(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0036748
(43) 공개일자 2023년03월15일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
*H10N 50/85* (2023.01) *C23C 16/40* (2006.01)
*C23C 16/455* (2006.01) *H10N 50/01* (2023.01)
*H10N 50/10* (2023.01)
(52) CPC특허분류
*H10N 50/85* (2023.02)
*C23C 16/405* (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0119605
(22) 출원일자 2021년09월08일
심사청구일자 2021년09월08일

(71) 출원인
**한국재료연구원**
경상남도 창원시 성산구 창원대로 797 (상남동)
(72) 발명자
**김용훈**
경상남도 창원시 성산구 원이대로878번길 9, 104동 402호
**권정대**
경상남도 창원시 성산구 창원대로1209번길 22
**김아라**
경상남도 창원시 성산구 가음정로11번길 5-20
(74) 대리인
**이인행**

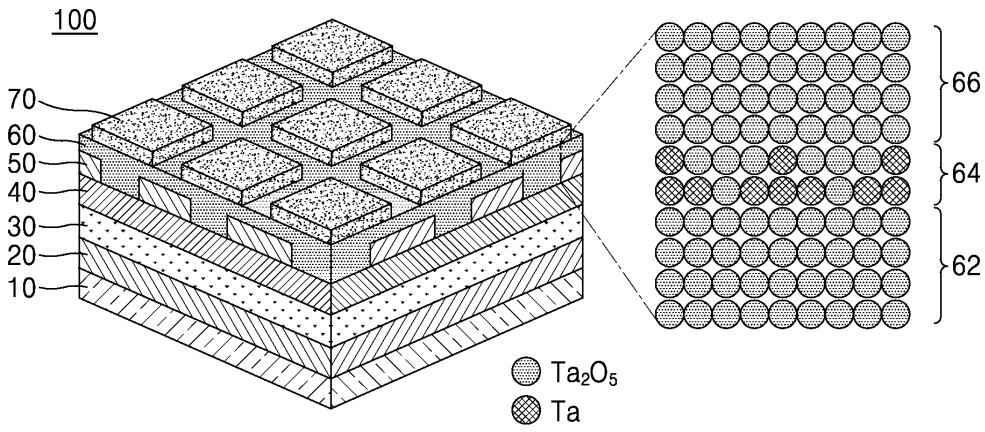
전체 청구항 수 : 총 16 항

(54) 발명의 명칭 **저항변화소자 및 이의 제조방법**

## (57) 요 약

본 발명은 Ta 합금을 포함하는 저항변화층을 구비하는 저항변화소자로서, 상기 저항변화층은 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 포함하고, 2차 이온질량 분석법(TOF-SIMS)에 의해 분석된 상기 저항변화층의 네거티브(negative) 스펙트럼 및 파지티브(positive) 스펙트럼에서 각각 변곡점이 나타나며, 상기 네거티브 스펙트럼의 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 160% 내지 190% 이거나, 혹은 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 128% 내지 212%를 포함할 수 있다.

*대 표 도* - 도1



(52) CPC특허분류
*C23C 16/45536* (2013.01)
*H10N 50/01* (2023.02)
*H10N 50/10* (2023.02)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

| | |
|---|---|
| 과제고유번호 | 7660 |
| 과제번호 | PNK7660 |
| 부처명 | 과학기술정보통신부 |
| 과제관리(전문)기관명 | 국가과학기술연구회 |
| 연구사업명 | 한국재료연구원 운영비지원사업 |
| 연구과제명 | 저전력 자극감응형 인공시냅스 소재 개발(1/3) |
| 기 여 율 | 1/1 |
| 과제수행기관명 | 한국재료연구원 |
| 연구기간 | 2021.01.01 ~ 2021.12.31 |

# 명 세 서

## 청구범위

### 청구항 1

Ta 합금을 포함하는 저항변화층을 구비하는 저항변화소자로서,

상기 저항변화층은 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 포함하고,

2차 이온질량 분석법(ToF-SIMS)에 의해 분석된 상기 저항변화층의 네거티브(negative) 스펙트럼 및 파지티브(positive) 스펙트럼에서 각각 변곡점이 나타나며,

상기 네거티브 스펙트럼의 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 160% 내지 190% 이거나, 혹은 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 128% 내지 212%를 포함하는,

저항변화소자.

### 청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 저점과 고점 사이의 비율은 상기 고점에서의 강도값을 상기 저점에서의 강도값으로 나눈 후 100을 곱하여 연산하는,

저항변화소자.

### 청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 165% 내지 185%인,

저항변화소자.

### 청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 170% 내지 180%인,

저항변화소자.

### 청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 128% 내지 146%인,

저항변화소자.

### 청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 130% 내지 140%인,

저항변화소자.

### 청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 저항변화층의 상면에 형성된 상부 전극층 및 상기 저항변화층의 하면에 형성된 하부 전극층을 더 포함하는,

저항변화소자.

**청구항 8**

제 1 항에 있어서,

상기 하부 전극층의 하면에 형성된 접착층;

상기 접착의 하면에 형성된 절연층; 및

상기 절연층의 하면에 형성된 실리콘 기판;을 더 포함하는,

저항변화소자.

**청구항 9**

제 1 항에 있어서,

상기 하부 전극층 상면의 적어도 어느 일부에는 절연 패턴이 형성되어, 상기 저항변화층이 상기 하부 전극층 및 상기 절연 패턴의 전면 상에 형성된,

저항변화소자.

**청구항 10**

Ta 합금을 포함하는 저항변화층을 포함하는 저항변화소자의 제조방법으로서,

실리콘 기판 상에 절연층을 형성하는 단계;

상기 절연층 상에 접착층을 형성하는 단계;

상기 접착층 상에 하부 전극층을 형성하는 단계;

PEALD(Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition) 방법을 이용하여 상기 하부 전극층 상에 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 포함하는 저항변화층을 형성하는 단계; 및

상기 저항변화층 상에 상부 전극층을 형성하는 단계;를 포함하고,

2차 이온질량 분석법(TOF-SIMS)에 의해 분석된 상기 저항변화층의 네거티브(negative) 스펙트럼 및 파지티브(positive) 스펙트럼에서 각각 변곡점이 각각 나타나며,

상기 네거티브 스펙트럼의 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 160% 내지 190% 혹은 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 128% 내지 212%를 포함하는,

저항변화소자의 제조방법.

**청구항 11**

제 10 항에 있어서,

상기 $Ta_2O_5$ 박막은 전구체 가스 $TaF_5$ 및 반응가스 $H_2O$를 챔버 내에 순차적으로 공급하여 상기 $Ta_2O_5$ 박막을 형성하는,

저항변화소자의 제조방법.

