AVT	60	%
η	2.45	—
I_d	1.1	nA
I_{photo}	0.435	mA
I_{photo}/I_{dark}	3.95×10^5	—
J_{SC}	0.838	mA cm ⁻²
V_{OC}	0.482	V
FF	38.7	%
R_s	390	Ohm
R_{SH}	2437.2	Ohm
PCE	1.57	%

표 1에 도시된 바와 같이 평균 가시광 투과율(AVT), 다이오드 이상계수, 광전류(I_{photo}), 암전류(I_{dark}), 개방전압(V_{oc}) 등 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 광학적 및 전기적 특성을 결정지을 수 있는 복수의 매개변수를 측정하였다.

구체적으로 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 가시 영역에서 60 % 이상의 평균 가시광 투과율(AVT)을 가져 가시 영역에서 투명성을 확보할 수 있고 인체의 광 수용체를 모방하기에 적합하다. 또한 10 mW/cm²의 광도와 400 nm의 파장을 갖는 자외선 광원 아래에서 838 μ A/cm²의 단락전류밀도 및 482 mV의 개방전압을 가지고 1.57 %의 전력변환효율(power conversion efficiency, PCE)을 갖는다. 이는 본원 발명의 투명 광전지 메모리가 자외선 광원을 흡수하여 우수한 효율로 발전할 수 있음 수 있음을 시사한다.

도 3의 (f)는 400 nm의 파장과 10 mW/cm²의 광도를 갖는 광원 아래에서 측정된 투명 광전지 메모리의 전류-전압(I-V) 특성이다. 도 3의 (f)에 도시된 바와 투명 광전지 메모리의 암전류는 무시할 수 있을 정도의 작은 전류값을 가진다. 반면에 투명 광전지 메모리의 광전류는 자외선 광이 조사됨에 따라 바이어스가 인가되고 이에 변동된다. 또한 암전류(I_{dark})와 광전류(I_{photo})의 관계식에서 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 도출할 수 있다. 신호 대 잡음비(SNR)는 노이즈 전력에 대비한 신호 전력의 비율로 본원 발명에서는 광 에너지를 출력하는 광전류(I_{photo})를 신호 전력으로 볼 수 있고 그렇지 않은 암전류(I_{dark})를 노이즈 전력으로 보아 하기의 식과 같이 구할 수 있다.

$$SNR = \frac{I_{photo}}{I_{dark}}$$

신호 대 잡음비(SNR)는 노이즈 신호가 존재할 때 신호 전력의 크기를 결정하는 요소로 일반적으로 신호 대 잡음비(SNR)의 크기가 클수록 양호한 특성을 지닌다. 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 3.95×10^5 이상의 양호한 신호 대 잡음비(SNR)를 가져 노이즈 전력에 대비해 신호 전력이 충분히 큼을 증명할 수 있다.

도 3의 (g)는 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 비대칭 전류-전압(I-V) 특성을 도시한 것이다. 비대칭 전류-전압(I-V)특성에서 다이오드 이상계수를 도출함으로써 본원 발명의 투명 광전지 메모리가 다이오드적 특성으로 동작하는 지 검증할 수 있다. 도 3의 (g)에 도시된 바와 같이 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 비대칭적 전류-전압(I-V)특성을 가져 전류를 정류하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 상기한 특성을 통해 도출한 다이오드 이상계수는 2.45이다.

