



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년01월05일  
(11) 등록번호 10-2346781  
(24) 등록일자 2021년12월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H01L 43/02 (2006.01) C01G 23/047 (2006.01)  
H01B 3/02 (2006.01) H01B 3/12 (2006.01)  
H01B 5/14 (2006.01) H01L 43/10 (2006.01)  
H01L 45/00 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
H01L 43/02 (2013.01)  
C01G 23/047 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2017-0043179  
(22) 출원일자 2017년04월03일  
심사청구일자 2020년03월04일  
(65) 공개번호 10-2018-0034183  
(43) 공개일자 2018년04월04일  
(30) 우선권주장  
1020160123915 2016년09월27일 대한민국(KR)  
1020160129662 2016년10월07일 대한민국(KR)  
(56) 선행기술조사문헌  
US20140339488 A1\*  
US20150333163 A1\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자  
연세대학교 산학협력단  
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)  
(72) 발명자  
조만호  
서울시 강남구 역삼로 306 개나리 래미안아파트 104-1201  
정광식  
서울특별시 서대문구 성산로 371, 102동 224호(연희동, 현대싱그런)  
(74) 대리인  
(뒷면에 계속)  
특허법인 고려

전체 청구항 수 : 총 17 항

심사관 : 이별섭

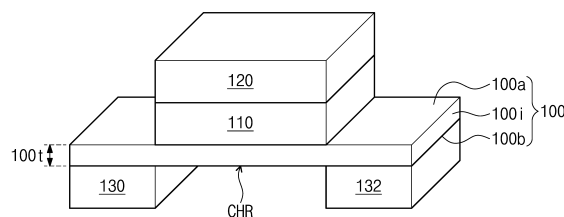
(54) 발명의 명칭 위상 절연체 및 전이금속 산화물을 포함하는 전자 장치

(57) 요약

본 발명의 실시예들에 따르면, 위상 절연체 및 전이금속 산화물을 포함하는 전자 장치가 제공된다. 상기 전자 장치는 서로 대향하는 제1 면 및 제2 면을 포함하는 위상 절연 층, 및 상기 위상 절연 층의 상기 제1 면 상에 배치되는 전이금속 산화물 층을 포함한다. 상기 위상 절연 층은 1nm 내지 10nm의 두께를 갖는다.

대표도 - 도1

10



(52) CPC특허분류

*H01B 3/025* (2013.01)

*H01B 3/12* (2013.01)

*H01B 5/14* (2020.05)

*H01L 43/10* (2013.01)

*H01L 45/1253* (2013.01)

*H01L 45/145* (2013.01)

(72) 발명자

**고대홍**

경기도 고양시 일산서구 강선로 116, 203동 503호  
(주엽동, 강선마을2단지아파트)

**임동혁**

경기도 파주시 독서울1길 21 선유희먼시아 402-404

**김태현**

경기도 화성시 동탄중앙로 200 메타폴리스 C동  
2405호

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

서로 대향하는 제1 면 및 제2 면을 포함하는 위상 절연 층; 및  
상기 위상 절연 층의 상기 제1 면 상에 배치되는 전이금속 산화물 층을 포함하되,  
상기 전이금속 산화물 층은 제1 서브 산화물 층 및 제2 서브 산화물 층을 포함하고,  
상기 제1 서브 산화물 층은 상기 위상 절연 층과 상기 제2 서브 산화물 층 사이에 위치하며,  
상기 제2 서브 산화물 층의 산소 결함들의 밀도는 상기 제1 서브 산화물 층의 산소 결함들의 밀도보다 큰 전자 장치.

#### 청구항 2

제1 항에 있어서,  
상기 위상 절연 층은 1nm 내지 10nm의 두께를 갖는 전자 장치.

#### 청구항 3

제1 항에 있어서,  
상기 위상 절연 층은 화학식  $A_X B_Y C_Z D_W$  ( $0 < X \leq 10$ ,  $0 < Y \leq 10$ ,  $0 < Z \leq 10$ ,  $0 < W \leq 10$ )로 표현되는 화합물을 포함하되, 상기 A 및 상기 B는 각각 Bi, Sb, Tl, Pb, Sn, In, Ga, 또는 Ge 중에서 선택된 원소이고, 상기 C 및 상기 D는 각각 Se, Te, 또는 S 중에서 선택된 원소인 전자 장치.

#### 청구항 4

제1 항에 있어서,  
상기 전이금속 산화물 층은 상기 제1 면과 접하는 전자 장치.

#### 청구항 5

제1 항에 있어서,  
상기 전이금속 산화물 층 상에 제공되는 게이트 전극을 더 포함하되,  
상기 게이트 전극은 상기 전이금속 산화물 층에 전압을 가하도록 구성되는 전자 장치.

#### 청구항 6

제5 항에 있어서,  
상기 전압에 의해 상기 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 밀도가 제어되는 전자 장치.

#### 청구항 7

제5 항에 있어서,

상기 전압에 의해 상기 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 전하 상태가 제어되는 전자 장치.

#### 청구항 8

제1 항에 있어서,

상기 제2 면 상에 배치되는 제1 및 제2 소스/드레인 전극들을 더 포함하되,

상기 제1 및 제2 소스/드레인 전극들 사이의 상기 제2 면은 채널 영역으로 정의되고,

평면적 관점에서, 상기 전이금속 산화물 층은 상기 채널 영역과 적어도 부분적으로 중첩되는 전자 장치.

#### 청구항 9

제1 항에 있어서,

상기 제1 면 상에 배치되는 제1 및 제2 소스/드레인 전극들을 더 포함하되,

상기 제1 및 제2 소스/드레인 전극들은 상기 전이금속 산화물 층을 사이에 두고 서로 이격하는 전자 장치.

#### 청구항 10

삭제

#### 청구항 11

삭제

#### 청구항 12

삭제

#### 청구항 13

위상 절연 층, 상기 위상 절연 층의 표면은 채널 영역을 포함하는 것;

평면적 관점에서, 상기 채널 영역과 중첩되도록 제공되는 전이금속 산화물 층; 및

상기 전이금속 산화물 층 상에 제공되는 게이트 전극을 더 포함하되,

상기 게이트 전극은 상기 전이금속 산화물 층에 전압을 가하도록 구성되고,

상기 전이금속 산화물 층은 제1 서브 산화물 층 및 제2 서브 산화물 층을 포함하고,

상기 제1 서브 산화물 층은 상기 위상 절연 층과 상기 제2 서브 산화물 층 사이에 위치하며,

상기 제2 서브 산화물 층의 산소 결함들의 밀도는 상기 제1 서브 산화물 층의 산소 결함들의 밀도보다 큰 전자 장치.

#### 청구항 14

제13 항에 있어서,

상기 위상 절연 층은 1nm 내지 10nm의 두께를 갖는 전자 장치.

#### 청구항 15

제13 항에 있어서,

상기 채널 영역의 저항은 상기 전압에 의해 제어되는 전자 장치.

#### 청구항 16

제15 항에 있어서,

상기 전압에 의해 상기 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 밀도가 제어되는 전자 장치.

#### 청구항 17

제15 항에 있어서,

상기 전압에 의해 상기 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 전하 상태가 제어되는 전자 장치.

#### 청구항 18

서로 대향하는 일면 및 타면을 포함하는 위상 절연 층;

상기 일면 상에 서로 이격하여 제공되는 제1 및 제2 소스/드레인 전극들, 상기 제1 및 제2 소스/드레인 전극들 사이의 상기 일면은 채널 영역으로 정의되는 것;

상기 위상 절연 층의 상기 일면 또는 상기 타면 상에 제공되는 전이금속 산화물 층, 평면적 관점에서 상기 전이금속 산화물 층은 상기 채널 영역과 적어도 부분적으로 중첩되는 것; 및

상기 전이금속 산화물 층 상에 제공되는 게이트 전극을 포함하고,

상기 전이금속 산화물 층은 제1 서브 산화물 층 및 제2 서브 산화물 층을 포함하고,

상기 제1 서브 산화물 층은 상기 위상 절연 층과 상기 제2 서브 산화물 층 사이에 위치하며,

상기 제2 서브 산화물 층의 산소 결함들의 밀도는 상기 제1 서브 산화물 층의 산소 결함들의 밀도보다 큰 전자 장치.

#### 청구항 19

제18 항에 있어서,

상기 위상 절연 층은 1nm 내지 10nm의 두께를 갖는 전자 장치.

#### 청구항 20

제18 항에 있어서,

상기 게이트 전극은 상기 전이금속 산화물 층에 전압을 가하도록 구성되고,

상기 전이금속 산화물 층에 가해지는 상기 전압에 의해 상기 채널 영역의 저항 상태가 제어되는 전자 장치.

#### 발명의 설명

## 기술 분야

[0001] 본 발명은 위상 절연체 및 전이금속 산화물을 포함하는 전자 장치에 관한 것이다.

## 배경 기술

[0002] 위상 절연체는 디랙 콘이라 불리는 표면 에너지 밴드 구조를 갖는 물질로서, 그 내부는 절연성을 띠나 그 표면은 도전성을 띌 수 있다. 이러한 특성을 갖는 위상 절연체를 전자 장치에 활용하기 위하여 다양한 연구들이 수행되고 있다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0003] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 위상 절연체의 표면의 저항 상태를 제어할 수 있는 전자 장치를 제공하는데 있다.

### 과제의 해결 수단

[0004] 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치는 서로 대향하는 제1 면 및 제2 면을 포함하는 위상 절연 층; 및 상기 위상 절연 층의 상기 제1 면 상에 배치되는 전이금속 산화물 층을 포함할 수 있다.

[0005] 일 실시예에 따르면, 상기 위상 절연 층은 1nm 내지 10nm의 두께를 가질 수 있다.

[0006] 일 실시예에 따르면, 상기 위상 절연 층은 화학식  $A_XB_YC_ZD_W$  ( $0 < X \leq 10$ ,  $0 < Y \leq 10$ ,  $0 < Z \leq 10$ ,  $0 < W \leq 10$ )로 표현되는 화합물을 포함할 수 있다. 상기 A 및 상기 B는 각각 Bi, Sb, Tl, Pb, Sn, In, Ga, 또는 Ge 중에서 선택된 원소일 수 있고, 상기 C 및 상기 D는 각각 Se, Te, 또는 S 중에서 선택된 원소일 수 있다.

[0007] 일 실시예에 따르면, 상기 전이금속 산화물 층은 상기 제1 면과 접할 수 있다.

[0008] 일 실시예에 따르면, 상기 전이금속 산화물 층 상에 제공되는 게이트 전극을 더 포함하되, 상기 게이트 전극은 상기 전이금속 산화물 층에 전압을 가하도록 구성될 수 있다.

[0009] 일 실시예에 따르면, 상기 전압에 의해 상기 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 밀도가 제어될 수 있다.

[0010] 일 실시예에 따르면, 상기 전압에 의해 상기 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 전하 상태가 제어될 수 있다.

[0011] 일 실시예에 따르면, 상기 제2 면 상에 배치되는 제1 및 제2 소스/드레인 전극들을 더 포함할 수 있다. 상기 제1 및 제2 소스/드레인 전극들 사이의 상기 제2 면은 채널 영역으로 정의될 수 있다. 평면적 관점에서, 상기 전이금속 산화물 층은 상기 채널 영역과 적어도 부분적으로 중첩될 수 있다.

[0012] 일 실시예에 따르면, 상기 제1 면 상에 배치되는 제1 및 제2 소스/드레인 전극들을 더 포함할 수 있다. 상기 제1 및 제2 소스/드레인 전극들은 상기 전이금속 산화물 층을 사이에 두고 서로 이격할 수 있다.

[0013] 일 실시예에 따르면, 상기 전이금속 산화물 층은 제1 서브 전이금속 산화물 층 및 제2 서브 전이금속 산화물 층을 포함할 수 있다. 상기 제1 서브 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 밀도는 상기 제2 서브 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 밀도보다 작을 수 있다.

