



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0139188
(43) 공개일자 2019년12월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 43/08 (2006.01) H01L 43/02 (2006.01)
H01L 43/10 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 43/08 (2013.01)
H01L 43/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0162795(분할)
(22) 출원일자 2019년12월09일
심사청구일자 없음
(62) 원출원 특허 10-2018-0030023
원출원일자 2018년03월15일
심사청구일자 2018년03월15일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암
동5가)
한국과학기술원
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)
(72) 발명자
이경진
서울특별시 노원구 한글비석로15길 51 현대아파트
203동-1210호
박병국
대전광역시 유성구 가정로 65 대림두레아파트 10
6동 501호
이동규
서울특별시 동대문구 무학로45길 40 엘피스빌 20
1호
(74) 대리인
특허법인 누리

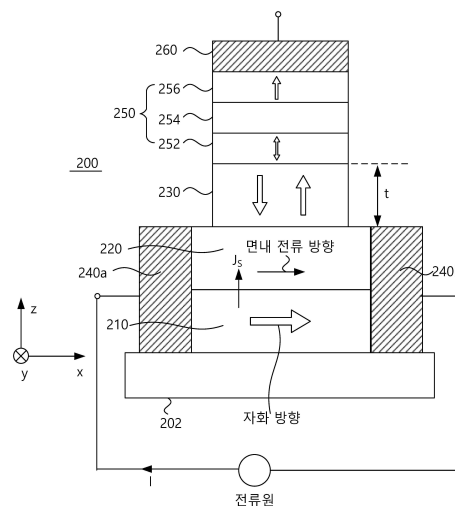
전체 청구항 수 : 총 4 항

(54) 발명의 명칭 저전력 테라헤르츠 자기 나노 발진 소자

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자는, 기판 상에 배치된 강자성층; 상기 강자성층 상에 적층된 비자성 도전층; 상기 비자성 도전층 상에 적층된 반강자성층(또는 페리자성층); 및 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들을 포함한다. 상기 반강자성층(또는 페리자성층)은 막면에 대하여 수직 혹은 수평한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이며, 상기 강자성층은 상기 강자성층의 막면에서 수평한 방향으로 자화되고, 상기 제1, 제2 전극들을 통해 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층에 주입된 면내 전류는 상기 반강자성층(또는 페리자성층)에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 반강자성층(또는 페리자성층)의 부극자의 자화 세차운동을 발생시킨다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

H01L 43/10 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

기관 상에 배치된 강자성층;

상기 강자성층 상에 적층된 비자성 도전층;

상기 비자성 도전층 상에 적층된 반강자성층; 및

상기 강자성층과 상기 비자성 도전층의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들을 포함하고,

상기 반강자성층은 막면에 대하여 수직 혹은 수평한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이며,

상기 강자성층은 상기 강자성층의 막면에서 수평한 방향으로 자화되고,

상기 제1, 제2 전극들을 통해 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층에 주입된 면내 전류는 상기 반강자성층에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 반강자성층의 부격자의 자화 세차운동을 발생시키는 것을 특징으로 하는 자기 나노 발진 소자.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 반강자성층 상에 배치된 자기터널 접합을 더 포함하고,

상기 자기 터널 접합은 자유층/터널 절연층/고정층을 포함하고,

상기 자기터널 접합의 상기 자유층은 상기 반강자성층과 교환상호작용하는 것을 특징으로 하는 자기 나노 발진 소자.

청구항 3

기관 상에 배치된 강자성층;

상기 강자성층 상에 적층된 비자성 도전층;

상기 비자성 도전층 상에 적층된 페리자성층; 및

상기 강자성층과 상기 비자성 도전층의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들을 포함하고,

상기 페리자성층은 막면에 대하여 수직 혹은 수평한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이며,

상기 강자성층은 상기 강자성층의 막면에서 수평한 방향으로 자화되고,

상기 제1, 제2 전극들을 통해 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층에 주입된 면내 전류는 상기 페리자성층에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 페리자성층의 부격자의 자화 세차운동을 발생시키는 것을 특징으로 하는 자기 나노 발진 소자.

청구항 4

제3 항에 있어서,

상기 페리자성층 상에 배치된 자기터널 접합을 더 포함하고,

상기 자기 터널 접합은 자유층/터널 절연층/고정층을 포함하고,

상기 자기터널 접합의 상기 자유층은 상기 반강자성층과 교환상호작용하는 것을 특징으로 하는 자기 나노 발진 소자.

발명의 설명

기술분야

- [0001] 본 발명은 저전력 테라헤르츠(THz) 나노 발진 소자에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 강자성층/비자성층 적층 구조에 면내 전류를 인가하여 인접한 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자(sub-lattice) 자화의 세차운동을 발생시키는 나노 발진 소자에 관한 것이다.
- [0002] [이 발명을 지원한 연구개발 사업] 삼성 미래기술육성사업
- [0003] [과제고유번호]SRFC-MA1702-02
- [0004] [연구사업명] 초저전력 자성체 기반 테라헤르츠 소자 개발

배경기술

- [0005] 도 1은 통상적인 자기 나노 발진 소자를 나타내는 개념도이다.
- [0006] 도 1을 참조하면, 자기 나노 발진 소자(100)는 도선(120)에 흐르는 면내 전류에 의해 발생하는 스핀홀 스핀 토크와 반강자성체(130)를 이용한다. 자기 나노 발진 소자(100)는 도선(120)/반강자성층(130)을 포함하고, 반강자성층(130)의 세차 운동(precession motion)은 도선(120)에 면내 방향으로 흐르는 전류에 의해 유도된다. 도선(120)에 존재하는 스핀 궤도 결합(spin-orbit coupling)을 통해 업스핀과 다운스핀의 전자는 서로 반대방향으로 편향된다. 이로 인해 외부에서 가해진 전류 방향(x 방향)에 수직인 z방향으로 스핀 전류가 발생한다. 이 때 스핀 전류가 전달하는 스핀은 외부 전류 방향(x 방향) 및 스핀 전류 방향(z 방향)에 모두 수직인 y 방향의 성분을 가진다. 이 스핀 성분이 인접한 강자성체에 흘러 들어가면, 상기 강자성체는 스핀전달토크를 받는다. 이러한 토크를 스핀 홀 스핀토크(spin Hall spin torque)라고 한다.
- [0007] 하지만 스핀 홀 스핀토크와 반강자성체를 이용한 나노 발진 소자는 매우 큰 전류 밀도를 필요로 한다. 또한 진동수의 조율성에 한계가 있다. 이를 극복하기 위해서 낮은 전류 밀도에서도 발진하는 나노 발진 소자가 요구된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0008] 본 발명이 해결하고자 하는 기술적 과제는 자기 발진을 위해 요구되는 전류를 저감하는 것이다. 이를 위해 강자성층/비자성층 구조를 가지는 도선이 도입된다. 강자성층/비자성층/반강자성층(또는 페리자성층)을 가진 나노 발진 소자를 이용하면, 낮은 전류 밀도와 진동수의 조율성(frequency tunability)을 향상시킬 수 있다.

과제의 해결 수단

- [0009] 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자는, 기판 상에 배치된 강자성층; 상기 강자성층 상에 적층된 비자성 도전층; 상기 비자성 도전층 상에 적층된 반강자성층; 및 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들을 포함한다. 상기 반강자성층은 막면에 대하여 수직 혹은 수평한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이며, 상기 강자성층은 상기 강자성층의 막면에서 수평한 방향으로 자화되고, 상기 제1, 제2 전극들을 통해 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층에 주입된 면내 전류는 상기 반강자성층에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 반강자성층의 부격자의 자화 세차운동을 발생시킨다.
- [0010] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 반강자성층 상에 배치된 자기터널 접합(magnetic tunnel junction)을 더 포함하고, 상기 자기 터널 접합은 자유층/터널 절연층/고정층을 포함하고, 상기 자기터널 접합의 상기 자유층은 상기 반강자성층과 교환상호작용(exchange interaction)할 수 있다.
- [0011] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 강자성층은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다.
- [0012] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 반강자성층은 Ir, Pt, Mn, Cr, FeMn, NiO, Fe₂O₃ 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다.
- [0013] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 비자성 도전층은 Cu, Ta, Pt, W, Ti, Bi 및 이들의 혼합물 중에서 선택되

는 물질로 이루어질 수 있다.

