(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0170367
(43) 공개일자 2024년12월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01F 1/40 (2006.01) *C23C 14/48* (2006.01)
H01B 1/02 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01F 1/408 (2013.01)
C23C 14/48 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0169525
(22) 출원일자 2023년11월29일
심사청구일자 2023년11월29일
(30) 우선권주장
1020230067711 2023년05월25일 대한민국(KR)

(71) 출원인
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
최석호
경기도 수원시 영통구 매영로 366, 726동 1103호 (영통동, 현대아파트)
(74) 대리인
김연권

전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 **3차원 디락 준금속을 2차원 바일 준금속으로 상전이하는 방법 및 이를 통해 상전이된 준금속**

(57) 요 약

본 발명은 3차원 디락 준금속을 2차원 바일 준금속으로 상전이하는 방법 및 이를 통해 상전이된 준금속에 관한 것으로서, 일실시예에 따른 디락 준금속은 비스무트-안티모니계 준금속, 나트륨-비스무트계 준금속 및 카드뮴-비소계 준금속 중 어느 하나의 준금속이며, 기판 상에 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성되어 바일 준금속으로의 상전이가 유도될 수 있다.

대 표 도 - 도1a



(52) CPC특허분류
H01B 1/02 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711194255
과제번호	00208310
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	(혁신법)이공학개인기초연구사업-중견후속(유형1-2)
연구과제명	2차원 디락 물질과 이질 접합구조의 특성 규명 및 소자 응용
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경희대학교산학협력단
연구기간	2023.03.01 ~ 2026.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

바일 준금속(weyl semimetal, WSM)으로의 상전이가 유도된 디락 준금속(dirac semimetal, DSM)에 관한 것으로,

상기 디락 준금속은 비스무트-안티모니계 준금속, 나트륨-비스무트계 준금속 및 카드뮴-비소계 준금속 중 어느 하나의 준금속이며, 기판 상에 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성되어 상기 바일 준금속으로의 상전이가 유도되는 것을 특징으로 하는

디락 준금속.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 비스무트-안티모니계 준금속은 하기 화학식1로 표현되는 준금속인

[화학식1]

$Bi_{1-x}Sb_x$

여기서, x는 $0 < x < 1$을 만족하는 양의 실수인

디락 준금속.

청구항 3

제1항에 있어서,

분자 빔 성장법(molecular beam epitaxy)을 통해 상기 기판 상에 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성되는 것을 특징으로 하는

디락 준금속.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 기판은 갈륨 비소(GaAs) 기판인 것을 특징으로 하는

디락 준금속.

청구항 5

기판을 준비하는 단계 및

상기 기판 상에 디락 준금속(dirac semimetal, DSM)을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성하여, 상기 디락 준금속에 대한 바일 준금속(weyl semimetal, WSM)으로의 상전이를 유도하는 단계

를 포함하고,

상기 디락 준금속은 비스무트-안티모니계 준금속, 나트륨-비스무트계 준금속 및 카드뮴-비소계 준금속 중 어느 하나의 준금속인 것을 특징으로 하는

디락 준금속의 상전이 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 비스무트-안티모니계 준금속은 하기 화학식1로 표현되는 준금속인

[화학식1]

$Bi_{1-x}Sb_x$

여기서, x는 0 < x < 1을 만족하는 양의 실수인

디락 준금속의 상전이 방법.

청구항 7

제5항에 있어서,

상기 상전이를 유도하는 단계는,

분자 빔 성장법(molecular beam epitaxy)을 통해 상기 디락 준금속을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성하는 것을 특징으로 하는

디락 준금속의 상전이 방법.

청구항 8

제5항에 있어서,

상기 기판을 준비하는 단계는,

상기 기판을 세정하는 단계 및

카드뮴 원소(Cd) 및 텔루륨 원소(Te)의 혼합물을 250 °C 내지 350 °C의 온도로 어닐링하여 상기 세정된 기판 상에 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층을 형성하는 단계

를 더 포함하고,

상기 상전이를 유도하는 단계는,

비스무트 원소(Bi) 및 안티모니 원소(Sb)의 혼합물을 250 °C 내지 350 °C의 온도로 어닐링하여, 상기 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층 상에 상기 디락 준금속을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는

디락 준금속의 상전이 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 상전이를 유도하는 단계는,

상기 카드뮴 원소(Cd) 및 텔루륨 원소(Te)의 혼합물을 250 °C 내지 350 °C의 온도로 어닐링하여 상기 디락 준금속 상에 텔루르화 카드뮴(CdTe) 캡핑층을 형성하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는

디락 준금속의 상전이 방법.

청구항 10

제6항에 있어서,

상기 기판은 갈륨 비소(GaAs) 기판인 것을 특징으로 하는

디락 준금속의 상전이 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 준금속의 상전이 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 3차원 디락 준금속을 2차원 바일 준금속으로 상전이하는 기술적 사상에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 현재, 디락 준금속(dirac semimetals, DSMs), 바일 준금속(weyl semimetals, WSMs), 노달-라인 준금속(nodal-line semimetals) 및 삼중점 준금속(triple-point semimetals) 등의 토폴로지 준금속(topological semimetals, TSM)에 대한 연구가 지속되고 있다.

[0003] 특히, 저온(low temperature) 또는 강한 자기장(strong magnetic field)의 상황에서 디락 준금속에서 바일 준금속으로의 상전이에 대한 연구가 지속되고 있으나, 상술한 연구들은 상전이의 안정성 문제에서 한계를 보이고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 한국등록특허 제10-2364726호, "이온 주입을 통해 준금속을 영구적으로 상전이하는 방법 및 이를 통해 상전이된 준금속"

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명은 디락 준금속의 두께 의존 특성을 고려하여, 디락 준금속을 바일 준금속으로 상전이 시키는 기술을 제공하고자 한다.

[0006] 또한, 본 발명은 디락 준금속의 두께를 최적화 제어하여, 보다 안정적으로 디락 준금속을 바일 준금속으로 상전이 시키는 기술을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 일실시예에 따른 디락 준금속은 바일 준금속(weyl semimetal, WSM)으로의 상전이가 유도되는 준금속으로, 여기서 디락 준금속은 비스무트-안티모니계 준금속, 나트륨-비스무트계 준금속 및 카드뮴-비소계 준금속 중 어느 하나의 준금속이며, 기판 상에 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성되어 상기 바일 준금속으로의 상전이가 유도될 수 있다.

[0008] 일측에 따르면, 비스무트-안티모니계 준금속은 하기 화학식1로 표현되는 준금속일 수 있다.

[0009] [화학식1]

[0010] $Bi_{1-x}Sb_x$

[0011] (여기서, x는 $0 < x < 1$을 만족하는 양의 실수)

[0012] 일측에 따르면, 디락 준금속은 분자 빔 성장법(molecular beam epitaxy)을 통해 기판 상에 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성될 수 있다.

[0013] 일측에 따르면, 기판은 갈륨 비소(GaAs) 기판일 수 있다.

[0014] 본 발명의 일실시예에 따른 디락 준금속의 상전이 방법은 기판을 준비하는 단계 및 기판 상에 디락 준금속(dirac semimetal, DSM)을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성하여 디락 준금속에 대한 바일 준금속(weyl semimetal, WSM)으로의 상전이를 유도하는 단계를 포함하고, 여기서 디락 준금속은 비스무트-안티모니계 준금속, 나트륨-비스무트계 준금속 및 카드뮴-비소계 준금속 중 어느 하나의 준금속일 수 있다.

[0015] 일측에 따르면, 비스무트-안티모니계 준금속은 상기 화학식1로 표현되는 준금속일 수 있다.

