



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0097028
(43) 공개일자 2018년08월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 43/02 (2006.01) H01F 10/32 (2006.01)
H01L 43/10 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 43/02 (2013.01)
H01F 10/3268 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0023588
(22) 출원일자 2017년02월22일
심사청구일자 2017년02월22일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암
동5가)
(72) 발명자
이경진
서울특별시 노원구 중계로 195, 105동 305호
이승재
서울시 마포구 독막로42길 2, 101동 902호
(74) 대리인
특허법인 누리

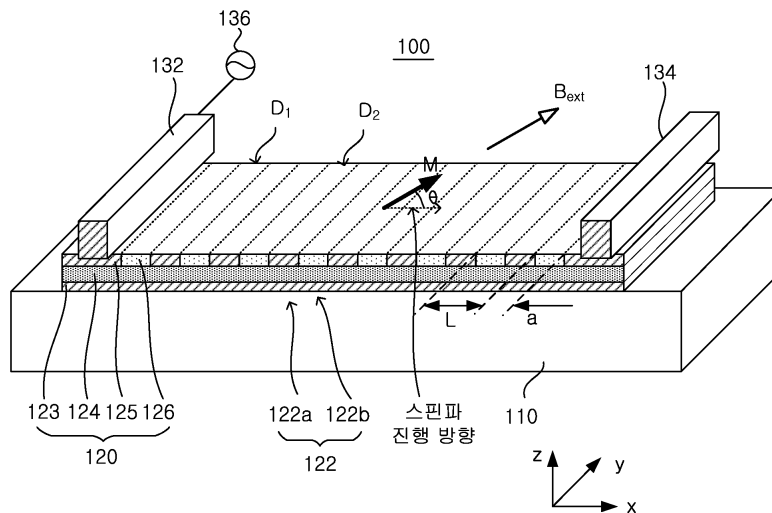
전체 청구항 수 : 총 17 항

(54) 발명의 명칭 반대칭 교환상호작용의 공간적 변조를 이용한 마그논 결정을 가진 스핀파 소자

(57) 요약

본 발명은 스핀파 소자를 제공한다. 이 스핀파 소자는, 기판 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선; 상기 마그논 결정 나노선의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나; 및 상기 마그논 결정 나노선의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나를 포함한다.

대표도 - 도1a



(52) CPC특허분류

H01L 43/10 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2015M3D1A1070465

부처명 미래창조과학

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 미래소재디스커버리지원

연구과제명 설계기반 Spin-Orbitronics 소재 개발

기 여 율 1/1

주관기관 고려대학교 산학협력단

연구기간 2016.04.04 ~ 2021.12.03

명세서

청구범위

청구항 1

기관 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선;

상기 마그논 결정 나노선의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나; 및

상기 마그논 결정 나노선의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나를 포함하고,

상기 마그논 결정 나노선은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함하는 나노선이며,

상기 마그논 결정 나노선은 복수의 단위 영역을 포함하고,

상기 단위 영역은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역과 제2 영역을 포함하고,

상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하고, K_{eff} , K , M_s 는 각각 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 막면에 수직한 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 그리고 포화자화값을 의미하는 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 마그논 결정 나노선은:

상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴;

상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴;

상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 상부 금속 패턴; 및

상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 상부 절연 패턴을 포함하고,

상기 상부 금속 패턴과 상기 상부 절연 패턴은 교번하여 배치되고,

상기 상부 금속 패턴은 상기 제1 영역에 대응되고,

상기 상부 절연 패턴은 상기 제2 영역에 대응되는 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 하부 금속 패턴은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고,

상기 중간 자성 패턴은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함하고,

상기 상부 절연 패턴은 AlOx , MgO , 및 GdOx 중에서 적어도 하나를 포함하고,

상기 상부 금속 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질인 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 마그논 결정 나노선은:

상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴;

상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴;
 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제1 상부 금속 패턴; 및
 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제2 상부 금속 패턴을 포함하고,
 상기 상부 금속 패턴과 상기 제2 상부 금속 패턴은 교번하여 배치되고,
 상기 제1 상부 금속 패턴은 상기 제1 영역에 대응되고,
 상기 제2 상부 금속 패턴은 상기 제2 영역에 대응되는 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 5

제 4항에 있어서,
 상기 하부 금속 패턴은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고,
 상기 중간 자성 패턴은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함하고,
 상기 제1 상부 금속 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질이고,
 상기 제2 상부 금속 패턴은 Ni 또는 Ir인 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 6

제 1항에 있어서,
 상기 마그논 결정 나노선은:
 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴;
 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴;
 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 배치된 상부 금속 패턴; 및
 상기 중간 자성 패턴과 상기 상부 금속 패턴 사이에 개재되고 주기적으로 배치된 보조 금속 패턴을 포함하고,
 상기 보조 금속 패턴이 없는 영역은 상기 제1 영역에 대응되고,
 상기 보조 금속 패턴이 있는 영역은 상기 제2 영역에 대응되는 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 7

제 6항에 있어서,
 상기 하부 금속 패턴은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고,
 상기 중간 자성 패턴은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함하고,
 상기 상부 금속 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질이고,
 상기 보조 금속 패턴은 Ni 또는 Ir인 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 8

제 1항에 있어서,
 상기 마그논 결정 나노선은:
 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴;
 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제1 중간 자성 패턴;
 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제2 중간 자성 패턴; 및
 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 제1 및 제2 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 배치된 상부 금속

패턴;을 포함하고,

상기 제1 중간 자성 패턴과 상기 제2 중간 자성 패턴은 교번하여 배치되고,

상기 제1 중간 자성 패턴은 상기 제1 영역에 대응되고,

상기 제2 중간 자성 패턴은 상기 제2 영역에 대응되는 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 9

제 1항에 있어서,

상기 하부 금속 패턴은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고,

상기 제1 중간 자성 패턴은 Co이고,

상기 제2 중간 자성 패턴은 CoFeB이고,

상기 상부 금속 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질인 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 10

제 9항에 있어서,

상기 제1 중간 자성 패턴과 상기 제2 중간 자성 패턴은 동일한 재질이고,

상기 제1 중간 자성 패턴은 두께는 상기 제2 중간 자성 패턴의 두께보다 큰 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 11

제 1항에 있어서,

상기 마그논 결정 나노선의 하부에 배치된 하부 전극; 및

상기 마그논 결정 나노선의 상부에 배치된 상부 전극을 더 포함하고,

상기 마그논 결정 나노선에서 진행하는 스핀파의 금지 대역은 상기 상부 전극과 상기 하부 전극에 인가되는 전압차에 따라 변경되고,

상기 제1 영역의 DMI 상수(D_1)과 상기 제2 영역의 DMI 상수(D_2)의 차이는 1 erg/cm^2 이상인 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 12

제 11항에 있어서,

상기 하부 전극은 서로 분리되지 않고,

상기 상부 전극은 상기 마그논 결정 나노선을 가로지르는 복수의 상부 전극 패턴을 포함하고,

상기 상부 전극 패턴은 상기 제2 영역과 정렬되어 국부적으로 전기장을 인가하여 상기 제2 영역의 DMI 상수(D_2)를 변경하는 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 13

제 11항에 있어서,

상기 상부 전극과 상기 마그논 결정 나노선 사이에 배치된 상부 층간 절연막; 및

상기 하부 전극과 상기 마그논 결정 나노선 사이에 배치된 하부 층간 절연막을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 14

제 13항에 있어서,

상기 상부 층간 절연막의 두께는 상기 제1 영역 및 제2 영역 상에서 서로 다른 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 15

제 11항에 있어서,

상기 제1 영역의 두께는 상기 제2 영역의 두께와 서로 다른 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 16

제 11항에 있어서,

상기 제1 영역의 길이 방향의 폭과 상기 제2 영역의 길이 방향의 폭이 서로 다른 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

청구항 17

제 11항에 있어서,

상기 마그논 결정 나노선에 외부 자기장을 인가하는 적어도 하나의 도선을 더 포함하고,

상기 도선은 상기 외부 자기장을 막면에 평행한 방향으로 제공하고,

상기 마그논 결정 나노선의 자화 방향은 상기 외부 자기장에 의하여 변화하고,

상기 마그논 결정 나노선에 인가되는 외부자기장의 방향과 전파되는 스핀파의 상대적인 방향에 따라 동일 주파수 영역에서 형성되는 스핀파의 금지대역이 변화하는 것을 특징으로 하는 스핀파 소자.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 스핀파의 전송 제어를 통해 정보를 처리하는 마그논 결정 도파관을 구비한 스핀파 소자에 관한 것으로서, 더욱 상세하게 공간적으로 비균질한 반대칭 교환 상호작용(anti-symmetric exchange interaction = Dzyaloshinskii-Moriya interaction; 이후 DMI) 상수를 갖는 마그논 결정의 자화방향을 변경하거나 혹은 DMI 상수를 위치에 따라 조절하고, 이를 통해 마그논의 에너지 특성을 변조하여 스핀파의 전송특성을 제어하는 마그논 결정 도파관을 구비한 스핀파 소자에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 현재 상보형 금속-산화물 반도체(Complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 기술의 한계를 넘어서기 위해 CMOS 와 같이 전자의 전송을 이용한 소자 대신 스핀파(마그논)와 같은 준입자(quasi-particle)의 파동성을 이용하여 파동의 위상 및 밀도를 정보처리의 매개체로 사용하려는 연구가 진행되고 있다.

