

(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구
국제사무국

(43) 국제공개일
2024년 12월 5일 (05.12.2024)

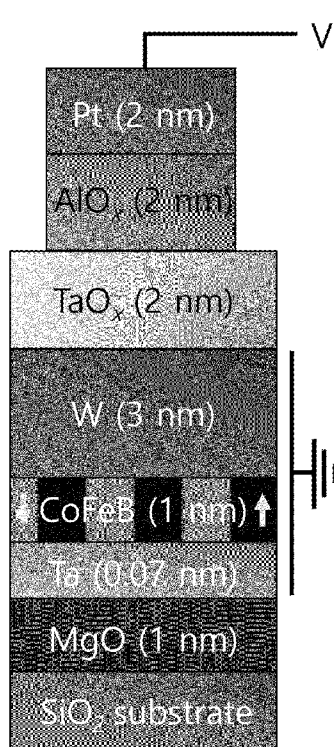


(10) 국제공개번호
WO 2024/248240 A1

- (51) 국제특허분류:
H10N 50/80 (2023.01) *H10N 50/10* (2023.01)
H10N 50/01 (2023.01) *H10B 61/00* (2023.01)
- (21) 국제출원번호: PCT/KR2023/017623
- (22) 국제출원일: 2023년 11월 6일 (06.11.2023)
- (25) 출원언어: 한국어
- (26) 공개언어: 한국어
- (30) 우선권정보:
10-2023-0071778 2023년 6월 2일 (02.06.2023) KR
- (71) 출원인: 한국표준과학연구원 (KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE) [KR/KR]; 34113 대전광역시 유성구 가정로 267, Daejeon (KR).
- (72) 발명자: 황찬용 (HWANG, Chan Yong); 06603 서울특별시 서초구 서초중앙로24길 33, 102동 1301호, Seoul (KR). 문경웅 (MOON, Kyoung Woong); 34121 대전광역시 유성구 대덕대로 596, 407호, Daejeon (KR). 양승모 (YANG, Seung Mo); 34061 대전광역시 유성구 노은로 353, 307동 605호, Daejeon (KR).
- (74) 대리인: 특허법인 세원 (SEWON PATENT LAW FIRM); 06651 서울특별시 서초구 사임당로 26, 3층, 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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, 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 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, 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).

(54) Title: APPARATUS FOR FORMING SKYRMIONS

(54) 발명의 명칭: 스커미온 생성 장치



(57) Abstract: The present invention relates to an apparatus for forming skyrmions capable of generating and storing skyrmions, comprising: a substrate; a first thin film stack formed on the substrate, including a magnesium oxide (MgO) layer, a cobalt iron boron (CoFeB) layer, and a heavy metal layer, and having one side that is grounded; and a second stack formed on an upper gate region of the first thin film stack and including an aluminum oxide (AlO_x) layer and an electrode layer. In addition, the apparatus for forming skyrmions of the present invention is characterized by applying a voltage to the gate region through the electrode layer to control the perpendicular magnetic anisotropy of the gate region, adjusting the perpendicular magnetic fields of the gate region and a non-gate region to form a skyrmion generating state in the gate region and a skyrmion stable state in the non-gate region, and applying an in-plane current to discharge skyrmions from the gate region to the non-gate region.

(57) 요약서: 본 발명의 스커미온 생성 장치는, 스커미온을 생성하고 저장할 수 있는 스커미온 생성 장치로서, 기판; 상기 기판 위에 형성된 산화마그네슘(MgO) 층, 코발트철보론(CoFeB) 층, 중금속(heavy metal)층을 포함하여 이루어지고 그 일측이 접지되어 있는 제1 박막스택; 및 상기 제1 박막스택의 상부 게이트 영역에 형성된 산화알루미늄(AlO_x) 층과 전극층으로 이루어지는 제2 스택; 을 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 한다. 또한, 본 발명의 스커미온 생성 장치는, 상기 전극층을 통하여 상기 게이트 영역에 전압을 인가하여 게이트 영역의 수직자기이방성을 제어하고 게이트 영역 및 비게이트 영역의 수직자기장을 조절하여 게이트 영역에서의 스커미온 생성 상태와 비게이트 영역에서의 스커미온 안정 상태를 형성하고, 면내 전류(in-plane current) 를 인가하여 상기 게이트 영역에서 상기 비게이트 영역으로 스커미온을 토출시키는 것을 특징으로 한다.



공개:

— 국제조사보고서와 함께 (조약 제21조(3))

명세서

발명의 명칭: 스커미온 생성 장치

기술분야

- [1] 본 발명은 스커미온(skyrmion) 생성 장치에 관한 것이며, 상세하게는 게이트 전압을 이용한 스커미온 형성 장치에 관한 것이다.

[2]

배경기술

- [3] 전통적인 마이크로 전자 장치는 전자에 기초한 전하 이동 작업을 진행하는 것이지만, 스핀 전자 장치는 전자의 스핀 속성에 기초하여 정보의 저장, 전송과 처리를 수행한다.

- [4] 스핀을 이용해 차세대 메모리 등의 전자소자를 개발하는 분야를 스핀트로닉스(spintronics)라 한다. 기존의 반도체 기반 전자소자 기술은 전자의 두 가지 특성인 전하와 스핀 중에서 양자역학적인 스핀을 고려하지 않고 전하만을 전기장으로 제어한다. 스핀트로닉스 기술은 전자의 전하와 스핀을 동시에 제어하는 기술로, 기존 전자소자의 기술적 한계를 극복할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 스핀전자소자는 스핀의 고유특성인 비휘발성(non-volatility)뿐만 아니라 초고속, 초저전력 및 초고주파 등의 특성이 있어 차세대 전자소자로 사용될 가능성이 크다.

- [5] 최근에는 도 1에서와 같은 자기 스커미온(magnetic skyrmions, 소용돌이 모양으로 스핀들이 배열되어 형성되는 스핀 구조체)을 이용하여 메모리, 논리소자, 통신소자 등 차세대 전자소자를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

- [6] 스커미온을 전자소자에 활용하기 위해서는 정보 저장의 기본단위(bit)인 각각의 스커미온을 원하는 위치에 생성하고 소멸시킬 수 있어야 하며, 생성된 스커미온을 매우 높은 효율로 이동시킬 수 있어야 한다.

- [7] 그러나 전압 제어된 스커미온 조작을 사용하여 스커미온 장치를 실현할 수 있는 가능성을 여러 연구에서 제시하고 있지만(S. Luo, M. Song, X. Li, Y. Zhang, J. Hong, X. Yang, X. Zou, N. Xu, L. You, Nano Lett. 2018, 18), 아직 실험적으로 입증되지는 않았다. 그 이유는 대부분의 전압 제어 스커미온 조작이 결함 또는 산소이온 이동에 의해 지배되어 느리거나 공간적으로 불균일한 작동을 나타내기 때문이다.

- [8] 특히, 스커미온 논리 장치의 경우, 스커미온은 위상 정보를 유지하면서 종종 제어 및 비제어 영역을 가로질러 이동해야 하기 때문에 서로 다른 자기 이방성 영역이 지속적으로 잘 연결된 계면(interface)이 필수적이거나 아직 이러한 기술은 제공되지 못하고 있다. 기존 전압제어 자기이방성(Voltage-controlled magnetic anisotropy, VCMA) 기술은 자성박막과 산소를 포함한 절연체를 접합시켜 전압을 인가하여 자성 물성을 조절하는 것이다. 이는 전기장이 산화층과 자성층 계면의 산화상태를 산소이온 이동으로 변화시켜 자기이방성을 제어하는 메커니즘이다.

- [9] 그러나, 이러한 종래 전압제어 자기이방성 기술은 산소이동이나 결함으로 인하여 자기이방성이 공간적으로 균일하지 못해 느리고 불균일한 작동을 보여준다.
- [10] 최근 연구(A J Tan, M Huang, C O Avci, F Buttner, Mann, W Hu, C Mazzoli, S. Wilkins, H. L. Tuller, G. S. D. Beach, Nat. Mater. 2019, 18, 35)는 산소 대신 양성자를 사용하는 전압 제어 자기 이방성을 보고하여 비교적 빠르고 안정적인 작동을 보여준다. 그러나 이러한 연구에서도 자기이방성의 공간적 균일성은 보여주지 못하고 있다.

[11]

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [12] 본 발명은 공간적으로 균일한 자기이방성을 나타내는 전압제어 자기이방성 기술을 이용하여 빠르고 안정적으로 스커미온을 생성하고 저장할 수 있는 스커미온 생성장치를 제공하는 것을 목적으로 한다.

[13]

과제 해결 수단

- [14] 본 발명의 스커미온 생성 장치는, 스커미온을 생성하고 저장할 수 있는 스커미온 생성 장치로서, 기판; 상기 기판 위에 형성된 산화마그네슘(MgO)층, 코발트철보론(CoFeB)층, 중금속(heavy metal)층을 포함하여 이루어지고 그 일측이 접지되어 있는 제1 박막스택; 및 상기 제1 박막스택의 상부 게이트 영역에 형성된 산화알루미늄(AlO_x)층과 전극층으로 이루어지는 제2 스택;을 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 한다.
- [15] 또한, 본 발명에 있어서, 상기 스커미온 생성 장치는, 상기 전극층을 통하여 상기 게이트 영역에 전압을 인가하여 게이트 영역의 수직자기이방성을 제어하고 게이트 영역 및 비게이트 영역의 수직자기장을 조절하여 게이트 영역에서의 스커미온 생성 상태와 비게이트 영역에서의 스커미온 안정 상태를 형성하고, 면내 전류(in-plane current)를 인가하여 상기 게이트 영역에서 상기 비게이트 영역으로 스커미온을 토출시키는 것을 특징으로 한다.
- [16] 또한, 본 발명에 있어서, 상기 게이트 영역에 전압을 인가하면 상기 게이트 영역 내에서 수직자기이방성이 공간적으로 균일하게 나타난다.
- [17] 또한, 본 발명에 있어서, 상기 산화알루미늄층은, 알루미늄 전구체와 물을 사용하여 원자층증착(ALD)으로 형성되며, 증착이 가능한 온도 범위 내에서 상대적으로 낮은 온도에서 이루어지며, 상기 산화알루미늄층은, 수소를 함유하고 있는 것을 특징으로 한다.
- [18] 또한, 본 발명에 있어서, 상기 중금속층은, W, Ta, Nb, Hf 중 적어도 하나로 이루어지는 것이 바람직하며, 상기 코발트철보론층과 상기 산화마그네슘층 사이에, 초박형 금속층을 개재할 수 있으며, 상기 중금속층 상부에는 자연산화층 또는 금속산화물층이 형성될 수 있다.

- [19] 또한, 본 발명에 있어서, MOKE(Magneto-optical Kerr effect) 현미경을 이용한 상기 게이트 영역 내 자기 이미지는 균일한 스트라이프 도메인 폭을 나타내는 것을 특징으로 한다.
- [20] 또한, 본 발명에 있어서, 수직자기이방성이 다른 상기 게이트 영역과 비게이트 영역의 계면에서 자화 도메인이 공간적으로 연속적으로 연결되어 있으며, 도메인 벽 키랄성(domain wall chirality)이 잘 보존되는 것을 특징으로 한다.
- [21] 또한, 본 발명에 있어서, 상기 면내 전류는 펄스 전류이며, 그 진폭과 시간을 조절하여 생성되는 스커미온의 수를 조절할 수 있다.