[0016] 일측에 따르면, 상전이를 유도하는 단계는 분자 빔 성장법(molecular beam epitaxy)을 통해 디락 준금속을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성할 수 있다.

[0017] 일측에 따르면, 기판을 준비하는 단계는 기판을 세정하는 단계 및 카드뮴 원소(Cd) 및 텔루륨 원소(Te)의 혼합물을 250°C 내지 350°C의 온도로 어닐링하여 세정된 기판 상에 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층을 형성하는 단계를 더 포함하고, 상전이를 유도하는 단계는 비스무트 원소(Bi) 및 안티모니 원소(Sb)의 혼합물을 250°C 내지 350°C의 온도로 어닐링하여, 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층 상에 디락 준금속을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성할 수 있다.

[0018] 일측에 따르면, 상전이를 유도하는 단계는 카드뮴 원소(Cd) 및 텔루륨 원소(Te)의 혼합물을 250 °C 내지 350 °C의 온도로 어닐링하여 디락 준금속 상에 텔루르화 카드뮴(CdTe) 캡핑층을 형성하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0019] 일측에 따르면, 기판은 갈륨 비소(GaAs) 기판일 수 있다.

발명의 효과

[0020] 일실시예에 따르면, 본 발명은 디락 준금속의 두께 의존 특성을 고려하여, 디락 준금속을 바일 준금속으로 상전이 시킬 수 있다.

[0021] 일실시예에 따르면, 본 발명은 디락 준금속의 두께를 최적화 제어하여, 보다 안정적으로 디락 준금속을 바일 준금속으로 상전이 시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0022] 도 1a 및 도 1b는 일실시예에 따른 디락 준금속을 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 일실시예에 따른 디락 준금속의 상전이 방법을 설명하기 위한 도면이다.

도 3 내지 4d는 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 TMR 특성 및 LMR 특성을 설명하기 위한 도면이다.

도 5는 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 제백 효과 및 홀 효과를 설명하기 위한 도면이다.

도 6a 및 도 6b는 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 에피택셜 변형 효과를 설명하기 위한 도면이다.

도 7은 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 SHG 및 THz 방출에 따른 반전 대칭 깨짐 현상을 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 본 명세서에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시예들에 대해서 특정한 구조적 또는 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로서, 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 명세서에 설명된 실시예들에 한정되지 않는다.

[0024] 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 변경들을 가할 수 있고 여러 가지 형태들을 가질 수 있으므로 실시예들을 도면에 예시하고 본 명세서에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 특정한 개시형태들에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 변경, 균등물, 또는 대체물을 포함한다.

[0025] 제1 또는 제2 등의 용어를 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 구성요소들은 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만, 예를 들면 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채, 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소는 제1 구성요소로도 명명될 수 있다.

[0026] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성요소들 간의 관계를 설명하는 표현들, 예를 들면 "~사이에"와 "바로~사이에" 또는 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.

[0027] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예들을 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서,

"포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 설시된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함으로 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0028] 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 가진다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0030] 이하, 실시예들을 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다. 그러나, 특허출원의 범위가 이러한 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0032] 도 1a 및 도 1b는 일실시예에 따른 디락 준금속을 설명하기 위한 도면이다.

[0033] 도 1a 및 도 1b를 참조하면, 일실시예에 따른 디락 준금속(130)은 두께 의존 특성을 고려하여, 디락 준금속을 바일 준금속으로 상전이 시킬 수 있다.

[0034] 또한, 일실시예에 따른 디락 준금속(130)은 두께가 최적화 제어되어, 보다 안정적으로 바일 준금속으로 상전이가 유도될 수 있다.

[0035] 구체적으로, 디락 준금속(130)은 비스무트-안티모니계 준금속(130-1), 나트륨-비스무트계 준금속(일례로, Na_3Bi 준금속) 및 카드뮴-비소계 준금속(일례로, Cd_3As_2 준금속) 중 어느 하나의 준금속이며, 바람직하게는 디락 준금속(130)은 비스무트-안티모니계 준금속(130-1)일 수 있다.

[0036] 또한, 디락 준금속(130)은 기판 상에 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성되어 상기 바일 준금속으로의 상전이가 유도될 수 있다.

[0037] 다시 말해, 디락 준금속(130)은 10 nm 이하의 두께로 형성되어 바일 준금속으로 상전이될 수 있으며, 이러한 디락 준금속(130)의 두께 의존 특성은 이후 도 3 내지 도 7의 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

[0038] 일측에 따르면, 비스무트-안티모니계 준금속(130-1)은 하기 화학식1로 표현되는 준금속일 수 있다.

[0039] [화학식1]

[0040] $Bi_{1-x}Sb_x$

[0041] 여기서, x는 $0 < x < 1$을 만족하는 양의 실수일 수 있으며, 바람직하게는, 다락 준금속은 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성된 $Bi_{0.96}Sb_{0.04}$ 박막일 수 있다.

[0042] 다시 말해, 다락 준금속(130)은 비스무트-안티모니계 디락 준금속($Bi_{1-x}Sb_x$)일 수 있으며, 결정 구조는 능면체이며 각각의 단위 셀에서 두 개의 원자가 $R\bar{3}m$ 대칭 구조를 가질 수 있다.

[0043] 구체적으로, 일실시예에 따른 디락 준금속(130)의 페르미온은 그래핀의 2차원 디락에 대응되는 3차원 구조체일 수 있다. 또한, 그래핀의 디락 콘(cone)과는 달리 디락 준금속은 세 방향(binary, bisectric, trigonal) 모두를 따라 선형적인 운동량 에너지 분산(energy-momentum dispersions)을 가질 수 있다.

[0044] 또한, 디락 준금속 결정은 디락 노드가 2개의 바일 노드로 분할되는 것을 방지하기 위해, 시간 역전 대칭(time reversal symmetry) 및 역-대칭(inversion symmetry)을 필요할 수 있다.

[0045] 한편, 토폴로지 절연체(topological insulator)에서 일반 절연체(normal insulator)로 전환하는 동안 크리티컬 포인트(critical point)에서 전도대(conduction band)와 가전자대(valence band)의 터칭 포인트(touching points)는 역-대칭의 존재 여부에 따라 3D 디락 포인트 또는 바일 포인트가 될 수 있다.

[0046] 또한, 전도대와 가전자대 사이의 토폴로지 얽힘(topological entanglement)을 특정 짓는 값인 베리 곡률(Berry curvature)은 고정된 키랄성을 가진 운동량 공간에서 단극자 역할을 하는 바일 포인트(Weyl points)에서 특이점

이 될 수 있다.

[0047] 일측에 따르면, 기판(110)은 갈륨 비소(GaAs) 기판일 수 있으며, 디락 준금속(130)은 분자 빔 성장법(molecular beam epitaxy)을 통해 기판(110) 상에 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성될 수 있다.

[0048] 한편, 기판(110) 상부에는 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층(120)이 형성될 수 있으며, 디락 준금속(130)은 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층(120) 상부에 형성될 수 있다.

[0049] 또한, 디락 준금속(130) 상부에는 디락 준금속(130)의 산화를 방지하기 위해 텔루르화 카드뮴(CdTe) 캡핑층(140)이 형성될 수도 있다.

[0050] 일실시예에 따른 디락 준금속(130)은 이후 실시예 도 2를 통해 보다 구체적으로 설명하기로 한다.

[0052] 도 2는 일실시예에 따른 디락 준금속의 상전이 방법을 설명하기 위한 도면이다.

[0053] 도 2를 참조하면, 210 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 기판을 준비할 수 있다.

