(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0129655
(43) 공개일자 2023년09월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H10N 50/10 (2023.01) *H10N 50/01* (2023.01)
H10N 50/80 (2023.01) *H10N 50/85* (2023.01)
(52) CPC특허분류
H10N 50/10 (2023.02)
H10N 50/01 (2023.02)
(21) 출원번호 10-2022-0026527
(22) 출원일자 2022년03월02일
심사청구일자 2022년03월02일

(71) 출원인
울산대학교 산학협력단
울산광역시 남구 대학로 93(무거동)
(72) 발명자
김상훈
울산광역시 남구 옥현로 34, 312동 1301호(무거동, 옥현으뜸마을주공3단지아파트)
김지수
울산광역시 남구 옥현로 92-12, 204동 201호(무거동, 옥현주공2단지아파트)
(74) 대리인
남건필, 박종수, 차상윤

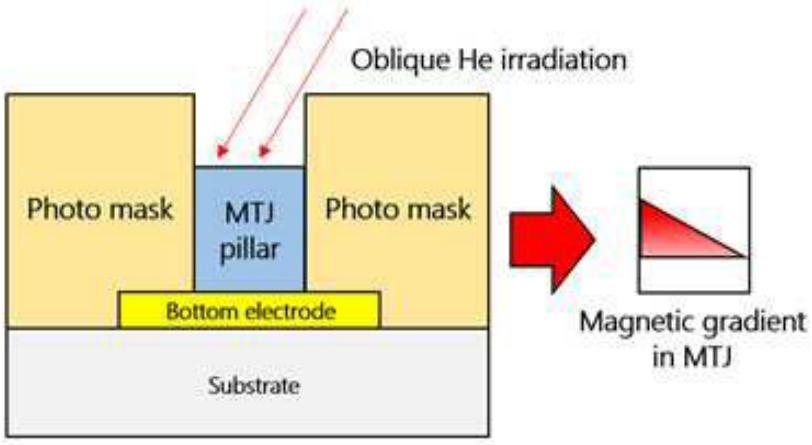
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 **이온조사법을 이용한 무자장 스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법 및 이에 의해 제조된 스핀 궤도 토크 스위칭 소자**

(57) 요 약

본 발명은 이온조사법을 이용한 무자장 스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조방법 및 이에 의해 제조된 스핀 궤도 토크 스위칭 소자를 개시한다. 상기 스핀 궤도 토크 스위칭 소자는 전류가 인가되는 전극층, 및 상기 전극층 상에 배치된 강자성 혹은 준강자성 자유층을 포함하고, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 표면에 형성되고 상기 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 배열되고 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역을 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도4b



(52) CPC특허분류
H10N 50/80 (2023.02)
H10N 50/85 (2023.02)

명 세 서

청구범위

청구항 1

전류가 인가되는 전극층; 및

상기 전극층 상에 배치된 강자성 혹은 준강자성 자유층;을 포함하고,

상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 표면에 형성되고 상기 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 배열되고 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역을 포함하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 복수의 패턴영역의 헬륨이온의 농도는 일측에서 타측으로 갈수록 점차적으로 증가하는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 패턴영역 각각의 헬륨이온 농도는 10 내지 50 ions/nm^2 인 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 복수의 패턴영역에 있어서, 인접한 패턴영역 사이의 헬륨이온 농도 차이는 10 내지 50 ions/nm^2 인 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 복수의 패턴영역은 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 2 내지 5 개의 패턴영역을 포함하고,

상기 패턴영역 각각의 폭(width)은 2 ㎛ 이하이고, 길이(length)는 100 ㎛ 이하인 것인,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 상에 배치된 절연층; 및

상기 절연층 상에 배치된 강자성 고정층;을 더 포함하는 것인,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 절연층은 MgO 또는 알루미늄 산화물(AlOx)을 포함하고,

상기 강자성 고정층은 Co/Pt, Co/Pd, Fe/Pd, Fe/Pt 및 CoFeB/IrMn 중에서 선택된 이중층을 포함하는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 Gd-Co 합금, Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함하는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 전극층은,

Ta 또는 W 을 포함하는 제1 전극층; 및

상기 제1 전극층 상에 형성되고, Pt 을 포함하는 제2 전극층;을 포함하는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자.

청구항 10

실리콘 질화막 상에 전극층을 증착하는 제1 단계;

상기 전극층 상에 강자성 혹은 준강자성 자유층을 증착하는 제2 단계; 및

상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 표면에 형성되고 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 인접한 복수의 영역에 헬륨이온을 조사하여, 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴 영역을 형성하는 제3 단계;를 포함하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 제1 단계는,

실리콘 질화막 상에 Ta 또는 W을 포함하는 제1 전극층을 증착하는 단계; 및

상기 제1 전극층 상에 Pt 를 포함하는 제2 전극층을 증착하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법.

청구항 12

제10항에 있어서,

상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 Gd-Co 합금, Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함하는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법.

청구항 13

제10항에 있어서,

상기 제2 단계에서 증착은, 코-스퍼터링(Co-sputtering) 방식으로 수행되는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법.

청구항 14

제10항에 있어서,

상기 제3 단계에서, 상기 복수의 영역에 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층의 표면에 수직한 방향으로 서로 다른 농도의 헬륨 이온을 조사하고, 조사되는 헬륨이온의 농도는 상기 복수의 패턴영역의 일측에서 타측으로 갈수록 점차적으로 증가되는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 제3 단계에서, 상기 헬륨이온의 조사는 10 내지 50 ions/nm^2 의 농도로 수행하는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법.

청구항 16

제10항에 있어서,

상기 제3 단계에서, 상기 복수의 영역에 소정의 각도로 기울어진 방향으로 헬륨 이온을 조사하는 것을 특징으로 하는,

스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법.

