

(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구
국제사무국

(43) 국제공개일
2020년 11월 12일 (12.11.2020) **WIPO | PCT**



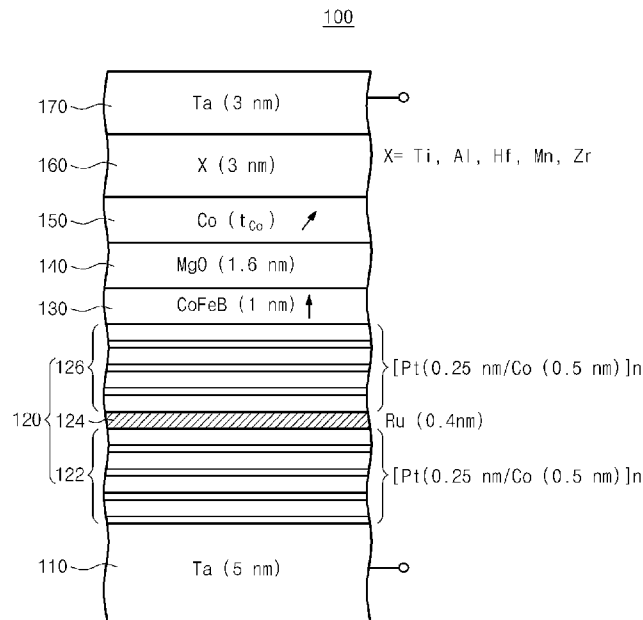
(10) 국제공개번호
WO 2020/226293 A1

- (51) 국제특허분류: **H01L 43/08** (2006.01) **H01L 43/02** (2006.01) **H01L 43/10** (2006.01)
- (21) 국제출원번호: PCT/KR2020/005085
- (22) 국제출원일: 2020년 4월 16일 (16.04.2020)
- (25) 출원언어: 한국어
- (26) 공개언어: 한국어
- (30) 우선권정보: 10-2019-0052411 2019년 5월 3일 (03.05.2019) KR
- (71) 출원인: 고려대학교 산학협력단 (**KOREA UNIVERSITY RESEARCH AND BUSINESS FOUNDATION**)
[KR/KR]; 02841 서울시 성북구 안암로 145, Seoul (KR).
- (72) 발명자: 권형근 (**GWEON, Hyung-Keun**); 05515 서울시 송파구 한가람로 468, 102-1202, Seoul (KR). 임상호 (**LIM, Sang Ho**); 12273 경기도 남양주시 와부읍, 덕소로 180, 113-1903, Gyeonggi-do (KR). 이경진 (**LEE, Kyung Jin**); 01700 서울시 노원구 한글비석로 15길, 51, 203-1210, Seoul (KR). 박현중 (**PARK, Hyeon Jong**); 02857 서울시 성북구 안암로 9가길, 68, Seoul (KR).
- (74) 대리인: 특허법인 누리 (**NURY PATENT LAW FIRM**); 06131 서울시 강남구 테헤란로 25길 15-5, 4층, Seoul (KR).
- (81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD,

(54) Title: MAGNETIC TUNNEL JUNCTION DEVICE HAVING EASY-CONE STATE OF FREE LAYER

(54) 발명의 명칭: 이지-콘 상태의 자유층을 가지는 자기 터널 접합 소자

[도9]



(57) Abstract: A magnetic tunnel junction device according to one embodiment of the present invention comprises: a fixed magnetic layer having a fixed magnetization direction; a free magnetic layer disposed on the fixed magnetic layer and switching a magnetization direction; a tunnel insulation layer interposed between the fixed magnetic layer and the free magnetic layer; a non-magnetic metal layer disposed on the free magnetic layer; and a metal protection layer disposed on the non-magnetic metal layer. The magnetization state of the free magnetic layer is an easy-cone state, and the work function difference obtained by subtracting a work function of the non-magnetic metal layer from a work function of the free magnetic layer is -0.5 eV to -1.5 eV.

[다음 쪽 계속]



WO 2020/226293 A1

SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ,
UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역
내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE,
LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유
럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,
FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK,
MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI
(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML,
MR, NE, SN, TD, TG).

공개:

— 국제조사보고서와 함께 (조약 제21조(3))

(57) 요약서: 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 터널 접합 소자는, 고정된 자화 방향을 가지는 고정 자성층; 상기 고정 자성층 상에 배치되고 자화 방향을 스위칭하는 자유 자성층; 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 배치된 터널 절연층; 상기 자유 자성층 상에 배치된 비자성 금속층; 및 상기 비자성 금속층 상에 배치된 금속 보호층을 포함한다. 상기 자유 자성층의 자화 상태는 이지 콘 상태이고, 상기 자유 자성층의 일함수에서 상기 비자성 금속층의 일함수를 뺀 일함수 차이는 -0.5 eV 내지 -1.5 eV 를 가진다.

명세서

발명의 명칭: 이지-콘 상태의 자유층을 가지는 자기 터널 접합 소자 기술분야

- [1] 본 발명은 자기 메모리 소자에 관한 것이며, 보다 상세하게는 자기 메모리 (MRAM) 소자에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 수직자기이방성 (Perpendicular Magnetic Anisotropy; 이하 PMA)은 자기 메모리 (MRAM)의 고집적화와 데이터 유지에 중요한 열적 안정성 특성에 직접적으로 연관이 있는 매우 중요한 특성이다.
- [3] 자기 메모리 응용에서 주로 사용되는 나노미터 수준의 자성다층박막은 일반적으로 벌크에 의한 수직자기이방성(PMA) 보다 계면에 의한 수직자기이방성(PMA)이 더 큰 것으로 알려져 있다. 따라서 다층박막에서의 수직자기이방성(PMA)은 계면의 상태에 의해 크게 그 특성이 결정된다. 현재까지 알려진 바에 의하면 비자성금속/강자성체/산화물을 구성하는 자기터널접합 구조에서, 계면의 산화량(interface oxidation), 상호 고용도 (intermixing), 오비탈 혼성화 (orbital hybridization) 등에 따라 수직자기이방성(PMA)의 성질이 달라질 수 있다.
- [4] 수직자기이방성(PMA) 에너지는 1차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_1)에 의존하는 에너지와 2차 수직자기이방성(PMA) 상수 (K_2)에 의존하는 에너지로 나누어 기술될 수 있다. 두 에너지의 부호와 상대적인 크기에 따라 자성 박막의 용이축 (easy axis)이 면내 방향 (in-plane) 상태, 수직 방향 (out-of-plane) 상태, 면내와 수직 사이에 기울어진 방향을 가진 이지-콘(easy-cone) 상태, 그리고 면내 방향 상태와 수직 방향 상태가 공존하는 (coexistence) 상태를 가질 수 있다. 따라서 1차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_1)와 2차 수직자기이방성(PMA) 상수 (K_2)를 조절함으로써 자성 박막의 자화 용이 방향을 제어할 수 있다.
- [5] 특히 자기 메모리 응용에서 자유층이 이지-콘 상태일 경우, 소자의 스위칭 속도와 임계 전류가 크게 감소할 수 있다 [R. Matsumoto et al., Phys. Rev. B 92, 140409(R) (2015)]. 그렇기 때문에 1차 수직자기이방성(PMA) 상수 (K_1)과 2차 수직자기이방성(PMA) 상수 (K_2)를 자유자재로 제어할 수 있는 기술을 확보하는 것은 자기 메모리 응용 관점에서 굉장히 중요하다.
- [6] 현재 학계와 산업 분야에서는 1차 수직자기이방성(PMA) 상수 (K_1)에 대한 이해는 깊은 편이지만 2차 수직자기이방성(PMA) 상수 (K_2)에 대한 이해는 기초적인 수준에 머물러 있는 실정이다. 이에 따라 2차 수직자기이방성(PMA) 상수 (K_2)의 제어를 통하여 메모리의 성능을 한층 더 개선시킬 수 있다. 그럼에도 불구하고 2차 수직자기이방성(PMA) 상수 (K_2)는 효율적으로 활용하지 못하고 있다. 예를 들어, J. M. Shaw et al. [IEEE Magn. Lett. 6, 3500404 (2015)]의 경우

종래의 구조인 Ta/CoFeB/MgO 구조에서 자성층(CoFeB)의 두께를 조절함으로써 이지-콘 상태를 유도하려 했지만 이를 실현하지 못하였다.

- [7] 뿐만 아니라, B. M. S. Teixeira et al. [Appl. Phys. Lett. 112, 202403 (2018)]의 경우, MgO/CoFeB/W or Ta/CoFeB/MgO 구조에서 이온 조사 기법을 활용하여 이지-콘 상태를 성공적으로 유도했다. 그러나, 이러한 구조는 통상적인 자기터널 접합의 적층 구조가 아니며, PMA의 크기 감소 등의 기타 특성들의 열화를 야기한다.
- [8] 본 발명의 발명자는 한국 등록특허 10-1897916에서 Pt/Co/MgO 구조에서 이지-콘 상태를 형성하는 내용을 개시하였다. 그러나, Pt/Co/MgO 구조는 용이하게 이지-콘 상태를 구현하기 힘들다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [9] 본 발명이 해결하고자 하는 일 기술적 과제는 자성다층박막 구조에서 1차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_1)와 2차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_2)를 제어하는 원리를 제안하고, 이지-콘 상태에 유발하는 새로운 구조 및 물질을 제안한다. 구체적으로, 1차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_1)와 2차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_2) 사이의 상관관계를 보이는 고유 인자를 파악하고, 구조 및 물질에 변화를 줌으로써, 1차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_1)와 2차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_2)가 제어될 수 있다. 즉, 이에 따라, 이지-콘 상태의 자성층을 포함하는 자기터널접합 소자가 구현된다.
- [10] 본 발명이 해결하고자 하는 일 기술적 과제는 이지-콘 상태의 자성층을 포함하는 자기터널접합을 구현하는 것이다. 상기 자기터널접합 소자는 스위칭 속도와 임계 전류를 크게 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

과제 해결 수단

- [11] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 터널 접합 소자는, 고정된 자화 방향을 가지는 고정 자성층; 상기 고정 자성층 상에 배치되고 자화 방향을 스위칭하는 자유 자성층; 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 배치된 터널 절연층; 상기 자유 자성층 상에 배치된 비자성 금속층; 및 상기 비자성 금속층 상에 배치된 금속 보호층을 포함한다. 상기 자유 자성층의 자화 상태는 이지 콘 상태이고, 상기 자유 자성층의 일함수에서 상기 비자성 금속층의 일함수를 뺀 일함수 차이는 -0.5 eV 내지 -1.5 eV를 가진다.
- [12] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 비자성 금속층은 Ti, Al, Hf, Zr, Mn 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [13] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 비자성 금속층은 Ta, W, Mo 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [14] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 자유 자성층은 Co이고, 상기 자유 자성층의 두께는 1.0 nm 내지 2.0 nm일 수 있다.
- [15] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 실리콘 기판 상에 배치된 씨앗층; 및 상기

씨앗층 상에 배치된 인위적 반강자성층을 더 포함할 수 있다. 상기 인위적 반강자성층 상에 상기 고정 자성층이 배치될 수 있다.