[22]

발명의 효과

- [23] 본 발명에 의하여, 공간적으로 균일한 자기이방성을 나타내는 전압제어 자기이방성 기술을 제공할 수 있으며, 이를 활용하여 PMA와 스트라이프 도메인 폭을 조작하여 전압 제어 스커미온 안정성 기술을 제공할 수 있다.
- [24] 또한 본 발명에서 제시한 전압 제어 스커미온 안정성 기술을 사용하여 스커미온 저장소 개념을 가진 새로운 스커미온 생성장치를 제공할 수 있다.

[25]

도면의 간단한 설명

- [26] 도 1은 종래 전압제어 자기이방성(VCMA) 실험 구성을 나타내는 도면이다.
- [27] 도 2은 스커미온을 나타내는 개념도이다.
- [28] 도 3는 본 발명의 일실시예에 따른 박막필름 스택의 구조를 나타낸 것이다.
- [29] 도 4은 MOKE 현미경 실험 설정도이다.
- [30] 도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 박막필름 스택의 평면구조 및 패턴을 나타낸 것이다.
- [31] 도 6는 게이트 영역에 양의 전압 펄스를 인가하여 스트라이프 도메인 폭이 변화한 것을 나타내는 것이다.
- [32] 도 7은 게이트 영역과 비게이트 영역의 고속푸리에변환 이미지이다.
- [33] 도 8의 (a)는 게이트 전압 펄스와 수직자기이방성필드의 관계를 나타내는 것이고, (b)는 in situ etching을 사용한 비게이트(실선) 및 게이트(파선) 영역에 대한 X선 광전자 분광 분석을 나타낸 것이다.
- [34] 도 9는 강한 횡방향 전류 주입에 의한 게이트 영역의 이동을 나타내는 것이다.
- [35] 도 10은 전압제어된 수직자기이방성의 공간적 균일성을 조사한 결과를 나타내는 것이다.
- [36] 도 11은 게이트 영역과 비게이트 영역 사이의 자기 도메인 연결을 조사한 결과를 나타내는 것이다.
- [37] 도 12는 다양한 $\mu_0 H_z$ 에서 스트라이프 도메인의 MOKE 이미지를 나타낸 것이다.

[38] 도 13은 전압 제어 스트라이프 도메인 폭과 z축 자기장 하에서 스트라이프 도메인-스커미온-균일 상태 사이의 위상 다이어그램이다.

[39] 도 14의 (a)는 유효 수직자기이방성 필드의 매핑을 나타낸 것이며, (b)와 (c)는 초기상태와 면내 전류를 주입한 후의 MOKE이미지를 각각 나타낸 것이다.

[40]

발명의 실시를 위한 최선의 형태

[41] 이하에서는, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 그러나, 본 발명은 여기서 설명되는 실시예에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 통상의 기술자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다.

[42]

[43] 본 발명의 스커미온 생성 장치는, 스커미온을 생성하고 저장할 수 있는 스커미온 생성 장치로서, 기판과, 상기 기판 위에 형성된 산화마그네슘(MgO)층, 코발트철보론(CoFeB)층, 중금속(heavy metal)층을 포함하여 이루어지고 그 일측이 접지되어 있는 제1 박막스택과, 및 상기 제1 박막스택의 상부 게이트 영역에 형성된 산화알루미늄(AlO_x)층과 전극층으로 이루어지는 제2 박막스택을 포함하여 이루어진다.

[44] 상기 중금속층은, W, Ta, Nb, Hf 중 적어도 하나로 이루어지는 것이 바람직하며, 상기 코발트철보론층과 상기 산화마그네슘층 사이에는 초박형 금속층을 개재할 수 있으며, 상기 중금속층 상부에는 자연산화층 또는 금속산화물층이 형성될 수 있다.

[45] 본 발명에 있어서, 상기 게이트 영역에 전압을 인가하면 상기 게이트 영역 내에서 수직자기이방성이 공간적으로 균일하게 나타난다(도 6 참고).

[46] 본 발명의 스커미온 생성 장치는, 상기 전극층을 통하여 상기 게이트 영역에 전압을 인가하여 게이트 영역의 수직자기이방성을 제어하고 게이트 영역 및 비게이트 영역의 수직자기장을 조절하여 게이트 영역에서의 스커미온 생성 상태와 비게이트 영역에서의 스커미온 안정 상태를 형성하고, 면내 전류(in-plane current)를 인가하여 상기 게이트 영역에서 상기 비게이트 영역으로 스커미온을 토출시킨다.

[47]

[48] 이하에서는 도면을 참조하여 본 발명의 일실시예에 따른 스커미온 생성 장치를 설명한다.

[49] 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 박막필름 스택의 구조를 나타낸 것이며, 도 4는 MOKE 현미경 실험 설정도이다.

[50] 도 5는 본 발명의 일실시예에 따른 박막필름 스택의 평면구조 및 패턴을 나타낸 것이다. MgO/Ta/CoFeB/W/TaO_x의 박막스택은 검은색 파선으로 표시된 와이

어 모양으로 패턴화되고, $\text{AlO}_x(2\text{nm})/\text{Pt}(2\text{nm})$ 박막스택은 흰색 파선 영역에서 성장한다. 패턴의 어두운 회색과 밝은 회색은 각각 $-z$ 및 $+z$ 자화에 해당한다.(Scale bar : $30\mu\text{m}$)

[51] 도 6은 게이트 영역에 양의 전압 펄스를 인가하여 스트라이프 도메인 폭이 변화한 것을 나타내는 것이며(Scale bar : $10\mu\text{m}$), 도 7은 게이트 영역과 비게이트 영역의 고속푸리에변환(FFT) 이미지이다(Scale bar : $0.1\mu\text{m}^{-1}$)

[52]

[53] 본 발명의 일실시예에 따른 스커미온 생성장치의 기본적인 구조는 도 3에 도시된 바와 같다. 본 발명의 스커미온 생성장치의 박막필름 스택은, 기판과, $\text{MgO}(1.0\text{nm})/\text{Ta}(0.07\text{nm})/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}(1.0\text{nm})/\text{W}(3.0\text{nm})/\text{TaO}_x(2\text{nm})$ 로 이루어지는 제1 박막스택과, $\text{AlO}_x(2\text{nm})/\text{Pt}(2\text{nm})$ 로 이루어진 제2 박막스택으로 이루어진다.

[54] 본 발명에서 제1 박막스택은 산화마그네슘(MgO)층, 코발트철보론(CoFeB)층, 중금속(heavy metal)층으로만 이루어질 수 있으며, 중금속층은, W, Ta, Nb, Hf 중 적어도 하나가 사용될 수 있다. 중금속층 상부에는 도 3에서와 같은 금속산화물층이 형성될 수 있으며, 자연산화층으로 형성될 수도 있다.

[55] CoFeB 층과 MgO 층 사이에는 계면에서 나타나는 수직자기이방성(perpendicular magnetic anisotropy, PMA)을 조절하여 PMA를 보다 정밀하게 제어하기 위해 초박형 금속층을 개재할 수 있다.

[56]

[57] 본 발명의 일실시예에서는, 마그네트론 스퍼터링(Magnetron Sputtering) 시스템을 사용하여 열산화된 Si 기판 위에 $\text{MgO}(1\text{nm})/\text{Ta}(0.07\text{nm})/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}(1.0\text{nm})/\text{W}(3\text{nm})/\text{TaO}_x(2\text{nm})$ 스택을 상온에서 기저압 4.0 torr의 마그네트론 스퍼터링 시스템을 이용하여 열산화 실리콘 기판 위에 증착한 후, 진공 조건 5.0 이하에서 350°C 에서 1시간 동안 후어닐링 공정을 수행하여 PMA를 촉진하였다.

[58] 여기에 CoFeB/MgO 계면에서 발생하는 PMA를 정밀하게 제어하기 위해 초박형(0.07nm) Ta층을 삽입했다. CoFeB/MgO 계면에서 발생하는 PMA가 작아야 스커미온이 생성될 수 있기 때문에 하나의 원자층 정도의 매우 얇은 Ta층을 삽입하여 CoFeB/MgO 계면에서 발생하는 PMA를 낮추어 보다 정밀하게 PMA를 제어할 수 있게 된다.

[59] $\text{MgO}/\text{Ta}/\text{CoFeB}/\text{W}/\text{TaO}_x$ 의 제1 박막스택은 포토리소그래피와 이온밀링을 이용하여 와이어 모양으로 패턴화되었다(도 5의 검은색 파선 영역). 그런 다음, $\text{AlO}_x(2\text{nm})/\text{Pt}(2\text{nm})$ 층을 제1 박막스택 상부의 게이트 영역(도 5의 흰색 파선 영역)에 증착했다.

[60]

[61] 여기서 AlO_x 층은 120°C 에서 열 원자층증착(ALD) 시스템을 사용하여 증착되었다. 전구체로는 TMA(Tri-methyl-Aluminium)와 물(H_2O)을 사용하였으며, 운반체와 퍼징가스로서 질소가스(N_2)를 사용하였다.

[62] 본 발명에 있어서, AlO_x 층은 증착이 가능한 온도 범위 내에서 상대적으로 낮은 온도인 120°C 에서 이루어져 증착 과정에서 수소가 날라가지 않고 AlO_x 층 내에 존재하게 된다. 즉, 본 발명에서 AlO_x 층은 수소를 함유하게 되며, 전극층인 Pt층을 통하여 전기장이 가해질 경우 수소이온이 역할을 하게 되어 PMA를 제어하게 된다.

[63]

[64] 전압제어 스커미온 동작을 실현하려면 공간적으로 균일한 제어와 두 개의 다른 영역이 지속적으로 잘 연결된 계면이 필수적인데, 도 3과 같은 구조로 이루어지는 본 발명의 일실시예에 따른 스커미온 생성기의 게이트 영역에 전압을 인가하면 수직자기이방성이 공간적으로 균일하게 나타나게 되고 게이트 영역과 비 게이트 영역이 지속적으로 잘 연결되게 된다. 이는 MOKE(Magneto-optical Kerr effect) 현미경 이미지를 사용하여 증명될 수 있다.

[65] 도 4에 도시된 바와 같이 MOKE 현미경을 사용하여, 전기전압과 수직자기장을 동시에 적용하면서 충분히 얇은 Pt 및 W 층을 통해 도 5와 같은 CoFeB 층의 자기 이미지를 얻을 수 있다. 도 5에서 어두운 회색과 밝은 회색은 MOKE 이미지에 대한 -z 및 +z 자화 도메인을 나타낸다.

[66] 도 3에서와 같이, Pt 탭 전극에는 게이트 전압이 인가되고, Ta/CoFeB/W 층의 바텀 전극은 접지된다. 따라서 대부분의 전압 강하는 저항이 높은 $\text{TaO}_x/\text{AlO}_x$ 층 사이에서 발생한다.

[67] 전압이 가해지지 않은 상태에서, 자기 채널은 도 6의 (a)와 같이 일정한 스트라이프 도메인 폭(stripe domain width, λ)을 갖는 스트라이프 도메인 패턴을 나타낸다.

[68] 스트라이프 도메인 폭은 자구벽에너지(domain wall energy)에 지수적으로(exponentially) 비례한다.

[69] Neel형 자구벽 에너지는 $4\sqrt{AK_{\text{eff}}} - \pi D + \frac{\ln 2}{\pi} \mu_0 M_s^2 d$ 로 주어지며, 여기

서 A는 교환 강성(exchange stiffness)이고, K_{eff} ($\equiv \frac{\mu_0 M_s H_k}{2}$)는 부피당

PMA 에너지 밀도이며, D는 면적당 DMI(Dzyaloshinski Moriya Interaction) 에너지 밀도이고, 마지막 항은 부피 탈자화 에너지 밀도이다.