청구항 17

전류가 인가되는 전극층;

상기 전극층 하부에 배치된 강자성 혹은 준강자성 자유층;

상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 하부에 배치된 절연층; 및

상기 절연층 하부에 배치된 강자성 고정층;을 포함하고,

상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 표면에 형성되고 상기 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 배열되고 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역을 포함하는,

자기 터널 접합 구조를 갖는 메모리 소자.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 Gd-Co 합금, Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함하고,

상기 절연층은 MgO 또는 알루미늄 산화물(AlOx)을 포함하고,

상기 강자성 고정층은 Co/Pt, Co/Pd, Fe/Pd, Fe/Pt 및 CoFeB/IrMn 중에서 선택된 이중층을 포함하는 것을 특징으로 하는,

자기 터널 접합 구조를 갖는 메모리 소자.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 스핀-궤도 상호작용이 큰 물질에 인가되는 전류에 의해 유도된 스핀-궤도 토크에 의해 외부 자기장이 없이 자화의 반전이 가능한 스핀 궤도 토크 스위칭 소자 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 자성체를 이용한 메모리 소자와 관련된 연구는 최근 들어 활발히 진행되고 있다. 하나의 예시로, 스핀 전달 토크(Spin transfer torque, STT) 구동 방식을 이용한 메모리 소자를 들 수 있으며, 구동 원리는 다음과 같다.

[0003] STT 는 터널 배리어를 사이에 두고 두 개의 자성체가 붙어있는 구조를 가지며, 전류가 이 구조를 통과하면 첫 번째 만나는 자성체 a 를 거치며 전자에 스핀이 만들어진다. 이러한 스핀 분극(spin polarization)이 일어나면 전자들이 두 번째 자성체인 b 에 주입되며 상호 작용하여 자화 반전이 일어난다(switching).

[0004] 상기 STT는 자기장 없이 전류만으로 자성을 제어할 수 있으며, 메모리 소자로 만들기에 비교적 단순한 구조이지만, 스위칭 시간이 길고 순수한 스핀을 얻기 힘들다는 문제점이 있다.

[0005] 이러한 문제점을 극복하기 위해, 비자성/강자성 이종구조에 전류를 인가하여 그 계면에서의 스핀-궤도 상호작용에 의해 토크가 발생하고 그로 인해 자화의 방향을 제어하는 연구가 자기 메모리로서의 잠재적 응용 가능성으로 인해 활발히 진행되어 왔다.

[0006] 하지만, 종래의 SOT(Spin orbit torque, SOT) 구동 방식은 여전히 높은 스위칭 전류로 인해 발생하는 줄 히팅 때문에 자기 이방성이 감소되며, 확률적 스위칭 등의 문제점이 존재한다. 또한, 자화를 SOT 로 반전하기 위해서는 대칭성을 깨뜨리기 위해 외부 수평 자기장이 필요하여 효율성이 떨어지는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명의 일 목적은 외부 자기장 없이 스핀-궤도 토크에 의해 전류만으로 자화가 반전될 수 있는 스핀 궤도 토크 스위칭 소자 및 이의 제조방법을 제공하는 것이다.

[0008] 본 발명의 다른 목적은 자기 터널 접합 구조를 갖는 메모리 소자를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 본 발명의 일 실시예에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자는 전류가 인가되는 전극층, 및 상기 전극층 상에 배치된 강자성 혹은 준강자성 자유층을 포함하고, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 표면에 형성되고 상기 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 배열되고 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역을 포함할 수 있다. 이러한 패턴은 표면 방향에 평행하고 전류 흐름 방향에 수직한 방향으로 자기 구배(magnetic gradient)를 인가할 수 있다.

[0010] 일 실시예에 있어서, 상기 복수의 패턴영역의 헬륨이온의 농도는 일측에서 타측으로 갈수록 점차적으로 증가할 수 있다.

[0011] 일 실시예에 있어서, 상기 패턴영역 각각의 헬륨이온 농도는 10 내지 50 ions/nm^2 일 수 있다.

[0012] 일 실시예에 있어서, 상기 복수의 패턴영역에 있어서, 인접한 패턴영역 사이의 헬륨이온 농도 차이는 10 내지 50 ions/nm^2 일 수 있다.

[0013] 일 실시예에 있어서, 상기 복수의 패턴영역은 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 2 내지 5 개의 패턴영역을 포함하고, 상기 패턴영역 각각의 폭(width)은 2 μm 이하이고, 길이(length)는 100 μm 이하일 수 있다.

[0014] 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 상에 배치된 절연층, 및 상기 절연층 상에 배치된 강자성 고정층을 더 포함할 수 있다.

[0015] 일 실시예에 있어서, 상기 절연층은 MgO 또는 알루미늄 산화물(AlOx)을 포함하고, 상기 강자성 고정층은 Co/Pt, Co/Pd, Fe/Pd, Fe/Pt 및 CoFeB/IrMn 중에서 선택된 이중층을 포함할 수 있다.

[0016] 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 Gd-Co 합금, Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함할 수 있다.

[0017] 일 실시예에 있어서, 상기 전극층은, Ta 또는 W 을 포함하는 제1 전극층, 및 상기 제1 전극층 상에 형성되고, Pt 을 포함하는 제2 전극층을 포함할 수 있다.

[0018] 본 발명의 다른 실시예에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법은 실리콘 질화막 상에 전극층을 증착하는 제1 단계, 상기 전극층 상에 강자성 혹은 준강자성 자유층을 증착하는 제2 단계, 및 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 표면에 형성되고 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 인접한 복수의 영역에 헬륨이온을 조사하여, 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴 영역을 형성하는 제3 단계를 포함할 수 있다.

[0019] 일 실시예에 있어서, 상기 제1 단계는, 실리콘 질화막 상에 Ta 또는 W 을 포함하는 제1 전극층을 증착하는 단계, 및 상기 제1 전극층 상에 Pt 를 포함하는 제2 전극층을 증착하는 단계를 포함할 수 있다.

[0020] 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 Gd-Co 합금, Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함할 수 있다.

[0021] 일 실시예에 있어서, 상기 제2 단계에서 증착은, 코-스퍼터링(Co-sputtering) 방식으로 수행될 수 있다.

[0022] 일 실시예에 있어서, 상기 제3 단계에서, 상기 복수의 영역에 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층의 표면에 수직한 방향으로 서로 다른 농도의 헬륨 이온을 조사하고, 조사되는 헬륨이온의 농도는 상기 복수의 패턴영역의 일측에서 타측으로 갈수록 점차적으로 증가될 수 있다.

[0023] 일 실시예에 있어서, 상기 제3 단계에서, 상기 헬륨이온의 조사는 10 내지 50 ions/nm^2 의 농도로 수행할 수 있다.

[0024] 일 실시예에 있어서, 상기 제3 단계에서, 상기 복수의 영역에 소정의 각도로 기울어진 방향으로 헬륨 이온을 조사할 수 있다.