[0014] 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치는 위상 절연 층, 상기 위상 절연 층의 표면은 채널 영역을 포함하는 것; 평면적 관점에서, 상기 채널 영역과 중첩되도록 제공되는 전이금속 산화물 층; 및 상기 전이금속 산화물 층 상에 제공되는 게이트 전극을 더 포함할 수 있다. 상기 게이트 전극은 상기 전이금속 산화물 층에 전압을 가하도록 구성될 수 있다.

[0015] 일 실시예에 따르면, 상기 위상 절연 층은 1nm 내지 10nm의 두께를 가질 수 있다.

[0016] 일 실시예에 따르면, 상기 채널 영역의 저항은 상기 전압에 의해 제어될 수 있다.

[0017] 일 실시예에 따르면, 상기 전압에 의해 상기 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 밀도가 제어될 수 있다.

[0018] 일 실시예에 따르면, 상기 전압에 의해 상기 전이금속 산화물 층의 산소 결함들의 전하 상태가 제어될 수 있다.

[0019] 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치는 서로 대향하는 일면 및 타면을 갖는 위상 절연 층; 상기 일면 상에 서

로 이격하여 제공되는 제1 및 제2 소스/드레인 전극들, 상기 제1 및 제2 소스/드레인 전극들 사이의 상기 일면은 채널 영역으로 정의되는 것; 상기 위상 절연 층의 상기 일면 또는 상기 타면 상에 제공되는 전이금속 산화물 층, 평면적 관점에서 상기 전이금속 산화물 층은 상기 채널 영역과 적어도 부분적으로 중첩되는 것; 및 상기 전이금속 산화물 층 상에 제공되는 게이트 전극을 포함할 수 있다.

[0020] 일 실시예에 따르면, 상기 위상 절연 층은 1nm 내지 10nm의 두께를 가질 수 있다.

[0021] 일 실시예에 따르면, 상기 게이트 전극은 상기 전이금속 산화물 층에 전압을 가하도록 구성될 수 있다. 상기 전이금속 산화물 층에 가해지는 상기 전압에 의해 상기 채널 영역의 저항 상태가 제어될 수 있다.

[0022] 기타 실시예들의 구체적인 사항들은 상세한 설명 및 도면들에 포함되어 있다.

### 발명의 효과

[0023] 본 발명의 실시예들에 따르면, 위상 절연체의 표면의 저항 상태를 제어할 수 있는 전자 장치가 제공될 수 있다.

### 도면의 간단한 설명

[0024] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치를 나타내는 사시도이다.

도 2a는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치가 오프-상태에 있을 때 채널 영역의 에너지 밴드 다이어그램을 개략적으로 나타낸다.

도 2b는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치가 온-상태에 있을 때 채널 영역의 에너지 밴드 다이어그램을 개략적으로 나타낸다.

도 3a 및 도 3b는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-오프 상태를 제어하는 일 예를 설명하기 위한 도면들이다.

도 4a 및 도 4b는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-오프 상태를 제어하는 다른 예를 설명하기 위한 도면들이다.

도 4c는 티타늄 산화물의 페르미 레벨에 따른 산소 결함들의 전하 상태 변화를 나타내는 그래프이다.

도 4d는 티타늄 산화물의 산소 결함들의 전하 상태에 따른 자기 모멘트의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 5a 내지 도 5c는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-오프 상태를 제어하는 또 다른 예를 설명하기 위한 도면들이다.

도 6a 내지 도 6c는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-오프 상태를 제어하는 또 다른 예를 설명하기 위한 도면들이다.

도 7a 내지 도 7c는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치를 나타내는 사시도들이다.

도 8a 내지 도 8d는 전이금속 산화물 층 내의 산소 결함에 따른 위상 절연 층의 표면 상태를 시뮬레이션한 결과를 나타내는 그래프들이다.

도 9a는 전이금속 산화물 층의 산소 결함에 따른 위상 절연 층의 표면의 저항 변화를 시뮬레이션한 결과를 나타내는 그래프이다.

도 9b는 전이금속 산화물 층의 산소 결함에 따른 위상 절연 층의 표면의 전도도 변화를 시뮬레이션한 결과를 나타내는 그래프이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부된 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시예를 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 이하에 개시된 실시예에 한정되지 않으며, 서로 다른 다양한 형태로 구현될 수 있다. 아래의 실시예는 단지 본 발명의 개시가 완전하도록 하고, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이다. 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다.

[0026] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명

세서에서, 단수형은 특별히 언급이 없는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용된 '포함한다(comprises)' 및/또는 '포함하는(comprising)'은 언급된 구성요소, 단계, 동작, 및/또는 소자 외에 하나 이상의 다른 구성요소, 단계, 동작, 및/또는 소자의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

- [0027] 본 명세서에서 기술하는 실시예들은 본 발명의 이상적인 예시도들을 참고하여 설명될 것이다. 도면들에 도시된 구성요소들의 두께는 기술 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것일 수 있다. 따라서, 구성요소들의 형상은 제조 공정 및/또는 허용 오차 등에 따라 변형될 수 있다. 즉, 본 발명의 실시예들은 도면들에 도시된 특정 형상으로 제한되는 것이 아니라 제조 공정에 따라 생성되는 형상의 변화도 포함하는 것이다. 예를 들어, 직각으로 도시된 식각 영역은 라운드시거나 소정 곡률을 가지는 형상일 수 있다. 도면에서 예시된 구성요소는 개략적인 속성을 가지며, 도면에서 예시된 구성요소의 형상은 구성요소의 설명을 위한 것이며 발명의 범주를 제한하기 위한 것이 아니다.
- [0028] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들에 대하여 설명한다. 이하에서, 본 발명의 실시예들은 위상 절연체 및 전이금속 산화물과 관련된 물리적 현상에 대한 현재의 이해를 바탕으로 설명된다. 하지만, 본 발명의 실시예들이 특정한 물리적 설명에 의존하는 것은 아니다.
- [0030] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치를 나타내는 사시도이다. 이하, 도 1을 참조하여 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 구조에 대하여 설명한다.
- [0031] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치(10)는 위상 절연 층(100), 전이금속 산화물 층(110), 게이트 전극(120), 및 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)을 포함할 수 있다.
- [0032] 위상 절연 층(100)은 표면(surface) 및 내부(100i)(interior portion)를 포함할 수 있다. 위상 절연 층(100)의 표면은 서로 대향하는 제1 면(100a) 및 제2 면(100b)을 포함할 수 있다. 단면적 관점에서, 위상 절연 층(100)의 내부(100i)는 제1 면(100a) 및 제2 면(100b) 사이에 위치할 수 있다.
- [0033] 위상 절연 층(100)은 위상 절연체(topological insulator; TI)를 포함할 수 있다. 위상 절연체란, 충분한 두께(예를 들어, 10 QL(quintuple layer)을 초과하는 두께)를 가질 때, 그 내부는 절연성을 띠고 그 표면은 전도성을 띠는 물질일 수 있다. 다시 말해, 충분한 두께를 갖는 위상 절연체의 내부는 에너지 밴드 갭을 갖지만, 그 표면은 에너지 밴드 갭을 갖지 않을 수 있다.
- [0034] 위상 절연체는 화학식  $A_xB_yC_zD_w$  ( $0 < X \leq 10$ ,  $0 < Y \leq 10$ ,  $0 < Z \leq 10$ ,  $0 < W \leq 10$ )로 표현되는 화합물일 수 있다. 상기 A 및 상기 B는 각각 Bi, Sb, Tl, Pb, Sn, In, Ga, 또는 Ge 중에서 선택된 원소일 수 있고, 상기 C 및 상기 D는 각각 Se, Te, 또는 S 중에서 선택된 원소일 수 있다. 일 예로, 위상 절연체는 화학식  $A_{1-x}B_xC_{1-y}D_y$  ( $0 < X \leq 1$ ,  $0 < Y \leq 1$ ), 화학식  $A_{2-x}B_xC_{3-y}D_y$  ( $0 < X \leq 2$ ,  $0 < Y \leq 3$ ), 화학식  $A_{3-x}B_xC_{4-y}D_y$  ( $0 < X \leq 3$ ,  $0 < Y \leq 4$ ), 또는 화학식  $A_{5-x}B_xC_{7-y}D_y$  ( $0 < X \leq 3$ ,  $0 < Y \leq 4$ )로 표현되는 화합물일 수 있다. 상기 A 및 상기 B는 각각 Bi, Sb, Tl, Pb, Sn, In, Ga, 또는 Ge 중에서 선택된 원소일 수 있고, 상기 C 및 상기 D는 각각 Se, Te, 또는 S 중에서 선택된 원소일 수 있다. 다른 예로, 위상 절연체는  $Bi_2Se_3$ ,  $Bi_2Te_3$ ,  $Ge_2Se_2Te_5$ ,  $Sb_2Te_3$ ,  $Sb_2Se_3$ ,  $Bi_2Te_2Se$ ,  $Bi_2Te_{1.6}S_{1.4}$ ,  $Bi_{1.1}Sb_{0.9}Te_2S$ ,  $Bi_{1.5}Sb_{0.5}Te_{1.7}Se_{1.3}$ ,  $TlBiSe_2$ ,  $TlBiTe_2$ ,  $TlBi(S_{1-x}Se_x)_2$ ,  $PbBi_2Te_4$ ,  $PbSb_2Te_4$ ,  $GeBi_2Te_4$ , 또는  $PbBi_4Te_7$ 일 수 있다.
- [0035] 충분한 두께를 갖는 위상 절연체의 표면은 디랙 콘 표면 상태(Dirac cone surface state)를 가질 수 있다. 충분한 두께를 갖는 위상 절연체의 제1 면(예를 들어, 상면)의 표면-상태 파동 함수(surface-state wave function)와 제2 면(예를 들어, 하면)의 표면-상태 파동 함수 사이의 중첩(overlapping)은 무시할 수 있을 정도로 작을 수 있다.
- [0036] 위상 절연 층(100)은 약 1 QL 내지 약 10 QL의 두께(100t)를 가질 수 있다. 예를 들어, 위상 절연 층(100)의 두께(100t)는 약 1nm 내지 약 10nm일 수 있다. 위상 절연 층(100)의 두께(100t)는 제1 면(100a)과 제2 면(100b) 사이의 거리로 정의될 수 있다. 위상 절연 층(100)의 두께(100t)는 충분히 얇기 때문에, 위상 절연 층(100)의 제1 면(100a)의 표면-상태 파동 함수와 제2 면(100b)의 표면-상태 파동 함수가 중첩되어 서로 영향을 미칠 수 있다.
- [0037] 위상 절연 층(100)의 제1 면(100a) 상에 전이금속 산화물 층(110)이 배치될 수 있다. 전이금속 산화물 층(110)은 제1 면(100a)에 인접하게 배치될 수 있다. 몇몇 실시예들에 따르면, 도 1에 도시된 바와 같이, 전이금속 산화물 층(110)은 제1 면(100a)에 접할 수 있다. 하지만, 본 발명이 이에 한정되는 것은 아니다. 다른 실시예들에 따르면, 도 1에 도시된 바와 달리, 전이금속 산화물 층(110)과 제1 면(100a) 사이에 별개의 층(미도시)이 제공



될 수도 있다. 전이금속 산화물 층(110)은 약 1nm 내지 약 100nm의 두께를 가질 수 있다.