[70] 따라서 A와 D가 동일한 값을 갖는 경우 PMA를 변경하면 스트라이프 도메인 폭의 변동이 발생한다.

[71] 도 6의 (a)는 전체 영역이 동일한 PMA 값을 가지고 있음을 나타낸다. 그런 다음, 왼쪽 파선 영역(게이트 영역)에서 4 V의 게이트 전압 펄스를 2초 동안 인가한 후, 도 6의 (b)와 같이, 스트라이프 도메인 폭은 게이트 영역 내부에서만 축소된다. 게이트 전압 펄스 주입을 추가하면 도 6의 (c)와 같이 스트라이프 도메인 폭이

훨씬 작아진다. 전압 제어 스트라이프 도메인 폭은 게이트 전압을 끈 후에도 남아 비휘발성 작동을 나타낸다.

[72] 도 6에 나타나 있는 게이트 영역과 비게이트 영역에 대해 고속 푸리에 변환(FFT)하면 그 이미지가 도 7의 (a)~(f)와 같이 나타난다. 이러한 FFT 이미지는 게이트 전압이 가해질 때 스트라이프 도메인 폭의 변화가 있음을 명확히 보여준다.

[73]

[74] 게이트 전압을 인가하면 DMI나 다른 파라미터가 아닌 PMA가 조작된다는 것을 명확히 하기 위해, MOKE 현미경 시스템을 사용하여 각 게이트 전압 펄스를 인가한 후 게이트 영역의 H_k 값을 직접 측정했다. 참고로, 게이트 전압에 의한 DMI의 변화는 무시할 수 있다.

[75]

$$m_z = \frac{H_z + m_z H_k}{\sqrt{(H_z + m_z H_k)^2 + H_x^2}}$$

[76]

상기 수식에서, m_z 는 정규화된 MOKE 신호에 해당하는 정규화된 수직 자화이고, H_z 는 수직 자기장이다. H_k 는 유효한 PMA 필드이며, 이 방정식을 사용하여 H_k 를 얻을 수 있다.

[77]

도 8의 (a)는 게이트 전압 펄스와 수직자기이방성필드의 관계를 나타내는 것이고, (b)는 in situ etching을 사용한 비게이트(실선) 및 게이트(파선) 영역에 대한 X선 광전자 분광 분석을 나타낸 것이다. 도 8의 (a)에서 사각형은 양의 게이트 전압 펄스를 적용한 후 $\mu_0 H_k$ 를 나타내고, 원은 음의 게이트 전압 펄스를 적용한 후 $\mu_0 H_k$ 를 나타낸다.

[78]

2,221 Oe의 초기 H_k 부터 시작하여 3.6 V의 게이트 전압 펄스를 3초 동안 인가하면 H_k 가 감소한다(도 8 (a) 참고). 그런 다음, 반복적인 게이트 펄스를 사용하면 도 8 (a)의 사각형으로 이어진 곡선에 표시된 것처럼 약 1,025 Oe에서 H_k 값이 포화된다.

[79]

포화된 H_k 로부터 3초 동안 순차적으로 -4.0V의 음의 게이트 전압 펄스를 인가했다. 반대로, 음의 게이트 전압 펄스는 H_k 를 증가시키고, 결국 2,037 Oe로 포화된다.

[80]

즉, 인가된 게이트 전압 펄스의 극성 또는 수에 따라 H_k 를 조작하여 스트라이프 도메인 폭을 자유롭게 제어할 수 있는 것을 알 수 있다.

[81]

[82]

전압 제어 자기 현상 연구는 산소이온 이동을 기본 메커니즘으로 활용해 왔다. 그러나, 본 발명의 일실시예를 통한 실험 결과는 산소이온 이동 메커니즘으로 설명될 수는 없다.

[83]

도 3에서와 같은 본 발명의 박막스택 구조에서 전압 강하는 주로 TaO_x/AlO_x 층 사이에서 발생하며, 이는 전기장이 산화물층 사이에만 존재함을 나타낸다.

[84]

산소이온 이동 개념을 사용하는 전형적인 VCMA 실험은 도 1에 도시된 바와 같이 기판/자성박막/절연체(산화물층)에서 산화물층에 직접에 게이트 전압을 인가

한다. 그러나, 본 발명의 박막스택 구조(도 3)에서는 자성박막(CoFeB)과 접하는 산화물층(MgO층)에 직접 전압을 인가하는 것이 아니라 Ta/CoFeB/W 층은 접지시키고 TaO_x/AlO_x 층 상부 Pt 전극에 전압을 인가하게 된다.

- [85] 따라서, 초기 상태에서 PMA를 감소시키는 양의 게이트 전압은 W/TaO_x 계면에서 산소이온(O²⁻)을 끌어당긴다. 따라서 W층이 초기에 높은 저항과 풍부한 산소이온을 가지지 않는 한 산소이온 이동은 본 발명을 설명하는 메커니즘이 될 수 없다.
- [86] 도 8의 (b)와 같이 게이트/비게이트 영역에 대한 W층 내부의 산소 상태를 파악하기 위해 *in situ etching*을 이용한 XPS(X선 광전자 분광법)분석을 수행했다.
- [87] 챔버 내부에 샘플을 넣기 전에 게이트/비게이트 영역의 H_k를 각각 1,025Oe, 2,221Oe로 측정하였다. 도 8의 (b)에서 파선 곡선은 게이트 영역의 스펙트럼을 나타내며, 실선 곡선은 비게이트 영역의 스펙트럼을 나타낸다.
- [88] 각 곡선은 도 8 (b)의 오른쪽에 표시된 에칭시간이 적용된 것이다.
- [89] W4f(28eV ~ 38eV)의 결합에너지 위치에서 W 금속 상태에 대한 W4f 코어 레벨의 스핀궤도분할(*spin-orbit splitting*)이 두 영역 모두에서 잘 관찰된다. W 금속 피크는 300초의 에칭시간부터 나타나기 시작한다.
- [90] 또한, Fe2p_{3/2}의 결합 에너지 위치(704 eV~711 eV)에서는, 480s의 에칭시간 후에 Fe 금속 상태에 대한 Fe2p_{3/2}의 피크가 관찰된다. 660s의 에칭시간에서 Fe2p_{3/2}의 충분한 피크 강도는 660s의 에칭시간에서의 스펙트럼들이 CoFeB 층 근처의 분석을 반영한다는 것을 나타낸다.
- [91] 그러나, W와 Fe의 산화물 상태는 모든 에칭 시간에 게이트 영역과 비게이트 영역 모두에서 관찰되지 않았다. 따라서 본 발명에서 VCMA에 관한 기본 메커니즘으로 산소이온 이동은 제외될 수 있다.
- [92] 남은 가능성 중 하나는 양성자이다. 최근, 다양한 논문들이 수소 흡착에 의한 자기 특성 제어를 보고하고 있다. 또한, 게이트 전압에 의해 작동되는 양성자 펌프는 최근 자기이방성(*magnetic anisotropy*) 또는 페리자성순서(*ferrimagnetic ordering*)를 제어하는 것이 입증되었다. 게이트 전압이 표면의 대기로부터 H₂O의 해리에 의해 양성자를 생성할 수 있고 양성자가 자기 특성을 바꿀 수 있다는 것이 실험적으로 증명되었다. 본 발명의 결과에 대한 가장 실현 가능한 것은 양성자일 것이다.
- [93] VCMA의 비휘발성 및 가역작동은 게이트 전압을 적용하여 이온이동이 이 작동을 담당한다고 할 수 있다.
- [94] 먼저, 가장 일반적인 산소이온을 고려해 볼 수 있는데, 이상에서 설명한 바와 같이 기본 메커니즘으로 산소이동을 배제할 수 있다.
- [95] 첫 번째 이유는 두 절연층(AlO_x, TaO_x)에 미리 존재하는 산소 이온을 강자성층(CoFeB) 쪽으로 이동시킬 구동력이 없기 때문이다. 전술한 바와 같이 절연층에

만 존재하는 전기장은 절연체층 밖으로 산소 이온을 밀어낼 수 없다. 도 8 (b)의 XPS 분석에서도 VCMA 전후의 산소 스펙트럼이 나타나지 않았다.

- [96] 다음으로, CoFeB 층 내부의 붕소 이온을 고려할 수 있다. 본 발명에서 PMA를 촉진하기 위해 포스트 어닐링 과정을 수행했을 때, W와 B의 큰 음의 혼합 엔탈피 ($\Delta H_{W-B} = -31 \text{ kJ/mol}$) 때문에 CoFeB 층의 붕소 원자는 인접한 W층으로 확산된다. 따라서 전기장은 TaO_x 와 W층 사이의 계면 근처의 붕소 이온에 영향을 미칠 수 있다.
- [97] 도 9는 강한 횡방향 전류 주입에 의한 게이트 영역의 이동을 나타내는 것이다. 본 발명에서는 붕소가 기본 메커니즘에 관계되지 않는다는 간접적인 실험 증거를 제시한다. 도 9에서 볼 수 있듯이, 게이트 영역에서 PMA를 감소시키기 위해 충분한 게이트 전압을 주입했다. 따라서 도 9의 (a)에서 게이트 영역의 회색 영역은 광학 해상도 또는 평면내 자화 상태보다 폭이 작은 스트라이프 도메인을 나타낸다. 그리고 게이트 전압을 끈 후 -x축을 따라 5분간 강한 전류(4.0 V)를 인가하였다(도 9의 (b)). 도 9의 (b)와 같이, 강하고 긴 평면내 전류 주입은 기존의 회색 영역을 왼쪽으로 밀면서 게이트 영역이 복구된다. 그 후 +x축을 따라 4.0-V 전류를 5분간 주입하였다. 이 경우 전류가 기존의 회색 영역을 오른쪽으로 밀면서 왼쪽 영역이 약간 복구된다. 그러나 게이트 제어를 작동하지 않는 경우 횡방향 전류 주입은 더 높은(10V) 전압과 더 긴(10분) 시간에도 자기 이방성을 변화시키지 않는다. 측방향 전류 주입에 의한 자기 이방성의 변화는 줄가열효과(Joule heating effect)를 제외하고는 CoFeB 기반 구조에서 보고된 적이 없다. 도 9에서 작동 방향은 줄가열이 지배적인 메커니즘이 아님을 나타낸다. 따라서 게이트 작동 전에 이미 존재하는 붕소 이온은 위의 실험 결과를 설명할 수 없다. 따라서 본 발명에서 VCMA에 관한 기본 메커니즘은 수소 이온 이동으로 인한 것이라고 할 수 있다.
- [98]
- [99] 전압 제어 스커미온 동작을 실현하려면 공간적으로 균일한 제어와 두 개의 다른 영역이 지속적으로 잘 연결된 계면이 필수적이다. 그러나 산소 이온 이동 기반 VCMA는 산소 이온의 무겁고 큰 특성 때문에 공간적으로 균일하지 않은 거동 또는 결함생성을 보인다. 예를 들어, VCMA 작동 중에 결함이 생성되면 이동된 스커미온이 갇혀서 더 이상의 움직임이 제한되거나 소멸될 수 있다.
- [100] 도 10은 전압제어된 수직자기이방성의 공간적 균일성을 조사한 결과를 나타내는 것이다. 도 10에서 (a)는 초기 상태에서, (b)와 (c)는 양의 게이트 전압 펄스를 인가한 후에 유효 수직 자기 이방성 필드를 맵핑한 것이다.
- [101] 도 11은 게이트 영역과 비게이트 영역 사이의 자기 도메인 연결을 조사한 결과를 나타내는 것이다. 도 11은 두 개의 서로 다른 수직 자기 이방성 영역을 통한 스트라이프 도메인의 지속적인 변형을 보여주고 있으며, 도 11 (b)에서 굵은 화살표는 도메인 벽에서 자화 방향을 나타내며 키랄성(chirality)이 잘 보존되어 있음을 나타낸다.

