(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년10월13일
(11) 등록번호 10-2589211
(24) 등록일자 2023년10월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H10N 50/80 (2023.01) *H10N 10/10* (2023.01)
H10N 10/80 (2023.01) *H10N 50/01* (2023.01)
H10N 50/85 (2023.01)
(52) CPC특허분류
H10N 50/80 (2023.02)
H10N 10/10 (2023.02)
(21) 출원번호 10-2022-0117301
(22) 출원일자 2022년09월16일
심사청구일자 2022년09월16일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020200132623 A
KR1020200135149 A

(73) 특허권자
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
유정우
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
최대성
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김종선, 이형석

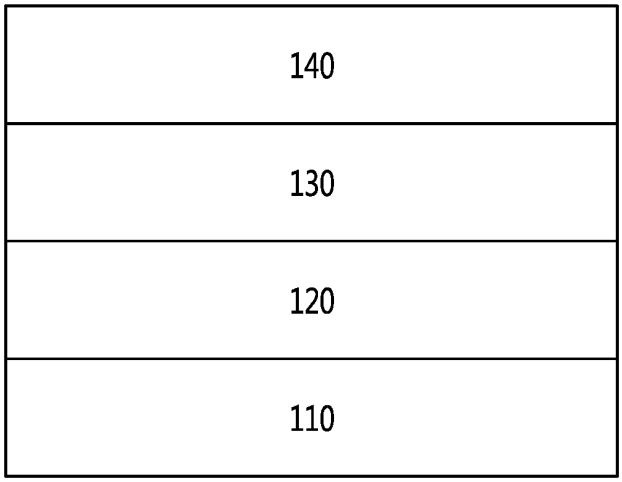
전체 청구항 수 : 총 14 항 심사관 : 이양근

(54) 발명의 명칭 **스핀-전하 변환 제어 소자 및 이의 제조 방법**

(57) 요 약

본 발명은 강자성체층; 상기 강자성체층에 형성된 터널 배리어층; 상기 터널 배리어층 상에 형성된 강유전체층; 및 상기 강유전체층 상에 형성된 게이트전극;을 포함하고, 상기 강유전체층의 분극을 제어하여 전하전류의 방향을 제어하는 것인, 스핀-전하 변환 제어 소자 및 이의 제조 방법에 대하여 개시한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H10N 10/80 (2023.02)
H10N 50/01 (2023.02)
H10N 50/85 (2023.02)

(72) 발명자
이재병
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
최종현
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이승현
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
노승현
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
정현정
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711130771
과제번호	2020M3F3A2A03082444
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	차세대지능형반도체기술개발(R&D)
연구과제명	스핀전하 변환의 비휘발성 제어와 스핀궤도 논리소자 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2020.07.01 ~ 2023.02.28

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711158804
과제번호	2021M3H4A1A03054864
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	나노소재기술개발
연구과제명	나노 전자소자 구현을 위한 위상물질 이종접합구조 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	울산과학기술원
연구기간	2021.04.26 ~ 2025.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

강자성체층;

상기 강자성체층에 형성된 터널 배리어층;

상기 터널 배리어층 상에 형성된 강유전체층; 및

상기 강유전체층 상에 형성된 게이트전극을 포함하고,

상기 강유전체층의 분극을 제어하여 전하전류의 방향을 제어하는 것인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 강자성체층에 연결된 줄 발열(joule heating)을 위한 전류회로를 더 포함하는, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 강자성체층은 전류가 인가되어 스핀전류를 생성하고,

상기 생성된 스핀전류는 상기 터널 배리어층에서 필터링되고,

상기 필터링된 스핀전류는 상기 강유전체층에서 전하전류로 변환되고,

상기 변환된 전하전류의 방향은 상기 게이트전극의 부호에 의해 결정된 상기 강유전체층의 분극에 의해 제어되는 것인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 4

제 2 항에 있어서,

상기 강자성체층에서 줄 발열(Joule heating)을 통하여 스핀전류를 생성하고,

상기 생성된 스핀전류는 상기 터널 배리어층에서 필터링되고,

상기 필터링된 스핀전류는 상기 강유전체층에서 전하전류로 변환되고,

상기 변환된 전하전류의 방향은 상기 게이트전극의 부호에 의해 결정된 상기 강유전체층의 분극에 의해 제어되는 것인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 강유전체층의 분극을 제어하는 것은 상기 강유전체층의 라쉬바 효과를 제어하는 것인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 강유전체층은 WTe_2, In_2Se_3, $MoTe_2$, Ge-Te, Sb_2Te_3, Sb_2Se_3, In_2Te_3, $Ge_2Sb_2Te_5$, $GeSeTe_2$, $AgSbSe_2$, Sb-Se, Ag-In-Sb-Te, Bi_2Te_3 및 Bi_2Se_3로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나 이상인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 터널 배리어층은 hBN, $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$, SiO_2, HfO_2 및 Al_2O_3으로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나 이상인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 강자성체층의 두께는 10 내지 50 nm인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 터널 배리어층의 두께는 0.3 내지 1 nm인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 10

제 1 항에 있어서,

상기 강유전체층의 두께는 1 내지 4 nm 인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 11

제 1 항에 있어서,

상기 게이트전극의 전계의 절대값은 0.17 내지 0.8 V/nm인, 스핀-전하 변환 제어 소자.

청구항 12

강자성체층을 형성하는 단계;

상기 강자성체층 상에 터널 배리어층을 형성하는 단계;

상기 터널 배리어층 상에 강유전체층을 형성하는 단계; 및

상기 강유전체층 상에 게이트전극을 형성하는 단계;를 포함하는, 스핀-전하 변환 제어 소자의 제조 방법.

청구항 13

제 12 항에 있어서,

상기 강자성체층 상에 터널 배리어층을 형성하는 단계는 기계적 박리법을 통해 수행되는 것인, 스핀-전하 변환 제어 소자의 제조 방법.

청구항 14

제 12 항에 있어서,

상기 강자성체층을 형성하는 단계는 포토 리소그래피, 전자빔 리소그래피, 및 임프린트 리소그래피(Imprint Lithography)로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나의 방법을 통해 수행되는 것인, 스핀-전하 변환 제어 소자의 제조 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 스핀-전하 변환 제어 소자 및 이의 제조 방법에 관한 것으로서, 강자성체층으로부터 주입된 스핀전류를 전하전류로 변환시키고, 상기 전하전류의 방향을 제어할 수 있는 스핀-전하 변환 제어 소자에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 오늘날은 고도의 정보화 시대로서, 이는 컴퓨터의 대중화와 인터넷 및 이동통신 기술의 급속한 발전에 의해 주로 이루어졌다. 이러한 정보화 시대에는 효율적인 정보 처리 및 저장 기술이 요구된다. 최근에는 정보기기의 휴대성에 대한 요구가 증대됨에 따라, 정보기기의 초고속화, 소형화, 대용량화 및 저전력화가 크게 요구되고 있는 실정이다. 이와 같이 정보산업의 급속한 발달에 대응할 수 있는 특성을 가진 전자소자에 대한 필요성이 크게 증대되고 있는데, 그 동안 장기간에 걸친 기술적 진보로 인하여 캐리어 전하의 제어에 기반을 둔 트랜지스터를 포함한 현재의 전자소자기술은 거의 포화 상태이며, 수년 후에는 한계에 이를 것으로 예상된다. 특히 반도체 기반의 전자 소자 기술은 물리적 현상 및 나노 공정에 있어서 근본적인 기술적 한계에 부딪히고 있으며 이러한 한계를 극복할 수 있는 새로운 차세대 전자 소자 기술의 출현이 강하게 요구되고 있다.

