



등록특허 10-2298837



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년09월06일  
(11) 등록번호 10-2298837  
(24) 등록일자 2021년09월01일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H01L 43/10 (2006.01) H01L 43/02 (2006.01)  
H01L 43/08 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
H01L 43/10 (2013.01)  
H01L 43/02 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2020-0033574  
(22) 출원일자 2020년03월19일  
심사청구일자 2020년03월19일  
(56) 선행기술조사문헌  
KR1020150018413 A\*  
KR1020150054804 A\*  
KR1020160134598 A\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자  
고려대학교 산학협력단  
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암  
동5가)  
(72) 발명자  
김영근  
서울특별시 강남구 압구정로61길 37 한양아파트  
72동 1109호  
김용진  
서울특별시 강남구 선릉로120길 4-3 힐스테이7  
402호  
이민혁  
경상남도 양산시 물금읍 야리로 76 양산대방노블  
랜드엔리지(2차) 206동 1101호  
(74) 대리인  
특허법인 누리

전체 청구항 수 : 총 10 항

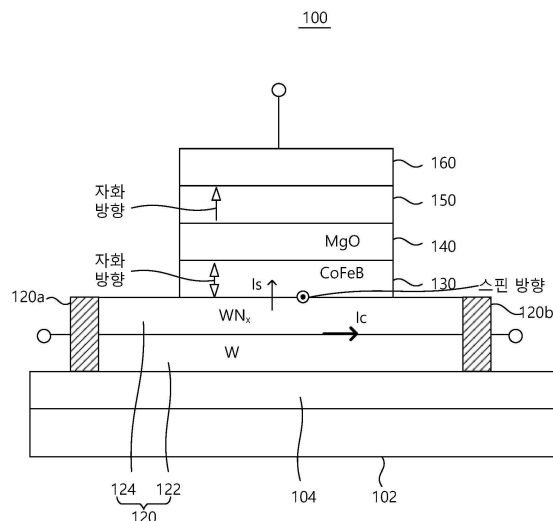
심사관 : 이양근

(54) 발명의 명칭 텅스텐 질화물을 가지는 스핀궤도토크 스위칭 소자

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 따른 자기 소자는, 고정된 자화 방향을 가지는 고정층; 스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층; 상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층; 및 면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층을 포함한다. 상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층의 자화 방향을 스위칭한다. 상기 고정층 및 상기 자유층은 수직 자기 이방성을 가지고, 상기 스핀 토크 발생층은 차례로 적층된 텅스텐층 및 텅스텐-질화물층을 포함한다. 상기 텅스텐-질화물층은 상기 자유층에 인접하게 배치된다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

**H01L 43/08** (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

|             |                             |
|-------------|-----------------------------|
| 과제고유번호      | 1711104070                  |
| 부처명         | 과학기술정보통신부                   |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국연구재단                      |
| 연구사업명       | 미래소재디스커버리지원(R&D)            |
| 연구과제명       | 설계기반 Spin-Orbitronics 소재 개발 |
| 기 여 율       | 1/1                         |
| 과제수행기관명     | 고려대학교                       |
| 연구기간        | 2015.12.04 ~ 2021.12.03     |

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

고정된 자화 방향을 가지는 고정층;  
스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층;  
상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층; 및  
면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층을 포함하고,  
상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층의 자화 방향을 스위칭하고,  
상기 고정층 및 상기 자유층은 수직 자기 이방성을 가지고,  
상기 스핀 토크 발생층은 차례로 적층된 텅스텐층 및 텅스텐-질화물층을 포함하고,  
상기 텅스텐-질화물층은 상기 자유층에 인접하게 배치된 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 2

제1 항에 있어서,  
상기 텅스텐-질화물층의 두께는 0.2 nm이고,  
상기 텅스텐-질화물층에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)가 5% 내지 42 %인 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 3

제1 항에 있어서,  
상기 텅스텐-질화물층에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 29% 이고,  
상기 텅스텐-질화물층의 두께는 0.2 nm 내지 0.8 nm인 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 4

제1 항에 있어서,  
상기 텅스텐-질화물층에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 5% 이고  
상기 텅스텐-질화물층의 두께는 0.2 nm 내지 3nm인 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 5

제1 항에 있어서,  
상기 텅스텐-질화물층은 결정질  $W_2N$  (111) 상을 포함하거나,  
상기 텅스텐-질화물층은 결정질  $W_2N$  (111) 상 및 결정질 WN (100) 상을 포함하는 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 6

제1 항에 있어서,  
상기 텅스텐층은 상기 자유층과 수직으로 정렬되는 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 7

제1 항에 있어서,

상기 스핀 토크 발생층은 면내 자기 이방성을 가진 강자성층을 더 포함하고,

상기 텅스텐층은 상기 강자성층과 상기 텅스텐질화물층 사이에 배치되는 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 8

제1 항에 있어서,

상기 텅스텐-질화물층의 비저항은  $350 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  이상인 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 9

고정된 자화 방향을 가지는 고정층;

스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층;

상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층;

면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층; 및

상기 자유층과 상기 스핀 토크 발생층 사이에 배치된 텅스텐-질화물층을 포함하고,

상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층의 자화 방향을 스위칭하고,

상기 고정층 및 상기 자유층은 수직 자기 이방성을 가지고,

상기 스핀 토크 발생층은 텅스텐층을 포함하고,

상기 텅스텐-질화물층은 상기 자유층과 수직으로 정렬된 것을 특징으로 하는 자기 소자.

#### 청구항 10

고정된 자화 방향을 가지는 고정층;

스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층;

상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층; 및

면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층을 포함하고,

상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층의 자화 방향을 스위칭하고,

상기 고정층 및 상기 자유층은 수직 자기 이방성을 가지고,

상기 스핀 토크 발생층은 텅스텐-질화물층을 포함하고,

상기 텅스텐-질화물층, 상기 자유층, 상기 터널 절연층, 및 상기 고정층은 기판 상에 차례로 적층되고,

상기 텅스텐-질화물층은 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 5%이고,

상기 텅스텐-질화물층은 상기 자유층에 인접하게 배치된 것을 특징으로 하는 자기 소자.

### 발명의 설명

#### 기술 분야

[0001] 본 발명은 스핀궤도토크(spin-orbit torque; SOT) 기반 스위칭 소자에 관한 것으로, 보다 자세하게는 낮은 전류로 스핀궤도토크(spin-orbit torque, SOT) 스위칭을 할 수 있는 텅스텐층/텅스텐 질화물층 다층 박막을 포함하는 스핀궤도토크(spin-orbit torque; SOT) 기반 스위칭 소자에 관한 것이다.

#### 배경 기술

[0002] 스핀궤도토크(spin-orbit torque; SOT) 스위칭 기반 자기 랜덤 액세스 메모리(Magnetic Random Access Memory; MRAM)는 자기터널접합(magnetic tunnel junction; MTJ)을 핵심 소자로 가진다.

- [0003] 도 1은 통상적인 자기터널접합(magnetic tunnel junction; MTJ)을 나타낸다.
- [0004] 도 1을 참조하면, 자기터널접합(magnetic tunnel junction; MTJ, 10)은 스핀토크 발생층/자유층/터널배리어층/고정층으로 구성된다.
- [0005] 자유층(14)과 고정층(18)의 상대적인 자화방향에 따라 터널배리어층(16)을 통과하는 터널링 전류의 전기저항값이 달라진다. 자기터널접합(10)은 이러한 터널자기저항(tunneling magnetoresistance; TMR) 현상을 이용하여 정보를 저장한다.
- [0006] 자기터널접합(10)은 높은 터널자기저항(TMR) 비(ratio), 높은 기록안정성, 낮은 기록 전류, 및 고집적화를 구현하기 위해서, 수직자기이방성(perpendicular magnetic anisotropy; PMA) 특성을 가질 수 있다. 수직자기이방성은 자성층의 자화 방향이 자성층 면에 수직인 것을 의미한다.
- [0007] 자유층(14)에 인접한 스핀토크 발생층(12)에 면내 전류( $I_c$ )가 흐를 때, 스핀토크 발생층(12)은 스핀궤도토크(spin-orbit torque; SOT)에 의하여 스핀 홀 효과(spin Hall effect) 또는 라쉬바 효과(Rashba effect)를 이용하여 자유층의 스위칭을 유도할 수 있다. 스핀궤도토크는 스핀전달토크(spin-transfer torque; STT)의 기록(writing) 방식보다 고속, 저전류, 및 저 소모 전력으로 정보를 기록할 수 있다.
- [0008] 하지만, 스핀궤도토크(SOT) MRAM이 상용화되기 위하여, 더 낮은 전류 주입으로 자유층의 자화반전을 유도할 수 있는 스핀토크 발생층의 물질 및 구조가 요구된다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

- [0009] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 낮은 스위칭 임계 전류에서 기록 동작을 수행하는 SOT-MRAM을 제공하는 것이다. 자유층에 접촉하여 면내 전류를 제공하는 스핀토크 발생층이 텅스텐층/텅스텐 질화물층 다층 박막을 포함하는 경우, SOT-MRAM의 스핀궤도토크 효과가 증강되고 기록 동작을 위한 스위칭 임계 전류가 감소된다. 텅스텐 질화물층은 질소가 도핑된 텅스텐 또는 텅스텐 질화물을 포함할 수 있다.
- [0010] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 스핀홀 발생층으로 텅스텐층/텅스텐 질화물층 구조를 사용하였을 때 텅스텐 질화물층의 소정의 두께와 소정의 질소 농도에서 수직자기이방성이 발현되는 SOT-MRAM을 제공하는 것이다.
- [0011] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 저온과 고온 가혹 환경에서도 작동하며, 이후 상온으로 돌아온 후에도 정상 작동하는 SOT-MRAM을 제공하는 것이다.
- [0012] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 낮은 임계 전류를 가지면서 무자기장 스위칭 동작을 수행하는 SOT-MRAM을 제공하는 것이다.

### 과제의 해결 수단

- [0013] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 소자는, 고정된 자화 방향을 가지는 고정층; 스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층; 상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층; 및 면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층을 포함한다. 상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층의 자화 방향을 스위칭한다. 상기 고정층 및 상기 자유층은 수직 자기 이방성을 가지고, 상기 스핀 토크 발생층은 차례로 적층된 텅스텐층 및 텅스텐-질화물층을 포함한다. 상기 텅스텐-질화물층은 상기 자유층에 인접하게 배치된다.
- [0014] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 텅스텐-질화물층의 두께는 0.2 nm이고, 상기 텅스텐-질화물층에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)가 5% 내지 42 %일 수 있다.
- [0015] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 텅스텐-질화물층에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 29%이고, 상기 텅스텐-질화물층의 두께는 0.2 nm 내지 0.8 nm일 수 있다.
- [0016] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 텅스텐-질화물층에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 5%이고, 상기 텅스텐-질화물층의 두께는 0.2 nm 내지 3nm일 수 있다.
- [0017] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 텅스텐-질화물층은 결정질  $W_2N$  (111) 상을 포함하거나, 상기 텅스텐-질화물층은 결정질  $W_2N$  (111) 상 및 결정질  $WN$  (100) 상을 포함할 수 있다.

- [0018] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 텅스텐층은 상기 자유층과 수직으로 정렬될 수 있다.
- [0019] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 스핀 토크 발생층은 면내 자기 이방성을 가진 강자성층을 더 포함하고, 상기 텅스텐층은 상기 강자성층과 상기 텅스텐질화물층 사이에 배치될 수 있다.
- [0020] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 텅스텐-질화물층의 비저항은  $350 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  이상일 수 있다.
- [0021] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 소자는, 고정된 자화 방향을 가지는 고정층; 스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층; 상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층; 면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층; 및 상기 자유층과 상기 스핀 토크 발생층 사이에 배치된 텅스텐-질화물층을 포함한다. 상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층의 자화 방향을 스위칭한다. 상기 고정층 및 상기 자유층은 수직 자기 이방성을 가지고, 상기 스핀 토크 발생층은 텅스텐층을 포함하고, 상기 텅스텐-질화물층은 상기 자유층과 수직으로 정렬된다.
- [0022] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 소자는, 고정된 자화 방향을 가지는 고정층; 스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층; 상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층; 및 면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층을 포함한다. 상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층의 자화 방향을 스위칭한다. 상기 고정층 및 상기 자유층은 수직 자기 이방성을 가지고, 상기 스핀 토크 발생층은 텅스텐-질화물층을 포함하고, 상기 텅스텐-질화물층은 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 5%이고, 상기 텅스텐-질화물층은 상기 자유층에 인접하게 배치된다.

### 발명의 효과

- [0023] 본 발명의 실시예에 따르면, 텅스텐층/텅스텐 질화물층 다층 구조를 이용한 SOT 스위칭 소자는 기존의 단일 텅스텐층을 사용한 소자보다 낮은 기록 전류에서 작동할 수 있다.
- [0024] 본 발명의 실시예에 따르면, 자유층에 접촉하여 면내 전류를 제공하는 스핀토크 발생층이 텅스텐층/텅스텐 질화물층을 포함하는 경우, SOT-MRAM의 스핀궤도토크 효과가 증강되고, 기록 동작을 위한 스위칭 임계 전류가 감소된다.
- [0025] 본 발명의 실시예에 따르면, SOT-MRAM은 저온과 고온 가혹 환경에서도 작동하며, 이후 상온으로 돌아온 후에도 정상 작동한다.
- [0026] 본 발명의 실시예에 따르면, 면내 자화 강자성층/텅스텐층/텅스텐 질화물층 다층 구조는 낮은 임계 전류를 가지면서 무자기장 스위칭 동작을 수행하는 SOT-MRAM을 제공할 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

- [0027] 도 1은 통상적인 자기터널접합(magnetic tunnel junction; MTJ)을 나타낸다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 소자를 나타내는 단면도이다.
- 도 3a는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 소자를 나타내는 도면이다.
- 도 3b는 도 3a의 단면도이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 SOT 스위칭 거동을 측정하기 위한 자기 소자이다.
- 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른  $\text{N}_2$  가스의 유량비(Q)에 따른 텅스텐 질화물층의 질소의 원자퍼센트(nitrogen atomic percent)를 나타낸다.
- 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 텅스텐 질화물층의 질소의 원자퍼센트(nitrogen atomic percent, n)에 따른 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )를 나타낸다.
- 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 텅스텐 질화물층의 두께( $t_{W-N}$ )에 따른 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )를 나타낸다.
- 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 질소의 원자 퍼센트(n)에 따른 스핀홀 각도의 절대값( $|\xi_{DL}|$ )을 나타낸다.
- 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 텅스텐 질화물층의 두께( $t_{W-N}$ )에 따른 스핀홀 각도의 절대값( $|\xi_{DL}|$ )을 나타

낸다.

도 10는  $t_{W-N} = 0.2$  nm에서  $n$ 의 조건 별 전류에 따른 저항을 나타낸다.

도 11은  $t_{W-N} = 0.2$  nm에서  $n$ 의 조건 별 외부 자기장에 따른 스위칭 전류를 나타낸다.