- [16] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 자유 자성층은 증착과 동시에 또는 후속 열처리에 의하여 이지 콘 상태로 정렬될 수 있다.

발명의 효과

- [17] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 터널 접합 소자는 자유 자성층 (예를 들어, Co)의 상부 또는 하부에 일함수 차이가 큰 비자성금속층 (e.g. Mn, Zr, Hf, Al, Ti 등)을 추가로 삽입함으로써 계면에 의한 2차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_2)를 증가시킨다. 이에 따라, 스핀전달토크 (spin transfer torque)에 의한 자화반전 속도가 증가하고 임계 전류가 감소하고, 열적 안정성이 증가될 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [18] 도 1은 유효 1차 수직 자기이방성 상수(K_1^{eff})와 2차 수직 이방성 상수(K_2)의 좌표에서 표시된 자성층의 위상 다이어그램(phase diagram)이다.
- [19] 도 2a는 본 발명의 일 실시예에 따른 Pt/Co/X의 다층 박막 구조를 나타내는 모식도이다.
- [20] 도 2b는 도 2a의 Pt/Co/X의 다층 박막 구조를 가지는 홀 바 패턴(Hall bar pattern)의 사시도와 이상 홀 전압 분석 (anomalous Hall voltage measurement) 셋업의 모식도이다.
- [21] 도 3a는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 m_z - H_{ext} 그래프이다.
- [22] 도 3b는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 $\alpha H_{\text{ext}} - (1 - m_z^2)$ 그래프이다.
- [23] 도 4a는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/Cu에 대한 구조를 나타내는 모식도이다.
- [24] 도 4b는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/Cu에 대한 $K_1 - 1/t_{\text{Co}}$ 그래프이다.
- [25] 도 4c는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/Cu에 대한 $K_2 - 1/t_{\text{Co}}$ 그래프이다.
- [26] 도 5a는 본 발명의 일 실시예에 따른 단일층 구조인 X에 대한 구조를 나타내는 모식도이다.
- [27] 도 5b는 본 발명의 일 실시예에 따른 단일층 구조인 X에 대한 자외선 광전자 분광법 스펙트럼에서 2차 전자 컷오프 (secondary electron cutoff) 영역 및 페르미 엣지 (Fermi edge) 영역을 나타낸다.
- [28] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 비자성 금속에 따른 일함수를 나타내는 결과이다.
- [29] 도 7a는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 $K_1 - \Delta W_{\text{meas}}$ 그래프이다.

[30] 도 7b는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 $K_2\text{-}\Delta W_{\text{meas}}$ 그래프이다.

[31] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 $K_2\text{-}\Delta W_{\text{meas}}$ 그래프이다.

[32] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기터널 접합 소자를 나타내는 단면도이다.

발명의 실시를 위한 형태

[33] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기터널 접합 소자는 자유 자성층/비자성금속층의 계면에서의 일함수 차이와 2차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_2)의 상관관계를 이해한 후, 적절한 구조 및 재료를 선택하여 의도에 따라 자화 용이 방향을 조절할 수 있다.

[34] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기터널 접합 소자는 자유 자성층과 접촉하도록 일함수 차이가 큰 비자성금속층을 배치하여, 상기 자유 자성층에 이지-콘 상태를 제공할 수 있다. 상기 이지-콘 상태는 스핀전달토크 (spin transfer torque)에 의한 자화반전 속도와 임계 전류를 크게 개선시킬 수 있다.

[35] 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 실시예는 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.

[36] 우선, 이론적 측면에서, 자유 자성층/비자성금속층 기반의 자성 다층박막구조에서 발현되는 1차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_1)와 2차 수직자기이방성(PMA) 상수(K_2)에 대하여 기술된다.

[37] 도 1은 유효 1차 수직 자기이방성 상수(K_1^{eff})와 2차 수직 이방성 상수(K_2)의 좌표에서 표시된 자성층의 위상 다이어그램(phase diagram)이다.

[38] 자성층은 1차 수직자기이방성 상수 (first-order PMA; K_1^{eff})과 2차 수직자기이방성 상수 (second-order PMA; K_2)을 포함한다. K_1^{eff} 와 K_2 의 부호와 상대적인 크기에 따라, 자성층의 자화 용이축 (easy axis)은 면내 방향 (in-plane) 상태, 수직 방향 (out-of-plane) 상태, 면내(in-plane)와 수직 사이 기울어진 방향을 가진 이지-콘 (easy-cone) 상태, 그리고 면내 방향과 수직 방향이 공존하는 (coexistence) 상태를 가질 수 있다. 자성층과 접촉하는 비자성금속층 사이의 계면 상태와 자성층의 두께를 조절을 통해 자화 용이 방향이 제어될 수 있다. 이 시스템의 자기 에너지는 다음과 같이 주어진다.

[39] [수학식 1]

$$[40] \quad E(\theta) = K_1^{\text{eff}} \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta$$

- [41] 여기서, $E(\theta)$ 는 시스템(system)의 자기에너지 (magnetic energy)이다. K_1^{eff} 은 유효 1차 수직자기 이방성 상수이다. K_2 는 2차 수직자기 이방성 상수이다. θ 는 상기 자성층의 자화 방향과 박막의 법선 방향 사이의 극각(polar angle)이다. K_1 은 1차 수직자기 이방성 상수이다.
- [42] $K_1^{\text{eff}}(=K_1 - 2\pi M_s^2)$ 은 1차 수직자기 이방성 상수(K_1)과 정자기 에너지 (magnetostatic energy)를 모두 고려한 유효 1차 PMA 에너지이다. M_s 는 상기 자성층의 포화 자화이다. 시스템(system)의 자기에너지 (magnetic energy)를 [수학식 1]의 형태로 기술할 경우, 자성층이 $K_2 > -1/2 K_1^{\text{eff}}$ 와 $K_1^{\text{eff}} < 0$ 조건을 동시에 만족했을 때, 이지-콘이 형성된다.
- [43] 도 2a는 본 발명의 일 실시예에 따른 Pt/Co/X의 다층 박막 구조를 나타내는 모식도이다.
- [44] 도 2b는 도 2a의 Pt/Co/X의 다층 박막 구조를 가지는 홀 바 패턴(Hall bar pattern)의 사시도와 이상 홀 전압 분석 (anomalous Hall voltage measurement) 셋업의 모식도이다.
- [45] 도 2a 및 도 2b를 참조하면, 시료는 Si 기판/Ta (5 nm)/Pt (5 nm)/Co (1 nm)/X (3 nm)/Ta or Pt (3 nm) 구조이다. 비자성금속층(160)인 X층의 경우, Ti, Al, Hf, Zr, Mn 등과 같은 금속층을 포함할 수 있다. 모든 금속층들(Ta (5 nm)/Pt (5 nm)/Co (1 nm)/X (3 nm)/Ta)은 순차적으로 DC 스퍼터링을 통하여 증착되었다.
- [46] Si 기판은 습식-산화 (wet-oxidation) Si/SiO₂ 기판이다. 상기 Si 기판 상에 Ta (5 nm)의 씨앗층(110)과 Pt (5 nm)의 중금속층(20)을 형성한 후, Co (1 nm)의 자성층(150)을 형성한다. 상기 자유 자성층(150)은 Co 외에 단일 물질인 Fe나 합금인 CoFeB 등을 포함할 수 있다. 상기 자성층 상에 비자성금속층(160)에 X (3 nm)을 형성한 후, 추가적인 산화를 방지하기 위하여 Pt 또는 Ta (3 nm)의 금속 보호층(170)을 형성한다.
- [47] 각 층들은 마그네트론 스퍼터링 증착 방법을 통해 증착되었다. 스퍼터링 증착 챔버의 기저압 (base pressure)은 8×10^{-8} Torr이며, 스퍼터링 증착은 Ar 가스 주입을 통하여 2×10^{-3} Torr에서 시행하였다. 스퍼터링 증착 과정 중, 모든 층은 진공을 깨지 않은 상태에서 in-situ 로 수행되어졌으며, 각 층은 단일 타겟으로 증착하였다.
- [48] 씨앗층(110)은 Ta, Ta/Ru, Ta/Pt/Ru와 같이 Ta를 포함하여 계면 거칠기를 조절할 수 있는 단일층 혹은 그 이상의 복합층을 포함할 수 있다. 계면 거칠기는 최적의 Ta의 두께에서 최소화될 수 있다.
- [49] 박막의 두께는 증착 속도로부터 정확하게 시간을 제어함으로써 조절하였다. 박막속도를 정확하게 측정하기 위하여, 증착된 박막의 두께는 박막두께측정기 (Stylus Surface Profilometer)를 사용하여 정확하게 측정하였다. 제작된 샘플의 포화 자화 (saturation magnetization)를 측정하기 위하여 진동시료자력계(VSM: Vibrating Sample Magnetometer)를 이용하였다. 또한 1차 및 2차 자기이방성 상수를 정확하게 측정하기 위해 이상 홀 전압 분석 (anomalous Hall voltage

measurements)을 실시하였다.

