(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0028614
(43) 공개일자 2025년03월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H10N 70/00 (2024.01)
(52) CPC특허분류
H10N 70/883 (2023.02)
H10N 70/021 (2024.05)
(21) 출원번호 10-2023-0109471
(22) 출원일자 2023년08월22일
심사청구일자 없음

(71) 출원인
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
김덕기
서울특별시 노원구 덕릉로71길 30, 104동 302호
파이잘 가푸어
서울특별시 성동구 동일로59가길 10-1, B01
김홍균
서울특별시 동대문구 무학로26길 30, 신동아아파트 104동 1704호
(74) 대리인
김정현

전체 청구항 수 : 총 10 항

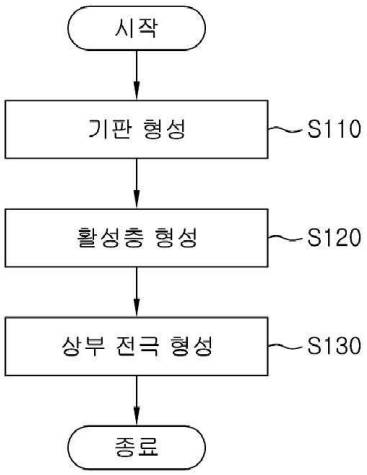
(54) 발명의 명칭 **멤리스터, 멤리스터 제조 방법 및 멤리스터용 하이브리드 나노복합체 제조 방법**

(57) 요 약

본 발명은 멤리스터에 관한 것으로서, 하부 전극을 포함하는 기판, 상기 기판 상에 형성되는 활성층 및 상기 활성층 상에 형성되는 상부 전극을 포함하되, 상기 활성층은 멤리스터용 하이브리드 나노복합체로 이루어진다.

본 발명에 의하면, 단순화된 졸-겔 방법에 의한 하이브리드 나노복합체를 포함하는 멤리스터는 높은 안정성과 재현성을 구현하며, 낮은 구동 전압을 나타내는 효과가 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H10N 70/826 (2023.02)
H10N 70/841 (2023.02)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1345362923
과제번호 2016R1D1A1B01009537
부처명 교육부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 개인기초연구(교육부)
연구과제명 초절전 원자 스위치 소자용 산소공공 방지막을 가진 이중층 고체 전해질 및 열역학적 동작 기구 연구
기 여 율 1/1
과제수행기관명 세종대학교
연구기간 2023.03.01 ~ 2025.04.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

하부 전극을 포함하는 기판;

상기 기판 상에 형성되는 활성층; 및

상기 활성층 상에 형성되는 상부 전극을 포함하되,

상기 활성층은 멤리스터용 하이브리드 나노복합체로 이루어지는 것을 특징으로 하는 멤리스터.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 하부 전극은

Pt, Au, ITO, Al, Ti, Ta로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속이고,

상기 기판은 rigid 기판 또는 flexible 기판으로 이루어지는것을 특징으로 하는 멤리스터.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 멤리스터용 하이브리드 나노복합체는

하나 이상의 금속 도핑 산화철 입자 및 하나 이상의 금속 황화물 입자를 포함하고,

상기 금속 도핑 산화철 입자는 Fe_3O_4, Fe_2O_3, ZrO_2 ,HfO_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 산화철과 금속 황화물 입자 WS_2, MoS_2, CuS_2, TiS_2, FeS_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 것을 특징으로 하는 멤리스터.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 상부 전극은 Ag, Pd, Au, ITO, Ti, Ta, Cu로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속으로 이루어지는 것을 특징으로 하는 멤리스터.

청구항 5

하부 전극을 포함하는 기판을 형성하는 단계;

상기 기판 상에 활성층을 형성하는 단계; 및

상기 활성층 상에 상부 전극을 형성하는 단계를 포함하되,

상기 활성층은 멤리스터용 하이브리드 나노복합체로 이루어지는 것을 특징으로 하는 멤리스터 제조 방법.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 하부 전극은

Pt, Au, ITO, Al, Ti, Ta로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속이고,

상기 기판은 rigid 기판 또는 flexible 기판으로 이루어지는 것을 특징으로 하는 멤리스터 제조 방법.

청구항 7

청구항 5에 있어서,

상기 멤리스터용 하이브리드 나노복합체는

하나 이상의 금속 도핑 산화철 입자 및 하나 이상의 금속 황화물 입자를 포함하고,

상기 금속 도핑 산화철 입자는 Fe_3O_4, Fe_2O_3, ZrO_2 ,HfO_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 산화철과 금속 황화물 입자 WS_2, MoS_2, CuS_2, TiS_2, FeS_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 것을 특징으로 하는 멤리스터 제조 방법.

청구항 8

청구항 5에 있어서,

상기 상부 전극은 Ag, Pd, Au, ITO, Ti, Ta, Cu로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속으로 이루어지는 것을 특징으로 하는 멤리스터 제조 방법.

청구항 9

산화철과 이황화텅스텐으로 구성된 전구체를 에틸렌 글리콜에 첨가하는 단계;

상기 전구체가 첨가된 에틸렌 글리콜 용액을 교반하고 가열하여 겔(gel)을 형성하는 단계; 및

상기 겔을 연소하여 하이브리드 나노복합체 나노 입자를 형성하는 단계

를 포함하는 멤리스터용 하이브리드 나노복합체 제조 방법.

청구항 10

청구항 9에 있어서,

상기 멤리스터용 하이브리드 나노복합체를 제조함에 있어서,

산화철이 50wt%이고 이황화텅스텐이 50wt%인 나노입자로 구성되는 것을 특징으로 하는 멤리스터용 하이브리드 나노복합체 제조 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 멤리스터(Memristor), 멤리스터 제조 방법 및 멤리스터용 하이브리드 나노복합체(hybrid nanocomposites) 제조 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 빅 데이터 시대는 보다 전력 효율적이고 빠른 컴퓨팅 시스템을 요구하기 때문에 새로운 컴퓨팅 시스템이 필요하다. 무어의 법칙이 물리적 한계에 도달함에 따라 폰 노이만(von Neumann) 아키텍처의 기본 구성 요소인 금속-산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)는 더 작은 크기로 축소하기가 더 어려워지고 있다. 강력한 컴퓨팅 아키텍처와 새로운 컴퓨팅 알고리즘을 갖춘 전력 효율적인 나노스케일(nanoscale) 전자 장치에 대한 요구가 있다.

[0003] 멤리스터(Memristor)는 아날로그와 디지털의 두 가지 유형으로 구분된다.

[0004] 디지털 유형의 멤리스터는 간단한 설계, 높은 수준의 집적도, 낮은 전력 요구 사항으로 인해 급격한 저항 스위칭을 갖는 차세대 비휘발성 메모리로 상당한 관심을 받고 있다.

[0005] 점진적인 저항 스위칭을 갖는 아날로그형 멤리스터는 최근 프로그래밍 가능한 아날로그 회로, 아날로그 비휘발성 메모리 및 기타 응용 분야에서 관심이 높아지고 있다. 인간의 뇌에서 영감을 얻은 뉴로모픽 컴퓨팅을 구현하기 위해 아날로그 멤리스터는 인공 시냅스를 활용하는 흥미로운 특성을 보여준다.

[0006] 최근 사용자의 건강 상태를 측정 또는 진단하거나 질병을 치료하는 목적의 인체 삽입형 전자 소자에 대한 기술이 활발하게 연구되고 있다. 특히 생분해성 전자 소자는 인체 내에서 분해 및 용해되는 물질로 이루어져, 삽입된 소자의 제거를 위한 2차 수술이 필요 없을 뿐만 아니라 그에 따른 위험부담을 낮출 수 있어 크게 주목받고 있다. 또한, 뇌나 뉴런 등에 존재하는 신경 세포를 모방한 뉴로모픽(neuromorphic) 소자를 인체에 삽입하여 치매를 치료하거나 개선하고자 하는 시도들 역시 이루어지고 있는데, 특히 MIM(Metal-Insulator-Metal) 구조를 갖는 멤리스터(memristor)를 뉴로모픽 소자에 적용하고자 하는 시도 역시 이루어지고 있다.