도 12는  $t_{W-N} = 0.2$  nm에서  $n$ 에 따른 규격화된 스위칭 전류 및 수직 자기이방성을 나타낸다.

도 13은  $n = 29\%$ 에서  $n$ 에 따른 규격화된 스위칭 전류 및 수직 자기이방성을 나타낸다.

도 14는 W (5 nm)/ $W_{N_x}$  ( $t_{W-N} = 0.2$  nm)/CoFeB (0.9 nm)/MgO (1 nm)/Ta (2 nm) 구조에서  $n$ 의 함수로써 비저항(resistivity,  $\rho_{xx}$ )을 나타낸다.

도 15는 40nm 두께의 텅스텐 질화물층의 GIXRD(Grazing Incidence X-ray Diffraction) 결과를 보여준다.

도 16은  $n$ 의 함수로서 40 nm의 두께를 갖는 텅스텐 질화물층의 비저항을 도시한다.

도 17은  $n = 5\%$ 인 경우 평면 내 TEM 이미지(in-plane TEM images)와 선택된 영역 회절(selected area diffraction; SAD) 패턴을 보여준다.

도 18은  $n = 34\%$ 인 경우 평면 내 TEM 이미지(in-plane TEM images)와 선택된 영역 회절 (selected area diffraction; SAD) 패턴을 보여준다.

도 19는  $n = 42\%$ 인 경우 평면 내 TEM 이미지(in-plane TEM images)와 선택된 영역 회절 (selected area diffraction; SAD) 패턴을 보여준다.

도 20은 +200 Oe의 외부 자기장(Hex) 하에서 다양한 온도에서 면내 전류에 따른 저항을 나타낸다.

도 21은 다양한 온도에서 외부 자기장에 따른 스위칭 전류를 나타낸다.

도 22는 본 발명의 일 실시예에 따른 W (5 nm)/ $W_{N_x}$  ( $t_{W-N}$ ;  $n$ )/CoFeB (0.9 nm)/MgO (1 nm)/Ta (2 nm) 구조에서 질소의 함량( $n$ )과  $W_{N_x}$  층의 두께에 따른 실험 결과를 나타낸다.

도 23은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자기 소자를 나타내는 단면도이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0028] 비자성층(NM)/강자성층(FM) 구조에서, 강자성층(NM)의 자화는 면내 전류가 비자성층(NM)에 주입될 때 생성된 스핀 궤도 토크 (SOT)에 의해 반전될 수 있다. SOT-스위칭 기반 메모리 또는 로직 소자는 종래의 스핀-전달-토크-스위칭된 디바이스(spin-transfer-torque-switched devices)에 비해 에너지 소비 감소 및 고속 스위칭의 이점을 제공할 수 있다. 그러나 상용화를 위해서는 두 가지 주요 장애물을 해결해야 한다. 즉, 외부 자기장이 없는 상태에서 결정적 스위칭(deterministic switching)과 매우 낮은 스위칭 전류가 요구된다.
- [0029] 스핀 궤도 토크 (Spin-orbit torque; SOT)는 면내 전류를 주입함으로써 비자성층(NM)/강자성층(FM) 구조에서 강자성층의 자화를 반전시키는 데 사용될 수 있다. 스핀 궤도 토크는 자기 랜덤 액세스 메모리를 위한 새로운 메커니즘으로서 상당한 관심을 끌었다. 다양한 중금속 중에서,  $\beta$ -상( $\beta$ -phase) 텅스텐 막은 비교적 높은 SOT 효율을 나타낸다. 따라서,  $\beta$ -상( $\beta$ -phase) 텅스텐 막은 스핀 전류 발생층의 잠재적 재료(potential material)로 고려된다.
- [0030] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 우리는 W/ $W_{N_x}$ /CoFeB/MgO 홀바(Hall bar) 구조에서 향상된 SOT 및 더 낮은 SOT 유도 스위칭 전류를 보고한다. CoFeB층은 수직자화되었다. 상기  $W_{N_x}$ 층은 질소 반응성 환경(nitrogen reactive environment)에서 스퍼터링 증착된다. 상기  $W_{N_x}$ 층의 조성은 미세 구조 및 전기적 특성에 영향을 미친다. 측정된 SOT 효율은 0.54이며, 스위칭 전류는 40% 내지 42%의 질소 원자 퍼센트를 포함하는 샘플에서 상기  $W_{N_x}$ 층을 포함하지 않는 샘플보다 약 1/5로 감소한다.
- [0031] 본 발명의 일 실시예에 따르면, W/ $W_{N_x}$ /CoFeB/MgO 구조는 낮은 스위칭 전류를 제공할 수 있다. 면내 자화 강자성층이 텅스텐층 하부에 배치된 경우, 무자기장 스위칭이 구현될 수 있다.
- [0032] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 상세히 설명하기로 한다. 그러나, 본 발명은 여기서 설명되어지는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실

시에는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되어지는 것이다. 도면들에 있어서, 구성요소는 명확성을 기하기 위하여 과장되어진 것이다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호로 표시된 부분들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.

- [0033] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 소자를 나타내는 단면도이다.
- [0034] 도 2를 참조하면, 자기 소자(100)는, 고정된 자화 방향을 가지는 고정층(150); 스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층(130); 상기 고정층과 상기 고정층 사이에 개재되는 터널 절연층(140); 및 면내 전류( $I_c$ )가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층(120)을 포함한다. 상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층(130)의 자화 방향을 스위칭한다. 상기 고정층(150) 및 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 가진다. 상기 스핀 토크 발생층(120)은 차례로 적층된 텅스텐층(122) 및 텅스텐-질화물층(124)을 포함한다. 상기 텅스텐-질화물층(124)은 상기 자유층(130)에 인접하게 배치된다. 상기 자기 소자(100)는 SOT-MRAM일 수 있다. 상기 고정층(150), 상기 터널 절연층(140), 및 상기 자유층(130)은 자기 터널 접합을 구성할 수 있다.
- [0035] 고정층(150)은 고정된 자화 방향을 가지며, 수직자기 이방성을 가진 강자성층을 포함할 수 있다. 상기 고정층(150)은 단층 구조 또는 다층 구조일 수 있다.
- [0036] 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 가지며, SOT에 의하여 자화 방향을 스위칭할 수 있다. 상기 자유층(130)은 0.9 nm 두께의 CoFeB일 수 있다. 상기 자유층(130)은 단층 구조 또는 다층 구조로 변형될 수 있다.
- [0037] 터널 절연층(140)은 터널 전류가 흐르는 절연체로 1 nm 두께의 MgO일 수 있다. 상기 터널 절연층(140)은 상기 고정층(150)과 자유층(130) 사이에 배치될 수 있다.
- [0038] 스핀 토크 발생층(120)은 비자성 도전성 금속을 포함할 수 있다. 상기 스핀 토크 발생층(120)은 차례로 적층된 텅스텐층(122) 및 텅스텐-질화물층(124)을 포함할 수 있다. 상기 스핀 토크 발생층(120)에 면내 전류( $I_c$ )가 흐르면, 상기 스핀 토크 발생층(120)은 배치 평면에 수직한 방향(자유층 방향)으로 스핀 전류( $I_s$ )를 제공할 수 있다. 상기 스핀 전류( $I_s$ )는 스핀 홀 효과 (Spin Hall effect; SHE) 또는 스핀 홀 효과 (Spin Hall effect; SHE)에 의하여 SOT 생성할 수 있다. 상기 SOT는 상기 자유층(130)의 자화를 스위칭할 수 있다. 스핀 토크 발생층(120)의 양단은 접속 전극(120a, 120b)을 통하여 면내 전류를 인가하는 외부 회로에 연결될 수 있다.
- [0039] 상기 텅스텐-질화물층(124)의 두께와 조성에 따라 스위칭 전류가 변화될 수 있다. 또한, 상기 텅스텐-질화물층(124)의 두께와 조성에 따라, 상기 자유층의 자화 특성이 변경될 수 있다. 즉, 텅스텐-질화물층(124)의 두께와 조성은 소정의 범위 내에서 상기 자유층(130)에 수직 자화 이방성 특성을 제공할 수 있다. 상기 자유층(140)이 수직자기 이방성을 발현하는 경우, 텅스텐-질화물층(124)의 두께가 감소하고 질소의 농도가 증가함에 따라 스위칭 전류가 감소할 수 있다.
- [0040] 구체적으로, 상기 텅스텐-질화물층(124)의 두께는 0.2 nm이고, 상기 텅스텐-질화물층(124)에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)가 5% 내지 42 %일 수 있다. 이 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 유지하면서, 질소의 원자퍼센트(atomic percent)가 증가함에 따라 스위칭 전류가 감소할 수 있다. 한편, 질소의 원자퍼센트(atomic percent)가 42 %를 초과하는 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 상실하고 면내 자기 이방성을 가진다.
- [0041] 상기 텅스텐-질화물층(124)에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 29% 이고, 상기 텅스텐-질화물층(124)의 두께는 0.2 nm 내지 0.8 nm일 수 있다. 이 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.
- [0042] 상기 텅스텐-질화물층(124)에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 5% 이고, 상기 텅스텐-질화물층의 두께는 0.2 nm 내지 3nm일 수 있다. 이 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.
- [0043] 상기 텅스텐-질화물층(124)은 결정질  $W_2N$  (111) 상(phase)을 포함하거나, 상기 텅스텐-질화물층(124)은 결정질  $W_2N$  (111) 상 및 결정질 WN (100) 상을 포함할 수 있다. 이 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.
- [0044] 전극(160)은 상기 고정층(150) 상에 배치되어 외부 회로에 연결될 수 있다.
- [0045] 도 3a는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 소자를 나타내는 도면이다.

- [0046] 도 3b는 도 3a의 단면도이다.
- [0047] 도 3a 및 도 3b를 참조하면, 자기 소자(200)는, 스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층(130); 상기 자유층 하부에 배치된 터널 절연층(140); 및 면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층(120)을 포함한다. 상기 고정층 및 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 가지고, 상기 스핀 토크 발생층(120)은 차례로 적층된 텅스텐층(122) 및 텅스텐-질화물층(124)을 포함할 수 있다. 상기 텅스텐-질화물층(124)은 상기 자유층(130)에 인접하게 배치된다. 캐핑층(162)은 상기 터널 절연층(140) 상에 배치되어 상기 터널 절연층(140)을 보호할 수 있다. 상기 캐핑층(162)은 탄탈일 수 있다.
- [0048] SOT는 비자성층(NM) 또는 스핀 토크 발생층의 스핀 홀 효과 (Spin Hall effect; SHE) 또는 비자성층(NM)/강자성층(FM) 인터페이스의 Rashba-Edelstein 효과에 의해 발생할 수 있다. 비자성층(NM)/강자성층(FM) 구조에서, 비자성층(NM)/강자성층(FM) 인터페이스에 수직인 방향이 z 방향이고, x 방향을 따라 비자성층(NM)에 면내 전류(I<sub>c</sub>)가 주입되면, 이 두 가지 효과 때문에 y 방향의 스핀이 축적된다. 이 경우, SOT에 의해 발생된 토크는 다음과 같이 자화 방향( $\hat{m}$ )과 스핀 방향( $\hat{s}$ )의 두 가지 성분으로 표현 될 수 있다.
- $$\begin{aligned}\tau_{DL} &= \hat{m} \times (\hat{s} \times \hat{m}) \\ \tau_{FL} &= \hat{m} \times \hat{s}\end{aligned}$$
- [0049]
- [0050] 여기서  $\tau_{DL}$ 은 댐핑-라이크 (damping-like; DL)-SOT이다.  $\tau_{FL}$ 은 필드-라이크 (field-like; FL)-SOT이다. 어떤 SOT가 자화 반전(magnetization reversal)에 미치는 영향이 지배적인지는 논란의 여지가 있다. 그러나 본 발명의 과제는 SOT의 크기를 증가시켜 스위칭 전류를 줄이는 것이다.
- [0051] SOT의 효율로 정의될 수 있는 주입 면내 전류 밀도 (J<sub>c</sub>)에 대한 스핀 전류 밀도 (J<sub>s</sub>)의 비율을 스핀 홀 각도 (Spin Hall Angle; SHA,  $\xi_{SH} = J_s / J_c$ )라고 한다. 스핀 홀 각도( $\xi_{SH}$ )가 증가함에 따라, 자화를 역전시키기 위해서는 더 낮은 스위칭 전류가 필요하다. 중금속(heavy metal)의 경우, 스핀 홀 각도( $\xi_{SH}$ )는 큰 것으로 알려져 있으며, 스핀 홀 각도( $\xi_{SH}$ )는 텅스텐(W)에서 ~ 0.33, 탄탈륨(Ta)에서 ~ 0.15 및 백금(Pt)에서 ~ 0.10 수준이다.
- [0052] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 스위칭 전류를 줄이기 위해 텅스텐 질화물층(124)이 비자성층(NM)과 강자성층(FM) 사이에 삽입되고, 텅스텐 질화물층(124)의 두께와 조성을 제어하였다. 이에 따라, 스핀 홀 각도( $\xi_{SH}$ )가 0.54로 증가한다. 또한, 전류-유도 SOT 스위칭 거동이 텅스텐 질화물층(124)이 없는 값의 약 1/5로 감소한다. 매우 얇은 텅스텐 질화물층(124) (두께 0.2 nm)에서도 SOT 스위칭 거동은 질소 원자 (N) 함량에 따라 달라진다.
- [0053] 본 발명의 일 실시예에 따르면, Si (100) 웨이퍼 상에 300 nm 두께의 SiO<sub>2</sub> 층이 증착된다. 상기 SiO<sub>2</sub>층 상에 차례로 W/WN<sub>x</sub>/CoFeB/MgO/Ta 층들이 차례로 적층된다. 텅스텐층(122) 및 텅스텐-질화물층(124)은 DC 마그네트론 스퍼터링 시스템에 의하여 증착된다.
- [0054] DC 마그네트론 스퍼터링 시스템은  $5 \times 10^{-9}$  Torr의 초기 진공에서 금속 증착을 위해 사용되었다. 작업 압력 (working pressure)은 Ar 가스 분위기에서 1.3 mTorr이다. 상기 텅스텐 질화물층(124)은 반응성 스퍼터링에 의해 증착되었다. 주입 된 Ar 및 N<sub>2</sub> 가스의 비율은 일정한 작동 압력에서 제어되었다. DC 전력 밀도는 2.5 W/cm<sup>2</sup>로 고정되었다.
- [0055] RF 마그네트론 스퍼터링 시스템은  $5 \times 10^{-9}$  Torr의 초기 진공 및 6 mTorr의 작동 압력에서 터널 절연층(140)의 증착에 사용되었다. 상기 터널 절연층(130)은 MgO일 수 있다. RF 전력 밀도는 1.6 W/cm<sup>2</sup>로 고정되었다.
- [0056] 자기 소자의 적층 구조는 Si / SiO<sub>2</sub> / W (5 nm) / WN<sub>x</sub> (t<sub>W-N</sub>) / CoFeB (0.9 nm) / MgO (1 nm) / Ta (2 nm)이다. 텅스텐 질화물층(124)의 두께(t<sub>W-N</sub>)는 0 내지 3 nm로 변하고, 텅스텐 질화물층(124)의 조성은 Q를 0 내지 50 %로 변화시켜 조정하였다. 여기서, Q는 스퍼터링 동안 총 가스 유량([Ar+N<sub>2</sub>])에 대한 N<sub>2</sub> 가스 유량([N<sub>2</sub>])의 비 (Q=[N<sub>2</sub>]/[Ar+N<sub>2</sub>])이다.
- [0057] 자유층(130)은 CoFeB (0.9 nm) 이다. 상기 캐핑층(162)의 증착 후, 모든 샘플은 10<sup>-6</sup> Torr에서 1 시간 동안 섭

씨 300도의 퍼니스(furnace)에서 어닐링되었다. 상기 캐핑층(162)은 보호층으로 동작한다.