[0025] 한편, 본 발명의 다른 실시 형태로, 자기 터널 접합 구조를 갖는 메모리 소자를 들 수 있다.

[0026] 상기 메모리 소자는, 전류가 인가되는 전극층, 상기 전극층 하부에 배치된 강자성 혹은 준강자성 자유층, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 하부에 배치된 절연층, 및 상기 절연층 하부에 배치된 강자성 고정층을 포함하고, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 표면에 형성되고 상기 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 배열되고 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역을 포함할 수 있다.

[0027] 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 Gd-Co 합금, Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함하고, 상기 절연층은 MgO 또는 알루미늄 산화물(AlOx)을 포함하고, 상기 강자성 고정층은 Co/Pt, Co/Pd, Fe/Pd, Fe/Pt 및 CoFeB/IrMn 중에서 선택된 이중층을 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0028] 본 발명에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자는, 강자성 혹은 준강자성 자유층에 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역이 포함되며, 상기 패턴영역의 국부적으로 변한 자기 모멘트 보상점과 PMA 특성으로 인해 이방성 비대칭성을 가지게 된다. 이로 인해, 외부 자기장 없이도 전류만으로 자화의 반전이 가능(이하, Field-free switching 이라 명명)하고, 빠른 스위칭 속도를 나타내 고효율 메모리 소자로 활용될 수 있다.

[0029] 또한, 본 발명에 따르면, 다양한 이온 조사법 중 헬륨 이온을 사용하여 강자성 혹은 준강자성 자유층의 국부적인 특성을 변화시키기 때문에 시료의 손상을 최소화할 수 있으며, 나노미터 이하 크기의 이온 프로브(ion probe)를 사용하여 헬륨 이온을 조사하여 강자성 혹은 준강자성 자유층의 복수의 패턴 영역 별로 자기 이방성을 변화시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1a 및 1b는 본 발명의 일 실시예에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자를 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 본 발명의 다른 실시예에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자를 설명하기 위한 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 강자성 혹은 준강자성 자유층을 설명하기 위한 도면이다.

도 4a 및 4b는 본 발명의 실시예에 따른 헬륨 이온 조사 방법을 각각 설명하기 위한 도면이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 터널 접합 구조를 갖는 메모리 소자를 설명하기 위한 도면이다.

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 헬륨 이온 조사 시뮬레이션 (Stopping and Range of Ions in Matter) 결과를 나타낸다.

도 7은 헬륨 이온 조사 조건에 따른 강자성 혹은 준강자성 자유층의 자기 모멘트 보상점의 변화를 나타낸 그래프이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자의 자화 반전(Field-free switching)을 자기 커 효과 (magneto-optical Kerr effect, 이하 MOKE) 현미경으로 관측한 이미지이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 대해 상세히 설명한다. 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 본문에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 개시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 각 도면을 설명하면서 유사한 참조부호를 유사한 구성요소에 대해 사용하였다.

[0032] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로서 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0033] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0034] 도 1a 및 1b는 본 발명의 일 실시예에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자를 설명하기 위한 도면이고, 도 2는 본 발명의 다른 실시예에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자를 설명하기 위한 도면이고, 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 강자성 혹은 준강자성 자유층을 설명하기 위한 도면이다.

[0035] 도 1a 및 1b 를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 스핀 궤도 토크(Spin Orbit Torque, SOT) 스위칭 소자(10)는 전극층(100) 및 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)을 포함하고, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)은 표면에 형성되고 상기 전류의 흐름 방향의 수직 방향으로 배열되고 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역(210)을 포함한다.

[0036] 상기 전극층(100)은 전류가 인가되면 전류의 수직 방향으로 스핀 분극이 되고 스핀 전류가 흐르는 스핀 홀 효과(spin hall effect)가 발생한다. 이때, 스핀 홀 효과에 의해 -x 방향 스핀을 가진 전자는 +z 방향으로 이동하고, +x 방향 스핀을 가진 전자는 -z 방향으로 이동하여 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)에는 -x 방향 스핀 전자만 쌓이게 된다.

[0037] 즉, 전극층(100)으로의 전류 인가 시에 전극층(100)과 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)의 계면 단위면적만큼 스핀 전류가 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)으로 주입되게 되며, 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)에 각운동량이 전달되어 자화 반전(switching)이 일어날 수 있다.

[0038] 이러한 자화 반전(switching)을 일으키기 위해서는 스핀 전류 효율이 매우 중요하며, 스핀 전류 효율을 극대화시키기 위해서, 상기 전극층(100)은 스핀-궤도 상호 작용이 큰 물질인 Pt, Ta, W 등을 포함하는 것이 바람직하다.

[0039] 일 실시예에서, 상기 전극층(100)은 Ta 또는 W을 포함하는 제1 전극층(110) 및 상기 제1 전극층(110) 상에 형성되고, Pt 를 포함하는 제2 전극층(120)을 포함할 수 있다. 다른 실시예로, 상기 전극층(100)은 Pt 을 포함하는 제1 전극층 및 상기 제1 전극층 상에 형성되고, Ta 또는 W 를 포함하는 제2 전극층을 포함할 수 있다.

[0040] 또한, 상기 제1 전극층(110) 및 제2 전극층(120) 각각은 2 내지 5 nm 의 두께인 것이 바람직하다.

[0041] 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)은 상기 전극층(100) 상에 배치되며, 전극층(100)에 인가되는 전류에 의해 유도된 스핀-궤도 토크에 의해 자화가 반전될 수 있다. 이때, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)은 수직 자기 이방성을 갖는 준강자성체 또는 강자성체를 포함할 수 있고, 3d 전이금속 자성체-4f 희토류 금속 합금을 포함하는 것이 바람직하다. 이는 헬륨 이온의 에너지에 의한 원자 분포의 변화를 이용하기 때문이다.

[0042] 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)은 Gd-Co 합금, Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함할 수 있고,바람직하게는 $Gd_{36}Co_{64}$ 으로 이루어질 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 또한, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)은 약 5 nm 이하의 두께일 수 있다.