**청구항 12**

제 10 항에 있어서,

상기 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 포함하는 저항변화층은 전구체 가스 $TaF_5$ 및 반응가스 $H_2$를 챔버 내에 동시에 공급하고, 플라즈마(plasma)를 발생시켜 Ta의 함량이 상대적

으로 리치한 구조를 포함하는 저항변화층을 형성하는,

저항변화소자의 제조방법.

**청구항 13**

제 10 항에 있어서,

상기 절연층은 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 형성하는,

저항변화소자의 제조방법.

**청구항 14**

제 10 항에 있어서,

상기 접착층은 스퍼터링(sputtering) 방법으로 형성하는,

저항변화소자의 제조방법.

**청구항 15**

제 10 항에 있어서,

상기 하부 전극층은 스퍼터링(sputtering) 방법으로 형성하는,

저항변화소자의 제조방법.

**청구항 16**

제 10 항에 있어서,

상기 상부 전극층은 전자빔 증발증착(e-beam evaporation) 방법으로 형성하는,

저항변화소자의 제조방법.

## *발명의 설명*

### *기 술 분 야*

[0001] 본 발명은 저항변화소자 및 이의 제조방법에 관한 것으로서, 더 상세하게는 Ta 합금을 포함하는 저항변화층을 구비하는 저항변화소자 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

### *배 경 기 술*

[0002] 최근 사물 인터넷의 급격한 성장으로 처리해야 할 데이터의 양이 급격히 증가하고 있다. 이러한 데이터를 처리함에 있어서 저전력 소모로 대규모 병렬 연산 기능을 할 수 있는 머신러닝이 필요하다. 그러나 종래의 시스템은 중앙처리장치와 메모리가 물리적으로 분리되어 있는 제한된 구조를 갖고 있다. 이로 인해 직렬 데이터 처리가 발생하여 병목현상에 의한 대기 시간이 발생한다. 또, 높은 전력 소모와 복잡성으로 인해 기존의 금속 산화물-반도체 기술로는 효율적인 머신러닝을 수행하기가 어렵다.

[0003] 이와 관련하여, 뉴로모픽 컴퓨팅 아키텍처(neuromorphic computing architectures)는, 기존의 폰 노이만 아키텍처(von Neumann architecture)의 한계를 극복하기 위해 집중적으로 연구되고 있다. 인간의 뇌는 복잡하고 다양한 신경 처리를 수행할 수 있고, 대규모의 데이터를 병렬적으로 구현할 수 있다.

[0004] 인공 신경 시스템에서 전자 시냅스 소자를 성공적으로 구현하기 위해서, 나노미터 스케일의 인공 시냅스 기능소자가 필요하다. 인공 시냅스 기능소자는 고밀도, 저전력, 빠른 스위칭 속도 및 다중 레벨 기능을 만족해야 한다.

[0005] 대표적인 인공 시냅스 기능소자는 저항성 물질($HfO_2$, $Ta_2O_5$, $TiO_2$ 등), 상변화 물질($Ge_2Sb_2Te_5$ 및 $Sb_2Te_3$), 스핀-토크 전달 물질(CoFeB/MgO/CoFeB)과 같은 2단자 구성으로 구성된 다양한 유망한 시냅스 물질 등이 개발되고 있다.

[0006] 그 중에서도 탄탈륨 산화물($Ta_2O_5$) 기반의 저항 시냅스 소자가 빠른 스위칭 응답속도와 우수한 내구성 및 안정성으로 인해 각광받고 있다. 탄탈륨 산화물 기반 저항 시냅스 소자는 10 fJ 미만의 초저에너지 소비를 보여주고 있다.

[0007] 그러나 상기 소자는 복잡한 제조 공정으로 인해 실용적이지 않으며, 간단한 나노스케일의 소자 제조방법으로 신뢰성이 향상된 $Ta_2O_5$ 기반의 저항 시냅스 소자를 제조하는 것이 매우 필요하다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0008] 종래에는 이와 같이, 빠른 스위칭 응답속도와 우수한 내구성 및 안정성을 가지며 신뢰성을 갖는 저항변화소자를 구현하기 어려운 문제점이 있었다. 본 발명은 상기와 같은 문제점을 포함하여 여러 문제점들을 해결하기 위한 것으로서, 간단한 제조방법으로 종래 대비 더 빠른 스위칭 응답속도와 우수한 내구성 및 안정성을 갖는 저항변화소자 및 이의 제조방법을 제공하는 것을 목적으로 한다. 그러나 이러한 과제는 예시적인 것으로, 이에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

### 과제의 해결 수단

[0009] 본 발명의 일 실시예에 따르면, Ta 합금을 포함하는 저항변화층을 구비하는 저항변화소자를 제공한다. 상기 저항변화소자는 상기 저항변화층은 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 포함하고, 2차 이온질량 분석법(ToF-SIMS)에 의해 분석된 상기 저항변화층의 네거티브(negative) 스펙트럼 및 파지티브(positive) 스펙트럼에서 각각 변곡점이 나타나며, 상기 네거티브 스펙트럼의 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 160% 내지 190% 이거나, 혹은 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 128% 내지 212%를 포함할 수 있다.

[0010] 상기 저항변화소자에 있어서, 상기 저점과 고점 사이의 비율은 상기 고점에서의 강도값을 상기 저점에서의 강도값으로 나눈 후 100을 곱하여 연산할 수 있다.

[0011] 상기 저항변화소자에 있어서, 상기 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 165% 내지 185%일 수 있다.

[0012] 상기 저항변화소자에 있어서, 상기 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 170% 내지 180%일 수 있다.

[0013] 상기 저항변화소자에 있어서, 상기 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 128% 내지 146%일 수 있다.

[0014] 상기 저항변화소자에 있어서, 상기 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 130% 내지 140%일 수 있다.

[0015] 상기 저항변화소자에 있어서, 상기 저항변화층의 상면에 형성된 상부 전극층 및 상기 저항변화층의 하면에 형성된 하부 전극층을 더 포함할 수 있다.

[0016] 상기 저항변화소자에 있어서, 상기 하부 전극층의 하면에 형성된 접착층; 상기 접착의 하면에 형성된 절연층; 및 상기 절연층의 하면에 형성된 실리콘 기판;을 더 포함할 수 있다.

[0017] 상기 저항변화소자에 있어서, 상기 하부 전극층 상면의 적어도 어느 일부에는 절연 패턴이 형성되어, 상기 저항변화층이 상기 하부 전극층 및 상기 절연 패턴의 전면 상에 형성될 수 있다.