[0058] 어닐링 후, 자기 특성은 진동 샘플 자력계 (vibrating sample magnetometer; VSM)를 사용하여 실온에서 측정되었다. 전기적 특성을 측정하기 위해, 폭 5  $\mu\text{m}$  및 길이 35  $\mu\text{m}$ 의 홀 바(Hall bar) 구조를 갖는 소자는 포토 리소그래피를 사용하여 제조된다. 고조파 측정(harmonics measurement)을 사용하여 SOT 효율이 측정되었다. 측정하는 동안, 주입된 교류 전류 (AC) 및 주파수(f)는 각각 1mA 및 13.7 Hz로 각각 고정되었다.

[0059] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 SOT 스위칭 거동을 측정하기 위한 자기 소자이다.

[0060] 도 4를 참조하면, SOT 스위칭 거동을 결정하기 위해, 직경 4  $\mu\text{m}$ 의 도트 형 패턴은 홀 바 구조에서 캐핑층(162), 터널 절연층(140), 그리고 자유층(130)을 차례로 이방성 식각하여 형성된다. 스위칭 특성은 프로브 스테이션 (probe station)을 사용하여 측정된다. 10  $\mu\text{s}$ 의 펄스 폭을 갖는 펄스 전류( $I_{\text{pulse}}$ )가 소자에 x 방향으로 인가되었고, 결정성 스위칭(deterministic switching)을 위해 외부 자기장 ( $H_{\text{ex}}$ )이 x 축 방향으로 인가되었다. 자기 소자(200a)는 홀바 구조에서 도트형태의 자유층(130), 터널 절연층(140), 및 캐핑층(162)을 가질 수 있다.

[0061] 텅스텐 질화물층(124)의 저항은 4 점 프로브 (four-point probe)를 사용하여 측정되었다. 텅스텐 질화물층(124)의 조성을 확인하기 위해 러더포드 후방 산란 (Rutherford backscattering; RBS) 분석을 수행하였다. 상기 텅스텐 질화물층(124)의 미세 구조는 0.5도의 고정각에서 그레이징 입사 X-선 회절 장치(grazing incidence X-ray diffraction device)를 사용하여 분석되었다. 상기 텅스텐 질화물층(124)의 미세 구조는 투과 전자 현미경을 사용하여 관측되었다.

[0063] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른  $\text{N}_2$  가스의 유량비(Q)에 따른 텅스텐 질화물층의 질소의 원자퍼센트 (nitrogen atomic percent)를 나타낸다.

[0064] 도 5를 참조하면, Q는 스퍼터링 동안 총 가스 유량( $[\text{Ar}+\text{N}_2]$ )에 대한  $\text{N}_2$  가스 유량( $[\text{N}_2]$ )의 비( $Q=[\text{N}_2]/[\text{Ar}+\text{N}_2]$ )이다. 텅스텐 질화물층(124)의 질소 원자의 원자퍼센트(nitrogen atomic percent)는 러더포드 후방 산란 장치에 의하여 측정되었다.

[0065] 텅스텐 질화물층(124)의 질소 원자 함량을 분석했다.  $\text{N}_2$  가스 유량의 비(Q)는 0, 4, 8, 15, 20, 30, 40, 그리고 50% 이다. 러더포드 후방 산란(RBS)을 사용하여 검사한 40 nm 두께의 텅스텐 질화물 박막의 Q의 함수로서 질소의 원자 퍼센트(n)를 보여준다.  $Q = 4\%$ 에서 질소의 원자 퍼센트(n)는 5%로 매우 작다.  $Q = 8\%$ 에서, N의 원자 퍼센트(n)는 29%로 급격히 증가한다.  $Q = 20\%$ 에서, 질소의 원자 퍼센트(n)는 33%이다. 그러나  $Q = 20\%$ 와  $Q = 30\%$  사이에서, 질소의 원자 퍼센트(n)은 다시 40%로 급격히 증가한다.  $Q = 40\%$ 에서, 질소의 원자 퍼센트(n)는 42% 이다.

[0066] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 텅스텐 질화물층의 질소의 원자퍼센트(nitrogen atomic percent, n)에 따른 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )를 나타낸다.

[0067] 도 6을 참조하면, 자기 소자(200)는 W(5 nm)/WN<sub>x</sub>(0.2 nm)/CoFeB(0.9 nm)/MgO(1 nm)/Ta(2 nm) 구조를 가진다. 상기 텅스텐 질화물층(124)의 질소의 원자퍼센트(nitrogen atomic percent, n)에 따른 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )가 분석되었다. 텅스텐 질화물층(124)의 질소의 원자퍼센트(nitrogen atomic percent, n)는 0 ~ 42% 범위에서 변경되었다. 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )는 n이 증가함에 따라 감소한다. 텅스텐 질화물층(124)의 두께( $t_{\text{WN}}$ )가 0.2 nm로 고정되었을 때, 수직자기이방성(PMA)는 질소의 원자퍼센트(n)가 0% 내지 최대 42% 범위 내에서 발생했다. 하지만, 질소의 원자퍼센트(n)가 42%를 초과하면, PMA는 발생하지 않았다. 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )는  $n = 0\%$ 에서 2.87 Merg/cm<sup>3</sup>이고,  $n = 42\%$ 에서 1.81 Merg/cm<sup>3</sup>로 감소했다. 따라서, n이 증가함에 따라, PMA의 강도는 감소하였다. 유효 이방성 에너지 ( $K_{u,eff}$ )는 평면내(in-plane) 및 평면외(out-of-plane) M-H 루프의 면적을 사용하여 계산되었다.

[0068] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 텅스텐 질화물층의 두께( $t_{\text{WN}}$ )에 따른 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )를 나타낸다.

[0069] 도 7을 참조하면, 자기 소자(200)는 W (5 nm)/WN<sub>x</sub> ( $t_{\text{WN}}$ )/CoFeB (0.9 nm)/MgO (1 nm)/Ta (2 nm) 구조를 가진다.

우리는 텅스텐 질화물층(124)의 두께( $t_{W-N}$ )를 0.2 nm ~ 3 nm 범위에서 변경하였다.

[0070] 텅스텐 질화물층(124)의 두께( $t_{W-N}$ )가  $t_{W-N} \geq 0.4$  nm의 경우, 수직자기이방성(PMA)은  $n \leq 29$  %에 대해서만 발현되었다.  $n = 29$  %에서, 텅스텐 질화물층(124)의 두께( $t_{W-N}$ )가 1 nm보다 클 때, 수직자기이방성(PMA)는 사라졌다. 텅스텐 질화물층(124)의 두께( $t_{W-N}$ )가 1.0 nm를 초과하면,  $n$ 에 상관없이 수직자기이방성(PMA)이 사라졌다.

[0071] 수직자기이방성(PMA)은 고밀도 자기 랜덤 액세스 메모리(MRAM)에 필수적이므로, 우리는 수직자기이방성(PMA)이 나타나는 범위에서, 텅스텐 질화물층(124)의 두께 및 조성을 가진 구조에서 SOT를 조사했다. 자기 수송 특성(magneto-transport characterization)을 조사하기 위해, 수직자기이방성(PMA)를 갖는 자기 소자는 포토 리소 그래피를 사용하여 폭 5  $\mu$ m 및 길이 35  $\mu$ m의 홀 바 구조로 제조되었다.

[0072] 우리는 PMA 자기 소자에서 SOT를 평가하는 데 널리 사용되는 고조파 방법으로 자기 수송 특성을 측정했다. AC 전류가 자기 소자에 주입되고, 외부 자기장( $H_{ex}$ ) 하에서 자화가 평형 상태에 있을 때, 제1 고조파 성분은 다음과 같이 극각( $\theta$ ) 및 방위각( $\phi$ )를 사용하여 표현된다.

[0073] [수학식1]

$$R_{xy}^{\omega} = R_{AHE} \cos \theta + R_{PHE} \sin^2 \theta \sin 2\phi$$

[0074]

[0075] 여기서  $R_{AHE}$ 는 비정상 홀 저항(anomalous Hall resistance)을 나타내고,  $R_{PHE}$ 는 평면 홀 저항(planar Hall resistance)을 나타낸다. 열전 전압(thermoelectric voltage)과 관련된 2차 고조파 성분(second harmonic component;  $R_{xy}^{2\omega}$ )은 다음과 같다.

[0076] [수학식2]

$$R_{xy}^{2\omega} = [R_{AHE} - 2R_{PHE} \cos \theta \sin 2\phi] \frac{d \cos \theta}{d B_I} \cdot \mathbf{B}_I + R_{PHE} \sin^2 \theta \frac{d \sin 2\phi}{d B_I} \cdot \mathbf{B}_I + I_0 \alpha \nabla T \sin \theta \cos \phi$$

[0077]

[0078] 여기서  $I_0$ 은 AC 전류의 진폭을 나타내고,  $\alpha$ 는 비정상적인 Nernst 효과 계수를 나타내고,  $\nabla T$ 는 줄 열(Joule heating)에 의한 열 기여도(thermal contribution)를 나타냅니다.

[0079]  $B_I = B_{DL} + B_{FL} + B_{0e}$ 는 전류 유도 필드의 합(sum of the current-induced field)을 나타냅니다. 여기서,  $B_{DL}$ 은 댐핑-라이크 필드(damping-like field),  $B_{FL}$ 은 필드-라이크 필드(field-like field),  $B_{0e}$ 는 Oersted 필드이다.  $B_{DL}$  및  $B_{FL}$ 은 각각 DL-SOT 및 FL-SOT에 의해 생성된 유효 자기장이다. 자화는 유효 자기장의 방향으로 진동한다.

[0080] 면내 자화 상태 ( $\theta = \pi/2$ )에서, DL-SOT 및 FL-SOT는 자화가 평면에서 각각 수직 및 수평으로 진동하도록 유발한다. 수학식 2는 다음과 같이 다시 작성할 수 있다.

[0081] [수학식 3]

$$R_{xy}^{2\omega} = \left[ \left( R_{AHE} \frac{B_{DL}}{B_{ext}} + I_0 \alpha \nabla T \right) \cos \phi + 2R_{PHE} (2 \cos^3 \phi - \cos \phi) \frac{B_{FL} + B_{0e}}{B_{ext}} \right].$$

[0082]

[0083] 이방성 자기장( $H_k$ )보다 충분히 큰 외부 자기장 ( $B_{ext}$ )이 인가되면, 자화가 필름의 평면 내에 있는 경우, 열 구배(thermal gradient)로 인한 저항의 기여는 일정하다고 가정 할 수 있다. 평면 홀 효과(planar Hall effect)의 2차항(second term)은  $\phi = 45^\circ$  일 때 소멸한다. 이러한 가정 하에서, 수학식 3 은 DL-SOT로 인한 유효 필드인,  $B_{DL}$ 을 계산하기 위해 근사화될 수 있다. 이어서  $B_{FL} + B_{0e}$ 가 획득될 수 있다.

[0084] [수학식 4]

$$B_{DL} = \left[ R_{DL}^{2W} / \cos \varphi \frac{dR_{xy}^W}{d\theta_B} \right] B_{ext}, \quad B_{FL} + B_{Oe} = \left[ R_{FL}^{2W} / \cos \varphi \frac{dR_{xy}^W}{d\varphi_B} \right] B_{ext},$$

[0085]

[0086] 그런 다음, 우리는 SOT 효율을 계산할 수 있다. 스핀홀 각도(Spin Hall Angle,  $\xi$ )는 다음과 같다.

[0087] [수학식 5]

$$\xi_{DL(FL)} = \frac{2e}{h} M_S t_{FM} \frac{B_{DL(FL)}}{J_e},$$

[0088]

[0089] 여기서  $e$ 는 전자 전하를 나타내고,  $h$ 는 플랑크 상수를 나타내고,  $M_S$ 는 자유층의 포화 자화를 나타내고,  $t_{FM}$ 은 자유층의 두께를 나타내고,  $J_e$ 는 전류 밀도를 나타낸다.

[0090] 스핀홀 각도( $\xi_{DL}$ )를 얻기 위해, 우리는 외부 자기장( $B_{ext}$ )의 방향을 변화시켜 고조파 측정을 수행했다. 우리는 자기 소자의 이방성 자기장( $H_K$ ) 값의 두 배보다 큰 약 13-18 kOe의 외부 자기장( $B_{ext}$ )을 인가한다.

[0091] 텅스텐의 FL-SOT 효율이 DL-SOT 효율보다 약 열 배 작은 것으로 알려져 있기 때문에, 본 발명에서는 DL-SOT에 의한 스핀홀 각도( $\xi_{DL}$ )만을 고려한다.

[0092] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 질소의 원자 퍼센트( $n$ )에 따른 스핀홀 각도의 절대값( $|\xi_{DL}|$ )을 나타낸다.

[0093] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 텅스텐 질화물층의 두께( $t_{W-N}$ )에 따른 스핀홀 각도의 절대값( $|\xi_{DL}|$ )을 나타낸다.

[0094] 도 8 및 도 9를 참조하면,  $|\xi_{DL}|$ 은  $n$ 이 증가함에 따라 점진적으로 증가하여,  $n = 40\%$ 에서 최대 0.54에 도달한다. 이 스핀홀 각도는 텅스텐 단독의 것보다 훨씬 크다.  $n > 40\%$ 의 경우,  $|\xi_{DL}|$ 은 약간 줄어든다.

[0095] W (5 nm)/CoFeB/MgO 구조 ( $n = 0\%$ ,  $t_{W-N} = 0$  nm)에서, 5 nm 두께의 W 박막은  $\beta$ -상 W일 것으로 예상되며, 스핀홀 각도의 절대값( $|\xi_{DL}|$ )은  $0.32 \pm 0.02$ 이다.