- [0014] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1, 제2 전극들은 Cu, Ta, Pt, W, Ti, Bi, Ir 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다.
- [0015] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는, 기판 상에 배치된 강자성층; 상기 강자성층 상에 적층된 비자성 도전층; 상기 비자성 도전층 상에 적층된 페리자성층; 및 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들을 포함한다. 상기 페리자성층은 막면에 대하여 수직 혹은 수평한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이며, 상기 강자성층은 상기 강자성층의 막면에서 수평한 방향으로 자화되고, 상기 제1, 제2 전극들을 통해 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층에 주입된 면내 전류는 상기 페리자성층에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 페리자성층의 부격자의 자화 세차운동을 발생시킨다.
- [0016] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 반강자성층 상에 배치된 자기터널 접합을 더 포함하고, 상기 자기 터널 접합은 자유층/터널 절연층/고정층을 포함하고, 상기 자기터널 접합의 상기 자유층은 상기 반강자성층과 교환상호 작용할 수 있다.
- [0017] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 페리자성층은 Co, Gd, Tb, Mn, Ir, Ge, Se, Cr, Y, Fe, 희토류-전이 금속(RE-TM) 합금 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다.
- [0018] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는, 기판 상에 배치된 제1 강자성층; 상기 제1 강자성층에 배치된 제1 비자성 도전층; 상기 제1 비자성 도전층 상에 배치된 제2 강자성층; 상기 제2 강자성층 상에 배치된 제2 비자성 도전층; 상기 제2 비자성 도전층 상에 배치된 제3 강자성층; 및 상기 제1 강자성층과 상기 제1 비자성 도전층의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들을 포함한다. 상기 제1 강자성층은 고정 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 제2 강자성층과 상기 제3 강자성층은 상기 제2 비자성 도전층으로 인해 반강자성 교환 상호작용(antiferromagnetic exchange interaction)을 하는 박막이다. 상기 제1, 제2 전극들을 통해 상기 제1 강자성층과 상기 제1 비자성 도전층에 주입된 면내 전류는 상기 제2 강자성층과 상기 제3 강자성층에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 제2 강자성층과 상기 제3 강자성층의 자화 세차운동을 각각 발생시킨다.
- [0019] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제3 강자성층 상에 배치된 자기터널 접합을 더 포함하고, 상기 자기 터널 접합은 터널 절연층/고정층을 포함한다.
- [0020] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 강자성층, 상기 제2 강자성층, 및 상기 제3 강자성층은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어지고, 상기 제1 비자성 도전층은 Cu, Ta, Pt, W, Ti, Bi 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어지고, 상기 제2 비자성 도전층은 Ru, Ta, Rh, Ir, Cr, Re, Mo, W, V 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다.

발명의 효과

- [0021] 본 발명에 일 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자는 면내 전류가 강자성층과 비자성층을 지나면서 강자성층과 비자성층 사이의 계면에서 스핀 편향되어 생기는 스핀 전류(spin-polarized spin current)를 생성하고, 스핀 전류는 반강자성층(또는 페리자성층)에 계면 스핀 궤도 토크(interfacial spin-orbit torque)를 전달하고, 상기 계면 스핀 궤도 토크는 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자의 자화 세차 운동을 유도한다.
- [0022] 본 발명에 일 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자는, 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자의 자화 세차 운동을 유도함으로써 임계 전류 밀도를 낮추고, 진동수의 조율성을 향상시킬 수 있다.
- [0023] 본 발명에 따른 자기 나노 발진 소자는 강자성층, 비자성층, 반강자성 교환 상호작용을 하고 있는 층을 포함하고, 상기 강자성층은 고정 자화 방향을 갖고 막면에 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이고, 강자성층과 비자성층의 계면에서 발생하는 스핀 전류로 인해 반강자성 교환 상호작용을 하고 있는 층의 자화 세차운동이 유도되는 것을 특징으로 한다.

도면의 간단한 설명

- [0024] 도 1은 통상적인 자기 나노 발진 소자를 나타내는 개념도이다.
- 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자를 나타내는 개념도이다.

도 3은 도 2의 자기 나노 발진 소자의 발진을 설명하는 사시도이다.

도 4는 본 발명의 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자(200)에서 반강자성층(또는 페리자성층)의 규격화된 자화(normalized magnetization, N)의 궤적을 나타내는 시뮬레이션 결과이다.

도 5는 도 4의 자기 나노 발진 소자(200)에서 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 에 따른 임계전류 밀도를 나타내는 그래프이다.

도 6은 도 4의 자기 나노 발진 소자(200)에서 전류 밀도에 따른 발진 주파수를 나타내는 그래프이다.

도 7은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자의 개념도이다.

도 8은 도 7의 자기 나노 발진 소자의 발진을 설명하는 사시도이다.

도 9는 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 에 따른 임계전류 밀도를 나타내는 그래프이다.

도 10은 전류 밀도에 따른 발진 주파수를 나타내는 그래프이다.

도 11은 본 발명의 다른 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자를 나타내는 개념도이다.

도 12는 도 11의 자기 나노 발진 소자(200a)에서 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 에 따른 임계전류 밀도를 나타내는 그래프이다.

도 13은 도 11의 자기 나노 발진 소자(200a)에서 전류 밀도에 따른 발진 주파수를 나타내는 그래프이다.

도 14는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자의 개념도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] 강자성체는 외부에서 강한 자기장을 인가하지 않더라도 자발적으로 자화(spontaneous magnetization)가 되어있는 물질을 말한다. 강자성체의 공명 진동수는 자기 이방성 자기장(magnetic anisotropy field)에 의해 결정되며, 이때의 진동수(f)는 [수학식 1]과 같다.

[0026] [수학식 1]

$$f = \gamma(B_k B_{ex})^{1/2} / 2\pi$$

[0027]

[0028] 상기 [수학식 1]에서, $\gamma = 2 \times 10^{11} \text{ T}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 는 자기회전상수(gyromagnetic ratio), B_k 는 강자성체의 자기 이방성 자기장을 의미한다. 일반적인 강자성체에서의 자기 이방성 자기장의 크기는 1T 정도이다. 따라서 강자성체를 이용한 나노 발진 소자의 진동수는 수십 기가헤르쯔(GHz)로 제한된다.

[0029] 두 강자성체 사이에 비자성체를 삽입한 스핀 밸브 구조 (제1 자성체/비자성체/제2 자성체), 혹은 두 강자성체 사이에 절연체를 삽입한 자기터널접합 구조 (제1 자성체/절연체/제2 자성체)에서 수직 (두께)방향으로 전류를 인가하면, 제1 자성체(고정 자성층)에 의해 스핀 분극된 전류가 제2 자성체(자유 자성층)를 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 이용하여 자유 자성층의 자화를 반전시키거나, 자화를 지속적으로 회전시키는 자화 세차운동을 가능하게 한다. 하지만 강자성체를 이용한 자기 나노 발진 소자는 낮은 동작 진동수(low operating frequency)를 갖는다는 한계가 있다.

[0030] 반강자성체(antiferromagnetic material)는 원자 단위에서 인접한 자기 모멘트(Magnetic moment)가 서로 반대 방향을 유지하려 하는 반강자성 교환 상호작용(Anti-ferromagnetic exchange interaction)이 있는 물질을 말한다. 또한 반강자성체는 인접한 자기 모멘트의 크기가 같은 물질을 말한다.

[0031] 페리자성체(ferrimagnetic material)는 인접한 자기모멘트의 크기 혹은 방향이 다른 물질을 말한다. 일부의 페리자성체는 인접한 두 자기모멘트 간에 반강자성 교환 상호작용이 존재하며 따라서 반강자성체와 마찬가지로 인접한 자기모멘트의 방향이 서로 반대이거나 반대에 가까운 방향을 갖는다. 본 발명에서 페리자성체는 이와 같이 반강자성 특성을 갖는 페리자성체를 의미한다.

[0032] 원자 단위에서 자기모멘트가 반강자성 상태로 결합되어 있으면 공명 진동수는 [수학식 2]와 같다.

[0033] [수학식 2]

$$f = \gamma(B_k B_{ex})^{1/2} / 2\pi$$

[0034]

[0035] 상기 [수학식 2]에서 B_{ex} 는 반강자성(페리자성)체의 반강자성 교환 자기장(anti-ferromagnetic exchange field)을 의미한다. 자기 이방성 자기장이 1T 정도인 반면, 반강자성 교환 자기장은 100T 내지 1000T 정도이다. 따라서 반강자성(페리자성)체를 이용한 나노 발진 소자의 진동수는 수 테라헤르쯔(THz) 영역을 가진다.