[0003] 이에 대한 대안으로 지금까지 분자전자, 나노전자, 스핀트로닉스 및 양자정보기술 등 많은 새로운 방법론이 제안되었다. 그 중에서도 스핀트로닉스는 가장 유망한 차세대 정보기술이라 할 수 있다. 스핀트로닉스(Spintronics)는 '스핀(spin)'과 '일렉트로닉스(electronics)'의 합성어로 전자의 스핀을 활용하는 기술이다. 용어에서 보듯이 이 기술은 전자의 전하뿐만 아니라 스핀 정보, 즉 spin-up, spin-down을 제어하고, 구분하여 사용할 수 있어 비휘발성, 고집적도, 저에너지 소비 및 데이터처리 속도 향상 등의 다양한 잠재적 이점이 있다.

[0004] 상기와 같은 다양한 장점과 기대효과에도 불구하고 스핀트로닉스는 현재 여러가지 문제에 직면해 있다. 기술의 발전을 위해서는 관련소자의 중요 원리가 되는 pure spin의 생성 및 주입, 장거리 스핀 전송, 스핀 방향 감지 등의 조작에 아직 많은 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 새로운 소자 개념의 도입과 신규 스핀트로닉스용 소재의 개발이 필요하다. 100% 분극화된 순수한 스핀의 생성 및 주입은 주로 스핀의 분극을 어떻게 조절하느냐에 달려 있으며, 또한 사용된 반도체 또는 금속 계면에서의 스핀 산란 여부도 중요한 영향을 끼치고 있다.

[0005] 스핀 극성을 이용하는 spin-FET(spin-polarized field effect transistor)는 기존의 FET에 비해 에너지 소모가 적고 훨씬 빠르게 작동할 뿐 아니라 자기장을 변화시킴으로써 자화 방향을 조절할 수 있고, 또한 동작 중에 기능을 변화시킬 수 있는 추가적인 논리게이트를 구현할 수 있다. 그러나 스핀전류를 강자성체 전극에서 반도체로 주입시키기가 어렵기 때문에 아직까지 완벽한 spin-FET 소자를 만드는 데 한계가 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해 안출된 것으로, 이차원 강유전체의 분극을 제어하는 것을 통해 스핀전류와 전하전류의 방향을 제어하는 스핀-전하 변환 제어 소자를 제공하기 위한 것이다.

[0007] 또한, 본 발명은 스핀전류과 전하전류의 방향를 제어하기 위해, 상기 이차원 강유전체의 분극을 제어하는 방법을 제공하기 위한 것이다.

[0008] 다만, 본원의 실시예가 이루고자 하는 기술적 과제는 상기된 바와 같은 기술적 과제에 한정되지 않으며, 또 다른 기술적 과제들이 존재할 수 있다.

과제의 해결 수단

[0009] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명은 강자성체층; 상기 강자성체층에 형성된 터널 배리어층; 상기 터널 배리어층 상에 형성된 강유전체층; 및 상기 강유전체층 상에 형성된 게이트전극;을 포함하고, 상기 강유전체층의 분극을 제어하여 전하전류의 방향을 제어하는 것인, 스핀-전하 변환 제어 소자에 대하여 개시한다.

[0010] 여기서 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 상기 강자성체층에 연결된 줄 발열(Joule heating)을 위한 전류 회로를 더 포함할 수 있다.

[0011] 여기서 상기 강자성체층은 전류가 인가되어 스핀전류를 생성하고, 상기 생성된 스핀전류는 상기 터널 배리어층에서 필터링되고, 상기 필터링된 스핀전류는 상기 강유전체층에서 전하전류로 변환되고, 상기 변환된 전하전류의 방향은 상기 게이트전극의 부호에 의해 결정된 상기 강유전체층의 분극에 의해 제어는 것일 수 있다.

[0012] 여기서 상기 강자성체층은 줄 발열(Joule heating)을 통하여 스핀전류를 생성하고, 상기 생성된 스핀전류는 상기 터널 배리어층에서 필터링되고, 상기 필터링된 스핀전류는 상기 강유전체층에서 전하전류로 변환되고, 상기 변환된 전하전류의 방향은 상기 게이트전극의 부호에 의해 결정된 상기 강유전체층의 분극에 의해 제어되는 것일 수 있다.

[0013] 여기서 상기 강유전체층의 분극을 제어하는 것은 상기 강유전체층의 라쉬바 효과를 제어하는 것일 수 있다.

[0014] 여기서 상기 강유전체층은 WTe_2, In_2Se_3, $MoTe_2$, Ge-Te, Sb_2Te_3, Sb_2Se_3, In_2Te_3, $Ge_2Sb_2Te_5$, $GeSeTe_2$, $AgSbSe_2$, Sb-Se, Ag-In-Sb-Te, Bi_2Te_3 및 Bi_2Se_3로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나 이상일 수 있다.

[0015] 여기서 상기 터널 배리어층은 hBN, $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$, SiO_2, HfO_2 및 Al_2O_3으로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나 이상일 수 있다.

[0016] 여기서 상기 강자성체층의 두께는 10 내지 50 nm일 수 있다.

[0017] 여기서 상기 터널 배리어층의 두께는 0.3 내지 1 nm일 수 있다.

[0018] 여기서 강유전체층의 두께는 1 내지 4 nm일 수 있다.

[0019] 여기서 게이트전극의 전계의 절대값은 0.17 내지 0.8 V/nm일 수 있다.

[0020] 또한 본 발명은 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 강자성체층을 형성하는 단계; 상기 강자성층 상에 터널 배리어층을 형성하는 단계; 상기 터널 배리어층 상에 강유전체층을 형성하는 단계; 상기 강유전체층 상에 게이트전극을 형성하는 단계;를 포함하는, 스핀-전하 변환 제어 소자의 제조 방법에 대하여 개시한다.

[0021] 여기서 상기 터널 배리어층을 형성하는 단계는 기계적 박리법을 통해 수행될 수 있다.

[0022] 여기서 상기 강자성체층을 형성하는 단계는 포토 리소그래피, 전자빔 리소그래피, 및 임프린트 리소그래피(Imprint Lithography)로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나의 방법을 통해 수행될 수 있다.

발명의 효과

[0023] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 이차원 강유전체층이 삽입되어, 상기 이차원 강유전체층의 분극을 제어하는 것을 통해, 전하전류의 방향을 제어할 수 있다.

[0024] 또한, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 게이트전극 부호를 변환하는 간단한 방법을 통하여, 전하전류의 방향을 제어할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0025] 도 1은 본 발명의 스핀-전하 변환 제어소자를 도시한 것이다.

도 2는 위상 절연체(Topological insulator, TI) 및 라쉬바 시스템의 밴드 구조를 나타내는 그림이다.

도 3은 역라쉬바-에델스타인 효과(Inverse Rashba-Edelstein effect)를 나타내는 그림이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자에 있어서, 스핀전류에서 전하전류로 변환되는 과정을 도시한 그림이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자의 강유전체층 및 터널 배리어층의 사진이다.