[0096] W (5 nm)/WN<sub>x</sub> ( $t_{W-N}$ )/CoFeB (0.9 nm)/MgO (1 nm)/Ta (2 nm) 구조에서,  $|\xi_{DL}|$ 는  $n = 29\%$ 의 조건에서  $t_{W-N}$ 에 따라 변화한다.  $|\xi_{DL}|$ 는  $t_{W-N} = 0.2$  nm에서 텅스텐 질화물층(124)이 없는 것보다 약간 더 높다. 하지만, 0.2 nm보다 큰 텅스텐 질화물층(124)의 두께에서,  $t_{W-N}$ 이 증가함에 따라,  $|\xi_{DL}|$ 는 점차 감소한다. 이 결과는 매우 얇은 텅스텐 질화물층(124)이 SOT 특성을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

[0097] 그러나,  $t_{W-N}$ 이 0.2 nm를 초과 할 때, 벌크 텅스텐 질화물의 특성이 점차적으로 나타나서, SOT 효율이 텅스텐 질화물층(124)이 없는 것보다 낮다. 그럼에도 불구하고,  $t_{W-N}$ 이 0.2 nm를 초과 할 때, 스위칭을 위한 임계 전류는 감소한다.

[0098] 도 10는  $t_{W-N} = 0.2$  nm에서  $n$ 의 조건 별 전류에 따른 저항을 나타낸다.

[0099] 도 10을 참조하면, 외부 자기장( $H_{ex} = +200$  Oe)이 자기 소자(200a)에 x축 방향으로 인가된 경우, 자유층(130)의 결정적인 스위칭은  $n$ 에 관계없이 발생한다.

[0100] 스위칭 전류( $I_{SW}$ )는  $n$ 이 증가함에 따라 감소하고, 스위칭 방향은  $n$ 이 변화함에 따라 시계 반대 방향으로 일정하게 유지된다.

[0101] 텅스텐 질화물층(124)이 없는 W/CoFeB/MgO 구조( $n = 0\%$ )에서 스위칭 전류( $I_{SW}$ )는  $8.58 \pm 0.08$  mA이고, 스위칭 전류 밀도( $J_{SW}$ )는  $33.0$  MA/cm<sup>2</sup>이다. 스위칭 전류( $I_{SW}$ )는  $n$ 이 증가함에 따라 점차 감소하며,  $n = 40\%$ 에서 1.49

$\pm 0.16$  mA 이고, 텅스텐 질화물층(124)이 없는 구조 보다 5 배 더 작다.

[0102] 도 11은  $t_{W-N} = 0.2$  nm에서 n의 조건 별 외부 자기장에 따른 스위칭 전류를 나타낸다.

[0103] 도 11을 참조하면, 스위칭 동작의 외부 자기장 의존성이 표시된다. 모든 질소 함량(n)에서, 외부 자기장( $H_{ex}$ )이 증가함에 따라, 스위칭 전류 ( $I_{SW}$ )는 감소하는 경향이 있다. 외부 자기장( $H_{ex}$ ) 방향이 +x에서 -x로 변경되면, 스위칭 방향이 시계 방향으로 변경되지만, 스위칭 전류( $I_{SW}$ )는 거의 동일하게 유지된다. 이러한 결과는 양호한 전류-유도 SOT 스위칭 동작이 발생함을 확인시킨다. 또한, 텅스텐 질화물층(124)이 SOT-MRAM에 적용되는 경우, 전력 소비를 감소시킬 수 있다.

[0104] 다음으로, 스위칭 전류( $I_{SW}$ )의 감소가  $|\xi_{DL}|$  상승에 기인할 수 있다. SOT 로 인한 스위칭 전류( $I_{SW}^{SO}$ )는 다음과 같이 표현된다.

[0105] [수학식 6]

$$I_{SW}^{SO} = \frac{2e}{h\xi_{SH}} M_S t_{FM} A_{NM} \left( \frac{H_{K,eff}}{2} - \frac{H_{ex}}{\sqrt{2}} \right),$$

[0106]

[0107] 여기서  $A_{NM}$ 은 전류가 주입되는 비자성층(또는 스핀홀 발생층)의 두께를 나타내고,  $H_{K,eff}$ 는 이방성 자기장을 나타낸다.  $t_{FM}$  은 자유층의 두께이다.  $M_S$ 는 자유층의 포화 자화이다.  $H_{ex}$ 는 외부 자기장이다.

[0108] 수학식6에서,  $H_{ex}$ 는  $H_{K,eff}$ 에 비해 작고,  $M_S H_{K,eff}/2$ 가 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )와 같기 때문에 무시할 만하다. 따라서  $t_{FM}$  그리고  $A_{NM}$ 이 고정되면, SOT로 인한 스위칭 전류( $I_{SW}^{SO}$ )는 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )에 정비례한다.

[0109] 텅스텐 질화물층(124)의 삽입이  $K_{u,eff}$ 의 열화(degradation)에 영향을 미치기 때문에, 우리는 스위칭 전류( $I_{SW}$ )가 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )의 감소에 의해 영향을 받을 가능성을 조사한다.

[0110] 도 12는  $t_{W-N} = 0.2$  nm에서 n에 따른 규격화된 스위칭 전류 및 수직 자기이방성을 나타낸다.

[0111] 도 13은  $n = 29\%$ 에서 n에 따른 규격화된 스위칭 전류 및 수직 자기이방성을 나타낸다.

[0112] 도 12 및 13를 참조하면, 각각 n 및  $t_{W-N}$ 의 함수로서  $I_{SW}$  및  $K_{u,eff}$ 의 정규화된 값을 보여준다.

[0113] 도 12를 참조하면, 스위칭 전류( $I_{SW}$ )와 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )가 n이 증가함에 따라 감소하지만, 그 감소율은 상당히 다르다는 것을 보여준다.  $n = 34\%$ 에서 시작하여, 스위칭 전류( $I_{SW}$ )는 유효 이방성 에너지( $K_{u,eff}$ )보다 더 빠르게 감소하기 시작하며, 이 차이는 n이 증가함에 따라 커진다.

[0114] 다시, 도 9를 참조하면,  $|\xi_{DL}|$ 은 텅스텐 질화물층(124)의 두께( $t_{W-N}$ )가 증가함에 따라 감소한다. 그럼에도 불구하고, 도 13을 참조하면, 스위칭 전류 ( $I_{SW}$ )가 텅스텐 질화물층(124)의 두께( $t_{W-N}$ )가 증가함에 따라 감소한다.

[0115] 그러나,  $t_{W-N}$ 이 변함에 따라  $I_{SW}$ 의 감소는 n을 증가시키는 경우와 달리,  $K_{u,eff}$ 의 비율과 거의 동일한 경향이 있다. 따라서 SOT 효율 향상이 아닌  $K_{u,eff}$ 의 변화로 인해,  $t_{W-N}$ 이 증가함에 따라  $I_{SW}$ 는 감소한다. 이러한 결과는 n이 증가함에 따른  $I_{SW}$ 의 감소가 향상된 SOT 효율 및  $K_{u,eff}$ 의 감소에 의해 크게 영향을 받는 것을 나타낸다. 매우 얇은 텅스텐 질화물층(124)의 삽입은 SOT 위칭 효율을 향상시킨다. 따라서, 질소의 원자 퍼센트(n)가 약 40% 인 얇은 텅스텐 질화물층(124)은 SOT-MRAM의 전력 소비 측면에서 상당한 이점을 제공한다.

[0116] FM/NM 인터페이스에서 삽입된 텅스텐 질화물층(124)의 구성이 SOT 효율에 어떤 영향을 미치는지 논의한다. 향상된 효율의 가능한 원인 중 하나는 불순물이 존재하기 때문에 전기 저항의 변화이다. 스핀홀효과(SHE)의 가능한 원인인 진성 및 측면-점프 산란(Intrinsic and side-jump scattering)은 재료의 비저항 ( $\rho_{xx}$ )과 관련이 있다.

[0117] 재료의 불순물은 산란과  $\rho_{xx}$  값을 증가시켜  $\xi_{SH}$ 를 향상시킬 수 있다. 우리는 Hall bar 소자에서  $\rho_{xx}$ 를 측정하여,  $|\xi_{DL}|$ 의 향상이 W-N층에서 n이 증가함에 따라  $\rho_{xx}$ 가 증가했기 때문인 것을 증명한다.

- [0118] 도 14는 W (5 nm)/WN<sub>x</sub> (t<sub>W-N</sub> = 0.2 nm)/CoFeB (0.9 nm)/MgO (1 nm)/Ta (2 nm) 구조에서 n의 함수로써 비저항(resistivity, ρ<sub>xx</sub>)을 나타낸다.
- [0119] 도 14를 참조하면, ρ<sub>xx</sub>를 t<sub>W-N</sub> = 0.2 nm에서 n의 함수로 나타낸다. ρ<sub>xx</sub> 값은 대부분의 n 값에서 거의 일정하지만, n = 40%에서 빠르게 증가한다. n = 40%에서, |ξ<sub>DL</sub>|는 최대이다. 이 결과는 ξ<sub>DL</sub>에 대한 저항의 영향을 무시할 수 없지만, ξ<sub>DL</sub>이 W/WN<sub>x</sub>/CoFeB/MgO 구조의 저항에 정확히 비례하지는 않았음을 보인다. 따라서 저항 외에 다른 요소들이 SOT 효율에 영향을 미치는 것으로 해석된다.
- [0120] 또 다른 가능한 원인은 결정성(crystallinity) 또는 상(phase)과 같은 텅스텐 질화물층(124)의 미세 구조의 영향이다. 이 가정을 확인하기 위해, n이 증가함에 따라 W 필름의 미세 구조 변화를 관찰했다.
- [0121] 그러나 0.2nm 두께의 초박막 텅스텐 질화물층의 미세 구조 변화를 분석하기가 매우 어렵다. 따라서, 약 40nm 두께의 텅스텐 질화물 필름을 분석하여 이러한 변화가 초박층(ultrathin layer)에서도 발생한다고 가정했다.
- [0122] 도 15는 40nm 두께의 텅스텐 질화물층의 GIXRD(Grazing Incidence X-ray Diffraction) 결과를 보여준다.
- [0123] 도 15를 참조하면, 스퍼터링 동안 N<sub>2</sub> 가스가 주입되지 않으면 (n = 0%), W 피크가 2θ = 40도 근처에서 분명하게 나타난다. 여기에서, 우리가 SOT 측정에 사용한 5 nm 두께의 W 필름은 β-W 상(phase)이고, 40nm 두께의 WN<sub>x</sub> 필름은 α-W 상(phase)이다. 40nm 두께의 WN<sub>x</sub> 필름에서, n이 5%로 증가한 후, W(110) 피크는 급격히 감소하고, 선폭은 넓어지고, 피크는 왼쪽으로 이동하여 W<sub>2</sub>N 피크에 접근한다. 이 결과는 n이 증가함에 따라 W<sub>2</sub>N이 형성되기 시작하고 W의 결정성이 감소함을 나타낸다.
- [0124] 다음으로, n이 더 증가함에 따라, 피크의 선폭은 더 넓어지고, 피크는 점차 왼쪽으로 이동하여 n = 34%에서 W<sub>2</sub>N (111) 피크와 거의 일치한다. 이는 n이 30%를 초과하면 W 상이 거의 사라지고, 나노 결정질 W<sub>2</sub>N 박막만 존재함을 나타낸다.
- [0125] n이 40%를 초과하면 피크는 왼쪽으로 더 이동하여 WN (100) 피크에 접근하고, n = 42%에서 피크가 더 선명해져 결정성이 향상됨을 나타낸다. 이 결과는 W-N 바이너리 위상 다이어그램(binary phase diagram)과 일치한다.
- [0126] 질소 원자의 함량이 증가함에 따라, 단계는 W → W + W<sub>2</sub>N → W<sub>2</sub>N → W<sub>2</sub>N + WN의 순서로 나타난다. 여기서 W<sub>2</sub>N은 대략 n = 34%에서 나타난다. 위상 다이어그램은 실험 결과와 거의 일치한다.
- [0127] 다음으로 텅스텐 질화물 필름의 비저항을 측정하고 이전 연구에서보고 된 것과 비교했다.
- [0128] 도 16은 n의 함수로서 40 nm의 두께를 갖는 텅스텐 질화물층의 비저항을 도시한다.
- [0129] 도 16을 참조하면, 점선은 XRD 분석에 의해 예측된 텅스텐 질화물 상변화(phase change)의 경계를 보여준다. 텅스텐 질화물층의 비저항은 n = 29%가 될 때까지, 200-260 μΩ·cm로 유지되지만, n > 30%에서 350 μΩ·cm 이상으로 빠르게 증가한다.
- [0130] n이 40%를 초과하면, 비저항이 다시 500 μΩ·cm 이상으로 급격히 증가한다. 스퍼터링된 텅스텐 질화물층의 저항은 압력, 스퍼터링 전력 및 온도와 같은 증착 조건에 크게 의존한다. 그러나 일반적으로 총 가스 유량([Ar+N<sub>2</sub>])에 대한 N<sub>2</sub> 가스 유량([N<sub>2</sub>])의 비(Q)가 증가함에 따라, 비저항이 증가한다. 또한, 결정성이 증가함에 따라 비저항이 감소한다. 이것은 우리의 실험 결과와 일치하다.
- [0131] 실험 결과는 n = 40%까지 비저항(resistivity)이 증가한 다음, n = 42%에서 결정성이 증가함에 따라 비저항이 약간 감소함을 보여준다.
- [0132] 피크 강도가 너무 작아 XRD를 사용하여 위상을 안정적으로 색인화 할 수 없었기 때문에, XRD 분석 이외에도, 우리는 나노 결정인 것처럼 보이기 때문에 TEM을 사용하여 40 nm 두께의 텅스텐 질화물층을 분석한다.
- [0133] 도 17은 n = 5%인 경우 평면 내 TEM 이미지(in-plane TEM images)와 선택된 영역 회절(selected area diffraction; SAD) 패턴을 보여준다.
- [0134] 도 17을 참조하면, n = 5% 일 때, 다결정 그레인(polycrystalline grains)이 나노 결정질 매트릭스(nanocrystalline matrix)에 나타난다.