[0036] 현재 전자기 스펙트럼에서 진동수가 수십 GHz 이하의 영역에서 발진은 전자 소자를 이용하여 수행된다. 수십 THz 이상의 영역에서 발진은 광학 소자를 이용하여 수행된다. 하지만 0.1~10 THz 영역에서 신호의 생성, 감지, 조절하는 적절한 소자를 찾지 못하고 있다. 0.1~10 THz 영역의 신호는 인체에 무해하고, 물질에 따라 THz 신호의 투과율 등과 같은 특성이 달라 높은 물질 선택성(material selectivity)을 가지며, 여러 분자들의 공명 진동수와 상응한다. 따라서, 0.1~10 THz 영역의 신호는 분자 스펙트럼 분석에 사용할 수 있다. 따라서 공명 진동수가 0.1~10 THz 영역에 해당되는 반강자성층(또는 페리자성층)을 구비한 자기 발진 소자는 낮은 전류 밀도와 진동수의 조율성을 향상시킬 필요가 있다.

[0037] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는, 차례로 적층된 강자성층/비자성 도전층/반강자성층(또는 페리자성층)을 포함한다. 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자의 자화 세차운동은 강자성층과 비자성 도전층을 통해 면내 방향으로 흐르는 전류에 의해 유도된다. 여기서 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자의 자화방향은 면내 평행한 방향 또는 면내 방향에 수직한 방향으로 정렬되어 있다. 강자성층과 비자성 도전층의 계면에서 발생한 스핀 전류는 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자의 자화 세차운동을 유도한다.

[0038] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노 발진 소자는, 차례로 적층된 제1 강자성층/제1 비자성 도전층/제2 강자성층/제2 비자성 도전층/제3 강자성층을 포함한다. 제2 강자성층과 제3 강자성층은 중간에 제2 비자성 도전층으로 인한 반강자성 교환 상호작용을 통해 서로 반평행(anti-parallel)한 자화방향을 갖는 구조이다. 제1 강자성층과 제1 비자성 도전층의 계면에서 발생한 스핀 전류에 의해 반강자성 교환 상호작용을 하고 있는 제2 강자성층과 제3 강자성층의 자화 세차운동을 유도한다.

[0039] 이하, 바람직한 실시예를 들어 본 발명을 더욱 상세하게 설명한다. 그러나 이들 실시예는 본 발명을 보다 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 실험 조건, 물질 종류 등에 의하여 본 발명이 제한되거나 한정되지는 않는다는 것은 당업계의 통상의 지식을 가진 자에게 자명할 것이다.

[0040] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자를 나타내는 개념도이다.

[0041] 도 3은 도 2의 자기 나노 발진 소자의 발진을 설명하는 사시도이다.

[0042] 도 2 및 도3을 참조하면, 자기 나노 발진 소자(200)는 기판(202) 상에 차례로 적층된 강자성층(210), 비자성 도전층(220), 및 반강자성층(230)을 포함한다. 상기 강자성층(210)과 상기 비자성층(220)의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들(240a, 240b)은 면내 전류(I)를 제공한다. 면내 전류(I)는 상기 강자성층(210)과 상기 비자성층(220)의 계면 스핀 궤도 결합에 의하여 상기 반강자성층(230)에 두께 방향으로 분극된 스핀(σ_z)을 포함하는 스핀 전류(J_s)를 제공한다. 상기 강자성층(210)은 고정 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 반강자성층(230)의 부격자는 고정된 자화 방향을 가진다. 상기 반강자성층(230)은 막면에 대하여 수직 혹은 수평한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 강자성층(210)은 상기 강자성층(210)의 막면에서 수평한 방향으로 자화된다. 상기 제1, 제2 전극들(240a, 240b)을 통해 상기 강자성층(210)과 상기 비자성 도전층(220)에 주입된 면내 전류는 상기 반강자성층에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류(J_s)를 제공하여 상기 반강자성층(230)의 부격자의 자화 세차운동을 발생시킨다.

[0043] 스핀 전류(J_s)는 강자성체/비자성체 계면 효과(interfacial effect)에 의해 발생하며 상기 스핀 전류는 y 방향과 z 방향의 스핀방향을 동시에 갖는다.

[0044] 상기 스핀 전류(J_s)의 스핀에 의해 발생하는 계면 스핀 궤도 토크(interfacial spin orbit torque)는 반강자성층(또는 페리자성층)의 자화를 세차운동시킨다.

- [0045] 반강자성층(230)은 페리자성층으로 대체될 수 있다. 상기 반강자성층(또는 페리자성층)에서 부격자(sub lattice)의 자화 세차운동은 강자성층(210)과 비자성 도전층(220)을 통해 면내 방향으로 흐르는 전류에 의해 유도된다. 강자성층(210)의 자화 방향은 $+x$ 방향으로 정렬되어 있다. 전류는 강자성층(210)과 비자성 도전층(220)을 통해 흐르게 되고, 계면에 존재하는 계면 스핀 궤도 결합에 의해 반강자성층(또는 페리자성층)으로 스핀 전류가 흐르게 된다.
- [0046] 전류가 강자성층(210)과 비자성 도전층(220)을 통해 흐르는 경우, 막면에 평행한 자화를 가지는 강자성층(210)/비자성 도전층(220) 구조에서 스핀궤도결합에 의해 y 방향 (σ_y), z 방향 (σ_z)의 스핀을 가지고 두께방향 (z 방향)으로 흐르는 스핀전류 (J_s)가 발생한다. 이 스핀 전류가 반강자성층(또는 페리자성층)에 y 방향 (σ_y), z 방향 (σ_z)의 스핀을 전달하여 반강자성층(또는 페리자성층) 자화의 세차운동을 유발한다.
- [0047] 즉, 계면에 수직인 방향으로 스핀 전류(J_s)가 흐른다. 이 때 계면을 통과하는 전자의 스핀과 계면에 축적된 스핀 분극(spin polarization)의 상호작용에 의해 반강자성층(또는 페리자성층)에 y 방향의 스핀(σ_y)과 z 방향의 스핀(σ_z)이 전달된다. 즉, z 축 방향으로 흐르는 스핀 전류(J_s) 중에서 z 방향의 스핀(σ_z)은 z 방향의 스핀이 없는 경우에 비하여 임계전류 밀도(threshold current density)를 감소시킬 수 있다.
- [0048] 본 발명에서는 y 방향의 스핀(σ_y)에 의해 발생하는 기존 스핀홀 스핀 토크(Spin Hall Torque)와 구분하기 위해, 위에 기술한 바와 같이 강자성층/비자성 도전층 계면 효과에 의해 발생하며 y 방향과 z 방향을 동시에 갖는 스핀에 의해 발생하는 스핀토크를 계면 스핀 궤도 토크(interfacial spin orbit torque)라고 명명한다.
- [0049] 반강자성층(또는 페리자성층)에 전달된 y 방향의 스핀(σ_y)과 z 방향의 스핀(σ_z)의 크기에 따라 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자의 자화 세차운동에 필요한 전류 밀도의 크기가 바뀌고, 진동수의 조율성도 변한다.
- [0050] 기판(202)은 반도체 기판일 수 있다. 상기 기판(202)은 실리콘 기판일 수 있다.
- [0051] 상기 강자성층(210)은 상기 기판(202) 상에서 라인 형태로 패터닝되고, Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다.
- [0052] 상기 비자성 도전층(220)은 Cu, Ta, Pt, W, Ti, Bi 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층은 서로 수직으로 정렬될 수 있다.
- [0053] 상기 반강자성층(230)은 상기 비자성 도전층(220) 상에 국부적으로 배치될 수 있다. 또는 상기 반강자성층(230)은 상기 비자성 도전층(220) 서로 수직으로 정렬되도록 변형될 수 있다. 상기 반강자성층(230)은 Ir, Pt, Mn, Cr, FeMn, NiO, Fe₂O₃ 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 반강자성층(230)의 부격자는 면에 수직인 방향으로 자화될 수 있다.
- [0054] 상기 제1 전극(240a) 및 상기 제2 전극(240b)은 Cu, Ta, Pt, W, Ti, Bi, Ir 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 제1 전극(240a) 및 상기 제2 전극(240b)은 상기 강자성층(210)과 상기 비자성 도전층(220)의 양단에 각각 연결되어 전류를 주입할 수 있다. 상기 전류는 상기 강자성층(210)과 상기 비자성 도전층(220)으로 구성된 도선을 따라 흐를 수 있다.
- [0055] 자기터널 접합(250)은 상기 반강자성층(230) 상에 배치된다. 상기 자기 터널 접합(250)은 자유층(252)/터널 절연층(254)/고정층(256)을 포함하고, 상기 자기터널 접합의 상기 자유층(252)은 상기 반강자성층(230)과 교환상호작용(exchange interaction)한다. 자기터널 접합(250)은 터널 저항(tunneling resistance)에 의하여 발진 신호(oscillating signal)를 출력할 수 있다. 상기 자유층(252) 및 상기 고정층(256)은 배치평면에서 수직하게 자화될 수 있다.
- [0056] 상기 제3 전극(260)은 상기 자기터널 접합(250) 상에 배치될 수 있다. 상기 제3 전극(260)은 발진 신호를 다른 회로에 연결하기 위한 배선에 연결될 수 있다. 상기 제3 전극(260)은 Cu, Ta, Pt, W, Ti, Bi, Ir 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다.
- [0057] 반강자성체(또는 페리자성체)의 부격자 자화(sub-lattice Magnetization)의 운동방정식은 [수학식 3]과 같다.