[0007] TiOx , TaOx , NiOx , ZnOx 등과 같은 산화물 기반 물질에서 저항성 스위칭 특성을 위한 물질이 연구되었다. 이러한 재료 중 하나인 Fe_3O_4 는 Clark 수가 더 높으며, 비용 효율성, 원소 풍부성, 무독성 및 환경 친화적인 측면에서 산업 호환성이 높다. 이온 이동성에 기초하여, 다결정 Fe_3O_4 필름 은 저항 스위칭 특성을 나타냈다. 8면체 배위 사이트에서 교대하는 Fe^{2+} 및 Fe^{3+} 이온은 동시 금속-절연체 전이의 전하 정렬 패턴과 연결되어 있다. 결정립 경계 사이의 누설 전류로 인해 Off 저항이 저하될 수 있으므로 Off/On 저항비가 낮으므로, 고품질 Fe_3O_4 는 Off/On 비율을 높이는 데 필수적이다. 결과적으로 전류 누출 경로가 없는 나노복합체는 더 높은 Off 저항을 가질 가능성이 더 높으며 결과적으로 더 높은 Off/On 비율이 된다. 뿐만 아니라, 입방체 나노입자는 구형 나노입자보다 배위수가 더 높고 결함이 더 적은 더 대칭적인 표면을 갖는다. 그 결과 매우 작은 나노입자에서 화학량론과 Verwey 전이를 변경하기 위해 형태 이방성을 사용한다. 누설 전류 및 저전력 애플리케이션을 줄이기 위해 2D 재료가 잠재적인 후보이다.

[0008] 2차원(2D) 재료 기반 멤리스터는 조정 가능하고 실제 뉴로모픽 애플리케이션을 위한 안정적인 스위칭 속성 및 확장성을 제공할 수 있다. 일반적으로 입계 이동 메커니즘을 통한 이온 이동은 2D 재료 저항 스위칭에서 발생하고, 결정립계의 잘못된 방향(동상 결정립계)의 결과로 전도성 필라멘트가 형성된다. 하지만, 2D 재료 기반 멤리스터는 균일하지 않고 일관되지 않은 저항 전환을 초래할 수 있는 동질상 입계의 확률적 형성 프로세스로 인해 예측할 수 없는 이온 수송을 가질 수 있다. 따라서 온라인 학습의 정밀도가 감소하고 뉴로모픽 시스템의 구현은 열악한 주기 간 및 장치 간 변형으로 인해 방해를 받는다.

[0009] 박리된 플레이크가 초기 프로토타입 장치 프레젠테이션에 사용되었지만 2D 커뮤니티는 모든 상업적 응용 분야의 제조 요구 사항을 충족하기 위해 대면적 필름 개발로 빠르게 이동했다. 이와 관련하여 가장 유망한 접근 방식은 비용 효율적이고 저온에서 합성하기 쉽기 때문에 졸-겔(sol-gel) 방법과 같은 용액 기반 공정이다. 단순화된 졸-겔 방법은 높은 순도, 낮은 처리 온도, 고유한 조합 특성 및 균질성으로 인해 나노복합체의 잠재적인 합성 방법이다. 또한, 열 기상 증착은 다양한 기판에 다양한 열 예산으로 균질한 나노복합체 필름을 증착할 수 있다.

[0010] 회로 성능을 개선하기 위해 아날로그 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템은 디지털 장치를 사용해야 할 수 있다. 아날로그 및 디지털 멤리스터를 모두 사용하는 회로의 제조 공정을 단순화하려면 두 유형의 저항성 스위칭을 단일 장치에 통합하는 것이 유리할 수 있다. 그러나 단일 장치에서 두 가지 유형의 저항 스위칭을 모두 수행하는 이러한 멤리스터는 흔하지 않다. 따라서 전이 금속 산화물 멤리스터를 제조하기 위한 용액 기반 접근 방식은 완전히 적응 가능한 인공 신경망의 개발에 매우 중요하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0011] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 10-2022-0078312

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 단순화된 졸-겔 방법에 의한 멤리스터용 하이브리드 나노복합체인 Fe_3O_4/WS_2 합성 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0013] 또한, 본 발명은 하이브리드 나노복합체를 활성층으로 하는 멤리스터 및 그 제조 방법을 제공하는데 그 다른 목적이 있다.

[0014] 본 발명의 목적은 이상에서 언급한 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 목적들은 아래의 기재로부터 통상의 기술자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0016] 이와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명은 멤리스터에 관한 것으로서, 하부 전극을 포함하는 기판, 상기 기판 상에 형성되는 활성층 및 상기 활성층 상에 형성되는 상부 전극을 포함하되, 상기 활성층은 멤리스터용 하이브리드 나노복합체로 이루어진다.

[0017] 상기 하부 전극은 Pt, Au, ITO, Al, Ti, Ta로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속이고, 상기 기판은 rigid 기판 또는 flexible 기판으로 이루어질 수 있다.

[0018] 상기 멤리스터용 하이브리드 나노복합체는 하나 이상의 금속 도핑 산화철 입자 및 하나 이상의 금속 황화물 입자를 포함하고, 상기 금속 도핑 산화철 입자는 Fe_3O_4, Fe_2O_3, ZrO_2 ,HfO_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 산화철과 금속 황화물 입자 WS_2, MoS_2, CuS_2, TiS_2, FeS_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함할 수 있다.

[0019] 상기 상부 전극은 Ag, Pd, Au, ITO, Ti, Ta, Cu로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속으로 이루어질 수 있다.

[0020] 본 발명의 멤리스터 제조 방법에서 하부 전극을 포함하는 기판을 형성하는 단계, 상기 기판 상에 활성층을 형성하는 단계 및 상기 활성층 상에 상부 전극을 형성하는 단계를 포함하되, 상기 활성층은 멤리스터용 하이브리드 나노복합체로 이루어질 수 있다.

[0021] 상기 하부 전극은 Pt, Au, ITO, Al, Ti, Ta로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속이고, 상기 기판은 rigid 기판 또는 flexible 기판으로 이루어질 수 있다.

[0022] 상기 멤리스터용 하이브리드 나노복합체는 하나 이상의 금속 도핑 산화철 입자 및 하나 이상의 금속 황화물 입자를 포함하고, 상기 금속 도핑 산화철 입자는 Fe_3O_4, Fe_2O_3, ZrO_2 ,HfO_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 산화철과 금속 황화물 입자 WS_2, MoS_2, CuS_2, TiS_2, FeS_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함할 수 있다.

[0023] 상기 상부 전극은 Ag, Pd, Au, ITO, Ti, Ta, Cu로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속으로 이루어질 수 있다.

[0024] 본 발명의 멤리스터용 하이브리드 나노복합체 제조 방법에서 산화철과 이황화텅스텐으로 구성된 전구체를 에틸렌 글리콜에 첨가하는 단계, 상기 전구체가 첨가된 에틸렌 글리콜 용액을 교반하고 가열하여 겔(gel)을 형성하는 단계 및 상기 겔을 연소하여 하이브리드 나노복합체 나노 입자를 형성하는 단계를 포함한다.

[0025] 상기 멤리스터용 하이브리드 나노복합체를 제조함에 있어서, 산화철이 50wt%이고 이황화텅스텐이 50wt%인 나노입자로 구성될 수 있다.

발명의 효과

[0027] 본 발명에 의하면, 단순화된 졸-겔 방법에 의한 하이브리드 나노복합체를 포함하는 멤리스터는 높은 안정성과 재현성을 구현하며, 낮은 구동 전압을 나타내는 효과가 있다.

[0028] 더 나아가서, 본 발명에서 제안하는 하이브리드 나노복합체를 포함하는 멤리스터를 통해 다목적 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템을 위한 고성능 인공 시냅스 개발에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터 제조 방법을 보여주는 흐름도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터의 적층 구조를 간략하게 도시한 것이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터용 하이브리드 나노복합체 제조 방법을 보여주는 흐름도이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 Fe_3O_4/WS_2 나노복합체의 구조를 보여주는 측면도이다.

도 5는 본 발명의 실험에서 단순화된 졸-겔 방법을 사용하여 합성된 샘플에 대한 실험 결과를 도시한 것이다.

도 6은 본 발명의 실험에서 Fe_3O_4, WS_2의 원자 구조를 도시한 것이다.

도 7은 본 발명의 실험에서 $Fe_{50}W_{50}$ 하이브리드 나노복합체의 구조와 실험 결과를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시 예를 가질 수 있는 바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 상세하게 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.

[0032] 본 출원에서 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 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 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.

[0033] 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 갖고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 갖는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0034] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성 요소는 동일한 참조 부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

[0035] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터 제조 방법을 보여주는 흐름도이다.