- [0135]  $n = 5\%$  일 때, SAD 패턴은 W와  $W_2N$ 이 공존한다는 것을 보여준다. 내측 점선 원은  $W_2N$  (111) 그레인을 나타낸다.  $W_2N$  (111) 그레인은 고속 푸리에 변환 이미지에서  $W_2N$  (111)으로 색인된(indexed) 링 패턴에 마스크를 적용함으로써 식별된다.
- [0136] 다결정 그레인(polycrystalline grains)은  $W_2N$ 이고, 질소가 주입될 때 W 박막이 대부분 나노 결정(nanocrystalline)이 됨을 나타낸다.
- [0137] 도 18은  $n = 34\%$ 인 경우 평면 내 TEM 이미지(in-plane TEM images)와 선택된 영역 회절(selected area diffraction; SAD) 패턴을 보여준다.
- [0138] 도 18을 참조하면, 명확한 링 패턴을 갖는 TEM 및 SAD 이미지는 나노 결정성  $W_2N(111)$ 만이  $n = 34\%$ 에서 존재함을 나타낸다.
- [0139] 도 19는  $n = 42\%$ 인 경우 평면 내 TEM 이미지(in-plane TEM images)와 선택된 영역 회절(selected area diffraction; SAD) 패턴을 보여준다.
- [0140] 도 19를 참조하면,  $n = 42\%$  일 때 나노 결정질 매트릭스에 다른 그레인이 형성된다. SAD 패턴에  $WN(100)$ 이 나타난다. 따라서 XRD와 TEM 결과는 일치하며  $WN_x$  박막의 위상이  $n$ 에 의존한다는 것을 확인한다.
- [0141] 개선된 SOT 효과의 원인을 찾기 위해, 우리는 텅스텐 질화물층의 삽입에 대한  $n$ 의 영향을 조사했다.
- [0142] 도 14 및 도 16을 참조하면, 자기 소자의 비저항( $\rho_{xx}$ )값과 40 nm 두께의 텅스텐 질화물 필름의 비저항은 약간 다르다. 그러나, 자기 소자의 비저항( $\rho_{xx}$ )값과 40 nm 두께의 텅스텐 질화물 필름의 비저항은 모두  $n = 40\%$ 에서 최대값을 보인다.
- [0143] 도 14의 자기 소자에서, 0.2 nm 두께의 텅스텐 질화물층은 다른 필름의 총 두께에 비해 매우 얇다. 따라서 비저항에 대한 0.2 nm 두께의 텅스텐 질화물층의 영향은 지배적이지 않을 수 있다.
- [0144] 또한, 미세 구조 분석을 초박막에 완전한 정확도로 적용하기는 어렵지만,  $n$ 의 값은 텅스텐 질화물층의 미세 구조에 영향을 미칠 것으로 예상된다.
- [0145] 상(phase) 및 결정도(crystallinity)의 변화와 같은 미세 구조 변화는 비저항의 변화를 수반한다. 따라서, 비저항과 미세 구조는 별도로 고려되기 어렵다.
- [0146] 텅스텐 질화물층의 질소 함량을 조정하면,  $|I_{DL}|$ 을 증가시키고,  $I_{SW}$ 를 감소시킨다. 그러나, 텅스텐 질화물층에 의존하는 향상된 SOT 스위칭 동작의 물리적 기원에 대한 추가 연구가 필요하다.
- [0147] MRAM 애플리케이션에 대한  $W/WN_x$  ( $t_{W-N} = 0.4$  nm)/CoFeB/MgO 구조의 적합성을 확인하기 위해 저온 및 고온에서의 자기 소자 온도 안정성에 대해 논의한다.
- [0148] 스위칭 전류의 온도 의존성을 결정하기 위해, 다음 순서로 온도를 변화시키는  $t_{W-N} = 0.4$  nm 및  $n = 29\%$ 를 가진 소자에서 시험을 수행하였다.
- [0149] (1) 실온(RT)  $\rightarrow$  (2)  $-100^\circ\text{C}$   $\rightarrow$  (3) RT  $\rightarrow$  (4)  $+100^\circ\text{C}$  (5) RT.
- [0150] 도 20은  $+200$  Oe의 외부 자기장(Hex) 하에서 다양한 온도에서 면내 전류에 따른 저항을 나타낸다.
- [0151] 도 20을 참조하면, SOT에 의한 스위칭은 모든 온도에서 반시계 방향으로 잘 이루어진다.
- [0152] 도 21은 다양한 온도에서 외부 자기장에 따른 스위칭 전류를 나타낸다.
- [0153] 도 21을 참조하면, 온도가 (1) 실온(RT)에서 (2)  $-100^\circ\text{C}$ 로 감소하면, 스위칭 전류가 증가한다. 온도가 (3) 실온(RT)에서  $+$  (4)  $100^\circ\text{C}$ 로 증가하면 스위칭 전류가 감소한다. SOT-유도 스위칭 전류는 열 변동에 의해 저온보다 고온에서 감소되는 것으로 널리 알려져 있다. 그러나, 스위칭 전류는 (1) 초기 실온 상태, (3) 냉각 후 실온 상태 및 (5) 가열 후 실온 상태에서 일정하게 유지된다. 이러한 결과는 소자가 다양한 온도의 열악한 환경에서 작동 할 수 있으며 저온 및 고온 환경을 경험 한 후에도 작동 전류를 변경하지 않고 정상적으로 작동함을 확인합니다. 그러므로 이것은  $WN_x$  층을 사용하는 구조가 SOT-MRAM 응용에 적합하다는 것을 의미한다.

- [0154] 우리는 텅스텐 질화물층을 갖는  $W/WN_x/CoFeB/MgO$  구조의 인터페이스 엔지니어링에 의해 SOT의 향상 및 SOT-유도 스위칭 전류의 감소를 조사하였다. 텅스텐 질화물층의 질소 함량이 40%로 증가했을 때, 우리는 0.54의 높은 SOT 효율과  $W/CoFeB/MgO$  구조의 값의 약 1/5로 스위칭 전류의 감소를 관찰했다.
- [0155] XRD 및 TEM을 통해 다양한 질소 함량을 갖는 필름의 미세 구조를 분석 하였다. 결과는 SOT 향상이 텅스텐 질화물층의 조성에 의존하는 비저항뿐만 아니라 미세 구조 변화 (텅스텐이  $W_2N$  및  $WN$  상으로 변화 할 때)에 의해 야기될 수 있음을 밝혀냈다.
- [0156] 도 22는 본 발명의 일 실시예에 따른  $W$  (5 nm)/ $WN_x$  ( $t_{w-n}$ ; n)/ $CoFeB$  (0.9 nm)/ $MgO$  (1 nm)/ $Ta$  (2 nm) 구조에서 질소의 함량(n)과  $WN_x$  층의 두께에 따른 실험 결과를 나타낸다.
- [0157] 도 22를 참조하면, PMA는 수직 자기 이방성을 나타내고, IMA는 면내 이방성을 나타낸다.  $WN_x$  층에서 질소의 원자 퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 29% 이고, 상기  $WN_x$  층의 두께는 0.2 nm 내지 0.8 nm일 수 있다. 이 경우, 상기 자유층( $CoFeB$  (0.9 nm))은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.
- [0158] 상기  $WN_x$  층에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 5% 이고, 상기  $WN_x$  층의 두께는 0.2 nm 내지 3nm 일 수 있다. 이 경우, 상기 ( $CoFeB$  (0.9 nm))은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.
- [0159] 상기  $WN_x$  층은 결정질  $W_2N$  (111) 상을 포함하거나, 상기  $WN_x$  층은 결정질  $W_2N$  (111) 상 및 결정질  $WN$  (100) 상을 포함할 수 있다. 이 경우, 상기 자유층( $CoFeB$  (0.9 nm))은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.
- [0160] 한편, 텅스텐 층이 없고 5 nm의  $WN_x$  층만이 있는 자기 소자의 경우, 질소의 함량(n)이 2% 내지 5%에서만, 자유층은 수직자기 이방성을 나타낸다.
- [0161] 도 23은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자기 소자를 나타내는 단면도이다.
- [0162] 도 23을 참조하면, 자기 소자(300)는 고정된 자화 방향을 가지는 고정층(150); 스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층(130); 상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층(140); 면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층(320); 및 상기 자유층과 상기 스핀 토크 발생층 사이에 배치된 텅스텐-질화물층(324)을 포함한다. 상기 스핀 전류는 스핀 레도 토크에 의하여 상기 자유층(130)의 자화 방향을 스위칭한다. 상기 고정층(150) 및 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 가지고, 상기 스핀 토크 발생층(320)은 텅스텐층을 포함하고, 상기 텅스텐-질화물층(324)은 상기 자유층과 수직으로 정렬된다.
- [0163] 상기 텅스텐-질화물층(324)의 두께와 조성에 따라 스위칭 전류가 변화될 수 있다. 또한, 상기 텅스텐-질화물층(324)의 두께와 조성에 따라, 상기 자유층의 자화 특성이 변경될 수 있다. 즉, 텅스텐-질화물층(324)의 두께와 조성은 소정의 범위 내에서 상기 자유층(130)에 수직 자화 이방성 특성을 제공할 수 있다. 상기 자유층(140)이 수직자기 이방성을 발현하는 경우, 텅스텐-질화물층(324)의 두께가 감소하고 질소의 농도가 증가함에 따라 스위칭 전류가 감소할 수 있다.
- [0164] 구체적으로, 상기 텅스텐-질화물층(324)의 두께는 0.2 nm이고, 상기 텅스텐-질화물층(324)에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)가 5% 내지 42 %일 수 있다. 이 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 유지하면서, 질소의 원자퍼센트(atomic percent)가 증가함에 따라 스위칭 전류가 감소할 수 있다. 한편, 질소의 원자퍼센트(atomic percent)가 42%를 초과하는 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 상실하고 면내 자기 이방성을 가진다.
- [0165] 상기 텅스텐-질화물층(324)에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 29% 이고, 상기 텅스텐-질화물층(324)의 두께는 0.2 nm 내지 0.8 nm일 수 있다. 이 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.
- [0166] 상기 텅스텐-질화물층(324)에서 질소의 원자퍼센트(atomic percent)는 2% 내지 5% 이고, 상기 텅스텐-질화물층의 두께는 0.2 nm 내지 3nm일 수 있다. 이 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.
- [0167] 상기 텅스텐-질화물층(324)은 결정질  $W_2N$  (111) 상(phase)을 포함하거나, 상기 텅스텐-질화물층(324)은 결정질  $W_2N$  (111) 상 및 결정질  $WN$  (100) 상을 포함할 수 있다. 이 경우, 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 유지할 수 있다.

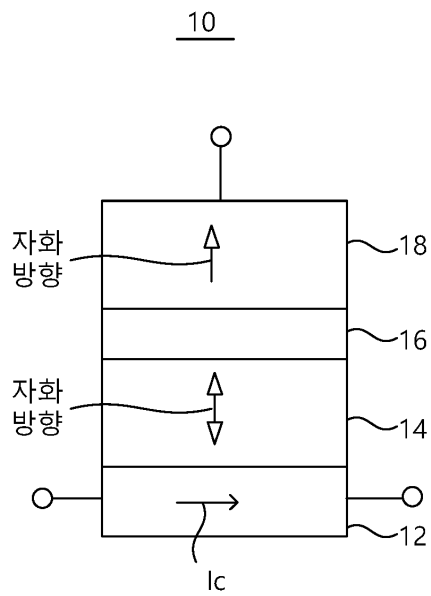
- [0168] 스핀 토크 발생층(320)의 양단은 면내 전류를 인가하는 외부 회로에 연결될 수 있다.
- [0169] 도 24는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자기 소자를 나타내는 단면도이다.
- [0170] 도 24를 참조하면, 자기 소자(400)는, 고정된 자화 방향을 가지는 고정층(150); 스위칭되는 자화 방향을 가지는 자유층(130); 상기 고정층과 상기 자유층 사이에 개재되는 터널 절연층(140); 및 면내 전류가 흐름에 따라 상기 자유층에 스핀 전류를 주입하는 스핀 토크 발생층(420)을 포함한다. 상기 스핀 전류는 스핀 궤도 토크에 의하여 상기 자유층(130)의 자화 방향을 스위칭한다. 상기 고정층(150) 및 상기 자유층(130)은 수직 자기 이방성을 가지고, 상기 스핀 토크 발생층(420)은 차례로 적층된 텅스텐층(122) 및 텅스텐-질화물층(124)을 포함한다. 상기 텅스텐-질화물층(124)은 상기 자유층(130)에 인접하게 배치될 수 있다.
- [0171] 상기 스핀 토크 발생층(420)은 면내 자기 이방성을 가진 강자성층(421)을 더 포함할 수 있다. 상기 텅스텐층(122)은 상기 강자성층(421)과 상기 텅스텐-질화물층(124) 사이에 배치될 수 있다. 상기 강자성층(421)의 자화 방향은 상기 면내 전류가 흐르는 방향과 평행 또는 반 평행할 수 있다. 상기 강자성층과 상기 텅스텐층 사이에서 계면 발생 스핀 전류가 생성될 수 있다. 상기 계면 발생 스핀 전류는 z축 성분의 스핀 분극을 가질 수 있다. 이에 따라, 면내 외부 자기장 없이 스핀-궤도 토크 스위칭이 구현될 수 있다.
- [0172] 스핀 토크 발생층(420)의 양단은 접속 전극(120a, 120b)을 통하여 면내 전류를 인가하는 외부 회로에 연결될 수 있다.
- [0173] 이상에서는 본 발명을 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 이러한 실시예에 한정되지 않으며, 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 실시할 수 있는 다양한 형태의 실시예들을 모두 포함한다.

### 부호의 설명

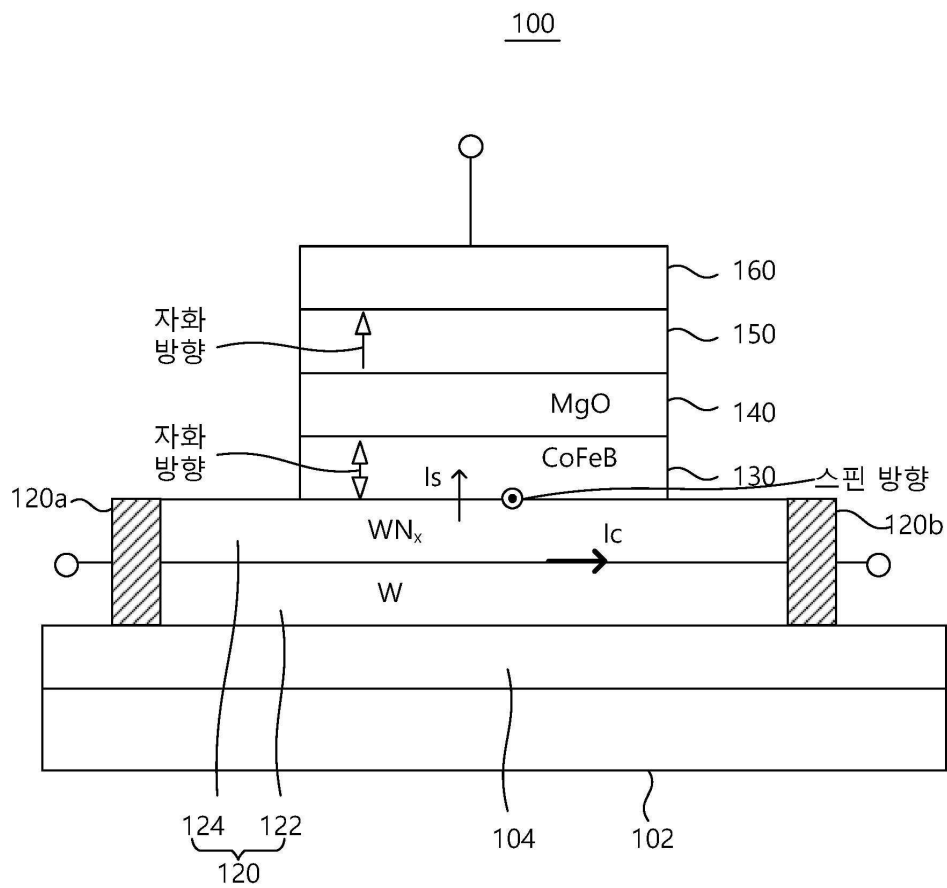
- [0174]
- 100: 자기 소자
  - 120: 스핀 토크 발생층
  - 122: 텅스텐층
  - 124: 텅스텐-질화물층
  - 130: 자유층
  - 140: 터널절연층
  - 150: 고정층