[0058] [수학식 3]

$$\frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M}_i \times \mathbf{H}_{eff,i} + \frac{\alpha}{M_{s,i}} \mathbf{M}_i \times \frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial t} + \frac{1}{M_{s,i}} \frac{\gamma \hbar J}{2e M_{s,i} t} \mathbf{M}_i \times [\mathbf{M}_i \times (\eta \hat{y} + \delta \hat{z})]$$

[0059]

[0060] [수학식 3]에서, $\mathbf{M}_i$ 은 반강자성층(페리자성층)의 i 번째 부격자(sub-lattice)의 자화벡터, γ 는 자기회전비(gyromagnetic ratio), $M_{s,i}$ 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 i 번째 부격자의 자화 값, $\mathbf{H}_{eff,i}$ 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 i 번째 부격자의 모든 유효 자기장벡터(effective magnetic field vector), α 는 Gilbert 감쇠상수(damping constant)이다. 부격자는 제1 부격자 또는 제2 부격자일 수 있다. η 는 강자성층과 비자성 도전층의 계면에서 형성되는 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율이고, δ 는 강자성층과 비자성 도전층의 계면에서 형성되는 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율이다. $\hbar$ ($=1.05 \times 10^{-34}$ Jsec)는 플랑크 상수를 2π 로 나눈 값이고, J 는 인가된 전류밀도이고, e ($=1.6 \times 10^{-19}$ C)는 전자의 전하량이고, t 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 두께를 나타낸다. x 방향은 반강자성층(또는 페리자성층)이 기판 상에서 연장되는 방향이고, z 방향은 반강자성층(또는 페리자성층)의 두께 방향이다.

[0061] 반강자성층(또는 페리자성층)에 z 방향의 스핀(σ_z)이 전달되지 않고, y 방향의 스핀(σ_y)만 전달되는 경우, 임계 전류 밀도(J_{th})는 [수학식 4]와 같이 주어진다.

[0062] [수학식 4]

$$J_{th} = \frac{2K\eta t}{\hbar \eta}$$

[0063]

[0064] 여기서 $\hbar$ 는 플랑크 상수를 2π 로 나눈 값, e 는 전자의 전하량, t 는 반강자성(페리자성)층의 두께, K 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 자기 이방성 에너지 밀도(magnetic anisotropy energy density, magnetic anisotropy constant), η 는 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율이다.

[0065] [수학식 4]에 해당하는 임계 전류 밀도보다 높은 값을 가지는 전류 밀도에 의해 유기되는 반강자성층(또는 페리자성층)의 발진 진동수는 [수학식 5]와 같이 기술된다.

[0066] [수학식 5]

$$f = \frac{\gamma \hbar \eta}{4e M_s t \pi \alpha} J$$

[0067]

[0068] 여기서, γ 는 자기회전비이고, J 는 전류 밀도, $\hbar$ 는 플랑크 상수를 2π 로 나눈 값, e 는 전자의 전하량, t 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 두께, M_s 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자의 포화 자화 값, α 는 Gilbert 감쇠상수, η 는 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율이다.

[0069] 반강자성층(또는 페리자성층)에 z 방향의 스핀(σ_z)이 전달되지 않고, y 방향의 스핀(σ_y)만 전달되는 경우, 규격화된 자화(N)는 xz 평면에서 회전한다. 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율 η 는 영이 아니고, 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 는 영이다.

[0070] 스핀 전류(J_s)는 z 방향의 스핀(σ_z) 성분을 가진다. 반강자성층(또는 페리자성층)에 y 방향의 스핀(σ_y)이 전달되지 않고, z 방향의 스핀(σ_z)만 전달되는 경우의 임계 전류 밀도는 [수학식 6]와 같이 주어진다.

[0071] [수학식 6]

$$J_{th} = \frac{4\alpha \eta t}{\hbar \delta d} \sqrt{AK}$$

[0072]

[0073] 여기서 $\hbar$ 는 플랑크 상수를 2π 로 나눈 값, e 는 전자의 전하량, t 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 두께, K 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 자기 이방성 에너지 밀도, A 는 반강자성 교환 상호작용 상수, α 는 Gilbert 감쇠상수, d 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자 사이의 거리, δ 는 인가 전류에 대한 z 방향의

스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율이다.

[0074] [수학식 6] 에 해당하는 임계 전류 밀도보다 높은 값을 가지는 전류 밀도에 대하여 반강자성층(또는 페리자성층)의 발진 진동수는 [수학식 7] 와 같이 기술된다.

[0075] [수학식 7]

$$f = \frac{\gamma \hbar \delta}{4eM_s t \pi \alpha} J$$

[0076]

[0077] 여기서, γ 는 자기 회전 비이고, J 는 전류 밀도, $\hbar$ 는 플랑크 상수를 2π 로 나눈값, e 는 전자의 전하량, t 는 반강자성(페리자성)층의 두께, M_s 는 반강자성층(또는 페리자성층)의 부격자의 포화 자화양, α 는 Gilbert 감쇠 상수, η 는 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율이다.

[0078] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 계면 스핀 웨도 토크에 의하여 반강자성층(또는 페리자성층)에 y 방향의 스핀(σ_y)과, z 방향의 스핀(σ_z)이 모두 전달된다. 이 경우의 임계 전류 밀도는 [수학식 4] 와 [수학식 6] 에 해당하는 임계 전류 밀도 중 낮은 임계 전류 밀도로 결정된다. 이 때 발진할 수 있는 진동수는 [수학식 8] 과 같이 기술된다.

[0079] [수학식 8]

$$f = \frac{\gamma \hbar \sqrt{\delta^2 + \eta^2}}{4eM_s t \pi \alpha} J$$

[0080]

[0081] 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율 η 은 영이 아니고, 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 는 영이 아니다. 반강자성층(또는 페리자성층)에 z 방향의 스핀(σ_z) 및 y 방향의 스핀(σ_y)이 모두 전달되는 경우, 규격화된 자화(N)는 xy 평면 성분 및 xz 평면 성분을 갖도록 회전한다.

[0082] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자(200)에서 반강자성층(또는 페리자성층)의 규격화된 자화(N)의 궤적을 나타내는 시뮬레이션 결과이다.

[0083] 도 4를 참조하면, 자기 나노 발진 소자의 효과는 자화의 운동방정식을 이용한 매크로 스핀 미소자기모델링(macrospin micromagnetic simulation)을 통해서 확인되었다.

[0084] 자기 나노 발진 소자의 구조와 물성 값은 다음과 같다.

[0085] 전체 구조의 단면적 = $0.8 \times 20\text{nm}^2$.

[0086] 반강자성층(230) : "두께 (t) = 3nm, 포화자화값 (M_s) = 400 emu/cm³, Gilbert 감쇠상수 α = 0.01, 자기 회전 비 γ = $1.76 \times 10^7 \text{ Oe}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 반강자성 교환 상호 작용 상수 (antiferromagnetic exchange interaction constant, antiferromagnet exchange stiffness, A) = $1 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$, 유효 자기 이방성 에너지 상수 (effective magnetic anisotropy energy constant, effective magnetic anisotropy constant, K) = $1 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ ".

[0087] 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율 η 은 0.1이고, 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 는 0.1이다. 이 경우, 규격화된 자화(N)는 xy 평면으로 투영된 타원 성분과 xz 평면으로 투영된 타원 성분을 포함한다. 이에 따라, 규격화된 자화(N)는 yz 평면으로 투영된 경우, 일정한 기울기를 가진 직선으로 표시된다.

[0088] 도 5는 도 4의 자기 나노 발진 소자(200)에서 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 에 따른 임계전류 밀도를 나타내는 그래프이다.

[0089] 도 6은 도 4의 자기 나노 발진 소자(200)에서 전류 밀도에 따른 발진 주파수를 나타내는 그래프이다.

[0090] 도 5를 참조하면, 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율 η 은 0.1이다. 반강자성

층(230)은 배치평면에 수직한 방향(두께 방향)의 부격자 자화를 갖는다. 자기 나노 발진 소자(200)에 대해 계면 스핀 궤도 토크가 인가되었을 때, z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 와 임계 전류 밀도(J_{th})가 표시된다.