[0036] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터 제조 방법은 하부 전극을 포함하는 기판을 형성하는 단계(S110), 기판 상에 활성층(active layer)을 형성하는 단계(S120) 및 활성층 상에 상부 전극을 형성하는 단계(S130)를 포함한다.

[0037] 여기서, 활성층은 멤리스터용 하이브리드 나노복합체로 이루어질 수 있다.

[0038] 본 발명의 일 실시예에서 하부 전극은

[0039] Pt, Au, ITO, Al, Ti, Ta로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속이고, 상기 기판은 rigid 기판 또는 flexible 기판으로 이루어질 수 있다.

[0040] 본 발명의 일 실시예에서 멤리스터용 하이브리드 나노복합체는 하나 이상의 금속 도핑 산화철 입자 및 하나 이상의 금속 황화물 입자를 포함하고, 상기 금속 도핑 산화철 입자는 Fe_3O_4, Fe_2O_3, ZrO_2 ,HfO_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 산화철과 금속 황화물 입자 WS_2, MoS_2, CuS_2, TiS_2, FeS_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함할 수 있다.

[0041] 본 발명의 일 실시예에서 상부 전극은 Ag, Pd, Au, ITO, Ti, Ta, Cu로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속으로 이루어질 수 있다.

[0042] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터의 적층 구조를 간략하게 도시한 것이다.

[0043] 도 2를 참조하면, 본 발명의 멤리스터는 하부 전극을 포함하는 기판(110), 기판(110) 상에 형성되는 활성층(120) 및 활성층(120) 상에 형성되는 상부 전극(130)을 포함한다.

[0044] 본 발명에서 활성층(120)은 멤리스터용 하이브리드 나노복합체로 이루어진다.

[0045] 본 발명의 일 실시예에서 하부 전극은 Pt, Au, ITO, Al, Ti, Ta로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속이고, 상기 기판은 rigid 기판 또는 flexible 기판으로 이루어질 수 있다.

[0046] 본 발명의 일 실시예에서 멤리스터용 하이브리드 나노복합체는 하나 이상의 금속 도핑 산화철 입자 및 하나 이상의 금속 황화물 입자를 포함하고, 상기 금속 도핑 산화철 입자는 Fe_3O_4, Fe_2O_3, ZrO_2 ,HfO_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 산화철과 금속 황화물 입자 WS_2, MoS_2, CuS_2, TiS_2, FeS_2로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함할 수 있다.

[0047] 본 발명의 일 실시예에서 상부 전극(130)은 Ag, Pd, Au, ITO, Ti, Ta, Cu로 이루어진 군에서 선택되는 1종 이상을 포함하는 금속으로 이루어질 수 있다.

[0048] 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터 제조 방법에서 구체적인 공정을 살펴보면 다음과 같다.

[0049] 먼저 백금이 코팅된 기판을 증류수로 세척한 다음, 아세톤 및 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol, IPA)의 초음파 세척조를 이용하여 세척한다.

[0050] 그리고, 초음파 세척조 처리 후, 기판을 100° C의 오븐에서 건조한다.

[0051] 그리고, 50nm 두께의 Fe_3O_4/WS_2 나노복합체를 열 증착기로 증착한다. 이때 증착 조건은 3 μ torr의 분위기에서 90-96A 전류를 통해 0.3-0.4 Å/s의 증착 속도로 증착할 수 있다.

[0052] 그리고, 증착된 막을 상자로(box furnace)에서 1시간 30분 내지 2시간 30분 동안 300~500 ℃에서 어닐링(annealing)한다. 여기서, 바람직하게는 증착된 막을 상자로(box furnace)에서 2시간 동안 400℃에서 어닐링한다.

[0053] 마지막으로, 120×120um 면적과 150nm 두께의 상부 전극인 은(Ag)을 상온에서 열증착법으로 증착한다. 이때 증착 조건은 5 μ torr의 분위기에서 40A 전류를 통해 0.2-0.3 Å /s의 증착 속도로 증착한다.

[0054] Fe_3O_4/WS_2 나노복합체 층 사이의 계면층의 두께는 프로필로메트리로 확인할 수 있다. 계면층(IL) 및 상부 전극의 증착을 위한 기본 압력은 3 u torr이다.

[0056] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터용 하이브리드 나노복합체 제조 방법을 보여주는 흐름도이다.

[0057] 도 3을 참조하면, 본 발명의 멤리스터용 하이브리드 나노복합체 제조 방법은 산화철과 이황화텅스텐으로 구성된 전구체를 에틸렌 글리콜에 첨가하는 단계(S310), 전구체가 첨가된 에틸렌 글리콜 용액을 교반하고 가열하여 겔(gel)을 형성하는 단계(S320) 및 겔을 연소하여 하이브리드 나노복합체 나노 입자를 형성하는 단계(S330, S340)를 포함한다.

[0058] 본 발명의 일 실시예에서 멤리스터용 하이브리드 나노복합체를 제조함에 있어서, 산화철이 50wt%이고 이황화텅

스텐이 50wt%인 나노입자로 구성될 수 있다.

[0059] 본 발명의 일 실시예에 따른 멤리스터용 하이브리드 나노복합체 제조 공정을 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

[0060] 먼저, 에틸렌 글리콜을 비이커에 넣고, 이를 상온의 핫플레이트 위에 올려 놓는다.

[0061] 그리고, 스티코메트리 양의 전구체(이황화텅스텐(WS_2), 산화철(Fe_3O_4))를 에틸렌 글리콜에 첨가하고, 이 용액을 핫플레이트 위에 두고 혼합을 위해 실온에서 교반한다.

[0062] 전구체를 완전하게 혼합한 후, 반응 시작을 위해 핫플레이트 온도를 1시간 동안 70~90℃로 증가시킨다. 여기서, 바람직하게는 핫플레이트 온도를 1시간 동안 80℃로 증가시킨다.

[0063] 반응이 시작되면, 2시간의 가열 및 교반을 통해 겔 형태를 생성한다. 여기서, 2시간 동안 가열하여 140~150 ℃의 겔을 형성할 수 있다.

[0064] 마지막으로 온도를 200 내지 300℃로 올려 겔을 연소시켜서 하이브리드 나노복합체 나노입자를 얻는다. 여기서, 나노복합체 샘플은 작은 중량 백분율의 WS_2 나노입자를 갖는 F(100-x)W(x)이다(x=10,20,30,40,50 wt%). 예를 들어, F90W10 샘플에는 90wt% 자철광 나노입자와 10wt% WS_2 나노입자가 포함되어 있다.

[0065] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 Fe_3O_4/WS_2 나노복합체의 구조를 보여주는 측면도이다.

[0066] 도 4에서 보는 바와 같이, Fe_3O_4/WS_2 나노복합체의 구조는 노란색과 회색으로 이루어진 WS_2와 파란색과 빨간색으로 이루어진 Fe_3O_4사이의 oxygen - surfur의 공유결합이 주된 구조 형태이다.

[0068] 본 발명의 실험에서 단순화된 졸-겔 방법에 의한 서로 다른 구성을 갖는 단일 셀 장치에서 아날로그 및 디지털 저항성 스위칭 특성을 갖는 Fe(100-x)W(x) (x=0,10,20,30,40,50 wt%) 새로운 나노복합체 시냅틱(synaptic) 장치를 합성한다.

[0069] 첫 번째 원리 계산은 VASP(Vienna ab initio Simulation Package)에서 구현된 밀도 함수 이론(density functional theory, DFT)을 사용하여 수행된다.

[0070] 본 발명의 실험에서 5 개의 멤리스터 소자를 제작하는데, (i) Ag/Fe_3O_4/Pt, (i) Ag/$Fe_{90}W_{10}$/Pt, (ii) Ag/$Fe_{80}W_{20}$/Pt, (iii) Ag/$Fe_{70}W_{30}$/Pt, (iv) Ag/$Fe_{60}W_{40}$/Pt, (v)Ag/$Fe_{50}W_{50}$/Pt 이다. 여기서, Ag/$Fe_{50}W_{50}$/Pt 소자는 최고의 전기적 성능과 시냅스 기능(즉, 초저 스위칭 전압, 최고의 내구성, 빠른 스위칭 시간, 최고의 유지 특성 및 신경 특성)을 보여준다.