- [0038] 전이금속 산화물 층(110)은 티타늄(Ti), 바나듐(V), 크로뮴(Cr), 망가니즈(Mn), 철(Fe), 코발트(Co), 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn), 이트륨(Y), 지르코늄(Zr), 니오븀(Nb), 테크네튬(Tc), 루테튬(Ru), 카드뮴(Cd), 하프늄(Hf), 탄탈럼(Ta), 이리듐(Ir), 텅스텐(W), 란타넘(La), 세륨(Ce), 및 가돌리늄(Gd) 중에서 선택된 적어도 하나의 산화물을 포함할 수 있다.
- [0039] 전이금속 산화물 층(110)은 산소 결함들(oxygen vacancies) 및 그에 인접하는 홀전자들(unpaired electrons)을 포함할 수 있다. 예를 들어, 전이금속 산화물 층(110)은 산소 원자들이 빠져나간 (혹은, 부족한) 자리인 산소 결함들을 포함할 수 있고, 상기 산소 결함들에 인접하는 전이금속 원자들은 홀전자들을 가질 수 있다. 전이금속 산화물 층(110)에 포함된 상기 홀전자들은 인접하는 위상 절연 층(100)의 표면 상태에 영향을 미칠 수 있다.
- [0040] 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도는 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들의 밀도 및/또는 전하 상태에 따라 달라질 수 있다. 일 예로, 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도는 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들의 밀도에 비례할 수 있다. 다른 예로, 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자의 밀도는 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들의 전하 상태에 따라 달라질 수 있다.
- [0041] 전이금속 산화물 층(110) 상에 게이트 전극(120)이 배치될 수 있다. 게이트 전극(120)은 도전성 물질을 포함할 수 있다. 예를 들어, 게이트 전극(120)은 금속, 금속 질화물, 및/또는 도핑된 반도체 물질을 포함할 수 있다. 게이트 전극(120)을 통해 전이금속 산화물 층(110)에 전압이 가해질 수 있다. 상기 전압을 통해 전이금속 산화물 층(110)의 산소 결함들의 밀도 및/또는 전하 상태(charge state)가 제어될 수 있으며, 나아가 전이금속 산화물 층(110)의 홀전자들의 밀도가 제어될 수 있다.
- [0042] 위상 절연 층(100)의 표면 상에 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)이 배치될 수 있다. 몇몇 실시예들에 따르면, 도 1에 도시된 바와 같이, 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)은 제2 면(100b) 상에 배치될 수 있다. 하지만 본 발명이 이에 한정되는 것은 아니다. 다른 실시예들에 따르면, 도 1에 도시된 바와 달리, 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)은 제1 면(100a) 상에 배치될 수도 있다.
- [0043] 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)은 서로 이격할 수 있다. 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132) 사이의 위상 절연 층(100)의 표면은 채널 영역(CHR)으로 정의될 수 있다. 예를 들어, 도 1에 도시된 실시예에 따르면, 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132) 사이의 제2 면(100b)은 채널 영역(CHR)으로 정의될 수 있다.
- [0044] 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)은 채널 영역(CHR)을 통해 연결될(coupled) 수 있다. 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132) 사이의 저항은 채널 영역(CHR)의 저항에 따라 달라질 수 있다. 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132) 사이의 저항이 클 때(즉, 채널 영역(CHR)의 저항이 클 때), 전자 장치(10)은 오프-상태(off-state)에 있다고 정의될 수 있다. 반대로, 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132) 사이의 저항이 작을 때(즉, 채널 영역(CHR)의 저항이 작을 때), 전자 장치(10)은 온-상태(on-state)에 있다고 정의될 수 있다.
- [0045] 전이금속 산화물 층(110)은 채널 영역(CHR)에 인접하게 위치할 수 있다. 예를 들어, 평면적 관점에서, 전이금속 산화물 층(110)은 채널 영역(CHR)과 적어도 부분적으로 중첩될 수 있다. 몇몇 실시예들에 따르면, 도 1에 도시된 바와 같이, 평면적 관점에서 전이금속 산화물 층(110)은 채널 영역(CHR) 내에 한정되어 제공될 수 있다. 하지만 본 발명이 이에 한정되는 것은 아니다. 다른 실시예들에 따르면, 도 1에 도시된 바와 달리, 평면적 관점에서 전이금속 산화물 층(110)은 채널 영역(CHR)을 넘어 연장될 수 있다.
- [0046] 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)은 도전성 물질을 포함할 수 있다. 예를 들어, 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)은 금속, 금속 질화물, 및/또는 도핑된 반도체 물질을 포함할 수 있다.
- [0048] 도 2a는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치가 오프-상태에 있을 때 채널 영역의 에너지 밴드 다이어그램을 개략적으로 나타낸다. 도 2b는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치가 온-상태에 있을 때 채널 영역의 에너지 밴드 다이어그램을 개략적으로 나타낸다. 이하, 도 1, 도 2a, 및 도 2b를 참조하여 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-상태와 오프-상태에 대하여 설명한다.
- [0049] 도 1을 참조하면, 채널 영역(CHR)의 표면 상태 및 그에 따른 저항은 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도(혹은, 산소 결함들의 밀도 및/또는 전하 상태)에 따라 달라질 수 있다. 즉, 전자 장치(10)의 온-오프 상태는 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도(혹은, 산소 결함들의 밀도 및/또는 전하 상태)에 따라 달라질 수 있다.
- [0050] 도 1 및 도 2a를 참조하면, 전이금속 산화물 층(110)에 포함된 홀전자들의 밀도가 낮을 때, 전자 장치(10)는 오

프-상태에 있을 수 있다. 다시 말해, 전이금속 산화물 층(110)에 포함된 홀전자들의 밀도가 낮을 때, 채널 영역(CHR)의 저항은 클 수 있다.

[0051] 위상 절연 층(100)의 두께(100t)가 약 1 QL 내지 약 10 QL로 얇기 때문에, 제1 면(100a)의 표면 상태(surface state)와 제2 면(100b)의 표면 상태 사이에 결합(coupling)이 이루어질 수 있다. 구체적으로, 제1 면(100a)의 표면-상태 파동 함수와 제2 면(100b)의 표면-상태 파동 함수 사이에 혼성(hybridization)이 발생할 수 있다. 이에 따라, 제1 면(100a) 및 제2 면(100b)의 디랙 콘 표면 상태가 깨질 수 있고, 제1 면(100a) 및 제2 면(100b)은 에너지 밴드 갭을 갖게 될 수 있다. 채널 영역(CHR)은 제2 면(100b)(혹은, 다른 실시예들에 따르면, 제1 면(100a))의 일부이므로, 도 2a에 도시된 바와 같이, 채널 영역(CHR)의 디랙 콘 표면 상태도 깨질 수 있고, 채널 영역(CHR)은 에너지 밴드 갭을 갖게 될 수 있다. 결론적으로, 전이금속 산화물 층(110)에 포함된 홀전자들의 밀도가 낮을 때, 채널 영역(CHR)은 높은 저항을 가질 수 있으며, 전자 장치(10)는 오프-상태에 있을 수 있다.

[0052] 도 1 및 도 2b를 참조하면, 전이금속 산화물 층(110)에 포함된 홀전자들의 밀도가 높을 때, 전자 장치(10)는 온-상태에 있을 수 있다. 다시 말해, 전이금속 산화물 층(110)에 포함된 홀전자들의 밀도가 높을 때, 채널 영역(CHR)의 저항은 작을 수 있다.

[0053] 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들은 그에 인접하는 위상 절연 층(100)의 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)을 강화시킬 수 있다. 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도가 높을수록 그리고 홀전자들이 위상 절연 층(100)에 인접하게 위치할수록, 홀전자들이 위상 절연 층(100)의 스핀-궤도 결합을 강화시키는 정도는 클 수 있다.

[0054] 위상 절연 층(100)의 스핀-궤도 결합이 강화되면, 제1 면(100a)의 표면 상태와 제2 면(100b)의 표면 상태 사이의 결합이 약해질 수 있다. 구체적으로, 제1 면(100a)의 표면-상태 파동 함수와 제2 면(100b)의 표면-상태 파동 함수 사이의 혼성이 소멸되거나 약화될 수 있다. 이에 따라, 전이금속 산화물 층(110)에 인접하는 제1 면(100a) 및 제2 면(100b)의 디랙 콘 표면 상태가 회복될 수 있고, 전이금속 산화물 층(110)에 인접하는 제1 면(100a) 및 제2 면(100b)은 에너지 밴드 갭을 갖지 않게 될 수 있다. 전이금속 산화물 층(110)은 채널 영역(CHR)에 인접하게 배치되므로, 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도가 높아지면, 도 2b에 도시된 바와 같이 채널 영역(CHR)의 디랙 콘 표면 상태가 회복될 수 있고, 채널 영역(CHR)은 에너지 밴드 갭을 갖지 않게 될 수 있다. 결론적으로, 전이금속 산화물 층(110)에 포함된 홀전자들의 밀도가 높을 때, 채널 영역(CHR)은 낮은 저항을 가질 수 있으며, 전자 장치(10)는 온-상태에 있을 수 있다.

[0055] 도 3a 및 도 3b는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-오프 상태를 제어하는 일 예를 설명하기 위한 도면들이다.

[0057] 도 1, 도 3a, 및 도 3b를 참조하면, 전이금속 산화물 층(110)은 산소 결함들(OV)을 포함할 수 있다. 전자 장치(10)의 온-오프 상태를 제어하는 것은 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도를 제어함으로써 달성될 수 있다. 다시 말해, 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도를 제어함으로써 채널 영역(CHR)의 저항 상태를 제어할 수 있다. 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도는 게이트 전극(120)을 통해 전이금속 산화물 층(110)에 전압을 가함으로써 변화될 수 있다.

[0058] 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도는 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도에 비례하기 때문에, 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도가 낮으면 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도도 낮을 수 있다. 반대로, 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도가 높으면 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도도 높을 수 있다.

[0059] 도 3a에 도시된 바와 같이, 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도가 낮을 경우, 채널 영역(CHR)은 높은 저항을 가질 수 있으며, 전자 장치(10)는 오프-상태에 있을 수 있다.

[0060] 낮은 밀도의 산소 결함들(OV)을 포함하는 전이금속 산화물 층(110)에 셋 전압(set voltage) 이상의 전압( $V_{SET}$ )을 가하면, 도 3b에 도시된 바와 같이 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도가 높아질 수 있으며, 이에 따라 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도도 높아질 수 있다. 따라서, 낮은 밀도의 산소 결함들(OV)을 포함하는 전이금속 산화물 층(110)에 셋 전압(set voltage) 이상의 전압을 가하면, 채널 영역(CHR)은 낮은 저항을 가질 수 있으며, 전자 장치(10)는 온-상태로 전환될 수 있다.

[0061] 높은 밀도의 산소 결함들(OV)을 포함하는 전이금속 산화물 층(110)에 리셋 전압(reset voltage) 이상의 전압( $V_{RESET}$ )을 가하면, 도 3a에 도시된 바와 같이, 전이금속 산화물 층(110) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도가 낮아질

수 있으며, 이에 따라 전이금속 산화물 층(110) 내의 홀전자들의 밀도도 낮아질 수 있다. 따라서, 높은 밀도의 산소 결함들(OV)을 포함하는 전이금속 산화물 층(110)에 리셋 전압(reset voltage) 이상의 전압을 가하면, 채널 영역(CHR)은 높은 저항을 가질 수 있으며, 전자 장치(10)는 오프-상태로 전환될 수 있다.

[0063] 도 4a 및 도 4b는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-오프 상태를 제어하는 다른 예를 설명하기 위한 도면들이다.

[0064] 도 1, 도 4a, 및 도 4b를 참조하면, 전이금속 산화물 층(110)은 산소 결함들(OV)을 포함할 수 있다. 전자 장치(10)의 온-오프 상태를 제어하는 것은 전이금속 산화물 층(110)에 포함된 산소 결함들(OV) 중에서 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)의 전하 상태를 제어함으로써 달성될 수 있다. 다시 말해, 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)의 전하 상태를 제어함으로써 채널 영역(CHR)의 저항 상태를 제어할 수 있다.

[0065] 게이트 전극(120)을 통해 전이금속 산화물 층(110)에 가해지는 전압이 변하면, 위상 절연 층(100)에 인접하는 전이금속 산화물 층(110) 부분의 페르미 레벨이 달라질 수 있으며, 이에 따라 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)의 전하 상태가 달라질 수 있다. 일 예로, 게이트 전극(120)을 통해 전이금속 산화물 층(110)에 양의 전압이 가해지면, 위상 절연 층(100)에 인접하는 전이금속 산화물 층(110) 부분의 페르미 레벨이 낮아질 수 있고, 이에 따라 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)은 양의 전하 상태(예를 들어, +2 또는 +1의 전하 상태)를 가질 수 있다. 다른 예로, 게이트 전극(120)을 통해 전이금속 산화물 층(110)에 음의 전압이 가해지면, 위상 절연 층(100)에 인접하는 전이금속 산화물 층(110) 부분의 페르미 레벨이 높아질 수 있고, 이에 따라 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)은 음의 전하 상태(예를 들어, -2 또는 -1의 전하 상태)를 가질 수 있다. 또 다른 예로, 게이트 전극(120)을 통해 전이금속 산화물 층(110)에 가해지는 전압의 절대값이 작아지면, 산소 결함들(OV)은 중성의 전하 상태(neutral)를 가질 수 있다.