- [102] 도 10과 같이 각 게이트 전압 펄스 후 H_k 를 공간적으로 매핑하여 전압 제어 스트라이프 도메인 폭의 공간적 균일성을 조사하였다. 게이트 가장자리의 노이즈 데이터는 원래 MOKE 이미지의 2x2 픽셀을 x-y 평면의 하나의 매핑 데이터 포인트로 분석하기 때문이다. 초기 상태(도 10의 (a))의 경우, 게이팅 영역(도 10 (a)의 흰색 파선 박스)은 비게이팅 영역과 거의 동일한 매핑 색상(H_k , 2803 Oe의 평균값)을 갖는다.
- [103] 4 V의 첫 번째 게이트 전압 펄스를 3초 동안 인가한 후, 게이팅 영역의 H_k 는 도 10의 (b)와 같이 잘 제어된다(평균값, 2234 Oe). 내부 게이트 영역의 표준 편차는 91 Oe이다. 3초 동안 4V의 두 번째 게이트 전압 펄스는 H_k (H_k 의 평균값, 1749 Oe)를 더욱 낮춘다. 여기서 H_k 의 표준 편차는 67 Oe이다. H_k 를 측정하는 방법의 오류 범위를 고려하면, 이 전압 제어 스트라이프 도메인 폭 연산은 게이트 영역 내에서 매우 균일하다.
- [104] 또한, 본 발명에서는 도 11과 같이 두 개의 서로 다른 스트라이프 도메인 폭 영역 사이의 자기 도메인 연결을 조사했다. 파선 박스 영역은 전압 제어 스트라이프 도메인 폭 영역이고, 다른 영역은 비게이팅 영역이다. 도 11의 (b)는 도 11(a)d의 실선 박스의 확대된 이미지이다. 비게이팅 영역 내부의 스트라이프 도메인 폭은 게이트 영역 내부의 거의 두 배이다. 그러나 두 영역의 계면(도 11 (a)의 파선)에서 다른 스트라이프 도메인 폭을 가진 두 유형의 스트라이프 도메인들은 도 11의 (b)에 표시된 것처럼 공간적으로 연속적인 스트라이프 도메인 변형으로 잘 연결되어 있다.
- [105] W 층로부터의 계면 DMI 때문에, 두 영역의 스트라이프 도메인의 도메인 벽은 도 11의 (b)에서 굵은 화살표로 표시된 왼손 키랄성(left-handed chirality)을 갖는 Neel-type 도메인 벽 구성을 가지고 있다. 위상학적 특징을 결정하는 도메인 벽 키랄성은 서로 다른 스트라이프 도메인 폭 영역을 통해 잘 보존된다는 점을 알 수 있다.
- [106]
- [107] 도 3과 같은 구조를 갖는 본 발명의 일실시예에 따른 스커미온 생성 장치는 자기이방성이 공간적으로 균일하며 게이트 영역과 비게이팅 영역이 지속적으로 잘 연결된 계면을 가지고 있어서 빠르고 안정적으로 스커미온을 생성하고 저장할 수 있다.
- [108] 도 12는 다양한 $\mu_0 H_z$ 에서 스트라이프 도메인의 MOKE 이미지를 나타낸 것이다 (Scale bar 5 μ m). 도 12에서 (a)~(d)는 초기 상태의 경우, (e)~(h)는 6번째 게이트 전압 펄스 후, (i)~(l)은 7번째 게이트 전압 펄스 후의 MOKE 이미지이다.
- [109] 도 13은 전압 제어 스트라이프 도메인 폭과 z축 자기장 하에서 스트라이프 도메인-스커미온-균일 상태 사이의 위상 다이어그램이다. 흰색, 진한회색 및 옅은회색 영역은 각각 균일한 상태, 스커미온+스트라이프 상태 및 스커미온 상태를 나타낸다.

- [110] 도 14의 (a)는 유효 수직자기이방성 필드의 매핑을 나타낸 것이며, (b)와 (c)는 초기상태와 면내 전류를 주입한 후의 MOKE이미지를 각각 나타낸 것이다. 도 14 (a)에서 왼쪽 영역은 비게이트 영역이고 오른쪽 영역은 게이트 영역이며, 도 14의 (b)는 초기상태 MOKE 이미지, (c)는 평면 내 전류 펄스를 주입한 후의 MOKE 이미지이다.(Scale bar 3 μ m)
- [111] 스커미온 반지름 또는 스커미온 안정성을 포함한 스커미온 특성은 제로 자기장에서 스트라이프 도메인 폭에 의해 결정된다. 특히, z축 자기장(H_z) 하에서 스트라이프 도메인-스커미온-균일 상태에 대한 에너지 지형은 다른 물질 매개 변수와 상관없이 주로 스트라이프 도메인 폭의 함수이다.
- [112] 예를 들어, 초기 상태는 도 12 (a)와 같이 제로 자기장에서 4.58 μ m의 스트라이프 도메인 폭을 갖는다. 그런 다음 $+H_z$ 를 적용하면 -z축 스트라이프 영역이 점차 축소되고, 결국 10.6 Oe의 $+H_z$ 에서 균일한 자기 상태를 형성한다(도 12의 (a)~(d)).
- [113] 그런 다음 3.6V의 양의 게이트 전압 펄스 6개를 3초 동안 주입하면 도 12의 (e)와 같이 스트라이프 도메인 폭이 2.19 μ m로 줄어든다. 여기서 $+H_z$ 를 적용하면 초기 상태와 동일한 동작이 나타나지만, 균일한 상태에 도달하기 위한 $+H_z$ 진폭은 10.6 Oe에서 12.8 Oe로 약간 증가한다(도 12의 (d) 및 (h)).
- [114] 그런 다음, 3초 동안 3.6 V의 양의 게이트 전압 펄스를 더하면 도 12의 (i)에 표시된 것처럼 스트라이프 도메인 폭이 1.80 μ m로 감소한다. 도 12의 (k)와 같이 10.0 Oe의 $+H_z$ 를 적용하면 스커미온 상태가 되며, 14.0 Oe의 $+H_z$ 에서 균일한 상태가 나타난다.
- [115] 스트라이프 도메인 상태에서 스커미온 상태로의 위상 전이는 스트라이프 도메인의 인접한 두 도메인 벽 위치의 열적요동(thermal fluctuation)이 충분할 때 발생할 수 있다. 따라서 특정 스트라이프 도메인 폭 이상에서는 스커미온 상태가 전반적으로 최소 상태임에도 불구하고 스커미온 상태가 관찰되지 않는다(도 13 참고).
- [116] 도 13에서 초기 상태(도 12의 (a))는 도 13에서 가장 오른쪽에 있는 검은색 원에 해당한다. 양의 게이트 전압 펄스를 적용하면 스트라이프 도메인 폭(도 13의 곡선을 따라 표시된 화살표)이 감소하고, 균일한 상태에 도달하기 위해 $+H_z$ 가 증가한다. 결국, 1.80 μ m의 스트라이프 도메인 폭 아래에서는 H_z 를 적용해야만 스커미온 상태를 관찰할 수 있다. 도 13에서 곡선 근처에서 스커미온 전역 최소 상태에 있으며, 이는 H_z 만으로는 관찰할 수 없다.
- [117] 이러한 위상 다이어그램을 의하면, SOT(spin-orbit torque)를 사용하여 1.80 μ m의 스트라이프 도메인 폭을 가진 게이트 제어 영역 내의 스커미온이 비게이트 영역으로 전달될 수 있음을 알 수 있다(도 13의 중앙부에 우측 방향으로 표시된 긴 화살표).
- [118] 이를 검증하기 위해 도 14에서 (a)~(c)의 각 오른쪽 영역에서는 약 1.80 μ m의 스트라이프 도메인 폭을 전압 제어했으며, (a)~(c)의 각 왼쪽 영역은 게이트되지 않

왔다. 도 14의 (a)는 두 영역이 분명히 다른 H_k 를 보여주는 H_k 매핑 데이터를 보여준다.

- [119] 8.7 Oe의 $+H_z$ 에서 비게이트 영역은 스커미온 또는 스커미온+스트라이프 도메인 상태이다. 이 상태에서 열 에너지가 부족하여 스커미온이 자발적으로 생성되지는 않지만, 일단 스커미온이 생성되면 안정적이다.
- [120] 게이트 영역은 8.7 Oe의 $+H_z$ 아래에서 스커미온 상태에 있으며, 도 14의 (b)와 같이 충분히 작은 스트라이프 도메인 폭 때문에 스커미온이 자발적으로 생성된다. 여기서 0.5V의 평면내 전류 펄스를 10ms 동안 주입하면 도 14의 (c)와 같이 SOT에 의해 게이트 영역의 스커미온이 비게이트 영역으로 밀리고 스커미온이 자발적으로 생성되어 게이트 영역의 빈 공간을 채운다. 게이트 영역에서 이동한 스커미온은 8.7 Oe의 $+H_z$ 에서 비게이트 영역 내에서도 안정적이다.
- [121] 게이트 영역에서 비게이트 영역으로의 스커미온 전달은 게이트/비게이트 영역의 계면을 통과할 때 스커미온의 모양과 위상이 잘 보존될 때만 가능하다. 이러한 작동은 본 발명이 새로운 스커미온 발생기로 사용될 수 있음을 알 수 있으며, 스커미온이 자발적으로 발생하기 때문에 게이트된 영역을 스커미온 저장소라고 할 수 있다.
- [122] 이상에서 설명한 바와 같이, 본 발명은 PMA와 스트라이프 도메인 폭을 조작하여 전압 제어 스커미온 안정성 기술을 제시했다. 스커미온이 제어/비제어 영역의 계면을 통과할 때 형상과 위상이 잘 보존되기 때문에 전압 제어 영역의 공간적 균일성은 본 발명의 스커미온 생성 장치에 적합하게 적용될 수 있다.
- [123] 또한 본 발명에서 제시한 전압 제어 스커미온 안정성 기술을 사용하여 스커미온 저장소 개념을 가진 새로운 스커미온 생성기를 제공할 수 있다.
- [124] 본 발명은 스커미온 트랜지스터 기반 논리 장치를 포함한 스커미온 장치를 설계하고 실현하기 위한 새로운 길을 열 것이다.
- [125]
- [126] 이상과 같이 도면과 명세서에서 최적 실시 예가 개시되었다. 여기서 특정한 용어들이 사용되었으나, 이는 단지 본 발명을 설명하기 위한 목적에서 사용된 것이지 의미 한정이나 특허청구범위에 기재된 본 발명의 범위를 제한하기 위하여 사용된 것은 아니다. 그러므로 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시 예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해 정해져야 할 것이다.