[0043] 한편, 도 3에 나타나듯이, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)은 표면에 형성되고 상기 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 배열되고 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역(210)을 포함할 수 있다. 상기 복수의 패턴영역(210)은 각 패턴영역(210)마다 자기 이방성이 다른 특성을 가질 수 있고, 각 패턴영역(210)마다 서로 다른 PMA 특성을 가질 수 있다. 여기서, 상기 패턴영역(210) 각각의 헬륨 이온 농도는 수 keV 의 가속전압일 때 10 내지 50 $ions/nm^2$ 일 수 있다.

[0044] 일 실시예에서, 상기 복수의 패턴영역(210)의 헬륨이온의 농도는 일측에서 타측으로 갈수록 점차적으로 증가하는 것이 바람직하다. 이는 자성체가 가지고 있는 대칭성을 면방향으로 깨뜨릴 수 있기 때문이다. 면방향으로 깨져있는 대칭성은 스핀 궤도 토크에 의한 스위칭에 반드시 필요한 z성분을 갖는 스핀 전류를 발생시킨다.

[0045] 일 실시예에서, 상기 복수의 패턴영역(210)은 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 2 내지 5 개의 패턴영역을 포함할 수 있다. 또한, 상기 패턴영역(210) 각각의 폭(width)은 최대 마이크로미터 수준이 될 수 있고, 그 이하에서 현 반도체 공정 기술을 고려했을 때 수 나노미터까지 가능하다. 예를 들면, 상기 패턴 영역(210) 각각의 폭(width)은 공정 해상도에 의존적이며 현 공정 기술을 고려했을 때 2 ㎛ 이하가 될 수 있다. 길이(length)는 제작될 소자 크기와 같고, 약 100 ㎛ 이하일 수 있다.

[0046] 이처럼, 본 발명은 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역(210)을 다양하게 형성하여 강자성 혹은 준강자성 자유층(200) 특정 영역의 자기 모멘트 보상점을 국부적으로 변화시킬 수 있으며, 각각의 패턴영역(210)마다 서로 다른 PMA 특성을 가지기에 구조적 대칭성이 깨지게 되어, 외부 자기장 없이도 전류에 의해 유도된 스핀-궤도 토크에 의해 전류만으로 자화가 반전될 수 있다.

[0047] 한편, 본 발명의 스핀 궤도 토크 스위칭 소자(10)는 전극층(100), 강자성 혹은 준강자성 자유층(200) 이외에 보호층(300)을 더 포함할 수 있다.

[0048] 상기 보호층(300)은 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(200) 상에 배치되어 스위칭 소자(10)를 보호하는 역할을 하는 것으로, Ta 를 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 또한, 보호층(300)은 약 3 nm 두께인 것이 바람직하다.

[0049] 한편, 본 발명의 다른 실시예에 있어서, 본 발명의 스핀 궤도 토크 스위칭 소자(20)는 전극층(100), 강자성 혹은 준강자성 자유층(200) 외에 절연층(400) 및 강자성 고정층(500)을 더 포함할 수 있다. (도 2 참조)

[0050] 상기 절연층(400)은 강자성 혹은 준강자성 자유층(200) 상에 배치되며, 자기 터널 접합 구조의 터널층 역할을 한다. 일 실시예에 있어서, 상기 절연층(400)은 MgO 또는 알루미늄 산화물(AlOx)을 포함할 수 있다.

[0051] 상기 강자성 고정층(500)은 상기 절연층(400) 상에 배치되며, 전류에 의해 제어되지 않는 특성이 있다. 따라서, 절연층(400) 및 강자성 고정층(500)을 포함하는 본 발명의 스위칭 소자(20)는 자기 터널 접합 구조를 가지며, 강자성 혹은 준강자성 자유층(200) 및 강자성 고정층(500)의 자화 방향이 평행 혹은 반평행함에 따라 차이나는 저항 특성을 디지털 신호 기록 및 읽기에 활용하는 메모리 소자로 활용될 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 고정층(500)은 Co/Pt, Co/Pd, Fe/Pd, Fe/Pt 및 CoFeB/IrMn 중에서 선택된 이중층을 포함할 수 있다.

[0052] 본 발명에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자(10, 20)는 강자성 혹은 준강자성 자유층(200)의 패턴영역(210)의 국부적으로 변한 자기 모멘트 보상점과 PMA 특성으로 인해 이방성 비대칭성을 가지게 되며, 이로 인해 외부 자기장 없이도 전류만으로 자화의 반전이 가능(이하, Field-free switching 이라 명명)하고, 빠른 스위칭 속도를 나타내 고효율 메모리 소자로 활용될 수 있다.

[0053] 한편, 본 발명의 다른 실시예에 따른 스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조 방법은, 실리콘 질화막 상에 전극층을 증착하는 제1 단계, 상기 전극층 상에 강자성 혹은 준강자성 자유층을 증착하는 제2 단계, 및 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 표면에 형성되고 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 인접한 복수의 영역에 헬륨이온을 조사하여, 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴 영역을 형성하는 제3 단계를 포함할 수 있다.

[0054] 먼저, 실리콘 질화막 상에 전극층을 증착하는 제1 단계를 수행한다. 여기서, 상기 전극층은 스핀-궤도 상호 작용이 큰 물질인 Pt, Ta, W 등을 포함하는 것이 바람직하다. 또한, 상기 실리콘 질화막은 Si 기판 위에 수 백 나노 크기로 쌓인 SiN_x 일 수 있다. (도 1a 참조) 이는 전류의 션트(shunt)를 방지하기 위한 질화막으로, 실리

콘 산화막(SiOx)이나 다른 반도체 기판을 활용할 수 있다.

[0055] 일 실시예에서, 상기 제1 단계는, 실리콘 질화막 상에 Ta 또는 W 을 포함하는 제1 전극층을 증착하는 단계, 및 상기 제1 전극층 상에 Pt 를 포함하는 제2 전극층을 증착하는 단계를 포함할 수 있다. 다른 실시예로, 실리콘 질화막 상에 Pt 을 포함하는 제1 전극층을 증착하는 단계, 및 상기 제1 전극층 상에 Ta 또는 W 을 포함하는 제2 전극층을 증착하는 단계를 포함할 수 있다.