[0054] 일측에 따르면, 210 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 기판을 세정한 후, 카드뮴 원소(Cd) 및 텔루륨 원소(Te)의 혼합물을 250 °C 내지 350 °C의 온도로 어닐링하여 세정된 기판 상에 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층을 형성할 수 있으며, 여기서 기판은 갈륨 비소(GaAs) 기판일 수 있다.

[0055] 구체적으로, 210 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 갈륨 비소(GaAs) 기판을 메탄올로 10분 동안 세정한 후, 세정한 기판을 희석된 HF 산 용액(HF : DI water = 1 : 20)에서 1분 동안 식각하여 자연 산화층(native oxidized layer)을 제거할 수 있다.

[0056] 다음으로, 210 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 자연 산화층이 제거된 기판을 30분 동안 초고진공에서 Te 플럭스(Te flux)에 노출시키면서 580 °C로 가열할 수 있으며, 이를 통해 기판에 존재하는 잔류 불순물과 잔류 산화물을 제거할 수 있다.

[0057] 다음으로, 210 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 디락 준금속($Bi_{1-x}Sb_x$ 박막)의 성장을 위해 320 °C의 온도에서 잔류 불순물과 잔류 산화물이 제거된 기판 상에 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층을 성장시킨 후, 150 °C로 냉각시킬 수 있다.

[0058] 220 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 기판 상에 디락 준금속(dirac semimetal, DSM)을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성하여, 디락 준금속에 대한 바일 준금속(weyl semimetal, WSM)으로의 상전이를 유도할 수 있으며, 여기서, 디락 준금속은 비스무트-안티모니계 준금속, 나트륨-비스무트계 준금속(일례로, Na_3Bi 준금속) 및 카드뮴-비소계 준금속(일례로, Cd_3As_2 준금속) 중 어느 하나의 준금속일 수 있다.

[0059] 바람직하게는, 디락 준금속은 상술한 화학식1의 비스무트-안티모니계 준금속($Bi_{1-x}Sb_x$ 박막)이며, 기판 상에 2 nm 내지 10 nm의 최적화된 두께로 형성될 수 있다.

[0060] 일측에 따르면, 220 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 분자 빔 성장법(molecular beam epitaxy)을 통해 디락 준금속을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성할 수 있다.

[0061] 구체적으로, 220 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 분자 빔 성장법에 기초하여 비스무트 원소(Bi) 및 안티모니 원소(Sb)의 혼합물을 250 °C 내지 350 °C의 온도로 어닐링하여, 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층 상에 디락 준금속을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 형성할 수 있다.

[0062] 또한, 220 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 카드뮴 원소(Cd) 및 텔루륨 원소(Te)의 혼합물을 250 °C 내지 350 °C의 온도로 어닐링하여 디락 준금속 상에 텔루르화 카드뮴(CdTe) 캡핑층을 형성할 수도 있다.

[0063] 바람직하게는, 220 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 320 °C의 온도에서 텔루르화 카드뮴(CdTe) 버퍼층 상에 디락 준금속(일례로, $Bi_{1-x}Sb_x$ 박막)을 2 nm 내지 10 nm의 두께로 성장시킬 수 있다.

[0064] 또한, 210 단계에서 일실시예에 따른 상전이 방법은 320 °C의 온도에서 디락 준금속 상에 텔루르화 카드뮴

(CdTe) 캡핑층을 2 nm의 두께로 성장시킬 수 있다.

[0066] 도 3 내지 4d는 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 TMR 특성 및 LMR 특성을 설명하기 위한 도면이다.

[0067] 도 3 내지 4d를 참조하면, 도 3의 (a) 및 (b)는 각각 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 5nm 두께의 디락 준금속(구체적으로, $Bi_{0.96}Sb_{0.04}$ 박막)에 대한 온도(T) 및 자기장(B)의 변화에 따른 TMR 특성 및 LMR 특성을 각각 도시하고, 도 3의 (c) 및 (d)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 4nm 두께의 디락 준금속에 대한 온도(T) 및 자기장(B)의 변화에 따른 TMR 특성 및 LMR 특성을 각각 도시한다.

[0068] 또한, 도 3의 (e) 및 (f)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 3nm 두께의 디락 준금속에 대한 온도(T) 및 자기장(B)의 변화에 따른 TMR 특성 및 LMR 특성을 각각 도시하고, 도 3의 (g) 및 (h)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 2nm 두께의 디락 준금속에 대한 온도(T) 및 자기장(B)의 변화에 따른 TMR 특성 및 LMR 특성을 각각 도시한다.

[0069] 도 4a의 (a) 및 (b)는 각각 온도(T)가 1.7K 및 50K일 때 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 5 nm)의 디락 준금속에 대한 TMR 특성을 도시하고, 도 4a의 (c) 및 (d)는 각각 온도(T)가 1.7K 및 100K일 때 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 5 nm)의 디락 준금속에 대한 LMR 특성을 도시한다.

[0070] 또한, 도 4b의 (a) 및 (b)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 10nm 두께의 디락 준금속에 대한 서로 다른 온도(2K 내지 300K)에서의 TMR 특성 및 LMR 특성을 각각 도시하고, 도 4b의 (c) 및 (d)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 50nm 두께의 디락 준금속에 대한 서로 다른 온도(2K 내지 300K)에서의 TMR 특성 및 LMR 특성을 각각 도시한다.

[0071] 또한, 도 4c의 (a) 및 (b)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 100nm 두께의 디락 준금속에 대한 서로 다른 온도(2K 내지 300K)에서의 TMR 특성 및 LMR 특성을 각각 도시하고, 도 4c의 (c) 및 (d)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 300nm 두께의 디락 준금속에 대한 서로 다른 온도(2K 내지 300K)에서의 TMR 특성 및 LMR 특성을 각각 도시한다.

[0072] 또한, 도 4d의 (a) 및 (b) 각각은 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 300 nm)의 디락 준금속에 대한 디페이징 길이(l_ϕ)를 2D HLN(Hikami-Larkin-Nagaoka) 및 HLN 공식으로 각각 도출한 결과를 도시한다.

[0073] 여기서, TMR(transverse MR) 및 LMR(longitudinal MR)은 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 디락 준금속의 결정에서의 자기장(B) 필드 대 전기장(E) 필드의 상대적인 방향을 의미하며, 구체적으로, TMR은 자기장(B) 필드와 전기장(E) 필드의 방향이 수직인 상태(즉, $B \perp E$)를 의미하고, LMR은 자기장(B) 필드와 전기장(E) 필드의 방향이 평행인 상태(즉, B//E)를 의미한다.

[0074] 도 3의 (a) 내지 (h)에 따르면, 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 일실시예에 따른 디락 준금속은 자기장(B) = 0 부근에서 샤프한 첨두(Sharp cusps)가 관찰되며 온도가 증가함에 따라 점차 약해지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 QI(quantum interference) 현상인 WAL(weak anti-localization)에 기인하는 것으로 분석된다.

[0075] 일실시예에 따른 디락 준금속의 TMR의 거동은 보다 높은 온도에서 자기장(B) 필드가 증가함에 따라 LMR이 감소한다는 점에서 LMR의 거동과 대조되며, 이러한 현상은 NMR(negative LMR)임을 의미한다. 여기서, NMR은 키랄 이상(chiral anomaly)을 포함한 다양한 메커니즘에 기인하는 것으로 알려져 있으며, 이는 온도 의존성에 의해 구별될 수 있다.

[0076] 한편, 일실시예에 따른 디락 준금속의 WAL 특성은 두께가 얇을수록 더 강하게 나타나고, 관찰을 위한 임계 온도는 두께가 2 nm일 때 최소 50K까지 증가하는데, 이는 TMR과 LMR 모두에서 공통적으로 나타나는 특성인 것으로 분석되었다.