[0018] 본 발명의 다른 실시예에 따르면, Ta 합금을 포함하는 저항변화층을 구비하는 저항변화소자의 제조방법을 제공한다. 상기 저항변화소자의 제조방법은 실리콘 기판 상에 절연층을 형성하는 단계; 상기 절연층 상에 접착층을 형성하는 단계; 상기 접착층 상에 하부 전극층을 형성하는 단계; PEALD(Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition) 방법을 이용하여 상기 하부 전극층 상에 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 포함하는 저항변화층을 형성하는 단계; 및 상기 저항변화층 상에 상부 전극층을 형성하는 단계;를 포함하고, 2차 이온질량 분석법(TOF-SIMS)에 의해 분석된 상기 저항변화층의 네거티브(negative) 스펙

트럼 및 파지티브(positive) 스펙트럼에서 각각 변곡점이 각각 나타나며, 상기 네거티브 스펙트럼의 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 160% 내지 190% 혹은 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 128% 내지 212%를 포함할 수 있다.

[0019] 상기 저항변화소자의 제조방법에 있어서, 상기 $Ta_2O_5$ 박막은 전구체 가스 $TaF_5$ 및 반응가스 $H_2O$를 챔버 내에 순차적으로 공급하여 상기 $Ta_2O_5$ 박막을 형성할 수 있다.

[0020] 상기 저항변화소자의 제조방법에 있어서, 상기 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 포함하는 저항변화층은 전구체 가스 $TaF_5$ 및 반응가스 $H_2$를 챔버 내에 동시에 공급하고, 플라즈마(plasma)를 발생시켜 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 구조를 포함하는 저항변화층을 형성할 수 있다.

[0021] 상기 저항변화소자의 제조방법에 있어서, 상기 절연층은 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 형성할 수 있다.

[0022] 상기 저항변화소자의 제조방법에 있어서, 상기 접착층은 스퍼터링(sputtering) 방법으로 형성할 수 있다.

[0023] 상기 저항변화소자의 제조방법에 있어서, 상기 하부 전극층은 스퍼터링(sputtering) 방법으로 형성할 수 있다.

[0024] 상기 저항변화소자의 제조방법에 있어서, 상기 상부 전극층은 전자빔 증발증착(e-beam evaporation) 방법으로 형성할 수 있다.

## *발명의 효과*

[0025] 상기한 바와 같이 이루어진 본 발명의 일 실시예에 따르면, 빠른 스위칭 응답속도와 우수한 내구성 및 안정성을 갖는 저항변화소자 및 이의 제조방법을 제시할 수 있다. 물론 이러한 효과에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

## *도면의 간단한 설명*

[0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 저항변화소자의 구조를 개략적으로 도해하는 도면이다.

도 2는 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자의 저항변화층을 제조하는 공정조건을 개략적으로 도해하는 도면이다.

도 3은 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 미세구조 및 성분을 X- 선 광전자 분광법(XPS)과 2차 이온질량 분석법(ToF SIMS)으로 각각 분석한 결과이다.

도 4는 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 전류-전압 특성을 분석한 결과이다.

도 5는 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 광학적 특성을 분석한 결과이다.

도 6은 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 스위칭 메커니즘을 설명하기 위한 도면이다.

도 7은 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 전위차 결과값을 나타내는 그래프이다.

도 8은 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 뉴모르픽 시스템의 알고리즘을 나타내는 도면이다.

## *발명을 실시하기 위한 구체적인 내용*

[0027] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 여러 실시예들을 상세히 설명하기로 한다.

[0028] 본 발명의 실시예들은 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명을 더욱 완전하게 설명하기 위하여 제공되는 것이며, 하기 실시예는 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다. 오히려 이들 실시예들은 본 개시를 더욱 충실하고 완전하게 하고, 당업자에게 본 발명의 사상을 완전하게 전달하기 위하여 제공되는 것이다. 또한, 도면에서 각 층의 두께나 크기는 설명의 편의 및 명확성을 위하여 과장된 것이다.

[0029] 이하, 본 발명의 실시예들은 본 발명의 이상적인 실시예들을 개략적으로 도시하는 도면들을 참조하여 설명한다.

도면들에 있어서, 예를 들면, 제조 기술 및/또는 공차(tolerance)에 따라, 도시된 형상의 변형들이 예상될 수 있다. 따라서, 본 발명 사상의 실시예는 본 명세서에 도시된 영역의 특정 형상에 제한된 것으로 해석되어서는 아니 되며, 예를 들면 제조상 초래되는 형상의 변화를 포함하여야 한다.

[0030] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 저항변화소자의 구조를 개략적으로 도해하는 도면이다.

[0031] 도 1을 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 저항변화소자(100)는 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 갖는 저항변화층(60)을 포함한다. 여기서, 상기 리치는 특정 원소의 함량이 다른 영역 대비 많다는 것으로 이해될 수 있다.

[0032] 구체적으로, 저항변화소자(100)는 기판(10) 상에 절연층(20), 접착층(30), 하부 전극층(40), 저항변화층(60) 및 상부 전극층(70)이 순차적으로 적층된 구조를 포함한다. 기판(10)은 예를 들어, 실리콘(Si) 기판을 포함할 수 있다.

[0033] 절연층(20)은 예를 들어, 실리콘 산화막, 대표적으로 $SiO_2$를 사용할 수 있으며, 두께는 520um 내지 530um일 수 있다. 접착층(30)은 예를 들어, 타이타늄(Ti)을 사용할 수 있으며, 두께는 9nm 내지 11nm일 수 있다.

[0034] 하부 전극층(40)은 예를 들어, 플래티늄(Pt)을 사용할 수 있으며, 두께는 95um 내지 105um일 수 있다. 또, 하부 전극층(40)과 저항변화층(60) 사이에는 절연 패턴(50)이 형성되어 하부 전극층(40)과 저항변화층(60)이 서로 맞닿는 영역에서만 전기적으로 연결될 수 있다. 절연 패턴(50)은 절연층(20)과 동일한 소재를 사용할 수 있으며, 절연 패턴(50)의 두께는 절연층(20)의 두께의 절반정도일 수 있다. 절연 패턴(50)의 두께는 예를 들어, 190nm 내지 210nm일 수 있다.

[0035] 저항변화층(60)은 Ta205 박막으로 구성되되, 상기 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 영역을 포함할 수 있다. 저항변화층(60)의 두께는 예를 들어, 18nm 내지 22nm일 수 있다. 이러한 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 구조를 갖는 저항변화층(60)에 의해 빠른 스위칭 응답속도와 우수한 내구성 및 안정성을 가질 수 있다. 저항변화층(60)은 PEALD(Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition) 방법을 이용하여 형성된다. 저항변화층(60)을 구성하는 박막은 $Ta_2O_5$ 박막이며, 상기 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 더 많아지도록 형성할 수 있다.

[0036] 저항변화층(60)은 $Ta_2O_5$ 박막(62, 66) 내에 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 영역(64)을 포함한다. 저항변화층(60)의 특성은 Ta의 함량에 따라 상이하게 제어되며, Ta의 함량을 제어하는 방법으로는 상기 PEALD 방식을 이용하는 것이 가장 바람직하다.