청구범위

- [청구항 1] 스커미온을 생성하고 저장할 수 있는 스커미온 생성 장치로서,
 기판;
 상기 기판 위에 형성된 산화마그네슘(MgO)층, 코발트철보론(CoFeB)층,
 중금속(heavy metal)층을 포함하여 이루어지고 그 일측이 접지되어 있는
 제1 박막스택; 및
 상기 제1 박막스택의 상부 게이트 영역에 형성된 산화알루미늄(AlO_x)층
 과 전극층으로 이루어지는 제2 박막스택;을 포함하여 이루어지는 것을 특
 징으로 하는 스커미온 생성 장치.
- [청구항 2] 제 1항에 있어서,
 상기 전극층을 통하여 상기 게이트 영역에 전압을 인가하여 게이트 영역
 의 수직자기이방성을 제어하고 게이트 영역 및 비게이트 영역의 수직자
 기장을 조절하여 게이트 영역에서의 스커미온 생성 상태와 비게이트 영
 역에서의 스커미온 안정 상태를 형성하고, 면내 전류(in-plane current)를
 인가하여 상기 게이트 영역에서 상기 비게이트 영역으로 스커미온을 토
 출시키는 스커미온 생성 장치.
- [청구항 3] 제 1항에 있어서,
 상기 게이트 영역에 전압을 인가하면 상기 게이트 영역 내에서 수직자기
 이방성이 공간적으로 균일하게 나타나는 것을 특징으로 하는 스커미온
 생성 장치.
- [청구항 4] 제 1항에 있어서,
 상기 산화알루미늄층은,
 알루미늄 전구체와 물을 사용하여 최대한 낮은 온도에서 원자층증착
 (ALD)으로 형성되는 것을 특징으로 하는 스커미온 생성 장치.
- [청구항 5] 제 4항에 있어서,
 상기 산화알루미늄층은, 수소를 함유하고 있는 것을 특징으로 하는 스커
 미온 생성 장치.
- [청구항 6] 제 1항에 있어서,
 상기 중금속층은, W, Ta, Nb, Hf 중 적어도 하나로 이루어지는 것을 특
 징으로 하는 스커미온 생성 장치.
- [청구항 7] 제 1항에 있어서,
 상기 코발트철보론층과 상기 산화마그네슘층 사이에, 초박형 금속층을
 개재하는 것을 특징으로 하는 스커미온 생성 장치.
- [청구항 8] 제 1항에 있어서,
 상기 중금속층 상부에는 자연산화층 또는 금속산화물층이 형성되는 것을
 특징으로 하는 스커미온 생성 장치.
- [청구항 9] 제 1항에 있어서,

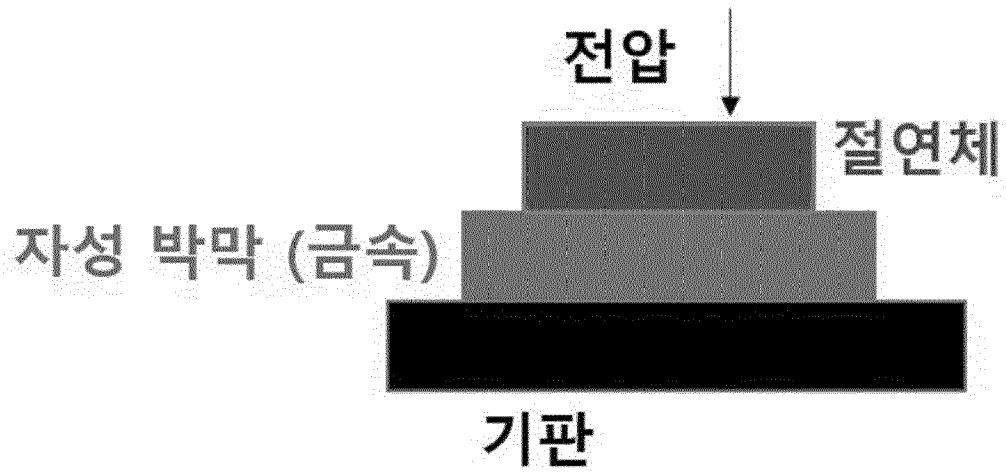
MOKE(Magneto-optical Kerr effect) 현미경을 이용한 상기 게이트 영역 내 자기 이미지는 균일한 스트라이프 도메인 폭을 나타내는 것을 특징으로 하는 스커미온 생성 장치.

[청구항 10] 제 1항에 있어서,
수직자기이방성이 다른 상기 게이트 영역과 비게이트 영역의 계면에서 자화 도메인이 공간적으로 연속적으로 연결되어 있는 것을 특징으로 하는 스커미온 생성 장치.

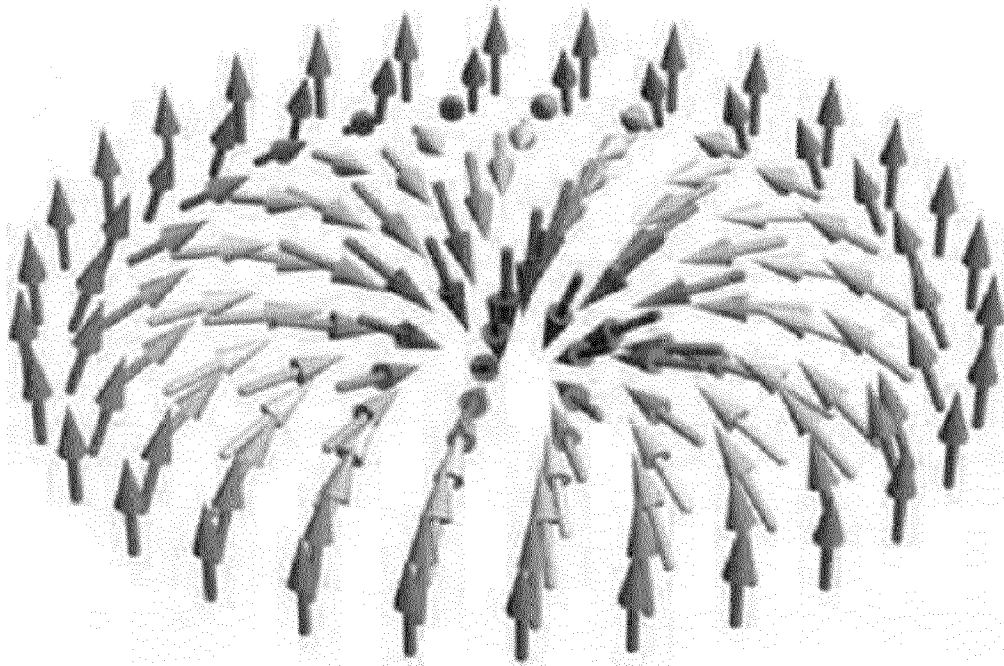
[청구항 11] 제 1항에 있어서,
수직자기이방성이 다른 상기 게이트 영역과 비게이트 영역의 계면에서 도메인 벽 키랄성(domain wall chirality)이 잘 보존되는 것을 특징으로 하는 스커미온 생성 장치.

[청구항 12] 제 1항에 있어서,
상기 면내 전류는 펄스 전류이며, 진폭과 시간을 조절하여 생성되는 스커미온의 수를 조절할 수 있는 것을 특징으로 하는 스커미온 생성 장치.

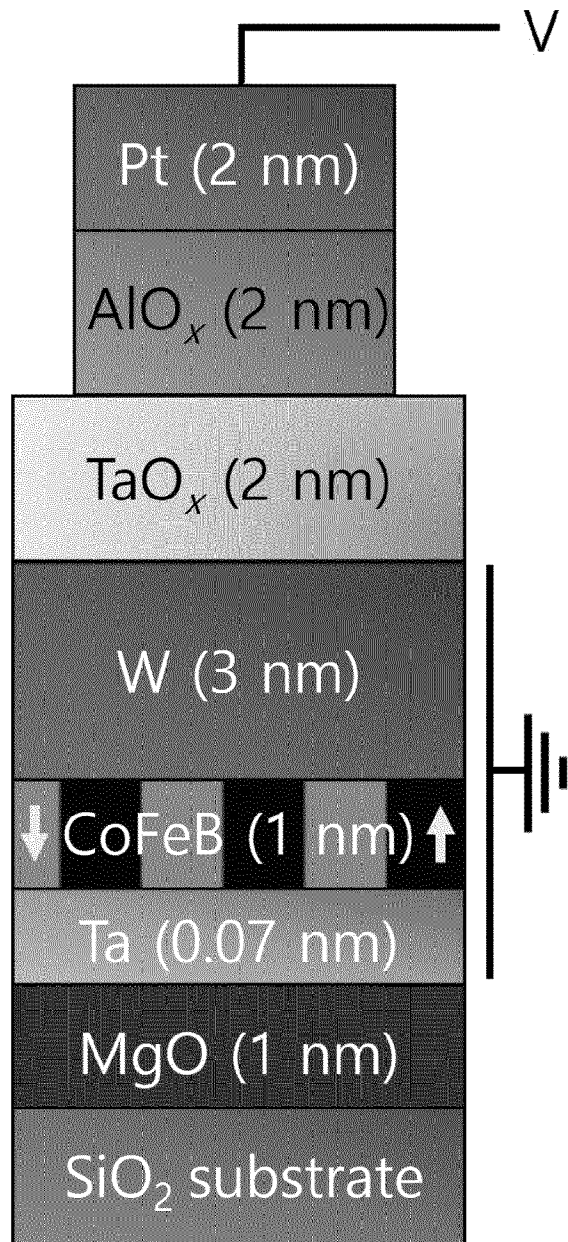
[도1]



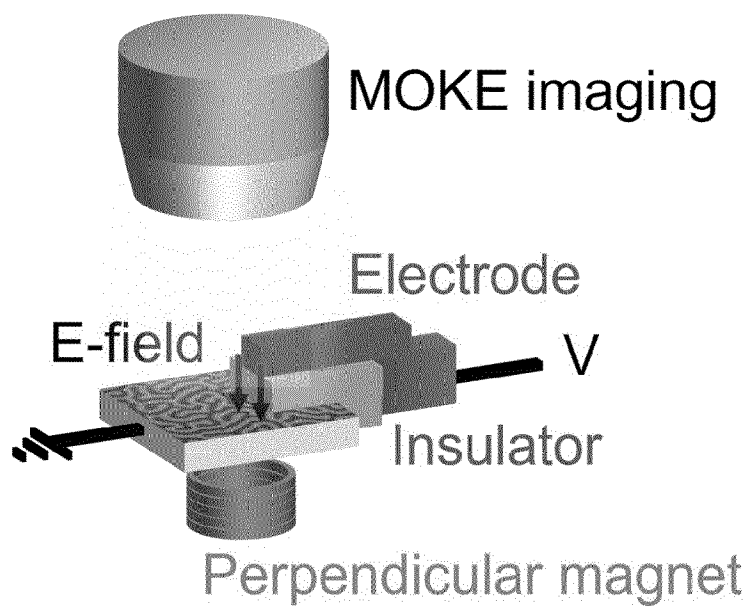
[도2]