도 6은 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자를 도시한 것이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 제벡(Seebeck) 스핀 터널 효과로 제어되는 스핀-전하 변환 제어 소자를 도시한 것이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자의 게이트 전계 크기에 따른 이력곡선을 나타내는 그래프이다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자의 채널 전극 전압에 따른 전류 변화를 나타내는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 구체적으로 설명하고자 한다. 그러나 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어

야 한다.

[0027] 본원 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.

[0028] 본 명세서에서 사용되는 정도의 용어 "약", "실질적으로" 등은 언급된 의미에 고유한 제조 및 물질 허용오차가 제시될 때 그 수치에서 또는 그 수치에 근접한 의미로 사용되고, 본원의 이해를 돕기 위해 정확하거나 절대적인 수치가 언급된 개시 내용을 비양심적인 침해자가 부당하게 이용하는 것을 방지하기 위해 사용된다. 또한, 본원 명세서 전체에서, "~하는 단계" 또는 "~의 단계"는 "~를 위한 단계"를 의미하지 않는다.

[0029] 본 발명의 기술분야에 속하는 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 요지를 통하여 다양한 응용을 할 수 있으므로, 본 발명의 권리범위는 이하의 실시예로 한정되지 않는다. 본 발명의 권리범위는 특허청구범위에 기재된 사항을 기초로 하여 본 발명의 기술분야에 속하는 통상의 지식을 가진 자가 종래 기술을 이용하여 용이하게 치환 또는 변경하는 것이 자명한 부분에까지 미친다.

[0030] 이하, 필요한 경우에 첨부하는 도면을 참조하면서 본 발명을 보다 상세하게 설명한다.

[0032] **<스핀-전하 변환 제어 소자>**

[0033] 본 발명자들은 상술한 과제를 해결하기 위하여 연구한 결과, 하기와 같은 발명을 안출하기에 이르렀다. 본 명세서는 강자성체층; 상기 강자성체층 상에 형성된 터널 배리어층; 상기 터널 배리어층 상에 형성된 강유전체층; 및 상기 강유전체층 상에 형성된 게이트전극;을 포함하는 스핀-전하 변환 제어 소자에 대하여 개시한다.

[0034] 본 명세서에 있어서, '전하전류'는 정방향의 스핀을 가진 전자와 역방향의 스핀을 가진 전자가 똑같은 방향으로 운동하는 경우에, 스핀의 흐름은 서로 상쇄되고, 남아있는 전하의 흐름을 의미한다.

[0035] 본 명세서에 있어서, '스핀전류'는 정방향의 스핀을 가진 전자와 역방향의 스핀을 가진 전자가 서로 반대 방향으로 운동하는 경우에, 전하의 흐름은 상쇄되고, 남아있는 스핀의 흐름을 의미한다.

[0036] 가장 간단한 스핀전류 생성방법은 비자성 물질에 강자성 물질을 접합하고, 이 접합체에 전류를 흘리는 것이다. 이때 스핀이 분극(polarization)되면서 강자성층에서 비자성층 안으로 스핀전류가 생기면서 주입된다. 그러나 스핀전류의 분극률은 각 자성층의 전기전도도에 따라 달라진다. 즉 강자성 금속/비자성 금속, 각 층의 전기전도도가 동일한 경우에는 비장성층 안에 스핀전류를 주입할 수 있다. 반면에 반도체나 유기물 등 고저항 물질에 스핀전류를 주입하면 스핀전류는 대부분 사라져 버린다.

[0037] 도 1은 본 발명의 스핀-전하 변환 제어소자를 도시한 것이다. 도 1을 참조하면, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 게이트전극(140); 강유전체층(130); 터널 배리어층(120); 및 강자성체층(110);을 포함하는 것을 확인할 수 있다.

[0038] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자에 있어서, 상기 강유전체층(130)은 강유전체로 구성된 층을 말하며, 상기 강유전체란 자연상태에서 전기편극을 가지고 있는 물질을 말한다. 상기 강유전체는 특징적으로 자발분극(spontaneous polarization)을 가지고 있을 뿐만 아니라 이 자발분극이 전기장에 의해 역전되는 현상이 나타나는 물성을 가지고 있다. 강유전체는 퀴리온도에서 상전이현상을 보이는데, 상전이온도 아래에서는 전기 쌍극자끼리의 상호작용을 통해 자발분극이 특정한 방향으로 배열하고 있다가 그 온도 이상에서는 열적 요동에 의해 자발분극을 잃게 되는 현상이 나타난다.

[0039] 본 발명에서 상기 강유전체는 2차원 형태를 가지고, 전도층 역할과 강유전체 특성을 같이 보유한 재료일 수 있으며, WTe_2, In_2Se_3, $MoTe_2$, Ge-Te, Sb_2Te_3, Sb_2Se_3, In_2Te_3, $Ge_2Sb_2Te_5$, $GeSeTe_2$, $AgSbSe_2$, Sb-Se, Ag-In-Sb-Te, $Bi2Te_3$ 및 Bi_2Se_3로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나 이상일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0040] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자에 있어서, 상기 강자성체층(110)은 강자성체로 구성된 층을 말하며, 상기 강자성체란 외부 자기장이 없는 상태에서도 자화가 유지되는 물질을 말한다. 즉, 강자성체는 자기장에 의해 생긴 스핀의 정렬이 자기장을 제거해도 유지되는 성질을 가진다. 물질의 자기적 성질을 자성(magnetism)이라고 하며, 자성은 주로 자기모멘트(magnetic moment)에 의해 정해지는데 자유원자의 자기모멘트는 세가지 주요 요인인 전자의 스핀, 핵에 대한 궤도 각운동량, 외부 자기장에 의해 유도된 궤도 각운동량의 변화에서 기인한다. 자화(magnetization)는 단위 부피당 자기모멘트로 정의되며, 자화는 스핀 정렬 상태에 따라, 상자성, 강자성, 반강자성, 준강자성(ferrimagnetism) 등으로 구분할 수 있다.

[0041] 상기 강자성체는 Co, CoFeB 및 NiFe로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나 이상일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0042] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자에 있어서, 상기 터널 배리어층(120)은 터널 배리어 물질로 구성된 층을 말하며, 상기 터널 배리어 물질은 2차원 형태를 가진 물질일 수 있고, 보다 구체적으로 hBN, $Ca(OH)_2$, $Mg(OH)_2$, SiO_2, HfO_2 및 Al_2O_3로 이루어진 군으로부터 선택된 어느 하나 이상일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0043] 또한, 본 발명은 상기 터널 배리어층(120)과 상기 강유전층을 포함함에 따라, 라쉬바 시스템을 나타낼 수 있다.

[0044] 도 2는 위상 절연체(Topological insulator, TI) 및 라쉬바 시스템의 밴드 구조를 나타내는 그림이다. 구체적으로 (a)는 TI의 밴드 구조를 나타내고, (b)는 라쉬바 시스템의 밴드 구조를 나타낸다. 상기 라쉬바 시스템이란, 라쉬바 효과에 의해 공간 반전 대칭성이 깨진 시스템을 일컫는데, 라쉬바 스핀 궤도 상호작용에 의해 밴드구조가 (b)의 밴드구조를 나타낼 수 있으며, 이는 (a)에서와 유사하게 스핀-모멘텀 커플링(spin-momentum coupled)되어 있는 형태로 나타날 수 있다.