[0091] δ 가 영이면, z 방향의 스핀(σ_z)이 없고, 임계전류 밀도는 $0.9 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 이다. δ 가 0.9인 경우, 임계전류 밀도(J_{th})는 $0.1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 이다. z 방향의 스핀(σ_z)의 비율이 증가함에 따라, 임계전류 밀도(J_{th})가 감소한다. 즉, 계면 스핀 궤도 토크를 증가시키도록 강자성층/비자성 도전층을 설계하면, 임계전류밀도(J_{th})가 감소한다.

[0092] 도 6을 참조하면, 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율 η 은 0.1로 고정되고, 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 을 변화시키면, 인가 전류밀도(J)와 발진 주파수가 표시된다.

[0093] δ 가 증가할수록, 전류 밀도밀도(J)에 대한 주파수의 기울기가 증가한다. 따라서, 작은 전류밀도(J)의 변화로 큰 주파수 차이를 제공할 수 있다. $\delta = 1$ 인 경우, 발진 소자는 전류 밀도에 따라 0.1 THz 내지 0.7 THz 범위에서 발진할 수 있다.

[0094] 도 7은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자의 개념도이다.

[0095] 도 8은 도 7의 자기 나노 발진 소자의 발진을 설명하는 사시도이다.

[0096] 도 9는 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 에 따른 임계전류 밀도를 나타내는 그래프이다.

[0097] 도 10은 전류 밀도에 따른 발진 주파수를 나타내는 그래프이다.

[0098] 도 7 내지 도 10을 참조하면, 자기 나노 발진 소자(300)는, 기판(202) 상에 배치된 강자성층(210); 상기 강자성층 상에 적층된 비자성 도전층(220); 상기 비자성 도전층(220) 상에 적층된 반강자성층(330); 및 상기 강자성층(210)과 상기 비자성 도전층(220)의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들(240a, 240b)을 포함한다. 상기 반강자성층(330)은 막면에 대하여 수평한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이며, 상기 강자성층(210)은 상기 강자성층의 막면에서 수평한 방향으로 자화된다. 상기 제1, 제2 전극들(240a, 240b)을 통해 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층에 주입된 면내 전류는 상기 반강자성층(330)에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 반강자성층(330)의 부격자의 자화 세차운동을 발생시킨다. 상기 반강자성층(330)은 면내 방향으로 자화된다.

[0099] 자기터널 접합(250)은 상기 반강자성층(330) 상에 배치된다. 상기 자기 터널 접합(250)은 자유층(252)/터널 절연층(254)/고정층(256)을 포함하고, 상기 자기터널 접합의 상기 자유층(252)은 상기 반강자성층(330)과 교환상호작용한다. 상기 자유층 및 상기 고정층은 배치평면 내에서 자화될 수 있다.

[0100] 도 9를 참조하면, 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율 η 은 0.1이다. 반강자성층(330)은 배치평면 내에서 부격자 자화를 갖는다. 반강자성층(330)의 자화 용이축은 y축이다. 자기 나노 발진 소자(300)에 대해 계면 스핀 궤도 토크가 인가되었을 때, 임계 전류 밀도(J_{th}) 및 발진 진동수(f)는 다음과 같은 조건에서 시뮬레이션되었다.

[0101] 소자의 구조와 물성 값은 다음과 같다.

[0102] 전체 구조의 단면적= $0.8 \times 0.8 \text{ nm}^2$,

[0103] 반강자성층(330) : "두께 (t) = 3nm, 포화자화값 (M_s) = 400 emu/cm^3 , Gilbert 감쇠상수 (α) = 0.01, 자기 회전비 (γ) = $1.76 \times 10^7 \text{ Oe-ls-1}$, 반강자성 교환 상호 작용 상수 (A) = $1 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$, 유효 자기 이방성 에너지 상수 (K) = $1 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ "

[0104] δ 가 영이면, z 방향의 스핀(σ_z)이 없고, 임계전류 밀도는 $0.9 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 이다. δ 가 0.9인 경우, 임계전류 밀도(J_{th})는 $0.1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ 이다. z 방향의 스핀(σ_z)의 비율이 증가함에 따라, 임계전류 밀도(J_{th})가 감소한다.

즉, 계면 스핀 궤도 토크를 증가시키도록 강자성층/비자성층을 설계하면, 임계전류밀도(J_{th})가 감소한다.

- [0105] 도 10을 참조하면, 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율 η 은 0.1로 고정되고, 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 을 변화시키면, 인가 전류밀도(J)와 발진 주파수가 표시된다.
- [0106] δ 가 증가할수록, 전류 밀도밀도(J)에 대한 주파수의 기울기가 증가한다. 따라서, 작은 전류밀도(J)의 변화로 큰 주파수 차이를 제공할 수 있다.
- [0107] 도 11은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자를 나타내는 개념도이다.
- [0108] 도 12는 도 11의 자기 나노 발진 소자(200a)에서 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 에 따른 임계전류 밀도를 나타내는 그래프이다.
- [0109] 도 13은 도 11의 자기 나노 발진 소자(200a)에서 전류 밀도에 따른 발진 주파수를 나타내는 그래프이다.
- [0110] 도 11 내지 도 13을 참조하면, 자기 나노 발진 소자(200a)는, 기판(202) 상에 배치된 강자성층(210); 상기 강자성층 상에 적층된 비자성 도전층(220); 상기 비자성 도전층 상에 적층된 페리자성층(230a); 및 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들(240a, 240b)을 포함한다. 상기 페리자성층(230a)은 막면에 대하여 수직 혹은 수평한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 강자성층(210)은 상기 강자성층의 막면에서 수평한 방향으로 자화된다. 상기 제1, 제2 전극들을 통해 상기 강자성층과 상기 비자성 도전층에 주입된 면내 전류는 상기 페리자성층에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 페리자성층의 부격자의 자화 세차운동을 발생시킨다.
- [0111] 나노 발진 소자(200a)의 구조와 물성 값은 다음과 같다.
- [0112] 전체 구조의 단면적= $0.8 \times 20\text{nm}^2$.
- [0113] 페리자성층(230a) : "두께 (t) = 3nm, 부격자 1의 포화자화값 ($M_{s,1}$)= 400 emu/cm^3 , 부격자 2의 포화자화값 ($M_{s,2}$)= 350 emu/cm^3 , 부격자 1의 자기회전비(γ_1) = $1.936 \times 10^7 \text{ Oe}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 부격자 2의 자기회전비 비(γ_2)= $1.76 \times 10^7 \text{ Oe}^{-1} \text{ s}^{-1}$, Gilbert 감쇠상수(α) = 0.01, 반강자성 교환 상호 작용 상수 (A) = $1 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$, 유효 자기 이방성 에너지 상수(K)= $1 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ "
- [0114] 페리자성층(230a)은 Co, Gd, Tb, Mn, Ir, Ge, Se, Cr, Y, Fe, 가넷, 희토류-전이 금속 (RE-TM) 합금 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어 질 수 있다.
- [0115] 계면 스핀 궤도 토크를 증가시키도록 강자성층/비자성 도전층을 설계하면, 임계전류밀도(J_{th})가 감소한다.
- [0116] 인가 전류에 대한 y 방향의 스핀(σ_y)을 전달하는 스핀 전류의 비율 η 은 0.1로 고정되고, 인가 전류에 대한 z 방향의 스핀(σ_z)을 전달하는 스핀 전류의 비율 δ 을 변화시키면, 인가 전류밀도(J)와 발진 주파수가 표시된다.
- [0117] δ 가 증가할수록, 전류 밀도밀도(J)에 대한 주파수의 기울기가 증가한다. 따라서, 작은 전류밀도(J)의 변화로 큰 주파수 차이를 제공할 수 있다. $\delta=1$ 인 경우, 발진 소자는 전류 밀도에 따라 0.1 THz 내지 0.9 THz 범위에서 발진할 수 있다.
- [0118] 도 14는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 자기 나노 발진 소자의 개념도이다.
- [0119] 도 14를 참조하면, 자기 나노 발진 소자(400), 기판(202) 상에 배치된 제1 강자성층(210); 상기 제1 강자성층(210)에 배치된 제1 비자성 도전층(220); 상기 제1 비자성 도전층(220) 상에 배치된 제2 강자성층(332); 상기 제2 강자성층(332) 상에 배치된 제2 비자성 도전층(334); 상기 제2 비자성 도전층(334) 상에 배치된 제3 강자성층(336); 및 상기 제1 강자성층과 상기 제1 비자성 도전층의 양측면에 각각 접촉하는 제1, 제2 전극들(240a, 240b)을 포함한다. 상기 제1 강자성층(210)은 고정 자화 방향을 갖고, 막면에 대하여 평행한 방향으로 자화되는 물질로 이루어진 박막이다. 상기 제2 강자성층(332)과 상기 제3 강자성층(336)은 상기 제2 비자성 도전층으로 인해 반강자성 교환 상호작용을 하는 박막이다. 상기 제2 강자성층(332)과 상기 제3 강자성층(336)은 막면에 평행하거나 또는 수직하게 자화된다. 상기 제1, 제2 전극들을 통해 상기 제1 강자성층과 상기 제1 비자성 도전층

에 주입된 면내 전류는 상기 제2 강자성층과 상기 제3 강자성층에 전달되는 박막의 두께 방향의 스핀을 포함하는 스핀 전류를 제공하여 상기 제2 강자성층과 상기 제3 강자성층의 자화 세차운동을 각각 발생시킨다.