[0037] 상기 $Ta_2O_5$ 박막은 전구체 가스 $TaF_5$ 및 반응가스 $H_2O$를 챔버 내에 순차적으로 공급하여 상기 $Ta_2O_5$ 박막을 형성할 수 있다. 이때, 상기 $Ta_2O_5$ 박막의 적어도 어느 일부에 Ta의 함량이 상대적으로 리치(rich)한 구조를 갖도록, 전구체 가스 $TaF_5$ 및 반응가스 $H_2$를 챔버 내에 동시에 공급하고, 플라즈마(plasma)를 발생시켜 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 구조를 형성할 수 있다.

[0038] 이렇게 형성된 저항변화층(60)에서 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 영역을 확인하는 것은 어렵다. 그 이유는 Ta가 Ta205 박막 내에서 박막의 형태로 존재한다기 보다, 나노 클러스터의 형태로 존재하기 때문에 투과전자현미경(TEM) 등으로 구분이 어렵기 때문이다. 따라서, 본 발명에서는 2차 이온질량 분석법(ToF-SIMS)을 이용하여 Ta의 적정 범위를 찾아 정리하였다. Ta의 함량에 따라 저항변화소자로서의 전기적 특성이 크게 달라지게 되므로, 하기에 정리된 내용을 통해서 Ta의 적정 범위를 한정하고자 하였다.

[0039] 2차 이온질량 분석법(ToF-SIMS)에 의해 분석된 저항변화층(60)의 네거티브(negative) 스펙트럼 및 파지티브(positive) 스펙트럼에서 각각 변곡점이 나타나게 된다. 상기 네거티브 스펙트럼의 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 160% 내지 190% 이거나, 혹은 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 128% 내지 212%를 포함한다. 여기서, 상기 저점과 고점 사이의 비율은 상기 고점에서의 강도값을 상기 저점에서의 강도값으로 나눈 후 100을 곱하여 연산하여 구할 수 있다.

[0040] 상기 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 더 바람직하게 165% 내지 185%일 수 있다. 더 바람직하게 상기 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 170% 내지 180%일 수 있다.

[0041] 또한, 상기 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 더 바람직하게 128% 내지 146%일 수 있다. 더 바람직하게 상기 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율은 130% 내지 140%일 수 있다. 이하에서 실험예를 통해서, 상기 Ta 원소의 피크 및 $Ta_2O_5$의 피크에 대한 비율을 측정하는 방법과 측정된 결과값이 갖는 의미를 후술한다.

[0042] 기판(10) 상에 형성되는 절연층(20)은 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition) 방법으로 형성될 수 있다. 또, 절연층(20) 상에 형성되는 접착층(30)은 스퍼터링(sputtering) 방법으로 형성할 수 있다.

[0043] 하부 전극층(40)은 접착층(30) 상에 형성되며, 스퍼터링(sputtering) 방법으로 형성될 수 있다. 상부 전극층(70)은 전자빔 증발증착(e-beam evaporation) 방법으로 형성할 수 있다. 상부 전극층(70)은 예를 들면, 타이타늄(Ti)을 사용할 수 있으며, 두께는 75nm 내지 85nm일 수 있다.

[0044] 이하에서는, 본 발명의 이해를 돕기 위한 실시예들을 설명한다. 다만, 하기의 실험예들은 본 발명의 이해를 돕기 위한 것일 뿐, 본 발명이 아래의 실시예들만으로 한정되는 것은 아니다.

[0045] 본 발명의 실험예 샘플은 250nm 크기의 비아홀(via-hole) 패턴을 구비한 실리콘 웨이퍼(Si wafer)를 기판으로 사용했다. 상기 비아홀은 포토리소그라피(photolithography) 방법과 반응성 이온 에칭(reactive ion etching) 방식을 이용하여 형성했다. 이후에 상기 기판 상에 CVD를 이용하여 절연층으로 $SiO_2$ 박막을 형성하였다.

[0046] 상기 $SiO_2$ 박막 상에 Ti 접착층과 Pt 하부 전극층을 순차적으로 형성했다. 이후에 Pt 하부 전극층 상에 $SiO_2$ 절연 패턴을 형성하고, 그 위에 저항변화층을 형성했다.

[0047] 저항변화층은 PEALD 방식을 이용했으며, 저항변화층의 전체 두께는 대략 20nm의 크기($Ta_2O_5$(10nm)/Ta/$Ta_2O_5$(10nm))로 형성하였다. 구체적으로, $Ta_2O_5$ 박막은 전구체 가스 $TaF_5$ 및 반응가스 $H_2O$를 챔버 내에 순차적으로 공급하여 두께 10nm의 상기 $Ta_2O_5$ 박막을 형성하였다.

[0048] 이후에 전구체 가스 $TaF_5$ 및 반응가스 $H_2$를 챔버 내에 동시에 공급하고, 플라즈마(plasma)를 발생시켜 $Ta_2O_{-5}$ 박막 상에 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 구조를 형성하였다. 여기서, 상기 Ta 함량이 상대적으로 리치한 구조를 형성하기 위해서, 공정 사이클을 5회(이하에서 Ta 5 사이클로 표기) 진행하였다.

[0049] 마지막으로 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 구조를 형성한 이후에 다시 $Ta_2O_5$ 박막을 앞서 상술한 방법과 동일한 방식으로 형성하였다. 여기서, 상기 PEALD 공정 조건은 도 2에 도시된 바와 같이 챔버 내에 공급되는 가스의 종류와 사이클 수만큼 제어하였다.

[0050] 이후에 Ti 상부 전극층을 전자빔 증발 증착 방법을 이용하여 저항변화층 상에 80nm의 두께로 형성하여 저항변화소자 샘플을 제조하였다.

[0051] 상기 샘플을 X- 선 광전자 분광법(XPS)과 2차 이온질량 분석법(ToF SIMS)으로 소자의 특성을 분석하고, 이와 비교하기 위해서, Ta의 함량이 상대적으로 리치한 영역을 갖지 않는 샘플과, Ta의 함량이 서로 다르게 제어된 비교예 샘플(Ta 사이클 수 0, 10, 15, 20, 30)도 동일한 방식으로 제조하여 분석하였다.

[0052] 도 3은 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 미세구조 및 성분을 X- 선 광전자 분광법(XPS)과 2차 이온질량 분석법(ToF SIMS)으로 각각 분석한 결과이다.

[0053] 도 3의 (a) 및 (b)를 참조하면, XPS 분석 결과 저항변화소자 샘플 모두 $Ta_2O_5$ 박막이 형성되어 있음을 확인할 수 있었고, 특히, $Ta_2O_5$ 박막 내에 Ta 원소로만 이루어진 영역이 존재함을 확인할 수 있었다.