[0056] 일 실시예에서, 상기 제1 전극층 및 제2 전극층은 각각은 magnetic random access memory의 자기 터널접합 제작 방식에 주로 사용되는 d.c.magnetron sputtering 방식으로 실리콘 질화막 상에 순차적으로 증착될 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0057] 다음으로, 상기 전극층 상에 강자성 혹은 준강자성 자유층을 증착하는 제2 단계를 수행한다. 여기서, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 수직 자기 이방성을 갖는 물질인 준강자성체 또는 강자성체를 포함할 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층은 Gd-Co 합금 Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함할 수 있고, 바람직하게는, $Gd_{36}Co_{64}$ 으로 이루어질 수 있다.

[0058] 일 실시예에서, 상기 제2 단계에서 강자성 혹은 준강자성 자유층의 증착은, 코-스퍼터링(co-sputtering) 방식으로 수행되는 것이 바람직하나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0059] 이후, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 표면에 형성되고 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 인접한 복수의 영역에 헬륨이온을 조사하여, 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴 영역을 형성하는 제3 단계를 수행한다.

[0060] 상기 제3 단계는 강자성 혹은 준강자성 자유층의 복수의 영역에 헬륨이온을 조사하여 자기 구배(magnetic gradient)를 형성하고, 각 패턴 영역의 자기 모멘트 보상점과 PMA 특성을 변화시키기 위한 것이다. 이때, 본 발명은 다양한 이온 조사법 중 헬륨 이온을 사용하는데, 이는 헬륨 이온이 다른 이온(Ar, PH_3, AsH_3)들에 비해 상대적으로 질량이 가벼워 시료의 손상을 최소화할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

[0061] 일 실시예에서, 상기 제3 단계에서, 헬륨이온은 나노미터 이하 크기의 이온 프로브(ion probe)에 의해 조사되며, 조사되는 헬륨이온의 농도는 상기 복수의 패턴영역의 일측에서 타측으로 갈수록 점차적으로 증가될 수 있다.

[0062] 구체적으로, 도 4a를 참조하면, 상기 제3 단계에서, 헬륨이온 빔 기술을 이용하여 복수의 영역에 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층 표면에 수직한 방향으로 서로 다른 농도의 헬륨이온을 조사할 수 있다. 따라서, 본 발명은 일측에서 타측으로 헬륨이온의 농도가 증가되는 나노 미터 수준의 복수의 패턴 영역을 형성할 수 있다.

[0063] 이때, 상기 제3 단계에서 조사하는 헬륨이온의 농도는 10 내지 50 $ions/nm^2$ 일 수 있다.

[0064] 다른 실시예에서, 상기 제3 단계에서, 헬륨이온의 조사 각도를 조절하여 일측에 타측으로 갈수록 헬륨이온의 농도가 점차적으로 증가되는 복수의 패턴 영역을 형성할 수 있다.

[0065] 구체적으로, 도 4b를 참조하면, 상기 제3 단계에서, 복수의 영역에 소정의 각도로 기울어진 방향으로 헬륨이온을 조사하면 일측에서 타측으로 헬륨이온의 농도가 증가되는 나노 미터 수준의 복수의 패턴 영역을 형성할 수 있다. 즉, 본 발명에 따르면, 하나의 이온 조사 조건 하에서도 서로 다른 헬륨 농도를 갖는 복수의 패턴 영역을 형성할 수 있다.

[0066] 한편, 본 발명은 상기 제3 단계 후, 상기 복수의 패턴 영역이 형성된 강자성 혹은 준강자성 자유층 상에 Ta를 포함하는 보호층을 증착하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0067] 일 실시예에서, 상기 보호층은 magnetic random access memory의 자기 터널접합 제작 방식에 주로 사용되는 d.c.magnetron sputtering 방식으로 증착될 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0068] 본 발명에 따르면, 다양한 이온 조사법 중 헬륨 이온을 사용하여 강자성 혹은 준강자성 자유층의 국부적인 특성을 변화시키기 때문에 시료의 손상을 최소화할 수 있으며, 나노미터 이하 크기의 이온 프로브(ion probe)를 사용하여 헬륨 이온을 조사하여 강자성 혹은 준강자성 자유층의 복수의 패턴 영역 별로 자기 이방성을 변화시킬 수 있다.

[0069] 한편, 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 터널 접합 구조를 갖는 메모리 소자를 설명하기 위한 도면이다.

[0070] 도 5를 참조하면, 본 발명의 일 실시예에 따른 자기 터널 접합 구조를 갖는 메모리 소자(30)는, 전극층(301), 상기 전극층(301) 하부에 배치된 강자성 혹은 준강자성 자유층(302), 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(302) 하부에 배치된 절연층(303), 및 상기 절연층(303) 하부에 배치된 강자성 고정층(304)을 포함할 수 있다.

[0071] 상기 전극층(301)은 전류가 인가되면 전류의 수직 방향으로 스핀 분극이 되고 스핀 전류가 흐르는 스핀 홀 효과(spin hall effect)가 발생한다. 이때, 스핀 홀 효과에 의해 -x 방향 스핀을 가진 전자는 +z 방향으로 이동하고, +x 방향 스핀을 가진 전자는 -z 방향으로 이동하여 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)에는 -x 방향 스핀 전자만 쌓이게 된다.

[0072] 즉, 전극층(301)으로의 전류 인가 시에 전극층(301)과 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)의 계면 단위면적만큼 스핀 전류가 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)으로 주입되게 되며, 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)에 각운동량이 전달되어 자화 반전(switching)이 일어날 수 있다.

[0073] 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)은 상기 전극층(301) 하부에 배치되며, 전극층(301)에 인가되는 전류에 의해 유도된 스핀-궤도 토크에 의해 자화가 반전될 수 있다. 이때, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)은 수직 자기 이방성을 갖는 준강자성체 또는 강자성체를 포함할 수 있고, 3d 전이금속 자성체-4f 희토류 금속 합금을 포함하는 것이 바람직하다. 이는 헬륨 이온의 에너지에 의한 원자 분포의 변화를 이용하기 때문이다.

[0074] 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)은 Gd-Co 합금, Gd-Fe-Co 합금, CoFeB 합금 또는 CoFe 합금을 포함할 수 있고,바람직하게는 $Gd_{36}Co_{64}$ 으로 이루어질 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0075] 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)은 표면에 형성되고 상기 전류 흐름 방향의 수직 방향으로 배열되고 서로 다른 농도의 헬륨이온이 주입된 복수의 패턴영역을 포함하여 자기 구배(magnetic gradient)를 형성할 수 있다. 따라서, 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)은 전류의 인가 시에 자화 스위칭이 일어날 수 있다.