- [0116] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 멤리스터 특성을 도시한다.
- [0118] 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 인체의 통각수용체 및 통각 기억 매커니즘을 모방하여 외부 자극에 대응할 수 있다. 이를 위해 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 멤리스터 및 저항 스위칭 특성을 가짐으로써 인체의 통각 기억 매커니즘과 유사하게 동작할 수 있다. 구체적으로 투명 광전지 메모리의 상단 전극(AgNW)과 하부 전극(FTO) 양단에 바이어스 전압을 인가하여 저항특성을 도출하고 기억특성을 갖는지 확인하였다.
- [0120] 도 4의 (a) 및 (b)는 순방향 및 역방향 바이어스가 인가되었을 때 순환 전압전류법(Cyclic voltammetry)에 의해 도출한 전류-전압(I-V) 특성이다. 도 4의 (a) 및 (b)에 도시된 바와 같이 각 주기에 대하여 각기 다른 경로의 히스테리시스 루프를 형성한다. 이는 본원 발명의 투명 광전지 메모리가 멤리스터 특성을 가짐을 의미할 수 있다. 또한 연속된 입력에 대해서 각기 다른 피크값을 가짐으로써 복수의 ON 상태를 나타낼 수 있음을 시사하고 있다.
- [0121] 도 4의 (a)는 순방향 바이어스가 인가되었을 때 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 전류-전압(I-V) 특성이다. 구체적으로 $0\text{ V} \rightarrow 5\text{ V} \rightarrow 0\text{ V}$ 의 전압이 순차적으로 인가되었을 때 전류는 3.8 mA 에서 순차적으로 증가하여 9.8 mA 까지 증가하였다. 전류는 각 주기의 반복횟수에 비례하여 순차적으로 증가한다.
- [0123] 도 4의 (b)은 역방향 바이어스가 인가되었을 때 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 전류-전압(I-V) 특성이다. 투명 광전지 메모리에 역방향 바이어스가 인가된 경우에도 순방향 바이어스가 인가되었을 때와 유사한 전류-전압 특성을 가짐을 확인할 수 있다. 구체적으로 $0\text{ V} \rightarrow -5\text{ V} \rightarrow 0\text{ V}$ 의 전압이 순차적으로 인가되었을 때 전류는 주기의 반복횟수에 비례하여 순차적으로 증가한다.
- [0125] 도 4의 (c)는 양방향 바이어스가 인가되었을 때 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 기억 특성 및 스위칭 동작을 도시한 것이다. 도 4의 (a) 및 (b)와 같이 양방향 바이어스가 인가되었을 때 순환 전압전류법(Cyclic voltammetry)에 의해 전류-전압(I-V) 특성을 도출하였다. 전압의 순환 주기는 $0\text{ V} \rightarrow 1.5\text{ V} \rightarrow 0\text{ V} \rightarrow -1.5\text{ V}$ 이다. 도 4의 (c)에 도시된 바와 같이 초기 순방향 바이어스가 인가되었을 때 전류는 낮게 출력되고 이 때의 상태를 고저항 상태(high-resistance state, HRS)로 정의할 수 있다. 전압이 인가됨에 따라 전류는 증가하고 이 때의 상태를 양의 저저항 상태(positive low-resistance state, LRS-positive region)로 정의할 수 있다. 또한 고저항 상태(HRS)에서 양의 저저항 상태(LRS-positive region)로 스위칭 되는 전압을 SET 상태 및 셋 전압으로 정의할 수 있다. 이어서 전압을 감소시킴에 따라 출력 전류도 감소하여 0 V 의 전압에서 0 A 의 전류를 갖는다.
- [0126] 역방향 바이어스의 경우에도 순방향 바이어스와 유사하게 초기 역방향 바이어스가 인가되었을 때 전류가 낮게 출력되는 상태를 고저항 상태(HRS)로 정의할 수 있고, 역방향 전압이 인가됨에 따라 전류는 음의 값으로 증가하고 이 때의 상태를 음의 저저항 상태(LRS-negative region)로 정의할 수 있다. 또한 역방향 바이어스가 인가되었을 때 고저항 상태(HRS)에서 음의 저저항 상태(LRS-negative region)로 스위칭 되는 전압을 RESET 상태 및 리셋 전압으로 정의할 수 있다. 이어서 역방향 전압을 감소시킴에 따라 출력 전류도 감소하여 0 V 의 전압에서 0 A 의 전류를 갖는다.
- [0127] 결과적으로 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 양의 고출력 전류(첫번째 ON 상태)와 음의 고출력 전류(두번째 ON 상태)를 가지며 두 상태는 메모리 저장소의 역할을 수행할 수 있다. 따라서 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 복수의 ON 상태를 가져 인체의 통각수용체의 기억 특성을 구현할 수 있다. 또한 상기 ON 상태는 영전압을 인가하여 쉽게 영전류(OFF 상태)로 전환할 수 있고 OFF 상태는 제로 메모리(Zero Memory) 또는 메모리가 비어있음을 의미할 수 있다.
- [0129] 메모리의 학습 능력 및 기억 특성은 신경망 또는 인공 시냅스를 구현하기 위한 필수적인 요소 중 하나이다. 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 21 - 23 개의 펄스 입력 신호에 대하여 출력 전류를 기억하는 특성을 보여주고 있다. 이러한 동작 특성은 시냅스 메모리 저장을 위하여 입력 신호에 반응해 시냅스 가중치를 이동시키는 시냅

스 가소성과 유사한 형태이다.

