

(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구
국제사무국

(43) 국제공개일
2018년 2월 1일 (01.02.2018)



(10) 국제공개번호
WO 2018/021706 A1

(51) 국제특허분류:

H03B 15/00 (2006.01)

H01L 43/08 (2006.01)

H01F 10/32 (2006.01)

(74) 대리인: 특허법인 누리 (NURY PATENT LAW FIRM);

06131 서울시 강남구 테헤란로 25길 15-5, 4층, Seoul (KR).

(21) 국제출원번호:

PCT/KR2017/006879

(22) 국제출원일:

2017년 6월 29일 (29.06.2017)

(25) 출원언어:

한국어

(26) 공개언어:

한국어

(30) 우선권정보:

10-2016-0095364 2016년 7월 27일 (27.07.2016) KR

(71) 출원인: 고려대학교 산학협력단 (KOREA UNIVERSITY RESEARCH AND BUSINESS FOUNDATION) [KR/KR]; 02841 서울시 성북구 안암로 145, Seoul (KR).

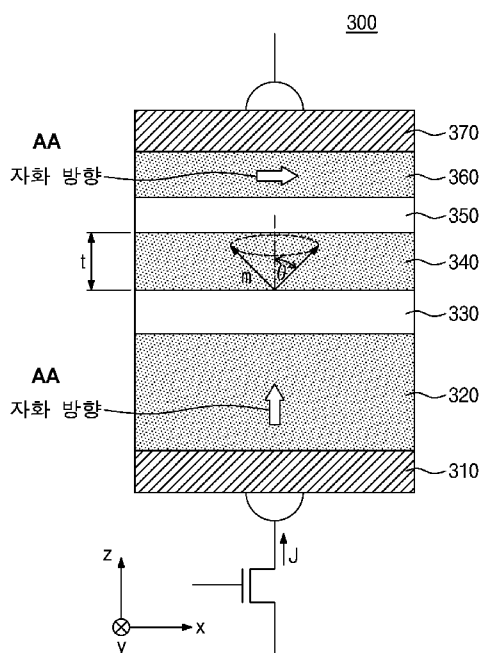
(72) 발명자: 이정진 (LEE, Kyung Jin); 01735 서울시 노원구 중계로 195, 105-305, Seoul (KR). 이서원 (LEE, Seo-Won); 14295 경기도 광명시 목감로 58, 108-102, Gyeonggi-do (KR). 장평화 (JANG, Pyong-Hwa); 10508 경기도 고양시 덕양구 능곡로13번길 16, 204-101, Gyeonggi-do (KR).

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

(84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 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), 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, 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: MAGNETIC NANO-OSCILLATION ELEMENT

(54) 발명의 명칭: 자기 나노 발진 소자



AA ... Magnetization direction

(57) Abstract: A nano-oscillation element according to one embodiment of the present invention comprises: a first fixed magnetic layer; a second fixed magnetic layer arranged on the first fixed magnetic layer; a free magnetic layer interposed between the first fixed magnetic layer and the second fixed magnetic layer; a first non-magnetic layer interposed between the first fixed magnetic layer and the free magnetic layer; and a second non-magnetic layer interposed between the free magnetic layer and the second fixed magnetic layer. The first fixed magnetic layer has a fixed magnetization direction and is a thin film made of a material to be magnetized in the direction perpendicular to a film surface thereof. The free magnetic layer has a cone state aligned in the direction for maintaining a specific angle with respect to the direction perpendicular to a surface thereof. The second fixed magnetic layer has a fixed magnetization direction and is made of a material to be magnetized in the direction parallel to the film surface thereof.

[다음 쪽 계속]

공개:

— 국제조사보고서와 함께 (조약 제21조(3))

(57) 요약서: 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는, 제1 고정 자성층; 상기 제1 고정 자성층 상에 배치된 제2 고정 자성층; 상기 제1 고정 자성층과 상기 제2 고정 자성층 사이에 개재된 자유 자성층; 상기 제1 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 제1 비자성층; 및 상기 자유 자성층과 상기 제2 고정 자성층 사이에 개재된 제2 비자성층을 포함한다. 상기 제1 고정 자성층은 고정된 자화 방향을 가지고, 막면에 대하여 수직한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 자유 자성층은 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향으로 정렬하는 콘 상태(**cone state**)를 가진다. 상기 제2 고정 자성층은 고정된 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진다.

명세서

발명의 명칭: 자기 나노 발진 소자

기술분야

- [1] 본 발명은 자기터널접합(Magnetic Tunnel Junction; MTJ) 또는 거대자기저항 효과를 이용한 나노 발진 소자에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 콘형 자화 상태를 갖는 자유 자성층에 전류를 인가하여 자유 자성층의 자화의 세차운동을 유도하여 마이크로파를 발생시키는 나노 발진 소자에 관한 것이다.

배경기술

- [2] 도 1은 종래의 스핀전달토크와 외부 자기장을 이용한 나노 발진 소자의 구조를 나타낸 단면도이다.
- [3] 도 1을 참조하면, 자기터널접합 구조(100)는 하부전극(110)/고정 자성층(120)/절연층(130)/자유 자성층(140)/상부전극(150)을 가진다. 상기 고정 자성층(120)은 면내 고정된 자화 방향을 가지며, 상기 자유 자성층은 면내에 스위칭되는 자화 방향을 가진다. 상기 자기터널접합 구조(100)에서, 상기 고정 자성층(120)과 상기 자유 자성층(140)의 상대적인 자화 방향에 따라 전기 저항이 달라지는 터널 자기저항 효과가 발생한다. 상기 터널 자기저항 효과는 상기 자기터널접합 구조에서 업스핀(up-spin)과 다운스핀(down-spin)의 전자가 상기 절연층(130)을 터널링하여 흐르는 정도가 다르기 때문에 발생한다. 이러한 터널 자기저항(tunnel magnetic resistance) 효과는 두 강자성체 사이에 절연체가 아닌 비자성체를 삽입한 스핀밸브 구조 (제1 자성체/비자성체/제2 자성체)에서 발생하는 거대 자기저항보다 그 값이 크다. 따라서, 나노 발진 소자의 경우, 상기 자기터널접합 구조는 보다 높은 전력을 갖는 마이크로파를 발생시킨다는 장점을 가진다.
- [4] 상기 터널 자기저항 효과로 인하여 두 자성층의 상대적인 자화방향이 전류의 흐름을 제어하는 현상을 가져오게 된다. 한편, 뉴턴의 제3 법칙인 작용-반작용 법칙에 따라, 상대적인 자화방향이 전류의 흐름을 제어할 수 있다면, 그 반작용으로 전류를 인가하여 자성층의 자화방향에 영향을 주는 것 역시 가능하다. 자기터널접합 구조에 수직(두께) 방향으로 전류를 인가하면, 상기 고정 자성층(120)에 의해 스핀 분극된 전류가 상기 자유 자성층(140)을 통과하면서 자신의 스핀 각운동량(spin angular momentum)을 전달하게 된다. 이러한 스핀 각운동량의 전달에 의해 자화가 느끼는 토크를 스핀전달토크(Spin-transfer-torque)라고 한다. 스핀전달토크를 이용하면 자유 자성층의 자화는 스위칭(switching)될 수 있다. 외부 자기장(Bext)이 함께 걸린 경우, 자화를 지속적으로 회전시키는 자화 세차운동(Magnetization Precession Motion)이 가능하다.
- [5] 면내 방향의 자화를 갖는 자성체로 구성된 자기터널접합 구조를 응용한 종래의

나노 발진 소자는 하부 전극(110)/고정 자성층(120)/절연층(130)/전류에 의해 자화의 방향이 변하는 자유 자성층(140)/상부 전극(150)의 구조를 갖는다. 이러한 자기터널접합 구조의 상부 혹은 하부에 트랜지스터(미도시)가 배치된다. 상기 트랜지스터는 상부 혹은 하부에 위치한 자기터널접합에 수직방향으로 흐르는 전류를 제공하는 역할을 한다.

- [6] 트랜지스터에 의한 전류가 막면에 수직한 방향으로 인가되고, 적절한 방향과 값을 갖는 외부 자기장(Bext)이 인가되면, 상기 자유 자성층(140)에는 자화가 지속적으로 회전하는 자화 세차 운동이 유도된다. 이때 면내에서 일정한 자화 방향을 갖는 고정 자성층(120)에 대해 상기 자유 자성층(140)의 자화가 회전함에 따라 계속해서 두 자화간의 상대적인 방향이 달라진다. 따라서, 터널자기저항에 의해 저항이 달라진다. 이를 통해 마이크로파가 발생하게 된다.
- [7] 도 2는 종래의 스핀 홀 스핀토크와 외부 자기장을 이용한 나노 발진 소자의 구조를 나타낸 단면도이다.
- [8] 도 2를 참조하면, 도선에 흐르는 면내전류에 의해 발생하는 스핀홀 스핀토크(Spin Hall Spin Torque)와 외부 자기장을 함께 걸어 자화 세차운동을 유도하는 소자가 개발되었다. 상기 나노 발진 소자(200)는 하부 전극(210)/고정 자성층(220)/절연층(230)/자유 자성층(240)/도선(250)을 포함한다. 상기 자유 자성층(240)의 자화 세차운동은 외부에서 인가되는 외부 자기장(Bext)과 도선(250)에 면내방향으로 흐르는 전류에 의해 유도된다. 여기서, 상기 고정 자성층(220) 또는 자유 자성층(240)의 자화 방향은 박막의 배치 평면 내에서 x방향 또는 -x방향으로 정렬되어 있다. 상기 도선(250) 내 흐르는 업스핀(up-spin)과 다운스핀(down-spin)의 전자는 스핀-궤도 상호작용(spin-orbit interaction)에 의해 각기 다른 방향으로 편향(polarized)되는 스핀 홀 효과(Spin Hall Effect)를 경험한다. 이에 따라, 전류방향에 수직인 모든 방향으로 스핀전류(spin current)의 발생이 이미 실험적으로 검증되었다. 이때 각 방향으로 발생한 스핀전류는 그 방향(스핀전류의 방향)에 수직으로 편향된 스핀성분을 가진다.
- [9] 도 2에 표시된 좌표계를 참조하면, 도선(250) 내의 면내 전류가 -y 방향 또는 +y 방향으로 흐르는 경우, 발생한 스핀전류 중에서 -z방향 성분(즉, 자유 자성층에 입사하는 스핀전류)은 -x방향 또는 +x 방향의 스핀성분을 가지며 자유 자성체로 흘러 들어간다. 상기 자유 자성체(240)에 흘러 들어간 스핀전류에 의해 상기 자유 자성체(240)는 스핀토크를 받는다. 이 경우, 상기 스핀토크는 스핀 홀 스핀토크(spin Hall spin-torque)라고 불린다. 상기 스핀 홀 스핀토크를 받은 상기 자유 자성체(240)의 자화는 인가되는 외부 자기장(Bext)과 인가되는 전류의 크기와 방향에 따라 +z축을 중심으로 또는 -z축을 중심으로 자화 세차운동을 한다.
- [10] 본 발명의 일 실시예에 따른 자화 세차 운동은 스핀 홀 스핀토크를 이용해 자성층의 자화를 반전시키는 선행된 실험 및 이론 연구[I. M. Miron et al., Nature

476, 189 (2011), L. Liu et al., Science 336, 555 (2012)]를 토대로 하고 있다. 스핀 홀 스핀토크가 자성층의 자화를 반전시키는 역할을 할 때, 외부 자기장이 반대 방향으로 함께 인가되면, 자화는 세차 운동을 한다.

