



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2011-0085725
(43) 공개일자 2011년07월27일

(51) Int. Cl.

G01R 33/07 (2006.01) G01R 33/09 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2010-0005657

(22) 출원일자 2010년01월21일

심사청구일자 2010년01월21일

(71) 출원인

충남대학교산학협력단

대전 유성구 궁동 220 충남대학교

(72) 발명자

김철기

대전광역시 유성구 하기동 송림마을아파트 509동 203호

김동영

경상북도 안동시 금곡동 124-1번지 태성경안 아파트 102동 2006호

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

박창희, 김종관, 권오식

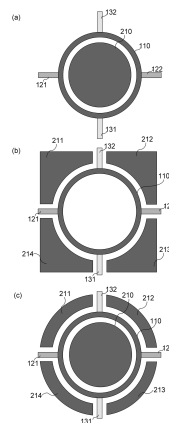
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 자기 센서

(57) 요약

본 발명은 자기장을 감지하는 자기센서에 관한 것으로, 상세하게, 본 발명에 따른 자기센서는 폐 루프(closed loop) 형상의 자성층; 서로 대향하여 상기 폐 루프와 접하며, 전류가 입/출력되는 한 쌍의 전류단자; 및 서로 대향하여 상기 폐 루프와 접하며, 출력전압을 검출하는 한 쌍의 전압단자를 포함하여 구성되고, 이방성자기저항(AMR; anisotropic magneto-resistance) 및 평면홀저항(PHR; planar hall resistance)이 모두 출력 전압에 기여하여, 강자성-반강자성층 박막 구조, 강자성-금속-강자성-반강자성 박막 구조에 의한 강자성층의 교환 결합력에 의한 출력전압의 이력특성을 제거하고, 상기 폐 루프의 내부 또는 외부에 폐 루프와 동일한 자성층을 폐 루프와 분리하여 위치함으로써 폐 루프의 형상이방성인자에 의한 이력특성을 최소화하고 자기센서의 출력전압을 안정화시키며, 민감도를 향상시키는 특징이 있다. 또한 원형의 대칭형 폐루프 형상을 통하여 신호의 선형성 및 대칭성을 강화함으로써 광대역의 직류 및 교류 자기장을 초고감도로 감지할 수 있는 특징이 있다.

대표도 - 도11



(72) 발명자

정종률

대전광역시 유성구 하기동 송림마을아파트 303동
1207호

트랑쵡 홍

대전광역시 유성구 220 충남대학교 나노공학부

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 R32-20026

부처명 한국연구재단

연구관리전문기관

연구사업명 세계수준의연구중심대학육성

연구과제명 [WCU]나노 소재 기반 바이오-의료 진단 기술

기여율

주관기관 충남대학교

연구기간 2009년 04월 01일~2013년 08월 31일

특허청구의 범위

청구항 1

폐 루프(closed loop) 형상의 자성층;

서로 대향하여 상기 폐 루프와 접하며, 전류가 입/출력되는 한 쌍의 전류단자; 및 서로 대향하여 상기 폐 루프와 접하며, 출력전압을 검출하는 한 쌍의 전압단자를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 자기센서.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 한 쌍의 전압단자에서 출력되는 출력전압은 상기 자성층의 비등방성자기저항(AMR; anisotropic magnetoresistance) 및 평면홀저항(PHR; planar hall resistance)에 의한 것을 특징으로 하는 자기센서.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 폐 루프는 원형 폐 루프, 타원형 폐 루프 또는 다각형 폐 루프인 것을 특징으로 하는 자기센서.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 폐 루프는 원형 폐 루프이며, 상기 루프의 중심반경(r :radius)과 상기 루프의 폭(w :width)의 비(r/w ratio)에 의해, 상기 출력전압에 기여하는 비등방성자기저항에 의한 전압과 평면홀저항에 의한 전압의 비가 조절되는 것을 특징하는 자기센서.

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 루프의 중심반경(r :radius)과 상기 루프의 폭(w :width)의 비(r/w ratio)는 0.5 이상인 것을 특징으로 하는 자기센서.

청구항 6

제 1항에 있어서,

상기 한 쌍의 전류단자에서 선택된 한 단자와 상기 한 쌍의 전압단자에서 선택된 한 단자의 각도가 90° 인 대칭 구조인 것을 특징으로 하는 자기센서.

청구항 7

제 1항에 있어서,

상기 한 쌍의 전류단자에서 선택된 한 단자를 통한 입력 전류는 직류, 교류 또는 펄스인 것을 특징으로 하는 자기센서.

청구항 8

제 2항에 있어서,

상기 자성층은 교환결합력이 결부된 강자성(ferromagnetic) 박막을 포함하는 것을 특징으로 하는 자기센서.

청구항 9

제 8항에 있어서,

상기 자성층은 강자성(ferromagnetic) 박막을 포함하며, 반강자성(antiferromagnetic) 박막, 절연체 박막, 비

자성 박막, 및 금속(metal) 박막에서 하나 이상 선택된 박막과 상기 강자성 박막이 적층된 다층박막인 것을 특징으로 하는 자기센서.

청구항 10

제 9항에 있어서,

상기 자성층은 강자성 박막과 반강자성 박막을 포함하는 다층박막; 강자성 박막, 금속 박막 및 강자성 박막을 포함하는 다층박막; 강자성 박막(I), 절연체 박막 및 강자성 박막(II)을 포함하는 다층박막; 또는 강자성 박막(I)-금속 박막-강자성 박막(II)-반강자성 박막을 포함하는 다층박막;인 것을 특징으로 하는 자기 센서.

청구항 11

제 1항에 있어서,

상기 자기센서는 상기 폐 루프(closed loop) 내부에, 상기 폐 루프와 동심을 이루며 상기 폐 루프와 일정 거리 이격된, 상기 폐 루프의 자성층과 동일한 물질로 이루어진 제2 자성층이 더 형성된 것을 특징으로 하는 자기 센서.

청구항 12

제 11항에 있어서,

상기 자기센서는 상기 폐 루프(closed loop) 외부에, 상기 폐 루프, 상기 한쌍의 전류단자 각각 및 상기 한 쌍의 전압단자 각각과 일정 거리 이격된, 상기 폐 루프의 자성층과 동일한 물질로 이루어진 제3 자성층이 더 형성된 것을 특징으로 하는 자기 센서.

청구항 13

제 2항에 있어서,

상기 자기센서는 자기장센서, 바이오센서, 투자율 센서, 비파괴 검사용 와전류센서, 자기장 이미징센서 또는 NMR(nuclear magnetic resonance)센서인 것을 특징으로 하는 자기 센서.

청구항 14

제 2항에 있어서,

상기 한 쌍의 전류단자에서 선택된 한 단자를 통한 입력 전류는 펄스이며, 상기 자기 센서는 3축 자기장 센서인 것을 특징으로 하는 자기 센서.

청구항 15

제 2항에 있어서,

상기 자기센서는 상기 자성층; 상기 한 쌍의 전류단자; 및 상기 한 쌍의 전압단자를 일 단위체로, 둘 이상의 상기 단위체가 배열된 것을 특징으로 하는 자기센서.

명세서

기술 분야

[0001] 본 발명은 자기장을 감지하는 자기센서에 관한 것으로, 상세하게 이방성자기저항 특성 및 평면 홀저항 특성을 모두 이용하여 광대역의 직류 및 교류 자기장을 초고감도로 감지할 수 있는 자기센서에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 자기 저항이란 자성체에 자기장을 걸어주면 변화하는 전기 저항 또는 전기 비저항을 지칭한다. 이러한 자기 저항은 종류에 따라 비등방성자기 저항, 거대자기 저항, 터널링 자기 저항, 초거대 자기 저항으로 나뉘는데 모두 이론과 원리에서 차이를 보인다. 자기저항 재료는 나노 두께의 자성체 박막으로 제조되고, 나노 크기의 형상에 서도 자기저항특성이 유지되므로 초소형의 저전력형 자기장 센서의 제작이 가능하다. 또한 자기장의 세기에 따

른 전기저항 변화 특성으로부터 출력을 전압신호로 전환이 가능하므로 초미세자기장의 검출이 가능할 뿐만 아니라 저항변화를 이용하므로 교류 주파수 특성이 우수하여 직류 및 교류의 광대역 자기장 센서로 응용이 가능하다. 따라서 자기 저항 현상은 하드디스크의 헤드, 자기장 센서, 바이오센서, 방향센서, 비파괴 검사용 저주파수 와전류 센서, 고속 자기저항 메모리소자 (Magnetoresistance RAM) 등에 사용된다.

- [0003] 자기저항재료의 자기장의 세기에 따른 저항변화(ΔR)의 정도를 자기저항비(MR(%))로 지칭하며, 백분율(%)로 $MR(\%) = \Delta R / R_x 100$ 으로 표현한다.
- [0004] 비등방성자기저항은 단일 자성층에서 나타나는 현상으로 전류의 방향과 자화(magnetization) 방향의 사이각에 의존하는 특성이 있으며 상온에서 자기저항비가 약 2 ~ 5% 정도이다.
- [0005] 강자성-금속-강자성 구조를 갖는 거대자기저항은 두 개 강자성층의 자화방향의 사이각에 의존하며 전류의 방향과는 무관한 특성을 보인다. 즉 전류는 두 강자성층의 자화방향에 의존하는 스핀 산란에 의하여 저항 변화를 일으키며, 두 강자성층의 자화 방향이 평행일때 저항이 가장 작고 두 강자성층의 자화 방향이 반평행일때 저항이 최대가 된다. 이러한 거대 자기저항의 경우 자기저항비가 약 10 ~ 50% 정도를 갖는다.
- [0006] 강자성-절연체-강자성 구조를 갖는 터널링 자기 저항 역시 두 개 강자성층의 자화방향의 사이각에 의존하며 전류의 방향과는 무관한 특성을 보인다. 즉 두 강자성체 사이의 절연체를 터널링해서 흐르는 전류는 두 강자성층의 자화방향에 의존하는 스핀 산란에 의하여 저항 변화를 일으키며, 두 강자성층의 자화방향이 평행일 때 저항이 가장 작고 두 강자성층의 자화방향이 반평행일때 저항이 최대가 된다. 이러한 터널링 자기 저항의 경우 자기저항비가 500% 이상인 재료가 이미 개발되었으며, 초거대 자기 저항은 1000% 이상의 자기저항비를 기대하고 있다.
- [0007] 자기센서로 자기저항재료를 이용할 경우 출력신호는 자기저항비에 비례한다. 따라서 자기장의 세기에 따른 출력특성을 증가시켜 민감도를 향상시키기 위해서는 자기저항비가 크고, 자기장의 세기에 따른 출력신호의 선형성이 확보되어야한다. 그러나 거대자기저항재료나 터널링 자기저항재료는 자기저항비가 커서 출력신호 특성을 증대시키는 이점이 있으나, 선형성이 나쁜 단점이 있다.
- [0008] 따라서 이들 거대자기저항재료나 터널링 자기저항재료는 우수한 신호특성을 이용하여 선형성의 보장이 필요하지 않는 하드디스크의 신호를 검출하는 헤드 또는 저기저항 메모리소자에 이용되고 있다. 그러나 거대자기저항재료나 터널링 자기저항재료를 자기센서로 이용할 경우 선형성이 확보되는 영역이 정해진 자기장영역에 걸쳐서 분포하므로 외부에서 정해진 자기장을 인가한 상태에서 출력 신호의 오프셋(offset) 전압을 제거해 주어야하므로 자기센서의 구조가 복잡하고 이들 부가장치에 의하여 민감도가 나빠지는 단점이 있다.
- [0009] 한편 비등방성자기저항재료는 거대자기저항재료나 터널링 자기저항재료에 비하여 자기저항비는 작지만 자기장의 세기에 따른 출력신호의 선형성이 우수하다. 또한 자기센서의 출력신호특성이 전류의 방향과 자화의 방향에 의존하는 자기저항특성의 원리를 바탕으로 자기센서의 형상 구조의 변경에 의하여 전류의 방향을 조절하는 것이 가능하고, 따라서 형상구조의 변경 및 재료의 자기저항비 특성 개선을 통하여 자기센서의 출력신호특성을 증대시켜 자기장을 측정하는 척도인 민감도를 향상시키는 것이 원리적으로 가능하다.
- [0010] 이러한 비등방성 자기저항의 원리를 이용하여 자기장을 감지하는 자기 센서는 일반적으로, 이방성자기저항(AMR; anisotropic magneto-resistance) 센서와 평면홀 효과(Planar Hall effect)를 이용한 평면홀저항(PHR; planar hall resistance) 센서로 분류된다. 이방성 자기저항 센서에서는 전압 측정 방향과 흐르는 전류의 방향은 서로 평행이 되어 자기장에 의해 야기되는 자기저항 자체에 의한 전압을 측정하며, 평면홀저항 센서에서는 전압 측정 방향과 흐르는 전류의 방향이 서로 수직이 된다. 즉, 흐르는 계측용 전류가 외부 자기장에 의해 영향 받은 평면홀 효과에 의해 발생한 전압을 이용하여 자기 저항을 측정한다.
- [0011] 미국 등록특허 제4,441,072호, 제4,533,572호, 제4,569,742호, 제4,681,812호, 제4,847,584호 또는 6,529,144호는 이방성 자기저항 센서를 제공하며, 국제특허 제2006-010014호는 브릿지형 이방성 자기저항 센서를 제공하며, 국제특허 제2001-57506호에는 원형 자기모멘트를 이용한 바이오 센서용 자기 센서를 제공하나, 종래의 자기센서에 있어, 이방성 자기저항 특성 또는 평면 홀 특성만을 이용한 자기 센서가 제공되었을 뿐이다.
- [0012] 이방성 자기저항 또는 평면 홀 특성만을 이용한 자기센서는 단일 강자성 박막층을 이용하고 있으며, 이러한 자기 센서는 외부에서 강한 자기장이 인가될 경우 자기저항의 이력 특성에 의하여 출력신호의 반전을 야기할 수 있으며, 이러한 특성을 보완하기 위하여 초기 구동시 자성 박막층에 강한 자기장을 인가하여 자구들(magnetic domain)을 한쪽 방향으로 정렬하여 출력신호를 안정화 시키는 구동장치가 추가되고 있다.