- [0131] 상기한 기억 특성은 금속 산화물의 저항 스위칭 특성에 의해 발생하며 이는 금속 산화물 내의 격자 결함(lattice imperfection)에 기인한다. 구체적으로 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 격자 결함은 주로 ZnO박막층(300)의 산소 결손에 의해 발생한다. ZnO박막층(300)의 격자 결함은 결손된 원자로 인해 생기는 공극, 규칙적인 공간에 여분의 원자의 침입, Zn원자가 O원자를 대체하거나 또는 그 반대의 경우와 같이 다양한 형태로 나타날 수 있다. 이러한 결함으로 인한 산소 결손은 금속산화물의 저항 스위칭 특성의 주요한 원인이 될 수 있다. 산소 결손은 금속산화물내에서 트래핑(trapping) 또는 디트래핑(de-trapping) 센터로 작용하며 순방향 및 역방향 바이어스가 인가되었을 때 저항 스위칭을 유도한다.
- [0132] 한편 NiO박막층(400)의 경우에도 Ni 또는 O의 결함이 발생할 수 있지만 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 NiO박막층(400)의 두께가 ZnO박막층(300)의 두께에 비교하여 현저히 작기 때문에 저항 스위칭 특성을 도출하는 데 있어 ZnO박막층(300)을 기반으로 분석하였다.
- [0134] 도 4의 (d)는 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 저항 스위칭 특성의 원리에 대해 도시한 것이다.
- [0136] 초기에 평형 상태에서 n형-ZnO과 p형-NiO 사이에 공핍 영역이 형성되어 고저항 상태(HRS)를 유지하며 이 때의 트래핑 구역(trapping sites)은 비어있게 된다. 이어서 양 전극에 작은 양의 바이어스 전압이 인가되었을 때 FTO전극에서 방출된 전자는 ZnO박막층(300)과 n형-ZnO과 p형-NiO 사이에 공핍 영역의 산소 결손에 의해 결합된다. 이 때 양 전극에 인가된 전압은 공핍 영역을 무시할 정도로 크지 않으므로 공핍 영역의 폭은 무시할 수 있다.
- [0137] 이어서 양 전극에 인가된 전압이 셋 전압에 도달하였을 때 모든 트랩 상태(trapped states)가 채워지고 공핍 영역의 폭이 줄어들고 내장 전위(built-in potential)가 감소하게 된다. 이 때 도 4의 (c)에서 상술한 바와 같이 투명 광전지 메모리의 저항 특성이 고저항 상태(HRS)에서 저저항 상태(LRS)로 스위칭 되고 전류의 급격한 상승을 불러온다. 결과적으로 저저항 상태(LRS)에서 전자는 ZnO에서 NiO로 이동하여 도통될 수 있다.
- [0138] 이어서 역방향 바이어스가 인가되었을 때 트랩 상태의 전자는 다시 하단 전극인 FTO 방향으로 인력을 받는다. 리셋 전압에 도달하였을 때 모든 트랩 상태의 전자가 하단 전극 FTO로 이동하여 공핍 영역의 폭이 두꺼워지고 내장 전위(built-in potential)가 증가하게 된다. 또한 투명 광전지 메모리의 저항 특성은 저저항 상태(LRS)에서 고저항 상태(HRS)로 다시 스위칭 되고 전류의 급격한 감소를 불러온다.
- [0140] 도 4의 (d)는 상기의 과정을 통해 스위칭 되는 저항 특성을 이미지로 도시한 것이다. 산소 결손 필라멘트 모델을 이용하여 저저항 상태(LRS)와 고저항 상태(HRS)에서의 동작특성을 증명할 수 있다.
- [0141] 도 4의 (d)의 왼쪽 이미지는 본원 발명의 투명 광전지 메모리에 순방향 바이어스가 인가되어 저저항 상태(LRS)가 되었을 때의 이미지를 도시한 것이다. 도 4의 (d)의 왼쪽 이미지에 도시된 바와 같이 저저항 상태(LRS)에서 모든 트랩 상태(trapped states)가 채워지고 공핍 영역(또는 공간 전하 영역(space charge region))의 폭이 줄어들고 내장 전위(built-in potential)가 감소하게 된다. 결과적으로 저저항 상태(LRS)에서는 상부전극 AgNW전극층(500)에서 하부전극 FTO전극층(200)으로 전류가 도통 된다.
- [0142] 도 4의 (d)의 오른쪽 이미지는 본원 발명의 투명 광전지 메모리에 역방향 바이어스가 인가되어 고저항 상태(HRS)가 되었을 때의 이미지를 도시한 것이다. 도 4의 (d)의 오른쪽 이미지에 도시된 바와 같이 고저항 상태(HRS)에서 전자는 트랩되고 공핍 영역(또는 공간 전하 영역(space charge region))의 폭이 두꺼워지고 내장 전위(built-in potential)가 증가하게 된다. 결과적으로 고저항 상태(HRS)에서는 상부전극 AgNW전극층(500)에서 하부전극 FTO전극층(200)으로 전류가 도통 되지 못한다.
- [0144] 이상적인 형태의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리를 구현하기 위해서는 반복 수행된 주기에 대해 안정적으로 동작하여 높은 운전 신뢰성을 가져야한다.