- [50] 도 2b를 참조하면, 홀 바 패턴된 Pt/Co/X 시료를 360° 회전이 가능한 샘플 스테이지에 마운팅을 한 후, x 방향으로 DC 전류를 인가하고 y방향으로 홀 전압을 측정한다. 자성층(150)을 포함하는 홀 바 구조에 외부자기장 (H_{ext})을 인가한 상태에서 홀 전압 분석(Hall Voltage Analysis)을 실시할 경우, 외부자기장 (H_{ext})에 따른 자화의 z축 성분 (m_z)의 변화에 대한 정보를 얻을 수 있다. 측정 시, 자화의 단자구 (single domain) 거동을 유도하기 위해 외부자기장 (H_{ext})의 극각 (θ_H)을 80°로 설정한다. 극각 (θ_H)은 외부 자기장의 방향과 박막의 법선 방향(z축 방향) 사이의 각도이다.
- [51] 도 3a은 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 m_z - H_{ext} 그래프이다.
- [52] 도 3b는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 $\alpha H_{ext} - (1 - m_z^2)$ 그래프이다.
- [53] 도 3a를 참조하면, 홀 전압 분석을 실시함으로써 Pt/Co/X에 대한 m_z - H_{ext} 그래프를 얻을 수 있다. 해당 그래프는 1차 자기이방성 상수(K_1) 및 2차 자기이방성 상수(K_2)에 대한 정보를 제공한다.
- [54] 도 3a로부터, 각 샘플의 유효 1차 PMA 필드 (H_{K1}^{eff})와 2차 PMA 필드 (H_{K2})를 추출하기 위해서, generalized Sucksmith-Thompson (GST) 방법을 활용한다. GST 방법을 활용하기 위해, [수학식 1]에서 추가로 제이만 에너지 (Zeeman energy)를 고려하여 다음과 같은 식을 (최소 에너지 조건을 가정하여) 유도한다.
- [55] [수학식 2]
- [56]
- $$\alpha H_{ext} = H_{K1}^{eff} + H_{K2}(1 - m_z^2), \quad \alpha = \frac{m_z \sin \theta_H - \sqrt{1 - m_z^2} \cos \theta_H}{m_z \sqrt{1 - m_z^2}}$$
- [57] 여기서, α 는 m_z 와 θ_H 에 의해 결정되는 변수이다. m_z 는 자화의 z축 성분이고, θ_H 는 외부 자기장의 방향과 박막의 법선 방향(z축 방향) 사이의 각도이다.
- [58] [수학식 2]는 H_{K1}^{eff} 와 H_{K2} 를 추출하기 위해 사용한다.
- [59] 도 3b를 참조하면, m_z - H_{ext} 그래프를 $\alpha H_{ext} - (1 - m_z^2)$ 로 도시하면 [수학식 2]의 형태로 변환된다.
- [60] 도 3b 와 [수학식 2]에 의하면, y 절편으로부터 H_{K1}^{eff} , 기울기로부터 H_{K2} 값을 각각 예측할 수 있다.
- [61] 도 3b를 참조하면, 자성층(150)인 Co 위에 적층된 비자성금속 X에 따라 기울기의 크기와 부호가 달라진다. 비자성금속층(160)의 X에 따라 2차 PMA 에너지가 변화하고 있음을 의미한다.
- [62] 1차 수직 이방성 상수(K_1)는 유효 1차 PMA 필드 (H_{K1}^{eff})와 다음과 같이 주어진다.
- [63] $K_1 = M_s H_{K1}^{eff} / 2 + 2\pi M_s^2$
- [64] 2차 수직 이방성 상수(K_2)는 2차 PMA 필드 (H_{K2})와 다음과 같이 주어진다.

- [65] $K_2 = M_s H_{K_2} / 4$
- [66] 도 4a는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/Cu에 대한 구조를 나타내는 모식도이다.
- [67] 도 4b는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/Cu에 대한 K_1-1/t_{Co} 그래프이다.
- [68] 도 4c는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/Cu에 대한 K_2-1/t_{Co} 그래프이다.
- [69] 도 4a를 참조하면, 시료는 Si 기판/Ta (5 nm)/Pt (5 nm)/Co (t_{Co})/Cu (3 nm)/Ta (3 nm) 구조이다. 시료는 Si 기판 상에 씨앗층(110)/중금속층(20)/자성층(150)/비자성금속층(60)/금속 보호층(170)을 포함할 수 있다.
- [70] 중금속층(Pt (5 nm)) 상에 자성층(Co)의 두께(t_{Co})에 변화를 주어 1차 수직이방성 상수(K_1)와 2차 수직 이방성 상수(K_2)를 벌크에 의한 기여와 계면에 의한 기여로 분리할 수 있다.
- [71] 1차 수직이방성 상수(K_1)는 벌크 성분과 계면 성분으로 분리될 수 있다. $K_1 = K_1^v + K_1^i/t_{Co}$ 로 표시된다.
- [72] 2차 수직이방성 상수(K_2)는 벌크 성분과 계면 성분으로 분리될 수 있다. $K_2 = K_2^v + K_2^i/t_{Co}$ 로 표시된다. 여기서 K_n^v ($n=1,2,\dots$)는 n 차 PMA 에너지의 벌크 성분이고, K_n^i ($n=1,2,\dots$)는 n 차 PMA 에너지의 계면 성분이다.
- [73] 도 4b를 참조하면, K_1-1/t_{Co} 그래프로부터 Pt/Co/Cu 시료의 K_1^i 와 K_1^v 를 구할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/Cu의 경우, $K_1^i = 1.01 \pm 0.04 \text{ erg/cm}^2$ 와 $K_1^v = 0.96 \pm 0.29 \text{ Merg/cm}^3$ 의 값을 갖는다. Pt/Co (1 nm)/Cu 시료의 경우, 계면 성분이 벌크 성분보다 1차 수직이방성 상수(K_1)에 기여하는 바가 더 크다.
- [74] 도 4c를 참조하면, K_2-1/t_{Co} 그래프로부터 Pt/Co/Cu 시료의 K_2^i 와 K_2^v 를 구할 수 있다. 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/Cu의 경우, $K_2^i = -0.02 \pm 0.006 \text{ erg/cm}^2$ 와 $K_2^v = 0.14 \pm 0.04 \text{ Merg/cm}^3$ 의 값을 갖는다. Pt/Co (1 nm)/Cu 시료의 경우, 음의 K_2 값이 계면에 의해 발현된다.
- [75] 도 4b 내지 도 4c를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X의 경우, 계면이 벌크에 비해 K_1 과 K_2 에너지 형성에 기여하는 바가 더 크다.
- [76] $K_1 (=K_1^v + K_1^i/t_{Co})$ 과 $K_2 (=K_2^v + K_2^i/t_{Co})$ 의 현상학적인 관계에 의하면 Pt/Co/X 구조의 경우, t_{Co} 를 조절하여 자기이방성을 조절할 수 있다.
- [77] K.-W. Kim et al.[Phys. Rev. B 94, 184402 (2016)]에 의하면, 자기이방성은 계면 라쉬바 효과 (interfacial Rashba effect)에 의해 발현될 수 있다. 라쉬바 해밀토니언 (Rashba hamiltonian)은 다음과 같은 식으로 기술된다.
- [78] [수학식 3]

[79]
$$H_R = \alpha_R(\mathbf{p} \times \hat{\mathbf{z}}) \cdot \boldsymbol{\sigma}$$

[80] 여기서 α_R 은 라쉬바 상수, $\mathbf{p}$ 는 모멘텀, 그리고 $\boldsymbol{\sigma}$ 는 파울리 스핀 행렬 (Pauli spin matrix)이다. 라쉬바 효과는 α_R 의 크기에 비례하고, 그 크기는 다음과 같은 식으로 기술될 수 있다 [M. Nagano et al., J. Phys.: Condens. Matter 21, 064239 (2009)].

[81] 라쉬바 상수의 크기를 나타내는 식은 다음과 같이 기술된다.

[82] [수학식 4]

[83]
$$\alpha_R = \left(\frac{2}{c^2}\right) \int (\partial V / \partial z) |\psi|^2 dz$$

[84] 여기서 c 는 빛의 속력, $(\partial V / \partial z)$ 는 계면 포텐셜 그라디언트 (surface potential gradient), 그리고 $|\psi|^2$ 는 전자밀도 (electron density distribution)를 나타낸다.

[85] [수학식 4]를 참조하면, 라쉬바 효과는 계면 포텐셜 그라디언트에 비례할 수 있다.

[86] 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X의 경우, 계면 포텐셜 그라디언트는 Pt/Co와 Co/X 계면에서 형성될 수 있다.

[87] 그러나 본 실시예의 경우, 비자성금속 X에 따라 K_1 과 K_2 값이 변화하고 있기 때문에, 이러한 변화는 Co/X 계면에 의한 것임을 예측할 수 있다. Co/X 계면에서의 계면 포텐셜 그라디언트는 자성층(Co)과 비자성금속(X)의 일함수 차이로 예측할 수 있다.

[88] 도 5a는 본 발명의 일 실시예에 따른 단일층 구조인 X에 대한 구조를 나타내는 모식도이다.

[89] 도 5b는 본 발명의 일 실시예에 따른 단일층 구조인 X에 대한 자외선 광전자 분광법 스펙트럼에서 2차 전자 컷오프 (secondary electron cutoff) 영역 및 페르미 엣지 (Fermi edge) 영역을 나타낸다.

[90] 도 5a를 참조하면, 시료는 Si 기판/X (5 nm) 단일층 구조이다. 비자성금속 X의 일함수를 측정하기 위해 자외선 광전자 분광법 (Ultraviolet photoelectron spectroscopy; UPS)을 활용한다. 비자성금속의 일함수를 측정할 때 챔버의 기저압은 2×10^{-8} Torr이며, 광원은 He I (21.2 eV)을 사용하고, 샘플에 -15 V의 바이어스를 인가한다. 자외선 광전자 분광법 측정에 활용된 시편의 경우 금속보호층이 포함되어 있지 않기 때문에 자외선 광전자 분광법(UPS)의 측정에 앞서 Ar 스퍼터링을 실시하였다. 여기서 Ar 스퍼터링은 비자성금속 X층의 페르미 엣지 영역에서 시그널이 관측될 때까지 실시한다.