[0003] 그 중 스핀파는 자화의 집합적인 움직임을 일컫는 말로, 스핀파 소자의 경우 기존 전자의 이동으로 구동되는 CMOS 트랜지스터와 달리 전자의 이동이 필요하지 않으므로 줄열(Joule Heating)로 인해 손실되는 에너지가 없어 저전력 논리 소자 제작이 가능하다는 장점이 있다.

[0004] 스핀파를 이용한 논리 소자의 또 다른 장점은 빠른 구동속도이다. 파동을 이용한 논리 소자의 경우, 그 파동의 진동수가 논리 소자의 클럭 속도를 결정한다. 마그논(magnon)은 강자성체에서 수 GHz의 진동수 영역을 가지며, 반강자성체에서 THz대의 진동수 영역을 가질 수 있다. 더욱이 이러한 파동을 이용한 스핀파 소자의 최소크기는 파동의 파장(λ)에 따라 결정된다. 강자성체에서 짧은 파장을 갖는 스핀파의 경우, 진동수(ω)와 파수($k=2\pi/\lambda$)의 관계가 이차함수($\omega \propto k^2$)로 주어지므로, 연산속도가 증가되는 고진동수 영역으로 갈수록 오히려 더 짧은 파장을 갖게 되어 소자의 소형화에도 장점이 있다.

[0005] 한편, 메타물질은 주기적인 원자의 배열로 구성된 물질과 달리 인위적으로 서로 다른 특성을 갖는 재료를 주기적으로 배열하여 제작된 물질로 기존에 알려져 있는 물질이 가질 수 없는 특성이 발현될 수 있다. 그 중 마그논 결정은 서로 다른 자기적 특성을 갖는 물질을 주기적으로 배열하여 순수 자성체가 가질 수 없는 자기특성을 갖는 메타물질의 한 종류이다.

[0006] 마그논 결정 내에서 스핀파의 금지대역 (특정 진동수를 갖는 스핀파는 마그논 결정을 통과할 수 없음; 전자구조 상 에너지 갭에 해당)이 형성될 수 있음이 알려져 있다. 종래의 마그논 결정은 기본적으로 포화자화값 및 교환 결합상수가 다른 두 물질을 주기적으로 배열하거나, 스핀파가 전파되는 도파로의 폭을 기하학적으로 변조시킨 형태이다. 여기에서 마그논 결정을 통해 전파되는 스핀파에는 두 자성물질 간 혹은 기하학적 변조구간 간의 계면에 주기적인 경계조건이 주어진다. 이에따라, 고체결정 내에서 주기적으로 배열되어있는 원자로부터 전자의 금지대역이 형성되는 것과 같이 스핀파의 금지대역이 형성된다.

[0007] 이러한 스핀파의 금지대역을 이용하여 CMOS 트랜지스터를 대체하기 위해서는, 외부 게이팅을 통해 금지대역 변조가 가능하여야 한다. CMOS 트랜지스터의 경우, 게이트 전압을 인가하여 소스-드레인 사이의 전자 이동을 제어하는 방식을 통해 높은 ON/OFF ratio를 얻는다. 그러나 종래의 마그논 결정에서와 같이 서로 다른 포화자화값을 가지는 자성물질을 주기적으로 배열하거나, 스핀파가 전파되는 도파로의 폭을 기하학적으로 변조시켜 제작하는 방식으로 마그논 결정이 제작되면 이에 따라 스핀파의 에너지 밴드가 고정되어 스핀파의 금지대역을 변조시킬 수 없다는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명의 해결하고자 하는 과제는 서로 다른 DMI 상수를 가지는 물질을 주기적으로 반복 배열한 마그논 결정을 이용하여 자화방향 혹은 DMI의 변화에 따른 스핀파 금지대역을 용이하게 변조할 수 있는 스핀파 소자를 제공하는 것이다.

[0009] 본 발명의 해결하고자 하는 과제는 전기장을 일정한 간격으로 주기적으로 마그논 결정에 전기장을 국부적으로 인가하여 스핀파 금지대역을 변조시킬 수 있는 스핀파 소자를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 일 실시예에 따른 스핀파 소자는, 기판 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선; 상기 마그논 결정 나노선의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나; 및 상기 마그논 결정 나노선의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함하는 나노선이며, 상기 마그논 결정 나노선은 복수의 단위 영역을 포함하고, 상기 단위 영역은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역과 제2 영역을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{eff} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하고, K_{eff} , K , M_s 는 각각 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 막면에 수직한 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 그리고 포화자화값을 의미한다.

[0011] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 마그논 결정 나노선은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴; 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴; 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 상부 금속 패턴; 및 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 상부 절연 패턴을 포함한다. 상기 상부 금속 패턴과 상기 상부 절연 패턴은 교번하여 배치되고, 상기 상부 금속 패턴은 상기 제1 영역에 대응되고, 상기 상부 절연 패턴은 상기 제2 영역에 대응될 수 있다.

[0012] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하부 금속 패턴은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 중간 자성 패턴은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 상부 절연 패턴은 AlO_x , MgO , 및 GdO_x 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 상부 금속 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질일 수 있다.

[0013] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 마그논 결정 나노선은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴; 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴; 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제1 상부 금속 패턴; 및 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제2 상부 금속 패턴을 포함할 수 있다. 상기 상부 금속 패턴과 상기 제2 상부 금속 패턴은 교번하여 배치되고, 상기 제1 상부 금속 패턴은 상기 제1 영역에 대응되고, 상기 제2 상부 금속 패턴은 상기 제2 영역에 대응될 수 있다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하부 금속 패턴은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 중간 자

성 패턴은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 제1 상부 금속 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질이고, 상기 제2 상부 금속 패턴은 Ni 또는 Ir일 수 있다.

[0015] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 마그논 결정 나노선은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴; 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴; 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 배치된 상부 금속 패턴; 및 상기 중간 자성 패턴과 상기 상부 금속 패턴 사이에 개재되고 주기적으로 배치된 보조 금속 패턴을 포함할 수 있다. 상기 보조 금속 패턴이 없는 영역은 상기 제1 영역에 대응되고, 상기 보조 금속 패턴이 있는 영역은 상기 제2 영역에 대응될 수 있다.

[0016] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하부 금속 패턴은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 중간 자성 패턴은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 상부 금속 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질이고, 상기 보조 금속 패턴은 Ni 또는 Ir일 수 있다.

[0017] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 마그논 결정 나노선은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴; 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제1 중간 자성 패턴; 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제2 중간 자성 패턴; 및 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 제1 및 제2 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 배치된 상부 금속 패턴;을 포함할 수 있다. 상기 제1 중간 자성 패턴과 상기 제2 중간 자성 패턴은 교번하여 배치되고, 상기 제1 중간 자성 패턴은 상기 제1 영역에 대응되고, 상기 제2 중간 자성 패턴은 상기 제2 영역에 대응될 수 있다.

[0018] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하부 금속 패턴은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 제1 중간 자성 패턴은 Co이고, 상기 제2 중간 자성 패턴은 CoFeB이고, 상기 상부 금속 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질일 수 있다.

[0019] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 중간 자성 패턴과 상기 제2 중간 자성 패턴은 동일한 재질이고, 상기 제1 중간 자성 패턴은 두께는 상기 제2 중간 자성 패턴의 두께보다 클 수 있다.

[0020] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 마그논 결정 나노선의 하부에 배치된 하부 전극; 및 상기 마그논 결정 나노선의 상부에 배치된 상부 전극을 더 포함할 수 있다. 상기 마그논 결정 나노선에서 진행되는 스핀파의 금지대역은 상기 상부 전극과 상기 하부 전극에 인가되는 전압차에 따라 변경되고, 상기 제1 영역의 DMI 상수(D_1)과 상기 제2 영역의 DMI 상수(D_2)의 차이는 1 erg/cm^2 이상일 수 있다.

[0021] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하부 전극은 서로 분리되지 않고, 상기 상부 전극은 상기 마그논 결정 나노선을 가로지르는 복수의 상부 전극 패턴을 포함하고, 상기 상부 전극 패턴은 상기 제2 영역과 정렬되어 국부적으로 전기장을 인가하여 상기 제2 영역의 DMI 상수(D_2)를 변경할 수 있다.

[0022] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 상부 전극과 상기 마그논 결정 나노선 사이에 배치된 상부 층간 절연막; 및 상기 하부 전극과 상기 마그논 결정 나노선 사이에 배치된 하부 층간 절연막을 더 포함할 수 있다.

[0023] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 상부 층간 절연막의 두께는 상기 제1 영역 및 제2 영역 상에서 서로 다를 수 있다.

[0024] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 영역의 두께는 상기 제2 영역의 두께와 서로 다를 수 있다.

[0025] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 제1 영역의 길이 방향의 폭과 상기 제2 영역의 길이 방향의 폭이 서로 다를 수 있다.