[0045] 상기 라쉬바 효과란 고체의 표면, 이종 접합 구조의 경계면, 그리고 반전 대칭성이 깨져있는 고체 내부에서 나타나는 운동량과 스핀 방향에 따른 에너지 갈라짐을 뜻한다. 다시 말해, 원자 속 전자는 원자핵을 일정한 궤도로 돌면서(운동량), 스스로 회전(스핀)하는데, 물질의 공간 반전 대칭성이 깨지면, 전자의 운동량과 스핀이 서로 속박 되어, 전자의 강한 스핀-궤도 상호작용에 따라 전자의 밴드구조가 분리되는 현상을 라쉬바 효과라 한다. 이러한 스핀 방향에 따른 에너지 차이는 스핀-궤도 결합과 전위차에 의한 전기장의 상호 작용에 기인한다. 반전 대칭성에 의해 생성된 전기장 하에서 움직이는 전자가 있을 때, 상대론적인 효과에 의해 발현되는 자기장과 전자의 스핀 간의 결합에 의한 에너지 차이로부터 라쉬바 효과를 유도해낼 수 있다. 전자의 스핀은 방향에 따라 업스핀(up spin)과 다운스핀(down spin)으로 나뉘며 서로 대칭된 전자구조를 가지는데, 자기장을 인가하면 이것이 깨지게 되고, 이때 전자들이 특정방향으로 더 잘 흐르는 '방향성' 흐름을 가질 수 있다.

[0046] 또한 이러한 라쉬바 효과를 이용해 스핀전류를 생성, 검출하는 효과를 라쉬바-에델스타인 효과라고 부르는데, 라쉬바 효과가 2차원 물질(본 발명에서 강유전체층(130))에 유도되면 라쉬바-에델스타인 효과에 의해 전하전류와 스핀전류가 상호 전환이 가능하다. 자기장이나 자성체 없이 2차원 물질에 전류를 흘려줌으로써 스핀전류를 생성시킬 수 있음은 물론 강유전체층(130)에 흘러들어오는 스핀전류를 전하전류 혹은 전압 측정을 통해 검출할 수 있다.

[0047] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 상기 강자성체층(110)에 전류를 인가하여 스핀전류를 생성하고, 상기 생성된 스핀전류는 상기 터널 배리어층(120)에서 필터링되고, 상기 필터링된 스핀전류는 상기 강유전체층(130)에서 전하전류로 변환되고, 상기 변환된 전하전류의 방향은 상기 강유전체층(130)의 분극에 의해 제어되고, 상기 강유전체층(130)의 분극은 상기 게이트전극(140)의 부호에 의해 결정되는 것일 수 있다. 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자에 있어서, 스핀전류가 생성되고, 상기 스핀전류가 전하전류로 변환되는 과정에 대한 구체적인 내용은 하기의 <스핀-전하 변환 제어 소자의 동작 방법>에서 상세히 설명하도록 한다.

[0048] 본 발명의 터널 배리어층(120)의 두께는 높은 스핀전류 주입 효율을 위해 얇은 두께로 설정하는 것이 바람직하며, 구체적으로 0.3 내지 1 nm일 수 있다. 상기 터널 배리어층(120)의 두께가 0.3 nm 미만인 경우 스핀전류의 터널링이 안정적이지 못한 문제가 발생할 수 있고, 반면에 1 nm를 초과하는 경우, 스핀전류의 주입 효율이 저하되는 문제가 발생할 수 있다.

[0049] 또한, 본 발명의 강유전체층(130)의 두께는 상기 강유전체층(130) 내부의 분극을 더욱 효율적으로 유지할 수 있는 두께로 설정하는 것이 바람직하며, 구체적으로 0.7 내지 4 nm 일 수 있다. 상기 강유전체층(130)의 두께가 0.7 nm 미만인 경우, 너무 얇은 두께로 인해 내부 분극이 유지되지 않는 문제가 발생할 수 있고, 반면에 4 nm를 초과하는 경우 분극 효율이 저하되는 문제가 발생할 수 있다.

[0050] 본 발명의 강자성체층(110)의 두께는 상기 강자성체층(110)의 자화 안정성을 위해 두껍게 설정하는 것이 바람직하며, 구체적으로 10 내지 50 nm 일 수 있다. 상기 강자성체층(110)의 두께가 10 nm 미만 또는 50 nm를 초과하는 경우, 상기 강자성체층(110)의 자화가 안정적으로 유지되지 않는 문제가 발생할 수 있다.

[0051] 또한 본 발명의 상기 게이트 전계(Electric field)에 의한 절대값은 0.17 내지 0.8 V/nm일 수 있다. 상기 게이트 전계의 절대값이 0.17 V/nm 미만인 경우, 게이트 전계의 크기가 상기 강유전체층(130)이 포화분극을 형성할 만큼 충분하지 않을 수 있다. 반면에, 상기 게이트 전계의 절대값이 0.8 V/nm를 초과하는 경우, 소자 성능이 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 상기 게이트 전계와 관련된 구체적인 내용은 이하의 {실시예 및 평가}에서 상세

히 설명하도록 한다.

[0053] **<스핀-전하 변환 제어 소자의 동작 방법>**

[0054] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 강자성체층(110)에 전류를 인가하여 스핀전류를 생성하는 단계; 상기 생성된 스핀전류가 터널 배리어층(120)에서 필터링되는 단계; 게이트전극(140)으로부터 강유전체층(130)에 전압을 인가하여 상기 강유전체층(130)을 분극시키는 단계; 및 상기 필터링된 스핀전류가 상기 분극된 강유전체층(130)에서 전하전류로 변환되는 단계;를 포함할 수 있다.

[0055] 이하에서는 상기의 스핀-전하 변환 제어 소자의 동작 방법을 각 단계 별로 세분화하여 설명하고자 한다.

[0056] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 동작 방법은 강자성체층(110)에 전류를 인가하여 스핀전류를 생성하는 단계를 포함할 수 있다. 강자성체층(110)은 상술한대로 자기장에 의해 생긴 스핀의 정렬이 자기장을 제거해도 유지되는 성질을 나타내는데, 앙페르의 법칙에 따라 전류가 흐르면 자기장이 발생하여 이로 인해 상기 강자성체층(110)에 스핀 분극이 유도되고, 이에 따라 스핀전류가 생성될 수 있다.

[0057] 또한, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 동작 방법은 상기 생성된 스핀전류가 터널 배리어층(120)에서 필터링되는 단계를 포함한다. 보다 구체적으로 설명하면, 상기 강자성체층(110)에서 생성된 스핀전류는 상기 터널 배리어층(120)을 통과함으로써, y축 방향으로 향하는 스핀전류만을 필터링하고, 상기 y축 방향으로 향하는 스핀전류를 강유전체층(130)에 z축 방향으로 주입할 수 있다. 상기 터널 배리어층(120)으로부터 z축 방향으로 주입받은 y축 방향의 스핀전류는 상기 터널 배리어층(120)과 상기 강유전체층(130)의 계면에서 역라쉬바-에델스타인 효과(Inverse Rashba-Edelstein effect)에 의해 x축 방향의 전하전류로 변환될 수 있다.