- [11] 하지만 스핀전달토크와 외부 자기장을 모두 이용한 나노 발진 소자는 기존 발진 소자에 비해 외부 자기장을 추가로 공급해주는 장치가 필요하여 실용화에 한계를 갖는다. 이를 극복하기 위해서 외부에서 주어지는 외부 자기장이 없이 발진하는 나노 발진 소자가 요구된다.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

- [12] 본 발명의 해결하고자 하는 일 기술적 과제는 외부 자기장 없이 재료의 자기 이방성 특성을 이용해 콘 상태를 갖는 자유 자성층에 면 수직 전류 스핀전달 토크를 전달하여 자유 자성층의 자화 세차운동을 유도한다.
- [13] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는 기존 구조에서처럼 자기터널접합 구조에서 수직방향 또는 도선의 면내방향으로 흐르는 전류에 의한 스핀전달토크 혹은 스핀 홀 스핀토크와 외부 자기장으로 인한 자유 자성층의 자화 세차운동을 유도하지 않는다.

과제 해결 수단

- [14] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는, 제1 고정 자성층; 상기 제1 고정 자성층 상에 배치된 제2 고정 자성층; 상기 제1 고정 자성층과 상기 제2 고정 자성층 사이에 개재된 자유 자성층; 상기 제1 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 제1 비자성층; 및 상기 자유 자성층과 상기 제2 고정 자성층 사이에 개재된 제2 비자성층을 포함한다. 상기 제1 고정 자성층은 고정된 자화 방향을 가지고, 막면에 대하여 수직한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 자유 자성층은 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향으로 정렬하는 콘 상태(cone state)를 가진다. 상기 제2 고정 자성층은 고정된 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진다.
- [15] 본 발명의 일 실시예에 있어서,
- [16] 상기 자유 자성층은
- [17] ($K_{1,eff} = K_1 - 2\pi M_s^2 < 0$, $K_2 > -\frac{K_{1,eff}}{2}$)을 만족하고,
- [18] K_1 , K_2 , $K_{1,eff}$, 그리고 M_s 는 각각 자기이방성 에너지 밀도의 1차항, 2차항, 1차항과 탈자장 에너지 밀도(demagnetization energy density)를 포함하는 유효 자기이방성 에너지 밀도(effective magnetic anisotropy energy density), 그리고 포화 자화값(Saturation Magnetization Value)을 의미한다.
- [19] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 고정 자성층은 차례로 적층된 자성층, 비자성층, 및 제2 보조 자성층으로 이루어진 반자성체구조일 수 있다. 상기 제2 고정 자성층은 차례로 적층된 자성층, 비자성층, 및 자성층으로 이루어진

반자성체구조일 수 있다. 상기 자성층은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 비자성층은 Ru, Cu 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 물질로 이루어질 수 있다.

- [20] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 고정 자성층은 차례로 적층된 반강자성층, 자성층, 비자성층, 및 자성층으로 이루어진 교환 바이어스된 반자성체구조일 수 있다. 상기 제2 고정 자성층은 차례로 적층된 자성층, 비자성층, 자성층, 및 반강자성층으로 이루어진 교환바이어스된 반자성체구조일 수 있다. 상기 반강자성층은 Ir, Pt, Mn 및 이들의 합금 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 자성층 및 자성층 각각은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 비자성층은 Ru, Cu 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [21] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 자유 자성층은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [22] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 비자성층 및 상기 제2 비자성층은 절연층이고, 상기 절연층은 AlOx, MgO, TaOx, 및 ZrOx 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [23] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 비자성층 및 상기 제2 비자성층은 금속층이고, 상기 금속층은 Cu, Ta, Pt, W, Gd, Bi, Ir 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [24] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 고정 자성층 및 제2 고정 자성층은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다.
- [25] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 자유 자성층은 CoFeB이고, 상기 자유 자성층의 두께는 0.8nm 내지 1.2nm일 수 있다.

발명의 효과

- [26] 본 발명에 따른 새로운 구조의 자기 나노 발진 소자는 스핀전달토크와 자유자성층의 콘 상태 유효 자기이방성 자기장을 이용해 외부 자기장의 인가 없이 자유 자성층에 화 세차 운동을 유도하는 원리를 이용한다. 스핀전달토크는 전류가 고정 자성층을 지나 스핀 편향되어(spin polarized) 생기는 스핀전류에 의해 자유 자성층에서 발생한다.
- [27] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는 기존 구조에서 1) 외부 자기장을 제공하는 추가적인 장치가 필요하다는 문제점과 2) 주파수의 조율성을 조절하기 힘들다는 문제점을 해결 할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [28] 도 1은 종래의 스핀전달토크와 외부 자기장을 이용한 나노 발진 소자의 구조를 나타낸 단면도이다.
- [29] 도 2는 종래의 스핀 홀 스핀토크와 외부 자기장을 이용한 나노 발진 소자의 구조를 나타낸 단면도이다.

- [30] 도 3(a)은 수직 편광자(p-PL)/비자성층/코니컬리 자화된 자유층(c-FL)을 포함하는 3층 구조를 설명하는 개념도이다.
- [31] 도 3(b)는 탈자화 에너지($K_{l,eff}$) 그리고 2차항 이방성 상수(K_2)의 위상 다이어그램이다.
- [32] 도 4(a)는 전류 밀도에 따른 스핀전달토크(STT)-유도 톨딩 각(θ_s)을 나타낸다.
- [33] 도 4(b)는 마크로스핀(Macrospin) 시뮬레이션 결과와 수학식 4로부터 이론적 예측을 나타낸다.
- [34] 도 5(a)은 전류 밀도에 대한 발진 주파수의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.
- [35] 도 5(b)는 전류 밀도에 대한 파워의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.
- [36] 도 6은 비 $K_2/|K_{l,eff}| (= -1/2 \kappa)$ 의 함수로써 최대 발진 주파수와 출력 전력을 나타낸다.
- [37] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자를 나타내는 단면도이다.
- [38] 도 8은 본 발명의 다른 실시예에 따른 발진 소자를 설명하는 단면도이다.
- [39] 도 9는 본 발명의 다른 실시예에 따른 발진 소자를 설명하는 단면도이다.

발명의 실시를 위한 형태

- [40] 실시예의 설명에 있어서, 각 층(막), 영역, 홀 또는 구조물들이 기판, 각 층(막), 영역, 패드 또는 홀들의 상/위(on)에 또는 "하/아래(under)"에 형성되는 것으로 기재되는 경우에 있어, 상/위(on)와 "하/아래(under)"는 "직접(directly)" 또는 "다른 층을 개재하여(indirectly)" 형성되는 것을 모두 포함한다. 또한 각층의 상/위 또는 하/아래에 대한 기준은 도면을 기준으로 설명한다.
- [41] 도면에서 유사한 참조부호는 여러 측면에 걸쳐서 동일하거나 유사한 기능을 지칭한다.
- [42] 이하, 도면을 참조하여 본 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용을 실시예에 기초하여 설명하도록 하며, 이들 실시예는 당업자가 본 발명을 실시할 수 있기에 충분하도록 상세히 설명된다.
- [43] 본 발명의 다양한 실시예는 서로 다르지만 상호 배타적일 필요는 없음이 이해되어야 한다. 예를 들어, 여기에 기재되어 있는 특정 형상, 구조, 및 특성은 일 실시예에 관련하여 본 발명의 정신 및 범위를 벗어나지 않으면서 다른 실시예로 구현될 수 있다.
- [44] 또한, 각각의 개시된 실시예 내의 개별 구성요소의 위치 또는 배치는 본 발명의 정신, 및 범위를 벗어나지 않으면서 변경될 수 있음이 이해되어야 한다. 따라서, 후술하는 상세한 설명은 한정적인 의미로서 취하려는 것이 아니며, 본 발명의 범위는 적절하게 설명된다면 그 청구항들이 주장하는 것과 균등한 모든 범위와 더불어 첨부된 청구항에 의해서만 한정된다.
- [45] 이하, 본 발명의 일 실시예에 따른 발진 소자의 동작 원리가 설명된다.
- [46] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 우리는 수직 편광자(a perpendicular polarizer)를 가지고 코니컬리 자화된 자유층(a conically magnetized free layer)을 사용하는

제로 필드 초고주파 발진기(zero-field microwave oscillator)를 제안한다. 상기 코니컬리 자화된 자유층은 큰 2차 이방성 상수(second order anisotropy constant, K_2)를 가진 시료에서 구현되었다.

[47] 도 3(a)은 수직 편광자(p-PL)/비자성층/코니컬리 자화된 자유층(c-FL)을 포함하는 3층 구조를 설명하는 개념도이다.

[48] 도 3(b)는 탈자화 에너지($K_{1,eff}$) 그리고 2차항 이방성 상수(K_2)의 위상 다이어그램이다.

[49] 도 3(a)를 참조하면, 수직 편광자(p-PL)는 고정 자성층으로, 면에 수직한 고정된 자화 방향을 가진다. 상기 비자성층은 절연층 또는 비자성 금속층일 수 있다. 상기 비자성 금속층은 Cu, Ta, Ru, Pt, W, Gd, Bi, Ir 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 절연층은 AlO_x , MgO , TaO_x , 및 ZrO_x 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 코니컬리 자화된 자유층(c-FL)은 큰 2차 이방성 상수(second order anisotropy constant, K_2)를 가진 시료에서 구현되고, 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향(cone 상태)으로 정렬하는 콘 상태를 가진다. 상기 코니컬리 자화된 자유층(c-FL)은 CoFeB 재질이고, 그 두께는 콘 상태(cone state)를 유지하기 위하여 0.8 nm 내지 1.2 nm 일 수 있다.