[0066] 산소 결함들(OV)에 의하여 발생하는 홀전자들의 양은 산소 결함들(OV)의 전하 상태에 따라 달라질 수 있기 때문에, 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)의 전하 상태를 제어함으로써 전자 장치(10)의 온-오프 상태(혹은, 채널 영역(CHR)의 저항 상태)를 제어할 수 있다. 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)의 전하 상태를 제어하기 위해 가해지는 전압( $V_1$ ,  $V_2$ )의 크기는 도 3a 및 도 3b를 참조하여 설명한 셋 전압( $V_{SET}$ )의 크기 및 리셋 전압( $V_{RESET}$ )의 크기보다 작을 수 있다.

[0067] 예를 들어, 도 4a에 도시된 바와 같이, 게이트 전극(120)에 제1 전압( $V_1$ )이 가해지면, 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)은 제1 전하 상태(CS1)를 가질 수 있다. 도 4b에 도시된 바와 같이, 게이트 전극(120)에 제1 전압( $V_1$ )과 다른 제2 전압( $V_2$ )이 가해지면, 위상 절연 층(100)에 인접하는 산소 결함들(OV)은 제1 전하 상태(CS1)의 산소 결함들(OV)에 비하여 많은 홀전자들을 발생시키는 제2 전하 상태(CS2)를 가질 수 있다. 이에 따라, 도 4a에 도시된 바와 같이, 게이트 전극(120)에 제1 전압( $V_1$ )이 가해지는 경우, 채널 영역(CHR)은 높은 저항을 가질 수 있고, 전자 장치(10)는 오프-상태에 있을 수 있다. 반대로, 도 4b에 도시된 바와 같이, 게이트 전극(120)에 제2 전압( $V_2$ )이 가해지는 경우, 채널 영역(CHR)은 낮은 저항을 가질 수 있고, 전자 장치(10)는 온-상태에 있을 수 있다. 결론적으로, 게이트 전극(120)을 통해 전이금속 산화물 층(110)에 가하는 전압을 제어함으로써, 전자 장치(10)의 온-오프 상태를 제어할 수 있다.

[0068] 도 4c는 티타늄 산화물의 페르미 레벨에 따른 산소 결함들의 전하 상태 변화를 나타내는 그래프이다. 도 4d는 티타늄 산화물의 산소 결함들의 전하 상태에 따른 자기 모멘트의 변화를 나타내는 그래프이다. 이하, 도 4c 및 도 4d를 더 참조하여, 전이금속 산화물 층(110)이 티타늄 산화물을 포함하는 실시예에 대하여 보다 자세히 설명한다.

[0069] 도 4c를 더 참조하면, 티타늄 산화물의 페르미 레벨이 점차적으로 높아짐에 따라, 산소 결함들(OV)의 전하 상태가 +2, 0(중성), -1, 그리고 -2로 변하는 것을 확인할 수 있다. 다시 말해, 게이트 전극(120)에 가해지는 전압이 양의 전압에서 음의 전압으로 점차적으로 변함에 따라, 산소 결함들(OV)의 전하 상태가 +2, 0(중성), -1, 그리고 -2로 변하는 것을 확인할 수 있다.

[0070] 도 4d를 더 참조하면, 산소 결함들(OV)의 전하 상태가 0(중성)일 때에 티타늄 산화물의 자기 모멘트가 가장 크고, 산소 결함들(OV)의 전하 상태가 +2, -1, 및 -2일 때 티타늄 산화물의 자기 모멘트가 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다. 티타늄 산화물의 자기 모멘트가 크다는 것은 티타늄 산화물 내의 홀전자들의 밀도가 높다는 것을 의미할 수 있다. 따라서, 티타늄 산화물 내의 산소 결함들의 전하 상태가 0(중성)일 때, 티타늄 산화물 내의 홀전자들의 밀도가 가장 높고, 티타늄 산화물 내의 산소 결함들의 전하 상태가 +2, -1, 및 -2일 때는 자기 모멘

트가 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있다.

- [0071] 결론적으로, 전이금속 산화물 층(110)이 티타늄 산화물을 포함하는 경우, 산소 결합들(OV)의 전하 상태가 0(중성)이 되도록 게이트 전극(120)에 인가되는 전압을 제어함으로써 전자 장치(10)를 온-상태로 만들 수 있다. 또한, 전이금속 산화물 층(110)이 티타늄 산화물을 포함하는 경우, 산소 결합들(OV)의 전하 상태가 +2, -1, 또는 -2가 되도록 게이트 전극(120)에 인가되는 전압을 제어함으로써 전자 장치(10)를 오프-상태로 만들 수 있다.
- [0073] 도 5a 내지 도 5c는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-오프 상태를 제어하는 또 다른 예를 설명하기 위한 도면들이다. 도 5a는 게이트 전극에 전압이 가해지기 전의 전자 장치를 도시한다. 도 5b는 게이트 전극에 음의 전압이 가해졌을 때의 전자 장치를 도시한다. 도 5c는 게이트 전극에 양의 전압이 가해졌을 때의 전자 장치를 도시한다.
- [0074] 도 1 및 도 5a를 참조하면, 전이금속 산화물 층(110)은 제1 서브 산화물 층(112) 및 제2 서브 산화물 층(114)을 포함할 수 있다. 제2 서브 산화물 층(114)은 제1 서브 산화물 층(112)보다 높은 산소 결합 밀도를 가질 수 있다. 다시 말해, 제2 서브 산화물 층(114)은 제1 서브 산화물 층(112)보다 많은 산소 결합들(OV)을 포함할 수 있고, 제1 서브 산화물 층(112)은 제2 서브 산화물 층(114)보다 많은 산소 이온들(OI)을 포함할 수 있다. 예를 들어, 제1 서브 산화물 층(112)은 상대적으로 높은 산소 분압에서 형성된 전이금속 산화물 층일 수 있고, 제2 서브 산화물 층(114)은 상대적으로 낮은 산소 분압에서 형성된 전이금속 산화물 층일 수 있다. 게이트 전극(120)에 전압이 가해졌을 때, 산소 이온들(OI)의 이동도는 산소 결합들(OV)의 이동도보다 높을 수 있다.
- [0075] 제1 서브 산화물 층(112)은 위상 절연 층(100)에 인접하게 배치될 수 있다. 다시 말해, 제1 서브 산화물 층(112)은 위상 절연 층(100)과 제2 서브 산화물 층(114) 사이에 배치될 수 있고, 제2 서브 산화물 층(114)은 제1 서브 산화물 층(112)과 게이트 전극(120) 사이에 배치될 수 있다. 따라서, 전자 장치(10)의 온-오프 상태는 제1 서브 산화물 층(112)의 홀전자들의 밀도에 따라 달라질 수 있다.
- [0076] 도 1 및 도 5b를 참조하면, 게이트 전극(120)에 음의 전압(V-)이 가해지면, 전자 장치(10)는 온-상태에 있을 수 있다.
- [0077] 게이트 전극(120)에 음의 전압(V-)이 가해지면, 제1 서브 산화물 층(112)의 산소 이온들(OI)이 제1 서브 산화물 층(112)과 위상 절연 층(100) 사이의 계면으로 이동할 수 있으며, 제1 서브 산화물 층(112) 내에 산소 결합들(OV)이 생성될 수 있다. 이에 따라, 제1 서브 산화물 층(112) 내의 산소 결합들(OV)의 밀도 및 홀전자들의 밀도가 높아질 수 있다. 결과적으로, 채널 영역(CHR)은 낮은 저항을 가질 수 있고, 전자 장치(10)는 온-상태에 있을 수 있다.
- [0078] 도 1 및 도 5c를 참조하면, 게이트 전극(120)에 양의 전압(V+)이 가해지면, 전자 장치(10)는 오프-상태에 있을 수 있다.
- [0079] 게이트 전극(120)에 양의 전압(V+)이 가해지면, 제1 서브 산화물 층(112)과 위상 절연 층(100) 사이의 계면으로 이동된 산소 이온들(OI)이 제1 서브 산화물 층(112) 내로 돌아갈 수 있으며, 제1 서브 산화물 층(112) 내에 산소 결합들(OV)이 소멸될 수 있다. 이에 따라, 제1 서브 산화물 층(112) 내의 산소 결합들(OV)의 밀도 및 홀전자들의 밀도가 낮아질 수 있다. 결과적으로, 채널 영역(CHR)은 높은 저항을 가질 수 있고, 전자 장치(10)는 오프-상태에 있을 수 있다.
- [0081] 도 6a 내지 도 6c는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치의 온-오프 상태를 제어하는 또 다른 예를 설명하기 위한 도면들이다. 도 6a는 게이트 전극에 전압이 가해지기 전의 전자 장치를 도시한다. 도 6b는 게이트 전극에 음의 전압이 가해졌을 때의 전자 장치를 도시한다. 도 6c는 게이트 전극에 양의 전압이 가해졌을 때의 전자 장치를 도시한다.
- [0082] 도 1 및 도 6a를 참조하면, 전이금속 산화물 층(110)은 제1 서브 산화물 층(112) 및 제2 서브 산화물 층(114)을 포함할 수 있다. 제2 서브 산화물 층(114)은 제1 서브 산화물 층(112)보다 높은 산소 결합 밀도를 가질 수 있다. 다시 말해, 제2 서브 산화물 층(114)은 제1 서브 산화물 층(112)보다 많은 산소 결합들(OV)을 포함할 수 있고, 제1 서브 산화물 층(112)은 제2 서브 산화물 층(114)보다 많은 산소 이온들(OI)을 포함할 수 있다. 게이트 전극(120)에 전압이 가해졌을 때, 산소 이온들(OI)의 이동도는 산소 결합들(OV)의 이동도보다 높을 수 있다.
- [0083] 제2 서브 산화물 층(114)은 위상 절연 층(100)에 인접하게 배치될 수 있다. 다시 말해, 제2 서브 산화물 층(114)은 위상 절연 층(100)과 제1 서브 산화물 층(112) 사이에 배치될 수 있고, 제1 서브 산화물 층(112)은 제2 서브 산화물 층(114)과 게이트 전극(120) 사이에 배치될 수 있다. 따라서, 전자 장치(10)의 온-오프 상태는 제2



서브 산화물 층(114)의 홀전자들의 밀도에 따라 달라질 수 있다.