- [0013] 또한 단일 강자성층을 이용할 경우 측정할 수 있는 자기장의 범위가 자성층의 이방성자기장의 세기로 제한되므로, 예를 들어 NiFe 박막을 사용할 경우 측정 범위가 약 5 Oe의 자기장 범위로 국한된다. 따라서 그 이상 (NiFe의 경우 $H > 5 \text{ Oe}$)의 자기장 하에서 변화되는 미소 자기장은 측정이 불가능하다. 따라서 휴대폰에 지구자기장을 측정하기 위하여 NiFe 단일층을 사용한 이방성 자기저항센서를 사용할 경우 휴대폰의 내부 회로에서 발생하는 5 - 10 Oe의 기기 내부 자기장 때문에 지구자기장의 측정이 불가능하게 된다.
- [0014] 이방성 자기저항센서는 센서의 저항이 작아지면 신호의 특성이 감소하므로 마이크로 크기의 자기 비트를 측정하기 위하여 센서의 크기를 축소할 경우 신호가 감소하는 단점이 있어 마이크로 자기 비트 측정용 바이오센서로 이용하는 것은 한계가 있다. 따라서 출력신호가 센서의 크기에 무관한 평면 홀 특성을 이용한 자기센서가 마이크로 자기 비트 측정용 바이오센서로 이용되고 있다.
- [0015] 이방성 자기저항 또는 평면 홀 특성은 전류의 방향과 자구의 방향에 의존하므로 자기센서의 형상변경으로 두 가지 특성 모두를 조절하는 것이 가능하며, 이방성 자기저항 또는 평면 홀 특성 모두를 이용한 자기센서는 출력 신호 특성의 개선이 가능하므로 마이크로 자기 비트 측정용 바이오센서의 비트 검출 능력을 향상시킬 수 있으며, 강자성층에 교환 결합력을 결부시킬 경우 자기장 측정 범위의 조절이 가능하고, 자기이력특성의 제거가 가능하므로 초소형 및 저전력형의 자기센서로 제작되어 휴대폰 또는 전자기기에서 사용되는 자기센서 또는 방향 센서로 이용될 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0016] 본 발명의 목적은 이방성 자기저항 특성과 평면 홀저항 특성을 모두 갖는 신규한 구조의 자기 센서를 제공하는 것이며, 광대역의 직류 및 교류 자기장 변화를 민감하게 측정할 수 있으며, 이력 특성이 없고 선형성이 우수하며, 자기장의 측정 범위(range) 조절이 용이하고 초소형화가 가능한 자기 센서를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0017] 본 발명에 따른 자기센서는 폐 루프(closed loop) 형상의 자성층; 서로 대향하여 상기 폐 루프와 접하며, 전류가 입/출력되는 한 쌍의 전류단자; 및 서로 대향하여 상기 폐 루프와 접하며, 출력전압을 검출하는 한 쌍의 전압단자를 포함하여 구성되는 특징이 있다. 특징적으로, 상기 폐 루프는 원형 폐루프, 타원형 폐루프 또는 다각 폐루프이며, 바람직하게 원형 폐루프이다.
- [0018] 본 발명에 따른 자기센서에서 상기 한 쌍의 전압단자에서 출력되는 출력전압은 상기 자성층의 비등방성자기저항(AMR; anisotropic magneto-resistance) 및 평면홀저항(PHR; planar hall resistance)에 의한 특징이 있다.
- [0019] 상기 자성층은 강자성 박막을 포함하며, 바람직하게, 상기 자성층은 교환결합력이 결부된 강자성(ferromagnetic) 박막을 포함한다.
- [0020] 상세하게, 상기 한 쌍의 전압단자에서 출력되는 출력전압은 상기 폐 루프(closed loop) 형상의 자성층을 통과하는 전류의 방향으로 유도되는 전압에 기인하는 이방성자기저항(AMR; anisotropic magneto-resistance) 특성 및 전류의 방향에 수직으로 유도되는 평면홀저항(PHR; planar hall resistance)에 의한 것인 특징이 있으며, 교환 결합력을 이용하여 자구들을 한쪽 방향으로 정렬하면 원형 폐 루프를 돌아 흐르는 모든 지점에서 전류의 방향이 변화하며, 따라서 전류의 방향과 자화 방향의 사이각이 달라진다. 이들 폐 루프의 모든 지점에서의 자기저항 효과를 합산한 경우의 자기저항 효과가 출력전압으로 유도된다. 이때 전류의 방향과 교환 결합력의 방향이 평행인 출력전압단자 부근에서는 평면 홀저항 특성이 우세하며, 전류의 방향과 교환 결합력의 방향이 수직인 입력전류 단자로부터 45도 부근에서는 이방성 자기저항 특성이 우세하게 된다. 따라서 원형의 폐 루프 형상의 자기센서는 이방성 자기저항(AMR; anisotropic magneto-resistance) 특성 및 평면 홀저항(PHR; planar hall resistance) 특성 모두를 갖는 신규한 자기센서이다.
- [0021] 본 발명에 따른 자기 센서에서, 상기 폐 루프는 원형 폐 루프인 것이 바람직하며, 상기 폐 루프의 중심반경(R:radius)과 상기 폐 루프의 폭(w:width)의 비(r/w ratio)에 의해, 상기 출력전압에 기여하는 비등방성자기저항에 의한 전압과 평면홀저항에 의한 전압의 비가 조절되는 특징이 있다.
- [0022] 상세하게, 상기 폐 루프의 중심 반경(r:radius)과 상기 폐 루프의 폭(w:width)의 비(r/w ratio, 이하, r/w)를

조절하여 페 루프의 저항치를 조절할 수 있으며, r/w 가 큰 경우에는 이방성자기저항특성이 우세하게 되고, r/w 가 작은 경우에는 평면홀효과가 우세하게 되어 상기 출력전압에 기여하는 이방성 자기저항에 의한 전압과 평면 홀저항에 의한 전압의 비가 조절된다.

- [0023] 상기 루프의 중심반경과 상기 루프의 폭의 비인 r/w 는 0.5 이상인 특징이 있으며, 실질적으로 0.5 내지 10000이다.
- [0024] 바람직하게, 본 발명에 따른 자기센서는 상기 페 루프(closed loop) 내부에, 상기 페 루프와 동심을 이루며 상기 페 루프와 일정 거리 이격된, 상기 페 루프의 자성층과 동일한 물질로 이루어진 제2 자성층이 더 형성되며, 상기 페 루프(closed loop) 외부에, 상기 페 루프, 상기 한쌍의 전류단자 각각, 및 상기 한 쌍의 전압단자 각각과 상기 일정 거리 이격된, 상기 페 루프의 자성층과 동일한 물질로 이루어진 제3 자성층이 더 형성된다.
- [0025] 상기 제2 자성층 또는 상기 제3 자성층은 원형 페 루프의 r/w 가 증가하면 자성층의 형상에 기인하는 형상이방성인자(demagnetization factor)가 자화 방향에 미치는 영향을 최소화하기 위함으로, 상세하게, 상기 자성층에 존재하는 강자성 박막의 원주방향에 대한 형상이방성인자(demagnetization factor)가 증가하면 이력특성을 야기시키는 원인이 될 수 있으며, 페 루프 내부 또는 외부에 페 루프와 동일한 자성층을 페 루프(및 한쌍의 전압단자와 한쌍의 전류단자)와 분리하여 위치시켜 페 루프의 형상이방성인자에 의한 이력특성을 최소화함으로써 자기센서의 출력전압을 안정화시키고, 민감도를 향상시키기 위함이다.
- [0026] 서로 대향하는 한 쌍의 전류단자 및 서로 대향하는 한 쌍의 전압단자는 전류단자와 전압단자가 교번하여 상기 페 루프와 접하며, 상기 한 쌍의 전류단자에서 선택된 한 단자와 상기 한 쌍의 전압단자에서 선택된 한 단자의 각도가 90° 인 대칭 구조를 가져, 대칭인 저항값에 의해 출력 전압신호를 극대화하는 특징이 있다.
- [0027] 상기 전류단자 및 상기 전압단자 각각은 상기 페 루프의 외주면과 접하여 구비되는 특징이 있으며, 이에 의해 출력전압특성이 최대가 되며 상기 전류단자 또는 전압단자와 상기 페 루프인 자성층이 서로 오버랩되지 않는 형상으로 이방성 자기저항 특성과 평면 홀저항 특성을 모두 갖는 특징이 있다.
- [0028] 페 루프 형상의 자성층은 강자성 박막을 포함하며, 상기 강자성 박막의 자기저항특성을 이용하므로 교류 및 직류 전류에 대한 주파수 특성이 우수하며, 자성층의 강자성 박막의 두께가 나노미터 오더(order)이므로 와전류 특성이 무시되어 주파수에 따른 자화량 변화도 강자성 박막의 강자성공명(ferromagnetic resonance) 주파수까지 확장이 가능하며, 광대역의 직류 및 교류 자기장의 측정이 가능한 특징이 있다. 따라서 전류단자를 통한 전류는 직류, 교류 및 펄스형 전류신호를 인가하는 것이 가능하며, 자성층의 인가 자기장의 세기에 따른 자화방향의 주파수 반응특성이 마이크로파 대역까지 가능한 광대역의 직류 및 교류 자기장을 검출할 수 있는 특징이 있다.
- [0029] 상술한 바와 같이 상기 페 루프 형상의 상기 자성층은 강자성 박막을 포함하며, 바람직하게, 상기 자성층은 교환결합력이 결부된 강자성(ferromagnetic) 박막을 포함한다.
- [0030] 상기 교환결합력이 결부된 강자성 박막을 포함하는 상기 자성층은 반강자성(antiferromagnetic) 박막, 절연체 박막, 비자성 박막, 및 금속(metal) 박막에서 하나 이상 선택된 박막과 상기 강자성 박막이 적층된 다층박막인 특징이 있으며, 상세하게, 상기 자성층은 강자성 박막과 반강자성 박막을 포함하는 다층박막; 강자성 박막, 금속 박막 및 강자성 박막을 포함하는 다층박막; 강자성 박막(I), 절연체 박막 및 강자성 박막(II)을 포함하는 다층박막; 또는 강자성 박막(I)-금속 박막-강자성 박막(II)-반강자성 박막을 포함하는 다층박막;인 특징이 있다.
- [0031] 상기 자성층은 출력전압을 특성화하는 비등방성자기저항비가 우수한 강자성박막을 포함하며, 상세하게, 상기 강자성박막의 비등방성자기저항비는 강자성 박막의 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling) 특성 및 스핀 분극율(spin polarization)에 기인하므로 상기 자성층에 구비되는 강자성 박막은 스핀-궤도 결합 및 스핀 분극율 특성이 우수한 강자성(ferromagnetic) 박막 또는 스핀분극율이 100%인 반금속(half-metal) 박막을 포함한다.
- [0032] 보다 특징적으로, 상기 자성층은 출력전압의 이력특성이 없는 교환 결합력을 갖는 다층 구조의 자성층으로, 상세하게, 교환결합력을 갖는 자성층은 강자성 박막-반강자성 박막의 적층 구조로 반강자성 박막의 스핀 정렬에 의한 반강자성 교환 결합력을 유기하는 다층구조를 포함하여, 강자성 박막-금속박막-강자성박막의 구조로 합성형 반강자성 결합(synthetic antiferromagnetic coupling or RKKY coupling)에 의한 반강자성 교환 결합력을 갖는 다층구조를 포함하며, 강자성 박막-절연체 박막-강자성체 박막의 구조에서 강자성체의 표면 거칠기에 기인하는 오렌지 껍질(Orange peel) 결합 등 강자성 박막에 교환 결합력을 인가하는 다층구조를 포함한다.
- [0033] 상기 자성층은 출력전압의 이력특성이 없으며 민감도가 향상된 자성층으로, 상세하게, 강한 교환결합력을 갖는

강자성박막-반강자성박막을 기반으로 강자성체를 한쪽 방향으로 고정시킨 후 금속막을 자성체 박막 사이에 삽입하여 두 자성박막 사이는 약한 교환결합력을 갖게 하여 두 강자성박막의 이방성 자기저항 특성과 평면 홀저항 특성을 모두 이용하여 자기센서의 민감도를 향상시키는 특징이 있다.