[0076] 상기 절연층(303)은 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(303) 하부에 형성되며, 상기 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)과 강자성 고정층(304)의 사이에 형성되어 자기 터널 접합 구조를 형성하고 터널층 역할을 할 수 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 절연층(303)은 MgO 또는 알루미늄 산화물(AlOx)을 포함할 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0077] 상기 강자성 고정층(304)은 상기 절연층(303) 하부에 형성되고, 전류에 의해 제어되지 않는 특성이 있다. 일 실시예에 있어서, 상기 강자성 고정층(500)은 상대적으로 열적 안정성이 우수한 Co/Pt, Co/Pd, Fe/Pd, Fe/Pt 및 CoFeB/IrMn 중에서 선택된 이중층을 포함할 수 있다.

[0078] 구체적으로, 본 발명의 메모리 소자(30)는 강자성 혹은 준강자성 자유층(302) 및 강자성 고정층(304) 사이에 약 1 나노미터의 절연층(303)을 포함하는 자기 접합 터널 구조를 갖는다. 여기서, 도 5에 도시된 것처럼, 전류를 면의 수직 방향으로 흘려 강자성 혹은 준강자성 자유층(302) 및 강자성 고정층(304)의 자화 방향이 평행 혹은 반평행 함에 따라 저항이 차이가 나게 되며, 이 특성을 디지털 신호 기록 및 읽기에 활용할 수 있다.

[0079] 본 발명의 메모리 소자(30)에 있어서, 자기구배(magnetic gradient)에 의한 자화 스위칭은 강자성 혹은 준강자성 자유층(302)에서만 일어나게 되며, 강자성 고정층(304)은 전류에 의해 제어가 되지 않는 특성이 있다.

[0080] 이하에서, 구체적인 실시예들 및 비교예를 통해서 본 발명의 스핀 궤도 토크 스위칭 소자 및 제조 방법에 대해서 보다 상세히 설명하기로 한다. 다만, 본 발명의 실시예들은 본 발명의 일부 실시 형태에 불과한 것으로서, 본 발명의 범위가 하기 실시예들에 한정되는 것은 아니다.

[0081] **<실시예 1: 스핀 궤도 토크 스위칭 소자 제조>**

[0082] d.c magnetron sputtering과 co-sputtering 증착 공정 방식을 이용하여 Gd-Co 합금 준강자성 박막을 제작한다. 이후 리소그래피 공정을 통해 100*20 (가로*세로) 사이즈의 더블 홀 바 패턴의 소자로 제작하였다. 헬륨 이온 조사는 제작된 더블 홀 바 패턴 전체 영역을 덮을 수 있는 크기로 가로 100 μm, 세로로는 20 μm를 4등분한 5 μm 씩 영역을 나누어, 각 영역에 각기 다른 이온조사 조건을 적용하여 패턴을 형성하였다. 이온 농도 조건은 10 ions/nm^2 ~ 50 ions/nm^2 으로 설정하여 서로 다른 농도의 헬륨 이온이 주입된 복수의 패턴을 형성하였다.

[0083] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 방법으로 제조된 스핀 궤도 토크 스위칭 소자의 준강자성 박막에 형성된 복수의 패턴영역을 도시한 이미지이다.

[0084] 도 3을 보면, 본 발명의 소자의 홀바 내부에 직사각형 모양의 복수의 패턴영역이 형성된 것을 관찰할 수 있다.

[0085] **<실시예 2: 헬륨 이온 조사 입사각에 따른 헬륨 이온 주입>**

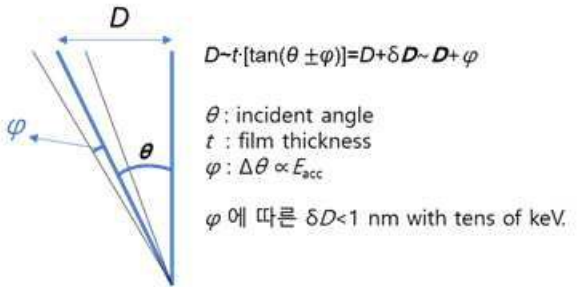
[0086] 도 6은 Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

[0087] 도 6에 도시된 것처럼, 헬륨 이온 조사 입사각에 따라 이온 조사에 방향성을 줄 수 있음을 알 수 있다(우측). 먼저 강자성 혹은 준강자성 자유층의 표면(단면)에 수직한 방향으로 이온 조사하였을 때(좌측), 이온 분포는 1nm 이하 범위로 국부적인 영역 범위 내에 수직한 방향으로 일정하게 주입된다. 주입된 헬륨 이온은 강자성 혹은 준강자성 자유층을 지나 각 층을 통과하며 이는 이온이 입사한 기점을 중심으로 좌우 대칭적인 특성을 보인다.

[0088] 비스듬하게 이온 조사 시에도 주입된 헬륨 이온이 각 층을 통과하며 퍼지는 형상은 동일하다. 비스듬한 방향으로 이온 조사한 이미지(우측)를 보면, 강자성 혹은 준강자성 자유층(시뮬레이션 상에서 Gd-Co 준강자성체)에서의 이온 분포가 입사각 방향으로 비스듬하게 이루어져 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 입사각이 90°가 아닌 소정의 각도로 기울어진 방향으로 설정되어 조사한 헬륨 이온에 따라 이온 분포 또한 소자의 깊이에 따라 다르게 형성되어 있음을 의미한다. 이런 원리를 이용하여 하나의 이온조사 조건에서도 자기구배를 형성할 수 있다.

[0089] 여기서, 입사각에 따른 자성 구배 길이 D(magnetic gradient length D)는 소자의 크기 결정 요소로 작용하게 된다. 하기 식은 입사각 Θ에 따른 D와 이온 분배(ion distribution)을 고려한 추가적인 길이(length)인 δD를 수학적으로 정의한 것이다.