[0077] 도 4a 내지 도 4c에 따르면, NMR은 100K 이상의 온도(T)에서 종방향(longitudinal)의 구성에서 관찰되며, 그 크기는 디락 준금속의 두께에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

[0078] 구체적으로, 250K 이상의 온도(T)의 경우에는 모든 두께에 대해 NMR만 관찰되며, 결정적으로 이러한 고유한 온도(T) 및 두께(d) 종속 MR 특성은 두께(d)가 5nm인 얇은 층에서만 관찰되는 것으로 나타났다.

[0079] 특히, 디락 준금속의 두께가 50 nm 내지 300 nm의 두꺼운 층으로 형성된 경우에는 온도(T) 및 두께(d)에 관계없이 자기장(B) 필드의 전체 범위에 걸쳐 어떠한 첨두도 없이 양의 TMR 및 양의 LMR 만 나타나는 것으로 분석되었다.

[0080] 한편, 디락 준금속의 두께가 10 nm인 경우에는 첨두 구조가 10K 및 50K 온도에서 TMR과 LMR 각각에 대해 나타나기 때문에 10 nm 미만의 얇은 층과 50 nm 내지 300 nm의 두꺼운 층의 중간 특성을 보이는 것으로 분석되며, 다른 온도에서는 두꺼운 층과 비슷한 특성을 보이는 것으로 분석된다.

[0081] 도 4d에 따르면, 디락 준금속은 디페이징 길이(l_ϕ)가 두께 보다 큰 경우 WAL이 2D 레이어에서 관찰되나, 10K 보다 높은 온도에서는 감소하여 WAL이 사라지는 것으로 나타났다.

[0082] 구체적으로, 디페이징 길이(l_ϕ)는 두께(d)에 관계없이 온도(T)가 증가함에 따라 갑자기 감소하는 것으로 관찰되며, 이 동작은 온도(T)가 10 K 보다 작고 두께가 2nm인 경우를 제외하고, 상대적으로 얇은 두께에서 보다 강하게 나타나는 것으로 분석된다.

[0083] 보다 구체적으로, 상술한 MR의 두께 및 온도 의존 거동과 디페이징 길이의 분석 결과는 10 nm 이하의 두께를 갖는 일실시예에 따른 디락 준금속(구체적으로, $Bi_{0.96}Sb_{0.04}$ 박막)이 2D 또는 준 2D 국소화 영역에 있음을 의미하며, 반면 50 nm 이상의 두께를 갖는 디락 준금속은 3D 영역에 있음을 의미한다.

[0085] 도 5는 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 제백 효과 및 홀 효과를 설명하기 위한 도면이다.

[0086] 도 5를 참조하면, 도 5의 (a) 및 (b)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 100 nm)의 디락 준금속(구체적으로, $Bi_{0.96}Sb_{0.04}$ 박막)에 대한 온도 변화에 따른 제백 계수(S)의 측정 결과를 도시하고, 도 5의 (c)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 100 nm)의 디락 준금속에 대한 제백 계수(S)를 300K의 온도에서 측정한 결과를 도시한다.

[0087] 또한, 도 5의 (d) 내지 (f)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 300 nm)의 디락 준금속에 대한 홀 저항률(Hall resistivity)(r_{yx})을 4K의 온도에서 측정한 결과를 도시한다.

[0088] 도 5의 (a) 내지 (c)에 따르면, 일실시예에 따른 디락 준금속은 10 nm 이하의 두께를 갖는 경우, 온도(T)가 증가함에 따라 제벡 계수(S)는 양수 값으로 증가 하지만, 두께가 50 nm 이상인 경우에는 온도에 따라 절대 값이 증가하는 음수 값을 나타내는 것으로 분석되었다. 즉, 디락 준금속은 10 nm 이하의 두께를 갖는 경우에는 제벡 계수(S)가 p-type과 유사하고, 50 nm 이상의 두께를 갖는 경우에는 제벡 계수(S)가 n-type과 유사한 것으로 나타났다.

[0089] 즉, 일실시예에 따른 디락 준금속은 300 K의 온도 및 소정의 자기장(B) 필드(여기서는, 8T)에서 제백 계수(S)가 디락 준금속의 두께 특성에 매우 강력한 영향을 받는 것으로 분석되었다.

[0090] 구체적으로, 디락 준금속의 두께가 50 nm 내지 300 nm인 경우에는 제백 계수(S)가 감소하는 것으로 나타났고, 디락 준금속의 두께가 2 nm 내지 3 nm로 매우 얇은 경우에는 제백 계수(S)가 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 제백 계수(S)에 대한 자기장(B) 필드의 영향은 디락 준금속의 두께가 50 nm 이상인 경우에는 강하게 나타나지만, 디락 준금속의 두께가 10 nm 이하인 경우에는 약하게 나타나는 것으로 분석되었다.

[0091] 도 5의 (d) 내지 (f)의 홀 저항률 (r_{yx})의 측정 결과에 따르면, 10 nm 이하의 두께에서 일실시예에 따른 디락 준금속은 p-type에서 n-type으로의 전이가 명확히 관찰되는 것을 확인할 수 있다.

[0093] 도 6a 및 도 6b는 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 에피택셜 변형 효과를 설명하기 위한 도면이다.

[0094] 도 6a의 (a)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 300 nm)의 디락 준금속에 대한 라만 스펙트럼의 측정 결과를 도시하고, 도 6a의 (b)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 300 nm)의 디락 준금속에 대한 라만 피크의 측정 결과를 도시한다.

[0095] 도 6b의 (a) 및 (b)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 300 nm)의 디락 준금속에 대한 Bi 4f 및 Sb 3d 원자 코어 레벨의 XPS 스펙트럼의 측정 결과를 도시하고, 도 6의 (c)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 300 nm)의 디락 준금속에 대한 XPS 피크의 FWHM(full width at

half maximum)의 측정 결과를 도시한다.

[0096] 도 6a 및 도 6b에 따르면, 300 nm 두께의 디락 준금속에서는 4개의 라만 피크가 관찰되었으나 잘 분해되지는 않은 것을 확인할 수 있으며, 이러한 현상은 디락 준금속에서 바일 준금속으로의 위상 전이 과정에서 IS 브레이킹(breaking)을 야기하는 에피택셜 변형(epitaxial strain)에 의해 발생이 되는 것으로 분석된다.

[0097] 한편, 모든 XPS 피크는 10 nm 이하의 두께를 갖는 디락 준금속에 대해 FWHM의 급격한 증가를 보이는 것으로 분석되었다.

[0099] 도 7은 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 SHG 및 THz 방출에 따른 반전 대칭 깨짐 현상을 설명하기 위한 도면이다.

[0100] 도 7을 참조하면, 도 7의 (a)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 300 nm)의 디락 준금속에 대한 SHG 패턴 대 방위각(Φ)의 분석 결과를 도시하고, 도 7의 (b)는 바일 준금속으로의 상전이가 유도된 서로 다른 두께(2 nm 내지 300 nm)의 디락 준금속에 대한 선형 편파 THz 파의 진폭 대 방위각(Φ)의 분석 결과를 도시한다.

[0101] 도 7에 따르면, 일실시예에 따른 디락 준금속에 대한 SHG 패턴은 두 가지 그룹(두께가 10 nm 이하인 그룹 및 50 nm 이상인 그룹)으로 명확히 구분되는 것을 확인할 수 있다.

[0102] 구체적으로, 도 7의 (a)는 두께가 10 nm 이하인 그룹의 경우에 IS 브레이킹이 발생하였음을 명확이 보여주며, 이는 두께가 10 nm 이하의 두께가 디락 준금속이 바일 준금속으로의 상전이를 유도하는 임계값임을 의미한다.