[50] 수직 편광자(p-PL)에서 코니컬리 자화된 자유층(c-FL)으로 흐르는 전자는 음의 전류 밀도에 대응한다. 상기 코니컬리 자화된 자유층(c-FL)의 유효 자기 이방성 에너지는 다음과 같이 주어진다.

[51] [수학식 1]

$$[52] \quad E_{K,eff} = K_{1,eff} \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta,$$

[53] 여기서, θ 는 구좌표계에서 자화의 극각(polar angle)이고, $K_{1,eff} (= K_1 - 2\pi M_s^2)$ 는 탈자화 에너지(demagnetization energy)를 포함하는 1차항 유효 이방성 상수(first-order effective anisotropy constant)이다. K_1 그리고 K_2 는 1차 및 2차항 이방성 상수들이다. M_s 는 포화자화(saturation magnetization)이다.

[54] 자화 이방성 용이축(magnetic anisotropy easy axis)은 탈자화 에너지($K_{1,eff}$) 그리고 2차항 이방성 상수(K_2)의 크기와 부호(sign)에 의존하여 결정된다. 탈자화 에너지($K_{1,eff}$) 그리고 2차항 이방성 상수(K_2)는 위상 다이어그램에서 표시된다.

[55] 양의 탈자화 에너지($K_{1,eff}$)에 대하여, 자성층은 수직 자기 이방성(perpendicular magnetic anisotropy; PMA) 영역을 가진다. 음의 탈자화 에너지($K_{1,eff}$)에 대하여, 상기 자성층은 면내 자기 이방성(in-plane (easy-plane) magnetic anisotropy; IMA) 영역 또는 자화 용이 콘 상태 영역(magnetic easy cone state region)을 가진다.

[56] 상기 자화 용이 콘 상태는 이방성 상수들이 $K_{1,eff} < 0$ 그리고 $K_2 > |K_{1,eff}|/2$ 조건을 만족하는 경우, 안정화된다.

[57] 수학식 1로부터, 평형 극각(equilibrium polar angle; θ_{eq})은 다음과 같이 주어진다.

[58] [수학식 2]

$$[59] \quad \theta_{eq} = \sin^{-1} \sqrt{-K_{1,eff} / 2K_2}.$$

- [60] 우리는 왜 스핀전달토크(STT)가 상기 자화 용이 콘 상태에 대하여 제로-필드 발진을 유발하는 지를 설명한다.
- [61] 도 4(a)는 $K_{1,eff} = -4 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ 및 $K_2 = 2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ 에 대하여 상기 자화 용이 콘 상태에 대한 조건을 만족하는 유효 이방성 에너지(effective anisotropy energy; $E_{K,eff}$)를 나타낸다.
- [62] 도 4(a)는 전류 밀도에 따른 스핀전달토크(STT)-유도 틸딩 각(θ_s)을 나타낸다.
- [63] 도 4(a)를 참조하면, 유효 이방성 에너지($E_{K,eff}$)는 평형 각(equilibrium angle; $\theta_{eq} \sim 0.1\pi$)에서 최소를 보인다. $\theta = \theta_{eq}$ 에서, 자화에 작용하는 이방성 자기장은 소멸한다. 전류(electrical current)가 이 구조에 인가되는 경우, 스핀전달토크(STT)는 평형 각(θ_{eq})에서 스핀전달토크(STT)-유도 틸딩 각(θ_s)로 자화 각을 틸팅시킨다. 이 스핀전달토크(STT)-유도 틸딩은 유효 이방성 자기장을 제로이외(non-zero)로 만든다. 따라서, 상기 자화는 제로이외 유효 자기장(H_{eff}) 주위로 세차한다.
- [64] 상기 스핀전달토크(STT)-유도 틸딩 각(STT-induced tilted angle; θ_s)은 슬론체위스키 항(Slonczewski term)을 가진 란다우-라이프시츠 방정식(Landau-Lifshitz equation)에 의하여 다음과 같이 분석될 수 있다.
- [65] [수학식 3]
- [66]
$$(1 + \alpha^2) \frac{d\hat{\mathbf{m}}}{dt} = -\gamma \hat{\mathbf{m}} \times (\mathbf{H}_{K,eff} + \alpha a_J \hat{\mathbf{p}}) - \alpha \gamma \hat{\mathbf{m}} \times \hat{\mathbf{m}} \times \left(\mathbf{H}_{K,eff} - \frac{a_J}{\alpha} \hat{\mathbf{p}} \right),$$
- [67] 여기서, α 는 댐핑 상수(damping constant)이고, $\hat{\mathbf{m}}$ 은 상기 자유층 자화를 따른 단위 벡터이고, γ 는 자이로마그네틱 비(gyromagnetic ratio)이고, $\mathbf{H}_{K,eff}$ 는 유효 자기 이방성 자기장(effective magnetic anisotropy field)이고, $\mathbf{H}_{K,eff}$ 는 수학식 1의 미분에 의하여
- [68]
$$H_{K,eff} = 2K_{1,eff} / M_S \cos \theta + 4K_2 / M_S (\cos \theta - \cos^3 \theta)$$
- [69] 로 주어진다. $a_J = (\hbar / 2e)(\eta / M_S t)J$ 는 STT 세기(STT magnitude)이고, η 는 스핀 분극 팩터(spin polarization factor)이고, t 는 상기 자유 층의 두께이고, J 는 전류 밀도(current density)이고, $\hat{\mathbf{p}}$ 는 스핀 분극의 단위 벡터(unit vector of spin polarization)이다.
- [70] 여기서, 비록, 자기 터널 접합에서 필드-라이크 STT(field-like STT)가 무시할 수 없는 경우에도, 우리는 단순화를 위하여 필드-라이크 STT(field-like STT)를 무시한다.
- [71] 수학식 3의 우측(right-hand-side)에서 제1 및 제2 항은 자화의 세차 운동 및 유효 댐핑 운동을 각각 기술한다. 제2 항으로부터, 인가 전류(applied current = a_J / α)에 기인한 유효 자기장은 상기 자화 각(magnetization angle)을 평형 각(θ_{eq})에서 스핀전달토크(STT)-유도 틸딩 각(θ_s)로 벗어나도록 구동한다.
- [72] 수직 자화 자유층(perpendicularly magnetized free layer; p-FL) 및 코니컬리

자화된 자유층(c-FL) 모두에 대하여, 스핀 토크에 기인한 상기 유효 자기장이 문턱을 초과하는 경우, 스위칭이 발생한다.

[73] 그러나, $\theta=0$ 에서 문턱 이방성 자기장 값을 가진 수직 자화 자유층(p-FL)과 달리, 코니컬리 자화된 자유층(c-FL)은 $H_{K,eff}$ 에서 음의 $H_{th,1}$ 과 양의 $H_{th,2}$ 을 가지는 두 개의 문턱을 가진다.

[74] 따라서, 수직 자화 자유층(p-FL)의 경우에는, 스핀 토크가 $\theta=0$ 에서 상기 유효 이방성 자기장을 초과할 때 까지 상기 자화 운동은 움직이지 못한다. 한편, 코니컬리 자화된 자유층(c-FL)의 경우에는, 자화는 θ_{eq} 로부터 벗어나고, 제로-필드 초고주파 발진이, 문턱 전류 밀도 $J_{th,1}$ 그리고 $J_{th,2}$ 에 대응하는 두 문턱 사이에서 스핀 토크가 인가된 경우, 실현된다.

[75] $\theta=\theta_s$ 에서, $H_{K,eff} \cdot \alpha_J/\alpha = 0$ 이다. 또한, 2차 항은 이 조건에서 소멸한다. 따라서, θ_s 은 위 조건으로부터 유도되고, 다음과 같이 주어질 수 있다.

[76] [수학식 4]

[77]

$$\theta_s = \cos^{-1} \left[\frac{2\sqrt{1-\kappa}}{\sqrt{3}} \cos \left(\frac{1}{3} \cos^{-1} \chi \right) \right]$$

[78]

$$\begin{aligned} \kappa &= -H_{K1,eff}/2H_{K2}, \\ \chi &= -\frac{9h_s\kappa}{2\sqrt{3}(1-\kappa)^{3/2}}, \\ h_s &= a_J/(\alpha H_{K1,eff}), \\ H_{K1,eff} &= 2H_{1,eff}/M_s, \\ H_{K2} &= 2K_2/M_s. \end{aligned}$$

[79] 도 4(b)는 마크로스핀(Macrospin) 시뮬레이션 결과와 수학식 4로부터 이론적 예측을 나타낸다.

[80] 도 4(b)를 참조하면, 두 문턱 전류 밀도($J_{th,1}$ 그리고 $J_{th,2}$) 사이의 인가된 전류 밀도의 함수로 스핀전달토크(STT)-유도 킬딩 각(θ_s)가 표시된다.

[81] 시뮬레이션에서, 우리는 다음과 같은 파라미터를 사용하였다. $\alpha = 0.01$, $M_s = 800 \text{ emu/cm}^3$, $\eta = 0.5$, $t = 1 \text{ nm}$, $K_{1,eff} = -4 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$, 그리고 $K_2 = 2 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$.

[82] 상기 시뮬레이션 결과는 이론적 예측과 일치한다. 스핀전달토크(STT)-유도 킬딩 각(θ_s)은 음의 전류 밀도에서 평형 각(θ_{eq})으로부터 감소한다. 한편, 스핀전달토크(STT)-유도 킬딩 각(θ_s)은 양의 전류밀도에서 평형 각(θ_{eq})으로부터 증가한다.

[83] 상기 세차 주파수(precession frequency)는 자이로마그네틱 비(gyromagnetic ratio; γ)와 상기 유효 자기 이성방 자기장($H_{K,eff}$)의 곱으로 주어진다. 이 경우, STT에 기인한 상기 유효 자기 이성방 자기장($H_{K,eff}$)은 α_J/α 로 주어진다. 따라서, 발진 주파수(oscillation frequency)는 다음과 같이 주어진다.

[84] [수학식 5]

$$[85] \quad f = \frac{\gamma}{4\pi} \frac{\hbar}{e} \frac{\eta |J|}{\alpha M_s t},$$

[86] 상기 발진 주파수(oscillation frequency; f)는 전류 밀도에 선형적으로 비례한다, 또한 출력 파워($P \propto I^2 (\Delta R)^2 / R$)는 다음과 같이 주어진다.