[0090] [식]



[0091]

[0092] 이온 조사 시 D+δD는 주입되는 헬륨 이온의 가속 운동 에너지(Acceleration E), 조사 목표 물질의 특성과 두께, 계면의 수와 같은 다양한 특성들에 의해 D 가 결정된다. 또한, 이온 조사의 입사각에도 큰 영향을 받는다. 일반적으로 δD는 수~수십 keV의 경우 1 nm 이하의 수준이다. 이온조사를 하기 위한 포토레지스트 마스크의 높이가 약 50 나노미터인 경우 입사각 10° 인 경우 50 nm × tan10° ~ 8 nm 이다. 따라서 D > 8 nm 가 가능한 자기터널접합의 경우에 적용이 가능하며, 이론적으로 마스크 높이가 더 낮은 경우 8 nm 이하의 공정도 가능하다.

[0093] 이는 헬륨 이온 조사를 통해 구현한 소자 내 대칭 파괴 결과가 본 발명에서 제안한 이온 조사 농도 조건을 다르게 설정하는 방법에 국한되지 않으며, 이온 조사 당시 입사각의 조절을 통해서도 구현할 수 있음을 의미한다.

[0094] **<실시예 3: 헬륨 이온 조사 조건에 따른 스위칭 소자의 자기 모멘트 보상점 변화 분석>**

[0095] 헬륨 이온 조사 조건에 따른 본 발명의 준강자성 혹은 준강자성 자유층의 자기 모멘트 보상점의 변화를 나타낸 그래프를 도 7에 도시하였다. 자기 모멘트 보상점은 원소들의 스핀 방향이 서로 다른 방향으로 정렬되어 있고, 각 원소가 가진 스핀의 크기가 온도에 따라 다른 특성을 가지고 있는 경우 원소들의 자기 모멘트를 모두 더한 값, 즉 알짜 자기 모멘트가 0이 되는 온도를 의미한다.

[0096] 도 7은 측정 온도를 약 300 K~ 1.4 K 범위에서 변화시키며 측정 온도에 따른 비정상 홀 효과 anomalous hall effect (AHE) 저항의 변화를 관측하여 얻은 결과이다. 측정 온도에 따라 변하는 소자의 보자력, AHE 부호의 반전 현상 등을 통해 페리 자성 소자의 특성 중 하나인 자기 모멘트 보상점을 확인할 수 있었다. 동일한 조건에서의 측정을 단일 조건(10, 20, 30 ions/nm^2)으로 헬륨 이온 조사를 진행한 각각의 소자들에 대해서도 진행한 결과 헬륨 이온 조사 이후 각각 소자의 자기 모멘트 보상점이 변한 것을 확인하였다. 구체적으로, 이온 조사를 하지 않은 소자의 경우 자기 모멘트 보상점이 47 K, 이후 이온 조사를 진행한 소자의 경우 10, 20, 30 ions/nm^2 순서대로 37 K, 26 K, 22 K 순으로 헬륨 이온 조사를 할수록 자기 모멘트 보상점이 낮아지는 것을 확인하였다.

[0097] **<실시예 4: 스핀 궤도 토크 스위칭 소자의 특성 분석>**

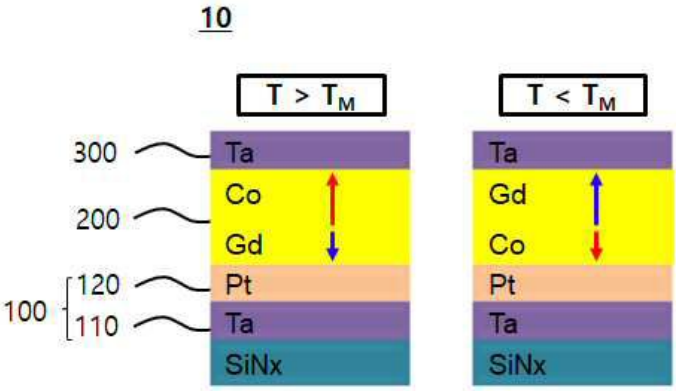
[0098] 전류를 인가하여, 외부 자기장 없이 본 발명의 스핀 궤도 토크 스위칭 소자의 자화의 반전(Field-free switching)을 수행하고, 그 결과를 MOKE 현미경으로 관측한 이미지를 도 8에 나타냈다.

[0099] 도 8에 나타난 것처럼, 복수의 패턴 영역의 gradient 방향은 전류에 수직하다. 도 8에 표시된 화살표 방향으로 외부자기장을 인가하지 않은 상황에서 전류 펄스를 인가하였을 때 좌측 이미지에서 한쪽 방향(down)으로 포화되어있던 자화(어두운 부분)가 전류 인가만으로 반전이 되어 다른 방향(up)으로 정렬되어 있음을 MOKE 이미지를 통해 확인할 수 있다. 이를 통해 외부 자기장 없이 전류만 인가함으로써 소자의 수직자화의 반전이 일어날 수 있음을 확인하였다.

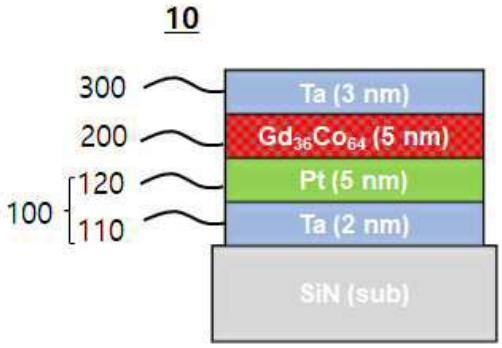
[0100] 상기에서는 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야의 숙련된 당업자는 하기의 특허 청구 범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