[0103] 또한, 일실시예에 따른 디락 준금속은 두께가 10 nm 이하인 경우 매우 큰 THz 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 두께가 10 nm 이하인 경우에 IS 브레이킹이 발생하였음을 의미한다.

[0105] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들면, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 장치, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

[0106] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

부호의 설명

[0107] 110 : 기판 120: 버퍼층

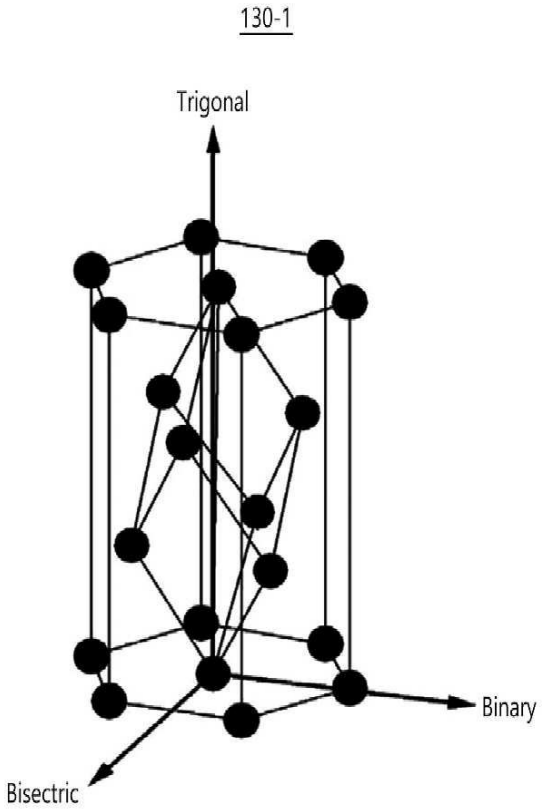
130: 디락 준금속 140: 캡핑층

도면

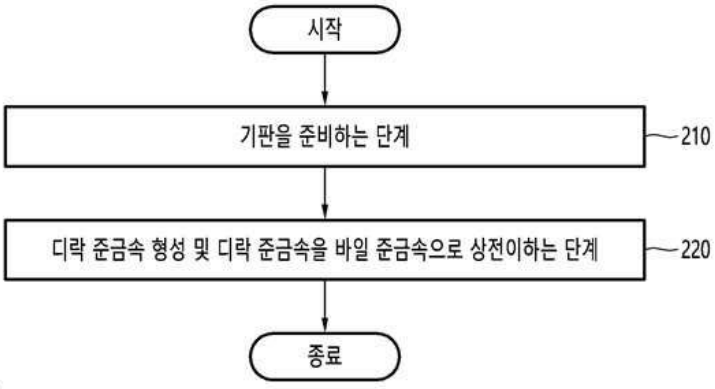
도면1a



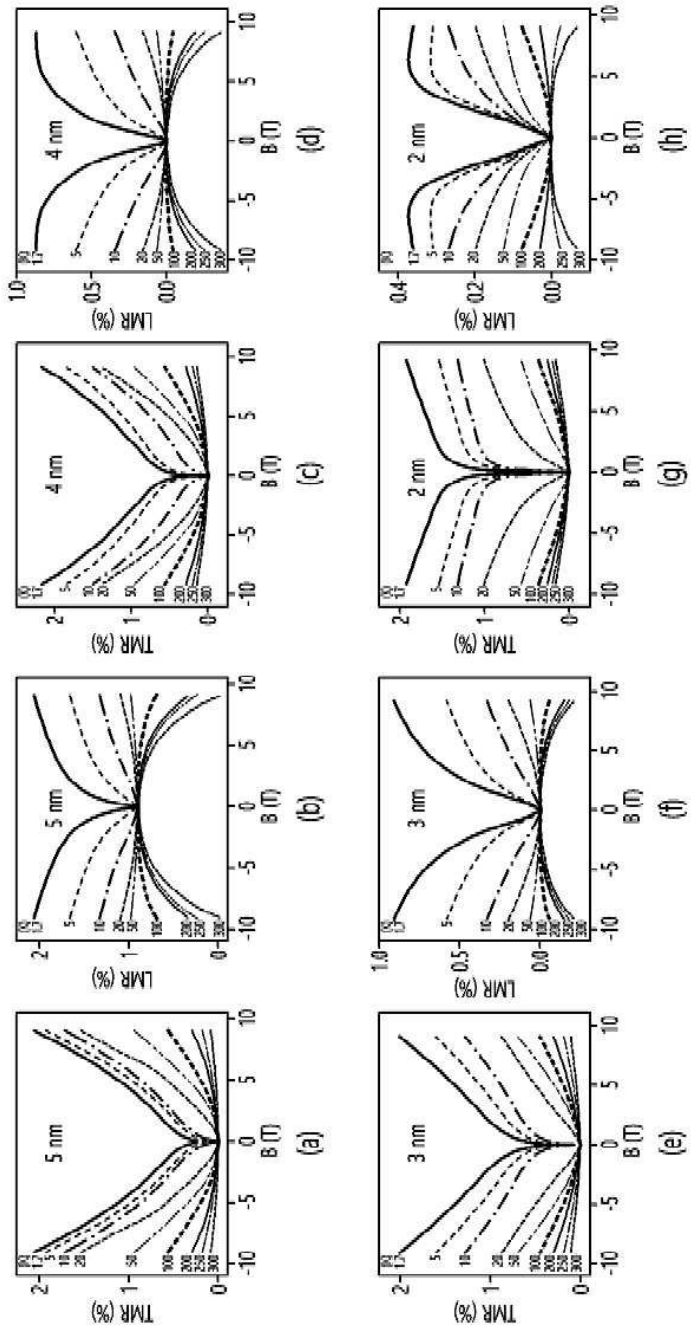
도면1b


130-1
Trigonal
Binary
Bisectric

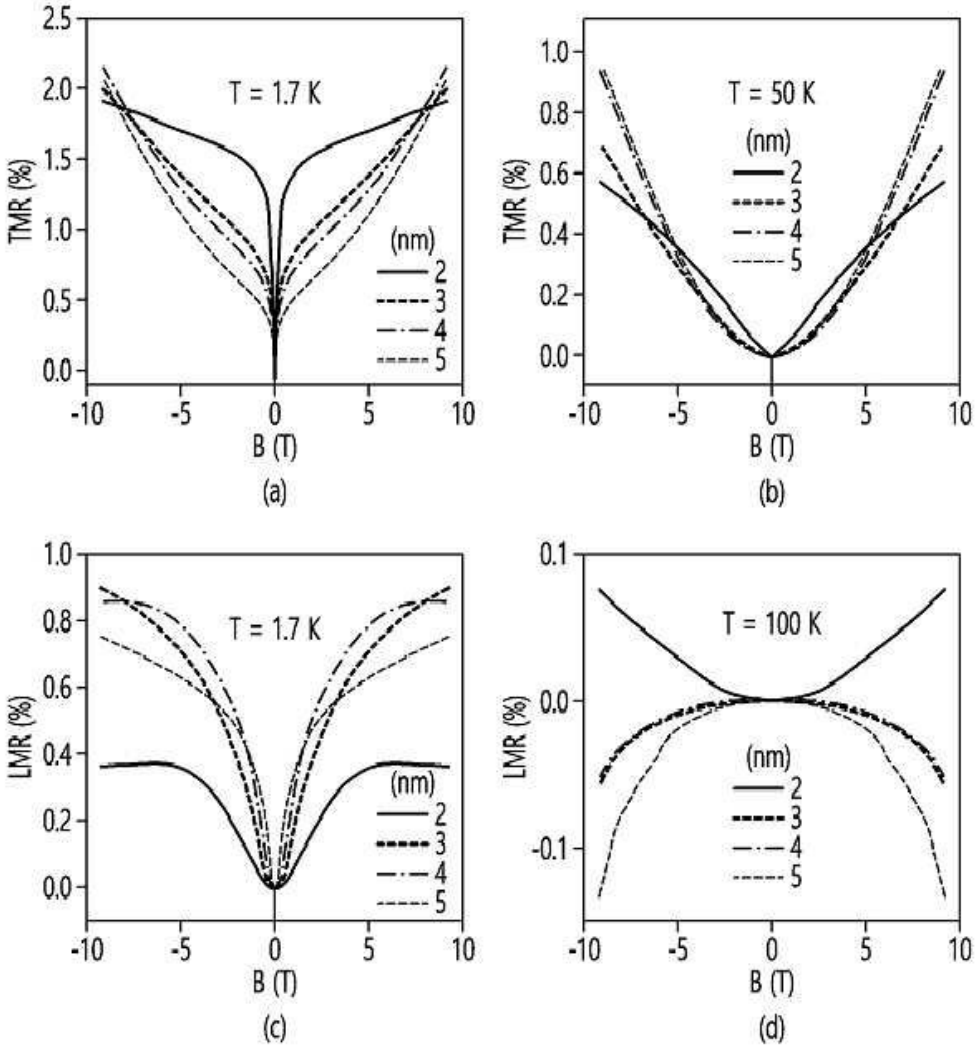
도면2


시작
기판을 준비하는 단계
210
디락 준금속 형성 및 디락 준금속을 바일 준금속으로 상전이하는 단계
220
종료

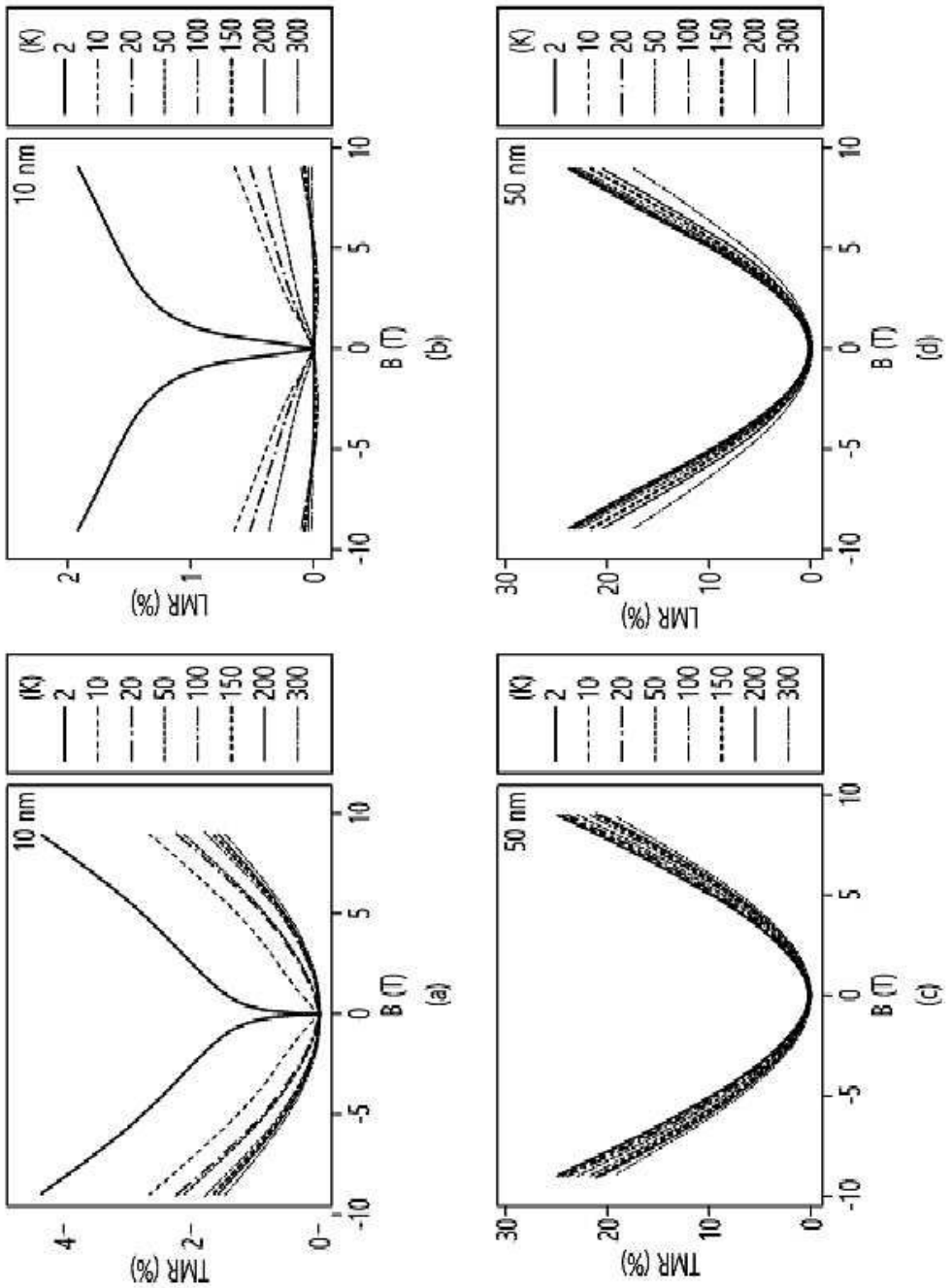
도면3



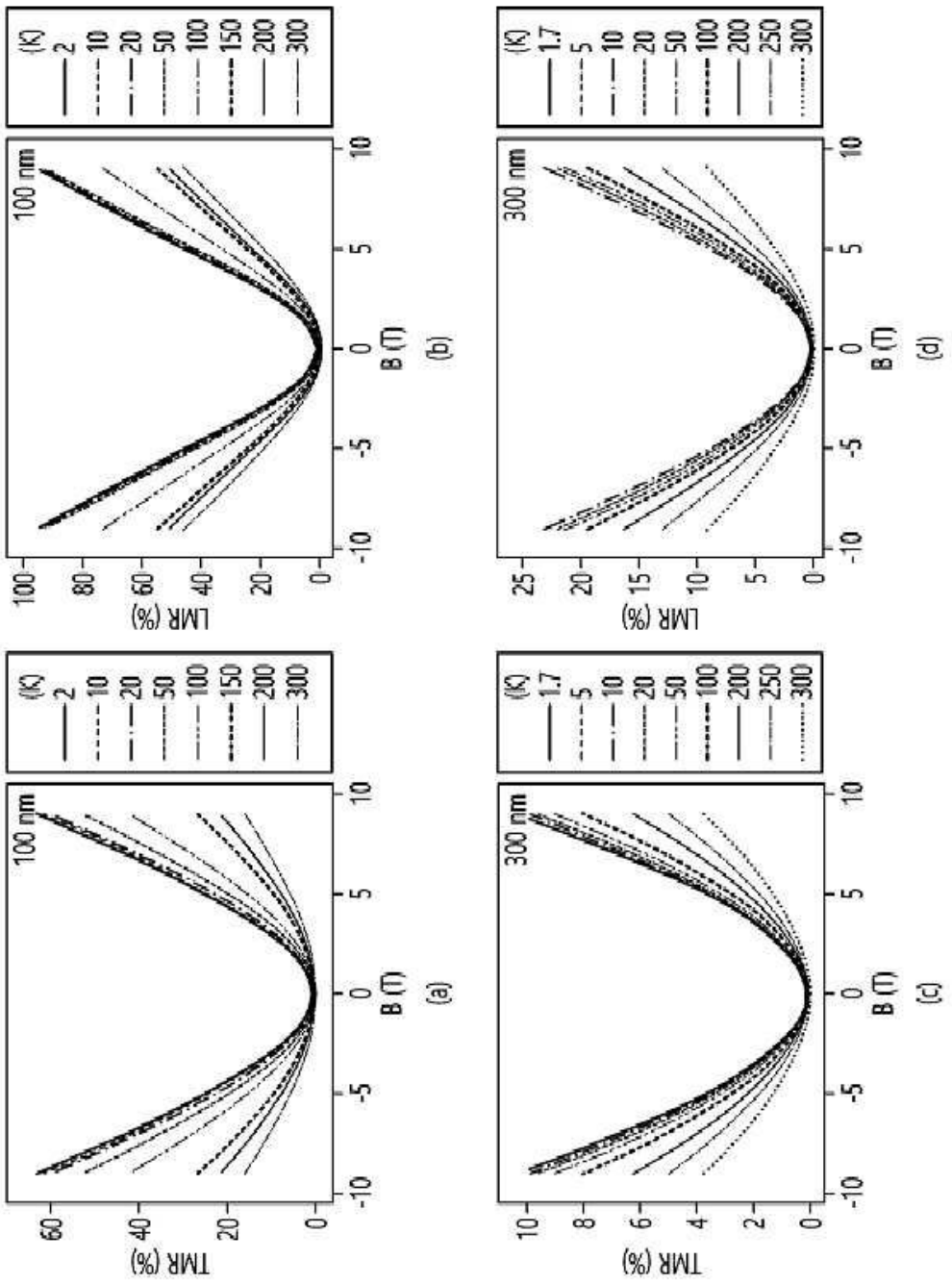
도면4a


T = 1.7 K