[0034] 상기 교환결합력을 갖는 자성층은 이방성 자기저항 특성과 평면 홀저항 특성이 나노형상에서도 유지되므로 초소형의 자기센서의 제작이 가능한 특징이 있다.

[0035] 상기 다층 구조의 자성층은 밀판(substrate)과의 접촉력 강화 및 자성층의 결정 성장을 돕는 언더레이어(under layer), 금속성 자성층의 산화 방지를 위한 보호막(capping layer)들을 더 포함할 수 있으며, 예를 들어, 교환결합력을 갖는 강자성-반강자성 자성층의 다층박막 구조는 언더레이어로 Ta 박막을, 강자성박막으로 자기저항비가 약 2%인 NiFe 박막을, 반강자성 교환 결합을 야기하기 위한 반강자성박막으로 IrMn 박막을, 그리고 산화 방지를 위한 보호막으로 Ta 박막을 순차적으로 적층한다.

[0036] Ta-NiFe-IrMn-Ta 적층 박막의 일 예와 같은 교환결합력을 갖는 자성층이 구비됨으로써, 교환 결합력에 의하여 이력특성이 제거되고, 강자성박막의 두께 및 열처리온도 변화에 따른 교환결합력의 세기를 조절함으로써 측정대상 자기장의 범위를 제어할 수 있으며, IrMn의 경우 약 300 °C의 온도까지 교환 결합력을 유지할 수 있어 열적 안정성이 우수한 자기센서가 제공된다. 다른 일 예로, Ta-NiFe(1)-Cu-NiFe(2)-IrMn-Ta 적층 박막은 두 개의 NiFe(1)과 NiFe(2) 사이에 금속인 구리(Cu)박막을 삽입하여 NiFe(1)과 NiFe(2) 사이의 약한 교환 결합력으로 인하여 자기장 측정의 민감도가 향상된 자기 센서가 제공된다.

발명의 효과

[0037] 본 발명에 따른 자기센서는 자기장의 세기에 따른 이방성자기저항(AMR; anisotropic magneto-resistance) 특성 및 평면 홀저항(PHR; planar hall resistance) 특성을 모두 이용함에 따라, 고감도로 민감하게 자기장의 크기 및 변화를 감지할 수 있으며, 동일한 구조로 평면 홀저항 특성만을 이용한 평면 홀저항센서의 특성 또는 이방성 자기저항 특성만을 이용한 이방성 자기저항센서의 특성을 모두 가질 수 있는 효과가 있다.

[0038] 또한, 페 루프 형상의 자성층과 4개의 단자로 이루어진 간단한 구조를 가지므로 그 제조가 용이하고 대량 생산이 가능하며, 반도체 공정에서 통상적으로 사용하는 리소그래피 (lithography)와 박막 증착기법을 이용하여 미소 페 루프의 패턴 제조가 가능하므로 초소형화가 가능하며, 저항특성을 이용하므로 타 소자 또는 회로와의 집적화가 용이한 장점이 있다.

[0039] 또한, 페 루프 형상의 자성층은 페 루프의 r/w(루프의 중심반경(r:radius)과 루프의 폭(w :width)의 비(r/w ratio))가 증가할수록 원주 방향의 형상이방성 자기장이 증가하게 되어 이력특성 증가 및 민감도를 감소시키는 역할을 하지만 페 루프의 형상 패턴시 내부 또는 외부에 동일한 자성층을 위치하여 이들 내부 또는 외부 자성층에서 유기되는 자기장과 페 루프의 자성층과의 상호작용에 의하여 페 루프의 자화 특성을 안정화 시켜 페 루프의 형상이방성에 기인하는 이력특성 및 민감도 특성을 향상시키는 효과가 있다.

[0040] 원형 페 루프 형상의 자기센서는 둥그런 모양의 대칭형 구조가 되어 광 식각법에 의한 형상화 제작시 직각형상의 가장자리부분에서 일반적으로 발생하는 원형화 현상에 의한 비대칭성을 자기센서 디자인 단계에서 최소화할 수 있어 페 루프의 대칭성 유지가 용이하다. 따라서 자기센서 제조시 발생하는 비대칭성 형상에 기인하는 출력전압의 기생 전압인 오프셋(offset)을 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

[0041] 본 발명에 따른 자기센서는 자성층의 자기저항 변화를 탐지하므로 일정전류(constant current) 구동을 기본으로 하지만 일정전압(constant voltage) 구동도 가능하다. 상기 원형 페 루프의 r/w가 작은 경우에는 자기센서의 저항이 작아지며 평면홀효과가 우세하게 되며, 이러한 평면홀 효과의 출력 전압은 전류의 세기에 비례한다. 따라서 원형 페 루프의 r/w가 작은 경우에는 일정 전류 구동이 유리하다. 반면 상기 원형 페 루프의 r/w가 큰 경우에는 자기센서의 저항이 커지고 이방성자기저항특성이 우세하게 되며, 이방성 자기저항특성의 출력 전압은 구동전압의 세기에 비례한다. 따라서 원형 페 루프의 r/w가 큰 경우에는 일정 전압 구동이 유리하다. 이들 일정 전압 또는 일정전류를 펄스형 신호로 구동할 경우 초저전력형 자기센서의 구현이 가능한 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

- [0042] 도 1은 2% 자기저항비를 갖는 단일 강자성층의 AMR 및 PHR 효과 일 예를 도시한 것이며,
 도 2는 원형 페 루프의 대면 브릿지(bridge) 한 쌍에 대한 출력전압 특성 (a) 측정결과 및 (b) 계산결과를 도시한 것이며,
 도 3은 원형 페 루프의 출력전압 특성 (a) 측정결과 및 (b) 계산결과를 도시한 것이며,
 도 4는 AMR과 PHR 효과에 의한 원형 페 루프의 출력전압 특성 측정결과를 도시한 것이며,
 도 5는 원형 페 루프의 r/w에 따른 출력전압 특성을 도시한 것이며,
 도 6은 자기센서의 출력전압 특성 및 민감도(S) 특성을 도시한 것이며,
 도 7은 단일층 강자성체(F) 및 교환결합력을 갖는 강자성/반강자성(F/AF) 다층 박막을 사용한 자기센서의 출력 특성을 도시한 것이며,
 도 8은 F/AF 및 RKKY 결합력을 갖는 원형 페 루프의 출력특성을 도시한 것이며,
 도 9는 원형 페 루프의 내부 및 외부 자성층에 의한 형상이방성 특성 감소 효과를 도시한 것이며,
 도 10은 자기 센서의 일 예를 도시한 것이며,
 도 11은 자기 센서의 다른 예를 도시한 것이며,
 도 12는 자기센서의 일 작동예를 도시한 도면이다.

도면의 주요 부분에 대한 부호의 설명

110 : 페 루프형상의 자성층

121, 122 : 전류단자

131, 132 : 전압단자

210 : 제2 자성층

211~214 : 제3 자성층

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0043] 이하 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 자기센서를 상세히 설명한다. 다음에 소개되는 도면들은 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 예로서 제공되는 것이다. 따라서, 본 발명은 이하 제시되는 도면들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 또한 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호들은 동일한 구성요소들을 나타내며, 제시되는 수식에서 동일한 기호는 동일한 의미를 갖는다.

- [0044] 이때, 사용되는 기술 용어 및 과학 용어에 있어서 다른 정의가 없다면, 이 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 통상적으로 이해하고 있는 의미를 가지며, 하기의 설명 및 첨부 도면에서 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대한 설명은 생략한다.

- [0045] 단일 강자성층의 AMR(anisotropic magneto-resistance) 및 PHR(planar hall resistance) 효과

- [0046] 비등방성 자기저항은 전류밀도 ($\vec{J}$)의 방향과 자화 방향($\vec{M}$)의 사이각에 따라서 저항이 변화되는 비등방 특성을 보인다. 이러한 비등방성 자기저항 특성은 자기장에 의하여 왜곡된 궤도 전자들의 산란(s-d산란) 기인하며, 전류밀도와 자화의 방향에 따른 전기장의 세기($\vec{E}$)는 하기의 식(1)과 같이 표현된다.

- [0047] (식 1)

$$\vec{E} = \rho_{\perp} \vec{J} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \vec{M}(\vec{J} \cdot \vec{M})$$

- [0049] 여기에서 $\rho_{\perp}$ 및 $\rho_{\parallel}$ 은 자구와 전류의 방향이 수직 및 수평일 때의 비저항값이며, $\vec{M}$ 은 자구의 벡터이며, $\vec{J}$ 는 전류밀도 벡터를 나타낸다.

- [0050] 식 (1)에서 자기저항의 변화는 전류밀도와 평행한 방향 및 수직 방향에서도 측정이 가능하다. 이때 전류밀도 벡

터와 평행한 방향의 저항 변화에 의한 전압을 일반적으로 AMR효과라고 하며, 전류밀도벡터에 수직인 방향의 저항변화에 의한 전압을 PHR효과라 한다.

[0051] 직선 바(bar)형태의 센서 형상을 갖는 경우 식(1)로부터 AMR효과에 의한 출력전압은 하기의 식(2)과 같이 표현된다.

[0052] (식 2)

$$V_{AMR} = I(\rho_{\perp} + \Delta\rho \cos^2\theta) \frac{l}{tw}$$

[0054] 여기서 I 는 전류, l 은 강자성 박막의 길이, w 는 강자성박막의 폭이고, t 는 강자성박막의 두께이고, $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ 이다.

[0055] AMR효과에 의한 출력전압은 $\rho_{\perp}$ 의 저항값에 의한 오프셋(offset) 전압을 가지며, 전류방향과 자기방향의 사이각 θ 에 따라 $\cos^2\theta$ 형태로 변한다. 강자성체의 용이축으로 전류를 인가하고, 용이축에 수직으로 자기장을 인가한 경우 자기장에 따른 출력전압은 도 1(a)와 같다. 즉 자기저항 변화는 $H = 0$ 을 기준으로 대칭형태로 나타난다. 식 (1)로부터 PHR효과에 의한 출력전압은 하기의 식(3)과 같이 표현된다.

[0056] (식 3)

$$V_{PHR} = I \frac{\Delta\rho}{t} \sin\theta \cos\theta$$

[0058] PHR효과에 의한 출력전압은 오프셋(offset)값이 0이며, 전류방향과 자기방향의 사이각 θ 에 따라 $\sin\theta \cos\theta$ 형태로 변한다. 강자성체의 용이축으로 전류를 인가하고, 용이축에 수직으로 자기장을 인가한 경우 자기장에 따른 PHR은 도 1(b)와 같다. 즉 자기저항 변화는 $H = 0$ 근처에서 선형특성이 우수한 특성을 보인다. 포화 자기장 이상으로 자기장을 인가 한 후 자기장의 방향을 바꾸면 매우 큰 이력특성을 보인다.

[0059] AMR특성은 자기저항비($\Delta\rho/\rho_{\perp}$)가 상온에서 2-5%이므로 $\rho_{\perp}$ 에 의한 출력전압의 오프셋이 매우 크다. 그러나 AMR에 의한 출력전압은 자기센서의 폭과 자성층의 두께가 일정한 경우 길이에 비례하므로 출력신호의 크기를 조절할 수 있는 장점이 있다. 한편 PHR은 자기센서의 길이 및 폭에 의존하지 않으므로 센서의 크기를 초소형화 하더라도 출력신호가 유지되는 장점이 있다. AMR 특성만을 이용한 자기센서의 경우 $\rho_{\perp}$ 에 의한 오프셋 전압을 제거하고 자기저항 특성인 $\Delta\rho = \rho_{\parallel} - \rho_{\perp}$ 에 의한 신호만을 추출하기 위하여 4개의 AMR센서를 휘스톤 브릿지(Wheatstone bridge)형태로 구성하여 자기센서로 이용하고 있으며, PHR 센서는 오프셋전압이 없어 도 1과 같이 바(bar)형태로 사용하고 있다.