[0026] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 마그논 결정 나노선에 외부 자기장을 인가하는 적어도 하나의 도선을 더 포함할 수 있다. 상기 도선은 상기 외부 자기장을 막면에 평행한 방향으로 제공하고, 상기 마그논 결정 나노선의 자화 방향은 상기 외부 자기장에 의하여 변화하고, 상기 마그논 결정 나노선에 인가되는 외부자기장의 방향과 전파되는 스핀파의 상대적인 방향에 따라 동일 주파수 영역에서 형성되는 스핀파의 금지대역이 변화할 수 있다.

발명의 효과

[0027] 기존에 제시된 마그논 결정의 경우 스핀파의 금지대역을 변조시키기 힘들다는 한계를 가지고 있다. 하지만 위에서 설명한 바와 같이 본 발명의 경우, 예를 들어, 외부자기장의 방향 변화 혹은 전기장 인가를 통해 스핀파의 금지대역을 변조시킬 수 있다. 또한 본 발명의 실시 예에 따르면 변조 가능한 스핀파의 금지대역이 수 GHz 대로 넓은 영역에 대한 변조가 가능하다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0028] 도 1a는 본 발명의 일 실시예에 따른 금지대역 변조를 수행하는 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.
 도 1b는 도 1a의 스핀파 소자의 마그논 결정 나노선을 설명하는 단면도이다.
 도 2는 서로 다른 DMI 상수를 갖는 제1 영역(122a)과 제2 영역(122b)이 주기적으로 배열된 마그논 결정에서 단위 영역의 길이(L)에 따른 스핀파 금지대역 변화를 나타낸다.
 도 3은 서로 다른 DMI 상수를 갖는 제1 영역과 제2 영역이 주기적으로 배열된 마그논 결정에서 단위길이 L이 48 nm일 때 제2 영역의 DMI ($= D_2$)의 변조에 따른 금지대역 변화를 나타낸다.
 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 개념도이다.
 도 5는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 개념도이다.
 도 6은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 도면이다.
 도 7은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 도면이다.
 도 8은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.
 도 9는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.
 도 10은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.
 도 11은 서로 다른 DMI 상수를 갖는 제1 영역과 제2 영역이 주기적으로 배열된 마그논 결정에서 단위 영역의 길이(L)가 48 nm일 때 스핀파의 진행 방향과 자화의 방향 사이의 각도(θ)에 따른 금지대역 변화를 나타낸다.
 도 12는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0029] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명을 보다 상세하게 설명한다. 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. 본 발명은 여기서 설명되어지는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다. 도면들에 있어서, 구성요소는 명확성을 기하기 위하여 과장되어진 것이다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호로 표시된 부분들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.

[0030] 도 1a는 본 발명의 일 실시예에 따른 금지대역 변조를 수행하는 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.

[0031] 도 1b는 도 1a의 스핀파 소자의 마그논 결정 나노선을 설명하는 단면도이다.

[0032] 도 1a 및 도 1b를 참조하면, 스핀파 소자(100)는 기판(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(120); 상기 마그논 결정 나노선(120)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(120)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(120)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(120)은 복수의 단위 영역(122)을 포함하고, 상기 단위 영역(122)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(122a)과 제2 영역(122b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{eff} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족한다. K_{eff} , K , M_s 는 각각 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 막면에 수직한 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 그리고 포화자화값을 의미한다.

[0033] 기판(110)은 반도체 기판일 수 있다. 입력 안테나(132)는 도선이고, 상기 마그논 결정 나노선(120)의 일단을 가로지르도록 배치될 수 있다. 상기 입력 안테나는 고주파 신호원(136)으로부터 신호를 제공받아 상기 마그논 결

정 나노선에 방사할 수 있다. 상기 입력 안테나(132)는 상기 마그논 결정 나노선(120)과 전기적으로 절연될 수 있다.

[0034] 출력 안테나(134)는 도선이고, 상기 마그논 결정 나노선의 타단을 가로지르도록 배치된다. 출력 안테나(134)는 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 스핀파를 검출하여 외부 검출 회로에 전달할 수 있다. 상기 출력 안테나는 상기 마그논 결정 나노선과 전기적으로 절연될 수 있다.

[0035] 상기 마그논 결정 나노선(120)은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴(123); 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴(123) 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴(124); 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되고 주기적으로 배치된 상부 금속 패턴(125); 및 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되고 주기적으로 배치된 상부 절연 패턴(126)을 포함한다. 상기 상부 금속 패턴(125)과 상기 상부 절연 패턴(126)은 동일 평면에서 교번하여 배치되고, 상기 상부 금속 패턴(123)은 상기 제1 영역(122a)에 대응되고, 상기 상부 절연 패턴(126)은 상기 제2 영역(122b)에 대응된다.

[0036] 상기 마그논 결정 나노선은 주기적으로 DMI 상수를 변경하도록 비대칭 구조를 가질 수 있다. D_1 는 상기 제1 영역의 DMI 상수이며, D_2 는 제2 영역의 DMI 상수이다. 상기 D_1 과 D_2 의 차이가 충분히 큰 값을 가질 수 있도록, 상기 마그논 결정 나노선은 국부적으로 상하 비대칭 구조를 가질 수 있다. 즉, 상기 마그논 결정 나노선은 상하 대칭 구조와 상하 비대칭 구조가 교번하는 구조를 포함할 수 있다. 이에 따라, 상하 대칭 구조에서, DMI 상수는 영을 나타낼 수 있다. 상하 비대칭 구조에서 DMI 상수는 큰 값을 가질 수 있다.

[0037] 상기 하부 금속 패턴(123)은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 하부 금속 패턴(123)은 상기 중간 자성 패턴(124)을 배치하기 위한 버퍼층으로 동작할 수 있다. 상기 중간 자성 패턴(124)은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함하는 강자성체 물질일 수 있다. 상기 상부 절연 패턴(126)은 AlO_x , MgO , 및 GdO_x 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 상부 금속 패턴(125)은 상기 하부 금속 패턴(123)과 동일한 물질일 수 있다.

[0038] 예를 들어, 상기 제1 영역(122a)은 Pt/Co/Pt 상하 대칭 구조이고, 상기 제2 영역은 Pt/Co/ AlO_x 상하 비대칭 구조일 수 있다. 상기 하부 금속 패턴(123)의 두께는 수 nm 수준일 수 있다. 상기 중간 자성 패턴(124)의 두께는 수 nm 수준일 수 있다. 상기 상부 절연 패턴(126) 및 상기 상부 금속 패턴(125)의 두께는 수 nm 수준일 수 있다.

[0039] 예를 들어, 상기 제1 영역(122a)은 Pt/Co/Al 구조이고, 상기 제2 영역은 Pt/Co/ AlO_x 구조일 수 있다.

[0040] 상기 제1 영역(122a)은 Pt/CoFeB/Pt 구조이고, 상기 제2 영역은 Pt/CoFeB/ AlO_x 구조일 수 있다.

[0041] 상기 단위 영역(120)의 길이(L)는 40 nm 내지 100 nm일 수 있다. 상기 단위 영역의 길이(L)는 40nm 내지 100 nm일 수 있다. 상기 단위 영역의 갯수는 수 개 내지 수백일 수 있다.

[0042] 상기 마그논 결정 나노선(120)은 x축 방향으로 연장되고, 상기 단위 영역(122)는 서로 인접하여 x축 방향으로 배열될 수 있다. 상기 마그논 결정 나노선(120)은 스핀파의 도파로로써 동작한다. 상기 단위 영역은 서로 다른 DMI 상수를 가지는 제1 영역(122a)/제2 영역(122b)의 구비하고, 상기 단위 영역은 x축 방향으로 반복적으로 배치된다. 마그논 결정은 스핀파의 주파수 등 파동인자를 제어하기 위해 자성 물질의 구조를 주기적으로 배열함으로써 스핀파의 분산 관계 변화 및 밴드갭을 제어한다. 상기 마그논 결정은 각 영역 또는 각 자성층의 DMI 상수에 따른 주기적인 포텐셜에 의하여 스핀파 금지대역을 형성한다. 이에 따라, 상기 스핀파의 주파수가 금지대역 내인 경우, 상기 스핀파는 상기 마그논 결정 나노선을 따라 진행하지 못한다.

[0043] DMI 란 재료의 반전 대칭성이 깨져있고 스핀-궤도 상호작용이 강한 강자성체에서 나타나는 현상이다. 대칭 교환 결합(symmetric exchange-interaction)은 일반적으로 인접 스핀 간의 방향이 평행한 상태로 유지한다. DMI는 인접 스핀 간의 방향이 수직인 상태로 유지하려는 성질을 가진다. 이러한 DMI가 있고, $K_{eff} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 조건을 만족하여 면에 평행한 자화방향을 가지는 강자성물질의 경우 면내 전파되는 스핀파는 다음 [수학식 1]과 같은 분산식을 가진다 [Moon et al. Physical Review B 88, 184404 (2013)]. K_{eff} , K, M_s 는 각각 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 막면에 수직인 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 그리고 포화자화값을 의미한다.