- [0084] 도 1 및 도 6b를 참조하면, 게이트 전극(120)에 음의 전압(V-)이 가해지면, 전자 장치(10)는 오프-상태에 있을 수 있다.
- [0085] 게이트 전극(120)에 음의 전압(V-)이 가해지면, 제1 서브 산화물 층(112)의 산소 이온들(OI)이 제2 서브 산화물 층(114)으로 이동할 수 있으며, 제2 서브 산화물 층(114) 내의 결함들(OV)이 소멸될 수 있다. 이에 따라, 제2 서브 산화물 층(114) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도 및 홀전자들의 밀도가 낮아질 수 있다. 결과적으로, 채널 영역(CHR)은 높은 저항을 가질 수 있고, 전자 장치(10)는 오프-상태에 있을 수 있다.
- [0086] 도 1 및 도 6c를 참조하면, 게이트 전극(120)에 양의 전압(V+)이 가해지면, 전자 장치(10)는 온-상태에 있을 수 있다.
- [0087] 게이트 전극(120)에 양의 전압(V+)이 가해지면, 제2 서브 산화물 층(114)으로 이동된 산소 이온들(OI)이 제1 서브 산화물 층(112) 내로 돌아갈 수 있으며, 제2 서브 산화물 층(114) 내에 산소 결함들(OV)이 생성될 수 있다. 이에 따라, 제2 서브 산화물 층(114) 내의 산소 결함들(OV)의 밀도 및 홀전자들의 밀도가 높아질 수 있다. 결과적으로, 채널 영역(CHR)은 낮은 저항을 가질 수 있고, 전자 장치(10)는 온-상태에 있을 수 있다.
- [0089] 도 7a는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치를 나타내는 사시도이다. 도 1을 참조하여 설명한 구성과 실질적으로 동일하거나 유사한 구성에 대하여는 동일하거나 유사한 참조 번호가 제공될 수 있으며, 설명의 간소화를 위해 중복되는 설명은 생략될 수 있다.
- [0090] 도 7a를 참조하면, 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치(11)는 위상 절연 층(100), 전이금속 산화물 층(110a), 게이트 전극(120), 및 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)을 포함할 수 있다. 위상 절연 층(100), 게이트 전극(120), 및 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)은 도 1을 참조하여 설명한 바와 실질적으로 동일할 수 있다. 이하에서는, 도 7a의 전이금속 산화물 층(110a)과 도 1의 전이금속 산화물 층(110)의 차이점에 대하여 중점적으로 설명한다.
- [0091] 위상 절연 층(100)의 제1 면(100a) 상에 전이금속 산화물 층(110a)이 배치될 수 있다. 전이금속 산화물 층(110a)은 채널 영역(CHR)에 인접하게 위치할 수 있다. 평면적 관점에서, 전이금속 산화물 층(110a)은 채널 영역(CHR)과 중첩될 수 있으며, 채널 영역(CHR)을 넘어 연장될 수 있다. 예를 들어, 평면적 관점에서, 전이금속 산화물 층(110a)은 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)과 중첩될 수 있다.
- [0093] 도 7b는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치를 나타내는 사시도이다. 도 1을 참조하여 설명한 구성과 실질적으로 동일하거나 유사한 구성에 대하여는 동일하거나 유사한 참조 번호가 제공될 수 있으며, 설명의 간소화를 위해 중복되는 설명은 생략될 수 있다.
- [0094] 도 7b를 참조하면, 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치(12)는 위상 절연 층(100), 전이금속 산화물 층(110), 게이트 전극(120), 및 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130a, 132a)을 포함할 수 있다. 위상 절연 층(100), 전이금속 산화물 층(110), 및 게이트 전극(120)은 도 1을 참조하여 설명한 바와 실질적으로 동일할 수 있다. 이하에서는, 도 7b의 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130a, 132a)과 도 1의 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)의 차이점에 대하여 중점적으로 설명한다.
- [0095] 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130a, 132a)은 위상 절연 층(100)의 제1 면(100a) 상에 배치될 수 있다. 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132)은 전이금속 산화물 층(110)을 사이에 두고 서로 이격될 수 있다. 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130a, 132a)의 각각은 전이금속 산화물 층(110)으로부터 이격될 수 있다. 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132) 사이의 제1 면(100a)은 채널 영역(CHR)으로 정의될 수 있다.
- [0097] 도 7c는 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치를 나타내는 사시도이다. 도 1을 참조하여 설명한 구성과 실질적으로 동일하거나 유사한 구성에 대하여는 동일하거나 유사한 참조 번호가 제공될 수 있으며, 설명의 간소화를 위해 중복되는 설명은 생략될 수 있다.
- [0098] 도 7c를 참조하면, 본 발명의 실시예들에 따른 전자 장치(13)는 위상 절연 층(100), 제1 및 제2 전이금속 산화물 층들(110-1, 110-2), 한 쌍의 게이트 전극들(120), 제1 내지 제3 소스/드레인 전극들(130, 132, 134)을 포함할 수 있다.
- [0099] 위상 절연 층(100)은 도 1을 참조하여 설명한 바와 실질적으로 동일할 수 있다.
- [0100] 위상 절연 층(100)의 제1 면(100a) 상에, 서로 이격하는 제1 및 제2 전이금속 산화물 층들(110-1, 110-2)이 배

치될 수 있다. 제1 및 제2 전이금속 산화물 층들(110-1, 110-2)은 제1 면(100a)에 인접하게 배치될 수 있다.

- [0101] 제1 전이금속 산화물 층(110-1)은 도 5a 내지 도 5c를 참조하여 설명한 전이금속 산화물 층(110)과 실질적으로 동일할 수 있고, 제2 전이금속 산화물 층(110-2)은 도 6a 내지 도 6c를 참조하여 설명한 전이금속 산화물 층(110)과 실질적으로 동일할 수 있다.
- [0102] 구체적으로, 제1 및 제2 전이금속 산화물 층들(110-1, 110-2)의 각각은 제1 서브 산화물 층(112) 및 제2 서브 산화물 층(114)을 포함할 수 있다. 제1 및 제2 전이금속 산화물 층들(110-1, 110-2)의 각각 내에서 제1 및 제2 서브 산화물 층(112, 114)이 적층된 순서는 반대일 수 있다. 제1 전이금속 산화물 층(110-1) 내에서 제1 서브 산화물 층(112)이 위상 절연 층(100)에 인접하게 배치될 수 있으며, 제2 전이금속 산화물 층(110-2) 내에서 제2 서브 산화물 층(114)이 위상 절연 층(100)에 인접하게 배치될 수 있다.
- [0103] 전이금속 산화물 층들(110) 상에 게이트 전극들(120)이 각각 배치될 수 있다. 게이트 전극들(120)의 각각은 도 1을 참조하여 설명한 바와 실질적으로 동일할 수 있다.
- [0104] 위상 절연 층(100)의 제2 면(100b) 상에, 서로 이격하는 제1 내지 제3 소스/드레인 전극들(130, 132, 134)이 배치될 수 있다. 제2 소스/드레인 전극(132)은 제1 및 제3 소스/드레인 전극들(130, 134) 사이에 배치될 수 있다.
- [0105] 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132) 사이의 제2 면(100b)은 제1 채널 영역(CHR1)으로 정의될 수 있고, 제2 및 제3 소스/드레인 전극들(132, 134) 사이의 제2 면(100b)은 제2 채널 영역(CHR2)으로 정의될 수 있다.
- [0106] 제1 전이금속 산화물 층(110-1)은 제1 채널 영역(CHR1)에 인접하게 위치할 수 있다. 예를 들어, 평면적 관점에서, 제1 전이금속 산화물 층(110-1)은 제1 채널 영역(CHR1)과 적어도 부분적으로 중첩될 수 있다.
- [0107] 제2 전이금속 산화물 층들(110-2)은 제2 채널 영역(CHR2)에 인접하게 위치할 수 있다. 예를 들어, 평면적 관점에서, 제2 전이금속 산화물 층(110-2)은 제2 채널 영역(CHR2)과 적어도 부분적으로 중첩될 수 있다.
- [0108] 제1 채널 영역(CHR1), 제1 및 제2 소스/드레인 전극들(130, 132), 제1 전이금속 산화물 층(110-1), 및 그 위의 게이트 전극(120)은 제1 서브 전자 장치(13a)를 구성할 수 있다. 유사하게, 제2 채널 영역(CHR2), 제2 및 제3 소스/드레인 전극들(132, 134), 제2 전이금속 산화물 층(110-2), 및 그 위의 게이트 전극(120)은 제2 서브 전자 장치(13b)를 구성할 수 있다.
- [0109] 제1 서브 전자 장치(13a)의 동작은 도 5a 내지 도 5c를 참조하여 설명한 바와 실질적으로 동일할 수 있으며, 제2 서브 전자 장치(13b)의 동작은 도 6a 내지 도 6c를 참조하여 설명한 바와 실질적으로 동일할 수 있다. 이에 따라, 게이트 전극들(120)에 동일한 극성의 전압이 가해졌을 때, 제1 서브 전자 장치(13a)와 제2 서브 전자 장치(13b)의 온-오프 상태는 서로 반대일 수 있다.
- [0110] 도 8a 내지 도 8d는 전이금속 산화물 층 내의 산소 결함에 따른 위상 절연 층의 표면 상태를 시뮬레이션한 결과를 나타내는 그래프들이다. 상기 시뮬레이션에서, 위상 절연 층으로는 2QL 두께의  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 가 사용되었고, 전이금속 산화물 층으로는  $\text{TiO}_2$ 가 사용되었다.
- [0111] 도 8a는 전이금속 산화물 층 내에 산소 결함이 존재하지 않을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.
- [0112] 도 8a를 참조하면, 전이금속 산화물 층 내에 산소 결함이 존재하지 않을 경우, 위상 절연 층의 표면의 전도대(conduction band)와 가전자대(valence band) 사이에 갭이 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서, 전이금속 산화물 층 내에 산소 결함이 존재하지 않을 경우, 위상 절연 층의 표면은 높은 저항을 가짐을 확인할 수 있다.
- [0113] 도 8b는 전이금속 산화물 층 내에 하나의 산소 결함이 위상 절연 층으로부터 멀게 존재할 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.
- [0114] 도 8b를 참조하면, 전이금속 산화물 층 내에 하나의 산소 결함이 위상 절연 층에서 멀게 존재할 경우에도, 위상 절연 층의 표면의 전도대와 가전자대 사이에 갭이 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서, 전이금속 산화물 층 내에 하나의 산소 결함이 위상 절연 층에서 멀게 존재할 경우에도, 위상 절연 층의 표면은 여전히 높은 저항을 가짐을 확인할 수 있다.
- [0115] 하지만, 금속 산화물 층 내에 산소 결함이 존재하지 않을 경우(도 8a)에 비하여, 전이금속 산화물 층 내에 하나의 산소 결함이 위상 절연 층에서 멀게 존재할 경우의 위상 절연 층의 표면의 전도대와 가전자대 사이에 갭이 작다는 것을 확인할 수 있다.
- [0116] 도 8c는 전이금속 산화물 층 내에 하나의 산소 결함이 위상 절연 층에 인접하게 존재할 때의 시뮬레이션 결과를

나타낸다. 도 8d는 전이금속 산화물 층 내에 두 개의 산소 결함들이 위상 절연 층에 인접하게 존재할 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

[0117] 도 8c 및 도 8d를 참조하면, 전이금속 산화물 층 내에 산소 결함(들)이 위상 절연 층에 인접하게 존재할 경우, 위상 절연 층의 표면의 전도대와 가전자대 사이에 갭이 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서, 전이금속 산화물 층 내에 산소 결함(들)이 위상 절연 층에 인접하게 존재할 경우, 위상 절연 층의 표면은 낮은 저항을 가짐을 확인할 수 있다.

[0118] 도 8a 내지 도 8d의 결과를 참조하면, 전이금속 산화물 층 내의 산소 결함(들)을 통해, 위상 절연 층의 표면의 저항 상태를 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

[0120] 도 9a는 전이금속 산화물 층의 산소 결함에 따른 위상 절연 층의 표면의 저항 변화를 시뮬레이션한 결과를 나타내는 그래프이다. 도 9b는 전이금속 산화물 층의 산소 결함에 따른 위상 절연 층의 표면의 전도도 변화를 시뮬레이션한 결과를 나타내는 그래프이다. 상기 시뮬레이션에서, 위상 절연 층으로는 3QL 두께의  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 가 사용되었고, 전이금속 산화물 층으로는  $\text{HfO}_2$ 가 사용되었다.

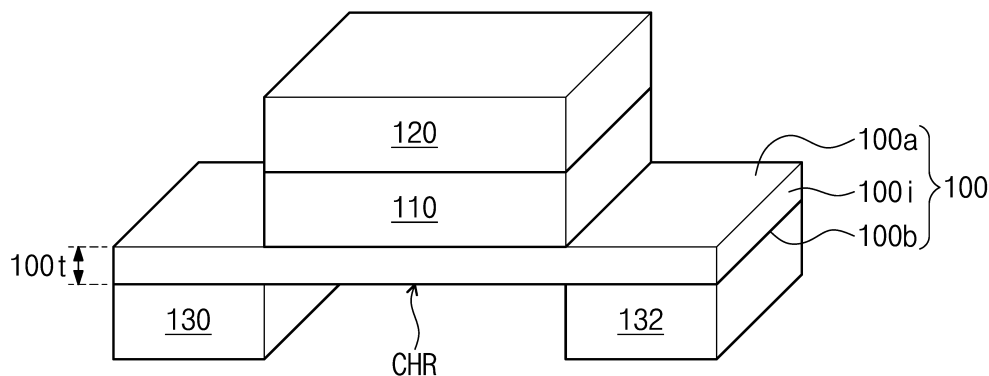
[0121] 도 9a 및 도 9b를 참조하면, 전이금속 산화물 층 내에 산소 결함들이 존재할 때, 위상 절연 층의 표면의 저항이 낮다(혹은, 전도도가 높다)는 것을 확인할 수 있다. 반대로 전이금속 산화물 층 내에 산소 결함이 존재하지 않을 때, 위상 절연 층의 표면의 저항이 높다(혹은, 전도도가 낮다)는 것을 확인할 수 있다.