[0071] 또한 본 발명의 실험에서 심층 신경망에 대한 적합성을 지원하기 위해 장치 대 시스템 수준 시뮬레이션을 수행한다. 본 발명의 실험을 통해 본 발명에서 제안하는 기술이 다목적 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템을 위한 나노복합 재료를 기반으로 한 고성능 인공 시냅스 개발의 중요한 단계가 될 것으로 전망된다.

[0072] 본 발명의 실험에서 $(Fe_3O_4)1-x$ $(WS_2)x$ 나노복합체의 합성을 위해 모든 조성에 대해 적절한 양의 Fe_3O_4 및 WS_2 나노입자의 전구체를 만들었다.

[0073] 처음에 에틸렌 글리콜(ethylene glycol)을 비이커(beaker)에 넣고 핫플레이트(hotplate) 위에 올려 놓았다. 그리고, 스티코메트리(Stichometry) 양(amounts)의 전구체(precursors)를 에틸렌 글리콜에 첨가하고, 용액을 핫플레이트에서 혼합하기 위해 실온에서 교반하였다.

[0074] 전구체의 완전한 혼합 후, 반응을 초기화하기 위해 핫플레이트 온도를 1시간 동안 80℃로 증가시켰다.

[0075] 그 후, 온도가 상승하고, 2시간의 가열 및 교반 후에 겔 상태가 발생하였다.

[0076] 마지막으로 온도를 200℃ 내지 300℃로 증가시켜서 하이브리드 나노복합체 나노입자를 얻기 위한 연소를 진행하였다.

[0077] 나노복합체 샘플은 WS_2 나노입자 의 작은 중량 백분율(x=10,20,30, 40 및 50 wt%)을 갖는 F(100-x)W(x)로 확인되었다. 예를 들어, F90W10 샘플은 90wt% 마그네타이트 나노입자와 10% WS_2 나노입자를 포함한다.

[0078] 본 발명의 실험에서 상업적으로 이용 가능한 백금(Pt) 코팅 기판이 하부 전극으로 사용될 수 있다.

[0079] 먼저 기판을 증류수로 세척한 다음, 아세톤 및 이소프로필 알코올(IPA)의 초음파 세척조를 이용하여 세척한다. 기판은 초음파 세척조에서 처리 후 100° C의 오븐에서 건조된다.

[0080] 그리고, 50nm 두께의 Fe_3O_4/WS_2 나노복합체를 열 증발기로 증착한다.

[0081] 다음, 필름을 박스 퍼니스(box furnace)에서 2시간 동안 400℃의 온도로 어닐링(annealing)한다.

[0082] 마지막으로, 120×120um 면적과 150nm 두께의 상부전극인 은(Ag)을 상온에서 열증착법으로 증착한다.

[0083] 본 발명의 실험에서 Fe_3O_4/WS_2 나노복합체 사이의 층인 계면층의 두께는 프로필로메트리(profilometry)로 확인할 수 있다. 계면층(interfacial layer, IL) 및 상부 전극의 증착을 위한 기본 압력은 3u torr이다. X선 회절(X-ray diffraction, XRD)을 사용하여 샘플의 상 순도를 결정한다. Panlytical X'Pert PRO 회절계가 사용되고, λ = 1.5045Å의 파장을 측정하기 위해 Cu-Kα 방사선이 사용되었다. 전계 방출 전자 현미경(TESCAN-VEGA3)을 사용하여 샘플의 표면 형태를 조사하였다. 라만 분광법은 파장이 532nm인 Horiba Jobin(JY) RAM Aramis 공초점 라만 기기를 사용하여 수행되었다. 전기적 측정은 Agilent B1500 반도체 파라메트릭 분석기 DC Sweep 메모리 응용 프로그램을 사용하여 기존의 4-프로브 및 2-프로브 방법을 사용하여 수행되었고, 대기 환경의 실온에서 수행되었다.

[0084] 본 발명의 실험에서 최적화를 위해 Perdew , Burke 및 Ernzerh(PBE)의 교환 상관(exchange correlation, XC) 기능을 사용하여 표준 DFT 계산을 수행했다.

[0085] 전자 구조 계산은 Heyd , Scuseria 및 Ernzerhof(HSE)에서 개발한 범위 분리 하이브리드 함수를 사용하였다. HSE 교환 상관관계(XC) 기능은 교환 에너지를 단거리(short-range, SR) 및 장거리(long-range, LR) 구성요소로 분할한다. SR 교환 상호 작용에는 Hartree- Fock(HF) 및 PBE 용어가 모두 포함되는 반면, LR 교환 상호 작용에는 PBE 교환만 포함된다. 본 발명의 실험에서는 SR 성분과 LR 성분 사이의 분할을 제어하기 위한 조정 가능한 매개변수와 a로 표시되는 HF 교환 혼합 계수를 갖는 HSE06 기능을 사용했다.

[0086] 본 발명의 실험에서 10-60° 의 2Θ 범위에 걸쳐 나노복합체의 결정 구조 및 위상 순도를 연구하기 위해 X선 회절(X-ray diffraction)을 수행하였다. 그리드의 마지막 스펙트럼은 Fe_3O_4 나노입자를 보여준다. Fe_3O_4 의 최대 강도 피크는 순수한 마그네타이트(magnetite)와 동일한 (311) 평면에 해당하는 20 ~ 35.4에서 관찰되었다.

[0087] 도 5는 본 발명의 실험에서 단순화된 졸-겔 방법을 사용하여 합성된 샘플에 대한 실험 결과를 도시한 것이다.

[0088] 도 5에서 (a) 단순화된 졸겔 방법을 사용하여 합성된 샘플 $(Fe_3O_4)(100-x)WS_2(x)$ (x=0,10, 20, 30, 40, 50)wt % 의 XRD 분석, (b) $Ag/Fe_{50}W_{50}/Pt$ 구조 소자의 고해상도 단면 TEM(transmission electron microscopy) 이미지 (직사각형 상자는 Fe3O4 및 WS_2의 격자 간격에 해당함), (c) 하이브리드 나노복합체 $Fe_{50}W_{50}$ 의 헤테로상 입계 (Heterophase grain boundaries), (d) 원소 분석을 위한 하이브리드-나노복합체 $Fe_{50}W_{50}$ 의 STEM 매핑, (e) W 5p 및 W 4f, (f) S 2p, (g) O 1s, (h) Fe_3O_4 및 $Fe_{50}W_{50}$ 하이브리드 나노복합체의 의 XPS 스펙트럼, (k), (l) 순수 Fe_3O_4 및 하이브리드 나노복합체 $Fe_{50}W_{50}$ 의 AFM 이미지가 도시되어 있다.

[0089] 도 5(a)에 도시된 바와 같이, 나노복합체 샘플에서 WS_2 및 Fe_3O_4 상 모두가 스펙트럼에서 관찰되었다. 이와 함께 순수한 나노복합체 시료에서는 불순물 피크가 관찰되지 않았다. WS_2 및 Fe_3O_4 상의 존재는 WS_2 강도 피크의 증가와 함께 모든 Fe_3O_4-WS_2 하이브리드 나노복합체에서 볼 수 있다.

[0090] Fe_3O_4-WS_2 하이브리드 나노복합체의 표면 형태는 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM)에 의해 추가로 조사된다.

[0091] 도 5 (b)에 도시된 바와 같이, 단면(HRTEM) 이미지는 소자의 두께 멤리스터 층 구조를 명확하게 보여준다. Gaetan 소프트웨어의 HRTEM 이미지를 사용하여 0.2512nm 및 0.612nm의 격자 간격이 Fe_3O_4 의 (113) 결정면에 해당하고, (002) 결정면이 WS_2 에 해당함을 알 수 있다. 격자 간격은 두 나노입자가 모두 존재하고 활성층에서 다른 상이나 배향이 감지되지 않음을 확인했다.

[0092] 도 5 (c)에서 FFT 이미지는 Fe_3O_4 와 WS_2 의 상호 작용과 결함 생성을 나타내는 눈에 보이는 격자 장애를 명확하게 반영한다.

[0093] 도 5 (d)에 도시된 바와 같이, STEM 매핑을 통해 설계된 전자 시냅스의 요소적 내용을 확인할 수 있다. 빈 인터페이스 상태의 형성과 전형적인 동상 입계에서 벗어난 위상 접합/전위 장벽은 다양한 위상의 존재로 인해 발생할 수 있다.