- [0146] 도 4의 (e)는 본원 발명의 투명 광전지 메모리에 선형 스위프 전압 측정법을 반복 수행하여 도출한 전류 특성이 다. 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 운전 신뢰성을 검증하기 위해 연속 10 주기로 선형 스위프 전압 측정법을 반복 수행하였다. 도 4의 (e)에 도시된 바와 같이 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 바이어스를 10회 이상 반복 인가하여도 비교적 안정적인 동작특성을 갖는다. 구체적으로 반복 횟수가 증가함에 따라 전류의 크기가 비례하여 증가한다. 또한 인가 전압의 크기에 비례하여 출력 전류의 크기가 증가함을 알 수 있다.
- [0148] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 전류 특성을 도시한다.
- [0150] 도 5의 (a)는 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 전류 특성을 설명하기 위한 도식이다. 도 5의 (a)에 도시된 바와 같이 외부 광원이 공간 전하 영역에 조사되었을 경우 공간 전하 영역에서 전자가 발생하고 ZnO박막층(300)으로 이동한다. 이어서 도 4에서 상술한 바와 같이 ZnO박막층(300) 내부에 트랩되지 않은 여분의 공간이 있을 경우 전자가 트랩된다. 또한 NiO박막층(400)의 경우에도 유사한 과정이 발생할 수 있으나 상술한 바와 같이 NiO박막층(400)의 두께는 ZnO박막층(300)의 두께에 비해 얇기 때문에 본원 발명에서는 ZnO박막층(300)을 중점으로 설명하였다.
- [0152] 도 5의 (b)는 자외선 광원의 조사 여부에 따른 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 응답 특성이 다. 0 V와 20 Hz의 조건에서 자외선 광원을 ON-OFF 시켰을 때 투명 광전지 메모리의 전류 특성을 도출하였다. 도 5의 (b)에 도시된 바와 같이 외부 광원이 ON-OFF됨에 따른 투명 광전지 메모리의 출력 펄스를 확인할 수 있다.
- [0154] 도 5의 (c)는 다양한 광도를 갖는 자외선 광원 아래에서 시간에 따라 측정된 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 전류 특성이다. 자외선 광원의 광도를 0.5 mW/cm^2 에서 4 mW/cm^2 으로 증가시켰을 때 투명 광전지 메모리의 전류 특성을 도출하였다. 구체적으로 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 2 mW/cm^2 의 광도를 갖는 자외선 광원 아래에서 $30 \text{ }^{\mu}\text{A}$ 의 전류를 출력했으며 이는 0.5 mW/cm^2 의 광도를 갖는 자외선 광원 아래에서 보다 약 3배 높은 전류를 출력한 것이다.
- [0155] 이는 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리가 인간의 안구와 유사하게 포톤 플럭스(photon flux)를 감지할 수 있음을 의미한다. 또한 시간이 경과함에 따라 일정한 광 반응을 유지함으로써 인체의 광수용체를 대체하는 데 있어 안정성을 확보할 수 있음을 증명할 수 있다. 구체적으로 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 인공 광수용체로서 인체의 안구를 대신해 광 신호를 수신하고, 광원의 파장 및 강도에 상이하게 반응하고, 이에 상응하는 반응을 신호로서 뇌를 포함한 중추신경계로 전달할 수 있다.
- [0157] 도 5의 (d)는 다양한 광도를 갖는 자외선 광원 아래에서 측정된 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 과도 응답 특성이다. 도 5의 (c)와 같이 자외선 광원의 광도를 0.5 mW/cm^2 에서 4 mW/cm^2 으로 증가시켰을 때 투명 광전지 메모리의 과도 응답 특성을 도출하였다. 도 5의 (d)에 도시된 바와 같이 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 자외선 광도가 증가함에 따라 더 높은 출력전류를 발생시킬 수 있다. 구체적으로 초전류(I_{phyro})는 자외선 광도에 비례하여 증가하여 포화되고, 광전류(I_{photo})는 자외선 광도의 증가에 대비해 비교적 일정한 출력값을 갖는다.
- [0158] 결과적으로 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 외부 광원에 대해 반응하고 상이한 출력을 발생 시킴으로써 인체의 광 수용체를 대체할 수 있다. 또한 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 인체의 통각수용체의 무적응(no adaptation), 임계값(threshold), 포화(saturation) 특성과 유사하게 동작함으로써 이를 대체할 수 있다. 구체적으로 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 임계값을 초과하는 강한 광에 대해서 적응하지 않고 외부 자극이 제거될 때까지 응답을 유지할 수 있다. 이는 인체의 통각수용체가 인체의 조직 세포를 손상시킬 우려가 있는 강한 광에 대해 적응하지 않아 인체를 보호하는 무적응(no adaptation) 특성과 유사한 것이다.