[0054] 도 3의 (c) 내지 (f)를 참조하면, 본 발명의 Ta 5 사이클 샘플, $Ta_2O_5$만 형성된 샘플(Ta 0 사이클) 및, Ta 15 사이클 샘플에 대해서 ToF SIMS로 분석된 저항변화층의 네거티브(negative) 스펙트럼 및 파지티브(positive) 스펙트럼에서 각각 변곡점이 나타나며, 네거티브 스펙트럼의 Ta 원소의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율과 $Ta_2O_5$의 피크에 나타나는 변곡점의 저점과 고점 사이의 비율을 각각 측정하여 하기 표 1에 정리하였다. 하기 표 1에서 비율 측정 위치를 각각 측정된 수치 앞에 괄호로 표기하였다.

표 1

[0055]

| | $Ta_2O_5^-$(%) | $Ta^-$(%) | $TaO_2^+$(%) |
|---|---|---|---|
| Ta 0 사이클 샘플 | 0 | 0 | 0 |
| Ta 5 사이클 샘플 (도 3(c) 및 (d)) | (1)128.2 ~ (2)146 | (3)164.6 | (4)106.4 |
| Ta 15 사이클 샘플 (도 3(e) 및 (f)) | (1)195.3 ~ (2)212.4 | (3)185.6 | (4)111.8 |

[0056] ToF SIMS 분석 결과, Ta 5 사이클 샘플과 Ta 15 사이클 샘플에 각각 Ta 원소가 상대적으로 리치한 영역이 형성된 것을 확인할 수 있었고, Ta의 함량이 증가함에 따라 $Ta_2O_5$만 존재하는 샘플(Ta 0 사이클) 대비 변곡점이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이하에서는 상기 Ta 원소의 함량에 따라 저항변화소자의 특성이 어떻게 달라지는지 후술한다.

[0057] 도 4는 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 전류-전압 특성을 분석한 결과이다.

[0058] 도 4를 참조하면, Ta 5 사이클 샘플, $Ta_2O_5$만 형성된 샘플(Ta 0 사이클) 및, Ta 10 사이클 샘플의 전류-전압 특성을 보면, 3가지 샘플 모두 크기의 차이는 있었으나, 점진적인 스위칭 동작을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그 중에서도 Ta 5 사이클 샘플이 가장 우수한 전기적 특성을 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Ta205 박막내의 산소 이온의 이동에 의한 것으로 판단된다. 그러나, Ta 10 사이클 샘플의 경우, 전기적 특성이 더 감소한 결과를 나타냈고, 이로 인해 특정 사이클 범위, 즉, Ta 함량이 상대적으로 리치한 영역은 일부 영역에 극소하게 형성되어야 전기적 특성이 향상되는 것을 의미한다.

[0059] 도 5는 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 광학적 특성을 분석한 결과이다.

[0060] 도 5를 참조하면, PE-ALD를 이용한 사이클 수에 따른 Ta의 성장 특성을 파악하기 위해 Ta 증착 사이클 수에 따른 굴절률(n)과 광학 상수(k)를 측정한 결과로서, 굴절률(n) 값은 Ta 10 사이클 샘플에서 Ta 15 사이클 샘플까지 크게 변화하며, Ta 15 사이클 샘플에서부터 광학 상수(k)는 4.6 eV에서 급격히 증가하기 시작한다. 이러한 변화는 4.6 eV에서 대역간 흡수가 발생하는 것으로 간주되며, 이는 Ta 15 사이클 이상일 때 TaOx 특성이 더 두드러지는 것으로 판단된다.

[0061] 기본적으로 증착된 Ta는 매우 얇기 때문에 공기에 노출되면 쉽게 TaOx로 산화되며, 측정된 굴절률과 광학 상수 값은 TaOx의 특성을 나타내는 경향이 있다. 도 4의 (c) 및 (d)를 참조하면, Ta가 아일랜드(island) 형태로 증착될 때, 입사광은 공기의 광학적 특성(n = 1, k = 0)의 영향을 크게 받게 되고, TaOx와 공기의 광학 특성을 혼합하여 반사광을 감지한다.

[0062] 한편, Ta 증착 사이클수가 증가함에 따라 Ta의 연속적인 박막형태로 되어 굴절률과 광학 상수 값은 TaOx 연속층의 두께에 따라 영향을 받게 되는 것을 확인할 수 있다.

[0063] 도 6은 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 스위칭 메커니즘을 설명하기 위한 도면이다.

[0064] 도 6을 참조하면, $Ta_2O_5$ 박막만 존재하는 Ta 0 사이클 샘플의 경우 외부 전기장에 의한 산소 이온의 드리프트 확산으로 인해 양극성 스위칭이 발생하여 두께 변화를 유도한다. 그러나, Ta 5 사이클 샘플의 경우, $Ta_2O_5$ 박막의 밀도 상태가 상대적으로 산소 결함의 양이 증가하게 되고, 산소 이온의 이동도가 증가하게 된다.

[0065] 이러한 산소 이온의 이동도가 증가되는 현상은 $Ta_2O_5$ 박막의 밀도 감소 및 플라즈마로 인한 산소 결함의 증가로 인해 Ta이 증착되는 동안 발생한 것으로 판단된다. 또는 $Ta/Ta_2O_5$ 계면에서 sub-TaOx의 생성으로 인한 저항의 안정성 향상되어 발생하는 것으로 판단된다.

[0066] 그 결과, Ta 5 사이클 샘플에서 소자의 향상된 스위칭 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나, Ta 10 사이클 이상으로 증가하게 되면, 증착된 Ta를 포함하는 소자에서 스위칭 특성의 열화가 발생한다. 이는 Ta 나노클러스터가 네트워크 내에서 서로 쉽게 연결되어 산소 이온의 이동을 방해하기 때문으로 판단된다. 따라서, 적당한 Ta의 함량으로 인해 소자의 안정성을 확보할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

[0067] 도 7은 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 전위차 결과값을 나타내는 그래프이다.

[0068] 도 7을 참조하면, 전기적인 시냅틱 기능(electronic synaptic functions)을 확인하기 위해서, Ta 함량에 의한 전위차 결과값을 각 샘플별로 측정한 결과로서, Ta 5 사이클 샘플의 전위차 값이 $Ta_2O_5$만 존재하는 Ta 0 사이클 샘플 대비 더 높은 것을 확인할 수 있었다. Ta 15 사이클 샘플은 이러한 경향성을 나타내지 않았으며, 전위차 값의 변화 폭이 크기 때문에 저항변화소자로서 사용하기 어렵다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, Ta 5 사이클 샘플만 시냅틱 특성 결과도 상당히 이상적인 결과를 나타내는 것으로 보아, Ta가 박막 전체를 구성하기 보다 $Ta_2O_5$ 박막의 일부에만 형성되는 것이 더 우수한 전기적 특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

[0069] 도 8은 본 발명의 실험예에 따른 저항변화소자 샘플의 Ta 함량에 의한 뉴모르픽 시스템의 알고리즘을 나타내는 도면이다.