[0094] 순수 Fe_3O_4 및 하이브리드 Fe_3O_4-WS_2 나노복합체의 화학적 상태 및 화학적 조성을 결정하기 위해 XPS 분석이 수행되었다. 하이브리드 Fe_3O_4-WS_2 나노복합체 의 XPS 스펙트럼은 Fe_3O_4 (700-900eV) 및 WS_2(100-400eV) 나노입자의 특성 피크를 모두 보여주고, 나노복합체에 WS_2 및 Fe_3O_4 의 존재를 나타낸다.

[0095] 도 5 (e,f)에 Fe_{2p} 의 XPS 스펙트럼이 도시되어 있다. 순수 및 하이브리드 나노복합체 샘플에서 709.2ev 및 713.3ev 피크의 존재는 Fe_3O_4 상을 확인시켜준다. Fe_3O_4 는 Fe^{2+} 및 Fe^{3+} 산화 상태로 존재하되, Fe^{2+} 는 709.2 eV에서 측정되는 가장 낮은 결합 에너지 피크를 담당한다.

[0096] 도 5 (g,h)에 도시된 것처럼, 순수한 Fe_3O_4 XPS 스펙트럼에서 두 개의 산소 피크 529.8ev 및 530.8ev는 격자 산소(O_I) 및 비격자 산소(O_{II})에 각각 해당하는 것인 반면, $Fe_{50}W_{50}$ 하이브리드 나노복합체에서는 528.8ev 격자 산소(O_I) 69.1% 및 529.9ev 비격자 산소(O_{II}) 30.1%에서, 피크가 더 낮은 결합 에너지로 이동했음을 명확하게 나타낸다.

[0097] 도 5 (i)에 도시된 바와 같이, 하이브리드 나노복합체 소자에서 30.1ev, 32.2ev, 34.6ev 및 36.6ev에서 텅스텐(W)의 유의한 피크가 관찰되었다. 하이브리드 나노복합체의 XPS 스펙트럼에서 +4, +5 및 +6 산화 상태의 존재는 WS_2 및 Fe_3O_4 이온의 상호작용으로 인해 관찰될 수 있다.

[0098] 도 5 (j)에 도시된 바와 같이, 2개의 강한 황 피크(sulfur peaks)는 162.5 및 163.7에서 나타난다.

[0099] 도 5 (k,l)은 순수한 Fe_3O_4 및 Pt 기판 상의 하이브리드 WS_2-Fe_3O_4의 표면 거칠기를 보여준다.

[0100] 원자적 계산에 의해 Ag/$Fe_{50}W_{50}$/Pt 나노접합에서 비휘발성 RS를 유발하는 물리적 및 화학적 프로세스를 살펴보면, 하이브리드 나노복합체 Fe_3O_4/WS_2 필름 내 분자의 밀도 함수 이론(Density functional theory, DFT) 시뮬레이션과 금속 전극과의 인터페이스는 많은 중요한 정보를 제공한다. Fd3m 공간 그룹은 8.396 Å의 실험적 격자 상수를 갖는 역 스피넬(spinel) 구조로 결정화되는 벌크 Fe_3O_4에서 발견된다.

[0101] 도 6은 본 발명의 실험에서 Fe_3O_4, WS_2의 원자 구조를 도시한 것이다.

[0102] 도 6에서 (a) 벌크(bulk) Fe_3O_4의 원자 구조, (b) 벌크 WS_2 의 원자 구조를 나타내고, 여기서, 파란색, 빨간색, 노란색 및 회색 공은 각각 Fe, O, W 및 S 원자를 나타낸다.

[0103] 도 6에서 (c) WS_2 이중층을 갖는 Fe_3O_4 (111) 하이브리드 구조의 측면도는 계면에서 공유 결합 형성을 보여주는 반면, (d) 전하 차이 모델은 계면에서 전하의 고갈 및 축적을 나타낸다.

[0104] 도 6에서 (e) 벌크 Fe_3O_4 및 WS_2, (f) Fe_3O_4 (111), (g) WS_2 의 이중층 및 (h) Fe_3O_4/WS_2 하이브리드 구조의 상태 밀도를 나타낸다. 여기서 수직 점선은 페르미 준위를 나타내고, 페르미 준위의 왼쪽과 오른쪽은 각각 각 물질의 가전자대와 전도대를 나타낸다.

[0105] 도 6 (a)에 도시된 바와 같이, 24개의 Fe 및 32개의 O 원자를 포함하는 Fe_3O_4 단위 셀의 기하학적 구조는 입방 대칭을 유지하면서 PBE 및 HSE06 수준에서 완전히 이완된다.

[0106] Fd3m 대칭은 기하 이완 중에 보존되었다. 격자 상수는 HSE06에 의해 8.389Å으로 주어지며, 이는 실험 결과값인 8.396과 거의 동일하다. Fe_3O_4 의 역 스피넬 구조에서 사면체 A 사이트는 Fe^{3+} 이온으로 채워진 반면, 팔면체 B 사이트는 동일한 수의 무작위로 분포된 Fe^{2+} 및 Fe^{3+} 이온으로 채워져 있다. 두 위치에서 Fe 이온 사이의 자기 모멘트의 반대 방향으로 인해 Fe_3O_4 는 Fe_3O_4 당 총 자기 모멘트가 4 μB 인 강자성을 나타낸다. 본 발명의 실험

에서 비 스핀 편광 DFT 계산은 실험 결과와 일치하도록 수행되었다.

[0107] 도 6 (b)는 c축에 평행하게 반복되는 샌드위치 S-W-S 계층 구조가 있는 벌크 WS_2 를 보여준다. a=b= 3.18 Å 및 c= 12.98 Å의 격자 매개변수를 갖는 육각형 WS_2 에 대한 WS의 계산된 결합 길이는 2.41 Å이다.

[0108] 도 6 (c)는 벌크 구조를 기반으로 Fe_3O_4 및 WS_2 의 하이브리드 구조를 보여주고, Fe_3O_4 의 Fe와 WS_2 의 S 사이의 계면에서 공유 결합의 형성을 묘사하고 있다. 계면(interface)에서 화학 결합 형성의 강도를 확인하기 위해, 결합 에너지 $E_{binding}$를 다음과 같이 계산한다.

[0109] $$E_{binding} = E_{Fe3O4/WS2} - E_{Fe3O4} - E_{WS2} \quad (1)$$

[0110] 여기서, $E_{FE3O4/WS2}$, E_{Fe3O4}, E_{WS2}는 각각 Fe_3O_4/WS_2, Fe_3O_4 및 WS_2 구조의 총 에너지이다. Fe_3O_4/WS_2 하이브리드 구조의 에너지는 -8.84 eV(원자당 40.58 meV)이다. 경계면에서 하이브리드 나노복합체의 상호작용은 Fe_3O_4 (111)에서 WS_2의 전자적 특성뿐만 아니라 구조적 특성을 조절하는 데 결정적인 역할을 한다. 인터페이스 상호 작용, 격리된 Fe_3O_4 및 WS_2 구조 간의 전하 밀도 차이 및 하이브리드 구조의 총 전하 밀도를 분석한다.

[0111] 도 6 (d)와 같이, WS_2와 Fe_3O_4 사이의 경계면에서 전하 밀도의 변화를 결정할 수 있다.

[0112] 도 6 (d)에서 전하는 Fe 원자에서 배출되고 WS_2와 Fe_3O_4 (111) 사이의 계면에 모이는 것이 명확하게 관찰된다. 노란색은 계면 영역에서 전자 과잉을 나타내고, 청록색은 계면 영역에서 전자 결핍을 나타낸다. 노란색 로브(lobes)는 WS_2와 Fe_3O_4의 S와 Fe 원자 사이의 강한 결합을 나타냅니다.

[0113] 도 6 (d)에서 보는 바와 같이, 계면 상호 작용을 조사하기 위해 Fe_3O_4에서 WS_2의 두 레이어를 평가하였다. Bader 전하 계산은 WS_2와 Fe_3O_4 사이의 전하 분포를 추가로 조사하는 데 사용된다. Bader 전하 분석에 따르면 Fe_3O_4는 S의 Pauling 전기 음성도가 Fe보다 높기 때문에 WS_2에 1개의 전자를 제공한다.