[0060] 원형 페 루프 형상의 출력 특성

[0061] 자기센서에 이들 AMR 및 PHR 특성 두 가지 모두가 결부될 경우, AMR특성에 의한 출력신호의 조절 기능과, 초소형화에서도 신호특성의 유지기능을 결부할 경우 자기장센서의 민감도 특성을 향상시킬 수 있다. 따라서 원형의 페 루프 형상은 AMR 특성과 PHR특성을 모두 가지며, 페 루프의 반경과 두께를 변경함으로써 출력신호 특성을 조절하는 기능을 이용하여, 민감도 성능이 우수한 초소형 자기센서가 가능하다.

[0062] AMR과 PHR특성을 모두 갖는 원형 페 루프형상의 자기센서에 대한 특성은 자기장의 세기에 다른 자화 방향에 대한 분석과 페 루프 각각의 지점에서의 전류의 방향을 고려하여 분석된다. 먼저 자기장의 세기에 다른 자화의 방향(ϕ)은 Stoner-Wolfforth (S-W) 모델로 계산된다. 일방이방성 교환 결합에너지(J_k)를 갖는 자성층에 대한 S-W모델은 하기의 식(4)과 같이 에너지 밀도(E_{tot})로 표현된다.

[0063] (식 4)

$$E_{tot} = -MHt\cos(\phi - \phi_H) + tK_u\sin^2\phi + J_k\cos(\phi)$$

[0065] 상기의 식 (4)에서 E_{tot} 는 총 에너지밀도이며, M 은 자화량이며, H 는 외부인가 자기장이며, ϕ 는 자화 용이축으로

부터의 자화 각도이며, Φ_H 는 자화 용이축으로 부터 인가 자기장의 각도이며, K_u 는 일축이방성상수이다.

[0066] 상기의 식(4)를 미분하여 0이 되는 조건($\partial E_{tot}/\partial \Phi = 0$)에서 평형상태의 자화 방향인 Φ_{eq} 를 구한다. 자구 방향인 Φ_{eq} 가 페 루프를 형성하는 자성층의 모든 위치에서 동일하다고 가정하면 즉 단일 자구 형태를 갖는 경우, AMR과 PHR신호는 간단하게 원형 페 루프를 흐르는 전류의 방향(Φ_I)과 자구의 방향(Φ_{eq})과의 사이각인 $\Theta = \Phi_{eq} - \Phi_I$ 에 의존한다. 즉 원형 페 루프를 흐르는 전류의 방향은 수평축을 $\Phi_I = 0$ 방향으로 기준을 삼을 경우, 위쪽 루프에서는 $90 \Rightarrow 0 \Rightarrow -90$ 로 방향이 바뀌며, 아래쪽 루프에서는 $-90 \Rightarrow 0 \Rightarrow 90$ 로 바뀐다. 따라서 AMR 특성과 PHR특성이 모두 포함된 페 루프의 출력신호는 페 루프 각각의 지점에서 발생하는 출력전압의 합으로 분석되어 진다. 페 루프 위쪽의 1/4루프에 대한 AMR과 PHR각각에 대한 독립적인 출력 전압($V_{AMR}^{1/4}$, $V_{PHR}^{1/4}$)은 다음과 같은 식(5) 및 식(6)으로 계산된다.

[0067] (식 5)

$$V_{AMR}^{1/4} = \frac{\pi r I}{2tw} (\rho_{\perp} + \Delta \rho) \int_0^{\Theta} \cos^2 \Theta d\Phi_I$$

[0069] (식 6)

$$V_{PHR}^{1/4} = I \frac{\Delta \rho}{t} \int_0^{\Theta} \sin \Theta \cos \Theta d\Phi_I$$

[0071] 여기서 r은 원형 페 루프의 중심 반경이다.

[0072] 본 발명의 자기센서는 입력단과 출력단이 90° 각도의 위치를 가지는 대칭 형상으로 4개의 자성층이 브릿지(bridge) 형태를 보이는 형상이다. 하나의 브릿지가 페루프 위쪽의 1/4 루프를 의미한다. 각각의 1/4 루프에 대한 자성층의 자화 방향과 전류의 방향을 고려하면, 위쪽과 아래쪽에서 대면하는 루프의 출력특성은 동일하다. 따라서 이들 대면하는 브릿지의 특성을 분석하기 위하여 4개의 브릿지중 서로 대면하는 두 개의 브릿지를 금속저항 박막으로 처리하여 출력전압 특성을 통하여 식(5) 및 (6)에서 기술한 AMR과 PHR 특성에 대한 영향을 분석하였다. 대면하는 브릿지의 출력전압 특성을 측정하기 위한 자성층은 Ta(5nm)/NiFe(50 nm)/MnIr(10nm)/Ta(5nm) 구조를 사용하였으며, 입력 전류 $I = 1$ mA로 고정한 상태에서 자기장의 세기에 따른 출력전압의 변화를 측정하였다.

[0073] 도 2는 원형 페 루프의 대면 브릿지 한 쌍에 대한 출력전압특성의 측정결과와 계산결과를 도시한 것이다. 계산 결과는 원형 페 루프 전체에 대하여 대면 한 쌍은 자성체이고, 다른 한 쌍은 금속저항체 구조를 갖는 휘스톤 브릿지에 대한 출력 전압 특성을 분석하였다. 이때 자성체의 저항특성은 식(5) 및 식(6)을 적용하였다. 도 2의 출력 전압은 식(5)의 AMR 특성 중 $\rho_{\perp}$ 에 의한 오프셋 전압이 매우 크게 나타나고 있으며, 자기장의 세기에 따른 출력전압은 $H=0$ 을 기준으로 비대칭 구조를 보인다. 이러한 비대칭구조는 AMR과 PHR특성의 결합에 기인함을 계산 을 통하여 알 수 있으며, 원형 페 루프 구조의 브릿지 각각에서 유도되는 출력전압은 AMR 효과와 PHR 효과의 합으로 설명된다.

[0074] 원형 페루프는 4개의 bridge가 대칭구조를 가지므로 휘스톤 브릿지의 출력 특성으로 분석이 가능하다. 즉 4개의 동일한 자성체로 구성된 원형 페 루프에서 위쪽 루프를 흐르는 전류의 방향과 아래쪽 루프를 흐르는 전류의 방향에 의하여 자기저항의 특성이 서로 대면하는 브릿지에서 180° 의 위상차만큼 달라진다. 이 결과 AMR과 PHR의 출력전압 특성은 대면하는 브릿지들에서 반대방향이 된다. 그 결과 매우 큰 오프셋 전압은 서로 상쇄되고 자기저항의 특성만이 출력전압에 기여하게 된다. 따라서 원형 페 루프 전체에 출력 전압 특성을 분석하면, 하기의 식 (7)과 같이, $\rho_{\perp}$ 에 의한 오프셋 전압은 사라지고, 이방성자기저항 특성인 $\Delta \rho$ 에 의한 AMR과 PHR 효과가 결합된 결과로 나타난다.

[0075] (식 7)

$$V_{out} = \frac{\Delta \rho I}{t} \left(\frac{\pi r}{2w} F_{AMR}(H, \Phi_I) + F_{PHR}(H, \Phi_I) \right)$$

[0077] 여기서 F_{AMR} 과 F_{PHR} 은 페 루프의 형상에 의한 전류의 방향 및 외부 자기장의 세기에 따른 변화를 반영하는 AMR 및

PHR에 대한 형상인자이며, 상기의 식(5)과 식(6)의 적분값을 나타낸다.

- [0078] 이들 형상 인자들의 특성 분석을 위하여 원형 페 루프에 대한 출력 전압의 특성을 측정하였다. 이때, 자성층은 Ta(5 nm)/NiFe(50 nm)/MnIr(10 nm)/Ta(5 nm) 구조를 사용하였으며, 입력 전류 $I = 1$ mA로 고정된 상태에서 자기장의 세기에 따른 출력전압의 변화를 측정하였다.
- [0079] 도 3은 원형 페 루프의 출력전압 특성의 측정결과와 계산결과를 도시한 것이다. 계산 결과는 원형 페 루프 전체가 자성체 구조를 갖는 휘스톤 브릿지에 대한 출력 전압 특성을 분석하였다. 이때 자성체의 저항특성은 식(5) 및 식(6)을 적용하였다. 도 3의 출력 전압은 식(5)의 AMR 특성 중 ρ_{xx} 에 의한 오프셋 전압이 제거되었으며, 자기장의 세기에 따른 출력전압은 $H=0$ 을 기준으로 선형성이 우수한 특성을 보임을 알 수 있다.
- [0080] 따라서 원형 페 루프 형상을 갖는 구조의 출력신호 특성은 우수한 선형성이 확보되어 자기센서로 사용할 수 있는 장점을 보인다. 원형 페 루프의 출력 특성은 AMR과 PHR 전압이 모두 기인함을 계산결과를 통하여 알 수 있다.
- [0081] 식(7)로부터 원형 페 루프의 출력전압은 AMR 및 PHR효과가 모두 영향을 주고 있음을 알 수 있으며, AMR 및 PHR 효과에 대한 형상 특성을 의미하는 F_{AMR} 과 F_{PHR} 에 대한 출력전압 특성을 분석한 결과를 바탕으로 실험 결과와 비교하면 도 4와 같다. 원형 페 루프의 출력특성은 입력 전류 단자 근처로부터 출력단자까지의 브릿지에서 유기되는 자기저항 특성인 AMR 효과에 의한 출력 특성이 우세하게 된다. 한편 출력전압 측정 단자 근처의 자성층에서 유기되는 전압 특성은 PHR 특성이 우세하게 된다. 이들 특성을 분석하기 위하여 도 4에서 이들 출력특성에 대한 측정 결과를 비교 분석하였다. 이들 원형 페 루프에 대한 출력 전압의 특성을 측정하기 위하여, 자성층은 Ta(5 nm)/NiFe(50 nm)/MnIr(10 nm)/Ta(5 nm) 구조를 사용하였으며, 입력 전류 $I = 1$ mA로 고정된 상태에서 자기장의 세기에 따른 출력전압의 변화를 측정하였다. 자기장의 세기에 따른 최대 출력전압과 최소 출력전압의 차이(ΔV_{out})가 원형 페 루프 자기센서의 성능을 결정짓는다. 도 4에서 원형 페 루프의 $\Delta V_{out} = 350 \mu V$ 였다. 이때, AMR효과를 의미하는 출력단자 부근의 자성층을 제거한 페 루프의 $\Delta V_{AMR} = 290 \mu V$ 이었으며, PHR효과를 의미하는 출력단자 부근의 자성층에 만의 자성층에 의한 페 루프의 $\Delta V_{PHR} = 50 \mu V$ 를 보인다. 이들 실험결과는 AMR효과에 의한 특성과 PHR특성의 합이 원형 페 루프의 성능 특성을 반영함을 보인다. 따라서 자기장의 세기에 따른 원형 페 루프의 출력 성능은 하기의 식(8) 같이 표현된다.
- [0082] (식 8)
- [0083]
$$\Delta V_{out} = \Delta V_{AMR} + \Delta V_{PHR}$$
- [0084] 식(8)의 결과는 식(7)의 결과로 자기장의 세기에 따른 출력전압 성능은 형상 특성을 의미하는 F_{AMR} 과 F_{PHR} 과 비등방성 자기저항 특성인 $\Delta \rho$ 에 비례한다. 따라서 형상을 원형 루프로 형상화 할 경우 원형 페 루프의 성능은 $\Delta \rho$ 에 의존하게 되므로 $\Delta \rho$ 가 큰 자성층을 사용하여 원형 페 루프의 성능을 향상시킬 수 있다.
- [0085] 식(8)로부터 원형 페 루프의 출력전압은 AMR 및 PHR효과가 모두 기여하고 있음을 확인하였으며, 이들 식(7)을 이용하여 원형 페 루프의 중심반경(R)과 폭(w)의 비(r/w)에 따른 AMR 및 PHR효과를 도 5에 도시하였다.
- [0086] 도 5에서 전류 및 강자성층의 두께(t)가 일정한 경우 원형 페 루프의 출력 성능은 r/w 가 증가할수록 AMR 효과가 우세하게 되며, r/w 가 작은 경우는 PHR 효과가 우세하게 됨을 알 수 있다. r/w 가 증가하면 원형 페 루프의 자기저항이 증가하게 되고 따라서 AMR 효과에 의한 출력 특성이 증가하게 된다. 따라서 r/w 가 큰 경우에는 휘스톤 브릿지에 대한 출력 전압이 입력전압(V_{in})에 비례하는 관계($V_{out} = \Delta R V_{in} / R$)가 있으므로 전압구동이 가능하다. 저항이 큰 경우 구동전류가 감소되어 전력소모가 작은 저전력형 자기센서가 가능한 장점이 있다.
- [0087] 한편 $r/w=0.5$ 에 근접하면 원형 페 루프의 출력전압은 PHR 효과에 기인한다. 따라서 r/w 가 작은 경우에는 PHR에 대한 출력 전압이 입력전류(I)에 비례하는 관계($V_{out} = \Delta \rho I / t$)가 있으므로 전류구동이 가능하다.
- [0088] 저항이 작은 경우 구동전류가 증가되어 전력소모가 큰 단점은 있으나, 출력전압이 자기 센서의 크기에 무관한 특성이 있으므로 초소형의 자기센서가 가능한 장점이 있다. 또한 전류의 양을 증가시켜 구동할 경우 센서를 구성하는 금속 자성층을 흐르는 전류에 의한 센서 자체 자기장을 이용하여 센서 위에 위치한 초소형 자기 비드의 탐지가 가능하므로 자기 비드측정용 바이오센서로 이용될 수 있으며, 교류 전류로 구동할 경우 자성체 박막 시

편의 주파수에 따른 투자율측정이 가능하여 자성 박막의 투자율 센서로 활용 가능한 장점이 있다.