TMR (%)
B (T)
(nm)
2
3
4
5
(a)
T = 50 K
TMR (%)
B (T)
(nm)
2
3
4
5
(b)
T = 1.7 K
LMR (%)
B (T)
(nm)
2
3
4
5
(c)
T = 100 K
LMR (%)
B (T)
(nm)
2
3
4
5
(d)

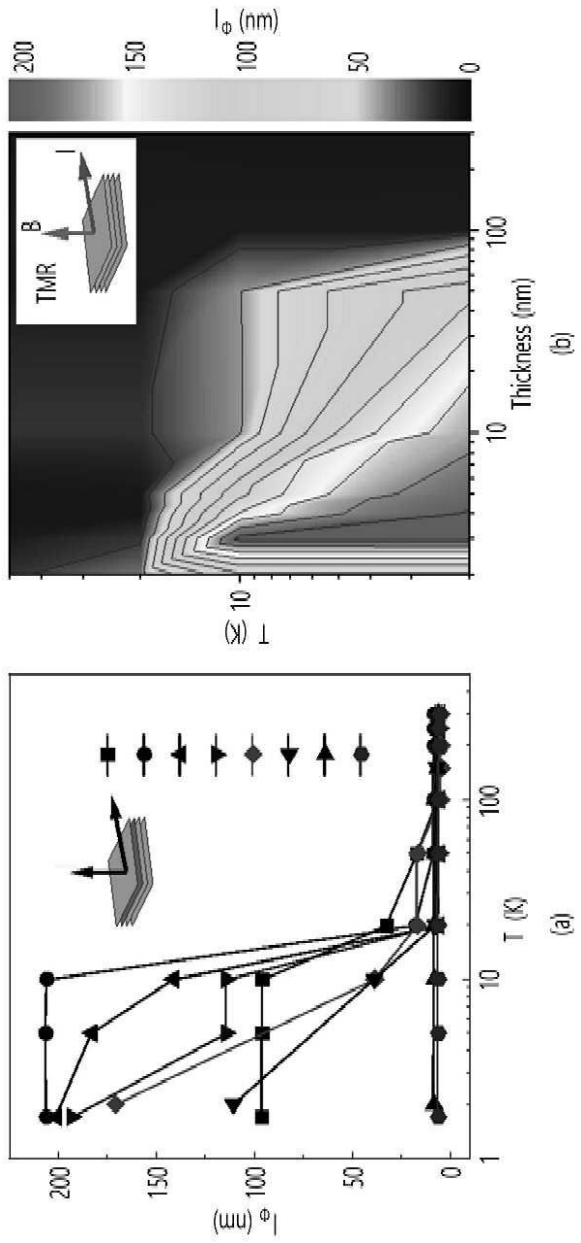
도면4b



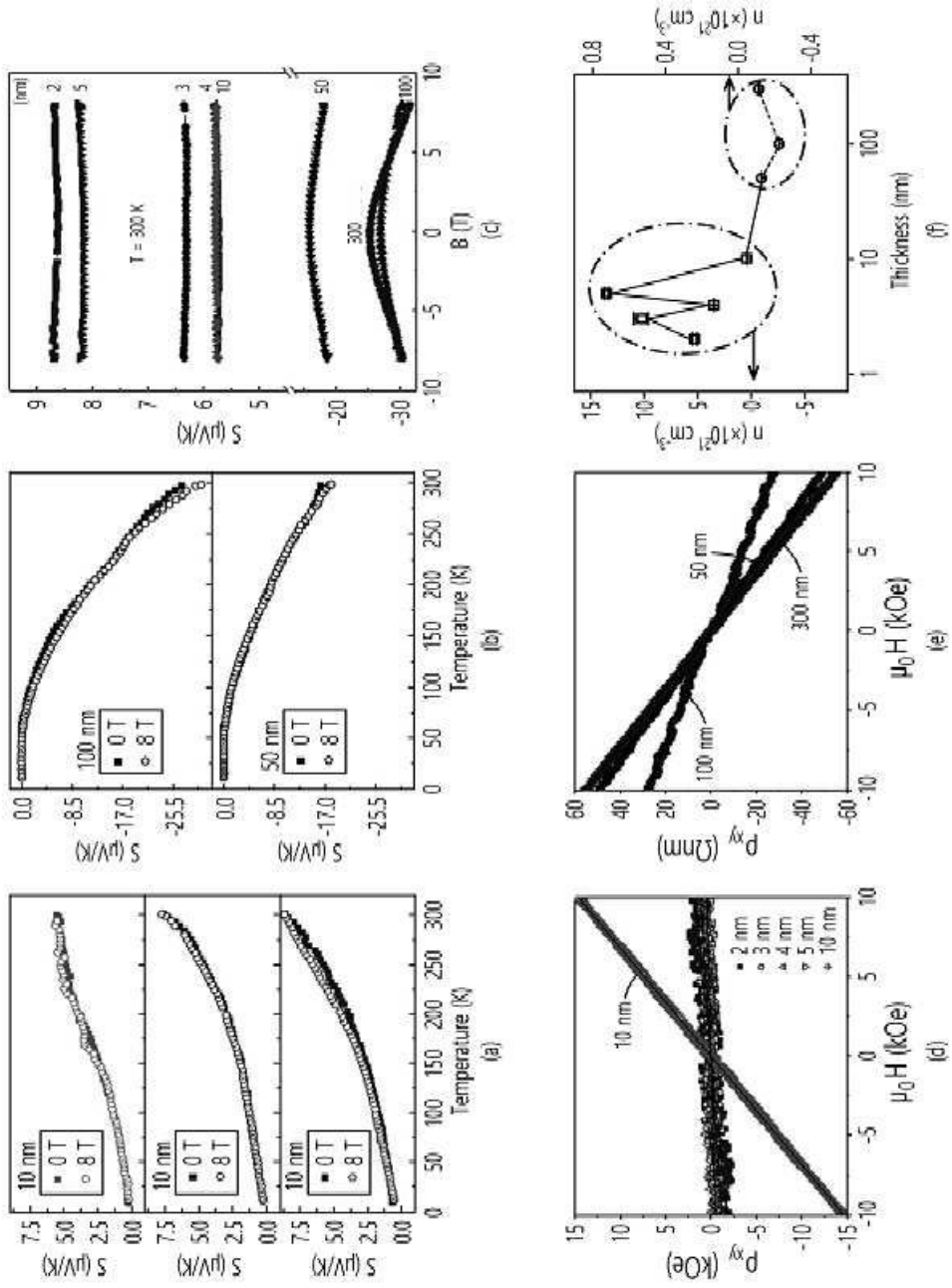
도면4c


100 nm
TMR (%)
B (T)
(a)
(K)
2
10
20
50
100
150
200
300
100 nm
LMR (%)
B (T)
(b)
300 nm
TMR (%)
B (T)
(c)
(K)
1.7
5
10
20
50
100
200
250
300
300 nm
LMR (%)
B (T)
(d)