[0120] 상기 제1 강자성층(210)과 상기 제1 비자성 도전층(220)은 수직으로 정렬될 수 있다.

[0121] 또한, 상기 제2 강자성층(332), 제2 비자성 도전층(334), 및 제3 강자성층(336)은 수직으로 정렬되고 반강자성 교환 상호 작용에 의하여 결합될 수 있다. 상기 제2 강자성층(332)와 상기 제3 강자성층(336)은 항상 반평행 결합(antiferromagnetic coupling)을 유지하면서 세차 운동할 수 있다.

[0122] 자기터널 접합(450)은 상기 제3 반강자성층(336) 상에 배치된다. 상기 자기 터널 접합(250)은 터널 절연층(254)/고정층(265)을 포함하고, 상기 자기터널 접합의 상기 고정층(256)은 상기 제3 강자성층(336)과 상호작용하여, 터널 자기 저항 신호를 생성할 수 있다. 상기 고정층(256)은 면내에서 평행하거나 수직하게 자화될 수 있다.

[0123] 상기 제1 강자성층(210), 상기 제2 강자성층(332), 및 상기 제3 강자성층(336)은 Fe, Co, Ni, B, Si, Zr 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 제1 비자성 도전층(220)은 Cu, Ta, Pt, W, Ti, Bi 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다. 상기 제2 비자성 도전층(334)은 Ru, Ta, Rh, Ir, Cr, Re, Mo, W, V 및 이들의 혼합물 중에서 선택되는 물질로 이루어질 수 있다.

[0124] 이상에서는 본 발명을 특정의 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였으나, 본 발명은 이러한 실시예에 한정되지 않으며, 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자가 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범위 내에서 실시할 수 있는 다양한 형태의 실시예들을 모두 포함한다.