[87] [수학식 6]

$$[88] \quad P \propto I^2 \sin^2 \left[\cos^{-1} \left[\frac{2\sqrt{1-\kappa}}{\sqrt{3}} \cos \left(\frac{1}{3} \cos^{-1} \chi \right) \right] \right].$$

[89] 도 5(a)은 전류 밀도에 대한 발진 주파수의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

[90] 도 5(b)는 전류 밀도에 대한 파워의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

[91] 도 5(a) 및 도 5(b)를 참조하면, 상기 발진 주파수는 전류 극성을 불문하고 전류 밀도에 대한 거의 선형적으로 증가한다. 전류 밀도가 두 문턱들 사이에 있는 경우에만, 상기 발진 주파수가 나타낸다. 상기 전류 밀도가 이들 문턱들을 초과하는 경우, 발진 대신에 스위칭이 발생한다. 양의 문턱 전류 밀도($J_{th,2} = 16 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$)에서, 상기 발진 주파수는 최대($\sim 9.5 \text{ GHz}$)가 된다. 한편, 발진 각(oscillation angle)은 양의 전류 밀도에 한하여 증가하기 때문에, 출력 전력은 양의 전류 밀도에 한하여 증가한다.

[92] 우리는 수학식 3으로부터 두 문턱 자기장($H_{th,1}, H_{th,2}$)과 이에 대응하는 문턱 전류 밀도($J_{th,1}, J_{th,2}$)를 얻었고 다음과 같이 주어진다.

[93] [수학식 7]

$$[94] \quad H_{th,1} = H_{K1,eff},$$

[95] [수학식 8]

$$[96] \quad J_{th,1} = \alpha \frac{2e}{\hbar} \frac{M_s t}{\eta} H_{K1,eff}$$

[97] [수학식 9]

$$[98] \quad H_{th,2} = \frac{4}{3\sqrt{3}} H_{K2} \sqrt{(1-\kappa)^3},$$

[99] [수학식 10]

$$[100] \quad J_{th,2} = \alpha \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{2e}{\hbar} \frac{M_s t}{\eta} H_{K2} \sqrt{(1-\kappa)^3}.$$

[101] 최대 발진 주파수와 최대 출력 전력은 수학식 10의 양의 문턱 전류 밀도에서 수학식 5 및 6으로부터 유도될 수 있다. 문턱 전류 밀도, 최대 발진 주파수, 및 최대 출력 전력은 이방성 상수의 비(the ratio of anisotropy constants; κ)에 의존한다. 따라서, 높은 발진 주파수를 얻기 위하여, 이방성 상수의 비(the ratio of anisotropy constants; κ)를 증가시킬 필요가 있다.

- [102] 도 6은 비 $K_2/|K_{1,eff}| (= -1/2 \kappa)$ 의 함수로써 최대 발진 주파수와 출력 전력을 나타낸다.
- [103] 도 6을 참조하면, $K_{1,eff}$ 는 $-4 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ 로 고정된다. 상기 비 $K_2/|K_{1,eff}| (= -1/2 \kappa)$ 가 2.5에서 20으로 증가함에 따라, 최대 발진 주파수는 $\sim 4 \text{ GHz}$ 에서 $\sim 40 \text{ GHz}$ 로 약 10 배 변화된다. 또한, 최대 전력은 ~ 32 에서 ~ 3500 으로 약 100 배 증가한다. 비 $K_2/|K_{1,eff}| (= -1/2 \kappa)$ 의 크기가 클수록, 발진 주파수의 전류-유도 튜닝 범위를 더 증가시킨다.
- [104] 상기 이방성 상수의 증가된 비는 전압-유도 이방성 변화에 의하여 달성될 수 있다. 제1 및 제2 이방성 상수(K_1 and K_2)은 전압-유도 스트레인 효과(voltage-induced strain effect)에 의하여 다르게 수정될 수 있다.
- [105] 결론적으로, 우리는 자화 용이 상태의 STT-유도 제로-필드 발진을 제안한다. 우리는 상기 발진 주파와 출력 전력의 분석 공식(analytical formula)을 도출하였다. 최대 발진 주파수와 파워는 제1 이방성 상수에 대한 제2 이방성 상수의 비(the ratio of the second to first anisotropy constants $(= K_2/|K_{1,eff}|)$)에 의하여 결정된다.
- [106] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 넓은 파장 조절성(wide frequency tunability)을 가진 제로-자기장 스핀 토크 발진기가 제안된다.
- [107] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는 차례로 적층된 수직 편광자(p-PL)/비자성층/코니컬리 자화된 자유층(c-FL)을 포함한다. 상기 자유 자성층의 자화의 세차 운동에 의하여 초고주파가 발생한다.
- [108] 강자성체에서는, 자기 이방성에 의해 그 자화방향이 면내 방향(in-plane direction), 면에 수직 방향(perpendicular-plane direction), 그리고 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향(cone 상태)으로 정렬하는 세 가지 상태가 존재한다. 자기 이방성 에너지 밀도(magnetic anisotropy energy density)를 나타내는 1차항(K_1)과 2차항(K_2)이 [수학식 11]을 만족할 때, 아래 [수학식 2]와 같은 평형상태의 각도(θ_{eq})을 얻을 수 있다. 이는 자기 이방성 에너지 축이 면에 수직인 방향과 수평인 방향 사이의 특정 각도(θ_{eq})를 유지한다는 것을 의미한다. 수학식 2를 참조하면, 이때 자기 이방성 에너지 축은 면에 수직방향인 z축으로부터 (θ_{eq})의 각도를 갖는 콘 상태(cone state)를 갖는다.
- [109] [수학식 11]
- [110]
$$K_{1,eff} = K_1 - 2\pi M_s^2 < 0, K_2 > -\frac{K_{1,eff}}{2}$$
- [111] [수학식 11]에서, K_1 , K_2 , $K_{1,eff}$, 그리고 M_s 는 각각 자기이방성 에너지 밀도의 1차항, 2차항, 1차항과 탈자장 에너지 밀도(demagnetization energy density)를 포함하는 유효 자기이방성 에너지 밀도(effective magnetic anisotropy energy density), 그리고 포화 자화값(Saturation Magnetization Value)을 의미한다.
- [112] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자를 나타내는 단면도이다.
- [113] 도 7을 참조하면, 나노 발진 소자(300)는 제1 고정 자성층(320); 상기 제1 고정

자성층(320) 상에 배치된 제2 고정 자성층(360); 상기 제1 고정 자성층(320)과 상기 제2 고정 자성층(360) 사이에 개재된 자유 자성층(340); 상기 제1 고정 자성층(320)과 상기 자유 자성층(340) 사이에 개재된 제1 비자성층(330); 및 상기 자유 자성층(340)과 상기 제2 고정 자성층(360) 사이에 개재된 제2 비자성층(350)을 포함한다. 상기 제1 고정 자성층(320)은 고정된 자화 방향을 가지고, 막면에 대하여 수직인 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 자유 자성층(340)은 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향으로 정렬하는 콘 상태(cone state)를 가진다. 상기 제2 고정 자성층(360)은 고정된 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다.

- [114] 상기 하부 전극(310)은 상기 제1 고정 자성층(320)의 하부에 배치되고, Cu, Ta, Ru, Pt, W, Gd, Bi, Ir 및 이들의 합금일 수 있다. 상기 하부 전극(310)은 Ta/Ru의 다층 구조일 수 있다.
- [115] 상기 제1 고정 자성층(320)은 상기 하부 전극(310) 상에 배치될 수 있다. 상기 제1 고정 자성층(320)은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 제1 고정 자성층(320)은 CoFeB/NM(=Ru, Ta)/CoFe의 다층 구조 또는 Co/Pt의 멀티 스택 구조일 수 있다. 상기 제1 고정 자성층은 수직 자기 이방성(perpendicular magnetic anisotropy; PMA)을 가질 수 있다. 이에 따라, 상기 제1 고정 자성층(320)의 자화 방향은 배치 평면에서 수직할 수 있다.
- [116] 상기 제1 비자성층(330)은 상기 제1 고정 자성층(320) 상에 수직으로 정렬되어 배치될 수 있다. 상기 제1 비자성층(330)은 절연층 또는 비자성 금속층일 수 있다. 상기 제1 비자성층(330)이 절연층인 경우, 상기 제1 비자성층(330)은 AlOx, MgO, TaOx, 및 ZrOx 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 제1 비자성층(330)은 MgO, MgAl₂O₄, 또는 Mg/MgO/Mg 구조일 수 있다. 상기 제1 비자성층이 절연체인 경우, 상기 제1 고정 자성층(320)/상기 제1 비자성층(330)/상기 자유 자성층(340)은 자기 터널 접합을 형성할 수 있다.
- [117] 상기 제1 비자성층(330)이 비자성 금속층인 경우, 상기 제1 고정 자성층(320)/상기 제1 비자성층(330)/상기 자유 자성층(340)은 거대자기저항 효과를 제공할 수 있다. 상기 제1 비자성층(330)이 비자성 금속층인 경우, 상기 제1 비자성층은 Cu, Ta, Ru, Pt, W, Gd, Bi, Ir 및 이들의 합금일 수 있다.
- [118] 상기 자유 자성층(340)은 상기 제1 비자성층(330) 상에 수직으로 정렬되어 배치될 수 있다. 상기 자유 자성층(340)은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 자유 자성층(340)은 CoFeB일 수 있다. 상기 자유 자성층(340)은 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향으로 정렬되는 콘 상태(cone state)를 가질 수 있다. 상기 자유 자성층(340)의 두께는 콘 상태를 위하여 0.8 nm 내지 1.2 nm일 수 있다.
- [119] 상기 자유 자성층(340)의 자화는 z 축을 기준으로 세차 운동한다. 따라서, 상기 자유 자성층(340)의 자화의 수직 성분은 일정하다. 수직 자기 이방성을 가지고

면에 수직한 자화 방향을 가지는 상기 제1 고정 자성층(320)과 상기 자유 자성층(340)은 상대적으로 서로 자화 방향의 변화가 없어 터널 자기저항 특성 또는 거대자기저항 효과를 제공하지 않을 수 있다.