[0070] 도 8을 참조하면, Ta 5 사이클 샘플이 $Ta_2O_5$만 존재하는 Ta 0 사이클 샘플 대비 동일한 에포크(epoch)에서 더 높은 패턴 인식 정확도를 보여주는 것을 확인할 수 있었다. 더 중요한 점은 Ta 함량이 상대적으로 리치한 영역을 도입함으로써 종래 기술 대비 학습 효율성이 85.99%로 눈에 띄게 향상되었다는 점이다.

[0071] 상술한 바와 같이, 본 발명에서는 PE-ALD를 사용하여 Ta의 함량이 상대적으로 리치한 영역, 즉, Ta 나노 클러스터의 농도를 정밀하게 제어하여 종래기술 대비 높은 대칭성과 향상된 스위칭 비율을 가진 $Ta_2O_5$ 기반 저항성 시냅스 소자를 제조할 수 있다. 특히, Ta 5 사이클 샘플에서 스위칭 비율이 증가하고 변동성이 크게 감소하였다.

[0072] 따라서, Ta 함량이 상대적으로 리치한 영역을 간단하게 $Ta_2O_5$ 박막 내에 형성함으로써, 신뢰성이 향상된 뉴로모픽 하드웨어를 실현할 수 있다.

[0073] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

## *부호의 설명*

[0074] 10: 기판

20: 절연층

30: 접착층

40: 하부 전극층

50: 절연 패턴

60: 저항변화층

62, 66: $Ta_2O_5$ 박막

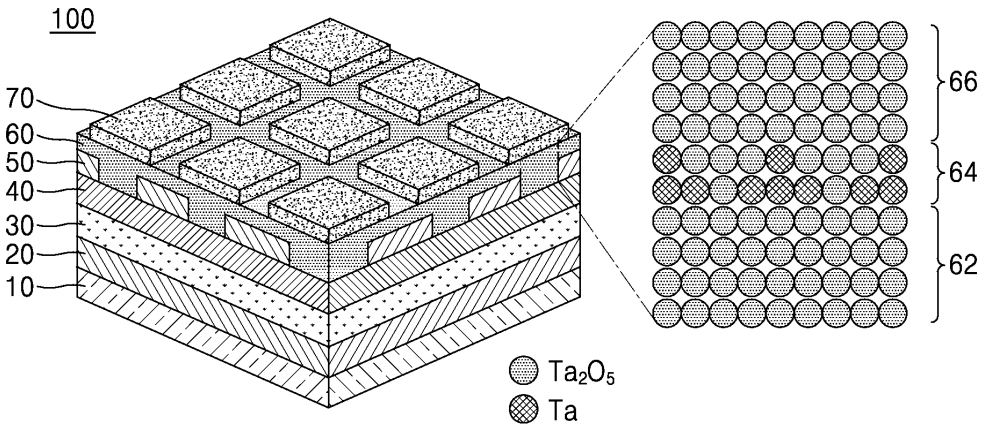