[0089] 자기센서의 자기장 측정 범위 및 민감도 특성 분석

[0090] 자기 센서로 원형 페 루프형상을 이용할 경우 자기장을 측정하는 범위 및 자기장을 측정하는 센서의 성능지표인 민감도 특성에 대한 분석이 필요하다. 도 6과 같이 자기장의 세기에 따른 자기센서의 출력 특성으로부터 자기장을 측정할 수 있는 범위를 센서의 출력특성이 최대 및 최소가 되는 자기장 범위(ΔH)로 한정하고, 민감도는 자기장의 세기에 따른 출력특성의 기울기로부터 자기센서의 민감도(field sensitivity, S)를 분석한다. 도 6(a)에서 ΔH 와 S의 특성을 보이며, 이들 특성을 분석하기 위하여 식(4)의 S-W 모델과 식(8)의 자기센서의 출력 특성을 이용한다.

[0091] 원형 페 루프 형상의 자기센서에 대한 자기장의 세기에 따른 민감도(S)는 다음과 같은 식(9)로 계산된다.

[0092] (식 9)

$$S = \frac{\partial V_{out}}{\partial H} = \frac{\Delta V_{out} \cos 2\theta \cos \Theta}{H_k \cos 2\theta + H \sin \Theta + H_{ex} \cos \Theta}$$

[0094] 여기서 H_k 는 강자성층의 이방성 자기장의 세기이며, H_{ex} 는 교환 결합력의 세기를 나타낸다. 하기의 식 (10)은 교환 결합력의 세기이며, 식(4)의 S-W에서 보인 교환 결합에너지 J_k 로 표현된다.

[0095] (식 10)

$$H_{ex} = \frac{J_k}{tM_s}$$

[0097] 도 6(b)는 식(9)를 이용하여 계산한 자기센서의 민감도 특성을 도시한 것이다. 자기장에 대한 민감도는 식(9)로부터 $\theta=0^\circ$ 에서 최대가 되며, 도 6(b)에서 보인 바와 같이 $H=0$ 에서 최대가 된다. 따라서 자기센서의 최대 민감도는 다음과 같이 식 (11)로 간단히 표현된다.

[0098] (식 11)

$$S_{max} = \frac{\Delta V_{out}}{H_k + H_{ex}}$$

[0100] 식(11)로부터 자기센서의 최대 민감도는 교환결합력의 세기에 따라서 감소한다. 따라서 민감도를 향상시키기 위해서는 교환 결합력의 세기를 최소화하는 것이 필요하다.

[0101] 자기장 측정 범위는 민감도가 S=0이 되는 자기장 범위로 정의할 경우 식(9)로부터 $\theta=45^\circ$ 의 조건에서 구할 수 있다. 즉 자기장 측정 범위 (ΔH)는 하기의 식(12)와 같다.

[0102] (식 12)

$$\Delta H = H_k + H_{ex}$$

[0104] 식(12)로부터 자기장 측정 범위는 교환 결합력의 세기에 비례한다. 따라서 교환결합력의 세기를 조절함으로써 자기센서의 자기장 측정범위를 조절할 수 있다. 민감도와 자기장 측정범위는 교환 결합력의 세기에 따라서 상반 관계(trade off)에 있으므로 자기센서의 용도를 기반으로 자기센서의 설계에 필히 고려해야할 변수이다.

[0105] 출력 전압 신호의 이력 특성 개선

[0106] 자기 센서로 일축이방성 또는 이축이방성을 갖는 단일 자성층을 이용할 경우, 자기센서의 출력 특성에서 이력특성을 보인다. 이러한 이력특성은 자기센서의 자기장의 방향에 대한 정보를 상실하게 하므로 자기센서의 기능을 저하한다. 따라서 이력특성을 일으키는 일축이방성, 이축이방성 및 형상이방성에 의한 이력특성을 제거하는 것

이 필요하다.

[0107] 이방성 자기저항 특성이 우수한 CoNiFe 합금들은 일축이방성(uniaxial anisotropy) 특성을 보인다. 즉 자화는 용이축을 따라서 0° 와 180° 의 각도를 갖는 것이 안정한 상태가 된다. 이러한 강자성체 시편에 한 주기의 고자장을 인가할 경우 자구는 $0^\circ - 180^\circ - 360^\circ$ 로 회전한다. 이 경우 전류의 방향과 자화방향의 사이각에 의존하는 PHR효과는 커다란 자기이력 특성을 보이게 된다. 그러나 일축이방성(unidirectional anisotropy)을 갖는 강자성/반강자성 재료를 사용할 경우 자화 용이축은 한 방향을 가지게 되므로 한 주기의 고자장을 인가할 경우 자구는 $0^\circ - 180^\circ - 0^\circ$ 로 회전하므로 출력전압의 자기이력특성이 없어진다.

[0108] 도 7은 자성층으로 단일층의 강자성체(F) 및 교환결합력을 갖는 강자성/반강자성(F/AF) 다층 구조를 사용한 자기센서의 출력특성을 도시한 것이다. 도 7에서 알 수 있듯이, 단일층 강자성체에서는 자기이력특성이 확연히 나타나고 있으나, 교환 결합력을 갖는 F/AF 이중층에서는 자기이력특성이 사라진다. 따라서 자기장 센서 제작시 교환결합력을 갖는 재료를 사용할 경우 자기이력에 따른 신호특성의 반전효과를 제거할 수 있다. 따라서 원형 페 루프의 출력 특성 및 민감도를 계산하기 위한 식(4)의 S-W모델에 교환 결합력 에너지를 도입하였으며, 그 결과 출력전압 특성에서 이력특성이 제거되어 나타나지 않았다.

[0109] 교환 결합력 에너지를 생성하는 방법은 여러 가지 방법이 있다. 앞에서 서술한 F/AF구조에서 반강자성층의 계면 스핀에 의한 효과에 의한 교환 결합력, 강자성/금속/강자성의 삼층 박막 구조에서 금속에 의한 RKKY 결합력, 강자성/절연체/강자성 구조에서 강자성체의 표면 거칠기에 의한 오렌지 껍질 결합력(orange peel coupling) 등이 있다.

[0110] 이들 모두는 강자성체에 교환 결합력 에너지 J_k 특성을 보이며, 시편 내부의 바이어스 자기장 H_{ex} 역할을 한다. 이러한 바이어스 자기장은 도 7의 F/AF구조에 대한(삽입 그림) 자화곡선에서 보이듯이 자기장의 세기가 0 근처에서 자화량(M)이 포화자화량(M_s)과 같아진다. 따라서 모드 자구가 한쪽 방향으로 정렬되어 있으므로 식(4)에서 기술한 단자구 모형으로 자기장의 세기에 따라서 회전하는 자구의 회전방향을 계산할 수 있으며, 이들 결과를 이용하여 원형 페 루프의 출력특성 및 민감도 특성의 분석이 가능하다. 또한 교환결합력 특성을 갖는 자성층의 경우 자구의 생성에 대한 이력특성과 자구의 이동에 따른 자구 노이즈 특성이 감소하므로, 신호 대 노이즈의 비(S/N ratio)를 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

[0111] 자기센서의 출력 특성은 자성층을 구성하는 강자성층의 두께에 반비례한다. 따라서 출력 전압특성을 향상시키기 위해서는 강자성층의 두께를 최소화 하여야한다. 그 경우, 교환 결합력이 증가하여 자기센서의 민감도가 감소하는 단점이 있다. 따라서 강자성층의 두께를 최소화하고 교환 결합력의 세기를 약화시키는 방법이 필요하다. 이러한 특성을 만족하기 위하여 교환 결합력을 유발하는 F/AF 및 RKKY 결합력을 이용하여 원형 페 루프의 출력특성을 최적화 할 수 있다.

[0112] 원형 페 루프에 대한 출력 전압의 이력 특성을 제거하고 민감도 특성을 향상시키기 위하여, 자성층은 Ta(5 nm)/NiFe(6 nm)/Cu(2 nm)/NiFe(4 nm)/MnIr(15 nm)/Ta(5 nm) 구조를 사용하였으며, 입력 전류 $I = 1$ mA로 고정된 상태에서 자기장의 세기에 따른 출력전압의 변화를 측정한 결과와 함께 계산 결과를 도 8에 도시하였다.

[0113] 도 8의 측정에서 사용한 자성층은 약한 교환 결합력 특성을 부여하기 위하여 NiFe/Cu/NiFe 구조를 사용하였으며, 강한 교환 결합력 특성을 부여하기 위하여 NiFe/MnIr 구조를 이용하였다. 이들 두 가지 교환결합력의 특성을 갖는 원형 페 루프의 출력특성은 도 8(a)와 같으며, 이들 자성층의 구조에 대하여 계산한 출력특성의 결과를 도 8(b)에 도시하였다. 도 8에서 알 수 있듯이 측정결과와 계산결과가 일치하는 특성을 보이며, 계산에서 고려한 사항은 약한 교환 결합력을 갖는 RKKY결합 특성으로 합성형 반강자성 결합(SAF : synthetic antiferromagnetic coupling) 조건을 부여하였다. 이러한 결합조건하에서 출력특성이 최적화 될 수 있으며, 원형 페 루프의 출력 전압은 두 강자성층의 출력특성의 합으로 나타나며, F/AF구조보다 민감도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

[0114] 페 루프의 형상 이방성 특성 개선

[0115] 원형 페 루프 형상의 자기센서는 형상에 따른 형상이방성 특성을 고려하여야 한다. 형상이방성 인자(demagnetization factor)는 자성층의 형상이 자성층의 두께보다 매우 큰 경우에는 무시할 수 있다. 그러나 원형 페 루프의 중심반경(R)이 매우 작아서 강자성층의 두께와 비교하여 무시할 수 없는 경우 또는 폭(w)이 좁아 r/w 가 큰 경우에는 형상 이방성 특성을 고려하여야 한다. r/w 가 큰 경우 도 9에서 보인 것과 같이 자성층의 형

상에 기인하므로 원주 방향의 형상이방성인자(demagnetization factor)가 증가하게 된다. 이러한 원주 방향의 형상이방성 인자는 자기장의 세기에 다른 자화 변화 특성에 영향을 미친다. 즉 원형 페 루프 각각의 위치에서 형상이방성 인자의 방향이 달라지므로 자화 방향 역시 달라진다. 이러한 특성은 원형 페 루프 형상 자기센서의 민감도 특성을 감소시키고, 이력특성을 증가시키는 요인으로 작용한다. 따라서 원형 페 루프의 형상이방성 상수를 감소시키는 방법이 필요하다.

[0116] 이를 위하여 도 9에서 보인 것과 같이 페 루프 내부 또는(and/or) 외부에 페 루프와 동일한 자성층을 페루프와 분리되게 위치한다. 이들 페 루프와 분리된 내부 또는 외부 자성층에서 유기되는 자기장과 페 루프의 자성층과의 상호작용에 의하여 페 루프의 형상이방성 인자를 감소시켜는 역할을 한다. 즉 페 루프와 페 루프 내부 외부의 자성층의 하나의 자성층 형태를 형성하면서 자성층의 형상을 증가 시켜 형상이방성 인자가 작아지는 특징을 갖는다. 따라서 자기센서로 이용하는 원형 페 루프의 자구 형성을 제거하고, 단일자구에 의한 자화의 회전을 통하여 자기장의 세기에 따른 출력신호 변화에 기여하게 함으로써 출력특성을 안정화시키고, 이력특성 및 민감도를 향상시키는 장점이 있다.

[0117] 자기센서의 일 예들

[0118] 도 10은 본 발명에 따른 자기센서의 일 예를 도시한 것이며, 도 11은 본 발명에 따른 자기센서의 바람직한 일 예를 도시한 것이며, 도 12는 본 발명에 따른 자기센서의 일 작동예를 도시한 것이다.

[0119] 도 10 내지 도 11에 도시한 바와 같이, 본 발명에 따른 자기센서는 페 루프(closed loop) 형상의 자성층(110), 전류 입/출력을 위한 한 쌍의 전류단자(121 및 122), 및 센서의 출력 전압을 측정하기 위한 한 쌍의 전압단자(131 및 132), 그리고 바람직하게는 페 루프와 분리된 내부(210) 또는 외부의 자성층(211~214)을 포함하여 구성된다.