- [120] 따라서, 터널 자기저항 특성 또는 거대자기저항 효과에 의하여, 상기 자유 자성층의 세차 운동의 효과를 검출하기 위하여, 별도의 자기 터널 접합 또는 거대자기저항 효과를 발생시키는 제2 비자성층(350) 및 제2 고정 자성층(360)이 배치될 수 있다. 상기 제2 고정 자성층(360)은 면내에서 고정된 자화 방향을 가진다. 즉, 상기 제2 고정 자성층(360)은 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진다. 이에 따라, 상기 자유 자성층(340)의 자화는 z 축을 기준으로 세차 운동함에 따라, 상기 자유 자성층의 자화의 수평 성분은 면 내에서 회전한다. 따라서, 상기 제2 고정 자성층(360)의 자화 방향과 상기 자유 자성층(340)의 수평 성분은 시간에 따라 상대적으로 서로 자화 방향의 변화에 기인하여 터널 자기저항 특성 또는 거대자기저항 효과를 제공한다.
- [121] 상기 제2 비자성층(350)은 상기 자유 자성층(340) 상에 수직으로 정렬되어 배치될 수 있다. 상기 제2 비자성층(350)은 절연층 또는 비자성 금속층일 수 있다. 절연층인 경우, 제2 비자성층은 AlO_x , MgO , TaO_x , 및 ZrO_x 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 제2 비자성층(350)은 MgO , MgAl_2O_4 , 또는 Mg/MgO/Mg 구조일 수 있다.
- [122] 상기 제2 비자성층(350)이 비자성 금속층인 경우, 상기 제2 비자성층(350)은 Cu, Ta, Ru, Pt, W, Gd, Bi, Ir 및 이들의 합금일 수 있다.
- [123] 상기 제2 고정 자성층(360)은 상기 제2 비자성층(350) 상에 수직으로 정렬되어 배치될 수 있다. 상기 제2 고정 자성층(360)은 박막 면 내에 고정된 자화 방향을 가질 수 있다. 예를 들어, 상기 제2 고정 자성층(360)은 x축 방향으로 자화될 수 있다. 상기 제2 고정 자성층(360)은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 제2 고정 자성층(360)은 CoFeB /비자성금속(=Ru,Ta)/CoFe의 다층 구조 또는 Co/Pt의 멀티 스택 구조일 수 있다.
- [124] 상기 상부 전극(370)은 상기 제2 고정 자성층(360) 상에 배치될 수 있다. 상기 상부 전극(370)은 Cu, Ta, Ru, Pt, W, Gd, Bi, Ir 및 이들의 합금일 수 있다. 상기 상부 전극은 Ta/Ru의 다층 구조일 수 있다.
- [125] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 하부 전극(310)/제1 고정자성층(320)/제1 비자성층(330)/자유 자성층(340)/제2 비자성층(350)/제2고정자성층(360)/상부전극(370)을 포함한다. 상기 자유 자성층(340)의 자화 세차운동은 면 수직 방향으로 흐르는 전류에 의해 유도된다. 여기서, 제1고정 자성층(320)의 자화방향은 +z 방향으로 정렬된다. 상기 하부 전극(310)으로부터 나온 전류는 제1 고정자성층(320)의 자화방향과 전류의 방향에 따라 상기 제1 고정 자성층(320)과 평행 또는 반평행한 방향으로 편향된 스핀성분을 가진다.
- [126] 도선 또는 하부 전극(310)으로부터 나오는 전류가 +z 방향으로 흐르는 경우,

제1 고정자성층(320)을 통과한 전자는 +z 방향으로 편향된 스핀전류가 되고, 반대로 자유 자성층(340)에는 -z 방향으로 편향된 스핀전류가 생긴다. 상기 자유 자성층(340)에 흐르는 스핀 전류에 의해 상기 자유 자성층(340)의 자화는 스핀토크를 받고, 인가되는 전류에 의한 스핀전달토크의 세기와 스핀전달토크의 세기에 상응하는 유효 자기장의 크기에 따라 +z 축을 중심으로 서로 다른 진동수로 자화 세차운동을 한다.

[127] 도 8은 본 발명의 다른 실시예에 따른 발진 소자를 설명하는 단면도이다.

[128] 도 8을 참조하면, 나노 발진 소자(500)는 제1 고정 자성층(520); 상기 제1 고정 자성층(320) 상에 배치된 제2 고정 자성층(560); 상기 제1 고정 자성층(520)과 상기 제2 고정 자성층(560) 사이에 개재된 자유 자성층(340); 상기 제1 고정 자성층(520)과 상기 자유 자성층(340) 사이에 개재된 제1 비자성층(330); 및 상기 자유 자성층(340)과 상기 제2 고정 자성층(560) 사이에 개재된 제2 비자성층(350)을 포함한다. 상기 제1 고정 자성층(520)은 고정된 자화 방향을 가지고, 막면에 대하여 수직한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 자유 자성층(340)은 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향으로 정렬하는 콘 상태(cone state)를 가진다. 상기 제2 고정 자성층(560)은 고정된 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다.

[129] 상기 제1 고정 자성층(520)은 차례로 적층된 하부 자성층(522); 비자성 금속층(524); 및 상부 자성층(526)으로 이루어진 반자성체구조일 수 있다. 상기 제2 고정 자성층(560)은 차례로 적층된 하부 자성층(562); 비자성 금속층(564); 및 상부 자성층(566)으로 이루어진 반자성체구조일 수 있다. 상기 하부 자성층(522,562) 및 상기 상부 자성층(526,566)은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 비자성 금속층(524,564)은 Ru, Cu 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 제1 고정 자성층의 하부 자성층(522) 및 상부 자성층(526)은 수직 자기 이방성을 가지고 면내 수직한 고정된 자화 방향을 가질 수 있다. 한편, 제2 고정 자성층의 하부 자성층(562) 및 상부 자성층(566)은 면내에 평행한 고정된 자화 방향을 가질 수 있다.

[130] 도 9는 본 발명의 다른 실시예에 따른 발진 소자를 설명하는 단면도이다.

[131] 도 9를 참조하면, 나노 발진 소자(500a)는 제1 고정 자성층(520a); 상기 제1 고정 자성층(520a) 상에 배치된 제2 고정 자성층(560a); 상기 제1 고정 자성층(520a)과 상기 제2 고정 자성층(560a) 사이에 개재된 자유 자성층(340); 상기 제1 고정 자성층(520a)과 상기 자유 자성층(340) 사이에 개재된 제1 비자성층(330); 및 상기 자유 자성층(340)과 상기 제2 고정 자성층(560a) 사이에 개재된 제2 비자성층(350)을 포함한다. 상기 제1 고정 자성층(520a)은 고정된 자화 방향을 가지고, 막면에 대하여 수직한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 자유 자성층(340)은 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향으로

정렬하는 콘 상태(cone state)를 가진다. 상기 제2 고정 자성층(560a)은 고정된 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다.

- [132] 상기 제1 고정 자성층(520a)은 차례로 적층된 반강자성층(521); 하부 자성층(522); 비자성 금속층(522); 및 상부 자성층(526)으로 이루어진 교환 바이어스된 반자성체구조일 수 있다. 상기 제2 고정 자성층(560a)은 차례로 적층된 하부 자성층(562); 비자성 금속층(564); 상부 자성층(566), 및 반강자성층(567)으로 이루어진 교환 바이어스된 반자성체구조일 수 있다. 상기 반강자성층(521,567)은 Ir, Pt, Mn 및 이들의 합금 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 하부 자성층(522,562) 및 상부 자성층(526,566) 각각은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 비자성층 금속층(524,564)은 Ru, Cu 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 물질로 이루어질 수 있다.
- [133] 이상과 같이 본 발명에서는 구체적인 구성 요소 등과 같은 특정 사항들과 한정된 실시 예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시 예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상적인 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다.
- [134] 따라서 본 발명의 사상은 설명된 실시 예에 국한되어 정해져서는 아니되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

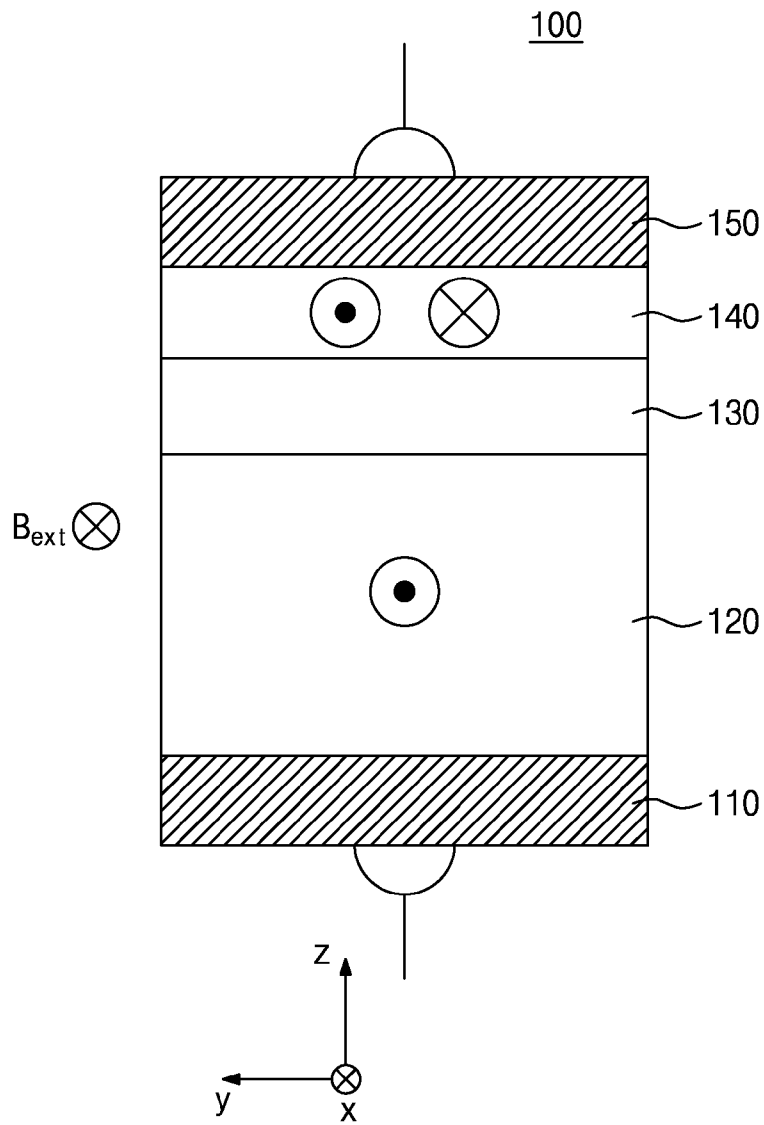
청구범위

- [청구항 1] 제1 고정 자성층;
 상기 제1 고정 자성층 상에 배치된 제2 고정 자성층;
 상기 제1 고정 자성층과 상기 제2 고정 자성층 사이에 개재된 자유 자성층;
 상기 제1 고정 자성층과 상기 자유 자성층 사이에 개재된 제1 비자성층;
 및
 상기 자유 자성층과 상기 제2 고정 자성층 사이에 개재된 제2 비자성층을 포함하고,
 상기 제1 고정 자성층은 고정된 자화 방향을 가지고, 막면에 대하여 수직인 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이며,
 상기 자유 자성층은, 면수직 방향으로 전류가 흐르지 않은 경우, 면 수직 방향으로부터 특정각도를 유지하는 방향으로 정렬하는 콘 상태(cone state)를 가지고,
 상기 제2 고정 자성층은 고정된 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막인 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.
- [청구항 2] 제 1 항에 있어서,
 상기 자유 자성층은

$$\left(K_{1,eff} = K_1 - 2\pi M_s^2 < 0, K_2 > -\frac{K_{1,eff}}{2} \right)$$
을 만족하고,
 K_1 , K_2 , $K_{1,eff}$, 그리고 M_s 는 각각 자기이방성 에너지 밀도의 1차항, 2차항, 1차항과 탈자장 에너지 밀도(demagnetization energy density)를 포함하는 유효 자기이방성 에너지 밀도(effective magnetic anisotropy energy density), 그리고 포화 자화값(Saturation Magnetization Value)을 의미하고,
 면수직 방향으로 구동 전류가 흐르는 경우, 상기 구동 전류가 두 개의 문턱 전류들 사이에 있는 경우에만 발진하는 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.
- [청구항 3] 제 1 항에 있어서,
 상기 제1 고정 자성층은 차례로 적층된 자성층, 비자성층, 및 제2 보조 자성층으로 이루어진 반자성체구조이고,
 상기 제2 고정 자성층은 차례로 적층된 자성층, 비자성층, 및 자성층으로 이루어진 반자성체구조이고,
 상기 자성층은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 물질로 이루어지며,
 상기 비자성층은 Ru, Cu 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 물질로 이루어진 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.