[91] 도 5b를 참조하면, 단일층 X의 자외선 광전자 분광법 측정 결과이다. 도 5b의 경우, 2차전자 컷오프 영역 및 페르미 엣지 영역(Fermi edge region)을 확대한 것이다. 운동에너지가 가장 작은 전자($E_{K,min}$)는 2차 전자 컷오프 영역에 기여하고, 운동 에너지가 가장 큰 전자 ($E_{K,max}$)는 페르미 엣지 영역의 신호에 기여한다. 따라서, 다음의 관계를 통해 금속의 일함수(W)를 구할 수 있다.

- [92] [수학식 5]
- [93] $W = h\nu - (E_{K,max} - E_{K,min})$
- [94] 여기서, W 는 비자성 금속의 일함수이고, E_K 는 전자의 운동에너지이다. ν 는 자외선의 진동수이다.
- [95] 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 비자성 금속에 따른 일함수를 나타내는 결과이다.
- [96] 도 6을 참조하면, W_{meas} 는 UPS로 측정한 일함수 측정값이며, W 는 문헌값이다.
- [97] 도 6을 참조하면, $W_{meas}(Co) - W_{meas}(X)$ 를 통해 Co/X 계면에서의 일함수 차이(ΔW_{meas})를 구할 수 있다. 일함수 차이(ΔW_{meas})는 Co/X 계면에서의 $(\partial V / \partial z)$ 를 의미한다. 따라서, [수학식 4]에 의해 이를 α_R 과 관련지을 수 있다. 즉, Co/X 계면에서 라쉬바 효과에 의해 K_1 과 K_2 에너지가 형성된다면, ΔW_{meas} 와 자기이방성 상수는 강한 상관관계를 보일 것이다.
- [98] 도 7a는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 $K_1 - \Delta W_{meas}$ 그래프이다.
- [99] 도 7b는 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 $K_2 - \Delta W_{meas}$ 그래프이다.
- [100] 도 7a 내지 도 7b를 참조하면, K_1 과 K_2 에너지 모두 ΔW_{meas} 와 강한 상관관계를 보인다. K_1 과 ΔW_{meas} 사이에서 0.81, K_2 와 ΔW_{meas} 사이에서 -0.94의 상관관계 계수(Pearson's correlation coefficient)가 관측되었다. 이러한 결과로 미루어보아 K_1 과 K_2 는 모두 라쉬바 효과의 영향을 받고 있다는 것을 짐작할 수 있다. 더 나아가 실용적인 관점에서 이러한 결과는 매우 중요하다. 그 이유는 ΔW_{meas} 의 조절을 통해 K_1 과 K_2 의 크기와 부호를 제어할 수 있다는 가능성을 제시하기 때문이다. 비자성 금속 X는 Ta, W, Mo, Cu, Ru, Pd, Pt일 수 있다. 이 경우, K_1 은 Ta, W, Mo, Cu, Ru, Pd, Pt에 대하여 양의 값을 가진다. 한편, K_2 는 Ta, W, Mo에 대하여 양의 값을 가진다. 자성층(Co)의 이지 콘 상태를 구현하기 위하여, 자성층이 $K_2 > -1/2K_1^{eff}$ 와 $K_1^{eff} < 0$ 조건을 요구한다. 한편, 이지-콘 상태를 만족하기 위하여, K_2 는 Ta보다 큰 값을 가진 물질이 요구된다.
- [101] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 삼층구조인 Pt/Co/X에 대한 $K_2 - \Delta W_{meas}$ 그래프이다.
- [102] 도 8을 참조하면, 비자성금속으로 Ti, Al, Hf, Zr, 그리고 Mn을 삽입했을 때 예상 가능한 K_2 값을 별 기호로 나타낸다. 동그라미는 실제 실험값을 의미한다.
- [103] 자성층(Co)과 일함수 차이가 큰 비자성금속(Ti, Al, Hf, Zr, 또는 Mn)을 삽입함으로써 K_2 의 크기를 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다. 자성층의 일함수에서 비자성 금속층의 일함수를 뺀 일함수 차이는 -0.5 eV 내지 -1.5 eV일 수 있다.
- [104] 여기서 Ti, Al, Hf, Zr, 그리고 Mn의 일함수는 문헌값을 참고하였다 [H. B. Michaelson, J. Appl. Phys. 48, 4729 (1977), Y.-K. Park et al., NPG Asia Mater. 10,

995 (2018)]. 예를 들어, 자유 자성층 Co 상에 비자성 금속 Ti층을 삽입할 경우, Co/Ti 계면에서의 강한 음의 ΔW_{meas} 으로 인해 큰 양의 K_2 값을 기대할 수 있을 것이다. K_2 가 큰 양의 값을 가질 경우, 강한 이지-콘 이방성을 가질 뿐만 아니라, 이지-콘 상태를 보이는 자성층의 두께 범위가 늘어날 수 있다. 이에 따라, 자성층의 두께를 증가시키면, K_{eff} 를 음의 값으로 감소시키면서, 열적 안정성을 증가시킬 수 있다.

- [105] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기터널 접합 소자를 나타내는 단면도이다.
- [106] 도 8를 참조하면, 자기터널 접합 소자(100)는 고정된 자화 방향을 가지는 고정 자성층(130); 상기 고정 자성층(130) 상에 배치되고 자화 방향을 스위칭하는 자유 자성층(150); 상기 고정 자성층(130)과 상기 자유 자성층 사이에 배치된 터널 절연층(140); 상기 자유 자성층(150) 상에 배치된 비자성 금속층(160); 및 상기 비자성 금속층(160) 상에 배치된 금속 보호층(170)을 포함한다. 상기 자유 자성층(150)의 자화 상태는 이지 콘 상태이고, 상기 자유 자성층(150)의 일함수에서 상기 비자성 금속층(160)의 일함수를 뺀 일함수 차이는 -0.5 eV 내지 -1.5 eV를 가진다.
- [107] 상기 자기터널 접합 소자(100)는 스핀전달토크 자기랜덤액세스 메모리(STT-MRAM)을 구성할 수 있다. 상기 터널 절연층(140)은 MgO이고, 상기 자유 자성층(150)은 Co이고, 상기 자유 자성층(150)의 자화 상태는 이지-콘 상태를 가지고, 상기 자유 자성층(150)은 음의 K_1^{eff} 및 양의 K_2 를 가지고, 상기 비자성 금속층(160)은 Ti, Al, Hf, Mn, Zr일 수 있다. 또는 상기 비자성 금속층(160)은 Ta, W, Mo 일 수 있다. 음의 K_1^{eff} 를 위하여, 상기 자유 자성층(150)의 두께는 증가될 수 있다.
- [108] 상기 자기터널 접합 소자(100)는 Si 기판/Ta(5 nm)/[Pt (0.25 nm)/Co (0.5 nm)]_n/Ru (0.4 nm)/[Pt (0.25 nm)/Co (0.5 nm)]_n/CoFeB (1 nm)/MgO (1.6 nm)/Co (t_{Co})/X (3 nm)/Ta (3 nm) 구조일 수 있다.
- [109] 상기 자기터널 접합 소자(100)는 Si 기판 상에 차례로 적층된 씨앗층(110), 인위적 반강자성층(120), 고정 자성층(130), 터널 절연층(140), 자유 자성층(150), 비자성 금속층(160), 및 금속 보호층(170)을 포함할 수 있다.
- [110] 씨앗층(110)은 Si 기판 상에 배치될 수 있다. 상기 씨앗층(110)은 Ta(5 nm)일 수 있다.
- [111] 상기 인위적 반강자성층(synthetic antiferromagnet; SAF; 120)은 상기 고정 자성층의 자화 방향을 고정시킬 수 있다. 상기 인위적 반강자성층(120)은 [Pt/Co]_n의 하부 다층 박막(122), Ru 도전성 스페이서층(124), 및 [Pt/Co]_n의 상부 다층 박막(126)을 포함할 수 있다. 상기 인위적 반강자성층(120)은 [Pt (0.25 nm)/Co (0.5 nm)]_n/Ru (0.4 nm)/[Pt (0.25 nm)/Co (0.5 nm)]_n 구조일 수 있다.
- [112] 고정 자성층(130)은 상기 인위적 반강자성층(120) 상에 배치될 수 있다. 상기 고정 자성층은 CoFeB (1nm)일 수 있다. 상기 고정 자성층은 수직 자기 이방성을

가지고 수직으로 자화될 수 있다. 상기 고정 자성층(130)의 재질은 Co, Fe, Ni 및 이들 중에서 적어도 하나를 포함하는 합금일 수 있다. 구체적으로, 상기 고정 자성층은 CoFeB일 수 있다.

[113] 상기 터널 절연층(140)은 MgO(1.6 nm)이고, 상기 터널 절연층(140)은 RF 스퍼터링으로 형성될 수 있다. 상기 터널 절연(140)층 상에는 자유 자성층(150)이 배치될 수 있다.

[114] 상기 자유 자성층(150)은 Co, Fe, Ni 및 이들 중에서 적어도 하나를 포함하는 합금일 수 있다. 상기 자유 자성층(150)의 두께는 1.0 nm 내지 2.0 nm이다. 상기 자유 자성층 상에는 일함수 차이가 큰 비자성금속이 배치될 수 있다. 상기 자유 자성층(150)의 두께는 음의 K_1^{eff} 를 가지도록 선택될 수 있다. 상기 자유 자성층은 증착과 동시에 또는 후속 열처리에 의하여 이지-콘 상태로 정렬될 수 있다.

[115] 상기 비자성금속층(160)은 Ti, Al, Hf, Zr, 그리고 Mn을 포함할 수 있다. 상기 자유 자성층의 자화는 상기 비자성금속의 증착과 동시에 또는 후열처리에 의하여 이지-콘 상태로 정렬될 수 있다. 상기 비자성금속층(160)은 상기 자유 자성층(150)이 양의 K_2 를 가지도록 선택될 수 있다. 또는 상기 비자성금속층(160)은 Ta, W, Mo 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 자유 자성층의 일함수에서 상기 비자성 금속층의 일함수를 뺀 일함수 차이는 -0.5 eV 내지 -1.5 eV를 가지도록, 상기 비자성금속층(160)은 선택될 수 있다.