[0044] [수학식 1]

$$\omega = \gamma_g \sqrt{\left(H + \frac{2A}{M_s} k^2 \right) \left(H + \frac{2A}{M_s} k^2 + H_d \right) + \frac{2\gamma_g D}{M_s} k \sin \theta}$$

[0045]

[0046] [수학식 1]에서 ω 는 스핀파의 진동수, γ_g 는 자기회전상수, H 는 외부자기장의 세기, A 는 교환 상호작용 상수, H_d 는 두께 방향 탈자화 필드 (demagnetization field)의 세기, M_s 는 포화자화 값, k 는 스핀파 파동 벡터의 크기, D 는 DMI 상수, θ 는 스핀파의 진행방향과 자화방향이 이루는 각도이다.

[0047] [수학식 1] 우변의 두번째 항을 보면, DMI가 스핀파 전파에 미치는 영향은 스핀파 전파의 방향과 도파로로 사용되는 자성층의 자화 방향에 따라 달라진다. DMI가 스핀파의 분산식에 주는 영향은 자화의 방향과 스핀파의 전파방향이 서로 수직일 때 ($\theta = \pm 90^\circ$) 가장 크다. 동일 선상에 있을 때 ($\theta = 0$ 혹은 180°), DMI의 효과가 사라진다. 따라서 DMI 상수가 주기적으로 달라지는 마그논 결정에서, 스핀파가 가지게 되는 제1 자성층(122a)과 제2 자성층(122b)에서의 에너지 차이는 자화의 방향과 스핀파의 전파방향이 90° 일 때 가장 크고, 0° 일 때 사라진다. 스핀파의 금지대역은 이러한 두 영역에서의 마그논 에너지 차이에 의해 결정된다. 마그논 결정의 강자성체의 자화 방향은, 예를 들어 외부자기장의 방향에 따라 쉽게 정렬될 수 있다. 따라서, 이 구조에서 형성되는 스핀파의 금지대역은 외부자기장 등 다양한 방법으로 변조시킬 수 있다.

[0048] 또한 [수학식 1] 우변의 두번째 항에 기초하여, 제1 자성층(122a)과 제2 자성층(122b)에서의 DMI 상수의 값을 변조하는 것을 통해 스핀파의 금지대역의 변조가 가능하다. 이러한 DMI 상수의 변조는 마그논 결정의 수직방향으로 전압을 인가하여 변조할 수 있다.

[0049] 본 발명의 일 실시예에 따른 스핀파 소자의 스핀파의 금지대역 변조를 스핀파의 에너지에 기반한 크로니-페니 모델(Kronig-Penney model))을 통해서 확인하였다.

[0050] 도 1a 및 도 1b를 참조하면, 서로 다른 DMI 상수를 가지는 제1 영역(122a)/ 제2 영역(122b)을 결정의 단위체로 하는 마그논 결정의 DMI 상수는 다음과 같이 주어진다.

[0051] [수학식 2]

$$D(x) = \begin{cases} D_1, & 2na < x \leq (2n+1)a \\ D_2, & (2n+1)a < x \leq (2n+2)a \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

[0052]

[0053] 여기서, D_1 는 제1 영역(122a)의 DMI 상수이며, D_2 는 제2 영역(122b)의 DMI 상수이며, a 는 제1 영역(122a) 또는 제2 영역(122b)의 x방향 길이이고, 마그논 결정의 단위 영역의 길이(L)은 $2a$ 이다. 여기서, 각 제1 영역(122a)의 길이와 제2 영역(122b)의 길이는 서로 다른 값을 가질 수 있다. 다만, 수식의 단순화를 위해 각 영역의 x 방향 길이는 a 로 통일하였다.

[0054] 마그논 결정으로 전파되는 스핀파는 주기적인 에너지 차이를 느끼게 되므로, 이 파동은 블로흐 정리(Bloch's theorem)를 만족한다. 블로흐 정리를 이용하여 얻은 스핀파의 분산식은 다음 [수학식 3]으로 주어진다.

[0055] [수학식 3]

$$\cos \left[\frac{1}{4} a (4k' - \beta + \gamma) \right] = \frac{(G - \alpha + \beta)(G + \alpha - \gamma) \cos \left[\frac{1}{4} a (2\alpha - \beta - \gamma) \right] + (G + \alpha + \beta)(-G + \alpha + \gamma) \cos \left[\frac{1}{4} a (2\alpha + \beta + \gamma) \right]}{2\alpha(\beta + \gamma)}$$

[0056]

[0057] 여기서, k' 은 블로흐 파수, α 는 $D(x)=D_1$ 인 영역에서 [수학식 1]로부터 주어지는 스핀파의 파수, β 는 $D(x)=D_2$ 인 영역에서 $+x$ 방향으로 진행하는 스핀파의 파수, γ 는 $D(x)=D_2$ 인 영역에서 $-x$ 방향으로 진행하는 스핀파의 파수, G 는 $(D_2 - D_1/2A)m_y$, A 는 대칭 교환상수, m_y 는 정상화된 자화의 y 성분이다. 여기서, D_1 이 임의의 상수값을 가질 수 있다. 다만, 수식의 단순화를 위해 D_1 값은 0으로 가정하였다.

- [0058] [수학식 3]의 좌변의 경우, 그 값의 크기는 -1 에서부터 1까지로 제한된다. 따라서, 우변의 크기가 -1보다 작거나 1보다 크게 되는 경우 [수학식 3]을 만족하지 않으며, 마그논 결정을 통해 전파되는 주기적인 파동함수가 존재할 수 없다.
- [0059] 따라서 제1 영역(122a)의 길이(a)가 짧아질수록, 블로흐 파수 k' 에 대한 주기가 짧아지고, 더 넓은 영역의 스핀파 금지대역을 형성한다. 자화의 방향과 스핀파의 전파방향 사이의 각도(θ)가 바뀌게 되면, 중간 자성 패턴(124)에서의 스핀파의 파수 α, β, γ 가 바뀐다. 그 결과 [수학식 3]에 의거하여 스핀파 금지대역의 변조가 가능하다.
- [0060] 이하, 크로니-페니 모델에 기반한 시뮬레이션 결과를 개시한다.
- [0061] 도 2는 서로 다른 DMI 상수를 갖는 제1 영역(122a)과 제2 영역(122b)이 주기적으로 배열된 마그논 결정에서 단위 영역의 길이(L)에 따른 스핀파 금지대역 변화를 나타낸다.
- [0062] 도 2를 참조하면, [수학식 3]으로부터 마그논 결정에 대해 주입되는 스핀파의 진동수에 따라 형성되는 스핀파의 금지대역이 단위 영역(122)의 길이(L)에 따라 변화하는 것을 보여준다. 여기에서 스핀파의 금지대역은 도면에서 검은 영역으로 표시된다.
- [0063] 사용된 물성 값은 다음과 같다.
- [0064] -외부자기장의 크기 = 5000 Oe
- [0065] -마그논 결정의 단위 영역의 제1 영역: DMI 상수 (D_1) = 0 erg/cm², 포화자화값(M_s) = 800 emu/cm³, 자기 각운동량비 (γ_g) = 1.76×10^7 Oe⁻¹s⁻¹, 교환결합 상수 (A) = 1.3×10^{-6} erg/cm, H_d = 0
- [0066] -마그논 결정의 단위 영역의 제2 영역: DMI 상수 (D_2) = 2 erg/cm², 포화자화값(M_s) = 800 emu/cm³, 자기 각운동량비 (γ_g) = 1.76×10^7 Oe⁻¹s⁻¹, 교환결합 상수 (A) = 1.3×10^{-6} erg/cm, H_d = 0
- [0067] -스핀파의 주파수 영역 0~50 GHz
- [0069] 도 3은 서로 다른 DMI 상수를 갖는 제1 영역과 제2 영역이 주기적으로 배열된 마그논 결정에서 단위길이 L이 48 nm일 때 제2 영역의 DMI (= D_2)의 변조에 따른 금지대역 변화를 나타낸다.
- [0070] 도 3을 참조하면, 분산식으로부터 마그논 결정에 대해 주입되는 스핀파의 진동수에 따라 형성되는 스핀파의 금지대역이 제2 영역의 DMI 상수(D_2)의 변조에 따라 변화함을 보여준다. 스핀파의 금지대역은 흑색 영역으로 표시된다. 예를 들어, 제2 영역에 국부적으로 전기장을 인가하면, 제2 영역의 DMI 상수(D_2)는 변경될 수 있고, 이 경우 스핀파의 금지대역이 조절될 수 있다. 제2 영역의 DMI 상수(D_2)가 2 이상인 경우, 스핀파의 금지대역이 급격히 변한다.
- [0071] 소자의 물성 값은 도 2에서 사용한 값과 동일하다.
- [0072] 도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 개념도이다.
- [0073] 도 4를 참조하면, 스핀파 소자(200)는 기관(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(220); 상기 마그논 결정 나노선(220)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(220)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(220)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(220)은 복수의 단위 영역(222)을 포함하고, 상기 단위 영역(222)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(222a)과 제2 영역(222b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{eff} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하여 영역내의 스핀파의 분산식이 수학식 1을 만족한다.
- [0074] 상기 마그논 결정 나노선(220)은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴(223); 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴(224); 상기 중간

자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제1 상부 금속 패턴(225); 및 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제2 상부 금속 패턴(226)을 포함한다. 상기 상부 금속 패턴(225)과 상기 제2 상부 금속 패턴(226)은 교번하여 배치되고, 상기 제1 상부 금속 패턴(225)은 상기 제1 영역(222a)에 대응되고, 상기 제2 상부 금속 패턴(226)은 상기 제2 영역(222b)에 대응될 수 있다.