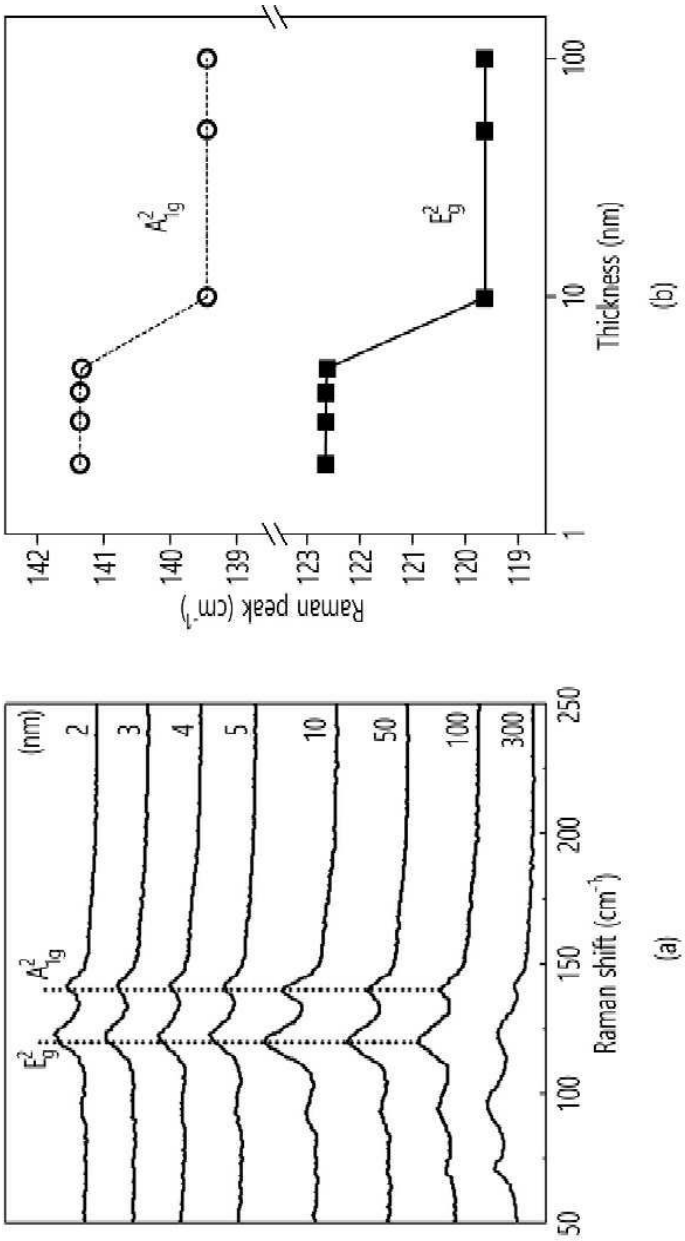
도면4d


l_ϕ (nm)
200
150
100
50
0
TMR
B
I
T (K)
10
Thickness (nm)
100
(b)
l_ϕ (nm)
200
150
100
50
0
1
10
T (K)
100
(a)

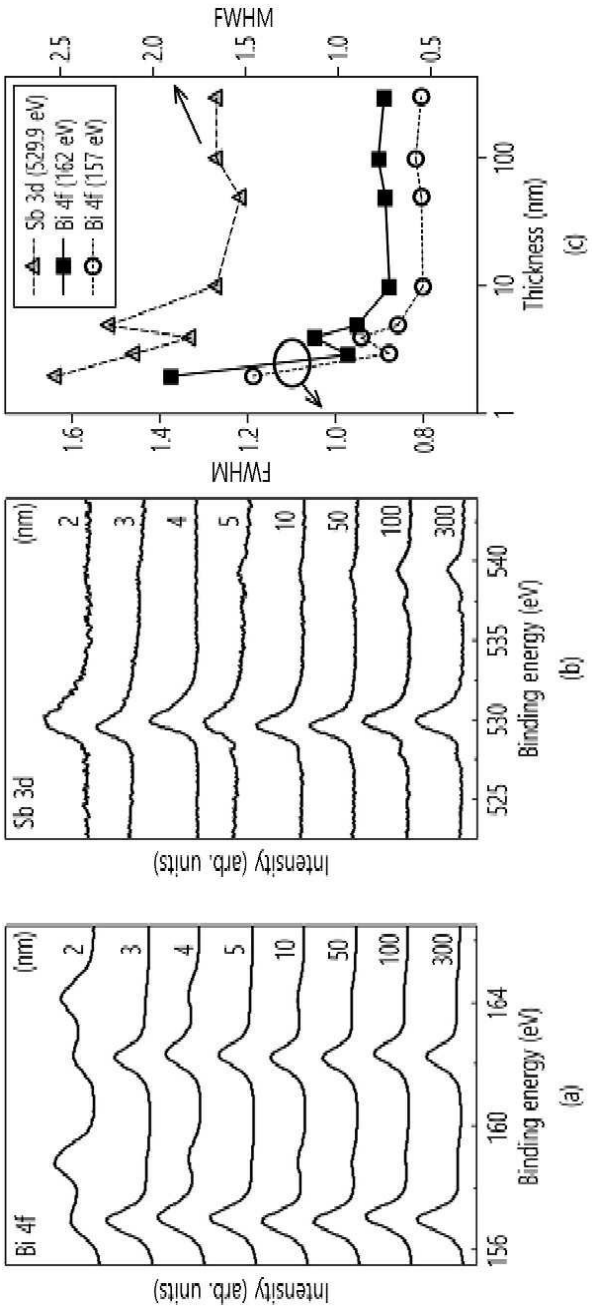
도면5


10 nm
0 T
8 T
S (μV/K)
Temperature (K)
(a)
100 nm
50 nm
(b)
T = 300 K
[nm]
B (T)
(c)
ρxy (kOe)
μ0H (kOe)
(d)
ρxy (Ωnm)
μ0H (kOe)
(e)
n (×10^21 cm^-3)
Thickness (nm)
(f)

도면6a


(nm)
2
3
4
5
10
50
100
300
E^2_g
A^2_{1g}
Raman shift (cm^{-1})
50
100
150
200
250
(a)
Raman peak (cm^{-1})
142
141
140
139
123
122
121
120
119
A^2_{1g}
E^2_g
1
10
100
Thickness (nm)
(b)

도면6b


FWHM
Sb 3d (529.9 eV)
Bi 4f (162 eV)
Bi 4f (157 eV)
Thickness (nm)
(c)
FWHM
Sb 3d
(nm)
Binding energy (eV)
(b)
Intensity (arb. units)
Bi 4f
(nm)
Binding energy (eV)
(a)
Intensity (arb. units)

도면7