[116] 금속 보호층(170)은 상기 비자성금속층(160) 상에 배치될 수 있다. 상기 보호층(170)은 Ta 또는 W일 수 있다. 금속 보호층(170)은 상기 비자성 금속층(160)과 서로 다른 재질일 수 있다.

[117] 상기 자유 자성층(150)은 평형 극각 (θ_E)을 가지고 이지-콘 상태를 가질 수 있다. 이에 따라, STT-MRAM의 스위칭 시간 (t_{sw})을 지배하는 인큐베이션 (incubation) 시간을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 이로 인해 스위칭 전류 밀도 (J_{sw})가 감소될 수 있다. 다만, 상기 이지-콘 상태의 자유 자성층의 극각(θ_E)에 의한 터널자기저항 (tunneling magnetoresistance; TMR)이 감소하여, 독출 (read-out) 효율이 감소할 수 있다. 터널자기저항의 감소(ΔTMR)는 수직자기 이방성을 가진 자유 자성층의 터널 자기저항과 이지-콘을 가진 자유 자성층의 터널 자기 저항의 차이일 수 있다. 그러나 $\Delta\text{TMR} \propto \cos\theta_{\text{rel}}$ (여기서 θ_{rel} 은 고정 자성층과 자유 자성층의 극각 차이)의 관계를 가지기 때문에 터널자기저항의 감소는 경미한 수준이다. 시뮬레이션 결과[R. Matsumoto et al., Appl. Phys. Express 8, 063007 (2015)]에 의하면 상기 자유 자성층이 이지-콘 상태를 가지는 경우, STT-MRAM의 열안전성 (thermal stability factor; Δ)은 기존의 수준으로 유지하되, 자화 스위칭을 위한 임계전류(J_{sw})를 22%, t_{sw} 를 56% 경감시킬 수 있다. 이러한 특성 개선은 단지 8%에 불과한 ΔTMR 의 감소에 의한 것이다.

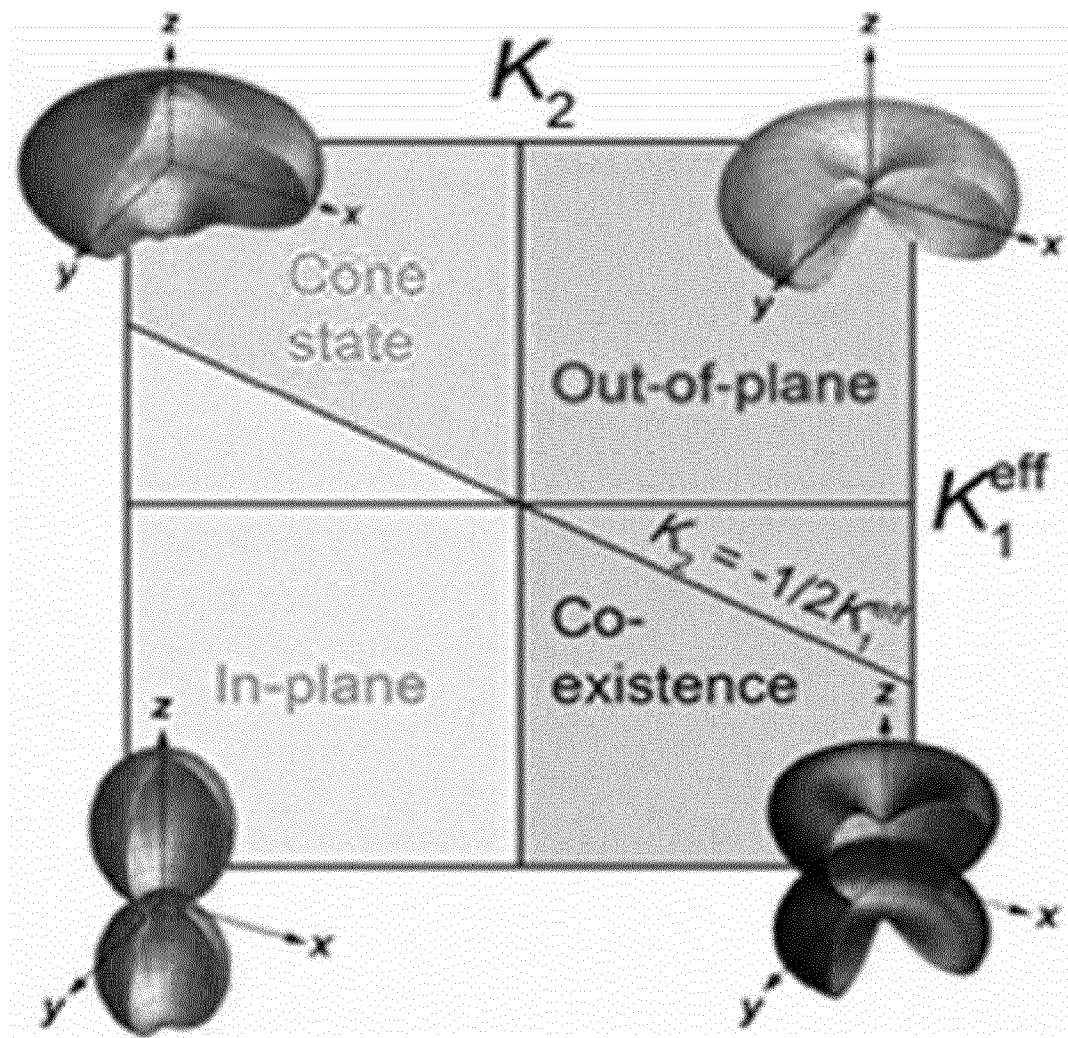
[118] 이상에서는 본 발명을 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 이러한 실시예에 한정되지 않으며, 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의

기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 실시할 수 있는 다양한 형태의 실시예들을 모두 포함한다.

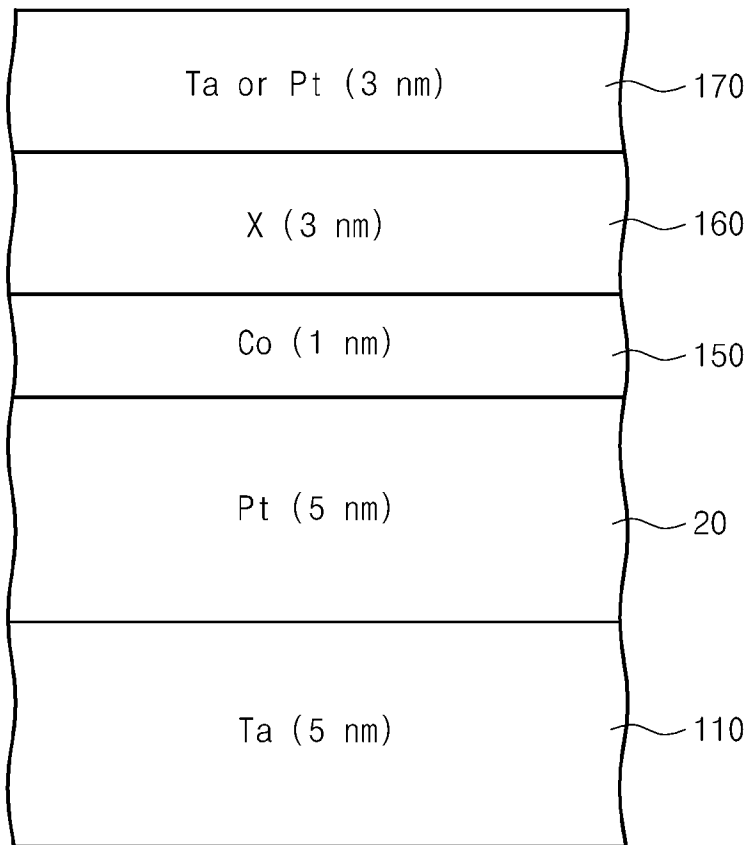
청구범위

- [청구항 1] 고정된 자화 방향을 가지는 고정 자성층;
 상기 고정 자성층 상에 배치되고 자화 방향을 스위칭하는 자유 자성층;
 상기 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 배치된 터널 절연층;
 상기 자유 자성층 상에 배치된 비자성 금속층; 및
 상기 비자성 금속층 상에 배치된 금속 보호층을 포함하고,
 상기 자유 자성층의 자화 상태는 이지 콘 상태이고,
 상기 자유 자성층의 일함수에서 상기 비자성 금속층의 일함수를 뺀
 일함수 차이는 -0.5 eV 내지 -1.5 eV를 가지는 것을 특징으로 하는 자기
 터널 접합 소자.
- [청구항 2] 제1 항에 있어서,
 상기 비자성 금속층은 Ti, Al, Hf, Zr, Mn 중에서 적어도 하나를 포함하는
 것을 특징으로 하는 자기 터널 접합 소자.
- [청구항 3] 제1 항에 있어서,
 상기 비자성 금속층은 Ta, W, Mo 중에서 적어도 하나를 포함하는 것을
 특징으로 하는 자기 터널 접합 소자.
- [청구항 4] 제1 항에 있어서,
 상기 자유 자성층은 Co이고,
 상기 자유 자성층의 두께는 1.0 nm 내지 2.0 nm인 것을 특징으로 하는
 자기 터널 접합 소자.
- [청구항 5] 제1 항에 있어서,
 실리콘 기판 상에 배치된 씨앗층; 및
 상기 씨앗층 상에 배치된 인위적 반강자성층을 더 포함하고,
 상기 인위적 반강자성층 상에 상기 고정 자성층이 배치된 것을 특징으로
 하는 자기 터널 접합 소자.
- [청구항 6] 제1 항에 있어서,
 상기 자유 자성층은 증착과 동시에 또는 후속 열처리에 의하여 이지 콘
 상태로 정렬되는 것을 특징으로 하는 자기 터널 접합 소자.