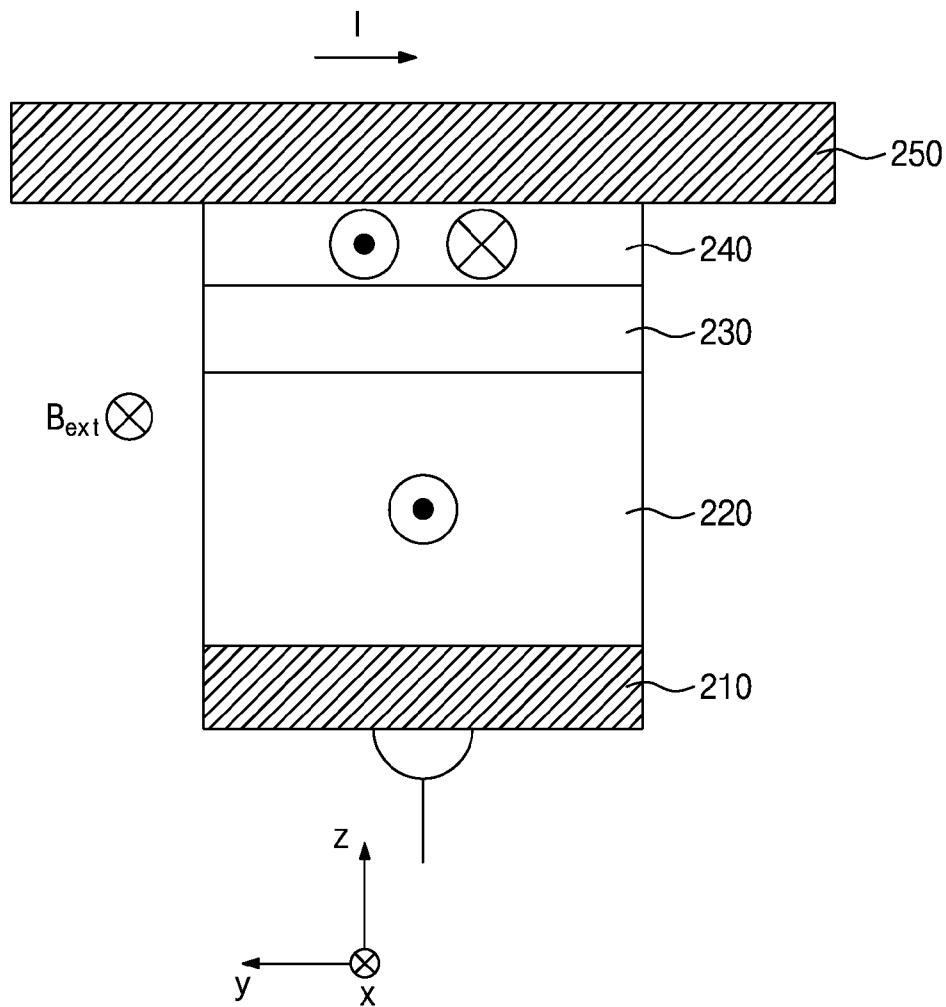
- [청구항 4] 제 1 항에 있어서,
상기 제1 고정 자성층은 차례로 적층된 반강자성층, 자성층, 비자성층, 및 자성층으로 이루어진 교환 바이어스된 반자성체구조이고,
상기 제2 고정 자성층은 차례로 적층된 자성층, 비자성층, 자성층, 및 반강자성층으로 이루어진 교환바이어스된 반자성체구조이고,
상기 반강자성층은 Ir, Pt, Mn 및 이들의 합금 중에서 선택되는 물질로 이루어지고,
상기 자성층 및 자성층 각각은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하고,
상기 비자성층은 Ru, Cu 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.
- [청구항 5] 제 1 항에 있어서,
상기 자유 자성층은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.
- [청구항 6] 제 1 항에 있어서,
상기 제1 비자성층 및 상기 제2 비자성층은 절연층이고,
상기 절연층은 AlOx, MgO, TaOx, 및 ZrOx 중에서 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.
- [청구항 7] 제 1 항에 있어서,
상기 제1 비자성층 및 상기 제2 비자성층은 금속층이고,
상기 금속층은 Cu, Ta, Pt, W, Gd, Bi, Ir 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.
- [청구항 8] 제 1 항에 있어서,
상기 제1 고정 자성층 및 제2 고정 자성층은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 합금 중에서 적어도 하나를 포함하는 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.
- [청구항 9] 제 1 항에 있어서,
상기 자유 자성층은 CoFeB이고,
상기 자유 자성층의 두께는 0.8nm 내지 1.2nm인 것을 특징으로 하는 나노 발진 소자.

[도1]



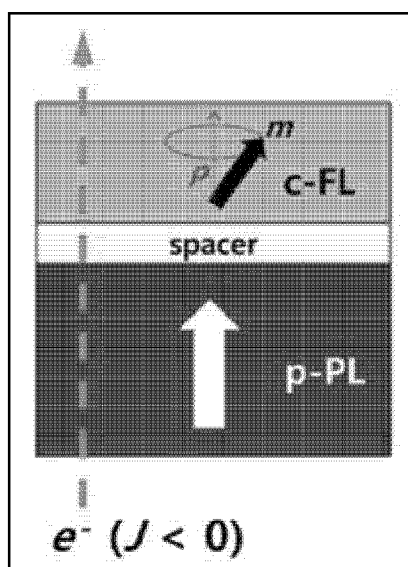
[도2]

200

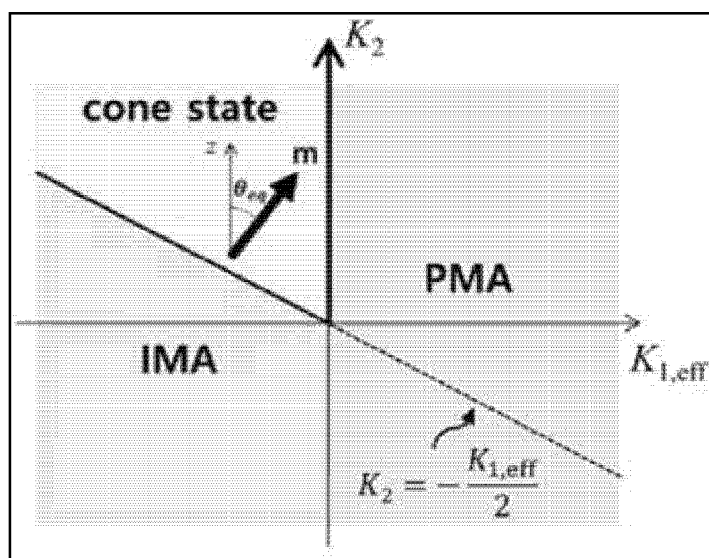


[도3]

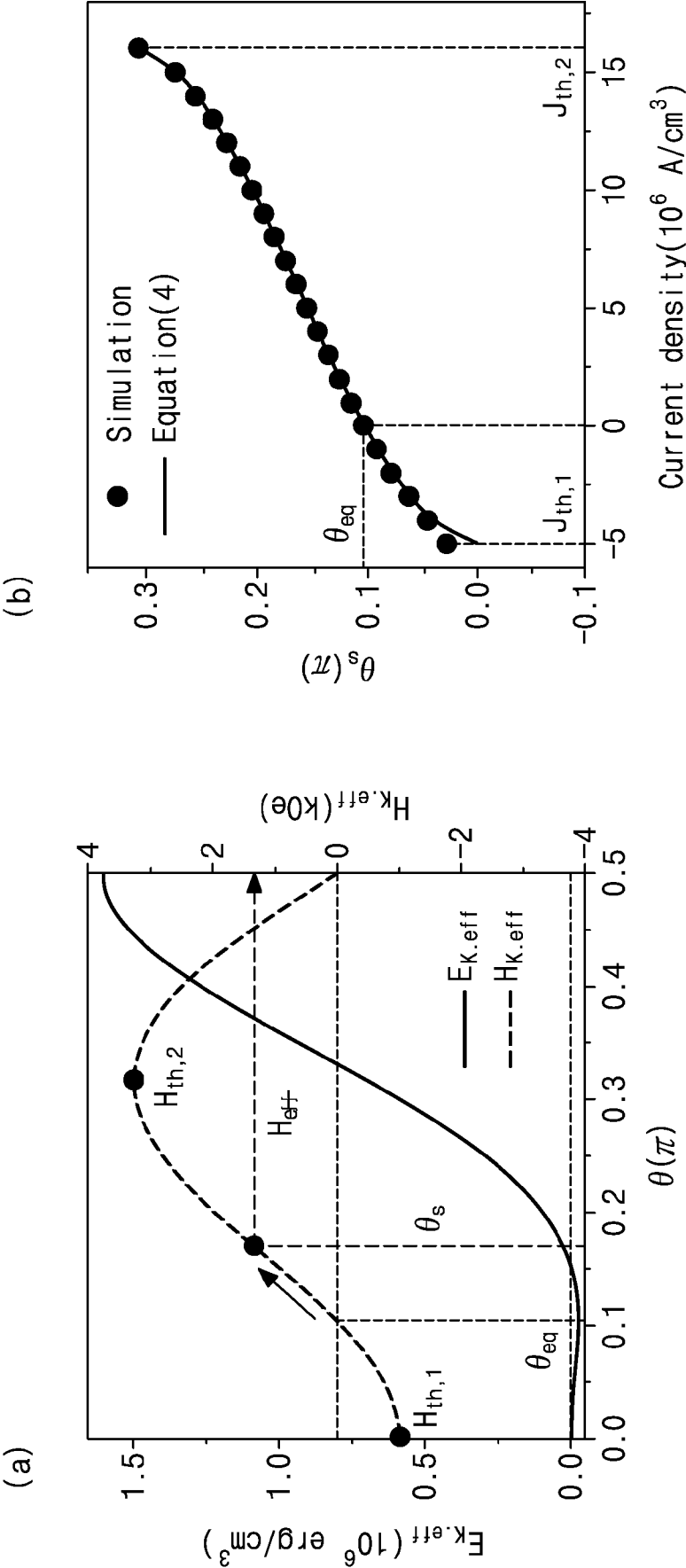
(a)