도면

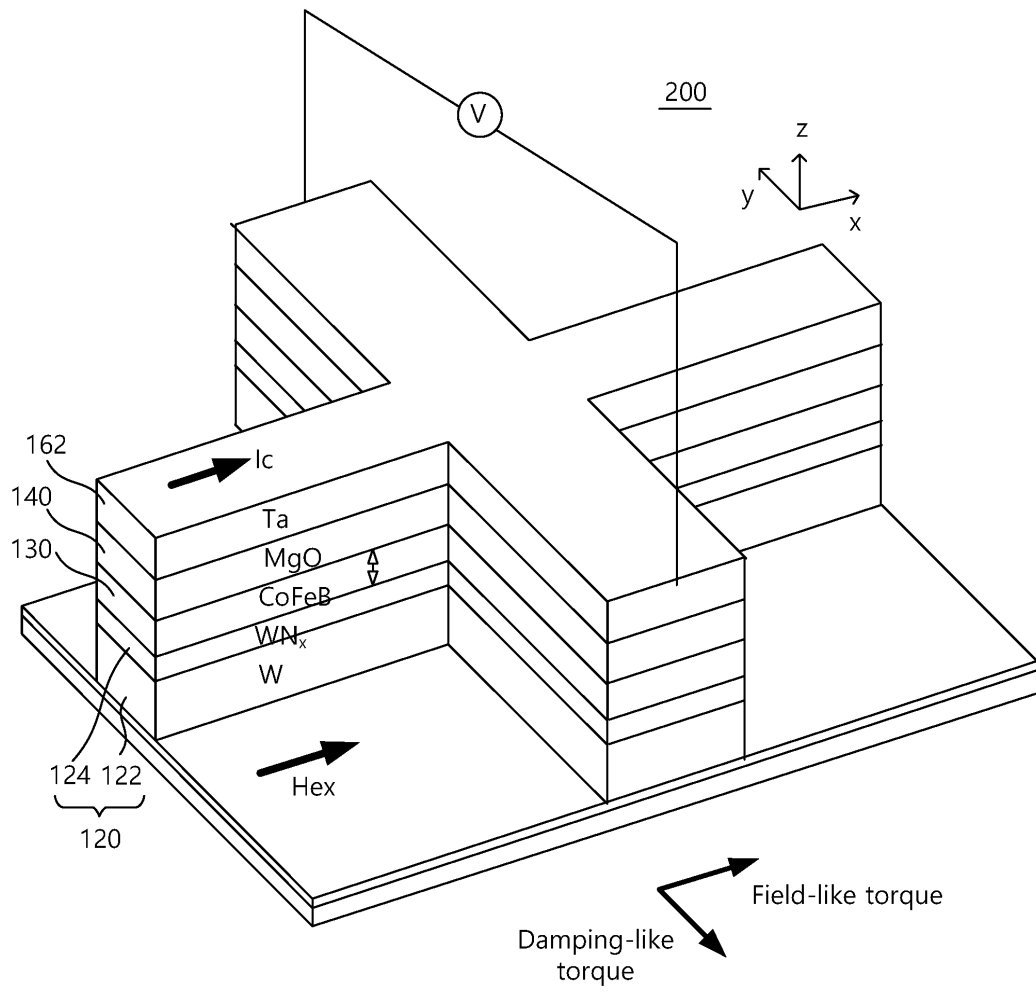
도면1



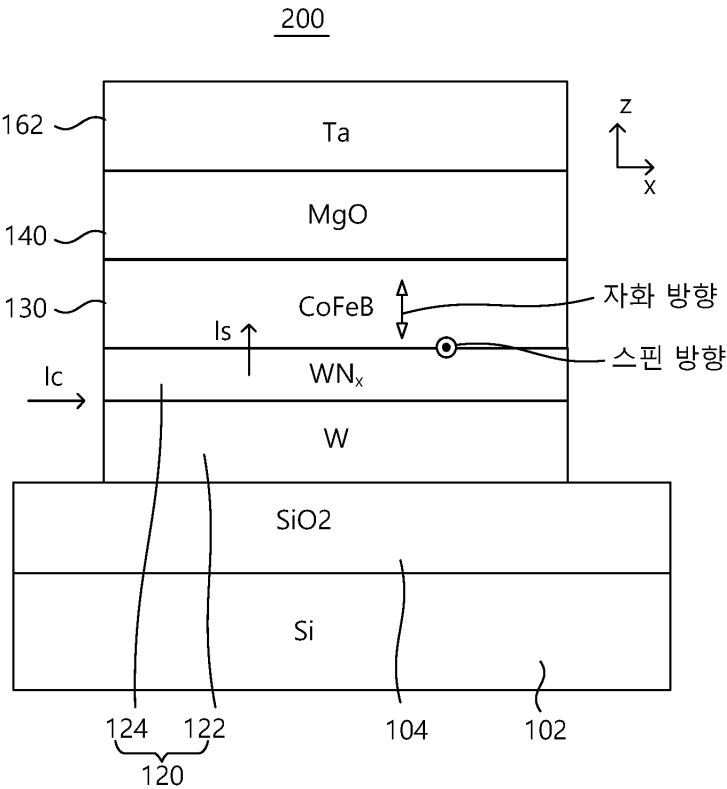
도면2



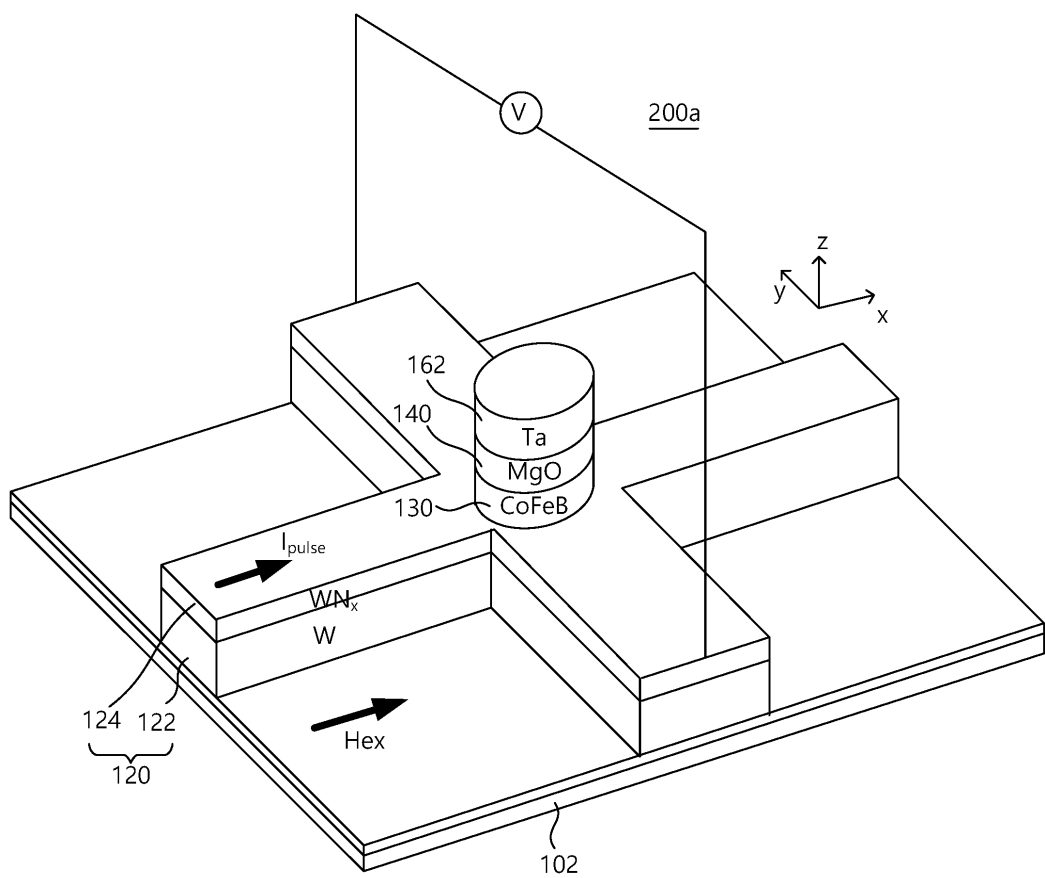
도면3a



도면3b

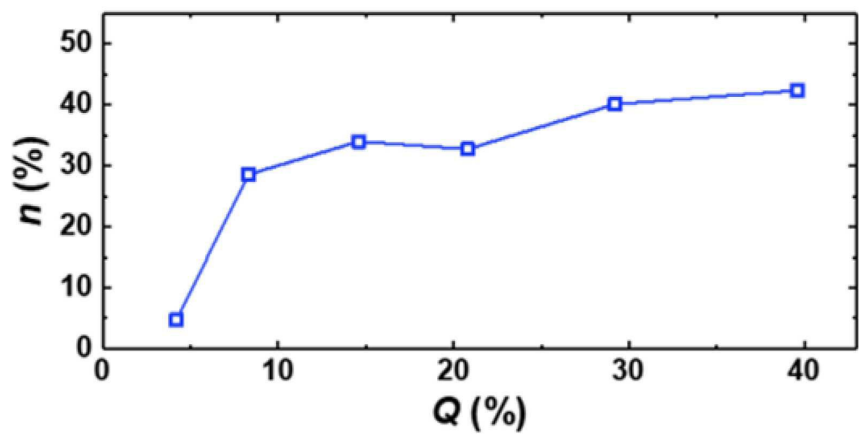


도면4



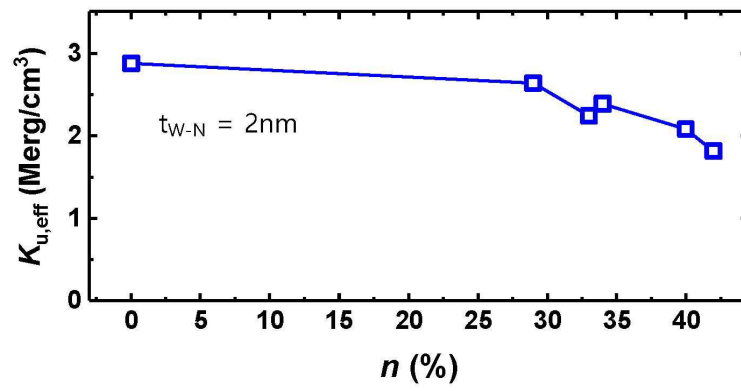
도면5

W(5nm)/WN<sub>x</sub>(t<sub>W-N</sub>=0.2 nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm)



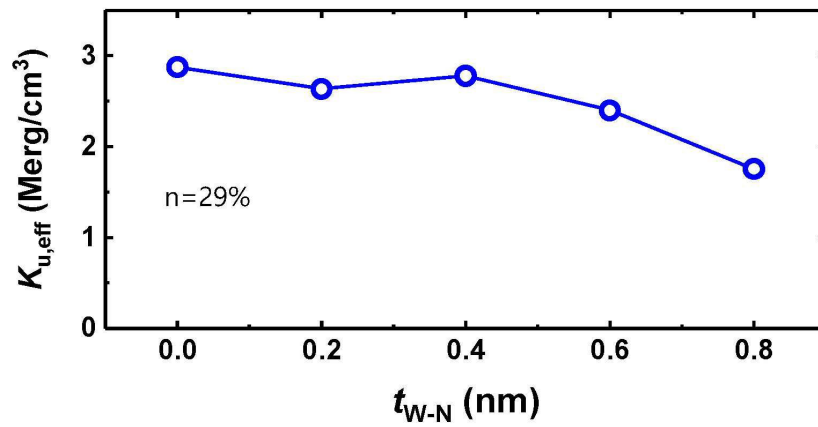
도면6

W(5nm)/WN<sub>x</sub>(t<sub>W-N</sub>=0.2 nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm)



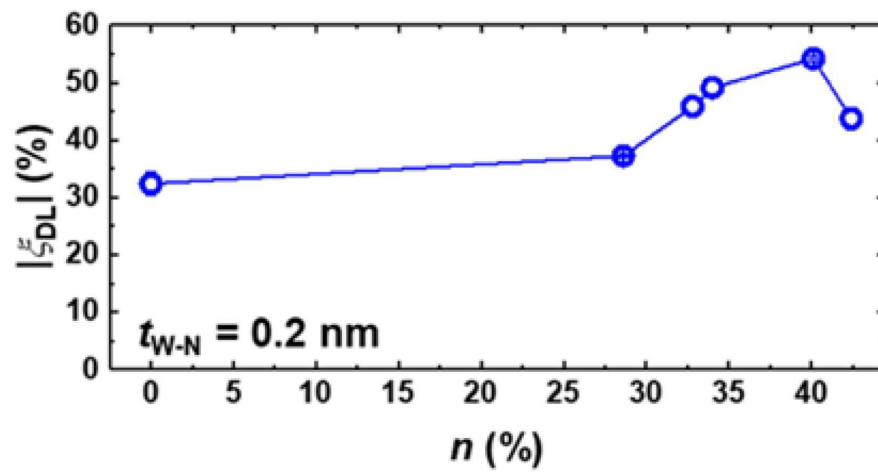
도면7

W(5nm)/WN<sub>x</sub>(n=29%)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm)



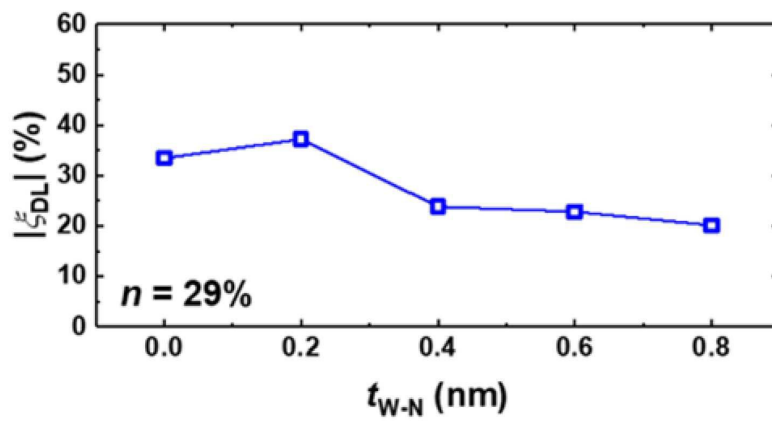
도면8

W(5nm)/WN<sub>x</sub>(t<sub>W-N</sub>=0.2nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm)