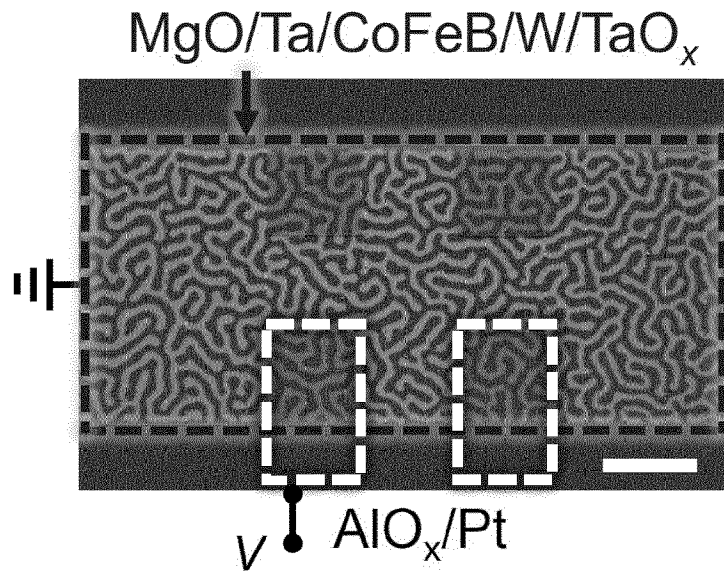
[도3]



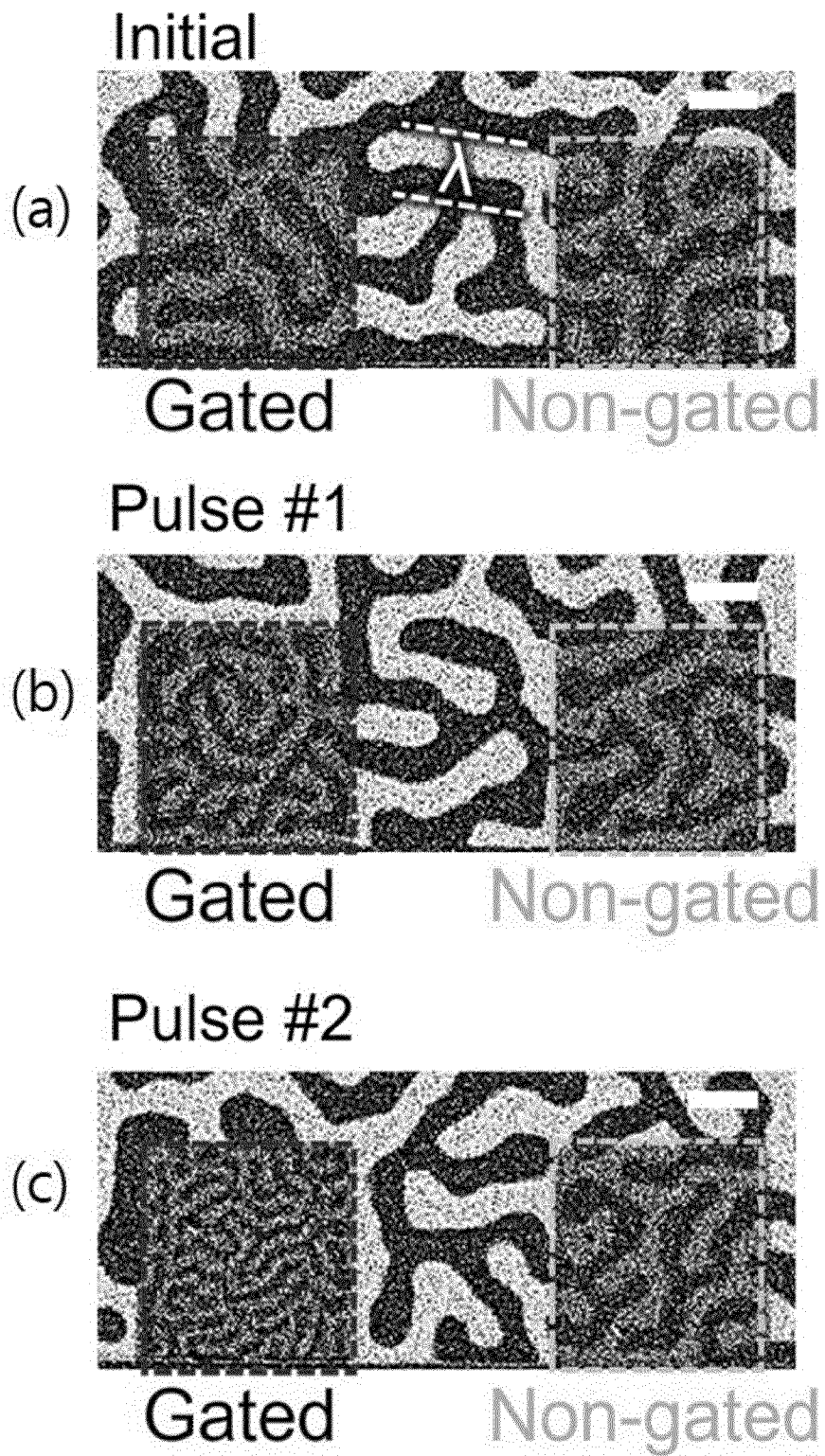
[도4]



[도5]

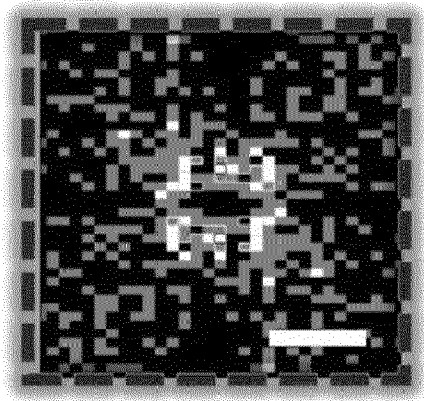


[도6]

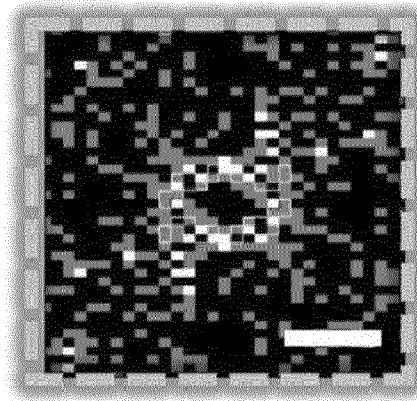


[도7]

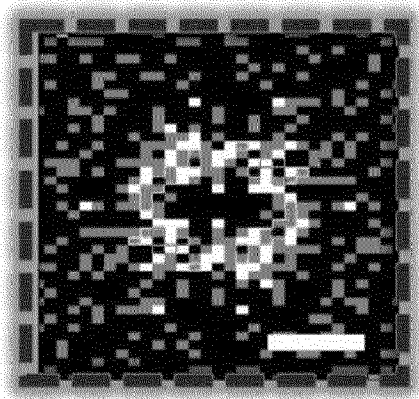
(a)



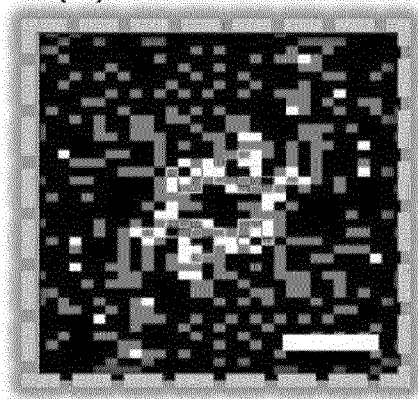
(b)



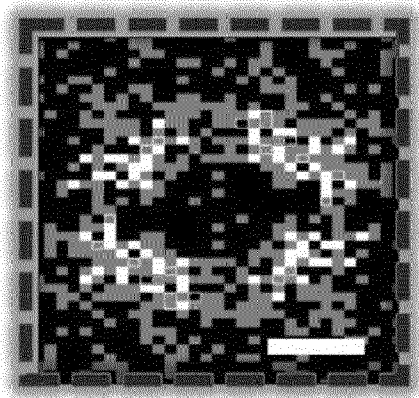
(c)



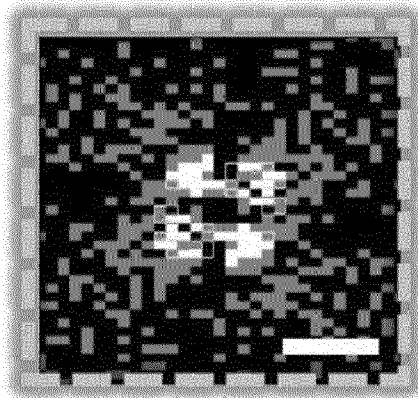
(d)



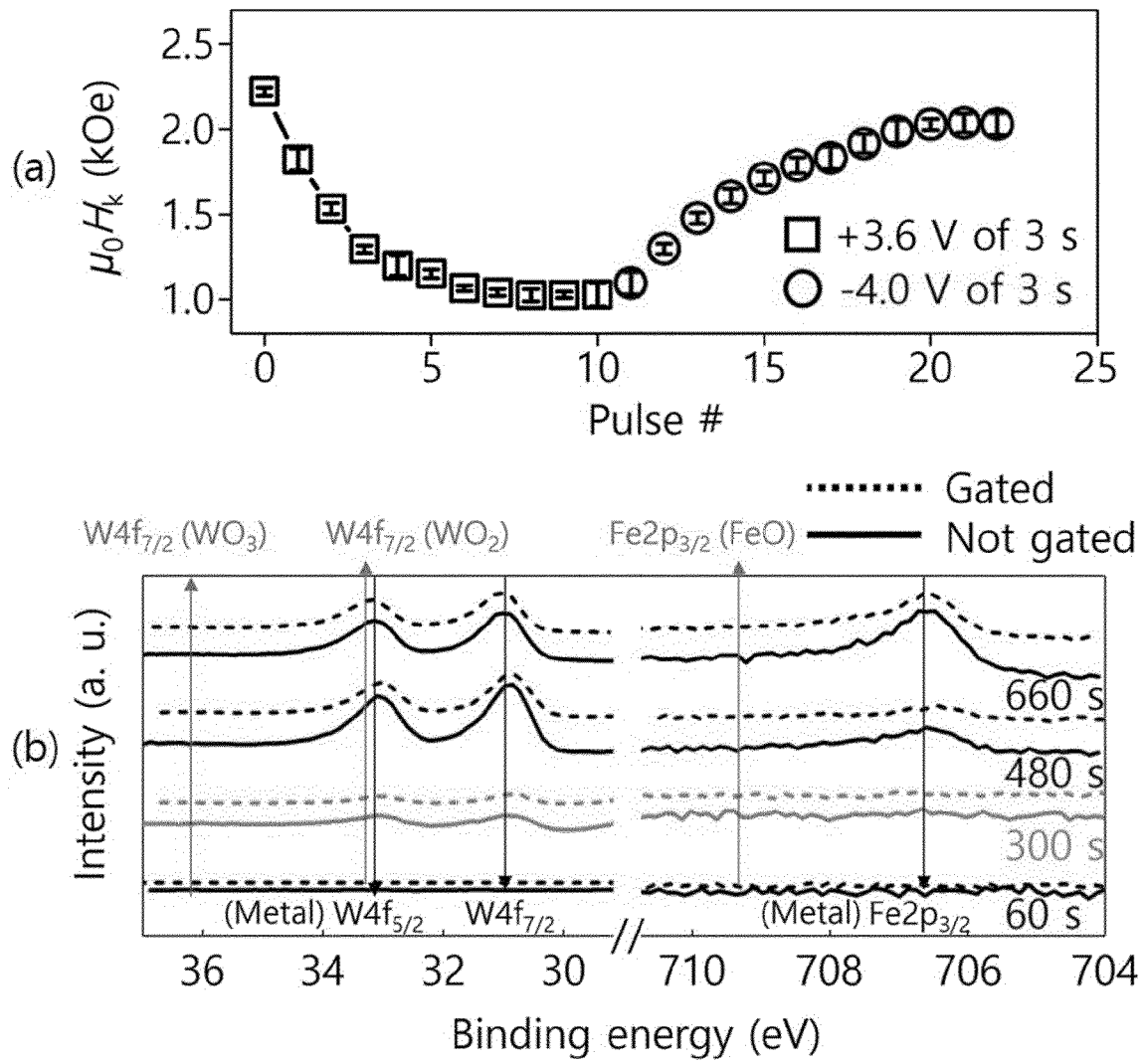
(e)