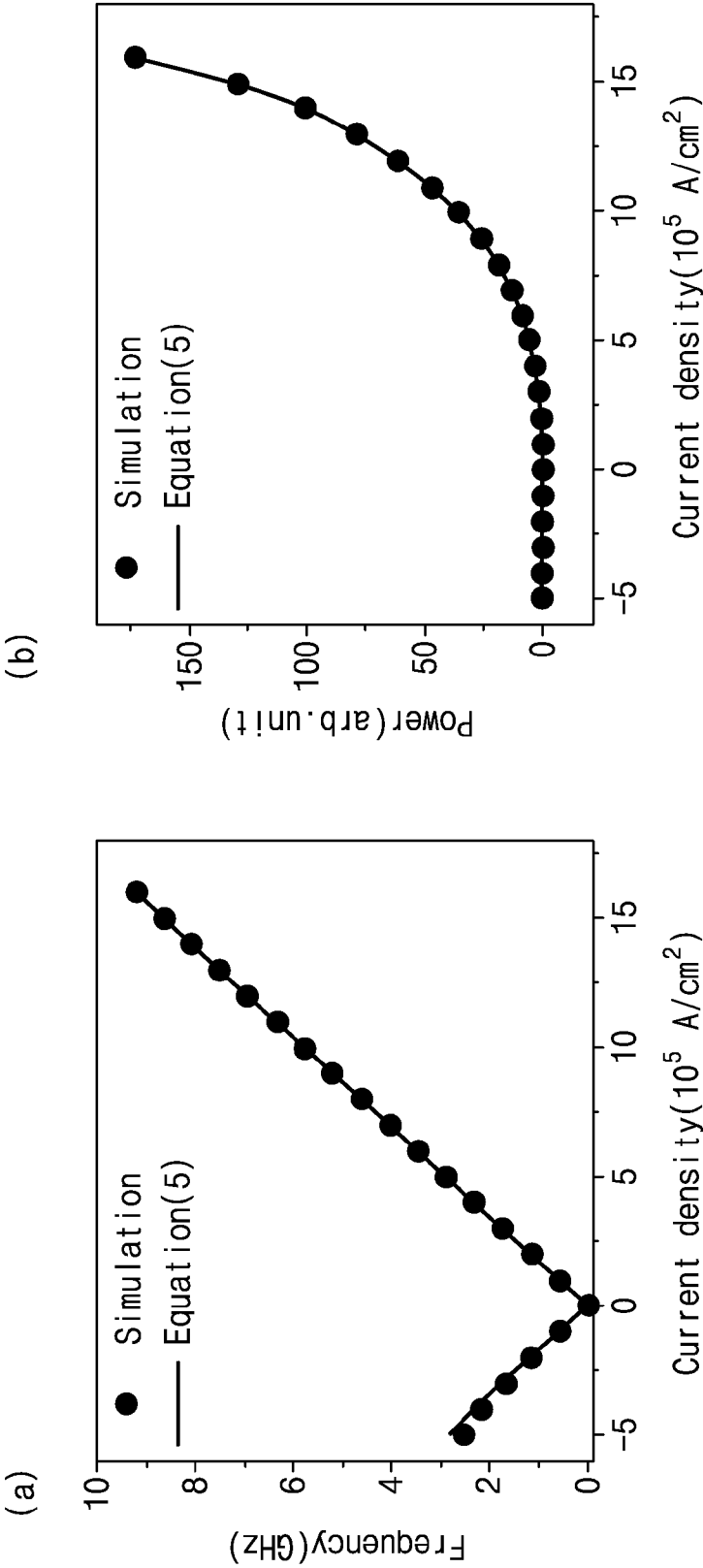
(b)



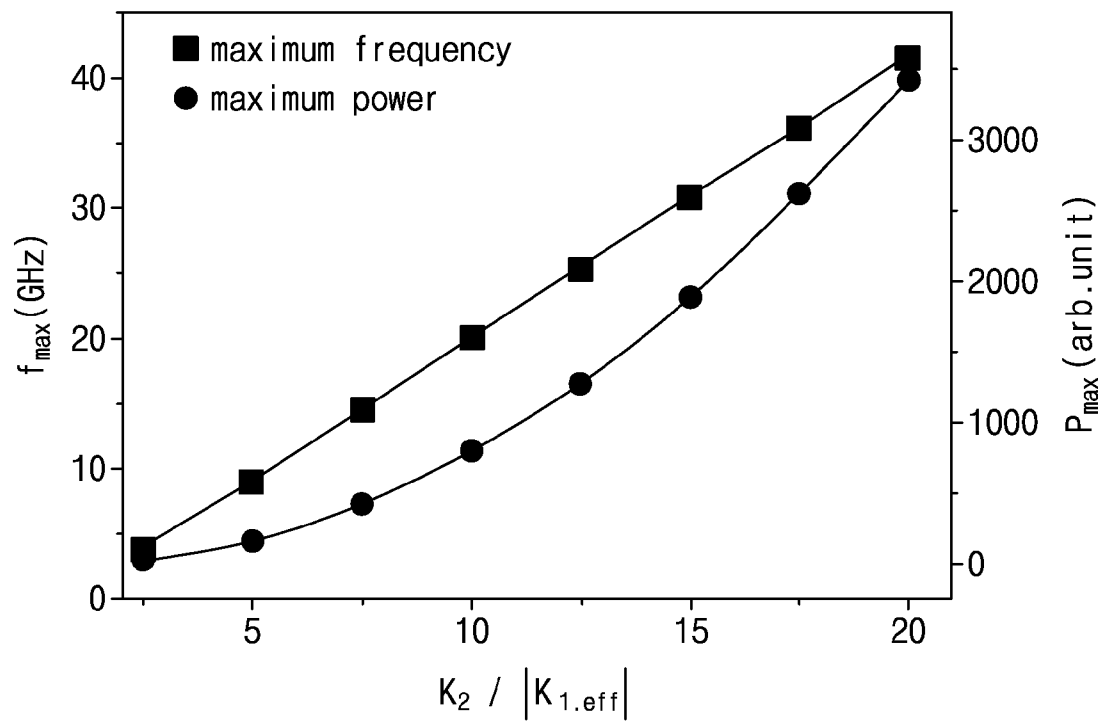
[도4]



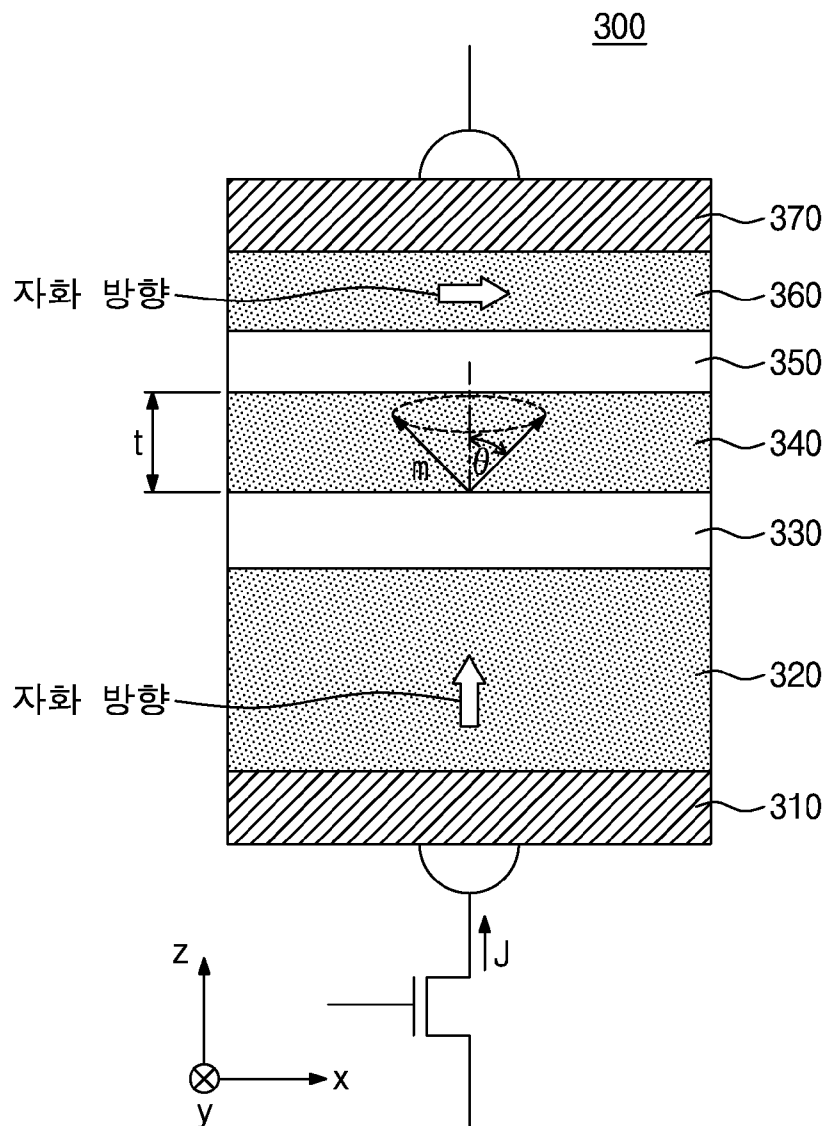
[도5]