도면

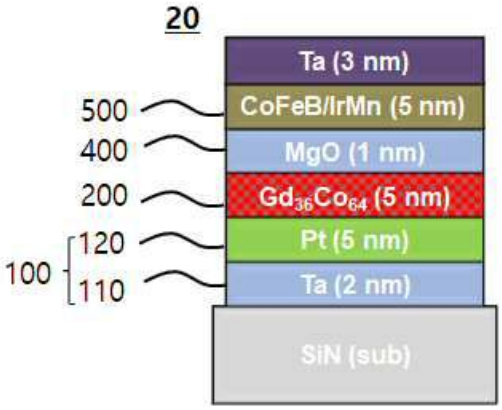
도면1a



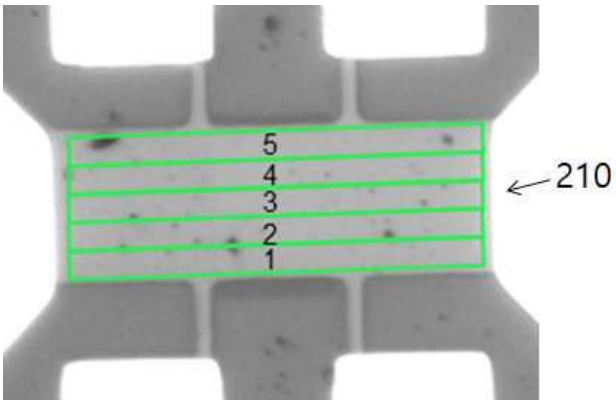
도면1b



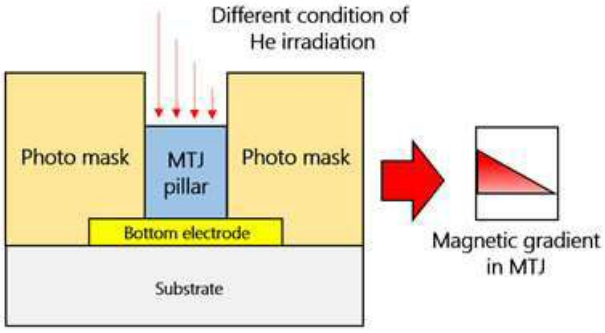
도면2



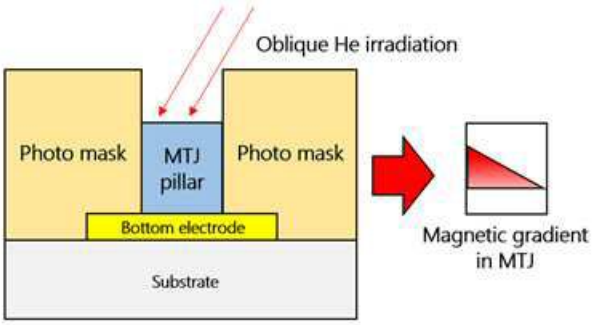
도면3



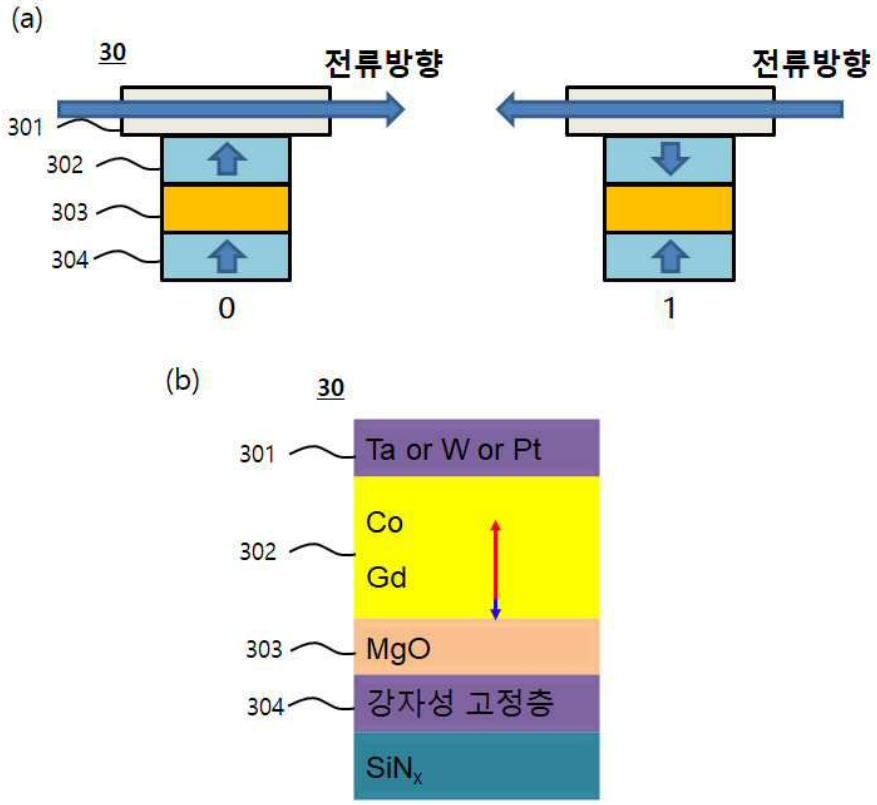
도면4a



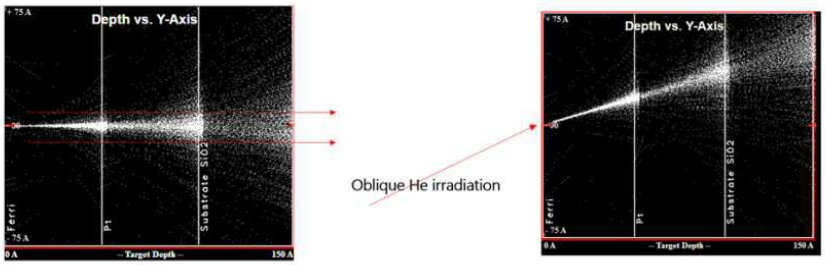
도면4b



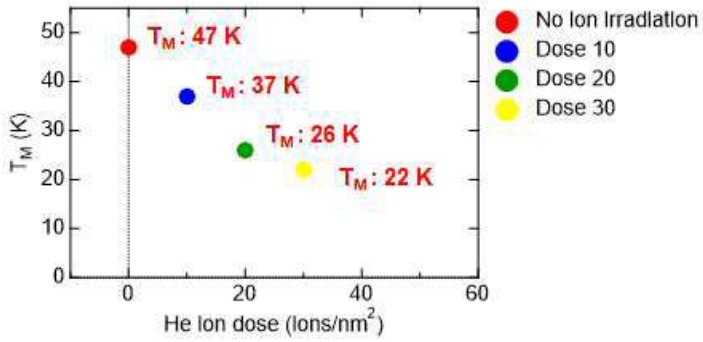
도면5


(a)
30
전류방향
전류방향
301
302
303
304
0
1
(b)
30
301
Ta or W or Pt
302
Co
Gd
303
MgO
304
강자성 고정층
SiNx

도면6


Depth vs. Y-Axis
Oblique He irradiation
Depth vs. Y-Axis

도면7


TM : 47 K
TM : 37 K
TM : 26 K
TM : 22 K
No Ion Irradiation
Dose 10
Dose 20
Dose 30
TM (K)
He Ion dose (Ions/nm2)

도면8