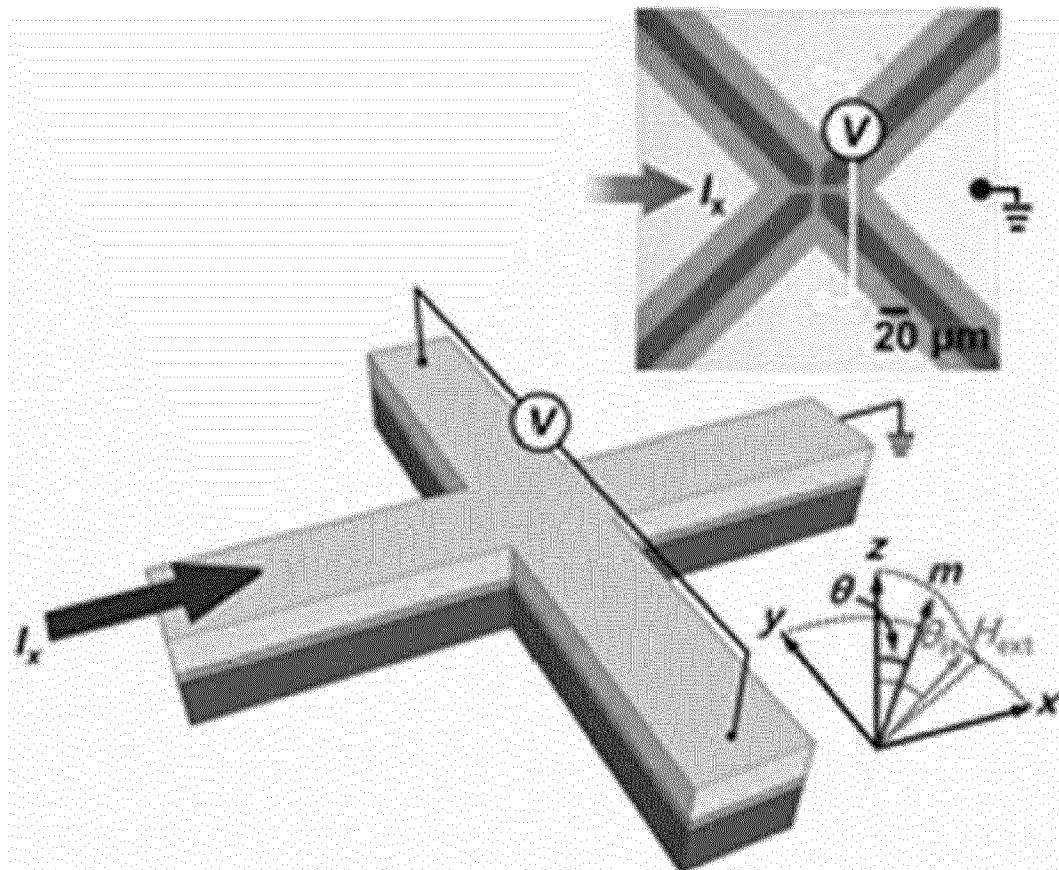
[도1]



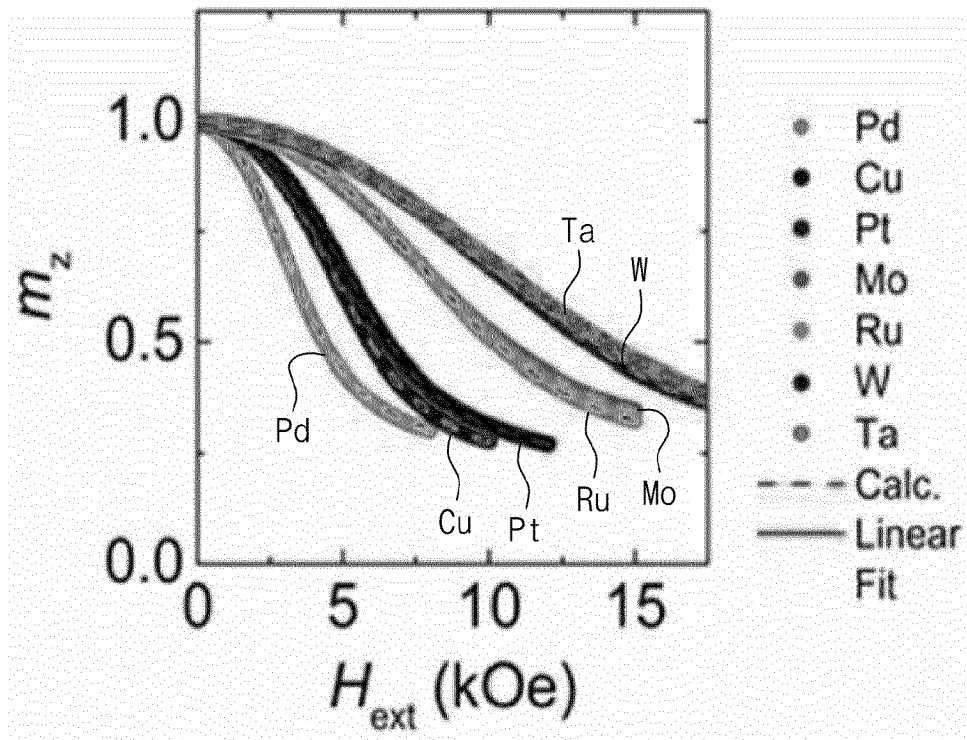
[도2a]



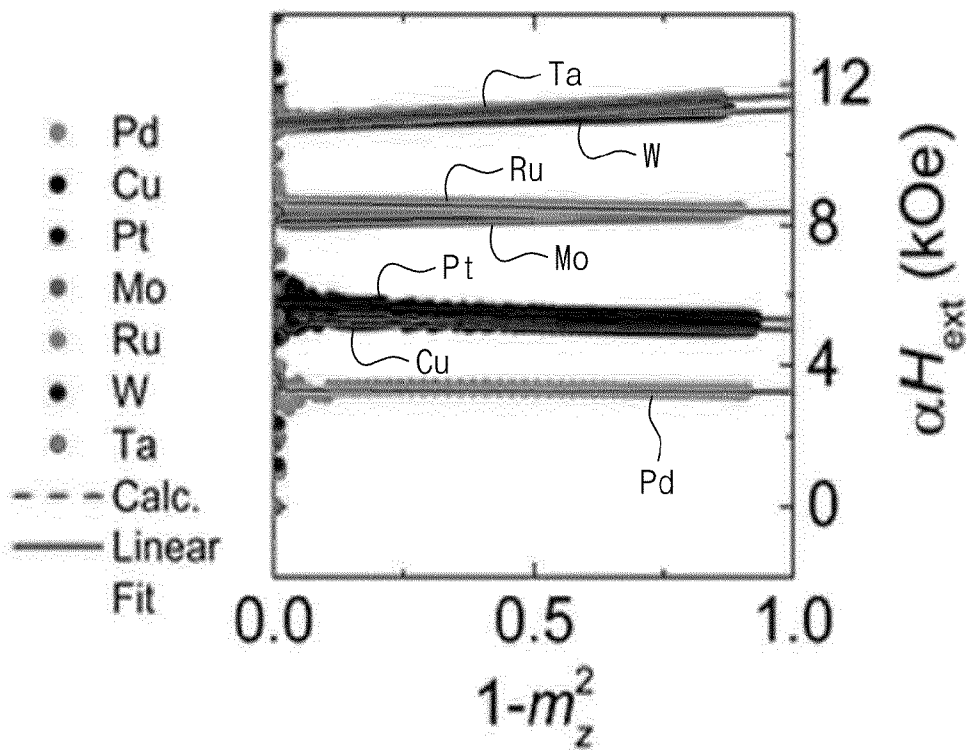
[도2b]



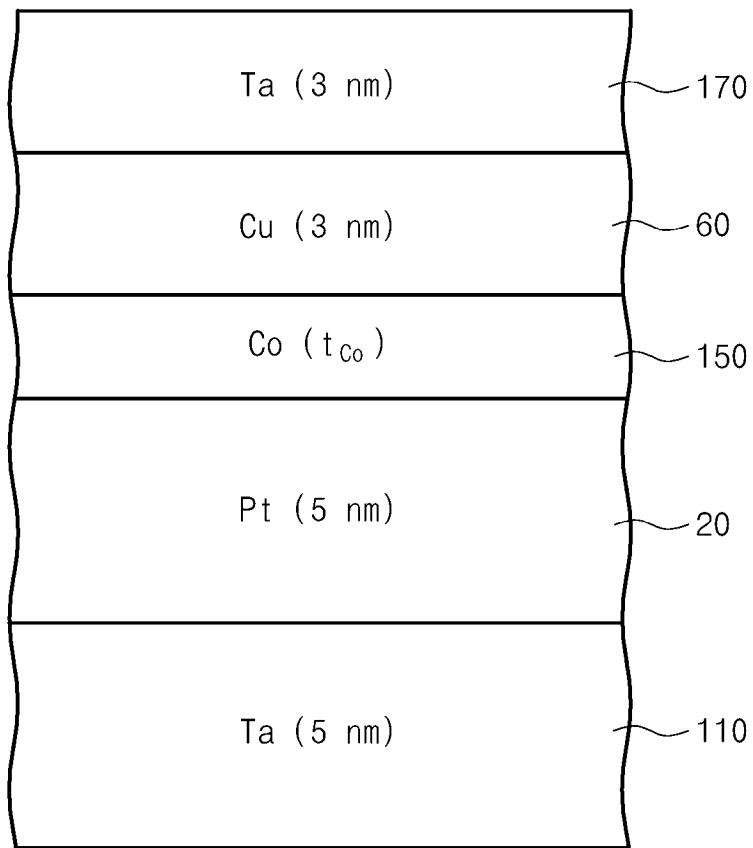
[도3a]