부호의 설명

[0125] 202: 기판

210: 강자성층

220: 비자성 도전층

230: 반강자성층

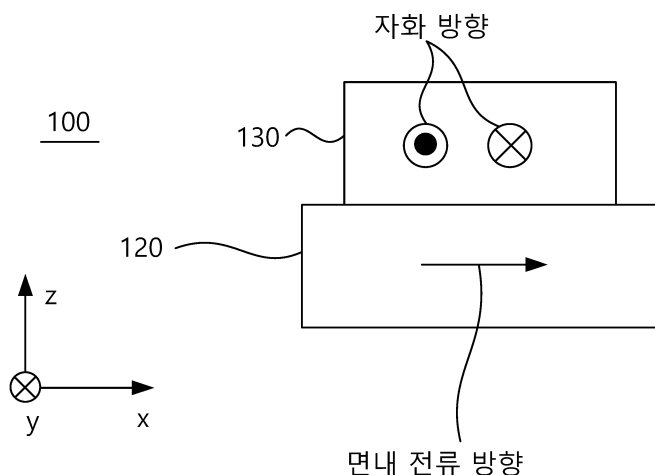
240a, 240b: 제1, 제2 전극

250: 터널 자기 접합

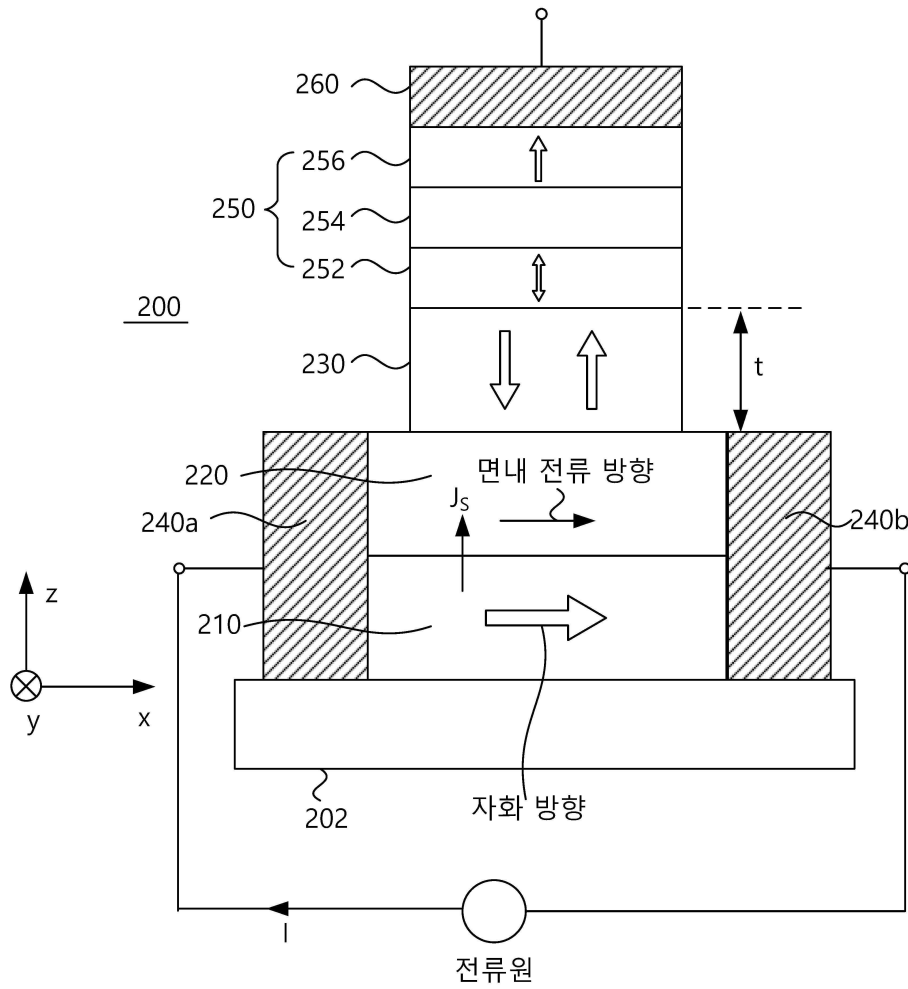
260: 제3 전극

도면

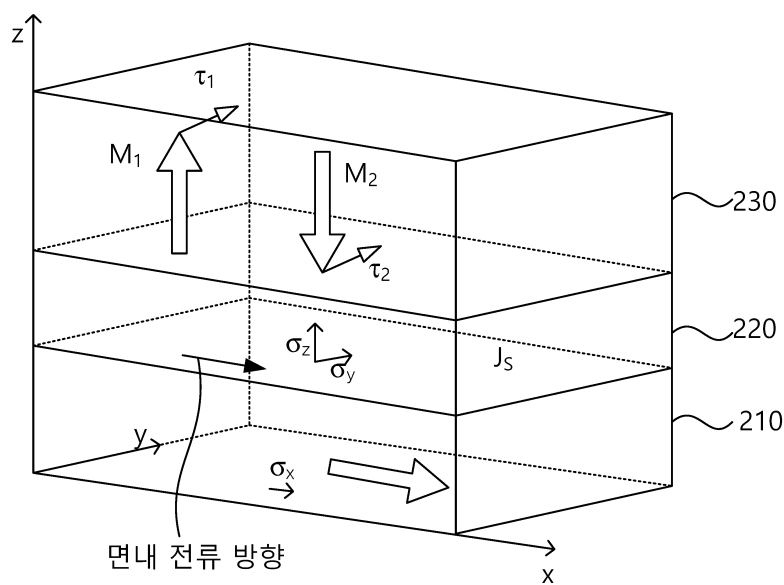
도면1



도면2

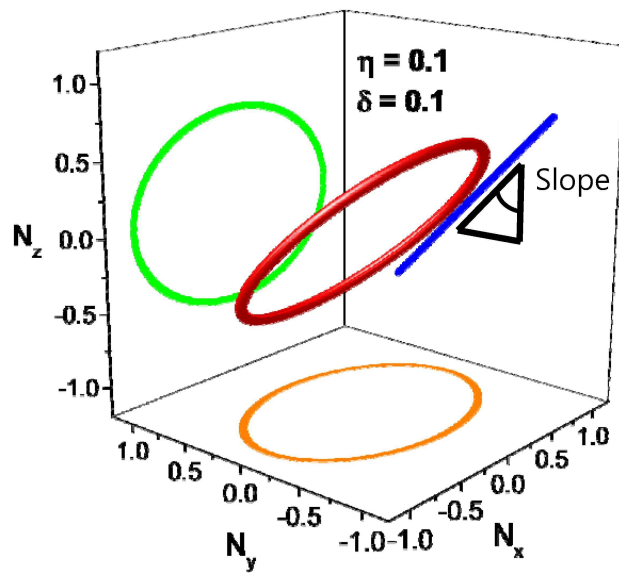


도면3



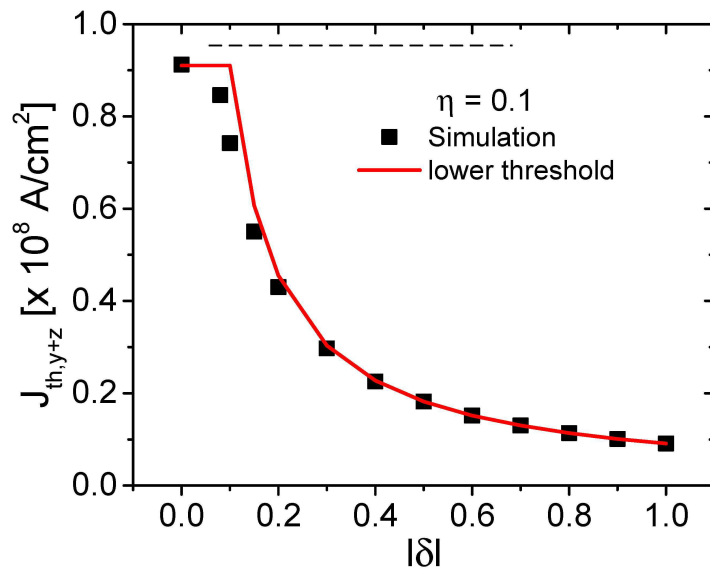
도면4

Simulation results – spin y + spin-z ($\eta \neq 0, \delta \neq 0$)

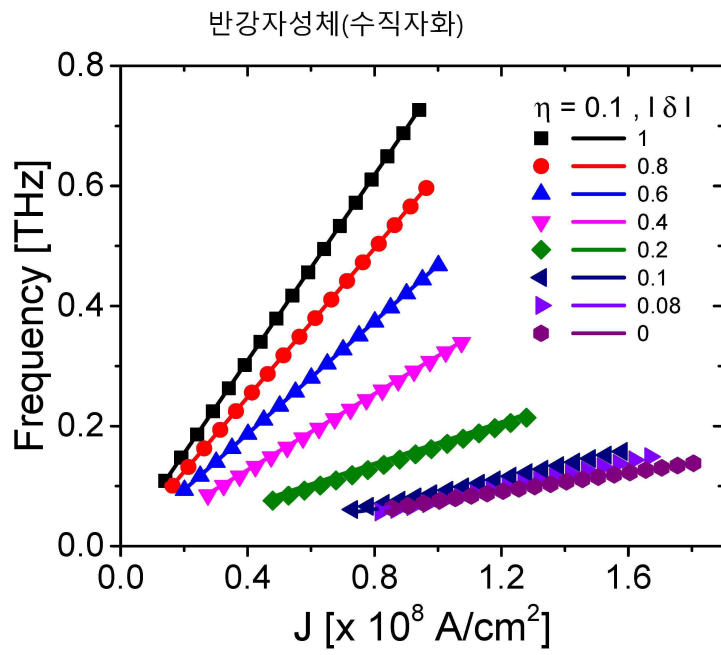


도면5

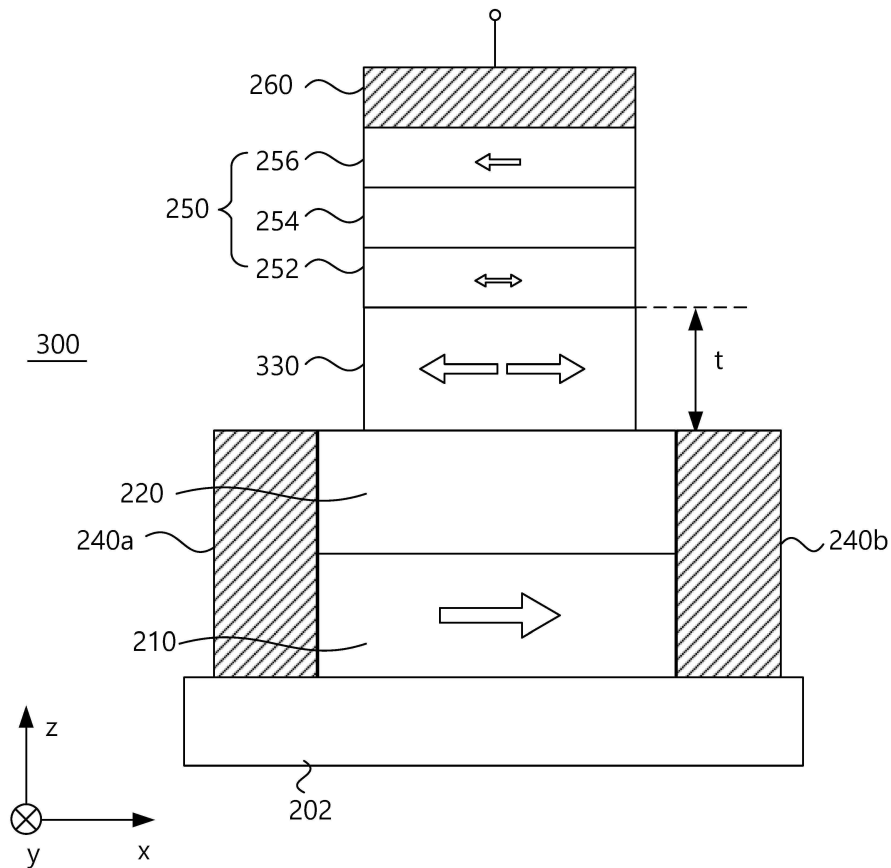
반강자성체(수직자화)