[0120] 상기 페 루프의 자성층(110)은 일정한 폭(도 12의 w)을 갖는 띠의 양 단이 연결된 페 루프 형상인 특징이 있으며, 원형 페 루프(도 10(a)), 타원형 페 루프(도 10(b) 또는 다각형 페 루프(도 10(c)))를 포함한다.

[0121] 상술한 바와 같이, 바람직하게, 본 발명에 따른 자기센서는 상기 페 루프 형상의 자성층, 페 루프의 입력단자 및 출력단자와 분리된 페 루프의 내부 또는 외부의 자성층, 한 쌍의 전류단자 및 한 쌍의 전압단자를 포함하여 구성되며, 자기장의 세기 변화에 따라 변화되는 저항인 상기 자성층(110)의 이방성자기저항(AMR; anisotropic magneto-resistance)과 평면홀저항(PHR; planar hall resistance)이 모두 센서의 출력 신호(한 쌍의 전압단자를 통해 측정되는 전압)에 기여하는 특징이 있다.

[0122] 바람직하게, 상기 자성층(110)은 도 11에 도시한 바와 같이 원형 페 루프이다. 상기 원형 페 루프 형상을 갖는 자기센서는 자성층(110)을 구성하는 강자성층에 교환 결합력을 부여하여 출력전압의 이력특성이 제거되고, 자기장에 대한 출력전압의 선형성이 우수하며, 교환 결합력의 세기를 조정하여 mT에서 pT 까지의 광범위한 영역의 자기장 검출이 가능한 장점이 있다. 더 나아가, 상기 원형 페 루프의 자성층(110)은 리소그래피(lithography)를 이용한 패턴 형성이 용이하여 나노 또는 마이크로 오더(order) 크기의 초소형 센서의 제작이 가능한 장점이 있다.

[0123] 바람직한 구조인 원형 페 루프의 자성층(110)을 기반으로, 본 발명의 자기 센서를 상술한다.

[0124] 상기 원형 페 루프 형상의 자성층(110)은 중심 반경(도 3의 R)과 일정한 폭(도 3의 w)을 갖는 띠의 양 단이 연결된 페 루프 형상인 특징이 있으며 이방성자기저항(AMR; anisotropic magneto-resistance)과 평면홀저항(PHR; planar hall resistance)이 모두 센서의 출력 신호(한 쌍의 전압단자를 통해 측정되는 전압)에 기여하기 위해, r/w의 범위는 0.5 이상인 특징이 있으며, 실질적으로 0.5 내지 10000이다. 이때 원형 페 루프의 r/w가 증가하면 자성층의 형상에 기인하는 원주 방향의 형상이방성인자(demagnetization factor)가 증가하게 되어 자기장의 세기에 따른 자구(domain)가 형성되며, 형성된 자구의 이동에 따른 이력특성을 야기하는 원인이 된다. 이 경우 페 루프 내부(210) 및/또는 외부(211~214)에 페 루프와 동일한 물질의 자성층을 페 루프(및 한 쌍의 전압단자와 한 쌍의 전류단자)와 분리되게 위치하여 이들 페 루프와 분리된 내부 또는 외부 자성층에서 유기되는 자기장과 페 루프의 자성층과의 상호작용에 의하여 페 루프의 형상이방성 인자를 감소시켜 페 루프의 자구 형성을 제거하고 자화의 회전을 통하여 출력신호에 기여하게 함으로써 출력특성을 안정화시키고, 이력특성 및 민감도 특성을 향상시키는 특징이 있다.

[0125] 상기 페 루프(110) 내부에 상기 페 루프와 일정거리 이격되어 구비되는 자성층(제2 자성층, 210)은 상기 페 루

프(110)와 동심구조를 가지며, 상기 페 루프와 유사한 형상을 갖는 것이 바람직하다. 즉, 상기 페 루프(110) 내부에 구비되는 자성층(제2 자성층, 210)은 페 루프와 유사하게 원형, 타원형 또는 다각형상을 가지며, 상기 페 루프와 일정 거리 이격된 동심 구조를 갖는다.

- [0126] 상기 페 루프(110) 외부에 상기 페 루프, 상기 한 쌍의 전압단자 및 상기 한 쌍의 전류단자와 일정거리 이격되어 구비되는 자성층(제3 자성층, 211~214) 각각은 상하 및 좌우 대칭인 구조인 것이 바람직하며, 상기 페 루프, 상기 한 쌍의 전압단자 및 상기 한 쌍의 전류단자와의 이격을 위한 공극을 고려하지 않을 경우, 전체적인 형상이 정사각형(도 11(b)) 또는 원형(도 11(c))을 갖는 것이 바람직하다.
- [0127] 페 루프의 형상이방성 인자를 감소시켜 페 루프의 자구 형성을 제거하고 자화의 회전을 통하여 출력신호에 기여하게 함으로써 출력특성을 안정화시키고, 이력특성 및 민감도 특성을 향상시키기 위해, 상기 페 루프 내부에 구비되는 자성층(210)과 상기 페 루프와의 이격거리 및 상기 페 루프 외부에 구비되는 자성층(211~214)과 상기 페 루프, 상기 한 쌍의 전압단자 및 상기 한 쌍의 전류단자와의 이격거리는 50 nm 내지 0.5 mm인 것이 바람직하다.
- [0128] 도 12에 도시한 바와 같이, 본 발명의 자기 센서는 원형 페 루프인 자성층(110)에 직류, 교류, 또는 펄스형 전류(I_{in})를 입력하고 전류이동 경로를 제공하는 한 쌍의 전류단자(121 및 122)를 포함하며, 자기장 변화에 대한 센서의 출력 신호인 직류, 교류, 또는 펄스형 출력 전압(V_{out})을 측정하기 위한 한 쌍의 전압단자(131 및 132)를 포함하여 구성된다.
- [0129] 상기 한 쌍의 전류단자(121 및 122)는 상기 페 루프인 자성층(110)과 접하며 두 전류단자(121 및 122)가 서로 대향하도록 구비되며, 상기 한 쌍의 전압단자(131 및 132) 또한 상기 페 루프인 자성층(110)과 접하며 두 전압단자(131 및 132)가 서로 대향하도록 구비된다.
- [0130] 상세하게, 도 12에 도시한 바와 같이, 상기 전류단자(121 및 122) 및 상기 전압단자(131 및 132)는 각각 페 루프(110)의 외주면과 접하는 경우 페 루프를 형성하는 자성층의 AMR과 PHR 특성이 최적화 되어 출력전압 특성이 최대가 되며, 페 루프(110) 상/하부로 상기 전류단자(121 및 122) 또는 상기 전압단자(131 및 132)가 오버랩(overlap)되지 않는 구조인 것이 바람직하다.
- [0131] 상세하게, 상기 서로 대향하는 한 쌍의 전류단자(121 및 122)의 연장선과 상기 서로 대향하는 한 쌍의 전압단자(131 및 132)의 연장선이 서로 직교하여, 상기 페 루프(110)의 외주면을 따라, 전류단자(121)-전압단자(131)-대향하는 전류단자(122)-대향하는 전압단자(132)로 교번되며, 상기 페 루프(110)의 중심(도 12의 0)을 기준으로 각 단자가 90°의 각도를 갖는 특징이 있다.
- [0132] 이때, 도 12에 도시한 바와 같이 상기 전류단자(121 및 122)는 외부의 전류소스(I)와 연결되어 상기 자성층(110)에 전류를 입력하고, 상기 전압단자(131 및 132)는 외부의 전압측정장치(V)와 연결되어 두 전압단자간의 전위차를 출력한다.
- [0133] 상술한 바와 같이, 상기 전류단자(121 및 122) 및 상기 전압단자(131 및 132) 각각의 일 단은 상기 자성층(110)과 접하며 다른 단은 상기 전류소스(I) 또는 전압측정장치(V)와 연결되는데, 상기 전류단자(121 및 122) 및 상기 전압단자(131 및 132)는 외부 장치와 자성층(110)간의 저 임피던스 경로를 제공하여 외부 전류를 손실없이 인가하고 센서의 출력 신호를 손실없이 출력하기 위함이므로, 통상의 전극 또는 배선 물질을 이용하여 형성될 수 있다.
- [0134] 접촉 저항 및 면 저항의 최소화 측면에서, 상기 전류단자(121 및 122) 및 상기 전압단자(131 및 132)는 비저항이 작은 비자성 금속 재료인 것이 바람직하다.
- [0135] 상술한 바와 같이, 본 발명의 자기 센서는 자성층의 이방성자기저항 특성과 평면홀저항 특성을 모두 이용하여 자기장을 검출하는 특징이 있으며, 이에 따라, 도 12에 도시한 바와 같이 상기 페 루프(110)의 중심반경(도 12의 R, 이하 r)과 페 루프(110)의 폭(도 12의 w, 이하 w)의 비를 제어하여 센서의 출력 신호에 기여하는 이방성 자기저항에 의한 전압과 평면홀저항에 의한 전압의 상대적 비를 제어하는 특징이 있다.
- [0136] 상세하게, 도 12에 도시한 바와 같이 자성층(110)이 큰 r/w를 갖는 경우, 센서의 출력 신호는 이방성자기저항에 의한 전압 신호가 주가 되어, 이방성자기저항 특성만을 이용한 자기저항센서와 유사한 센서 특성을 가지며, 도 12에 도시한 바와 같이 자성층(110)이 작은 r/w를 갖는 경우, 센서의 출력은 평면홀저항에 의한 전압이 주가 되어, 평면홀저항 특성만을 이용한 홀 센서와 유사한 센서 특성을 갖게 된다.
- [0137] 상세하게, 본 발명의 자기 센서의 출력 전압(V_{out})은 상기의 식 (7)에서 표현된 바와 같이 이방성자기저항에 의

한 전압과 평면홀저항에 의한 전압의 합이 된다. 본 발명에 따라 원형 페 루프의 자성층(110)의 구조 및 각 단자 간 90°의 각도를 갖는 구조에서, 상기 이방성자기저항에 의한 최대전압(ΔV_{AMR})은 저항에 의존적이므로 r/w에 따라 달라지며, 상기 평면홀저항에 의한 전압(ΔV_{PHR})은 자성층(110)의 물질 특성에 의존적이므로 크기에 의존하지 않는다.

[0138] 도 5는 일정 전류 조건에서 상기 식 (5)를 이용하여 r/w에 따른 출력 전압을 도시한 것으로, 상술한 바와 같이 페 루프의 반경이 작고 페 루프의 폭이 클 수록 평면홀저항 특성에 의해 센서의 출력 전압이 제어되며, 페 루프의 반경이 크고 페 루프의 폭이 작을수록 이방성자기저항 특성에 의해 센서의 출력 전압이 제어된다. 또한, 평면홀저항 특성이 주가 되는 영역과 이방성자기저항 특성이 주가 되는 영역 사이의 r/w에서는 센서 출력이 평면홀저항 특성 및 비등방성자기저항 특성 두 특성에 모두에 의해 제어된다.

[0139] 상술한 바와 같이 본 발명의 자기 센서는 동일한 구조에서 단순한 r/w의 제어를 통해, 비등방성 자기저항 특성이 주가 되는 센서, 비등방성 자기저항과 평면홀저항 특성이 모두 주가 되는 센서, 평면홀저항 특성이 주가 되는 센서로 작용하게 된다.

[0140] 자기장센서, 바이오센서, 방향센서, 와전류탐지센서 등과 같이 본 발명에 따른 자기 센서의 활용 분야를 고려하여 r/w, 자성층의 물질 및 적층 구조, 페 루프의 중심반경(R)이 결정될 수 있으며, 이때, 상기 페 루프의 반경(R)은 나노미터 오더(order) 내지 마이크로미터 오더(order)일 수 있으며, 그 크기에 의해 본 발명의 자기센서가 한정되는 것은 아니다.

[0141] 자성층의 이방성자기저항 특성과 평면홀저항(PHR; planar hall resistance) 특성을 모두 이용하여 자기장을 검출하는 본 발명의 자기 센서에 있어, 상기 자성층은 비등방성 자기저항의 변화가 큰 강자성 물질 및 이력 특성을 제거하기 위하여 교환결합력을 갖는 반강자성층 등을 포함하는 복합 박막 적층 구조를 모두 사용할 수 있다.

[0142] 상세하게, 본 발명의 자기 센서에 구비되는 자성층은 강자성(ferromagnetic) 박막을 포함하며, 반강자성(antiferromagnetic) 박막, 절연체 박막, 비자성 박막, 및 금속 박막에서 하나 이상 선택된 박막과 상기 강자성 박막이 적층된 다층박막으로, 자기장의 스위프(자기장 세기 sweep)시 저점 피크(peak)와 고점 피크(peak)를 갖는 출력 신호가 얻어지는 자성층이다.