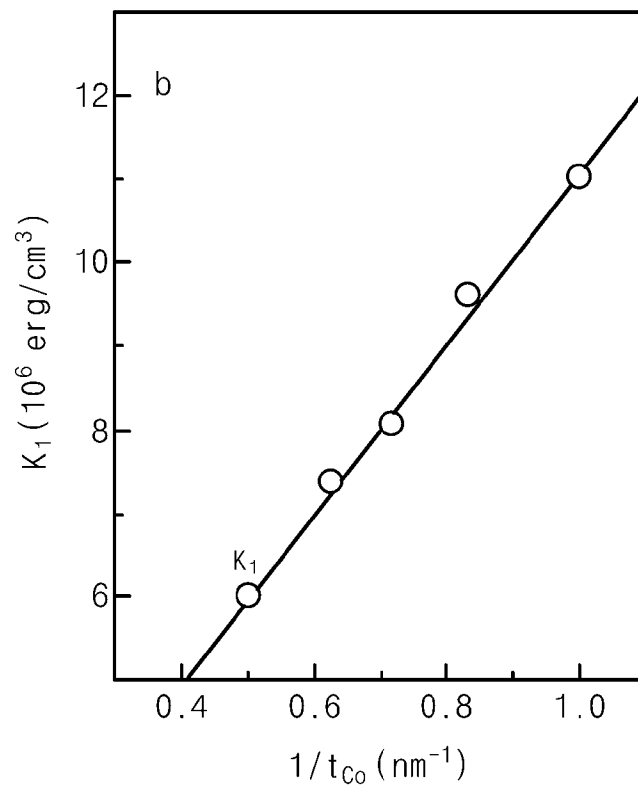
[도3b]



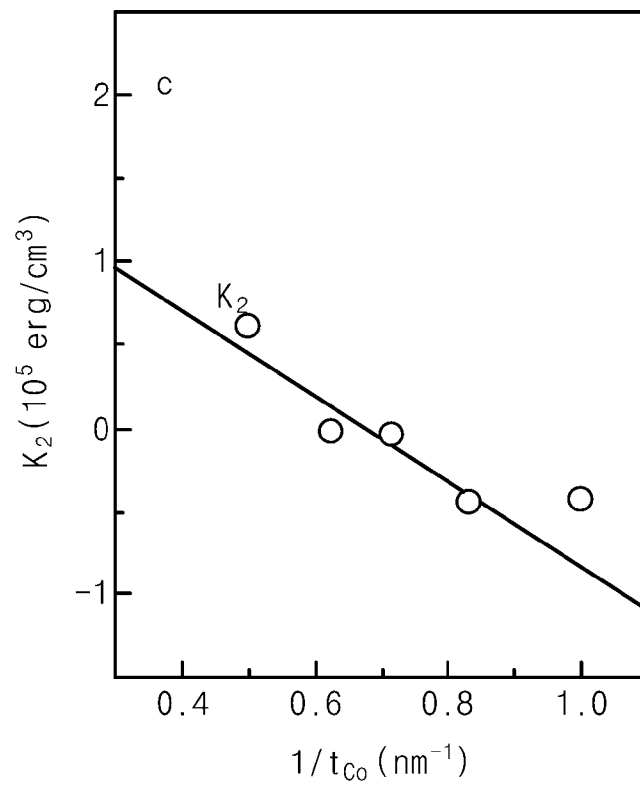
[도4a]



[도4b]



[도4c]



[도5a]

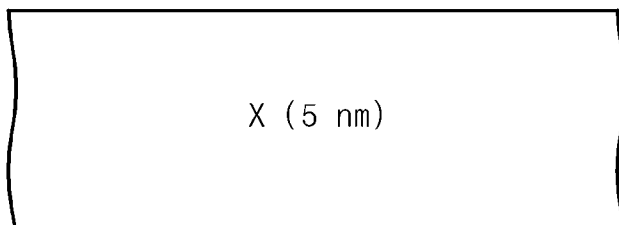
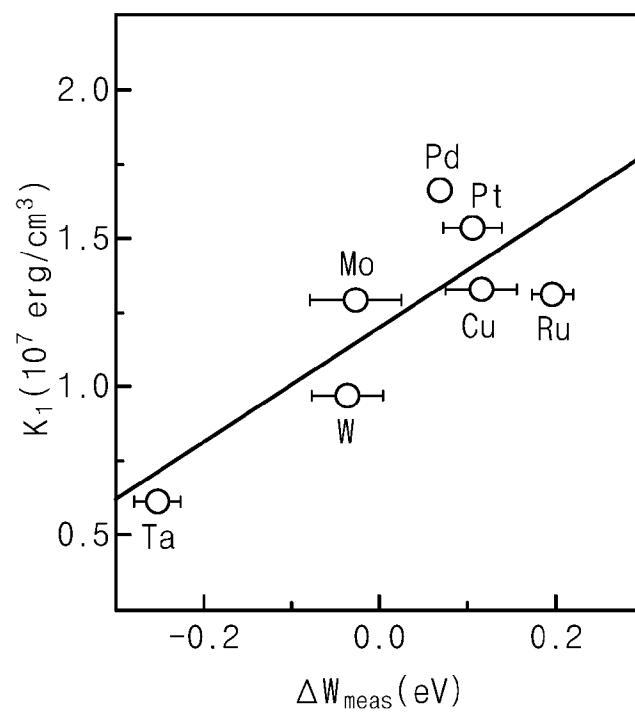


Figure 1 consists of two panels showing normalized intensity (a.u.) versus energy relative to the Fermi level (E w.r.t E_F in eV). The left panel, labeled 'Secondary electron cutoff region', shows the energy range from 17 eV to 15 eV. The right panel, labeled 'Fermi edge region', shows the energy range from 1 eV to -1 eV. Both panels display curves for Ta, W, Mo, Co, Pd, Pt, Cu, and Ru. The curves are vertically offset for clarity. In the secondary electron cutoff region, the intensity increases as energy decreases. In the Fermi edge region, the intensity drops sharply at the Fermi level (0 eV) for most metals, with Ta showing a more gradual transition.

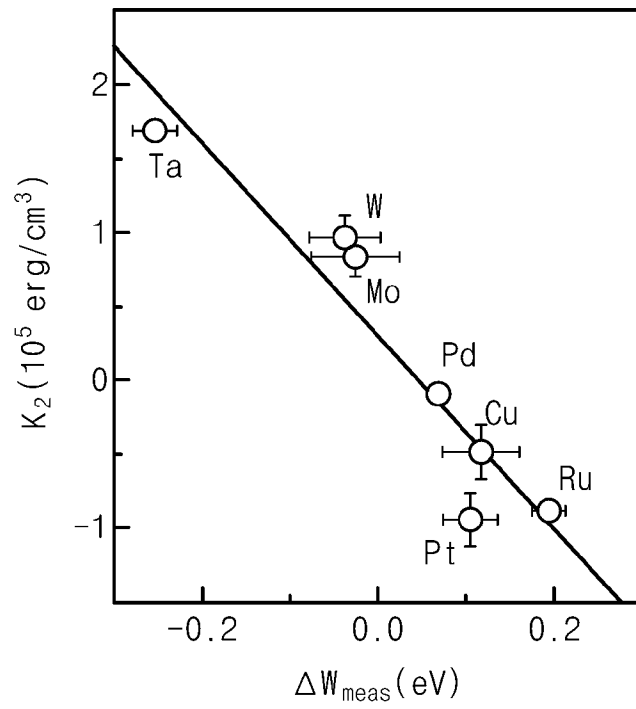
[도6]

X	W_{meas} (eV)	W (eV)
Ru	4.82 ± 0.02	4.85 ± 0.27
Cu	4.75 ± 0.04	4.65 ± 0.20
Pt	4.74 ± 0.03	5.68 ± 0.24
Pd	4.70 ± 0.01	5.35 ± 0.29
Co	4.63 ± 0.05	4.69 ± 0.27
Mo	4.60 ± 0.05	4.99 ± 0.17
W	4.59 ± 0.05	4.80 ± 0.56
Ta	4.38 ± 0.03	4.37 ± 0.31

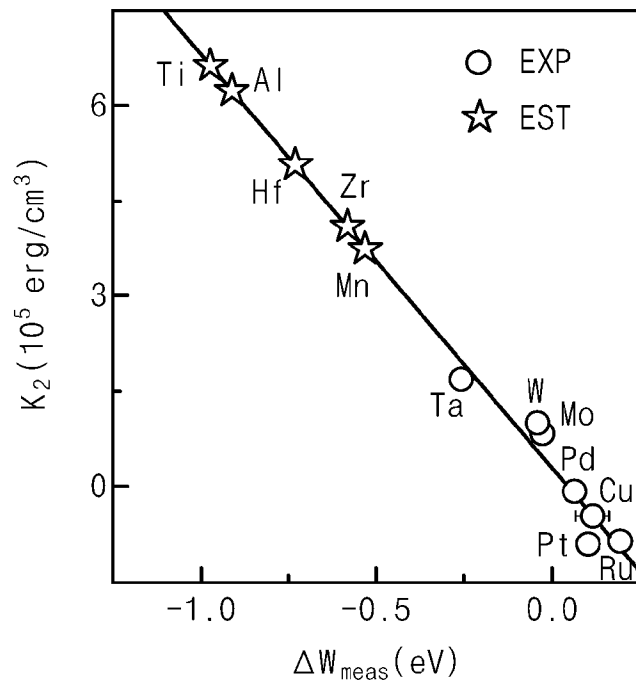
[도7a]