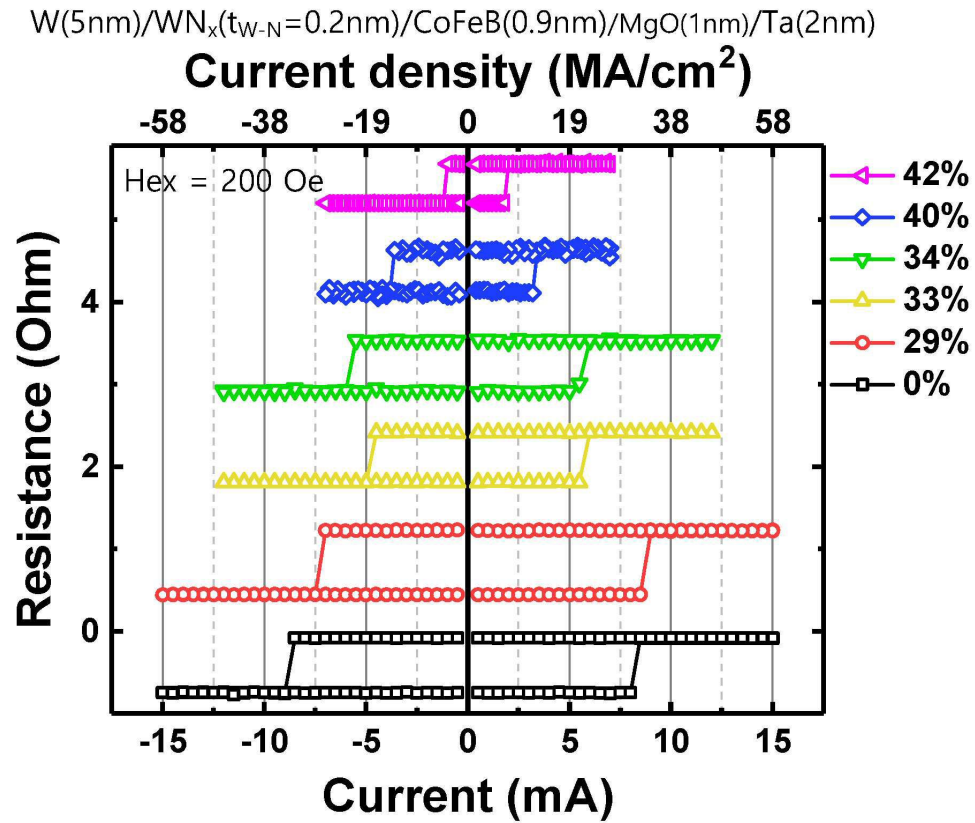


도면9

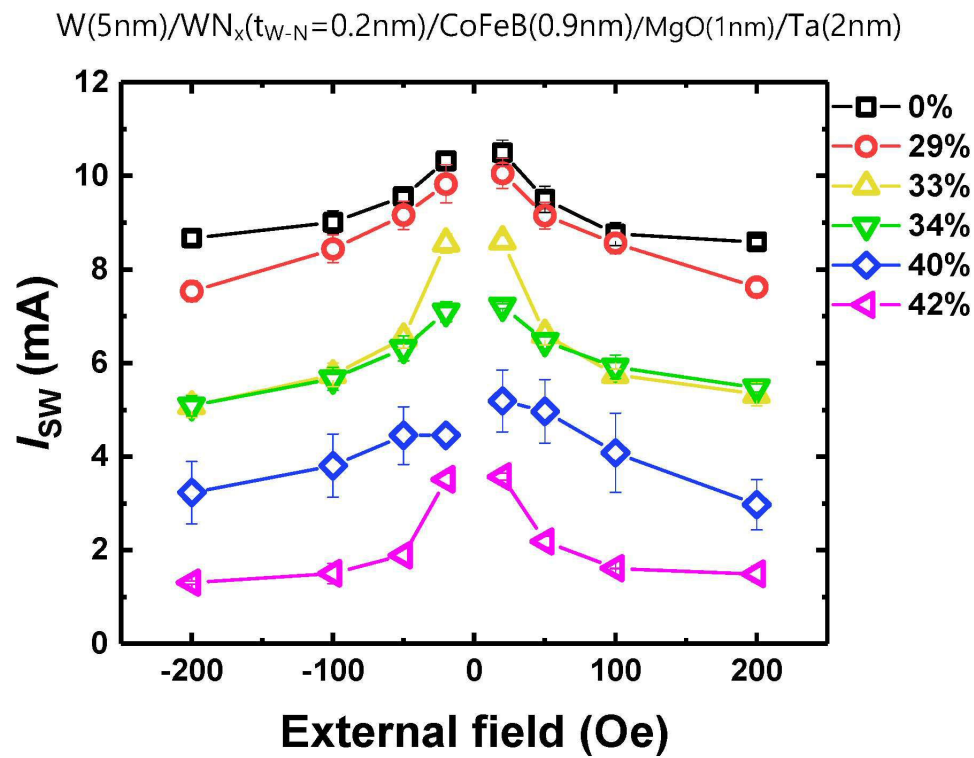
W(5nm)/WN<sub>x</sub>(n=29%)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm)