[0123] 이상, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예를 설명하였지만, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명이 그 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예에는 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다.

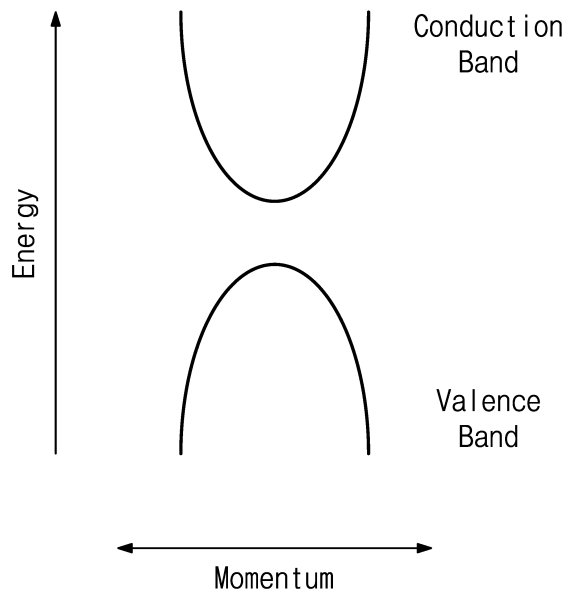
## 도면

### 도면1

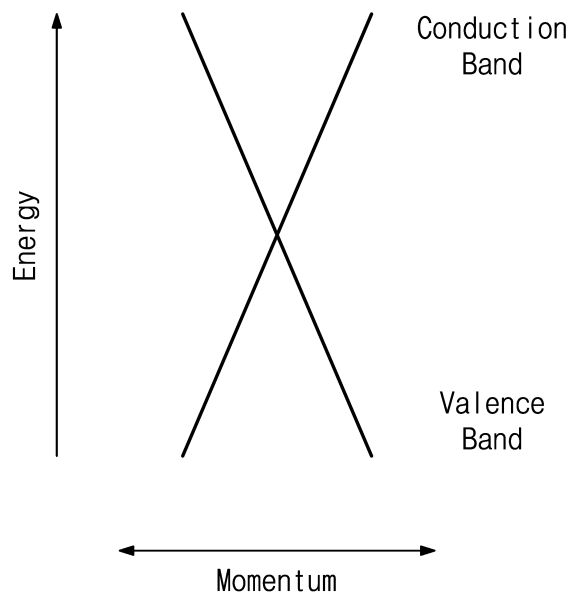
10



도면2a

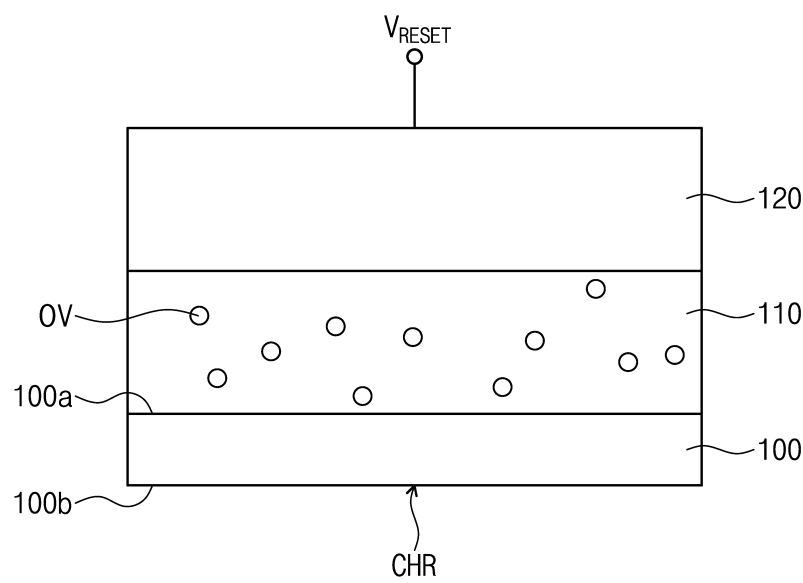


도면2b

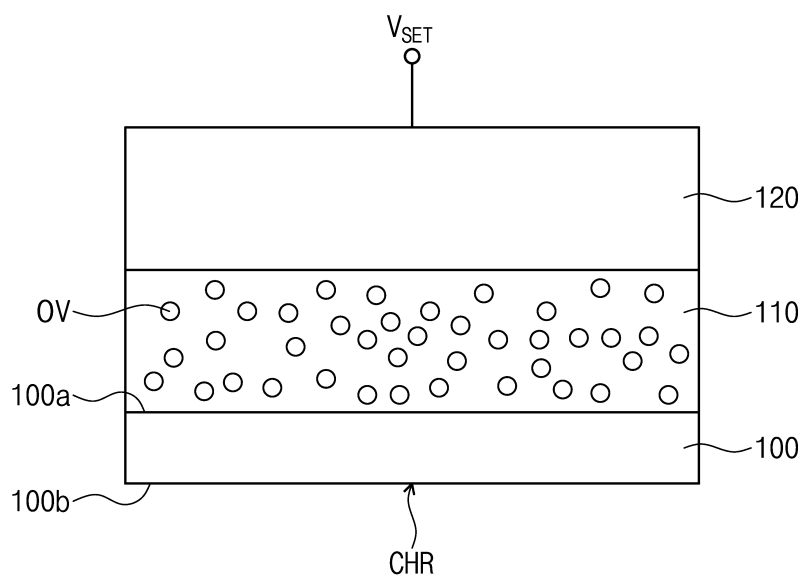