64: Ta의 함량이 상대적으로 리치한 영역

70: 상부 전극층

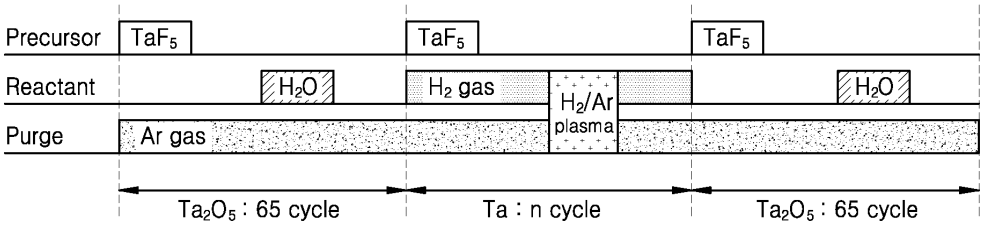
100: 저항변화소자

## 도면

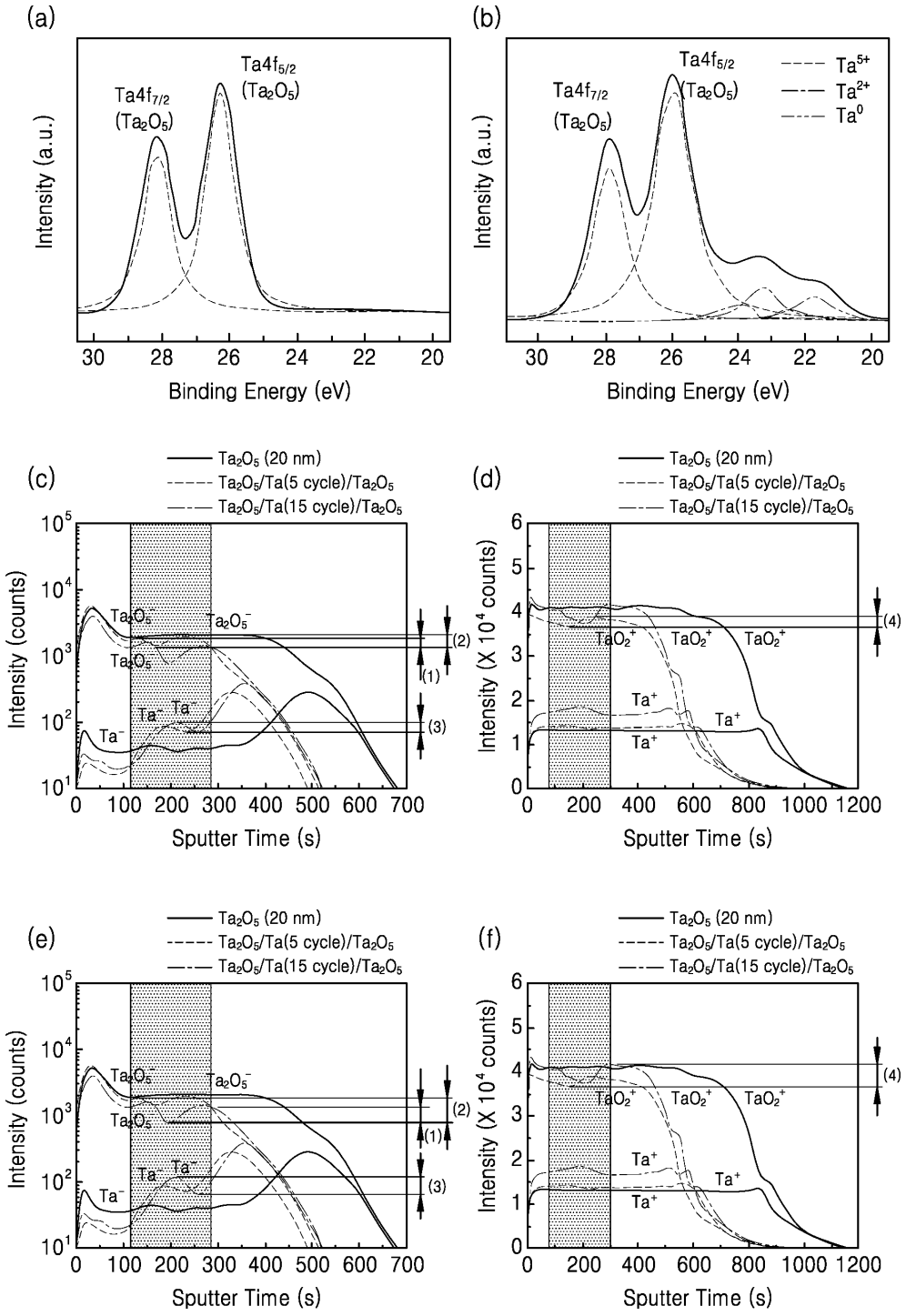
### 도면1


100
70
60
50
40
30
20
10
66
64
62
$Ta_2O_5$
Ta

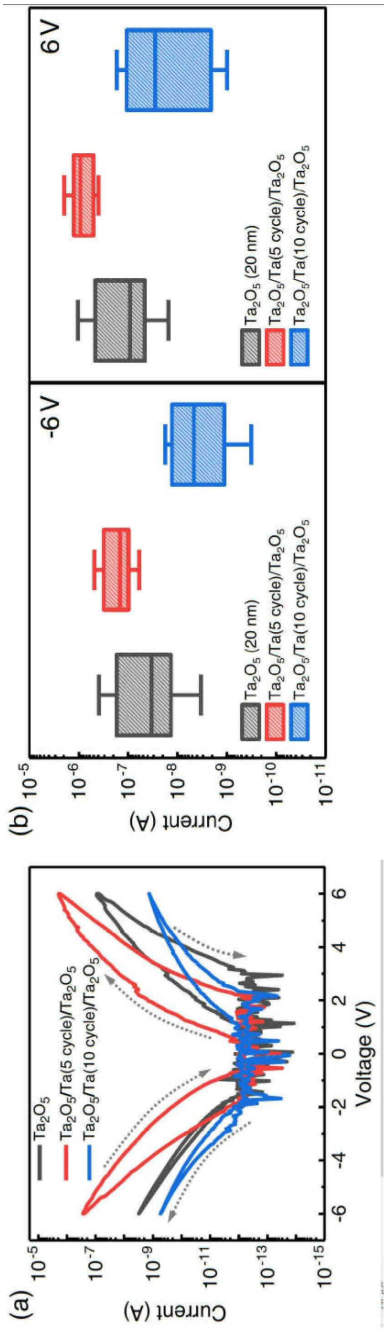
### 도면2


Precursor
Reactant
Purge
$TaF_5$
$TaF_5$
$TaF_5$
$H_2O$
$H_2$ gas
$H_2$/Ar plasma
$H_2O$
Ar gas
$Ta_2O_5$ : 65 cycle
Ta : n cycle
$Ta_2O_5$ : 65 cycle

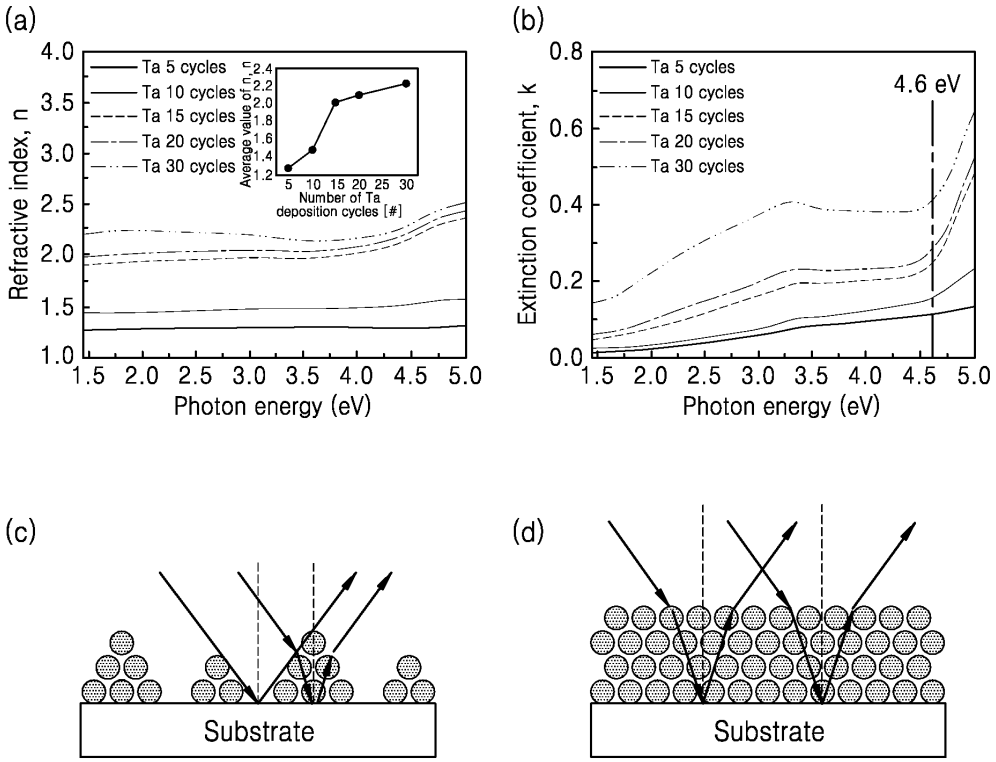
도면3


(a)
Ta4f7/2 (Ta2O5)
Ta4f5/2 (Ta2O5)
Intensity (a.u.)
Binding Energy (eV)
(b)
Ta5+
Ta2+
Ta0
(c)
Ta2O5 (20 nm)
Ta2O5/Ta(5 cycle)/Ta2O5
Ta2O5/Ta(15 cycle)/Ta2O5
Intensity (counts)
Sputter Time (s)
(d)
Intensity (X 10^4 counts)
(e)
(f)