[0159] 투명 광전지 메모리의 포화 특성은 도 4의 (d)에 상술한 바와 같이 트랩 상태와 생성된 전자 캐리어의 평형 상태에 기초하여 설명할 수 있다. 또한 변동되는 자외선 광원에 대비해 일정한 광전류를 출력할 수 있고 - 0.1 V의 인가 바이어스에서도 발전하여 통각수용체와 유사하게 동작할 수 있다.

[0160] 또한 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 외부 광원의 광도에 비례하여 더 높은 출력을 발생시킬 수 있다. 구체적으로 0.5 mW/cm^2 의 광도를 초과하는 자외선 광원을 인체 손상을 불러일으킬 수 있는 임계값으로 설정하고 임계값을 초과하는 외부 자극에 대해서 더 높은 전류를 발생시킴으로써 외부 자극에 적절히 대응할 수 있게 할 수 있다. 이는 인체의 통각수용체가 외부 자극의 강도가 임계값을 초과하였을 때 통증의 강도를 증가시켜 인체의 손상을 방지하는 원리와 유사한 것이다.

[0162] 상기한 특성 외에 응답 시간, 턴온 전압 등을 통해 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리의 특성을 구체화할 수 있다. 표 2는 종래의 멤리스터 및 통각 기억 특성을 갖는 금속산화물 기반 장치와 본원 발명의 투명 광전지 메모리의 응답 특성을 도시한 것이다.

[0163] 표 2

Device architecture	t_{th} (s)	V_{SET} (V)	I_{max} (mA)	I_{HRS} (A)	Receptive response (A)	Specifications	Ref.
Au/Ga ₂ O ₃ /TiO ₂ /ITO	~11	1	16	10^{-12}	50×10^{-12}	Memristor, receptor, nociceptor	8
Pt/TiO ₂ , nanobelt/Pt	~12	6	1.1	10^{-13}	—	Memristor, nociceptor	35
Ag/ClC/ITO	0.8	0.4	0.07	10^{-9}	—	Memristor, nociceptor	36
Pt/HfO ₂ /TiN	—	4	4	10^{-13} ~ 10^{-10}	—	Memristor, nociceptor	37
Pt/SiO ₂ /Ag/Pt	—	0.3	—	< 10^{-12}	—	Nociceptor	38
Cu/TaO ₅ /Cu/Pt	—	0.25	—	10^{-9}	—	Memristor	39
Ag/SiO ₂ /Pt	—	6	—	10^{-12}	—	Memristor	40
Pt/Ag/Ag ₂ S/Pt	—	0.45	—	10^{-10}	—	Memristor	41
ZnO/ATO/FTO	~0.2	0.8	17	—	—	Transparent, memristor, nociceptor, photovoltaic,	7
AgNW/NiO/ZnO/FTO	~0.02	1.5	100	10^{-9}	30×10^{-3}	Transparent, memristor, receptor, nociceptor, photovoltaic, broadband photodetector	This study

[0164]

[0165] 여기서 t_{th} 는 응답 시간, V_{SET} 는 턴온 전압, I_{max} 는 통각 과민 출력응답(hyperalgesia output response), I_{HRS} 는 고저항 상태의 전류값이다.