[0114] 도 6 (e)는 밴드 갭이 각각 1.23eV 및 1.93eV인 벌크 Fe_3O_4 및 WS_2의 비 스핀 분극 상태의 총 밀도를 나타낸다. Fe_3O_4는 스핀업 채널에 밴드 갭이 있고 스핀다운 채널에서 페르미 레벨에 유한 상태가 있는 반금속 전자 구조를 가지고 있어 Fe_3O_4당 4 μB가 된다. WS_2에서 전자의 비자기적 순서로 인해 상태 밀도는 벌크 WS_2에서 페르미 준위로 분할되지 않아 자기 모멘트가 0이 된다. 경계면에서 원자 및 전자 상호작용을 조사하기 위해 Fe_3O_4 (111)는 주기적인 이미지 사이의 상호작용을 피하기 위해 z축을 따라 적절한 거리로 분리된 WS_2의 두 층을 사용하여 모델링되었다.

[0115] 도 6 (f) 및 (g)는 Fe_3O_4 (111) 및 이중층 WS_2 상태의 부분 밀도를 보여준다. 벌크 Fe_3O_4와 비교할 때 Fe_3O_4 (111)의 밴드 갭은 1.23에서 0.13 eV로 크게 낮아졌다. 대조적으로, 이중층 WS_2의 밴드 갭은 나노 스케일에서의 양자 구속으로 인해 벌크 WS_2와 비교할 때 1.93에서 2.53 eV로 현저하게 증가한다. Fe_3O_4 (111) DOS 프로파일은 Fe 3d 및 O 2p 상태로 구성되며, 가전자대에서 페르미(Fermi) 준위 근처의 Fe-d_{z2} 및 O-$_{pz}$ 상태에서 크게 기여한다. 전도대 최대값에서 Fe-d 상태가 O-p 상태보다 우세하다. Fe-O 결합은 Fe 3d와 O 2p 상태 사이의 국부적 혼성화로 인해 형성된다. 이중층 WS_2의 부분적 상태 밀도 프로파일은 페르미 준위 근처의 W 5d 상태 및 S 3p 상태에 의해 기여되어 밴드 갭이 2.53eV인 반도체를 생성한다. W d_{xy}, d_{x2-y2} 및 d_{z2} 상태는 WS_2의 가전자대 최대값과 전도대 최소값 모두에 크게 기여했다. W-S 공유 결합은 W 5d와 S 3p 상태 사이의 국소 혼성화 때문에 형성된다.

[0116] 도 6 (h)는 계면에서 Fe-S 사이에 공유 결합이 형성된 Fe_3O_4 (111)과 WS_2의 하이브리드 구조 개발 후 상태의 부분 밀도를 묘사한다. Fe_3O_4의 Fe d 및 O p 상태는 0.29 eV의 유한 밴드 갭을 갖는 Fe_3O_4/WS_2 하이브리드 구조의 가전자대 최대값과 전도대 최소값에 크게 기여한다. 계면 상호작용의 생성과 대칭 파괴로 인해 Fe_3O_4와 WS_2의 결합은 Fe_3O_4 (111)에 비해 하이브리드 구조의 밴드 갭을 두 배로 증가시켰다. Fe_3O_4가 WS_2의 다른 적층 층과 상호작용하지 않기 때문에 페르미 레벨에서 가전자대에서 W-d 및 S-p 상태의 기여도는 중요하지 않다. 대조적으로, W-d 및 S-p 상태는 페르미 레벨 주변의 전도대에 크게 기여한다. 또한 결합 에너지 및 Bader 전하 이동 계산에

의해 입증된 중요한 계면 접촉으로 인해, W-d 및 S-p 상태는 가전자대에서 2.5eV 및 전도대에서 0.30 ~ 2.80eV에서 Fe-d 및 Op 수준과 강한 중첩을 나타낸다. 상태의 부분 밀도는 또한 Fe_3O_4에서 WS_2로 전하가 이동하는 동안 고유한 밴드 가장자리가 가전자대로 이동하여 WS_2를 n형 반도체로 만든다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 WS_2의 다른 레이어와 인터페이스 사이의 거리가 커짐에 따라 WS_2의 전기적 구조에 대한 계면 영향이 감소함을 의미한다.

[0117] 도 7은 본 발명의 실험에서 $Fe_{50}W_{50}$ 하이브리드 나노복합체의 구조와 실험 결과를 도시한 것이다.

[0118] 도 7에서 (a) $Fe_{50}W_{50}$ 하이브리드 나노복합체의 도식적 구조, (b) $Fe_{50}W_{50}$ 하이브리드 나노복합체의 100회 스위칭 주기 동안의 I-V 곡선, (c, d) $F_{50}W_{50}$ 하이브리드 나노복합체의 설정 및 재설정 전압의 히스토그램, (e) 0.02V 증분 크기로 -0.3V에서 -0.68V까지 리셋 전압을 변화시키면서 50 스위칭 사이클의 디지털 셋 대 아날로그 리셋 I-V 곡선, (f) 0.01 증분 크기로 -0.3V에서 -0.7V까지 리셋 전압을 변화시키면서 50 스위칭 사이클의 디지털 셋 대 아날로그 리셋 I-V 곡선, (g) 10^3초 동안 0.1 판독 전압에서 소자의 다중 저항 상태 유지, (h) $Fe_{50}W_{50}$ 하이브리드 나노복합체의 100회 스위칭 주기의 내구성을 도시되어 있다.

[0119] 도 7 (a)에서 $Ag/Fe_{50}W_{50}/Pt$ 구조 장치의 개략도가 도시되어 있다. 여기서, 은(Ag)이 상부 전극(top electrode, TE)으로 작용하고, Fe_3O_4-WS_2 하이브리드 나노복합체가 활성층으로 작용하고, 백금(Pt)이 하부전극으로 작용한다.

[0120] Fe_3O_4-WS_2 하이브리드 나노복합체의 구조 및 표면 분석 후, (i) $Ag/Fe_3O_4/Pt$ (ii) $Ag/Fe_{90}W_{10}/Pt$ (iii) $Ag/Fe_{80}W_{20}/Pt$ (iv) $Ag/Fe_{70}W_{30}/Pt$ (v) $Ag/Fe_{60}W_{40}/Pt$ 및 (vi) $Ag/Fe_{50}W_{50}/Pt$ 멤리스터 소자의 전기적 반응을 측정하였다. IV 측정 중에 상단 전극 Ag에 전압이 가해졌고 하단 전극 Pt는 접지되었다. 멤리스터 소자의 연속 전류-전압(I-V) 곡선은 0→-1.5V→0→2V의 포지티브 및 네거티브 전압 스위핑 시퀀스를 (.10A)의 전류 컴플라이언스로 적용하여 디바이스의 고장을 방지한다. Ag 필라멘트의 무작위 생성으로 인해 순수 Fe_3O_4 멤리스터 장치의 Vset 및 Vreset 히스토그램은 1.1~2V 범위의 광범위한 분포를 나타낸다.

[0121] $Ag/Fe_{50}W_{50}/Pt$ 소자는 안정적인 스위칭 주기를 나타내고 큰 변동 없이 일관된 동작을 보여준다. 이 소자는 여러 셀 측정에서 변동이 없는 매우 낮은 설정 및 재설정 전압을 보여준다. 포지티브 스윕 동안 소자는 0.26V에서 전류가 급격히 증가하여 "셋(set)" 프로세스인 고저항 상태(high-resistance state, HRS)에서 저저항 상태(low-resistance state, LRS)로 전환된다. 음의 전압을 인가하면 장치가 -0.28V까지 LRS에서 유지되며, 이 시점에서 장치는 "리셋(reset)" 프로세스인 LRS에서 HRS로 다시 전환된다.

[0122] 도 7 (b)에 소자의 다중 스위칭 주기가 도시되어 있다.

[0123] 도 7 (c), (d)에서 보는 바와 같이, 균일한 스위칭의 달성은 0.15-0.38V의 좁은 Vset 분포와 0.2-0.4V의 Vreset 분포로 확인된다. Vset 표준 편차(s.d)(σ)가 0.220V 및 0.046V의 값으로 산출되고, Vreset s.d(σ)는 -0.267 및 0.0235의 값으로 산출된다. 결과적으로 설정 전압 변동이 6배 감소할 가능성이 높으며 훨씬 더 나은 스위칭 균일성을 보여준다.

[0124] 도 7 (e), (f)에서 전압이 -0.3V에서 -0.7V까지 0.02와 0.01의 단계적 증분으로 변화할 때 IV 주기는 전도도의 점진적인 변화를 보여준다. 다른 합성된 멤리스터 장치와 달리 이 구성은 아날로그 저항 스위칭을 나타내지 않았으며 이는 뉴로모픽 컴퓨팅에 중요하다. 또한 전압 펄스를 사용하여 아날로그 저항 스위칭을 구동하고, 전류는 각 반복 펄스 후 0.1V에서 측정되었다. 아날로그 저항 스위칭을 측정하기 위해 순차적 전압 스윕을 사용하여 시간 경과에 따른 저항 변화를 측정했다. 소자는 10^3 초 이상 35개의 저항 상태를 안정적으로 유지했다.