[0143] 일 예로, 상기 자성층은, 강자성 박막-반강자성 박막의 적층 박막 구조, 강자성 박막-금속 박막-반강자성 박막의 적층 박막 구조, 강자성 박막-금속 박막-강자성 박막의 적층 박막 구조, 강자성 박막(I)-절연체 박막-강자성 박막(II)의 적층 박막 구조, 또는 강자성 박막(I)-금속 박막-강자성 박막(II)-반강자성 박막의 적층 박막 구조를 하나 이상 포함하는 다층박막이며, 이력 특성을 나타내지 않는 자성층이다.

[0144] 본 발명에 따른 자기센서에 있어, 상기 자성층(110)은 측정 대상 자기장의 범위(range)를 용이하게 제어할 수 있도록, 교환 결합력을 갖는 강자성 박막-반강자성 박막 구조의 적층박막인 것이 바람직하며, 이때, 상기 강자성 박막의 두께에 따른 교환 결합력의 세기 이용하여 측정하고자 하는 자기장의 대역(range)이 조절되는 특징이 있다.

[0145] 상기 강자성 박막은 강자성체, 산화물 자성체 또는 반금속(half-metal)의 박막이며, 상세하게, 강자성체로 Ni, Fe 및 Co에서 하나 이상 선택된 물질의 합금인 것이 바람직하며, 자기장에 의해 보다 큰 자기 저항 변화($\Delta\rho$)를 보이는 NiFe 또는 NiCo 합금인 것이 보다 바람직하다. 강자성 재료의 자기저항 변화는 스핀-궤도 산란에 의한 영향(χ)과, 분극률(α)에 비례한다($\Delta\rho \propto \chi(\alpha-1)$). 따라서 분극율이 큰 재료를 강자성 박막으로 사용이 가능하며, 분극율이 100%인($\alpha=0$) 반금속(half-metal)을 강자성 박막으로 사용하는 것도 바람직하다. 또한 자기저항변화는 재료의 저항(ρ_0) 및 자기저항비에 비례하므로($\Delta\rho = \rho_0 \times MR(\%)$) 저항이 큰 산화물 자성재료를 사용하는 것도 바람직하다.

[0146] 상기 반강자성 박막은 강자성 박막의 계면효과에 의하여 교환 결합력을 유발 시킨다. 이러한 반강자성 박막 재료로는 교환 결합력이 큰 Mn계 물질이 사용되고 있다. 상기 Mn계 반강자성 물질은 열적 안정성 및 저온 공정 측면에서 IrMn인 것이 보다 바람직하며, 출력 신호특성을 향상시키는 측면에서는 산화물 재료로 절연체이면서 반강자성 특성을 갖는 전이금속산화물인 것이 바람직하며, 상기 전이금속산화물은 NiO 또는 FeO를 포함한다.

[0147] 이때, 상기 적층 박막은, 기판과의 접합성, 자성층의 결정 방향 및 결정화를 촉진하기 위한 하나 이상의 언더레이어(underlayer)를 더 포함하는 할 수 있으며, 일 예로, 강자성 박막인 NiFe 및 반강자성 박막인 IrMn에 있어,

상기 언더레이어는 Ta인 것이 바람직하다.

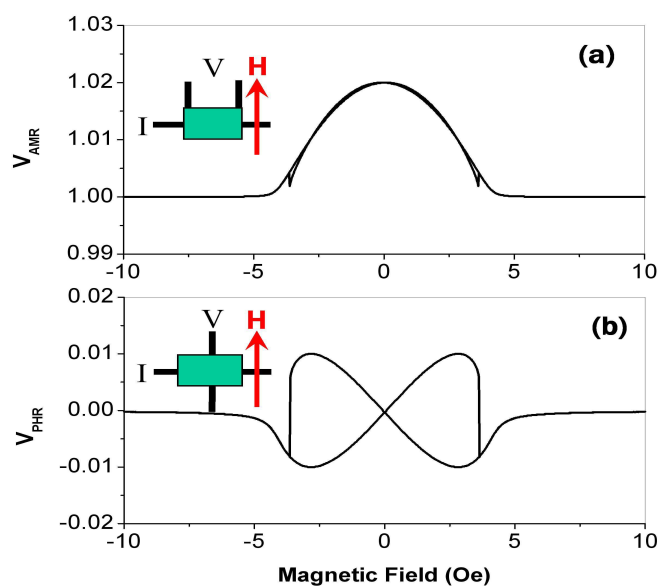
- [0148] 이때, 상기 자성층(110), 한 쌍의 전류단자(121 및 122) 및 한 쌍의 전압단자(131 및 132)는 물리적 지지를 위한 비전도성 기판상에 형성될 수 있으며, 상기 비전도성 기판은 자성을 갖지 않는 유리(glass), Si, SiO, SiN 또는 이들의 적층 기판을 포함한다.
- [0149] 상기 자성층(110)은 스퍼터링(sputtering), 분자빔증착(MBE), 유기금속화학증착법(MOCVD) 또는 전기도금 방법을 이용하여 형성될 수 있으며, 페 루프 (110), 상기 단자(121, 122, 131 및 132) 및 페 루프의 내부 및 외부의 자성층(210, 211~214)은 각각 상기 기판에 감광물질을 도포하고 마스크(mask)를 이용하여 노광 및 현상하는 리 쓰그라피를 통해 패터닝 하여 형성될 수 있다.
- [0150] 도 3에 삽입한 원형 페 루프의 사진은 본 발명에 따라 실 제조된 자기센서의 주사전자현미경 사진으로, Si/SiO를 기판으로 사용하였으며, $R=150\ \mu\text{m}$, $w=10\ \mu\text{m}$ 의 크기를 갖는 원형 페 곡선 형상으로 Ta(3nm) - NiFe(50nm) - IrMn(10nm) - Ta(3nm)의 적층 구조를 갖는 자성층을 형성하고, 금(Au)으로 입력 및 출력단자(121, 122, 131 및 132)를 형성한 예이다.
- [0151] 비교예로, 본 발명에 따른 자기센서(도 4의 AMR+PHR)와 유사한 크기, 형상 및 자성층 물질을 이용하여 이방성자기저항을 이용하는 자기저항센서(도 4의 AMR, 이하 AMR 센서)를 제조하고, 본 발명에 따른 자기센서(도 4의 AMR+PHR)와 유사한 크기, 형상 및 자성층 물질을 이용하여 평면홀저항을 이용하는 홀저항센서(도 4의 PHR, 이하 PHR 센서)를 제조하였다.
- [0152] 도 4는 1mA의 전류(I_{in})조건에서 자기장의 세기를 스위프(sweep)하며 본 발명에 따른 자기센서와 AMR 센서 및 PHR 센서의 출력특성(V_{out})을 측정한 결과로, 도 4에서 알 수 있듯이, 본 발명의 자기센서의 출력값이 AMR 센서 또는 PHR 센서의 출력값 보다 크며, AMR 센서의 출력값과 PHR 센서의 출력값 모두에 의한 것임을 알 수 있다.
- [0153] 또한, 스위프에 따라 단일한 저점 피크와 단일한 고점 피크를 가져 이력특성이 나타나지 않음을 알 수 있으며, 출력 특성의 선형성이 우수하고, 초 고감도로 자기장의 검출이 가능함을 알 수 있다.
- [0154] 도 3은 본 발명에 따라 제조된 자기센서의 출력 특성과 원형 폐곡선을 가지며 단자간 90° 의 각도를 갖는 자기센서를 기반으로 이론적으로 계산된 출력 특성을 비교 도시한 도면으로, 이론적 출력 특성은 Stoner-Wohlfarth 모델과 Wheatstone bridge형 회로를 기반으로 계산된 것으로, 도 3에서 알 수 있듯이 계산값과 실제 측정한 그래프가 일치함을 보이며, 도 4 그래프 특성 비교에 의해 본 발명의 센서가 실제 AMR 특성과 PHR 특성을 모두 가지며, 본 발명에 따른 자기 센서는 선형성이 우수하고, 교환 결합력의 작용을 이용하여 민감도를 조절할 수 있는 장점을 갖는다.
- [0155] **자기센서의 응용**
- [0156] 본 발명에 따른 자기센서 3개를 x, y, z의 3축 방향으로 배치하여 초소형 3축 자기장 센서에 이용할 수 있으며, x-y 평면에 본 발명의 자기센서 2개를 위치하여 x, y축 자기장을 측정하고, 반도체의 홀효과를 이용한 홀센서를 이용하여 x-y평면에 수직인 z-축방향의 자기장을 측정하는 3축 자기장 센서에 이용할 경우 3축 자기장센서의 부피를 최소화 할 수 있으며, 초소형/초저전력형의 3축 자기장 방향 센서를 요구하는 휴대폰 등 전자기기 또는 부품에 이용할 수 있는 장점이 있다.
- [0157] 본 발명에 따른 자기센서는 초소형화가 가능하므로 나노 또는 마이크로 오더(order) 크기의 자기 비드(bead)를 측정하는 바이오센서로 이용될 수 있다. 일반적으로, 자기비드는 초상자성(superparamagnetic) 재료를 사용하므로 매우 작은 스트레이 자기장이 외부 인가자기장의 세기에 따라서 증가한다. 따라서 외부 자기장을 인가하여 그때 유기되는 자기비드의 미소 스트레이 자기장(stray field)을 측정한다. 이 경우 자기센서는 외부인가자기장에 의한 신호와 미소 스트레이 자기장에 의한 신호가 혼합되어 측정되므로, 미소 스트레이 자기장에 의한 영향만을 추출하는데 한계가 있다. 따라서 금속성 자성재료를 이용하는 본 발명에 따른 자기센서의 전류 구동 특성을 이용하여, 자기비드의 측정 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 즉, 페 루프를 흐르는 직류 또는 교류의 구동전류는 페 루프 주변에 직류 또는 교류 자기장을 형성하게 되고, 이 자기장은 페 루프 근처에 위치한 자기비드를 자화시켜 직류 및 교류 스트레이 자기장을 형성시키는 역할을 한다. 이때 구동전류의 세기는 스트레이 자기장의 세기 뿐만 아니라 자기센서의 신호특성을 향상키는 효과가 있으며, 외부 자기장을 인가하지 않고 구동전류 자체 자기장을 이용하므로 자기비드의 미소 스트레이 자기장만을 검출할 수 있는 바이오센서를 가능하게

하는 장점이 있다.

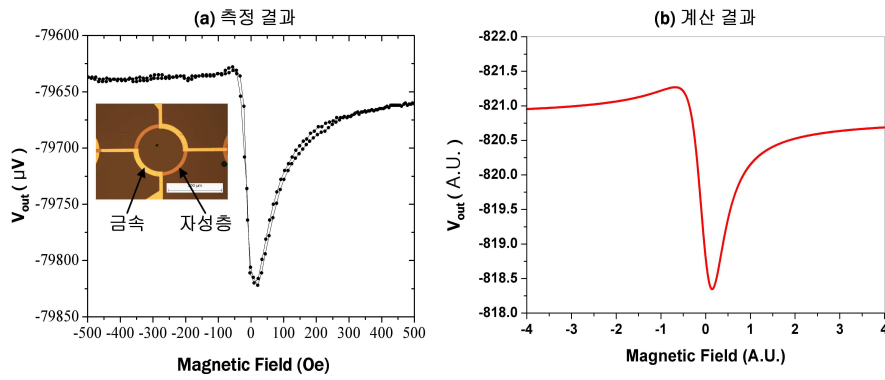
- [0158] 본 발명에 따른 자기센서는 교류 구동 전류에 의한 자체 자기장을 이용하여패 루프 위에 위치한 자성 박막 또는 자성 재료의 주파수에 따른 투자율(permeability) 측정이 가능하다. 본 발명에 따른 자기센서는 자기저항 특성을 이용하므로 측정 주파수(f)의 범위는 직류($f = 0$)에서 자성층의 강자성 공명주파수 ($f = \text{GHz}$ 대역) 까지 가능하므로 코일을 이용한 투자율센서에 비하여 저주파수 특성이 우수한 광대역의 투자율센서가 가능한 장점이 있다.
- [0159] 본 발명에 따른 자기센서는 초소형화 및 저주파수 특성이 우수하여 기존에 비파괴 검사에서 와전류 센서로 사용하고 있는 코일센서의 탐지 가능한 결함의 크기 및 저주파수 한계를 극복할 수 있는 효과가 있다. 따라서, 가스 파이프 라인과 같이 두꺼운 금속성 후막에서 후막 내부에 존재하는 미소한 마이크로 오더 크기의 결함을 탐지할 수 있는 비파괴 검사용 와전류 센서가 가능한 장점이 있다.
- [0160] 본 발명에 따른 자기센서는 민감도가 우수하여 중자장 핵자기 공명장치(NMR)의 공명신호 측정 센서로 이용이 가능하다. 기존의 고자장($H \sim T$ order) NMR 장치는 핵자기 공명주파수 수 100 MHz 오더이므로 코일센서를 사용하고 있으며, 초저자장($H = \mu T$ order) NMR 장치는 공진 주파수가 낮고 신호가 작아서 fT의 분해능을 갖는 저주파수용 교류 SQUID장치를 이용하고 있다. 따라서 중자장 ($\mu T < H < T$) NMR 장치에는 pT 범위의 광대역 자기장의 검출이 가능한 본 발명에 따른 자기센서의 이용이 가능하다.
- [0161] 본 발명에 따른 자기센서는 어레이(array)로 센서들을 구성한 어레이형 바이오센서로 이용하여 자기 비드 탐지 능력을 향상시킬 수 있으며, 이러한 어레이 센서는 2차원 또는 3차원 자기장 이미징 센서로도 이용이 가능한 장점이 있다.
- [0162] 이상과 같이 본 발명에서는 특정된 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다.
- [0163] 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