[0075] 상기 하부 금속 패턴(223)은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 중간 자성 패턴(224)은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 제1 상부 금속 패턴(225)은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질일 수 있다. 상기 제2 상부 금속 패턴(226)은 Ni 또는 Ir일 수 있다. 예를 들어, 제1 영역(222a)은 Pt/Co/Pt 구조이고, 제2 영역(222b)은 Pt/Co/Ni 구조일 수 있다.

[0076] 본 발명의 변형된 실시예에 따르면, 제1 영역은 Pt/Co/Al 구조이고, 제2 영역은 Pt/Co/Ni 구조일 수 있다. 상기 제1 영역의 DMI 상수(D_1)과 상기 제2 영역의 DMI 상수(D_2)의 차이는 1 erg/cm^2 이상일 수 있다.

[0077] 도 5는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 개념도이다.

[0078] 도 5를 참조하면, 스핀파 소자(300)는 기판(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(320); 상기 마그논 결정 나노선(320)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(320)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(320)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(320)은 복수의 단위 영역(322)을 포함하고, 상기 단위 영역(322)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(322a)과 제2 영역(322b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하여 영역내의 스핀파의 분산식이 수학식 1을 만족한다.

[0079] 상기 마그논 결정 나노선(320)은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴(323); 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 배치된 중간 자성 패턴(324); 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 배치된 상부 금속 패턴(325); 및 상기 중간 자성 패턴(324)과 상기 상부 금속 패턴(325) 사이에 개재되고 주기적으로 배치된 보조 금속 패턴(326)을 포함한다.

[0080] 상기 보조 금속 패턴(326)이 없는 영역은 상기 제1 영역(322a)에 대응되고, 상기 보조 금속 패턴이 있는 영역은 상기 제2 영역(322b)에 대응될 수 있다.

[0081] 상기 하부 금속 패턴(323)은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 중간 자성 패턴(324)은 퍼멀로이, Co, 및 CoFeB 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 상부 금속 패턴(325)은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질이고, 상기 보조 금속 패턴(326)은 Ni 또는 Ir일 수 있다. 예를 들어, 제1 영역(322a)은 Pt/Co/Pt 구조이고, 제2 영역(322b)은 Pt/Co/Ni/Pt 구조일 수 있다.

[0082] 도 6은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 도면이다.

[0083] 도 6을 참조하면, 스핀파 소자(400)는 기판(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(420); 상기 마그논 결정 나노선(420)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(420)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(420)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(420)은 복수의 단위 영역(422)을 포함하고, 상기 단위 영역(422)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(422a)과 제2 영역(422b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하여 영역내의 스핀파의 분산식이 수학식 1을 만족한다.

[0084] 상기 마그논 결정 나노선(420)은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴(423); 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제1 중간 자성 패턴(424); 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제2 중간 자성 패턴(425); 및 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 제1 및 제2 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 배치된 상부 금속 패턴(426);을 포함한다.

- [0085] 상기 제1 중간 자성 패턴(424)과 상기 제2 중간 자성 패턴(425)은 교번하여 배치되고, 상기 제1 중간 자성 패턴(424)은 상기 제1 영역(422a)에 대응되고, 상기 제2 중간 자성 패턴(425)은 상기 제2 영역(422b)에 대응된다.
- [0086] 상기 하부 금속 패턴(423)은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 제1 중간 자성 패턴(424)은 Co이고, 상기 제2 중간 자성 패턴(425)은 CoFeB이고, 상기 상부 금속 패턴(426)은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질일 수 있다. 제1 중간 자성 패턴(424)과 상기 제2 중간 자성 패턴(425)의 두께는 동일할 수 있다. 상기 제2 중간 자성 패턴(425)은 마스크를 사용한 선택적 이온 주입 공정을 통하여 형성될 수 있다. 예를 들어, 제1 영역(422a)은 Pt/Co/Pt 구조이고, 제2 영역(422b)은 Pt/CoFeB/Ni/Pt 구조일 수 있다.
- [0087] 도 7은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 도면이다.
- [0088] 도 7을 참조하면, 스핀파 소자(500)는 기판(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(520); 상기 마그논 결정 나노선(520)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(520)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(520)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(520)은 복수의 단위 영역(522)을 포함하고, 상기 단위 영역(522)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(522a)과 제2 영역(522b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하여 영역내의 스핀파의 분산식이 수학식 1을 만족한다.
- [0089] 상기 마그논 결정 나노선(520)은, 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되는 하부 금속 패턴(523); 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제1 중간 자성 패턴(524); 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 하부 금속 패턴 상에 정렬되어 주기적으로 배치된 제2 중간 자성 패턴(525); 및 상기 마그논 결정 나노선과 나란히 연장되고 상기 제1 및 제2 중간 자성 패턴 상에 정렬되어 배치된 상부 절연 패턴(526);을 포함한다.
- [0090] 상기 제1 중간 자성 패턴(524)과 상기 제2 중간 자성 패턴(525)은 교번하여 배치되고, 상기 제1 중간 자성 패턴(524)은 상기 제1 영역(522a)에 대응되고, 상기 제2 중간 자성 패턴(525)은 상기 제2 영역(522b)에 대응된다.
- [0091] 상기 하부 금속 패턴(523)은 Pt 및 Ta 중에서 적어도 하나를 포함하고, 상기 제1 중간 자성 패턴(524) 및 상기 제2 중간 자성 패턴(525)은 Co 또는 CoFeB이고, 상기 상부 절연 패턴(526)은 AlOx , MgO , 또는 GdOx 일 수 있다. 상기 제1 중간 자성 패턴(524)은 두께는 상기 제2 중간 자성 패턴(525)의 두께보다 클 수 있다. 상기 제2 중간 자성 패턴(525)은 마스크를 사용한 선택적 일부 식각 공정을 통하여 형성될 수 있다. 예를 들어, 제1 영역(422a)은 Pt/Co[2nm]/ AlOx 구조이고, 제2 영역(422b)은 Pt/Co[1nm]/ AlOx 구조일 수 있다.
- [0092] 본 발명의 변형된 실시예에 따르면, 상기 상부 절연 패턴은 상기 하부 금속 패턴과 동일한 물질로 변환될 수 있다.
- [0093] 도 8은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.
- [0094] 도 8을 참조하면, 스핀파 소자(600)는 기판(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(620); 상기 마그논 결정 나노선(620)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(620)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(620)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(620)은 복수의 단위 영역(622)을 포함하고, 상기 단위 영역(622)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(622a)과 제2 영역(622b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하여 영역내의 스핀파의 분산식이 수학식 1을 만족한다.
- [0095] 하부 전극(142)은 상기 마그논 결정 나노선(620)의 하부에 배치될 수 있다. 상기 하부 전극(142)은 접지될 수 있다. 상기 하부 전극(142)은 상기 마그논 결정 나노선을 따라 상기 기판 상에 연장될 수 있다.
- [0096] 상부 전극(144)은 상기 마그논 결정 나노선(620)의 상부에 배치될 수 있다. 상기 상부 전극(144)은 상기 마그논 결정 나노선을 따라 배열될 수 있다. 상기 마그논 결정 나노선에서 진행하는 스핀파의 금지 대역은 상기 상부 전극과 상기 하부 전극에 인가되는 전압차(V_G)에 따라 변경될 수 있다. 상기 제1 영역(622a)의 DMI 상수(D_1)과

상기 제2 영역(622b)의 DMI 상수(D_2)의 차이는 1 erg/cm^2 이상일 수 있다. 상기 상부 전극(144)은 상기 마그논 결정 나노선을 가로지르는 복수의 상부 전극 패턴(144a)을 포함할 수 있다. 상기 상부 전극 패턴(144a)은 상기 제2 영역(622b)과 정렬되어 국부적으로 전기장을 인가하여 상기 제2 영역의 DMI 상수(D_2)를 변경할 수 있다. 이에 따라, 스핀파의 금지 대역이 변경될 수 있다. 상기 입력 안테나(132), 상기 출력 안테나(134), 및 상기 상부 전극(144)은 동일한 평면에 배치될 수 있다. 예를 들어, 상기 제1 영역(622a)은 Pt/Co/Pt 구조이고, 상기 제2 영역(622b)은 Pt/Co/AlOx 구조이고, 상기 제2 영역(622a)의 DMI 상수(D_2)은 위치에 따라 주기적으로 인가되는 전기장의 세기에 따라 추가적으로 변경될 수 있다.

[0097] 하부 층간 절연막(152)은 상기 하부 전극(142)과 상기 마그논 결정 나노선(620) 사이에 배치될 수 있다. 상기 하부 층간 절연막(152)은 실리콘 산화막 또는 실리콘 질화막일 수 있다. 상기 하부 층간 절연막의 상부면은 평탄화될 수 있다.