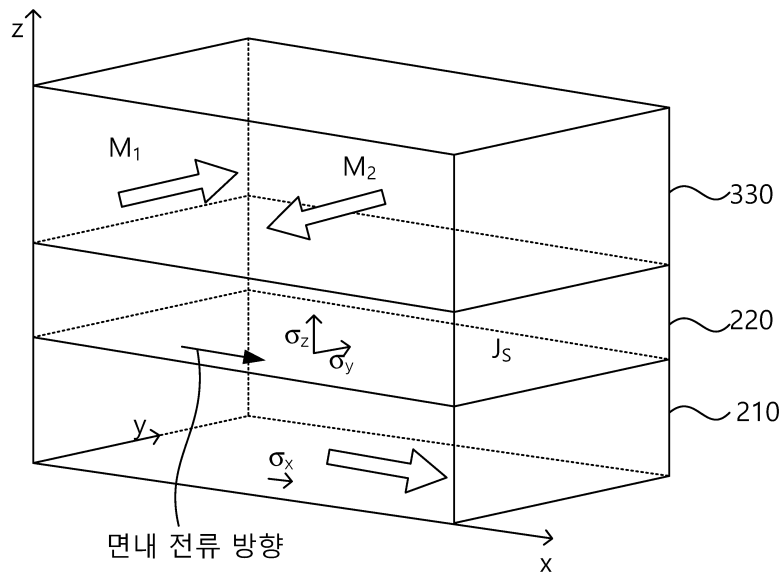
도면6



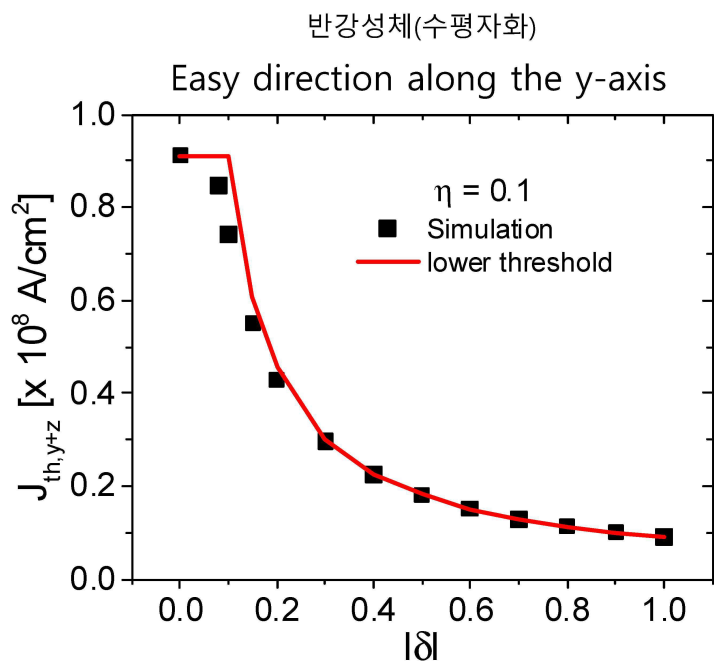
도면7



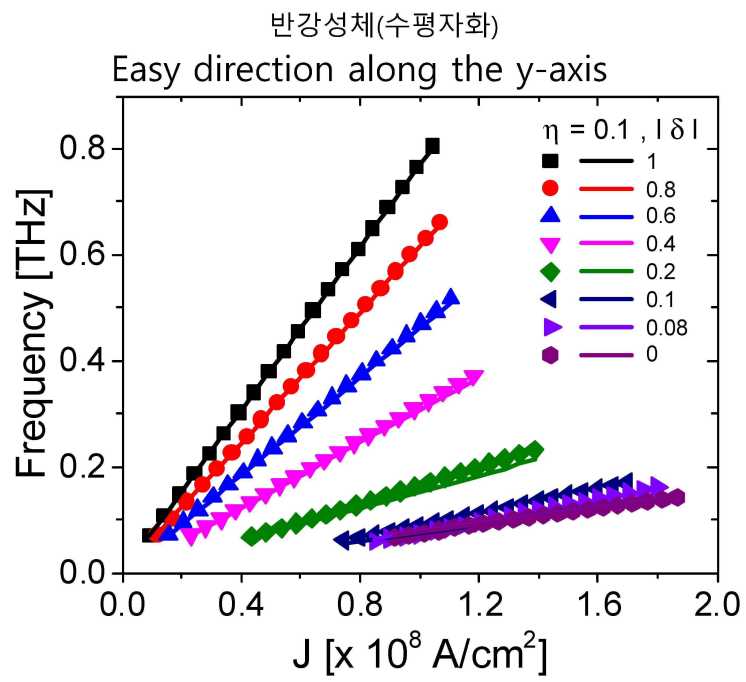
도면8



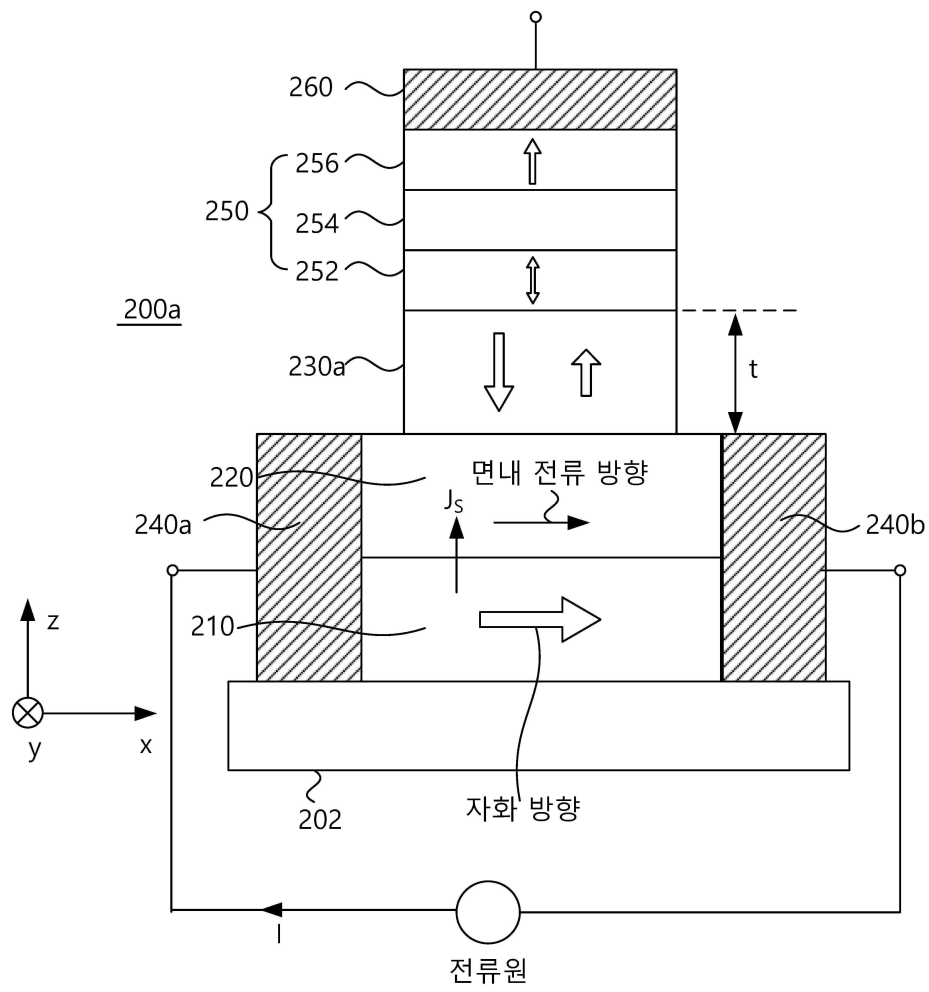
도면9



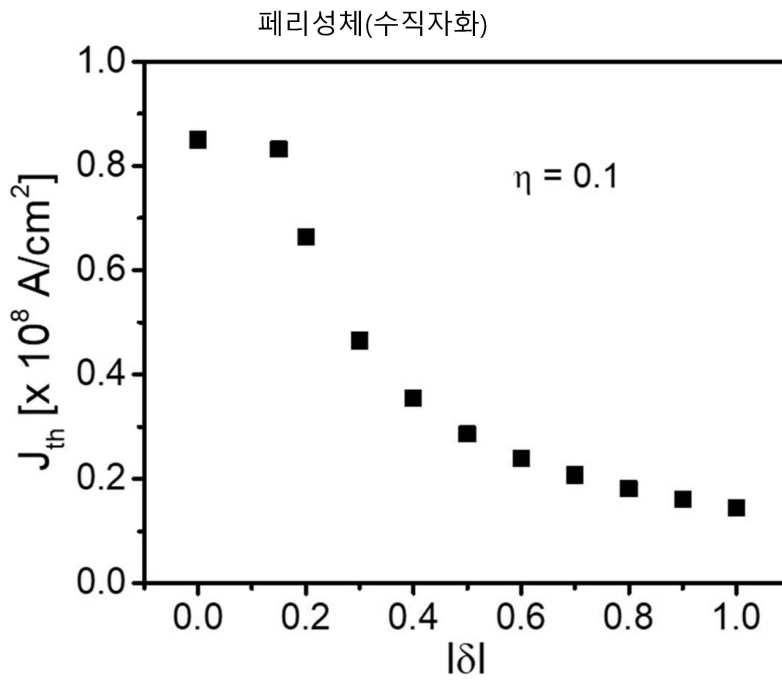
도면10



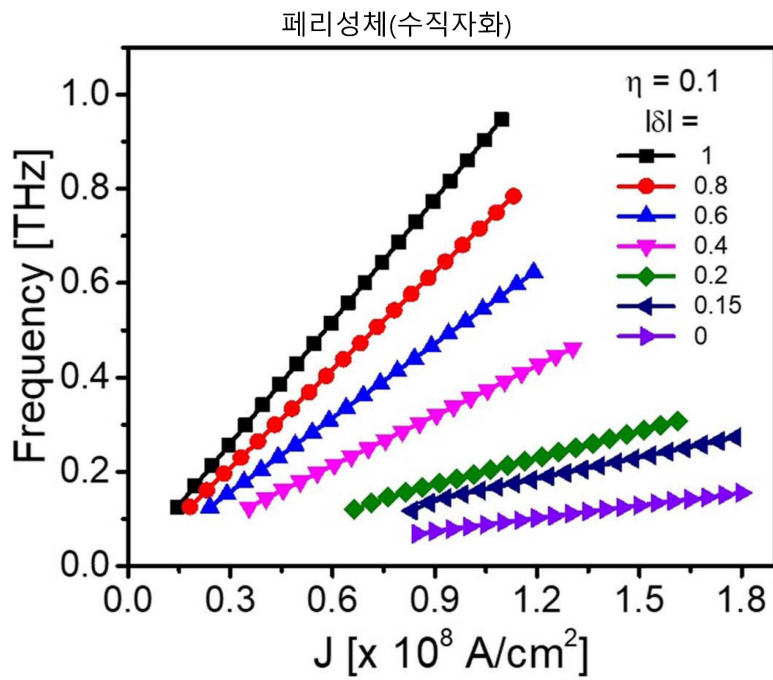
도면11



도면12



도면13



도면14