[0058] 도 3은 역라쉬바-에델스타인 효과(Inverse Rashba-Edelstein effect)를 나타내는 그림이다. 상기 역라쉬바-에델스타인 효과란, 상기 라쉬바-에델스타인 효과와 반대로, 반전 비대칭 라쉬바 시스템에서 스핀의 축적이 스핀 편광 방향에 수직인 평면 전기장을 생성하는 효과를 일컫는다. 도 3을 참조하면, TI 및 라쉬바 시스템에서 y축 방향의 스핀전류가 계면에 쌓일 때 확산에 의한 주입으로 k-space에서 페르미 등가선(contour)들이 이동되고 그에 따라 x축 방향의 전하전류가 생성되는 스핀-전하 변환이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

[0059] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자에 있어서, 스핀전류에서 전하전류로 변환되는 과정을 도시한 그림이다. 도 4를 참조하면, 상술한대로, 강자성체층(110)에 전류를 인가하면 스핀전류가 생성되고, 생성된 스핀전류는 터널 배리어층(120)을 통과하면서 y축 방향의 스핀(업스핀 또는 다운스핀)만이 필터링되고, 상기 필터링된 스핀전류를 강유전체층(130)에 z축 방향으로 인가하면, 상기 강유전체층(130)에 인가된 스핀전류는 역라쉬바-에델스타인 효과에 의해 상기 터널 배리어층(120) 및 상기 강유전체층(130)의 계면에서 전하전류로 변환되는 것을 확인할 수 있다.

[0060] 또한, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 동작 방법은 게이트전극(140)으로부터 강유전체층(130)에 전압을 인가하여 상기 강유전체층(130)을 분극시키는 단계를 포함할 수 있다. 즉, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 강유전체의 분극을 제어함으로써, +x축 방향(0) 또는 -x축 방향(1)의 전하전류를 유도할 수 있다. 도 6(a)는 상기 터널 배리어층(120) 및 상기 강유전체층(130) 계면에 +분극이 유도되어, 상기 터널 배리어층(120) 및 상기 강유전체층(130)의 계면에는 업스핀이 축적됨에 따라 +x축 방향의 전류(0)이 흐르는 것을 나타내고, 도 6(b)는 상기 터널 배리어층(120) 및 상기 강유전체층(130) 계면에 -분극이 유도되어, 상기 터널 배리어층(120) 및 상기 강유전체층(130)의 계면에는 다운스핀이 축적됨에 따라 -x축 방향의 전류(1)가 흐르는 것을 나타낸다.

[0061] 상기 강유전체의 분극은 상기 게이트전극(140)의 부호에 의해 결정될 수 있다.

[0062] 상기 강유전체층(130)의 분극을 제어하는 것은 상기 강유전체층(130)의 라쉬바 스핀 방향을 제어하는 것일 수 있다.

[0063] 다시 말해, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 게이트 전계 부호에 따라 강유전체층(130) 분극 방향이 제어하여, 강유전체층(130) 및 터널 배리어층(120) 계면에서의 라쉬바 스핀 방향이 제어할 수 있다. 보다 구체적으로 설명하면, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 게이트전극(140)에 + 전압을 인가하면, 상기 강유전체층(130)에 있어서, 상기 게이트전극(140)과 인접한 부분은 -로 분극되고, 상기 터널 배리어층(120)과 인접한 부분은 +로 분극되어, 상기 터널 배리어층(120) 및 상기 강유전체층(130)의 계면에는 업스핀이 축적됨에 따라 +x축 방향의 전류(0)가 흐를 수 있다. 반대로, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 게이트전극(140)에 -전압을 인가하면, 상기 강유전체층(130)에 있어서, 상기 게이트전극(140)과 인접한 부분은 +로 분극되고, 상기 터널 배리어층(120)과 인접한 부분은 -로 분극되어, 상기 터널 배리어층(120) 및 상기 강유전체층(130)의 계면에는 다운

스핀이 축적됨에 따라 -x축 방향의 전류(1)이 흐를 수 있다.

[0065] **<스핀-전하 변환 제어 소자의 제조 방법>**

[0066] 이하에서는, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 제조 방법에 대해 개시하고자 한다.

[0067] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 제조 방법은 게이트전극(140) 상에 강유전체층(130)을 형성하는 단계; 상기 강유전체층(130) 상에 터널 배리어층(120)을 형성하는 단계; 및 상기 터널 배리어(120)층 상에 강자성체층(110)을 형성하는 단계;를 포함한다.

[0068] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 제조 방법에 있어서, 상기 게이트 전극(140) 상에 강유전체층(130)을 형성하는 방법은 분자선성장법(Molecular beam epitaxy, MBE), 금속 유기물 화학 증착법(MOCVD), 스퍼터(Sputter), 전자빔 증착법 및 이온주입법(ion implantation)으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나의 방법으로 수행되는 것일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0069] 상기 강유전체층(130) 상에 터널 배리어층(120)을 형성하는 단계는 기계적 박리법을 통해 수행될 수 있다. 상기 기계적 박리법은 2차원 평면상 물질의 층간에 물리적인 힘을 가하여 박리하는 방법으로 대표적인 예로 주사탐침현미경을 이용하는 방법과 스카치 테이프를 이용한 방법을 들 수 있다. 이러한 방법은 2차원 평면상으로는 강한 공유 결합을 형성하는 반면, 수직인 방향으로는 상대적으로 약한 반데르발스 힘으로 연결되어 있어 층간의 마찰계수가 매우 낮은 2차원 평면상의 물질을 상대적으로 약한 접착력을 이용하여 분리하는 방법이다.

[0070] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자의 강유전체층(130) 및 터널 배리어층(120)의 사진이다. 보다 구체적으로, (a)는 강유전체층(130)으로서 WTe_2를 기계적 박리법을 통해 도입한 것을 나타내고, (b)는 터널 배리어층(120)으로서 hBN을 기계적 박리법을 통해 도입한 것을 나타낸다. 도 5를 참조하면, 본 발명의 강유전체층(130) 및 터널 배리어층(120)이 2차원 평면상의 박막의 형태로 도입인 것을 확인할 수 있다.

[0071] 상기 터널 배리어층(120) 상에 강자성체층(110)을 형성하는 단계는 리소그리피(lithography) 공정을 통해 수행될 수 있다. 상기 리소그래피 공정이란, 극히 미세하고 복잡한 전자회로를 반도체 기판에 그려 집적회로를 만드는 기술을 일컫는다. 감광성 수지를 도포한 기판에 포토마스크(원판)를 통해 자외선을 조사하면 포토마스크에 새겨진 IC의 패턴이 포토레스트에 전사된다. 보다 미세한 패턴을 형성하려면 자외선으로는 한계가 있어 X선이나 전자빔의 응용도 연구되고 있다. 리소그래피 공정의 구체적인 예로는 포토 리소그래피, 전자빔 리소그래피, 임프린트 리소그래피(Imprint Lithography) 등이 있다.

[0073] **<제벡(Seebeck) 스핀 터널 효과를 이용한 스핀-전하 변환 제어 소자>**

[0074] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 상기 강자성체층(110)에 줄 발열(Joule heating)을 통한 제벡(Seebeck) 스핀 터널 효과에 의해 스핀전류를 생성하는 것을 더 포함할 수 있다. 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자가 제벡 스핀 터널 효과를 이용하기 위해서는 상기 강자성체층(110)에 줄 발열(Joule heating)을 위한 전류회로가 더 포함될 수 있으며, 제벡 스핀 터널 효과를 이용하는 스핀-전하 변환 제어 소자의 구체적인 예는 이하의 {실시예 및 평가}에서 도면을 예시로 들어 설명하도록 한다.

[0075] 제벡 효과(seebeck effect)는 열전 효과의 대표적인 현상으로, 상기 열전 효과란 열을 흘렸을 때 발생하는 전기적 현상 또는 전기를 흘렸을 때 발생하는 열적 현상을 말한다.