[0098] 상부 층간 절연막(154)은 상기 상부 전극(144)과 상기 마그논 결정 나노선(620) 사이에 배치될 수 있다. 상기 상부 층간 절연막(154)은 실리콘 산화막 또는 실리콘 질화막일 수 있다. 상기 상부 층간 절연막의 상부면은 평탄화될 수 있다.

[0099] 상기 마그논 결정 나노선(620)은 도 1 내지 도 7에서 설명한 구조일 수 있다.

[0100] 본 발명의 변형된 실시예에 따르면, 상기 제1 영역(622a)은 Pt/Co/AlOx 구조이고, 상기 제2 영역(622b)은 상기 제1 영역(622a)과 동일한 Pt/Co/AlOx 구조이고, 상기 제2 영역(622a)의 DMI 상수(D_2)은 위치에 따라 주기적으로 인가되는 전기장의 세기에 따라 위치에 따라 주기적으로 변경될 수 있다.

[0101] 도 9는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.

[0102] 도 9를 참조하면, 스핀파 소자(700)는 기판(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(720); 상기 마그논 결정 나노선(720)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(720)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(720)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(720)은 복수의 단위 영역(722)을 포함하고, 상기 단위 영역(722)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(722a)과 제2 영역(722b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하여 영역내의 스핀파의 분산식이 수학적식 1을 만족한다.

[0103] 상기 제1 영역(722a)의 두께는 상기 제2 영역(722b)의 두께와 서로 다를 수 있다. 예를 들어, 제1 영역(722a)은 Pt/Co[2nm]/AlOx 구조이고, 제2 영역(722b)은 Pt/Co[1nm]/AlOx 구조일 수 있다.

[0104] 상부 층간 절연막(154a)은 상기 상부 전극(144)과 상기 마그논 결정 나노선(620) 사이에 배치될 수 있다. 상기 상부 층간 절연막(154a)은 실리콘 산화막 또는 실리콘 질화막일 수 있다. 상기 상부 층간 절연막의 상부면은 평탄화될 수 있다. 상기 상부 층간 절연막(154a)의 두께는 상기 제1 영역 및 제2 영역 상에서 서로 다를 수 있다.

[0105] 도 10은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.

[0106] 도 10을 참조하면, 스핀파 소자(800)는 기판(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(120); 상기 마그논 결정 나노선(120)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(120)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(120)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(120)은 복수의 단위 영역(122)을 포함하고, 상기 단위 영역(122)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(122a)과 제2 영역(122b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하여 영역내의 스핀파의 분산식이 수학적식 1을 만족한다.

[0107] 상기 마그논 결정 나노선(120)은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하고, K_{eff} , K , M_s 는 각각 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 막면에 수직한 유효 자기 이방성 에너지 밀도, 그리고 포화자화값을 의미한다.

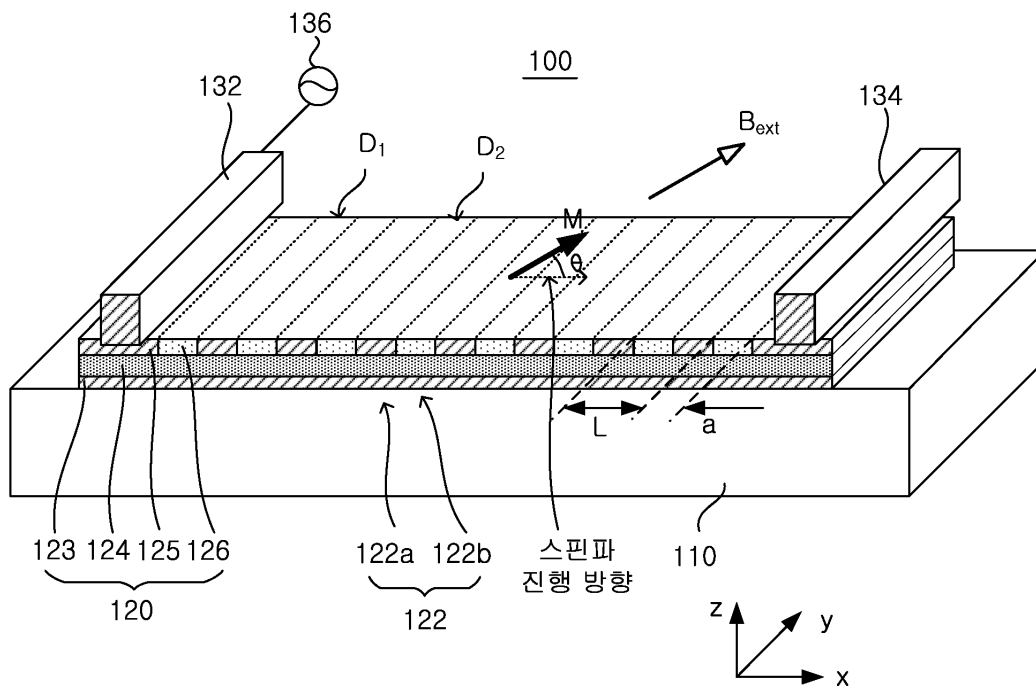
- [0108] 적어도 하나의 도선(160)은 상기 마그논 결정 나노선에 외부 자기장을 인가할 수 있다. 상기 도선(160)은 상기 마그논 결정 나노선을 따라 연장될 수 있다. 상기 도선(160)은 상기 외부 자기장을 막면에 평행한 방향으로 제공할 수 있다. 상기 마그논 결정 나노선의 자화 방향은 상기 외부 자기장에 의하여 변화할 수 있다. 상기 마그논 결정 나노선에 인가되는 외부자기장의 방향과 전파되는 스핀파의 상대적인 방향에 따라 동일 주파수 영역에서 형성되는 스핀파의 금지대역이 변화할 수 있다.
- [0109] 도 11은 서로 다른 DMI 상수를 갖는 제1 영역과 제2 영역이 주기적으로 배열된 마그논 결정에서 단위 영역의 길이(L)가 48 nm일 때 스핀파의 진행 방향과 자화의 방향 사이의 각도(θ)에 따른 금지대역 변화를 나타낸다.
- [0110] 도 10 및 도 11을 참조하면, 분산식으로부터 마그논 결정에 대해 주입되는 스핀파의 진동수에 따라 형성되는 스핀파의 금지대역이 자화의 방향과 스핀파의 전파방향의 사이각(θ)에 따라 변화함을 보여준다. 스핀파의 금지대역은 흑색 영역으로 표시된다. 예를 들어, 외부 자기장을 이용하여 자화방향을 바꾸는 것으로 인해 스핀파의 금지대역을 조절하는 것이 가능하다.
- [0111] 도 12는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 스핀파 소자를 나타내는 절단 사시도이다.
- [0112] 도 12를 참조하면, 스핀파 소자(900)는 기판(110) 상에서 연장되는 마그논 결정 나노선(120); 상기 마그논 결정 나노선(120)의 일단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선에 스핀파를 제공하는 입력 안테나(132); 및 상기 마그논 결정 나노선(120)의 타단을 가로지르도록 배치되고 상기 마그논 결정 나노선을 진행하는 상기 스핀파를 검출하는 출력 안테나(134)를 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(120)은 막면에 평행한 방향으로 자화되는 강자성 물질을 포함한다. 상기 마그논 결정 나노선(120)은 복수의 단위 영역(122)을 포함하고, 상기 단위 영역(122)은 서로 다른 비대칭 교환 결합 상수 (DMI 상수)를 가지는 제1 영역(122a)과 제2 영역(122b)을 포함한다. 상기 마그논 결정의 단위영역은 $K_{\text{eff}} = K - 2\pi M_s^2 < 0$ 를 만족하여 영역내의 스핀파의 분산식이 수학적 1을 만족한다. 제1 영역의 길이 방향(x축 방향)의 폭(a)과 상기 제2 영역의 길이 방향의 폭(b)의 서로 다를 수 있다.
- [0113] 상기 마그논 결정에서도 역시 제 1영역과 제2 영역의 스핀파의 파수를 자화방향 및 DMI 상수변조를 통해 변조가 가능하므로, 도 3 및 도 10에서 설명하고 있는 스핀파의 금지대역을 조절하는 것이 가능하다.
- [0114] 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

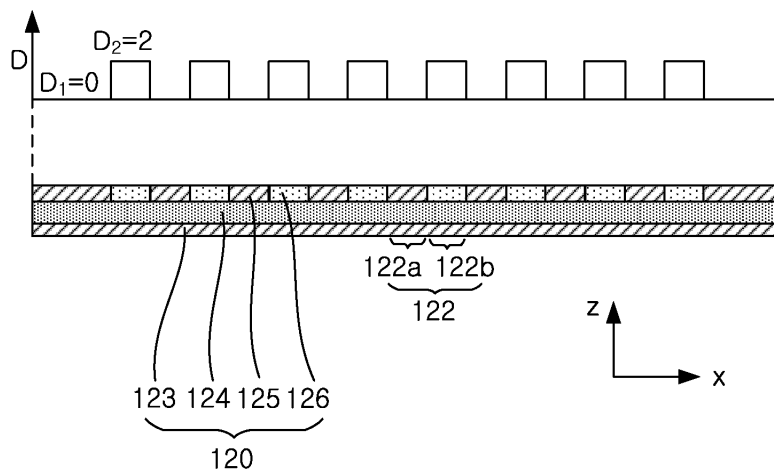
- [0115] 100: 스핀파 소자
110: 기판
120: 마그논 결정 나노선
122a: 제1 영역
122b: 제2 영역
132: 입력 안테나
134: 출력 안테나