도면

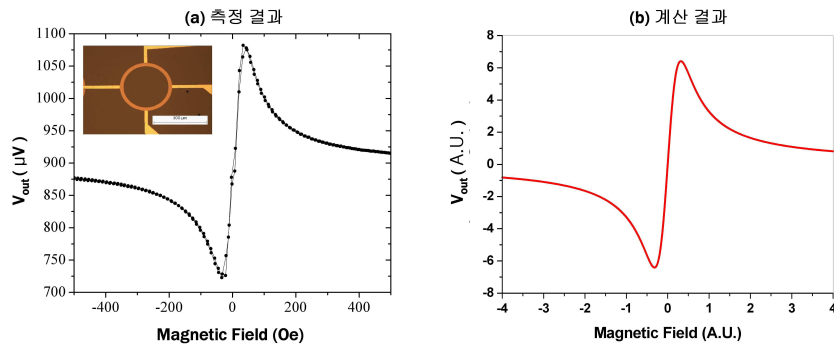
도면1



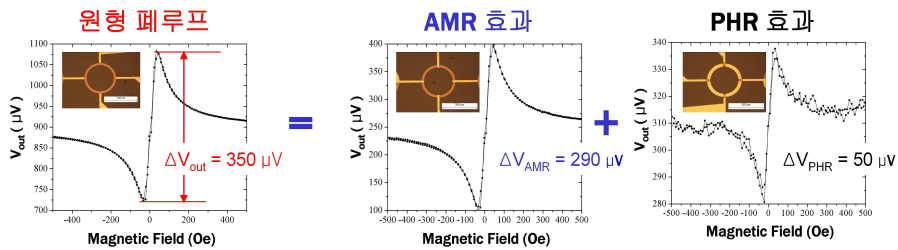
도면2



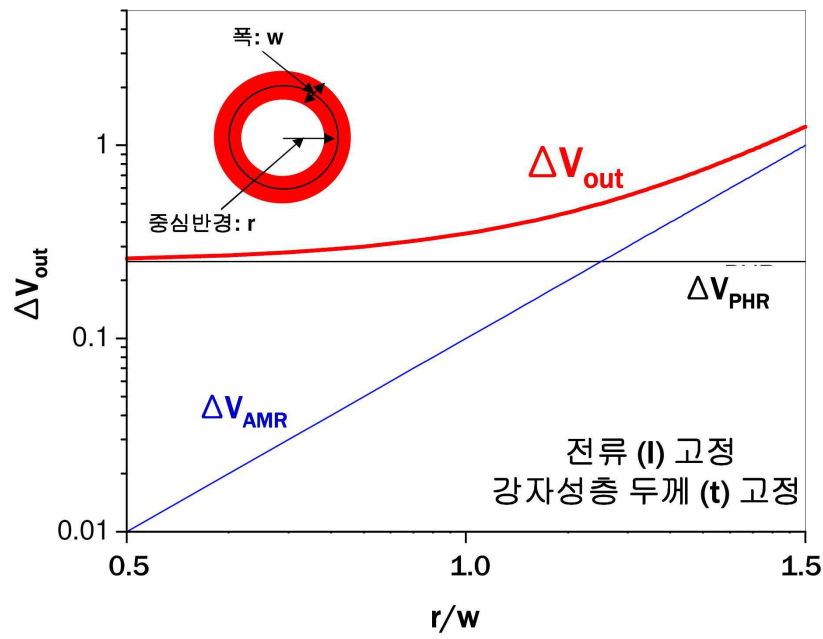
도면3



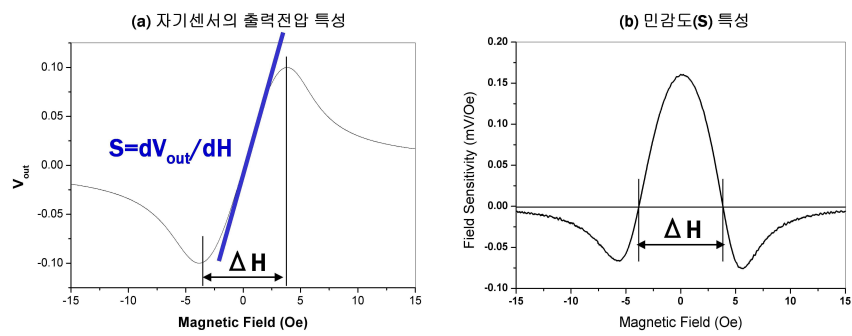
도면4



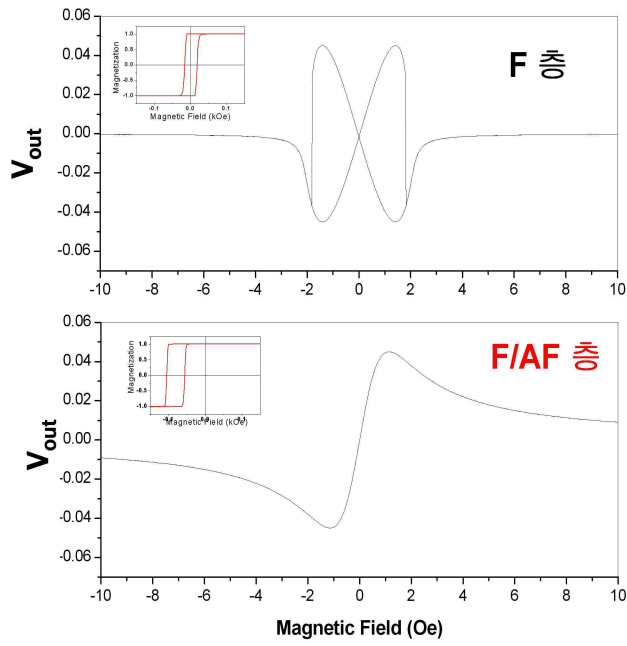
도면5



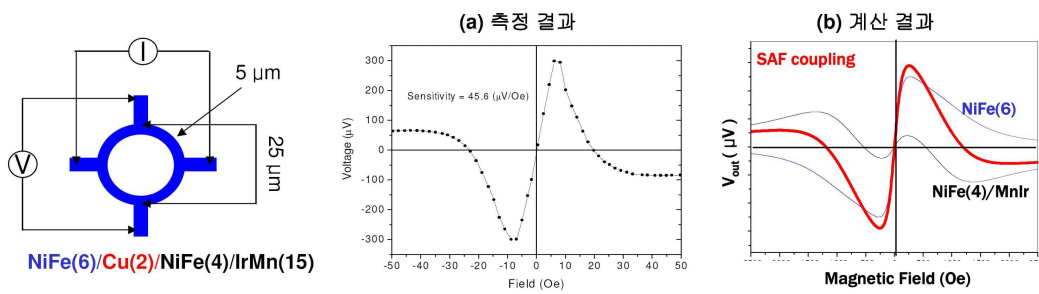
도면6



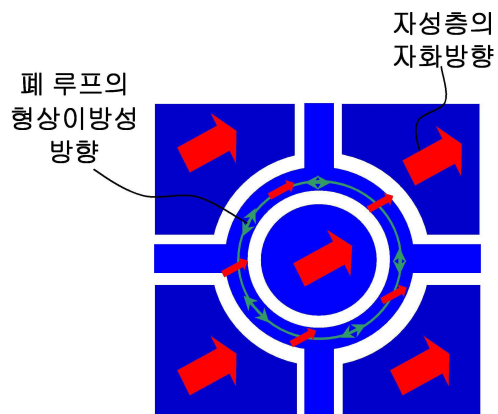
도면7



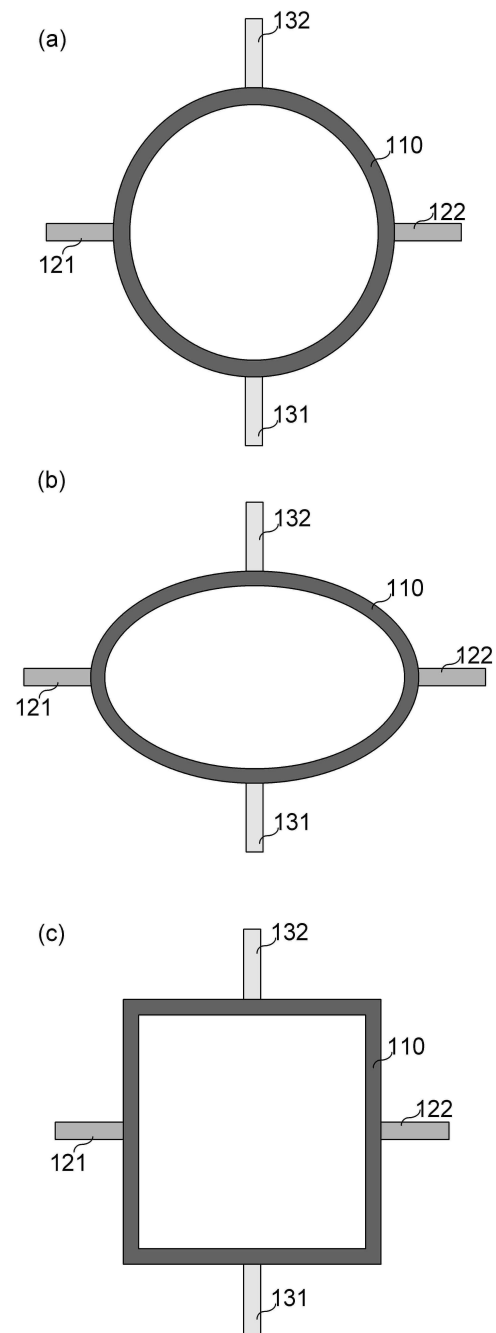
도면8



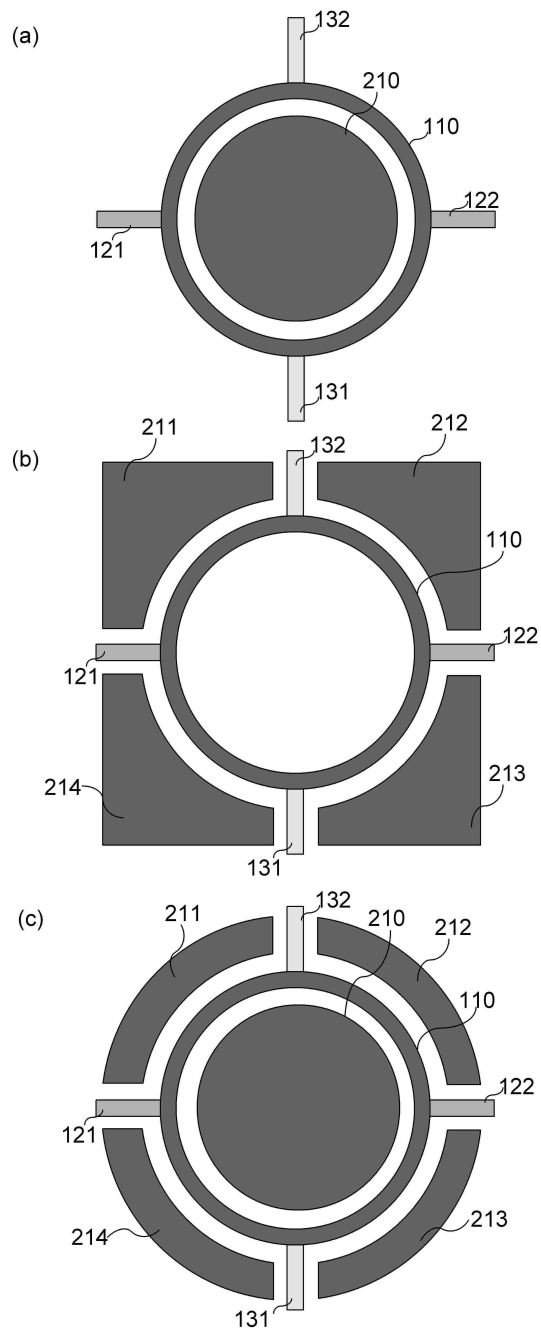
도면9



도면10



도면11



도면12