[0076] 상기 제벡(Seebeck) 스핀 터널 효과란, spin caloritronics라는 자성 도체에 온도차가 존재할 때 스핀전류가 발생하는 것으로 공간적으로 균일하지 않은 스핀 축적이 스핀전류를 발생시키는 것을 말한다. 다시 말해, 강자성체에 전류를 흘리면, 상기 강자성체의 양단에 온도차가 발생하게 되고, 상기 온도차에 의해 상기 강자성체 내부에서 업 스핀과 다운 스핀의 화학적 퍼텐셜 차이가 생겨, 업 스핀과 다운 스핀의 제벡(Seebeck) 계수에 차이로 인해, 온도의 구배(temperature gradient) 방향으로 스핀전류가 생성되게 된다.

[0077] 상기 제벡 스핀 터널 효과는 상기 강자성체에 전류가 흐름에 따라 줄 발열(Joule heating) 현상에 의한 것일 수 있다.

[0078] 줄 발열(Joule heating)은 다른 말로 옴 발열 또는 저항적 발열이라 하며, 도체에 전류가 흐름으로 인해 열이 발생하는 과정을 말한다. 줄 발열은 전류를 이루고 있는 이동 입자(전자)와 도체를 구성하고 있는 원자 이온 사이의 상호작용에 의해 발생된다. 전자 회로 내에서 극성이 부여된 입자들은 전기장에 의해 가속되지만, 이온들과 충돌할 때마다 운동에너지를 잃게 되고 반대로 이온의 에너지는 증가한다. 이러한 과정을 통해 이온의 운동

에너지 또는 진동에너지가 증가하게 되면 그것이 열로 나타나고 도체의 온도가 높아질 수 있다.

[0080] 이하, 첨부한 도면 및 실시예들을 참조하여 본 명세서가 청구하는 바에 대하여 더욱 자세히 설명한다. 다만, 본 명세서에서 제시하고 있는 도면 내지 실시예 등은 통상의 기술자에 의하여 다양한 방식으로 변형되어 여러 가지 형태를 가질 수 있는 바, 본 명에서의 기재사항은 본 발명을 특정 개시 형태에 한정되는 것이 아니고, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 균등물 내지 대체물을 포함하고 있는 것으로 보아야 한다. 또한, 첨부된 도면은 본 발명을 통상의 기술자로 하여금 더욱 정확하게 이해할 수 있도록 돕기 위하여 제시되는 것으로서 실제보다 과장되거나 축소되어 도시될 수 있다.

[0081]

[0082] **{실시예 및 평가}**

[0083] **<실시예>**

[0084] 실시예 1

[0085] 강자성체로서 CoFeB를 패터닝 후 증착시킨 후 기계적 박리법을 이용해 상기 CoFeB 상에 터널링 배리어층으로서 hBN을 CoFeB 보다 넓은 폭으로 전사시켰다. 상기 hBN 상에 채널 전극으로서 Pt를 증착시키고, 이 후 기계적 박리법을 이용해 상기 Pt 상에 강유전체층으로서 WTe_2를 전사시켰다. 이후 게이트전극으로서 Pt를 패터닝 한 후 상기 강유전체층 상에 증착시켜 스핀-전하 변환 제어 소자를 제조 하였다(이하 실시예 1 이라 함).

[0086] 상기 실시예 1에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자를 도 6에 도시하였다. 보다 구체적으로, (a)는 전하전류(0)를 도출하는 스핀-전하 제어 소자를 나타내고, (b)는 전하전류(1)를 도출하는 스핀-전하 제어 소자를 나타낸다.

[0088] 실시예 2

[0089] (제벡(Seebeck) 스핀 터널 효과를 이용한 스핀-전하 변환 제어 소자)

[0090] 채널 전극으로서 Pt를 증착시킨 후 강유전체층으로서 WTe_2을 기계적 박리법을 통하여 상기 Pt 상에 전사시켰다. 터널링 배리어층으로서 hBN은 상기 WTe_2보다 넓은 폭으로 하여 상기 WTe_2 상에 기계적 박리법을 이용해 전사시켰다. 이후 강자성체층으로서 CoFeB를 패터닝한 후 상기 hBN 상에 증착시켜 스핀-전하 변환 제어 소자를 제조하였다(이하 실시예 2라함).

[0091] 상기 실시예 2에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자를 도 7에 도시하였다. 도 7에 도시된 스핀-전하 변환 제어 소자는 강자성체층에서, 줄 발열(Joule heating)에 의해 상기 강자성체층에서 스핀전류를 생성할 수 있다. 보다 구체적으로, (a)는 제벡(Seebeck) 스핀 터널 효과를 이용한 스핀-전하 변환 제어 소자를 도식화한 것이고, (b)는 전하전류(0)를 도출하는 스핀-전하 제어 소자를 나타내고, (c)는 강자성체층에 줄 발열(Joule heating)을 위한 전류 회로가 연결되어 줄 발열에 의한 제벡(Seebeck) 스핀 터널링 효과에 따라 스핀전류가 생성되고, 상기 생성된 스핀전류는 강유전체의 분극에 따라 방향이 결정된 전하전류(1)을 도출하는 스핀-전하 제어 소자를 나타낸다.

[0093] **<평가>**

[0094] **스핀-전하 변환 평가**

[0095] 도 8은 본 발명의 실시예 1의 게이트 전계 크기에 따른 이력곡선을 나타내는 그래프이다. 보다 구체적으로 (a)는 게이트 전계 크기가 0.07 V/nm 및 0.085 V/nm일 때, (b)는 게이트 전계 크기가 0.17 V/nm일 때의 실시예 1의 이력곡선을 나타낸다. 도 8을 참조하면, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 게이트 전계의 크기가 0.17 V/nm 미만에서는 상기 강유전체층이 포화분극을 형성하지 못함에 따라 minor loop를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 반면에, 게이트 전계의 크기가 0.17 V/nm로 설정되면, 상기 강유전체층이 포화분극에 도달하여 이력곡선을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이력곡선이 나타남으로써, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자에서 강유전체층의 분극 방향에 따라 상기 강유전체층 내의 라쉬바 스핀 효과의 제어를 통한 스핀-전하 전환의 방향을 반전시킬 수 있음을 예측할 수 있다.

[0096] **스핀 터널링 효과 평가**

[0097] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따라 제조된 스핀-전하 변환 제어 소자의 채널 전극 전압에 따른 전류 변화를 나

타내는 그래프이다. 도 9를 참조하면, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 채널 전극 전압이 점차 증가함에 따라 비선형 그래프를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 상기 hBN이 강자성체층과 강유전체층 사이에 터널 배리어층으로 삽입되어, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자에서 상기 hBN으로 인한 스핀 터널링 효과가 작용되고 있음을 의미한다.

[0099] 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자는 이차원 강유전체층이 삽입되어, 상기 이차원 강유전체층의 분극을 제어하는 것을 통해, 전하전류의 방향을 제어할 수 있다.

[0100] 또한, 본 발명의 스핀-전하 변환 제어 소자의 동작 방법은 게이트전극 부호를 변환하는 간단한 방법을 통하여, 전하전류의 방향을 제어할 수 있다.

[0101] 이상의 설명은 본 발명의 기술 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과한 것으로서, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 다양한 수정 및 변형이 가능할 것이다.