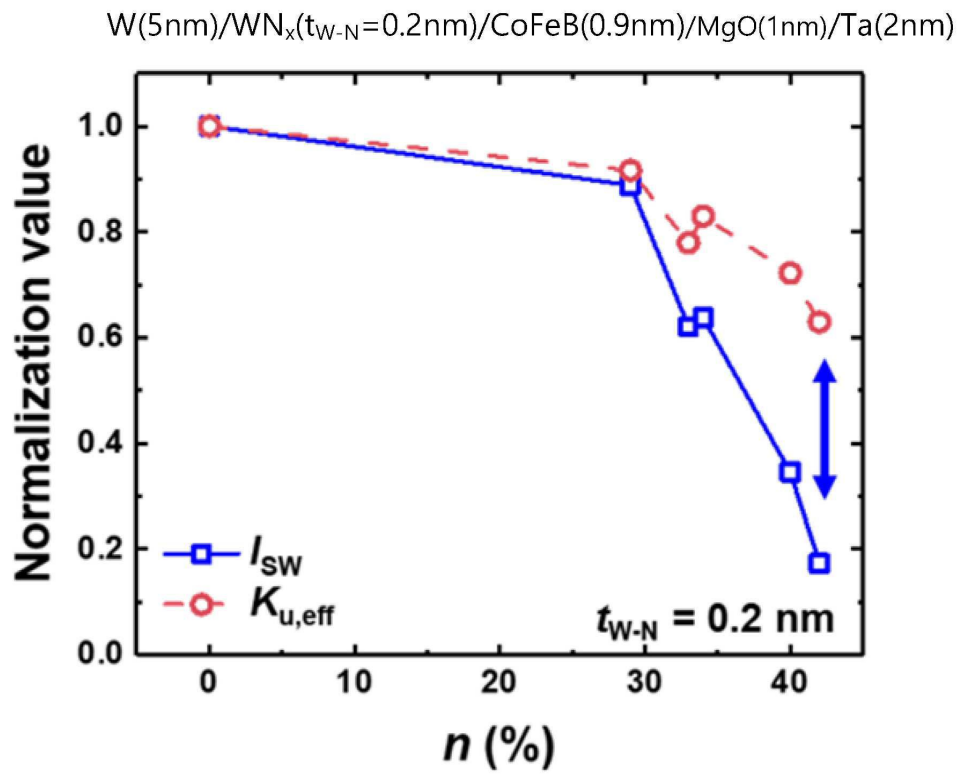
도면10



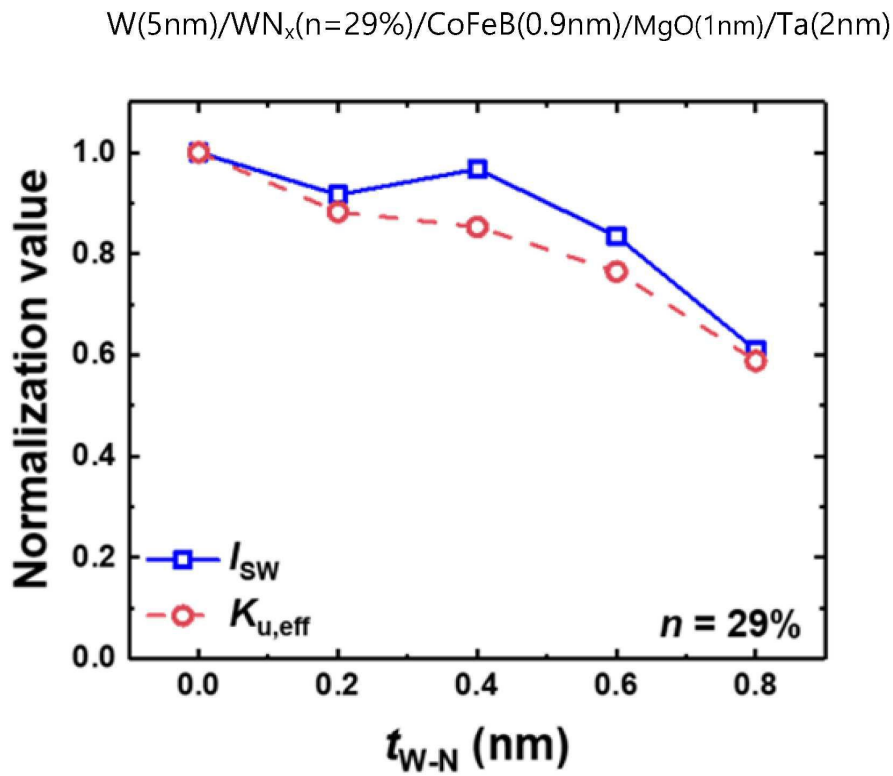
도면11



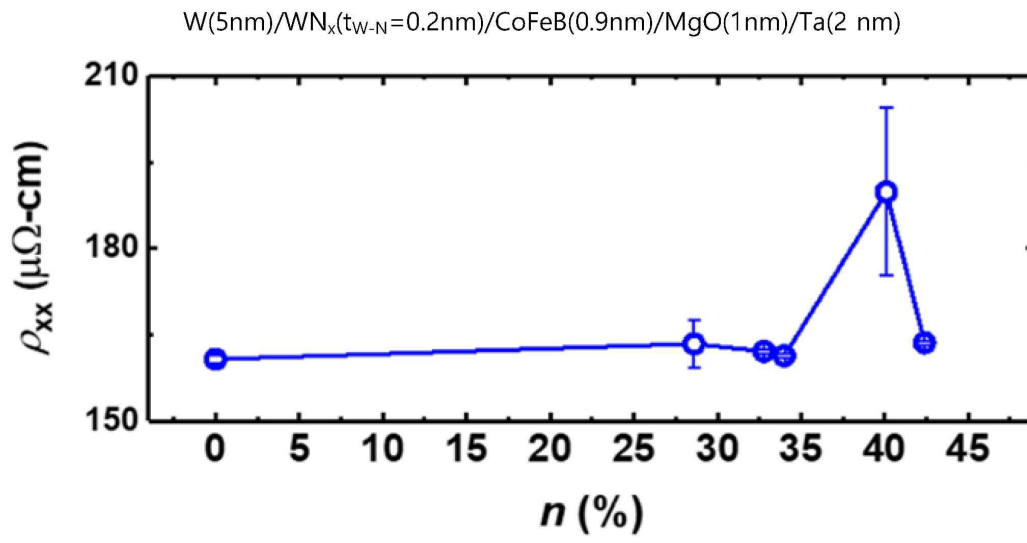
도면12



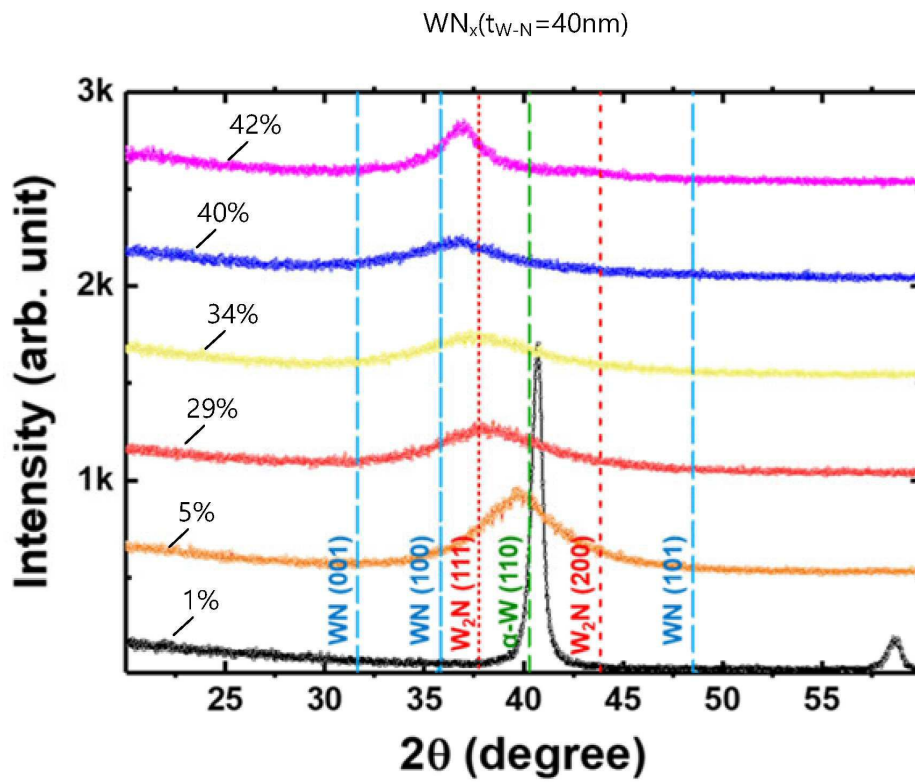
도면13



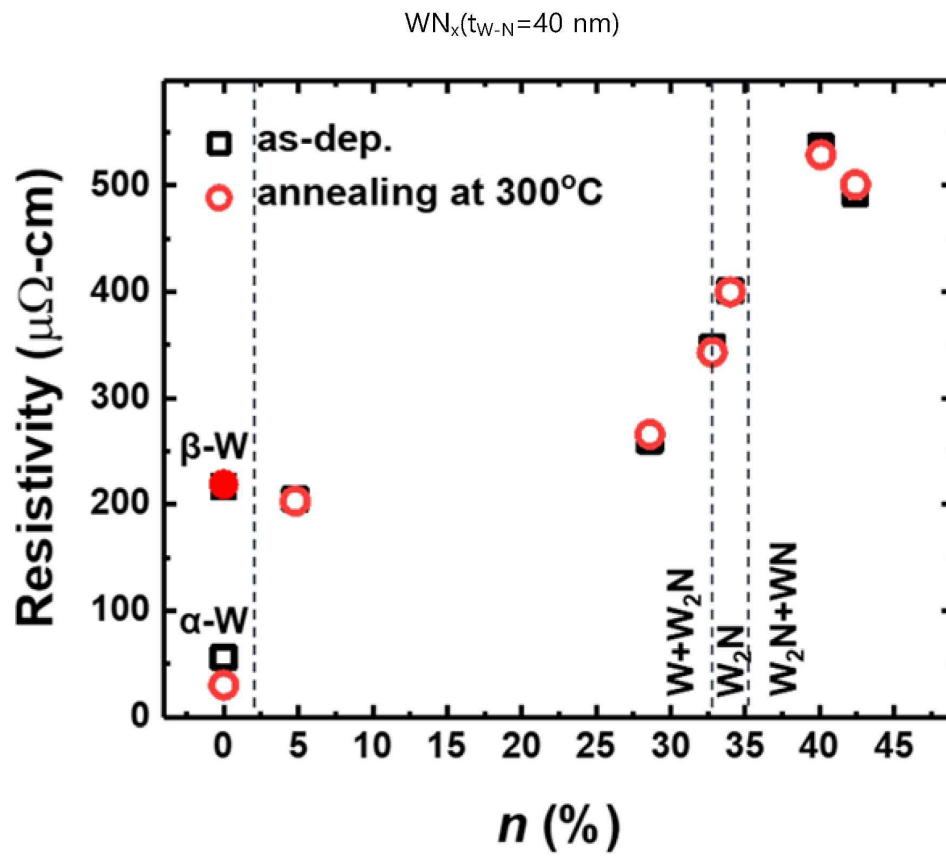
도면14



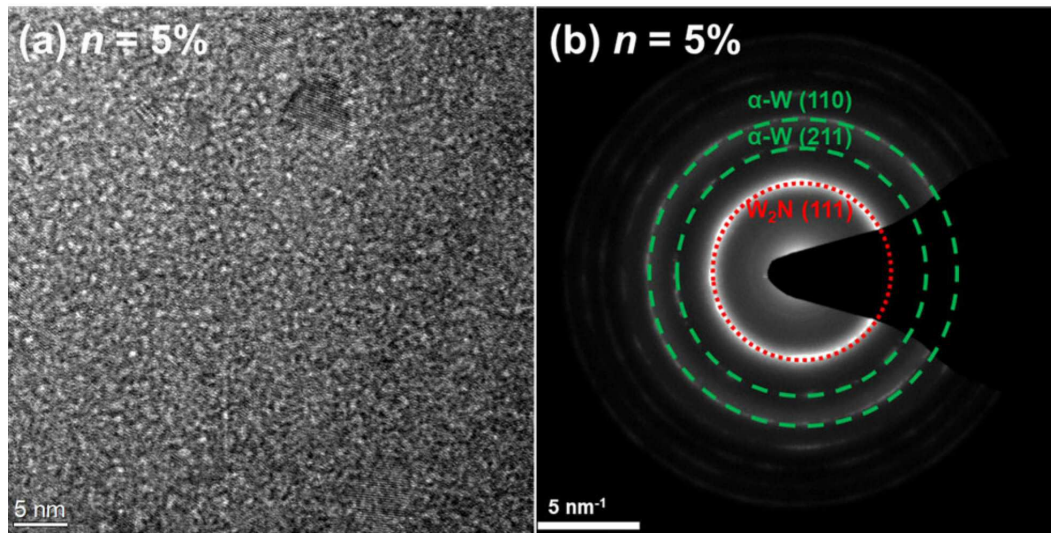
도면15



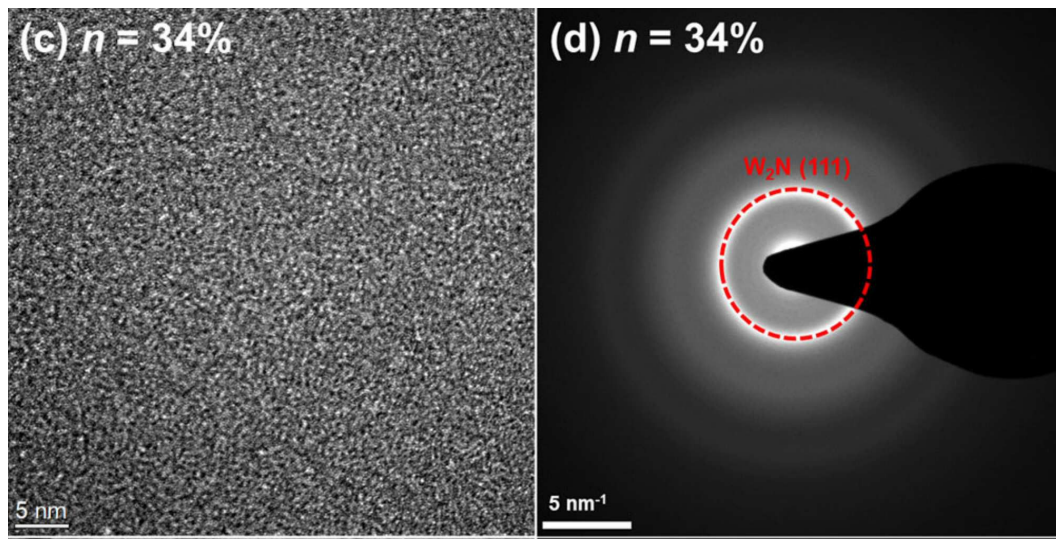
도면16



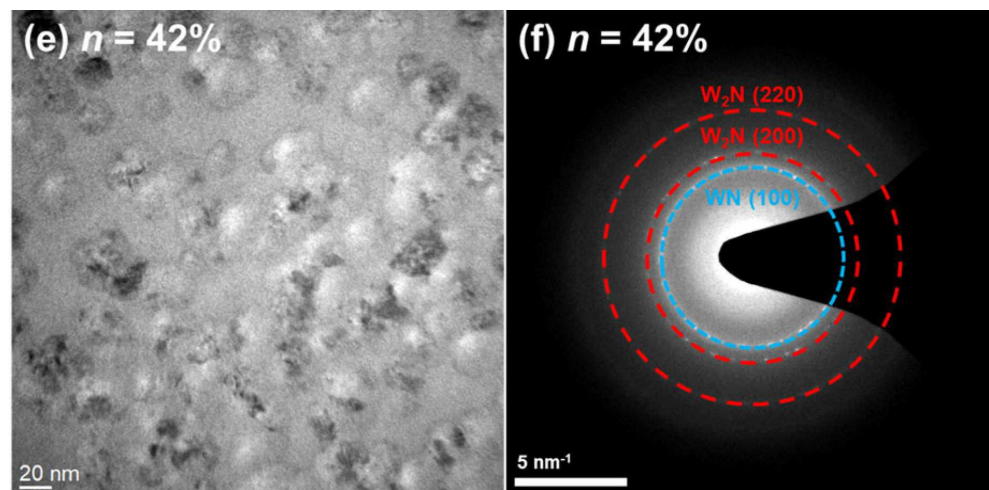
도면17



도면18

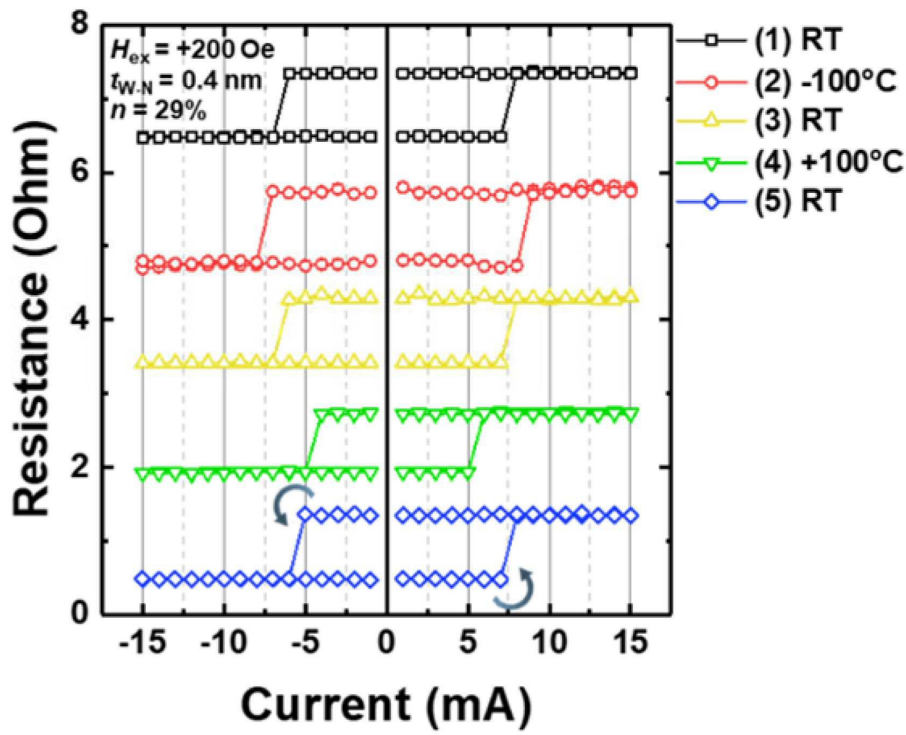


도면19



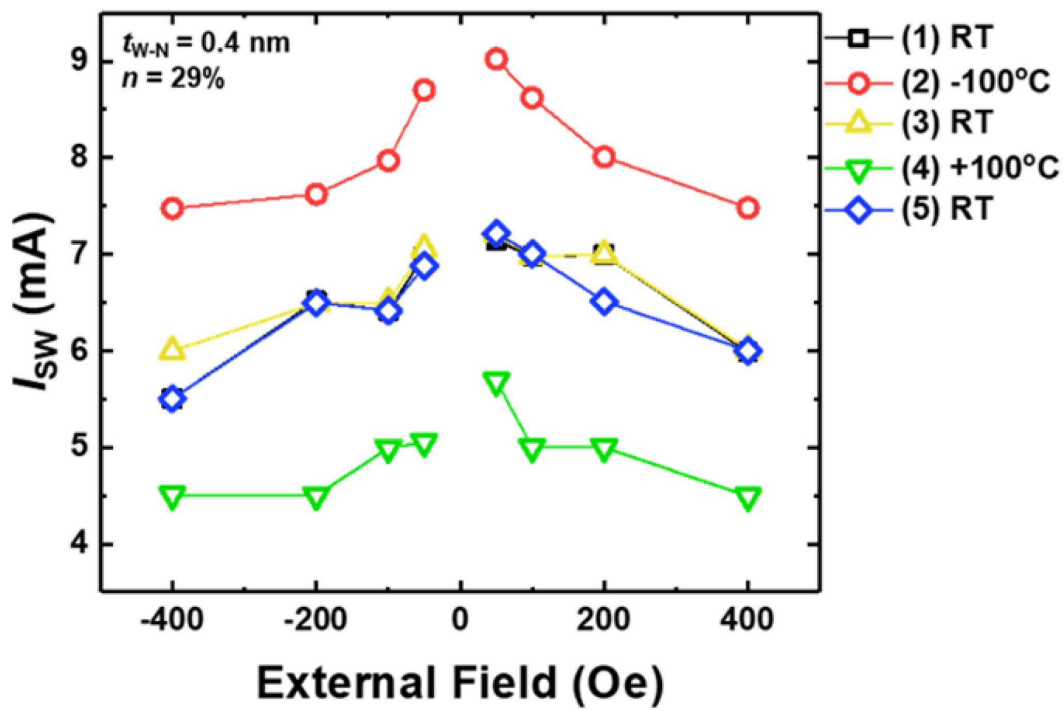
도면20

W(5nm)/WN<sub>x</sub>(t<sub>W-N</sub>=0.4nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2 nm)



도면21

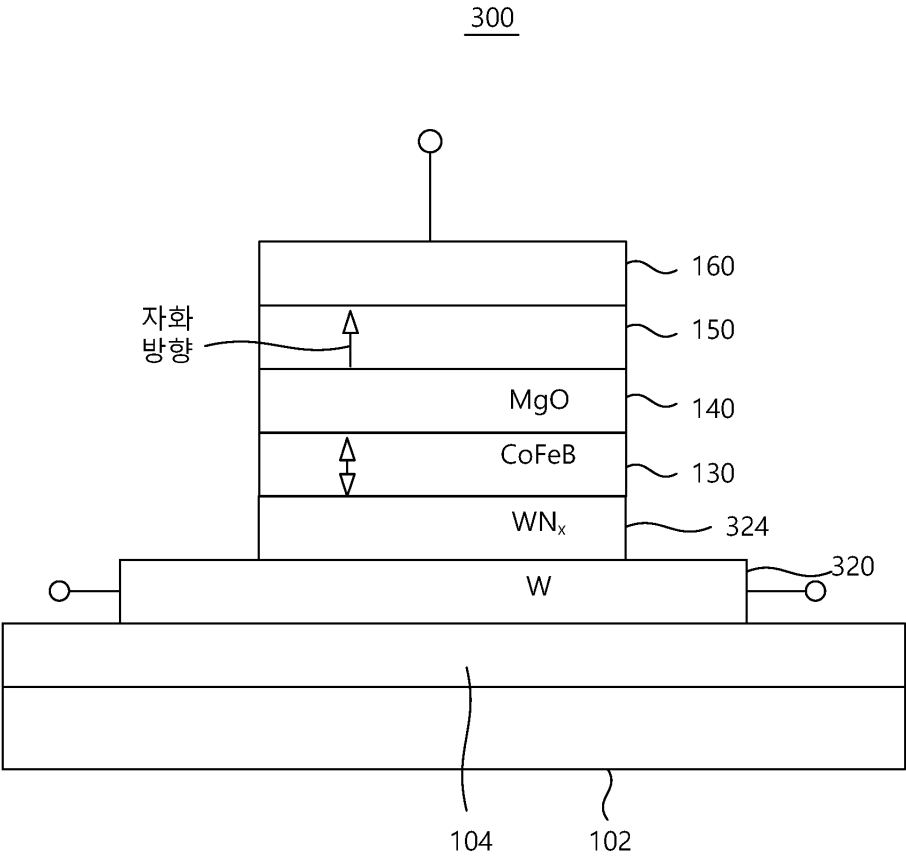
W(5nm)/WN<sub>x</sub>(t<sub>W-N</sub>=0.4nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2 nm)



도면22

| W/WN <sub>x</sub> (t <sub>w-n</sub> :n)/CoFeB/Ta  |        |        |        |        |        |        |        |        |                  |
|---------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| <div><div>t<sub>w-n</sub></div><div>n</div></div> | 0.2 nm | 0.4 nm | 0.6 nm | 0.8 nm | 1.0 nm | 1.5 nm | 2.0 nm | 3.0 nm | 5.0 nm<br>(no W) |
| 2%                                                |        |        |        |        |        |        |        |        | PMA              |
| 5%                                                | PMA    |        |        |        |        |        |        |        | PMA              |
| 29%                                               | PMA    | PMA    | PMA    | PMA    | IMA    | IMA    | IMA    | IMA    | IMA              |
| 33%                                               | PMA    | IMA    | IMA    | IMA    |        |        |        |        | IMA              |
| 34%                                               | PMA    |        |        |        |        |        |        |        |                  |
| 40%                                               | PMA    |        |        |        |        |        |        |        |                  |
| 42%                                               | PMA    |        |        |        |        |        |        |        | IMA              |
| Over 42%                                          | IMA    | IMA    |        |        |        |        |        |        | IMA              |

도면23



도면24