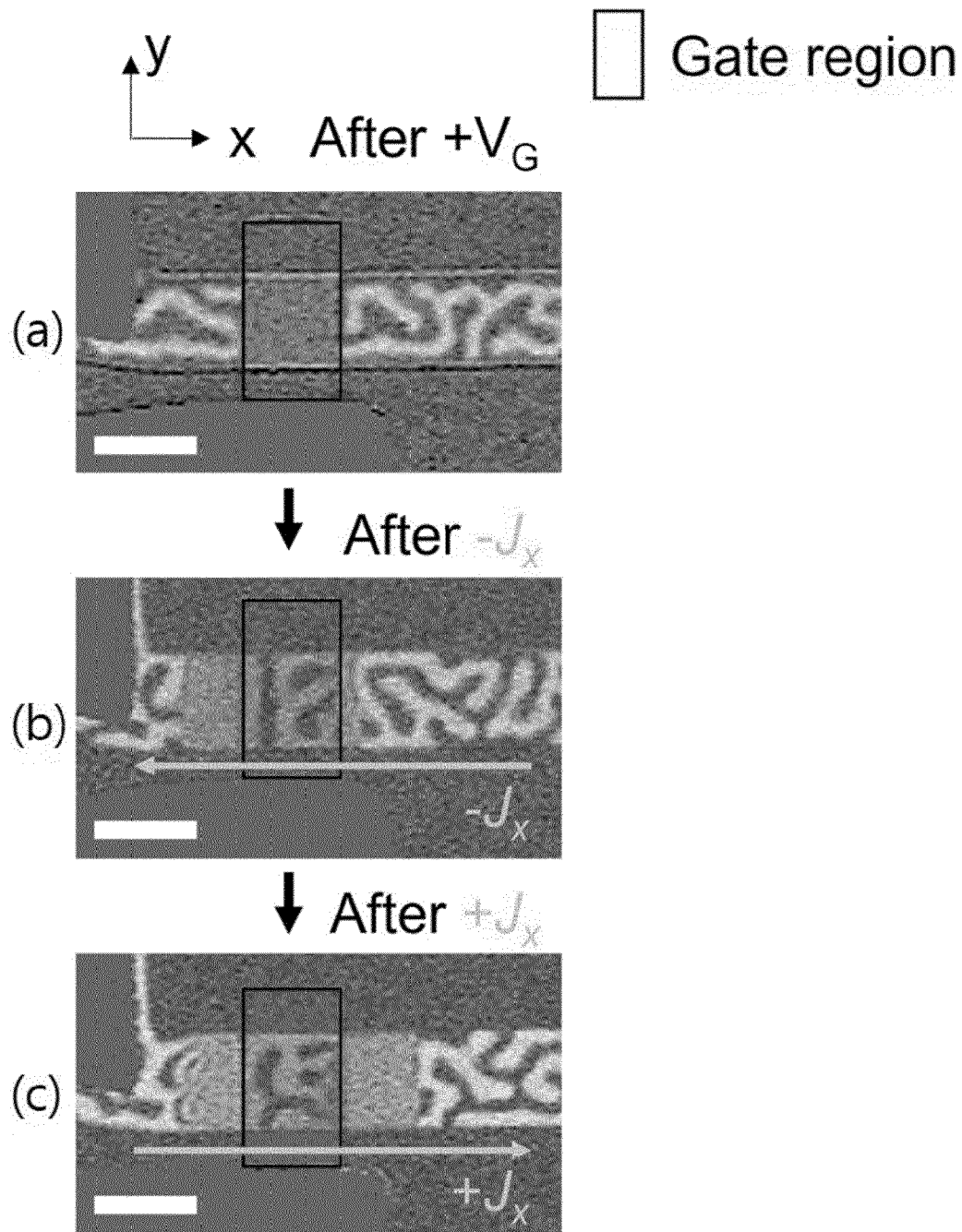
(f)



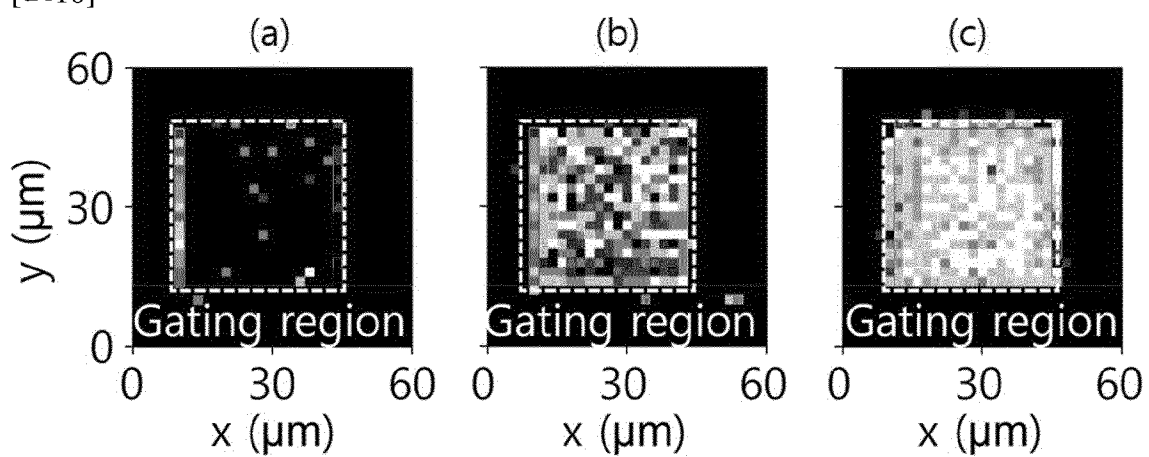
[도8]



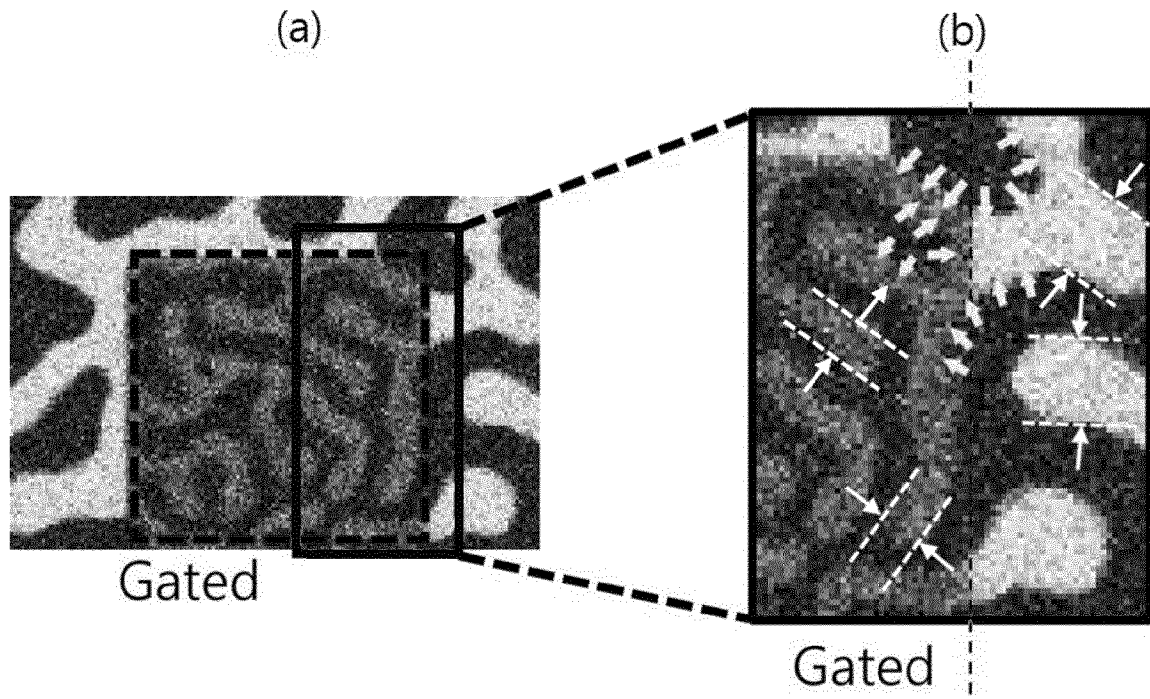
[도9]



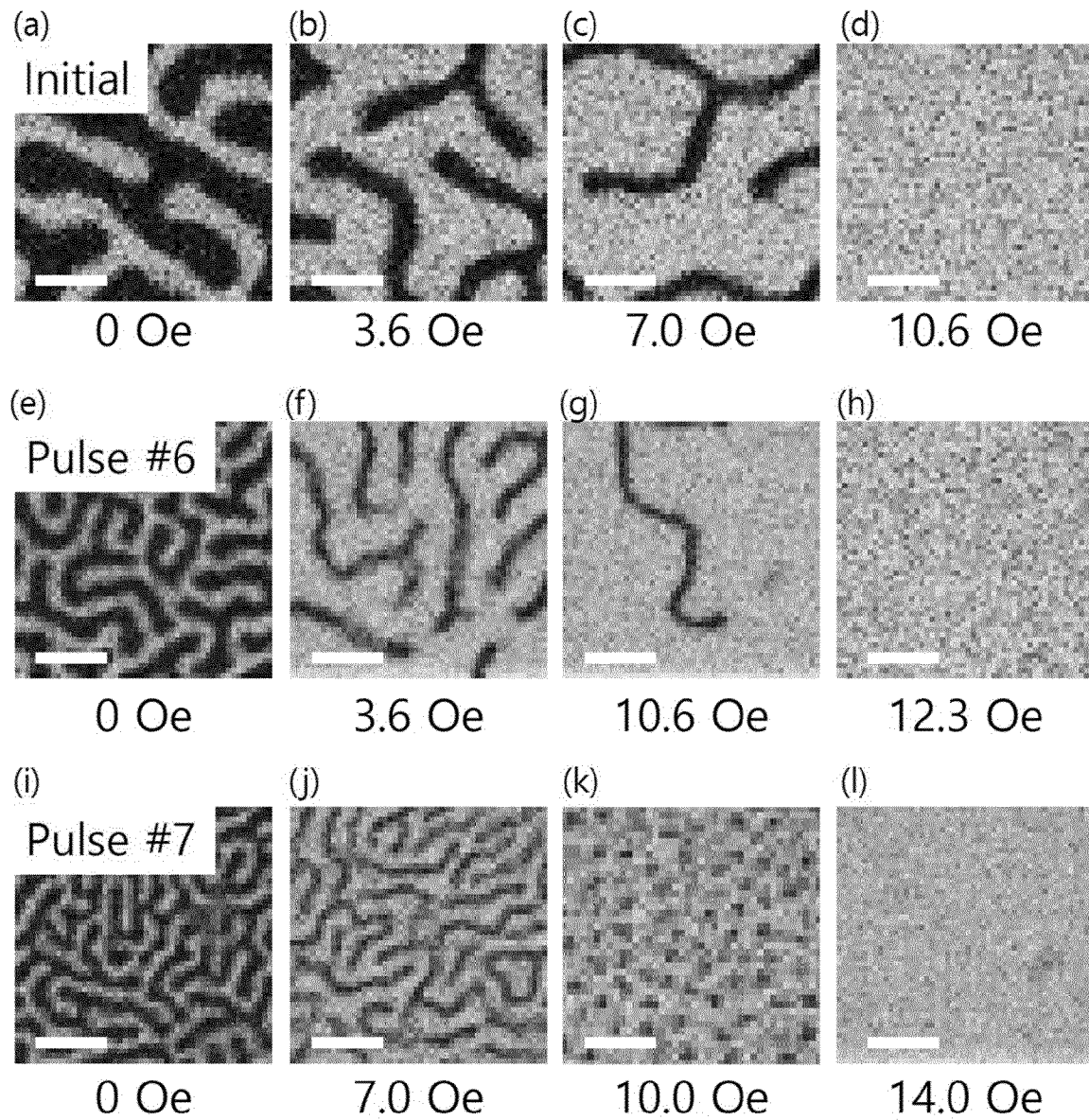
[도10]