[0102] 따라서, 본 발명에 개시된 실시예들은 본 발명의 기술 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시예에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 본 발명의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

[0103] 110 : 강자성체층

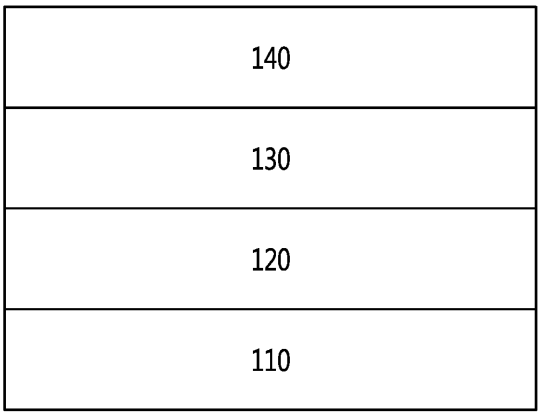
120 : 터널 배리어층

130 : 강유전체층

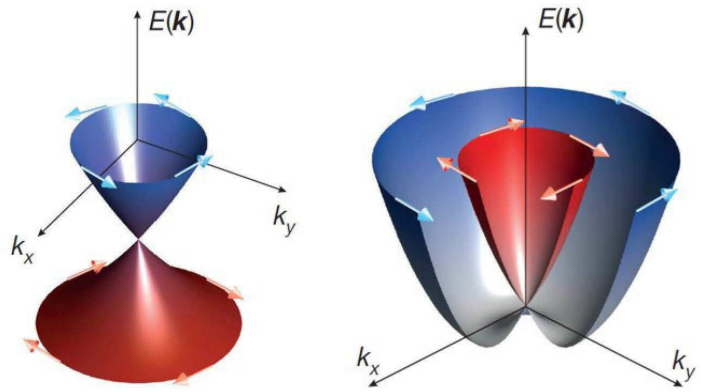
140 : 게이트전극

도면

도면1

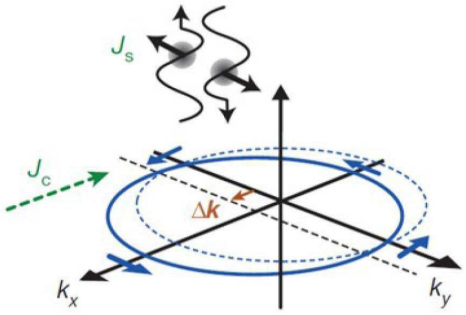


도면2

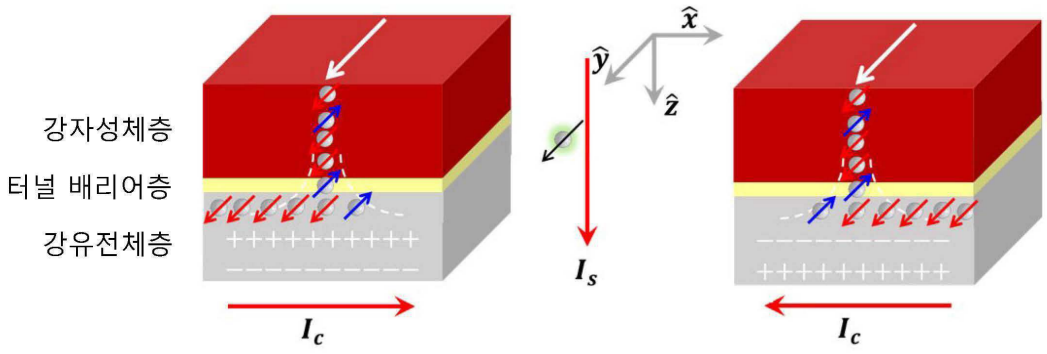


(a) (b)

도면3

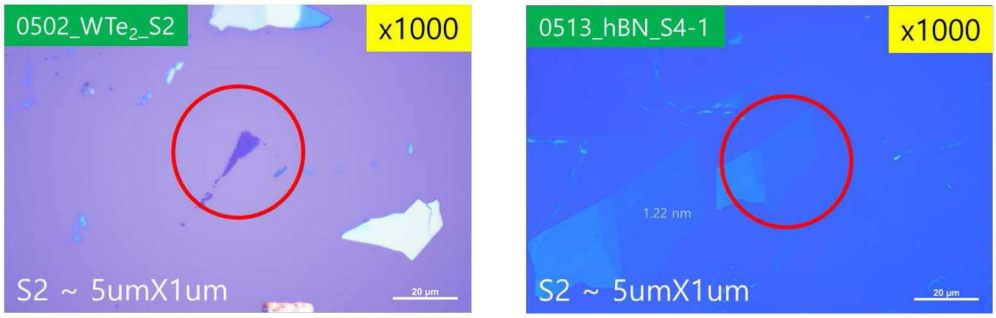


도면4



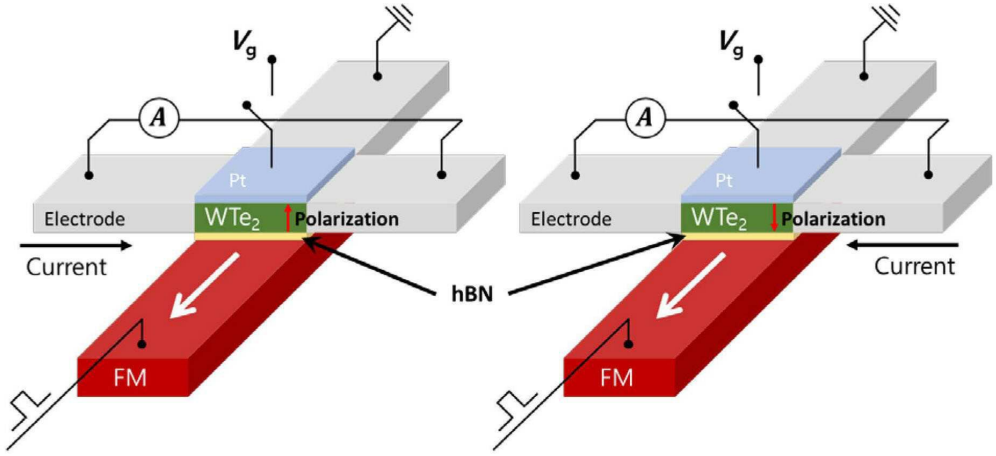
(a) (b)

도면5


0502_WTe2_S2
x1000
S2 ~ 5umX1um
20 μm
0513_hBN_S4-1
x1000
1.22 nm
S2 ~ 5umX1um
20 μm