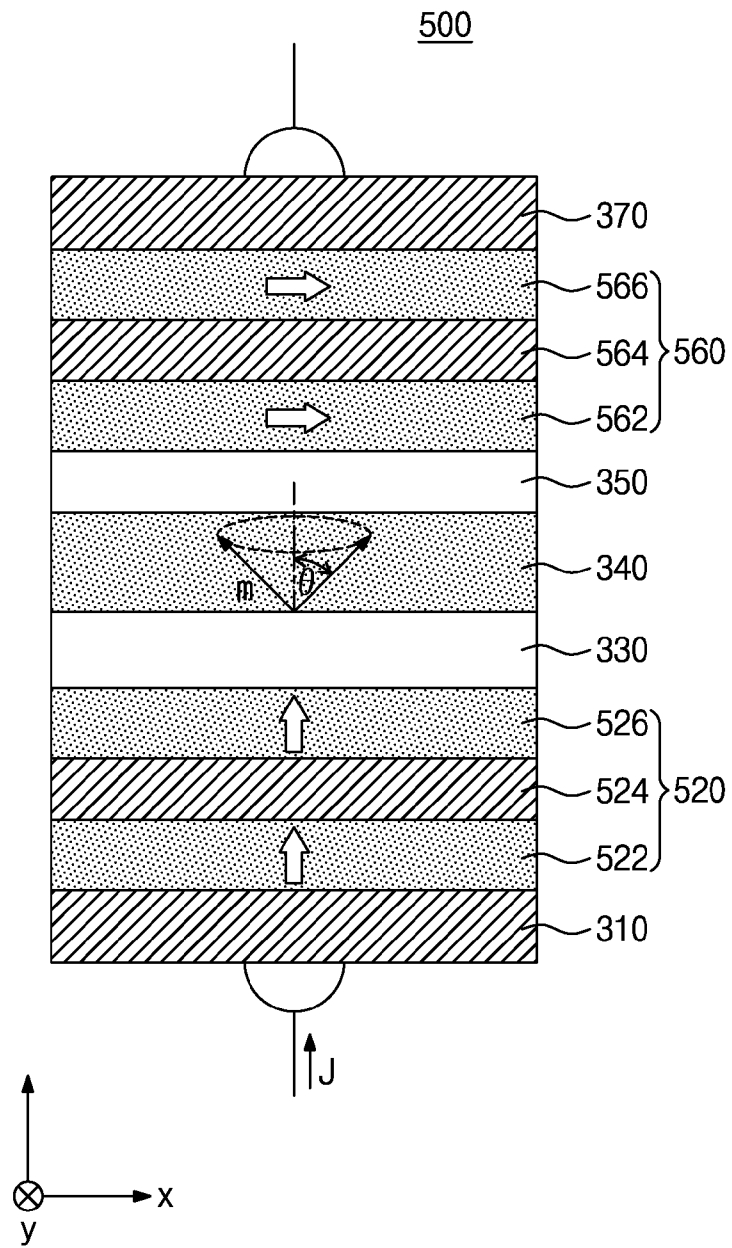
[도6]



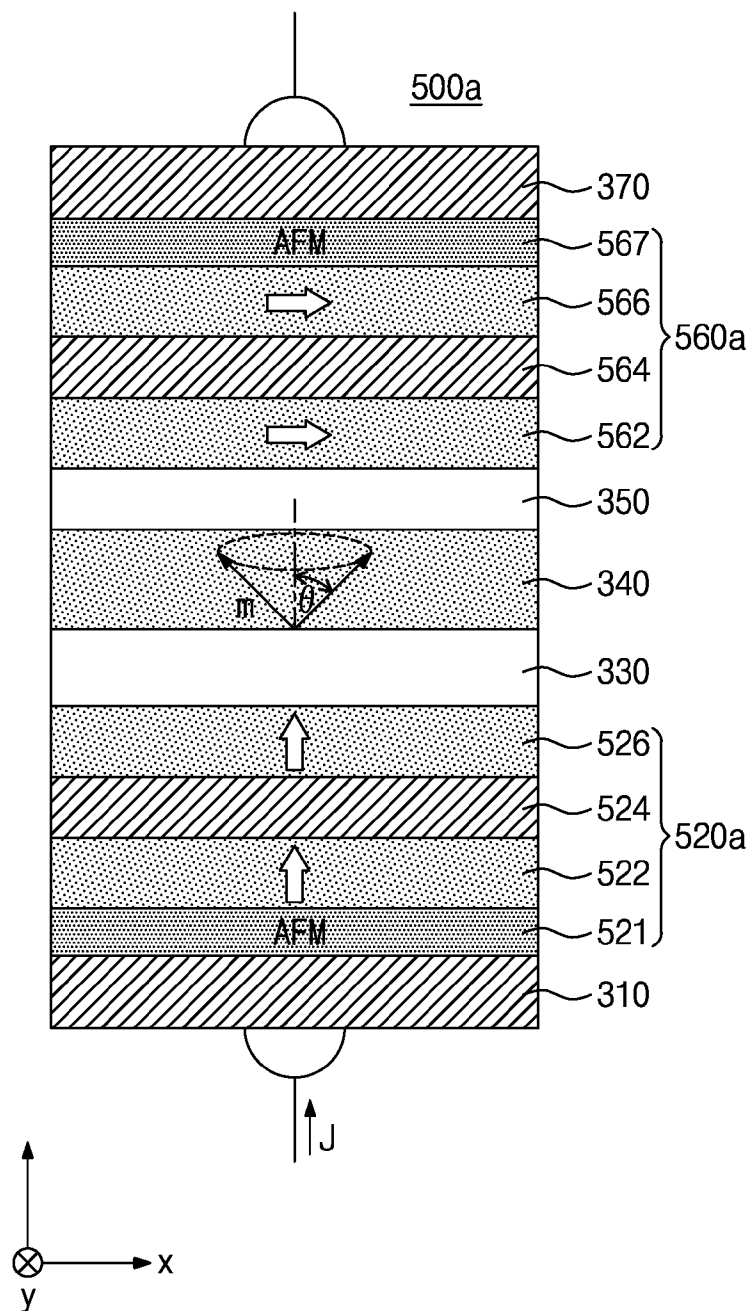
[도7]



[도8]



[도9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/KR2017/006879**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER*****H03B 15/00(2006.01)i, H01F 10/32(2006.01)i, H01L 43/08(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)

H03B 15/00; H01F 10/32; G11C 11/15; G11B 5/127; H01L 43/08

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 layer, oscillation, nano, compact, vibration, angle, electric current, magnetization, free

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2008-0019040 A1 (ZHU, Xiaochun et al.) 24 January 2008 See paragraphs [0020]-[0037] and figures 1A-1D, 9.	1-9
A	US 2011-0032644 A1 (WATTS, Steven M. et al.) 10 February 2011 See paragraphs [0022]-[0046] and figures 2-4.	1-9
A	KR 10-2013-0114327 A (KOREA UNIVERSITY RESEARCH AND BUSINESS FOUNDATION) 17 October 2013 See paragraphs [0038]-[0047] and figure 2.	1-9
A	KR 10-1359399 B1 (KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 10 February 2014 See paragraphs [0024]-[0036] and figures 2-4.	1-9
A	KR 10-2012-0024028 A (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 14 March 2012 See paragraphs [0014]-[0028] and figures 1-4.	1-9



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

31 AUGUST 2017 (31.08.2017)

Date of mailing of the international search report

31 AUGUST 2017 (31.08.2017)

Name and mailing address of the ISA/KR

Korean Intellectual Property Office
Government Complex-Daejeon, 189 Sconsa-ro, Daejeon 302-701,
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/KR2017/006879

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member	Publication date
US 2008-0019040 A1	24/01/2008	US 7616412 B2	10/11/2009
US 2011-0032644 A1	10/02/2011	CN 103490006 A	01/01/2014
		JP 2013-254957 A	19/12/2013
		KR 10-2013-0137531 A	17/12/2013
		US 2011-0031569 A1	10/02/2011
		US 2012-0155156 A1	21/06/2012
		US 2014-0008742 A1	09/01/2014
		US 2014-0151829 A1	05/06/2014
		US 8779538 B2	15/07/2014
		US 8913350 B2	16/12/2014
		US 9412787 B2	09/08/2016
KR 10-2013-0114327 A	17/10/2013	KR 10-1375871 B1	17/03/2014
KR 10-1359399 B1	10/02/2014	US 2015-0303873 A1	22/10/2015
		US 9407202 B2	02/08/2016
		WO 2014-073798 A1	15/05/2014
KR 10-2012-0024028 A	14/03/2012	NONE	

A. 발명이 속하는 기술분류(국제특허분류(IPC)) H03B 15/00(2006.01)i, H01F 10/32(2006.01)i, H01L 43/08(2006.01)i		
B. 조사된 분야 조사된 최소문헌(국제특허분류를 기재) H03B 15/00; H01F 10/32; G11C 11/15; G11B 5/127; H01L 43/08 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: 자성층, 발진, 나노, 소형, 진동, 각도, 전류, 자화, 자유		
C. 관련 문헌		
카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
A	US 2008-0019040 A1 (XIAOCHUN ZHU 등) 2008.01.24 단락 [0020]-[0037] 및 도면 1A-1D, 9 참조.	1-9
A	US 2011-0032644 A1 (STEVEN M. WATTS 등) 2011.02.10 단락 [0022]-[0046] 및 도면 2-4 참조.	1-9
A	KR 10-2013-0114327 A (고려대학교 산학협력단) 2013.10.17 단락 [0038]-[0047] 및 도면 2 참조.	1-9
A	KR 10-1359399 B1 (한국과학기술원) 2014.02.10 단락 [0024]-[0036] 및 도면 2-4 참조.	1-9
A	KR 10-2012-0024028 A (삼성전자주식회사) 2012.03.14 단락 [0014]-[0028] 및 도면 1-4 참조.	1-9
☐ 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 “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 신구성 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 2017년 08월 31일 (31.08.2017)	국제조사보고서 발송일 2017년 08월 31일 (31.08.2017)	
ISA/KR의 명칭 및 우편주소 대한민국 특허청 (35208) 대전광역시 서구 청사로 189, 4동 (둔산동, 정부대전청사) 팩스 번호 +82-42-481-8578	심사관 김성곤 전화번호 +82-42-481-8746 	

국제조사보고서
대응특허에 관한 정보

국제출원번호

PCT/KR2017/006879

국제조사보고서에서 인용된 특허문헌	공개일	대응특허문헌	공개일
US 2008-0019040 A1	2008/01/24	US 7616412 B2	2009/11/10
US 2011-0032644 A1	2011/02/10	CN 103490006 A	2014/01/01
		JP 2013-254957 A	2013/12/19
		KR 10-2013-0137531 A	2013/12/17
		US 2011-0031569 A1	2011/02/10
		US 2012-0155156 A1	2012/06/21
		US 2014-0008742 A1	2014/01/09
		US 2014-0151829 A1	2014/06/05
		US 8779538 B2	2014/07/15
		US 8913350 B2	2014/12/16
		US 9412787 B2	2016/08/09
KR 10-2013-0114327 A	2013/10/17	KR 10-1375871 B1	2014/03/17
KR 10-1359399 B1	2014/02/10	US 2015-0303873 A1	2015/10/22
		US 9407202 B2	2016/08/02
		WO 2014-073798 A1	2014/05/15
KR 10-2012-0024028 A	2012/03/14	없음	