도면

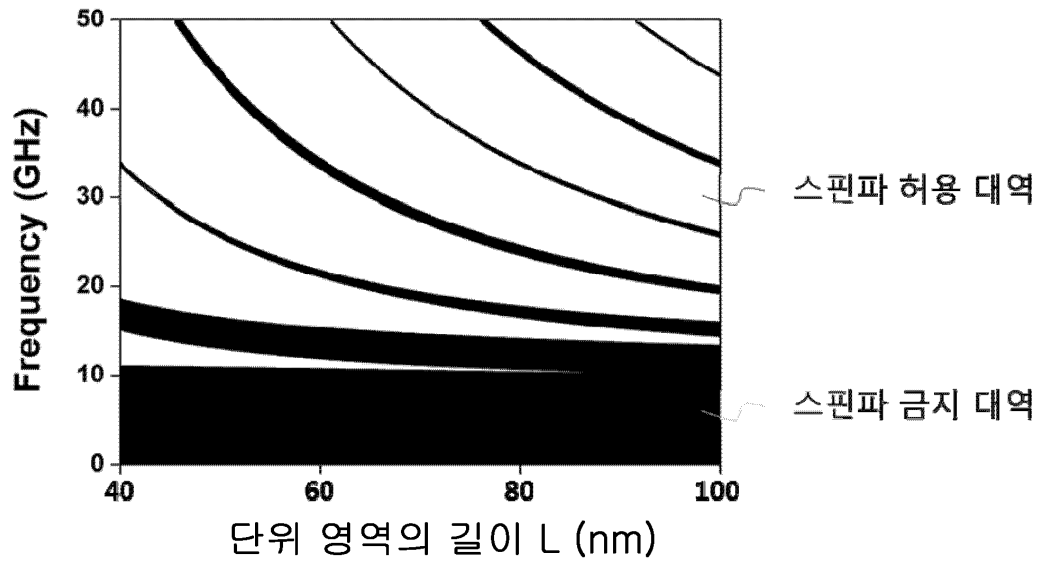
도면1a



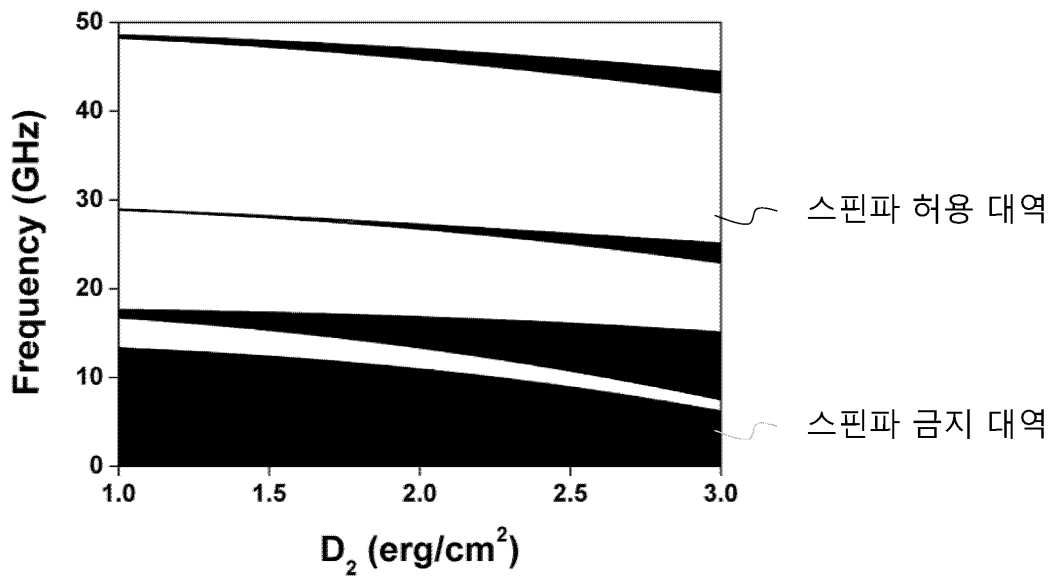
도면1b



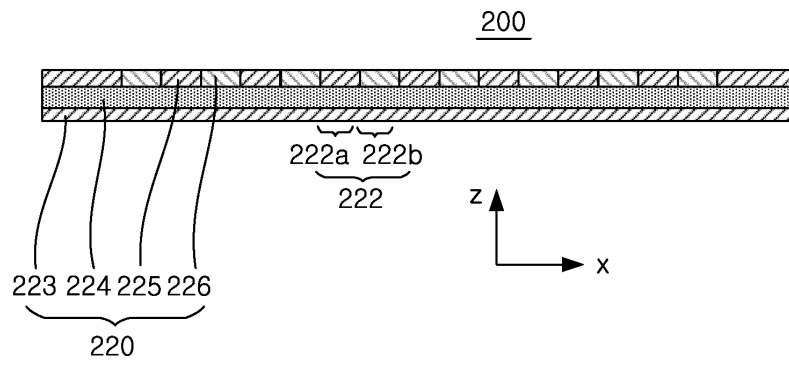
도면2



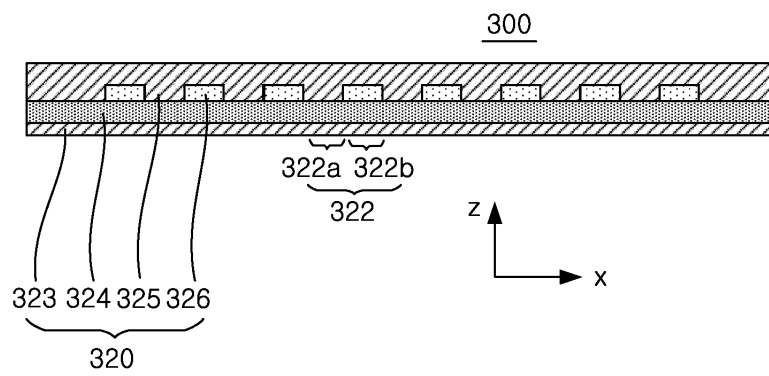
도면3



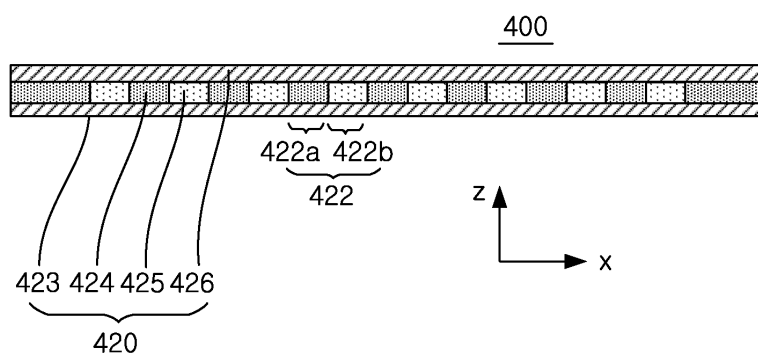
도면4