[0125] 도 7 (g)에서 보는 바와 같이, 전도도는 포화에 도달하기 전에 음의 펄스로 꾸준히 증가했다. 반면에 포지티브 펄스는 전도도의 감소 및 포화를 초래한다. 초저 셋 및 리셋 작동 전압에도 불구하고 멤리스터는 실온에서도 현저한 성능 저하 없이 10^5 및 10^7 (초) 내구성 주기 이상 뛰어난 유지 성능 및 내구성 안정성을 나타낸다. 추가 시냅스 가중치를 반영할 수 있기 때문에 다중 컨덕턴스 상태는 시냅스 기능을 달성하는 데 중요하다. 또한, 비휘발성 또는 높은 유지율은 뉴로모픽 컴퓨팅의 장기 추론 프로세스에 필수적이다.

[0126] 도 7 (h)에서 하이브리드 나노복합체 장치의 0.1 읽기(read) 전압에서의 내구성 주기가 도시되어 있다. 하이브

리드 나노복합체 멤리스터의 환경 안정성 및 소자 변화는 10개의 제조된 소자의 I-V 곡선을 측정하여 평가되었다. 또한 RS 거동(behavior)은 우수한 환경 안정성을 나타내며 3개월 동안 주변 대기에서 유지된 후에도 무결성을 유지한다. 멤리스터의 관찰된 거동은 인터페이스 결함이 있는 이질적인 입자 경계의 형성 때문일 수 있다. 이러한 경계는 동질상 입자 경계에서 일반적으로 발견되지 않는 인터페이스 상태를 가진 이종접합을 포함할 수 있다. 이를 통해 멤리스터 스위칭을 구동하는 ECM(electrochemical metallization) 공정을 위한 전도성 경로를 형성할 수 있다. ECM 외에도 스위칭 프로세스에는 전하 트래핑 및 디트래핑 프로세스가 포함될 수 있다. 그러나 인공 신경망은 시냅스 장치의 초기화를 달성하기 위해 여러 저항 상태가 필요하다. 멤리스터 소자는 초저 V_{set}, 우수한 유지력 및 우수한 $R_{on/off}$ 비율을 포함하여 우수한 성능을 보여준다.

[0127] 본 발명에서 전자 시냅스 소자로서의 가능성을 갖는 전력 효율적인 하이브리드 나노복합체 멤리스터 소자에 대해 제안한다. 본 발명에서 제안하는 멤리스터 소자는 자유롭게 형성되며 동시 아날로그 및 디지털 바이폴라 저항 스위칭을 포함한 여러 기능을 갖추고 있다. 그리고, 멤리스터는 우수한 스위칭 균일성, 우수한 내구성 및 낮은 작동 전압을 나타낸다. DFT 시뮬레이션을 통해 계면에서 계면 상호 작용 및 대칭 깨짐이 저항성 스위칭에서 중요하다는 것을 보여준다. Heterophase Grain Boundary는 가변성이 거의 없는 낮은 설정 전압에서 전도성 필라멘트를 형성하는 데 도움을 주어 에너지 소비를 줄이고 학습 정확도를 향상시킨다. 인공 시냅스 장치는 PPF, PTP, ,STDP 및 SRDP와 같은 생물학적 시냅스가 수행하는 기억 및 학습 프로세스를 정확하게 모방할 수 있다. 또한 CNN(Convolution Neural Network) 시뮬레이션도 통계 데이터를 기반으로 하여 95.4%의 정확도를 나타냈다.

[0128] 이상 본 발명을 몇 가지 바람직한 실시 예를 사용하여 설명하였으나, 이들 실시 예는 예시적인 것이며 한정적인 것이 아니다. 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 지닌 자라면 본 발명의 사상과 첨부된 특허청구범위에 제시된 권리범위에서 벗어나지 않으면서 다양한 변화와 수정을 가할 수 있음을 이해할 것이다.