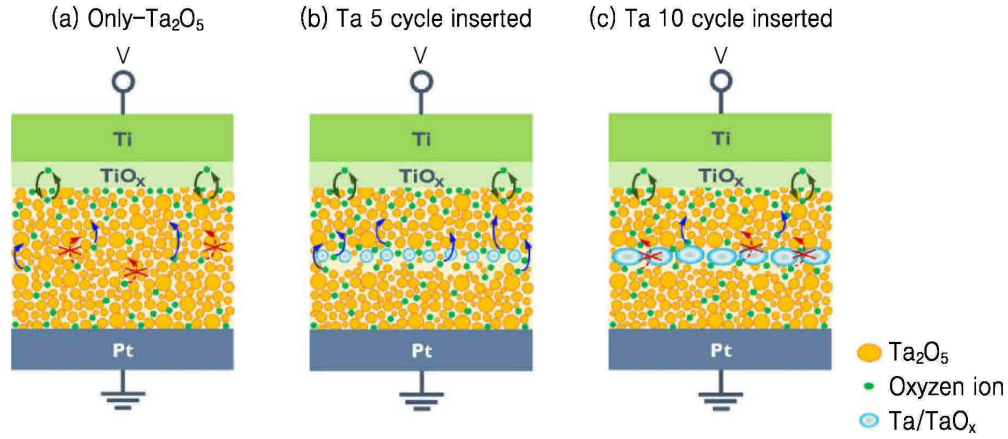
도면4


(a)
Current (A)
Voltage (V)
Ta2O5
Ta2O5/Ta(5 cycle)/Ta2O5
Ta2O5/Ta(10 cycle)/Ta2O5
(b)
Current (A)
-6 V
6 V
Ta2O5 (20 nm)
Ta2O5/Ta(5 cycle)/Ta2O5
Ta2O5/Ta(10 cycle)/Ta2O5

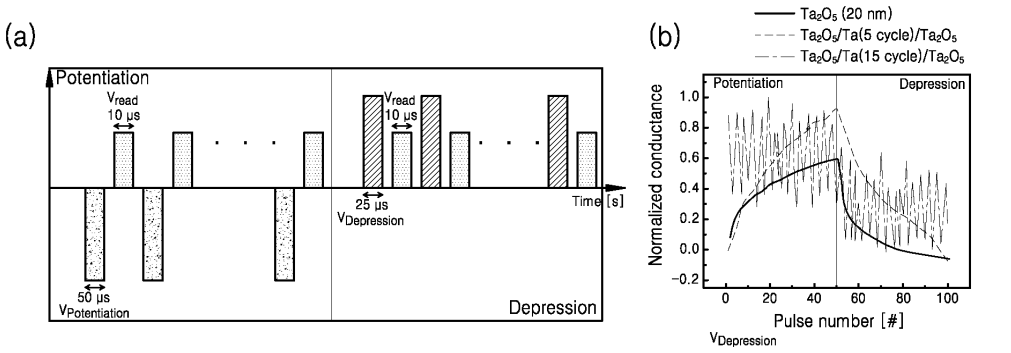
도면5


(a)
Refractive index, n
Photon energy (eV)
Ta 5 cycles
Ta 10 cycles
Ta 15 cycles
Ta 20 cycles
Ta 30 cycles
Average value of n, n
Number of Ta deposition cycles [#]
(b)
Extinction coefficient, k
Photon energy (eV)
4.6 eV
(c)
Substrate
(d)
Substrate

도면6

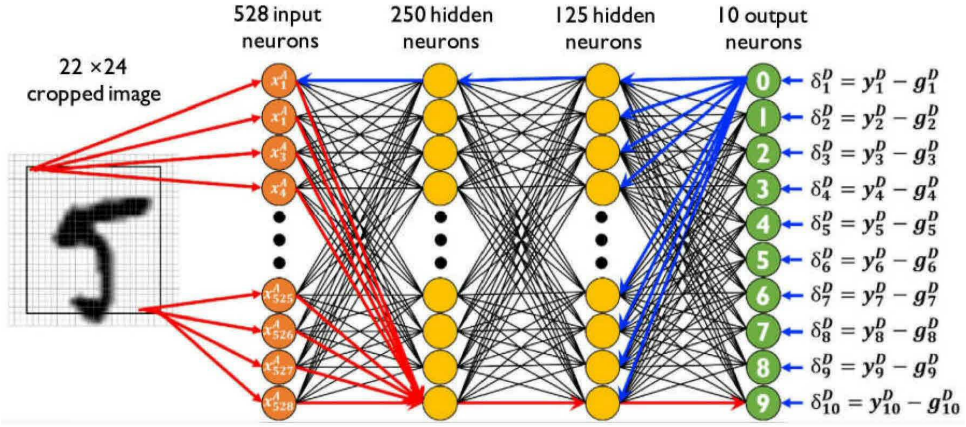

(a) Only-Ta2O5
(b) Ta 5 cycle inserted
(c) Ta 10 cycle inserted
V
Ti
TiOx
Pt
Ta2O5
Oxyzen ion
Ta/TaOx

도면7

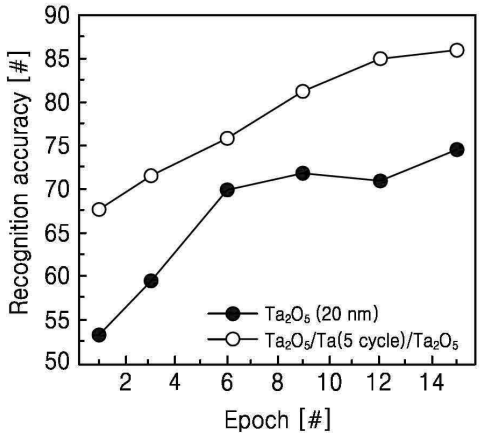

(a)
Potentiation
Vread
10 μs
25 μs
VDepression
Time [s]
50 μs
VPotentiation
Depression
(b)
Ta2O5 (20 nm)
Ta2O5/Ta(5 cycle)/Ta2O5
Ta2O5/Ta(15 cycle)/Ta2O5
Potentiation
Depression
Normalized conductance
Pulse number [#]
VDepression

도면8

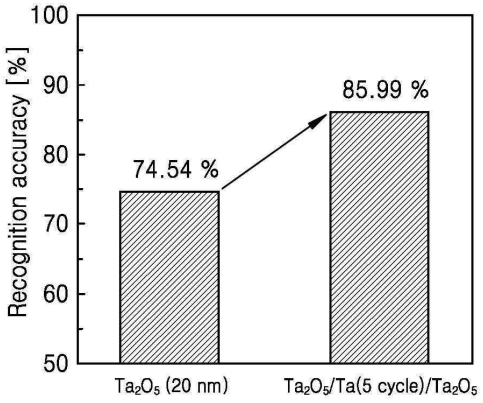
(a)


528 input neurons
250 hidden neurons
125 hidden neurons
10 output neurons
22 ×24 cropped image
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9

(b)


Recognition accuracy [#]
Epoch [#]
Ta2O5 (20 nm)
Ta2O5/Ta(5 cycle)/Ta2O5

(c)


Recognition accuracy [%]
74.54 %
85.99 %
Ta2O5 (20 nm)
Ta2O5/Ta(5 cycle)/Ta2O5