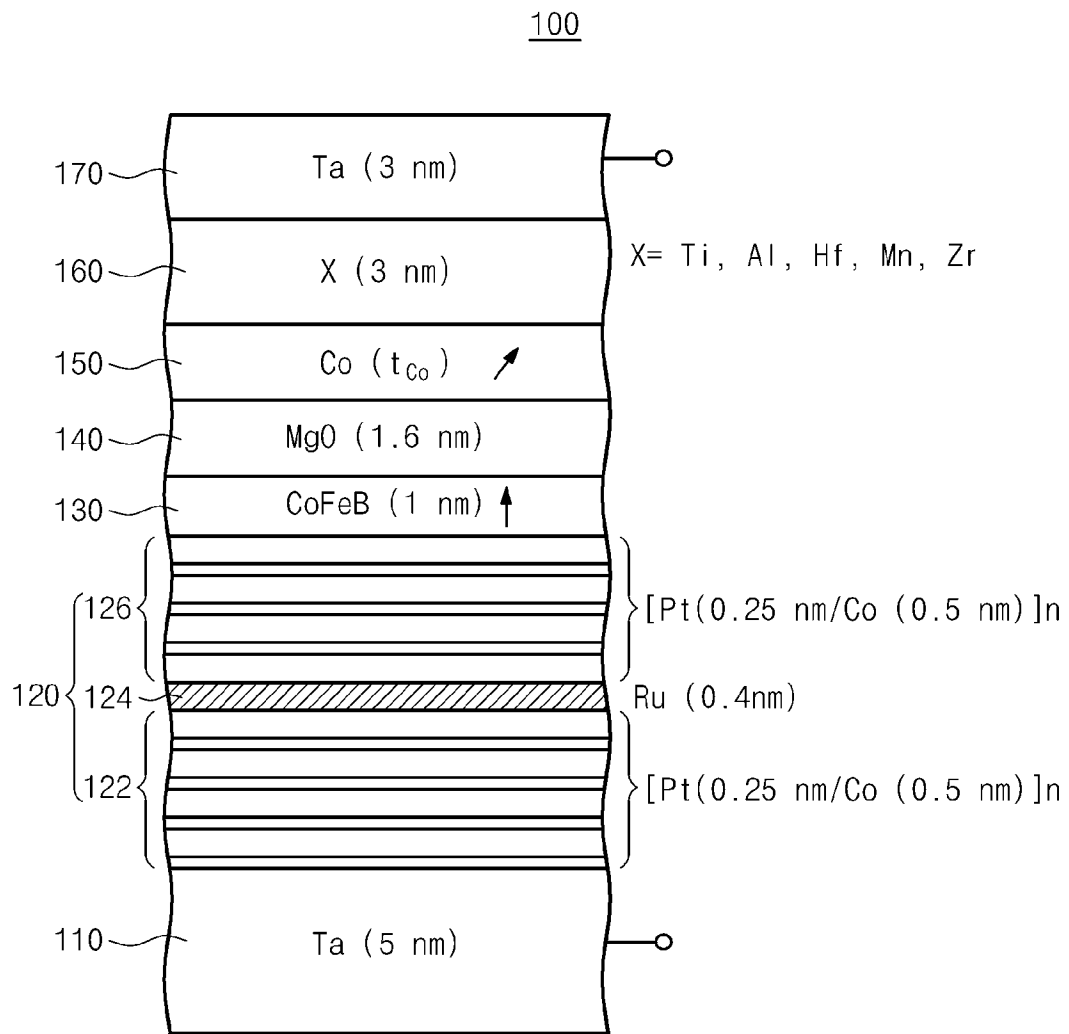
[도7b]



[도8]



[도9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/KR2020/005085

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L 43/08(2006.01)i, H01L 43/10(2006.01)i, H01L 43/02(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L 43/08; H01L 21/8239; H01L 27/105; H01L 43/10; H01L 43/12; H03B 15/00; H01L 43/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Korean utility models and applications for utility models: IPC as above

Japanese utility models and applications for utility models: IPC as above

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

eKOMPASS (KIPO internal) & Keywords: magnetic tunnel junction, free layer, fixed layer, non-magnetic metallayer, tunneling barrier layer

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	KR 10-2017-0113717 A (IUCF-HYU (INDUSTRY-UNIVERSITY COOPERATION FOUNDATION HANYANG UNIVERSITY)) 13 October 2017 See paragraphs [0008], [0009], [0059]-[0084], claim 11 and figure 5.	1-6
Y	KR 10-1897916 B1 (KOREA UNIVERSITY RESEARCH AND BUSINESS FOUNDATION) 31 October 2018 See paragraphs [0021]-[0034] and claims 1, 2.	1-6
Y	JP 2019-506745 A (SPIN MEMORY, INC.) 07 March 2019 See paragraphs [0006]-[0008], [0026] and figure 1.	5
A	KR 10-1018502 B1 (INHA UNIVERSITY RESEARCH AND BUSINESS FOUNDATION) 03 March 2011 See paragraphs [0025]-[0031] and figures 3, 4.	1-6
A	US 2013-0314166 A1 (KOREA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 28 November 2013 See paragraphs [0030]-[0041] and figure 1.	1-6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 JULY 2020 (15.07.2020)

Date of mailing of the international search report

15 JULY 2020 (15.07.2020)

Name and mailing address of the ISA/KR

Korean Intellectual Property Office
Government Complex Daejeon Building 4, 189, Cheongsu-ro, Seo-gu,
Daejeon, 35208, Republic of Korea

Facsimile No. +82-42-481-8578

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/KR2020/005085

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member	Publication date
KR 10-2017-0113717 A	13/10/2017	US 10559745 B2	11/02/2020
		US 2019-0044056 A1	07/02/2019
		WO 2017-164646 A2	28/09/2017
		WO 2017-164646 A3	07/09/2018
KR 10-1897916 B1	31/10/2018	CN 109564968 A	02/04/2019
		US 2019-0140164 A1	09/05/2019
		WO 2018-236121 A1	27/12/2018
JP 2019-506745 A	07/03/2019	CN 108604632 A	28/09/2018
		KR 10-2018-0100065 A	06/09/2018
		US 10381553 B2	13/08/2019
		US 10643680 B2	05/05/2020
		US 2017-0222132 A1	03/08/2017
		US 2017-0324029 A1	09/11/2017
		US 2019-0006582 A1	03/01/2019
		US 9741926 B1	22/08/2017
		WO 2017-131894 A1	03/08/2017
KR 10-1018502 B1	03/03/2011	None	
US 2013-0314166 A1	28/11/2013	KR 10-1356769 B1	28/01/2014
		KR 10-2013-0131760 A	04/12/2013
		US 9083279 B2	14/07/2015

A. 발명이 속하는 기술분류(국제특허분류(IPC))

H01L 43/08(2006.01)i, H01L 43/10(2006.01)i, H01L 43/02(2006.01)i

B. 조사된 분야

조사된 최소문헌(국제특허분류를 기재)

H01L 43/08; H01L 21/8239; H01L 27/105; H01L 43/10; H01L 43/12; H03B 15/00; H01L 43/02

조사된 기술분야에 속하는 최소문헌 이외의 문헌

한국등록실용신안공보 및 한국공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC

일본등록실용신안공보 및 일본공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC

국제조사에 이용된 전산 데이터베이스(데이터베이스의 명칭 및 검색어(해당하는 경우))

eKOMPASS(특허청 내부 검색시스템) & 키워드: 자기 터널 접합(magnetic tunnel junction), 자유층(free layer), 고정층(fixed layer), 비자성 금속층(non-magnetic metal layer), 터널절연층(tunneling barrier layer)

C. 관련 문헌

카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
Y	KR 10-2017-0113717 A (한양대학교 산학협력단) 2017.10.13 단락 [0008], [0009], [0059]-[0084], 청구항 11 및 도면 5	1-6
Y	KR 10-1897916 B1 (고려대학교 산학협력단) 2018.10.31 단락 [0021]-[0034] 및 청구항 1, 2	1-6
Y	JP 2019-506745 A (SPIN MEMORY, INC.) 2019.03.07 단락 [0006]-[0008], [0026] 및 도면 1	5
A	KR 10-1018502 B1 (인하대학교 산학협력단) 2011.03.03 단락 [0025]-[0031] 및 도면 3, 4	1-6
A	US 2013-0314166 A1 (KOREA INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 2013.11.28 단락 [0030]-[0041] 및 도면 1	1-6

☐ 추가 문헌이 C(계속)에 기재되어 있습니다.☒ 대응특허에 관한 별지를 참조하십시오.

* 인용된 문헌의 특별 카테고리:

“A” 특별히 관련이 없는 것으로 보이는 일반적인 기술수준을 정의한 문헌

“D” 본 국제출원에서 출원인이 인용한 문헌

“E” 국제출원일보다 빠른 출원일 또는 우선일을 가지나 국제출원일 이후 “X”에 공개된 선출원 또는 특허 문헌

“L” 우선권 주장에 의문을 제기하는 문헌 또는 다른 인용문헌의 공개일 또는 다른 특별한 이유(이유를 명시)를 밝히기 위하여 인용된 문헌

“O” 구두 개시, 사용, 전시 또는 기타 수단을 언급하고 있는 문헌

“P” 우선일 이후에 공개되었으나 국제출원일 이전에 공개된 문헌

“T” 국제출원일 또는 우선일 후에 공개된 문헌으로, 출원과 상충하지 않으며 발명의 기초가 되는 원리나 이론을 이해하기 위해 인용된 문헌

“X” 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌 하나만으로 청구된 발명의 신규성 또는 진보성이 없는 것으로 본다.

“Y” 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌이 하나 이상의 다른 문헌과 조합하는 경우로 그 조합이 당업자에게 자명한 경우 청구된 발명은 진보성이 없는 것으로 본다.

“&” 동일한 대응특허문헌에 속하는 문헌

국제조사의 실제 완료일

2020년 07월 15일 (15.07.2020)

국제조사보고서 발송일

2020년 07월 15일 (15.07.2020)

ISA/KR의 명칭 및 우편주소

대한민국 특허청
(35208) 대전광역시 서구 청사로 189,
4동 (둔산동, 정부대전청사)

팩스 번호 +82-42-481-8578

심사관

양정록

전화번호 +82-42-481-5709



국제조사보고서에서 인용된 특허문헌	공개일	대응특허문헌	공개일
KR 10-2017-0113717 A	2017/10/13	US 10559745 B2 US 2019-0044056 A1 WO 2017-164646 A2 WO 2017-164646 A3	2020/02/11 2019/02/07 2017/09/28 2018/09/07
KR 10-1897916 B1	2018/10/31	CN 109564968 A US 2019-0140164 A1 WO 2018-236121 A1	2019/04/02 2019/05/09 2018/12/27
JP 2019-506745 A	2019/03/07	CN 108604632 A KR 10-2018-0100065 A US 10381553 B2 US 10643680 B2 US 2017-0222132 A1 US 2017-0324029 A1 US 2019-0006582 A1 US 9741926 B1 WO 2017-131894 A1	2018/09/28 2018/09/06 2019/08/13 2020/05/05 2017/08/03 2017/11/09 2019/01/03 2017/08/22 2017/08/03
KR 10-1018502 B1	2011/03/03	없음	
US 2013-0314166 A1	2013/11/28	KR 10-1356769 B1 KR 10-2013-0131760 A US 9083279 B2	2014/01/28 2013/12/04 2015/07/14