[0166] 표 2에 도시된 바와 같이 본원 발명의 투명 광전지 메모리는 외부 광원의 광도에 상관없이 20 ms의 응답 시간을 가져 종래의 투명태양전지보다 우수한 응답속도를 갖는다. 이는 본원 발명의 투명 광전지 메모리가 통각 과민(hyperalgesia)을 포함하는 다양한 형태의 통각 기억 매커니즘을 구현할 수 있음을 시사하는 것이다. 또한 상기한 특성을 고려하면 본원 발명의 투명 광전지 메모리가 투명성, 멤리스터, 수용체(Receptor), 통각수용체, 광전 특성을 가짐으로써 의학용 생체 모방 장치를 포함하여 다양한 분야로 응용될 수 있음을 시사한다.

[0168] 결과적으로 본원 발명의 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 가시광 아래에서 높은 광투과율과 저항 스위칭 특성을 가지는 ZnO/NiO 이종접합 투명태양전지를 기초로 하여 제작함으로써 자가 발전하여 에너지 독립을 실현하면서, 인체의 시각 기능과 통각 수용 매커니즘을 모방할 수 있다.

[0170] 구체적으로 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 가시광 아래에서 높은 광투과율과 저항 스위칭 특성을 가지는 투명태양전지를 기초로 하여 제작함으로써 인체의 시각 기능과 통각 수용 매커니즘을 모방할 수 있다.

[0171] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리는 저항스위칭 메모리소자로서 순방향 및 역방향 바이어스가 인가되었을 때 고저항에서 저저항 상태 또는 그 역으로 저항 스위칭이 발생할 수 있다.

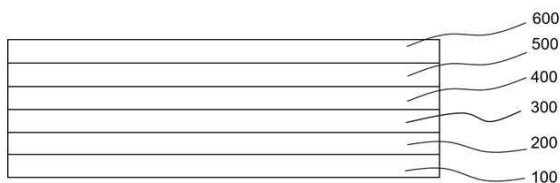
[0172] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 금속산화물 기반 투명태양전지를 자가 전원장치로 사용하여 별도의 외부 전원없이 자가 발전함으로써 저전력으로 구동되는 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템을 구현할 수 있다.

[0173] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 AgNW전극층 일측에 ZnO초박막전극층을 증착함으로써 열 또는 바이어스 인가에 따른 AgNW전극층의 변형을 방지할 수 있다.

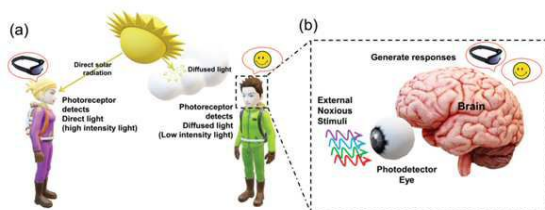
- [0174] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 400 - 800 nm의 파장을 갖는 광원 아래에서 40% 이상의 광 투과성을 가져 인체의 광수용체와 유사하게 시각 기능을 모방할 수 있다.
- [0175] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 0.15 V 이하의 인가 바이어스에서도 응답 특성을 갖고 30 ms이하의 응답 시간을 가져 인체의 통각 수용 매커니즘을 모방할 수 있다.
- [0176] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 3.95×10^5 이상의 높은 신호 대 잡음 비를 가져 장치의 신뢰성을 증명할 수 있다.
- [0177] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 뉴로모픽 소자용 투명 광전지 메모리로서 10 mW/cm^2 의 광도와 400 nm의 파장을 갖는 자외선 광원 아래에서 $838 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$ 의 단락전류밀도 및 482 mV의 개방전압을 출력하여 1.57 %의 전력변환효율을 가질 수 있다.
- [0179] 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

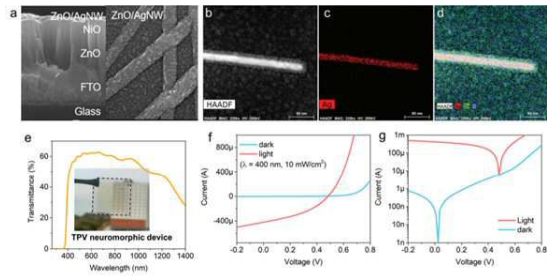
도면1



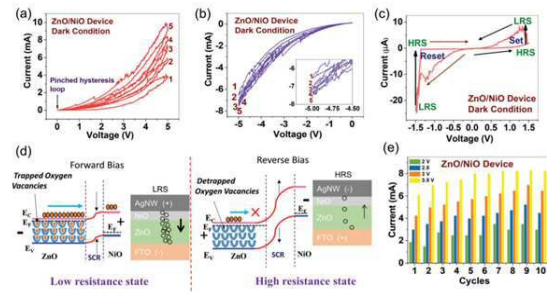
도면2



도면3



도면4



도면5