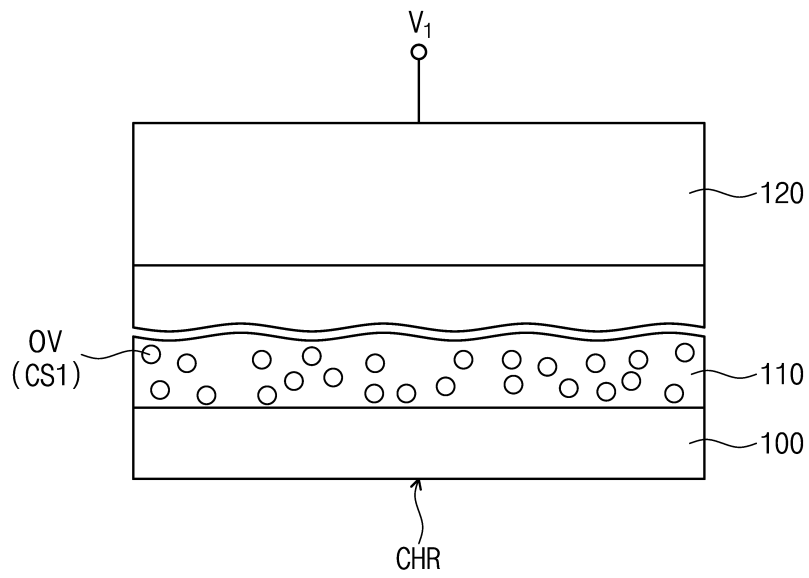
도면3a



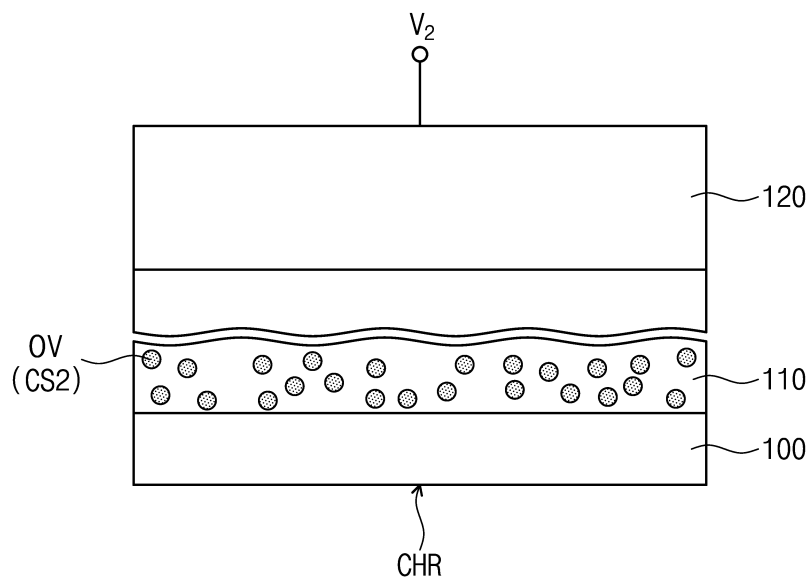
도면3b



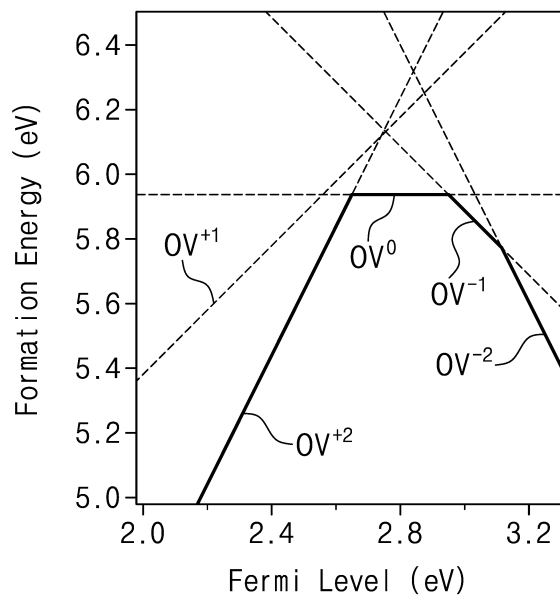
도면4a



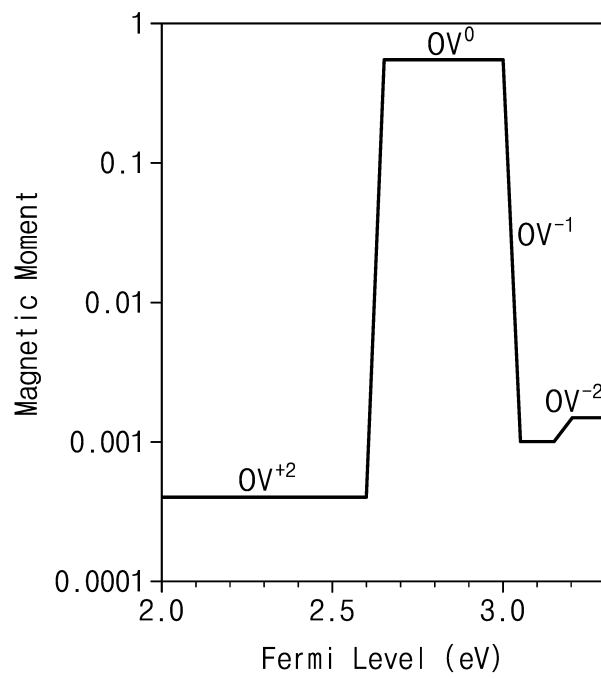
도면4b



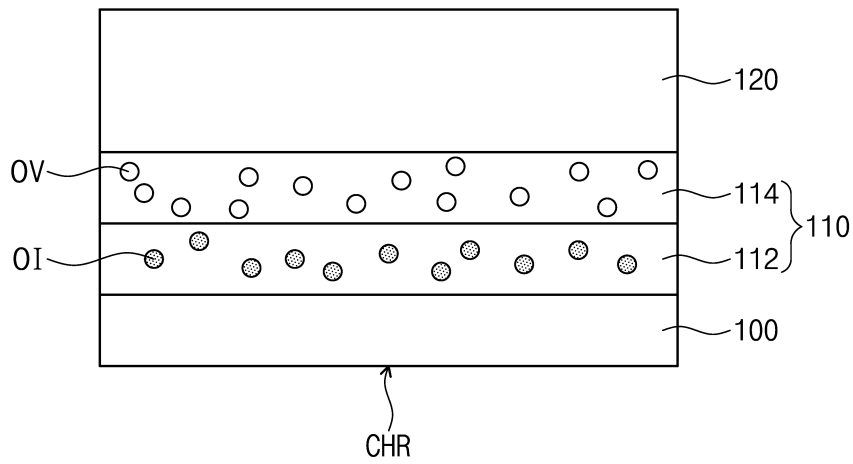
도면4c



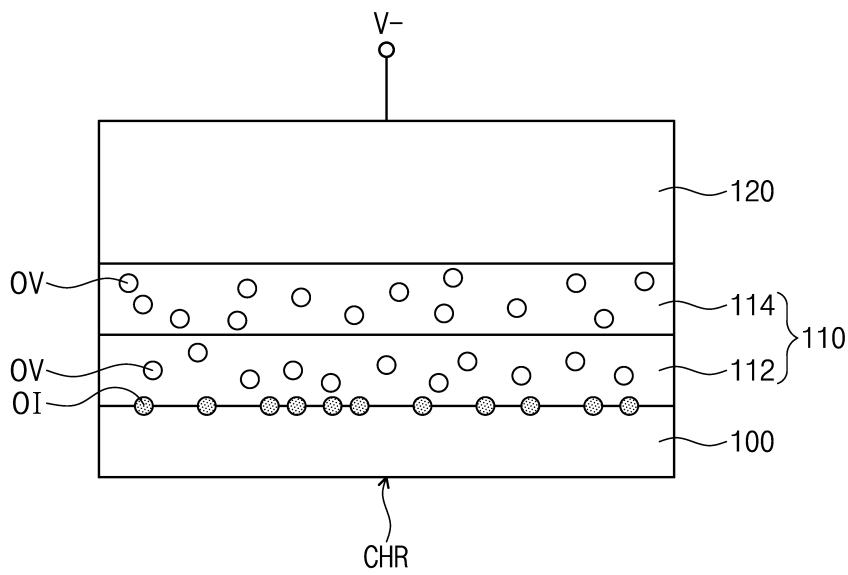
도면4d



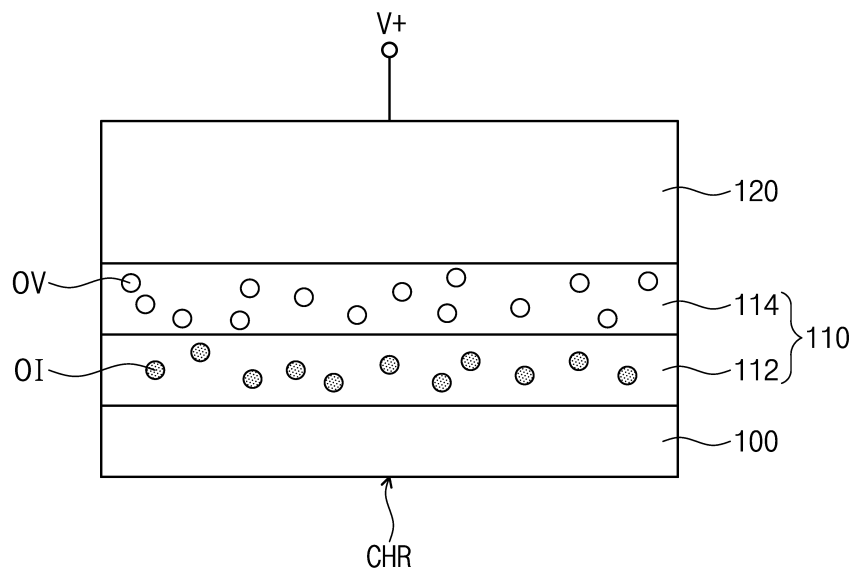
도면5a



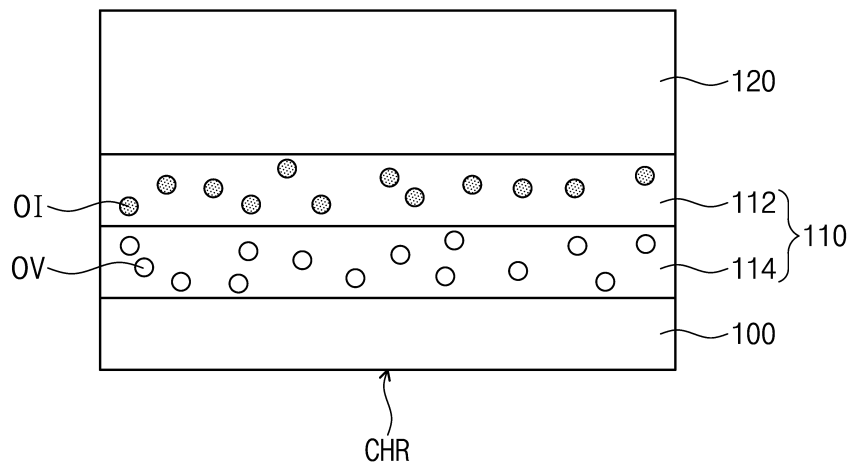
도면5b



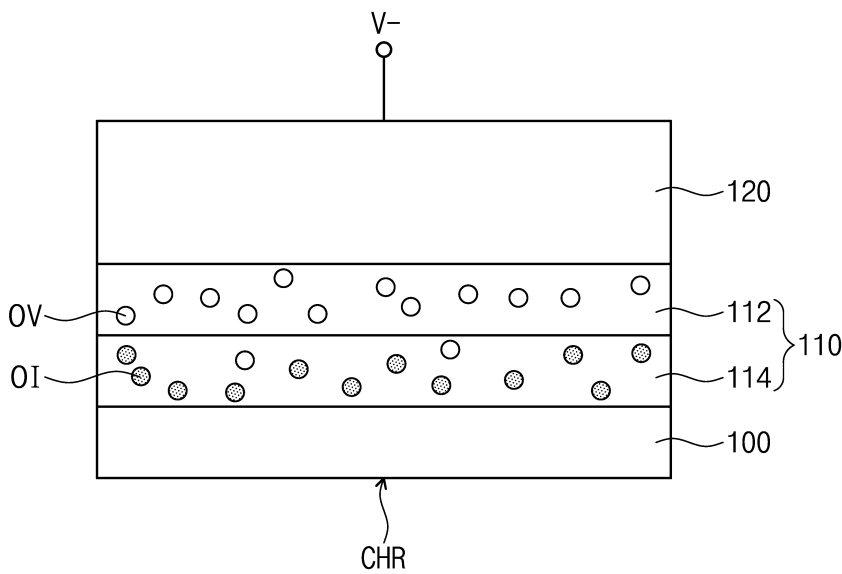
도면5c