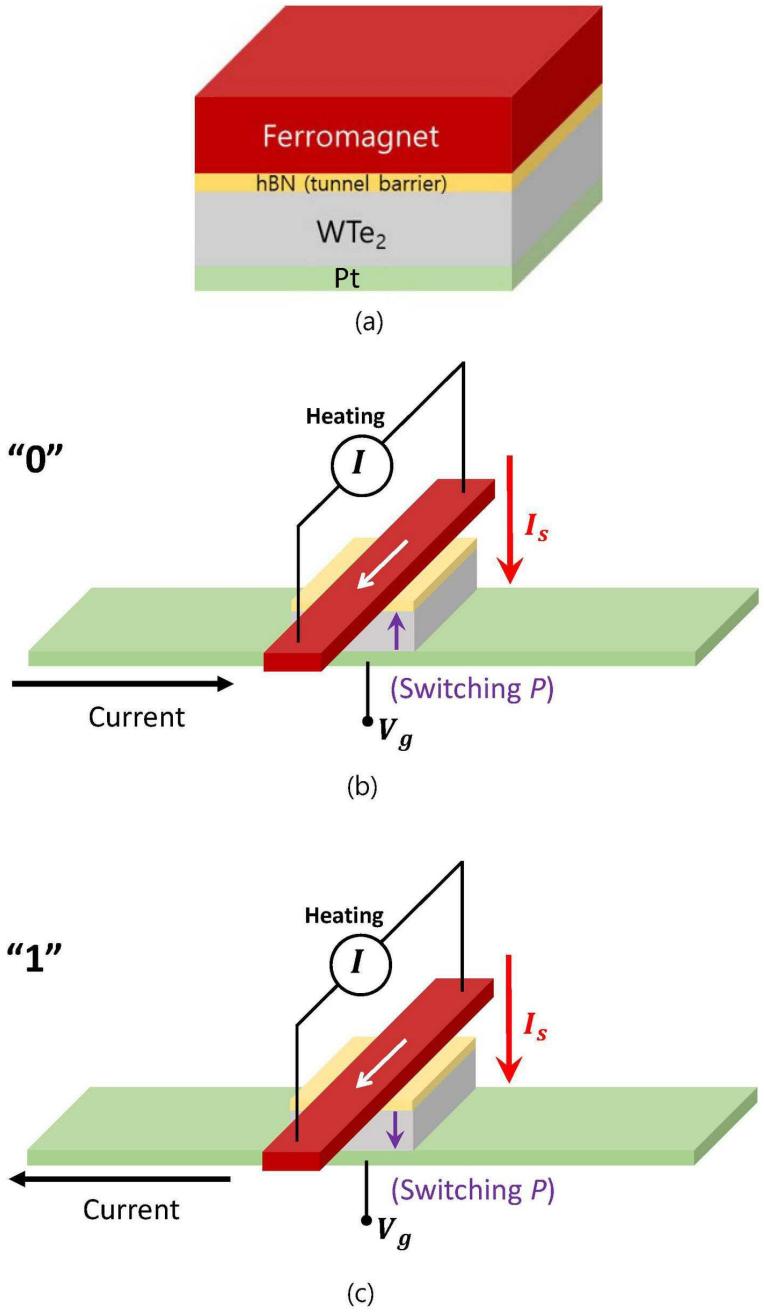
(a) (b)

도면6

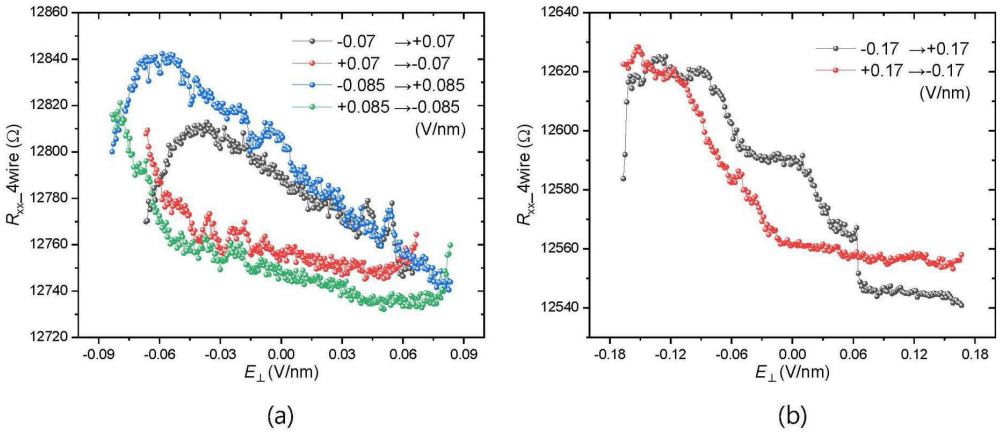

Vg
A
Pt
Electrode
WTe2
Polarization
Current
hBN
FM
Vg
A
Pt
Electrode
WTe2
Polarization
Current
FM

(a) (b)

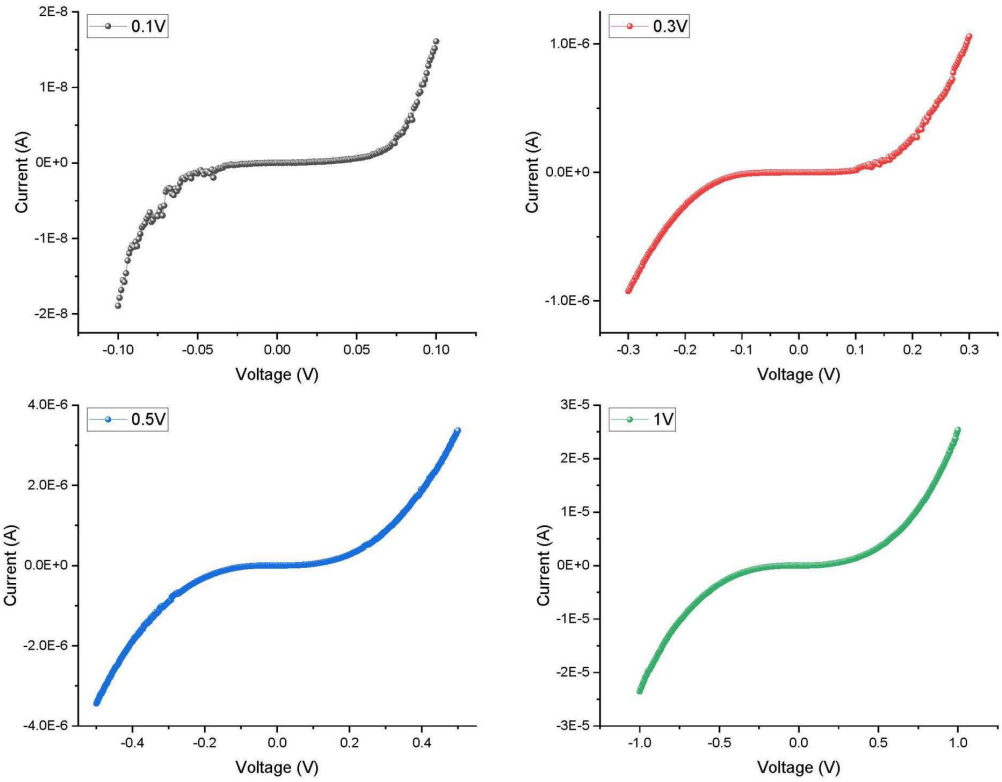
도면7


Ferromagnet
hBN (tunnel barrier)
WTe2
Pt
(a)
"0"
Heating
I
Is
Current
(Switching P)
Vg
(b)
"1"
Heating
I
Is
Current
(Switching P)
Vg
(c)

도면8


-0.07 →+0.07
+0.07 →-0.07
-0.085 →+0.085
+0.085 →-0.085
(V/nm)
R_{xx}_4wire (Ω)
$E_\perp$ (V/nm)
(a)
-0.17 →+0.17
+0.17 →-0.17
(V/nm)
R_{xx}_4wire (Ω)
$E_\perp$ (V/nm)
(b)

도면9


0.1V
Current (A)
Voltage (V)
0.3V
Current (A)
Voltage (V)
0.5V
Current (A)
Voltage (V)
1V
Current (A)
Voltage (V)