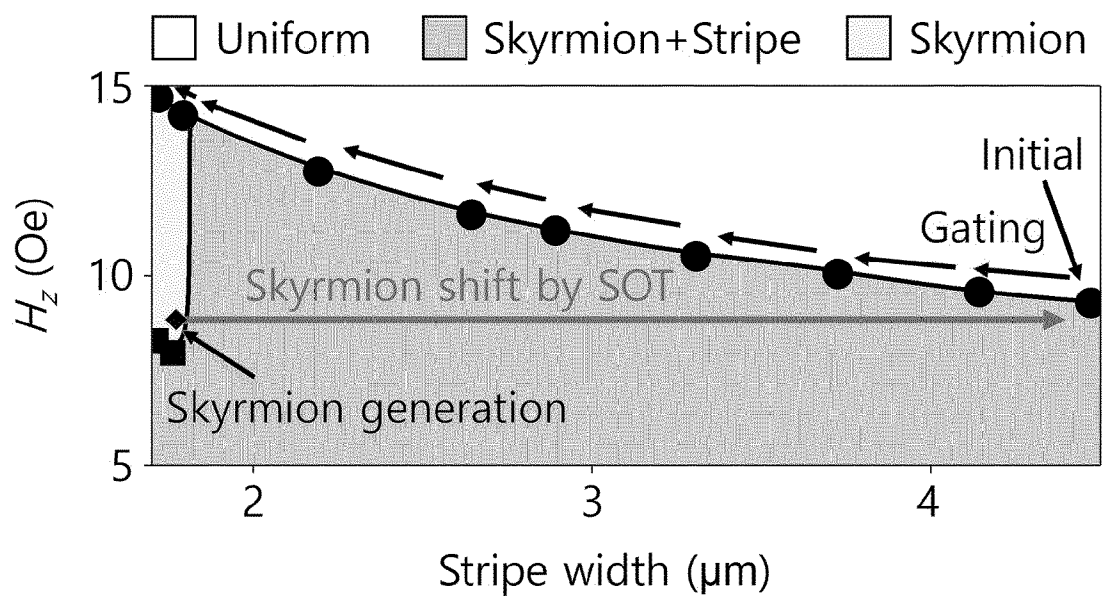
[도11]



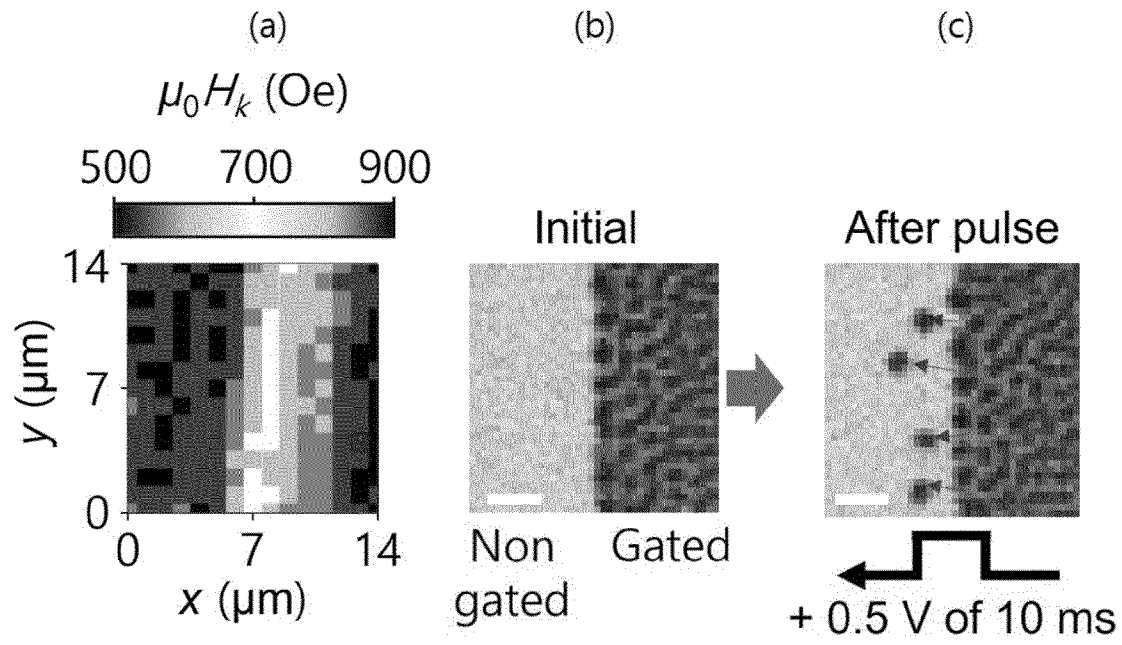
[도12]



[도13]



[도14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/KR2023/017623

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**H10N 50/80(2023.01)i; H10N 50/01(2023.01)i; H10N 50/10(2023.01)i; H10B 61/00(2023.01)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)

H10N 50/80(2023.01); A61B 19/00(2006.01); G11C 11/16(2006.01); H01L 43/02(2006.01); H01L 43/08(2006.01);
H10N 50/10(2023.01)

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: 스커미온(skyrmion), 자성층(magnetic layer), 산화알루미늄(AlOx), 중금속(heavy metal), 수직자기이방성(PMA, perpendicular magnetic anisotropy)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	YANG, Seungmo et al. Magnetic Skyrmion Transistor Gated with Voltage-Controlled Magnetic Anisotropy. ADVANCED MATERIALS. Volume 35, Issue 9, 13 December 2022, pp. 1-8. Retrieved from URL: <://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202208881>. See pages 2-7; and figures 1-3. ※ This document is a document 'declaring exceptions to lack of novelty' in an earlier application that serves as a basis for claiming priority of the present international application.	1-12
Y	KR 10-2023-0007091 A (KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE) 12 January 2023 (2023-01-12) See paragraphs [0046]-[0048]; claim 1; and figure 2.	1
Y	KR 10-2020-0121482 A (KOREA UNIVERSITY RESEARCH AND BUSINESS FOUNDATION) 26 October 2020 (2020-10-26) See paragraphs [0023] and [0028]; and figure 2.	1



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

“D” document cited by the applicant in the international application

“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

16 February 2024

Date of mailing of the international search report

26 February 2024

Name and mailing address of the ISA/KR

Korean Intellectual Property Office
Government Complex-Daejeon Building 4, 189 Cheongsaro, Seo-gu, Daejeon 35208

Facsimile No. +82-42-481-8578

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/KR2023/017623

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KR 10-1902261 B1 (KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE) 28 September 2018 (2018-09-28) See claims 1-14; and figure 2.	1-12
A	WO 2017-151735 A1 (VIRGINIA COMMONWEALTH UNIVERSITY) 08 September 2017 (2017-09-08) See claims 1-19; and figures 1A-1B.	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/KR2023/017623

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
KR	10-2023-0007091	A	12 January 2023	KR	10-2517665	B1	05 April 2023
				US	2023-0006130	A1	05 January 2023
KR	10-2020-0121482	A	26 October 2020	KR	10-2221375	B1	26 February 2021
				WO	2020-213844	A1	22 October 2020
KR	10-1902261	B1	28 September 2018	None			
WO	2017-151735	A1	08 September 2017	US	10593389	B2	17 March 2020
				US	10957372	B2	23 March 2021
				US	2019-0074044	A1	07 March 2019
				US	2020-0211612	A1	02 July 2020

A. 발명이 속하는 기술분류(국제특허분류(IPC))

H10N 50/80(2023.01)i; H10N 50/01(2023.01)i; H10N 50/10(2023.01)i; H10B 61/00(2023.01)i

B. 조사된 분야

조사된 최소문헌(국제특허분류를 기재)

H10N 50/80(2023.01); A61B 19/00(2006.01); G11C 11/16(2006.01); H01L 43/02(2006.01); H01L 43/08(2006.01);
H10N 50/10(2023.01)

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: 스커미온(skyrmion), 자성층(magnetic layer), 산화알루미늄
(AlOx), 중금속(heavy metal), 수직자기이방성(PMA, perpendicular magnetic anisotropy)

C. 관련 문헌

카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
X	SEUNGMO YANG 등. Magnetic Skyrmion Transistor Gated with Voltage-Controlled Magnetic Anisotropy. ADVANCED MATERIALS, Volume 35, Issue 9, 2022.12.13, 페이지 1-8, URL:<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202208881> 페이지 2-7; 및 도면 1-3 ※ 위 문헌은 본 국제출원의 우선권주장의 기초가 되는 선출원에서 '공지에외주장'된 문헌임	1-12
Y	KR 10-2023-0007091 A (한국표준과학연구원) 2023.01.12 단락 [0046]-[0048]; 청구항 1; 및 도면 2	1
Y	KR 10-2020-0121482 A (고려대학교 산학협력단) 2020.10.26 단락 [0023], [0028]; 및 도면 2	1
A	KR 10-1902261 B1 (한국표준과학연구원) 2018.09.28 청구항 1-14; 및 도면 2	1-12
A	WO 2017-151735 A1 (VIRGINIA COMMONWEALTH UNIVERSITY) 2017.09.08 청구항 1-19; 및 도면 1A-1B	1-12

☐ 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
이후에 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
문헌과조합하는 경우로 그 조합이 당업자에게 자명한 경우
청구된 발명은 진보성이 없는 것으로 본다.

“&” 동일한 대응특허문헌에 속하는 문헌

국제조사의 실제 완료일

2024년02월16일(16.02.2024)

국제조사보고서 발송일

2024년02월26일(26.02.2024)

ISA/KR의 명칭 및 우편주소

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

팩스 번호 +82-42-481-8578

심사관

김성훈

전화번호 +82-42-481-8710

국제조사보고서에서 인용된 특허문헌	공개일	대응특허문헌	공개일
KR 10-2023-0007091 A	2023/01/12	KR 10-2517665 B1	2023/04/05
		US 2023-0006130 A1	2023/01/05
KR 10-2020-0121482 A	2020/10/26	KR 10-2221375 B1	2021/02/26
		WO 2020-213844 A1	2020/10/22
KR 10-1902261 B1	2018/09/28	없음	
WO 2017-151735 A1	2017/09/08	US 10593389 B2	2020/03/17
		US 10957372 B2	2021/03/23
		US 2019-0074044 A1	2019/03/07
		US 2020-0211612 A1	2020/07/02