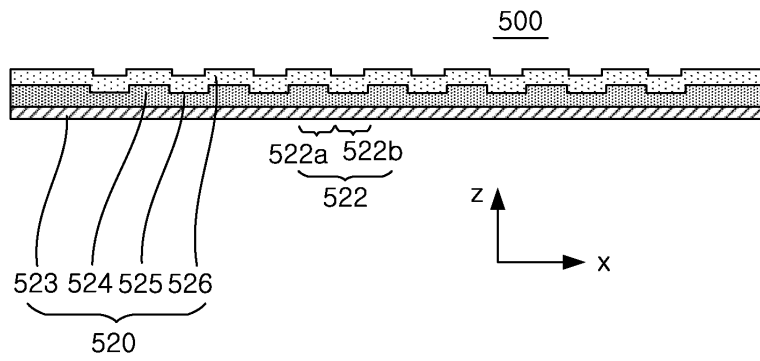
도면5



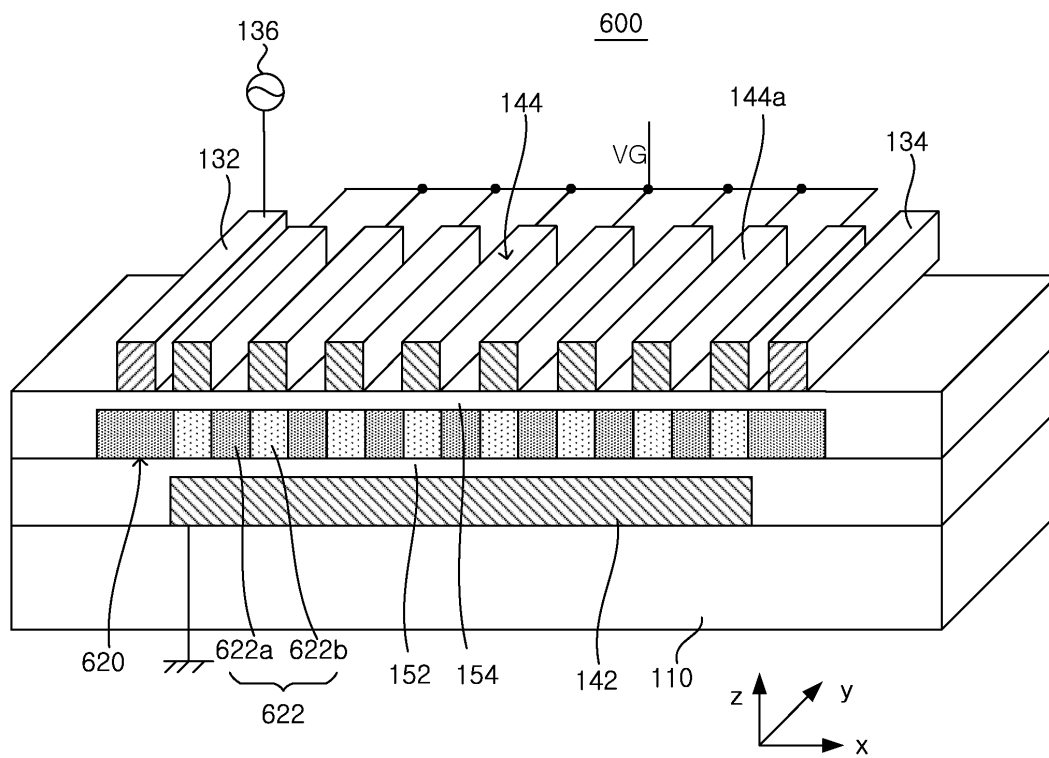
도면6



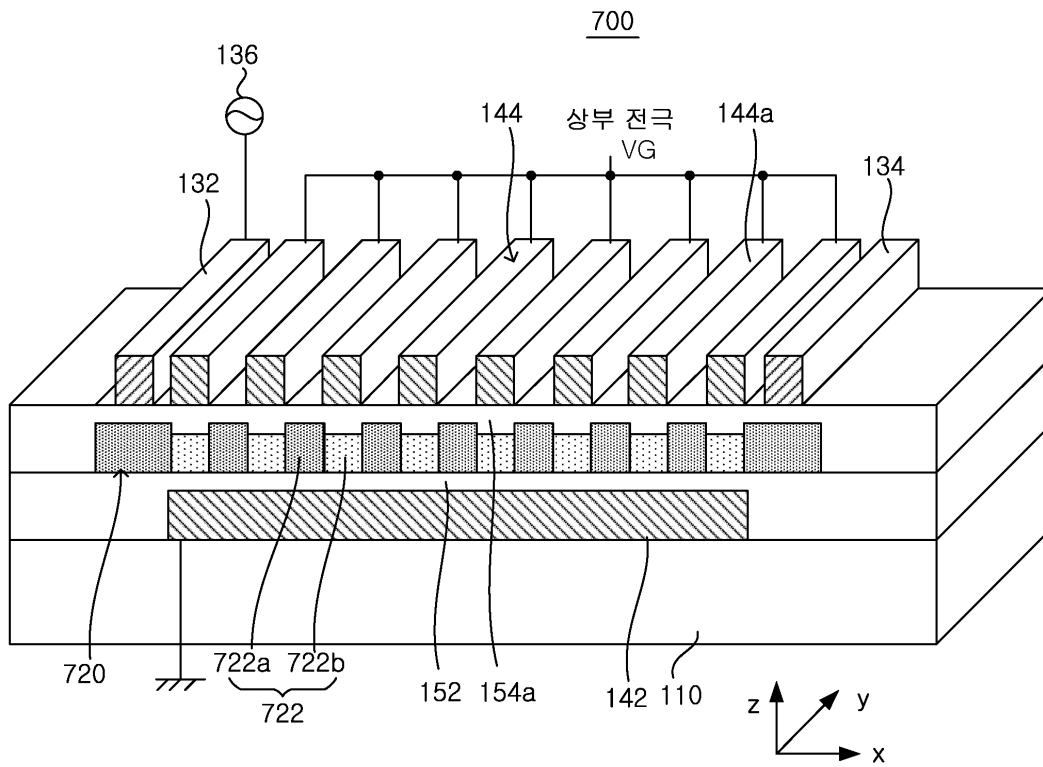
도면7



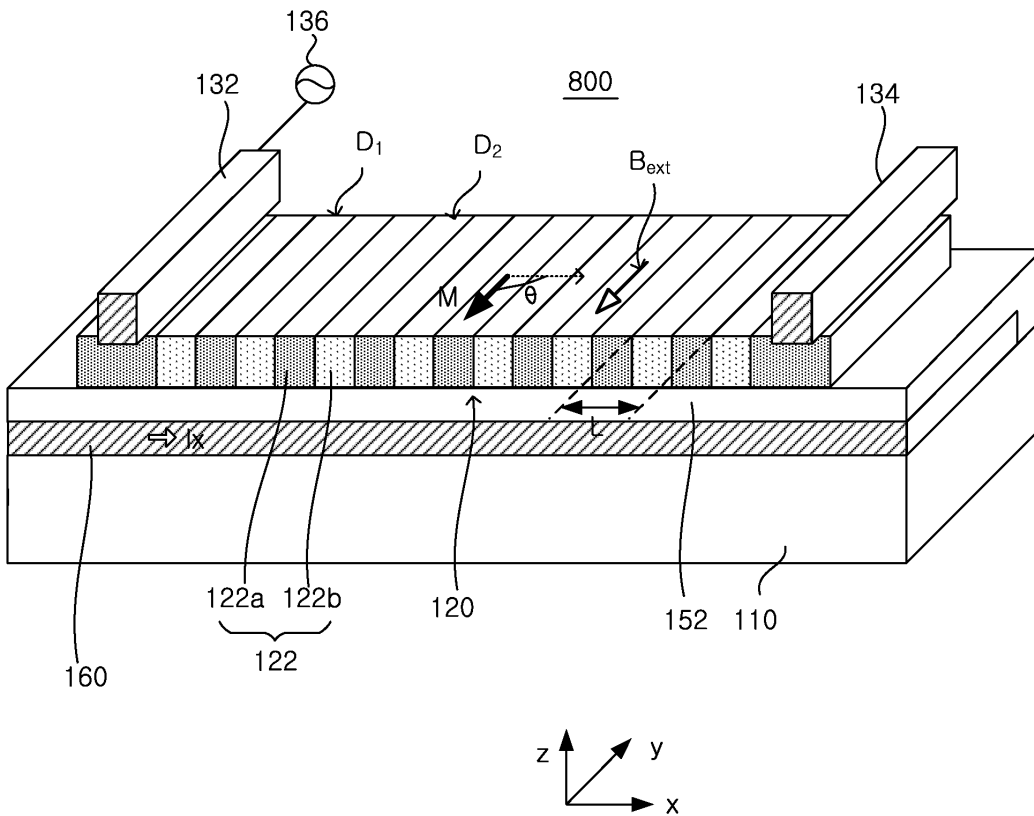
도면8



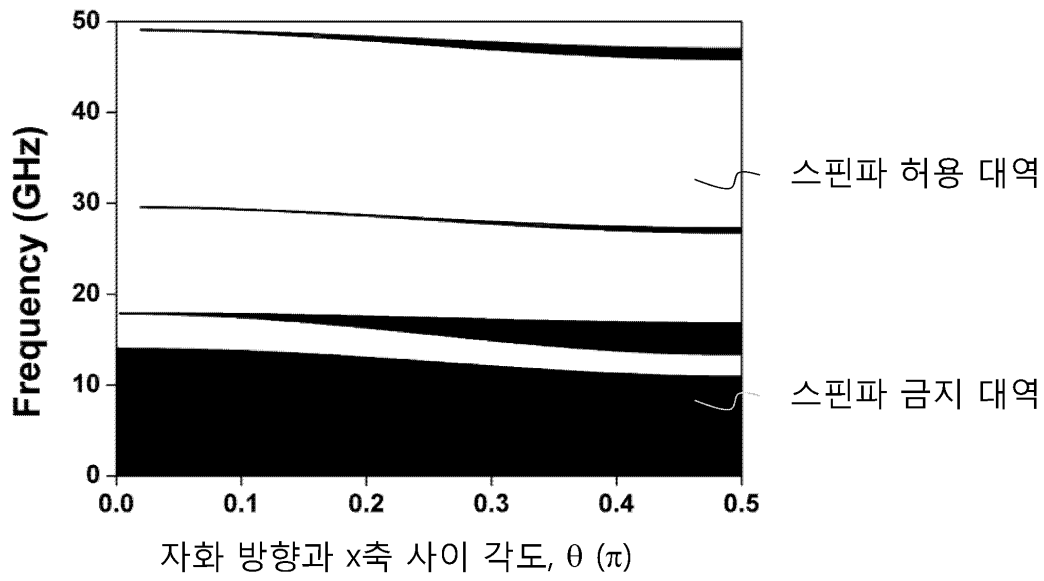
도면9



도면10



도면11



도면12