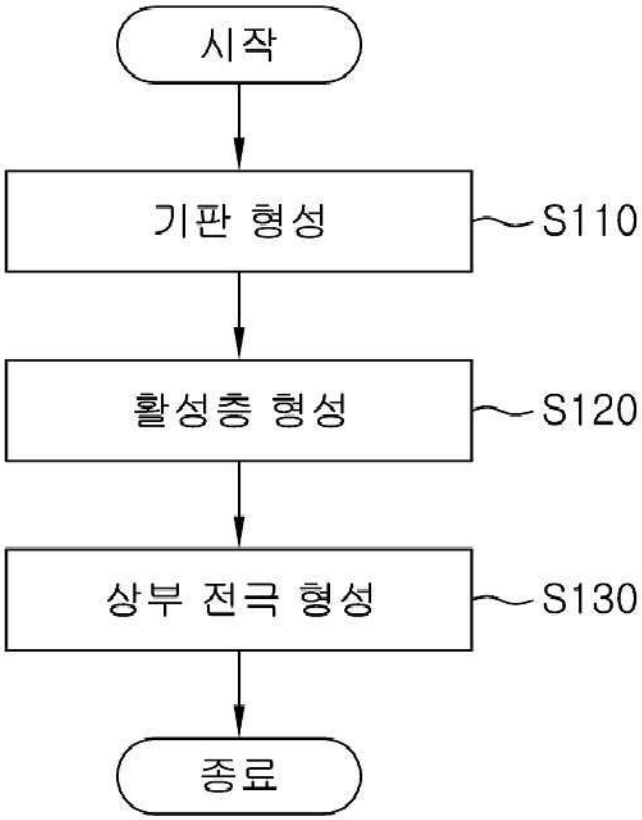
부호의 설명

[0129] 110 기판 120 활성층

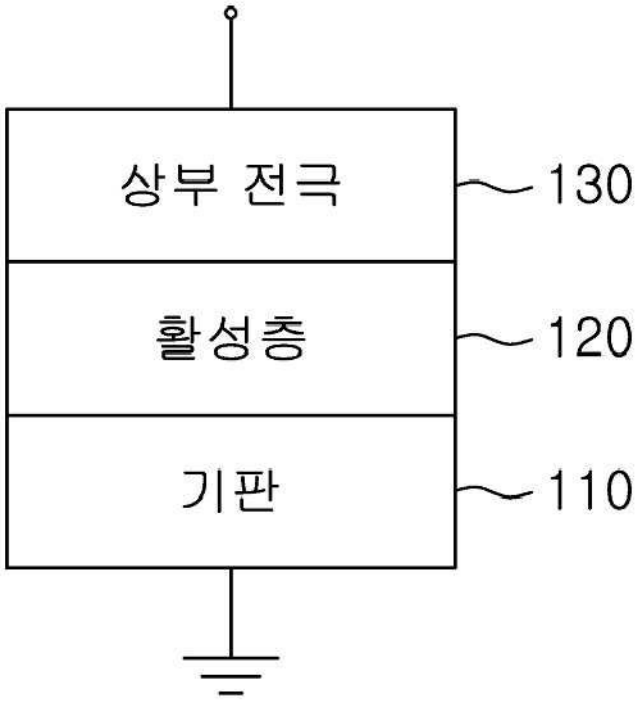
130 상부전극

도면

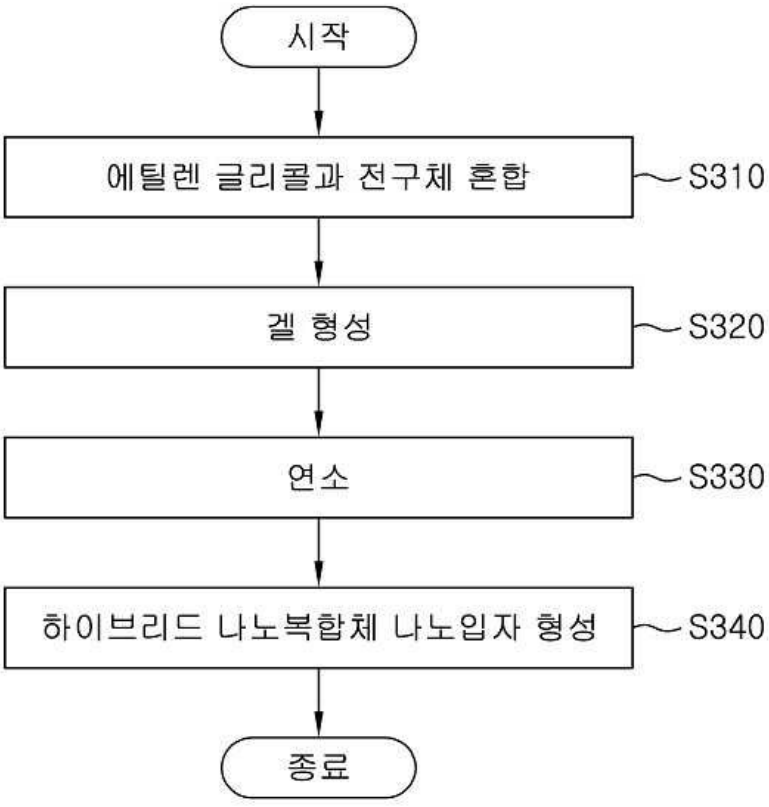
도면1



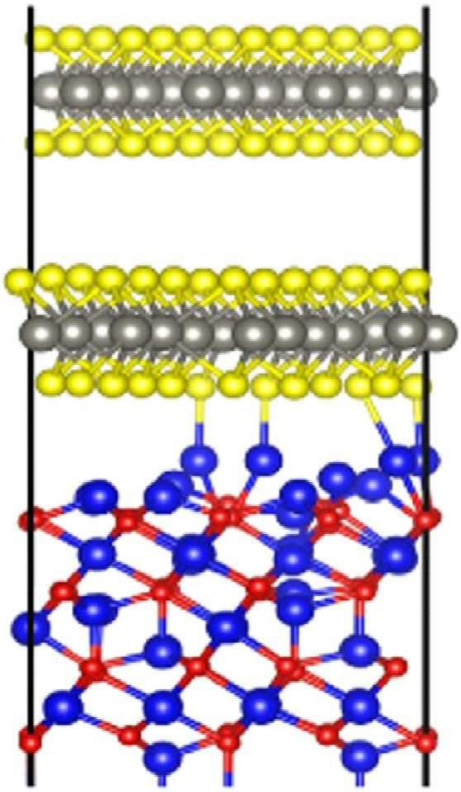
도면2


상부 전극
130
활성층
120
기판
110

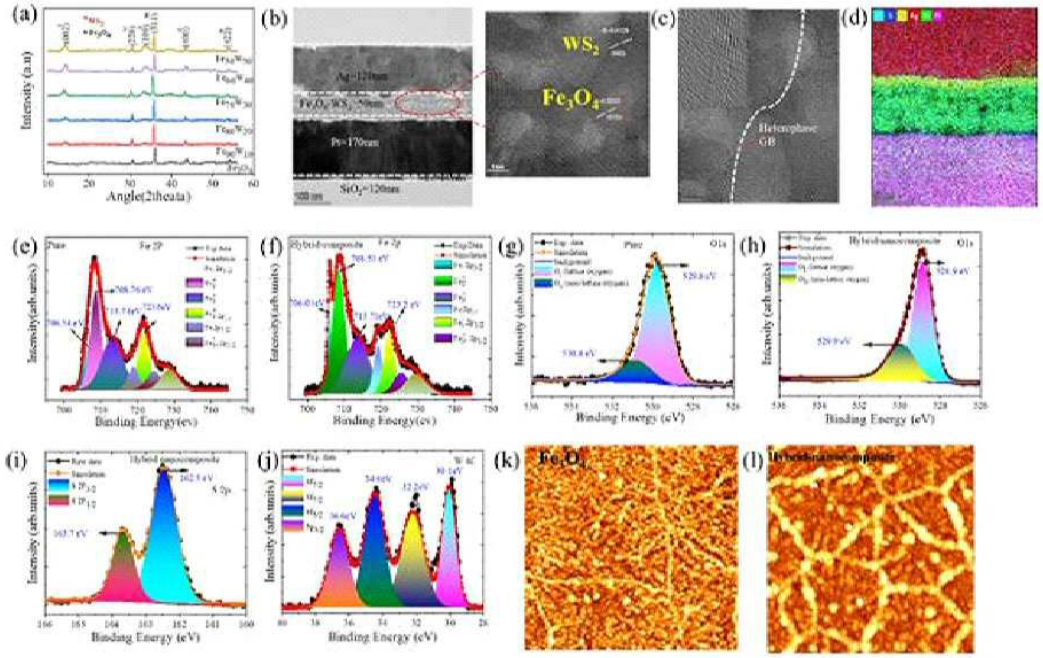
도면3


시작
에틸렌 글리콜과 전구체 혼합
S310
겔 형성
S320
연소
S330
하이브리드 나노복합체 나노입자 형성
S340
종료

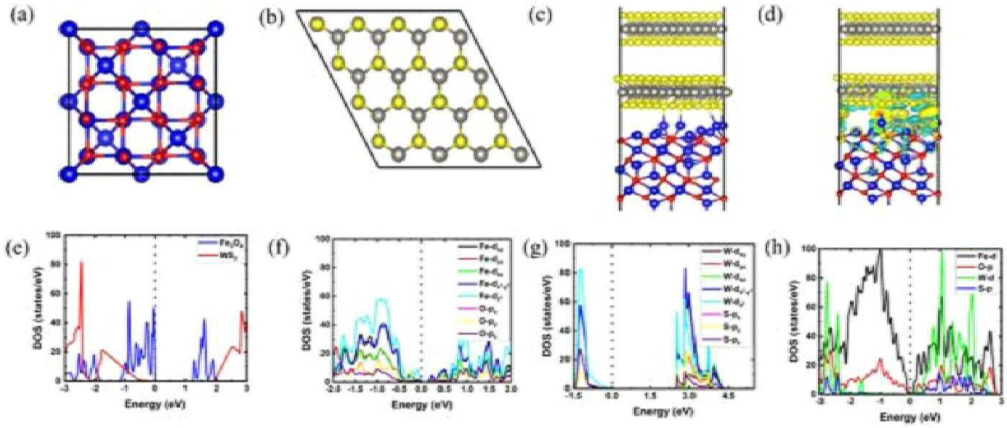
도면4



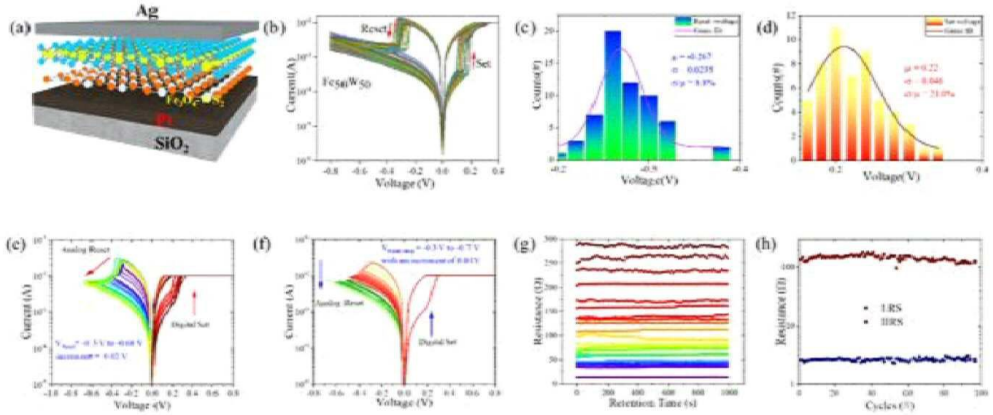
도면5


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)
(j)
(k)
(l)
Intensity (a.u)
Angle(2theata)
Ag~120nm
Pt~170nm
SiO_2~120nm
WS_2
Fe_3O_4
Heterophase GB
Binding Energy(ev)
Binding Energy (eV)
Intensity (arb.units)
Fe_3O_4

도면6


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
DOS (states/eV)
Energy (eV)

도면7


(a)
Ag
SiO_2
(b)
Reset
Set
$Fe_{50}W_{50}$
Current(A)
Voltage (V)
(c)
Count(#)
Voltage(V)
(d)
Count(#)
Voltage(V)
(e)
Current (A)
Voltage (V)
(f)
Current (A)
Voltage (V)
(g)
Resistance (Ω)
Retention Time (s)
(h)
Resistance (Ω)
LRS
HRS
Cycles (#)