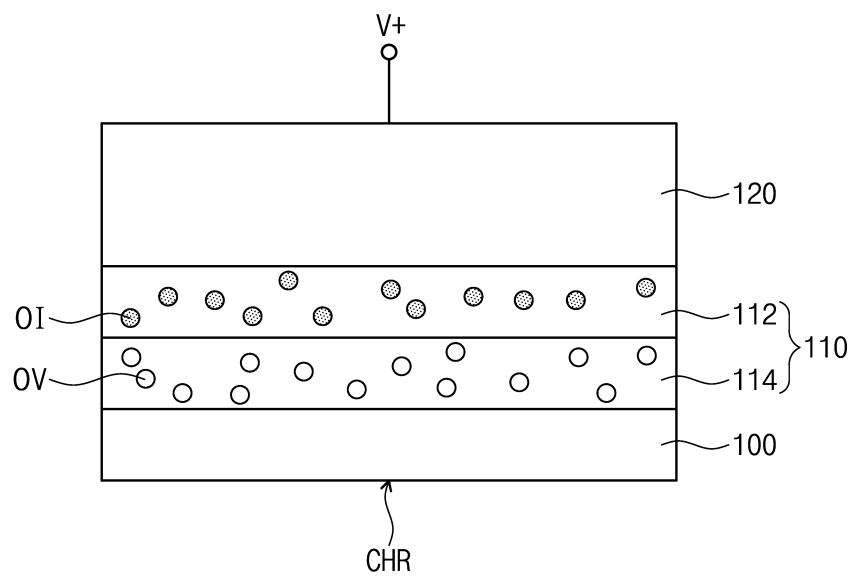
도면6a



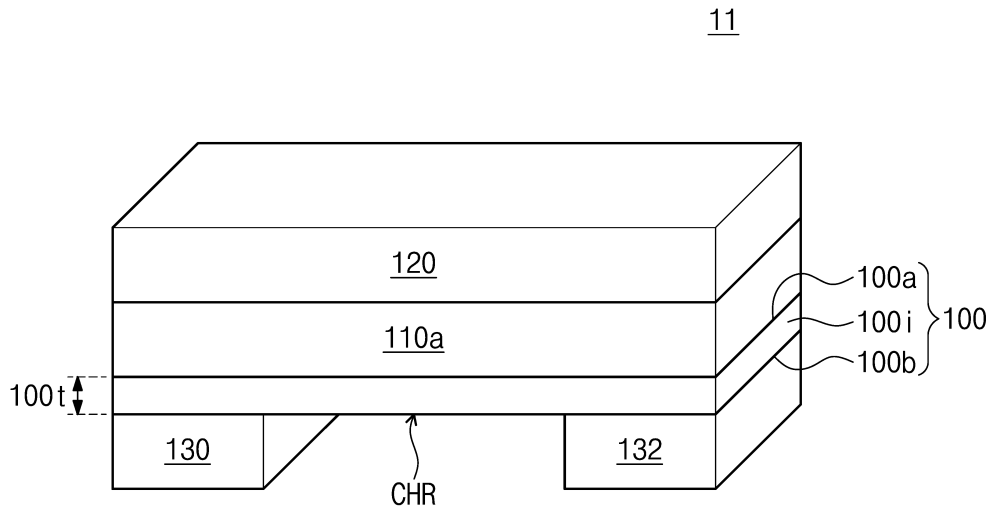
도면6b



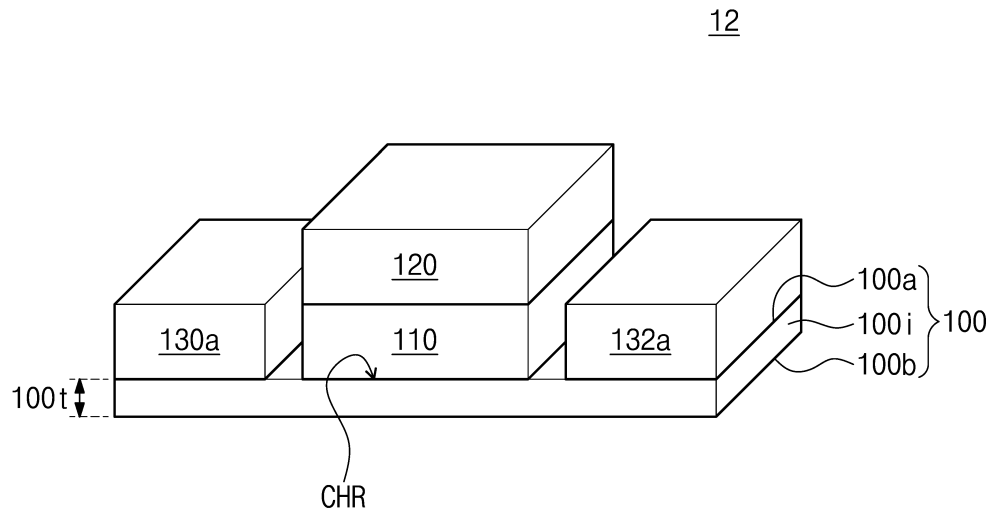
도면6c



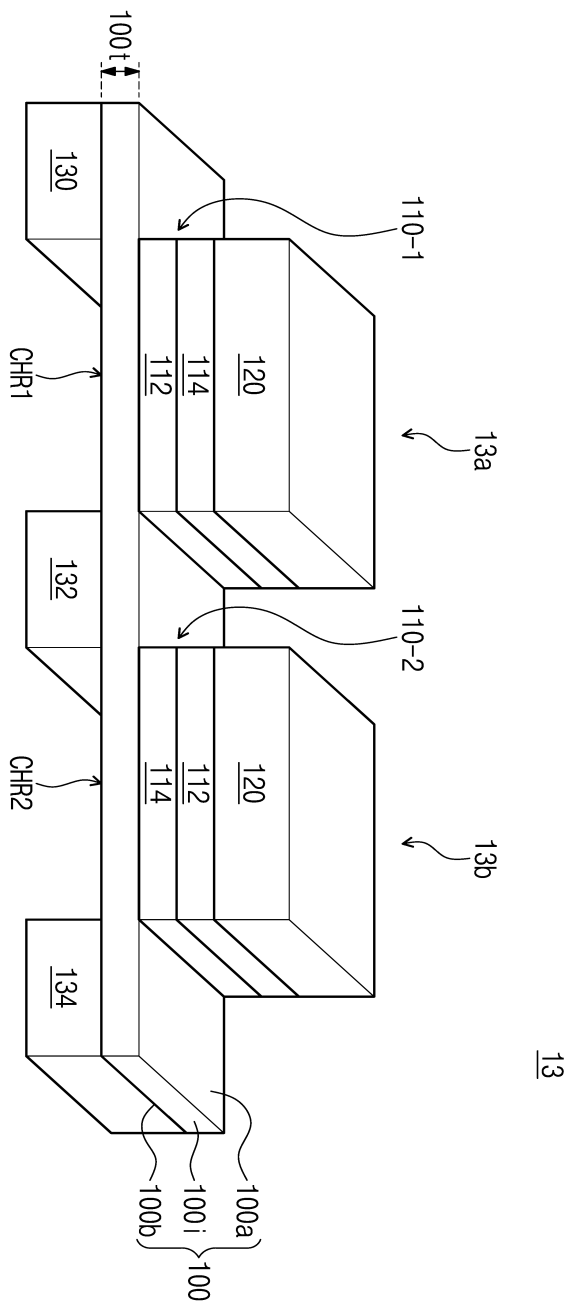
도면7a



도면7b

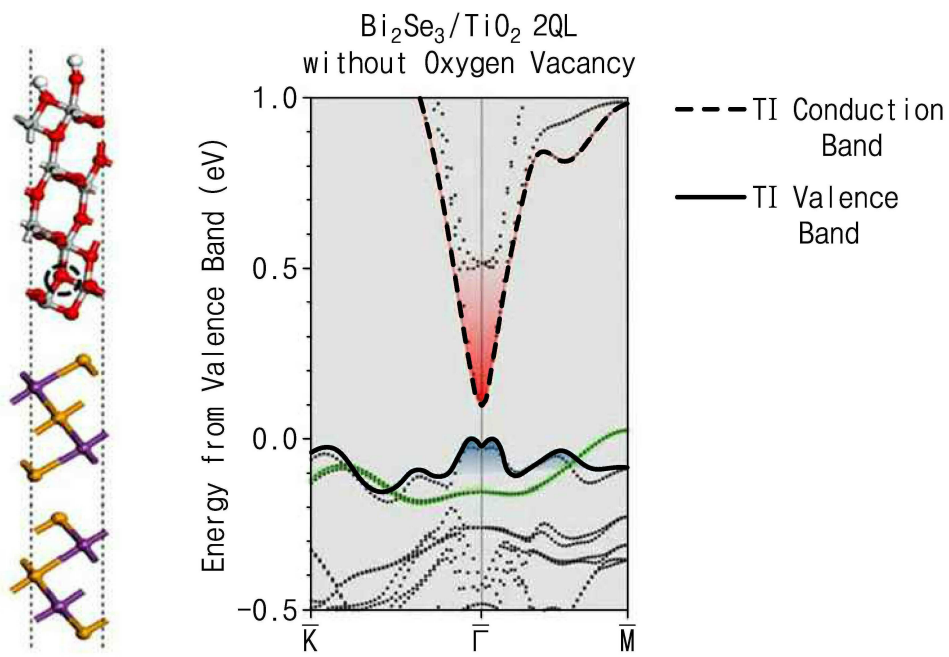


도면7c

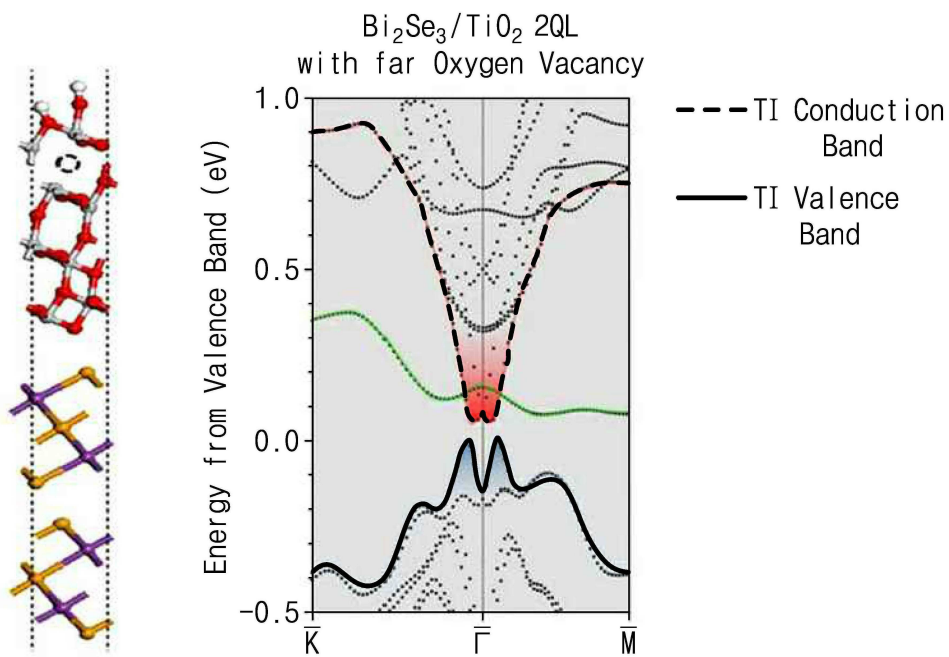




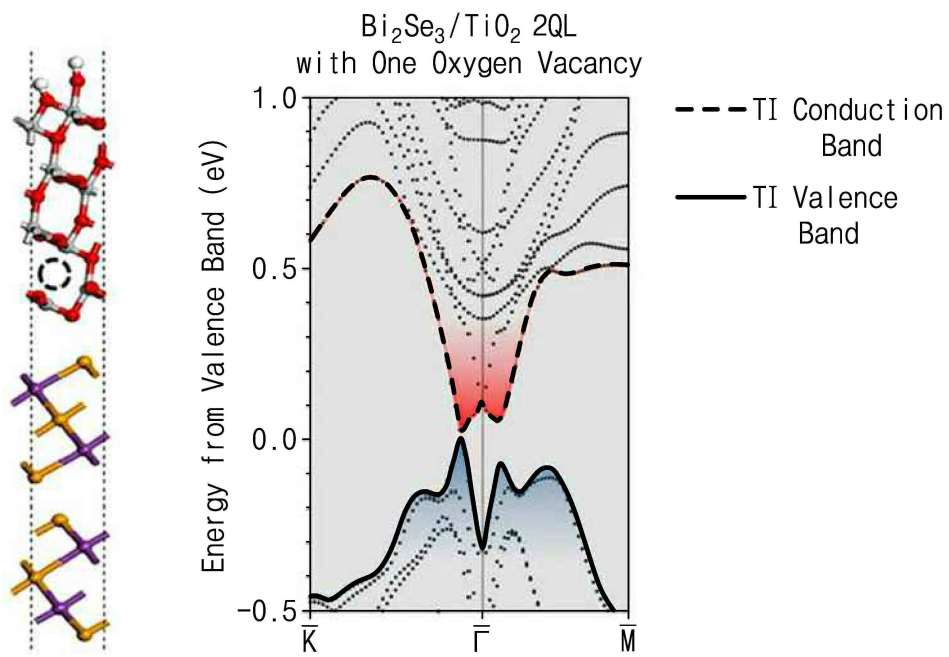
도면8a



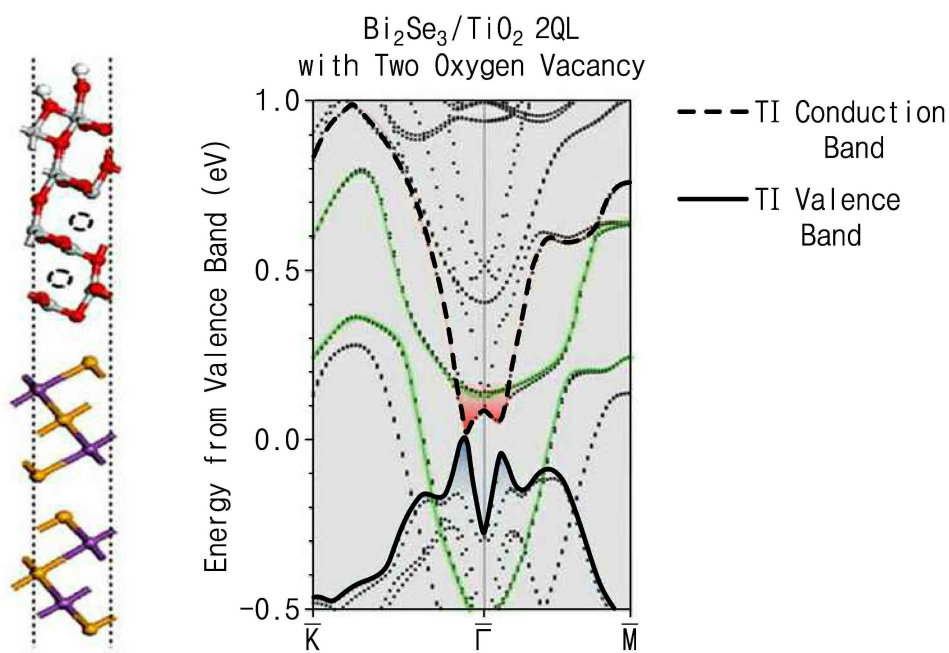
도면8b



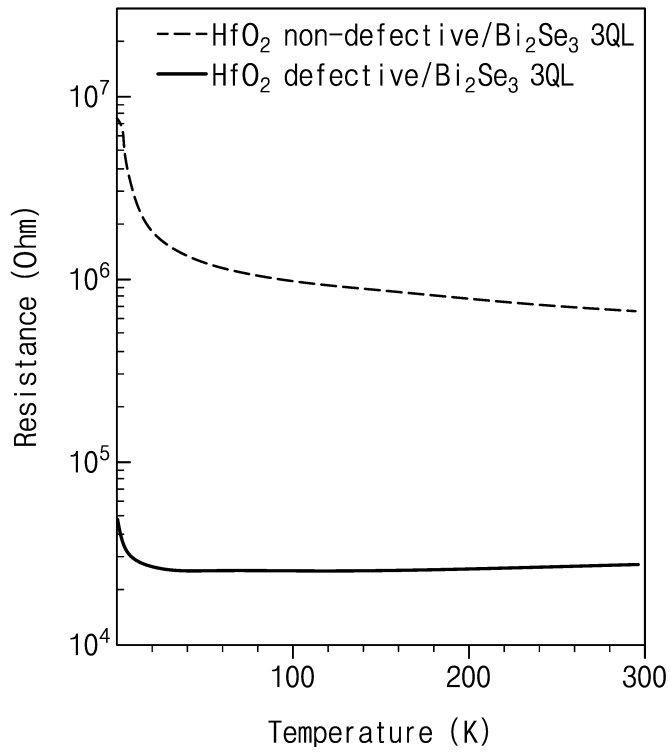
도면8c



도면8d



도면9a



도면9b

