(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년05월03일
(11) 등록번호 10-2247789
(24) 등록일자 2021년04월28일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 29/51 (2006.01) *H01L 21/02* (2006.01)
H01L 21/28 (2006.01) *H01L 49/02* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 29/516 (2013.01)
H01L 21/02181 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0144294
(22) 출원일자 2019년11월12일
심사청구일자 2019년11월12일
(56) 선행기술조사문헌
US20100283042 A1
KR1020160038631 A

(73) 특허권자
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
이준희
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 교수아파트 402동 101호
박노정
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 교수아파트 404동 302호
(74) 대리인
박상열, 최내윤, 정우상

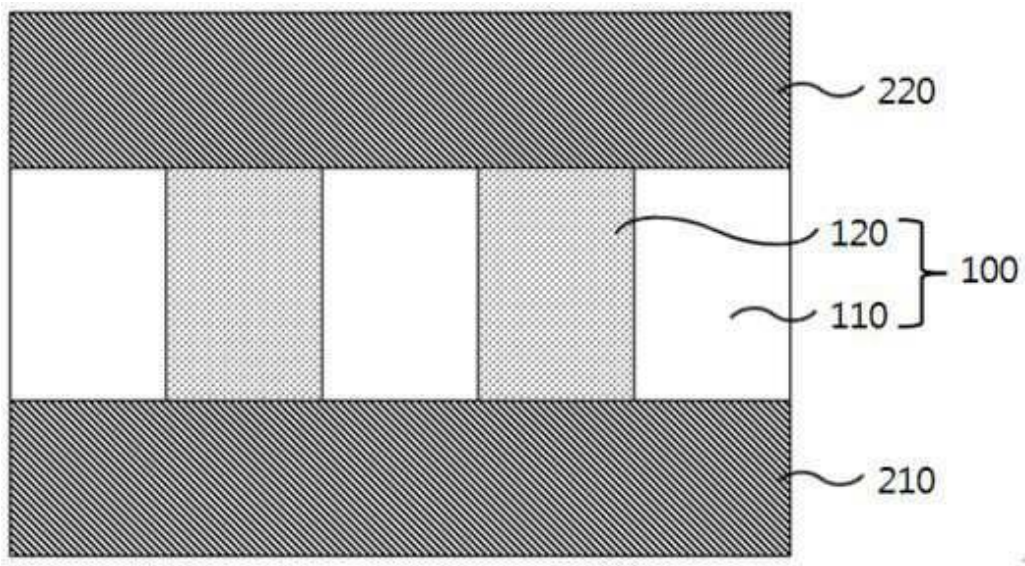
전체 청구항 수 : 총 13 항 심사관 : 김종호

(54) 발명의 명칭 **유전 박막, 및 이를 포함하는 멤커패시터**

(57) 요 약

유전 박막에 있어서, 제1 축 방향으로 변위를 가질 수 있는 포논(phonon)을 포함하는 복수의 강유전 도메인, 및 상기 포논의 탄성 상호 작용(elastic interaction)을 차단하는 복수의 스페이서를 포함하되, 복수의 상기 강유전 도메인 및 복수의 상기 스페이서는, 상기 1축에 직각인 제2 축을 따라 교대로 그리고 반복하여 배열되는 것을 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도8



(52) CPC특허분류
H01L 21/02266 (2013.01)
H01L 21/02609 (2013.01)
H01L 21/28008 (2013.01)
H01L 28/75 (2013.01)
H01L 29/40111 (2019.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711096829
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 미래소재디스커버리지원(R&D)
연구과제명 양자물질 게놈을 이용한 다중 정전용량 소재군 발굴
기 여 율 1/2
과제수행기관명 울산과학기술원
연구기간 2019.03.01 ~ 2019.12.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711087407
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 집단연구지원(R&D)
연구과제명 응집계의 비평형 양자 동역학 연구
기 여 율 2/2
과제수행기관명 울산과학기술원
연구기간 2019.03.01 ~ 2020.02.29

명 세 서

청구범위

청구항 1

제1 축 방향으로 변위를 가질 수 있는 포논(phonon)을 포함하는 복수의 강유전 도메인; 및

상기 포논의 탄성 상호 작용(elastic interaction)을 차단하는 복수의 스페이서를 포함하되,

복수의 상기 강유전 도메인 및 복수의 상기 스페이서는, 상기 제1축에 직각인 제2 축을 따라 교대로 그리고 반복하여 배열되는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 2

제1 항에 있어서,

복수의 상기 스페이서는, 외부에서 인가된 전기장으로부터 고정된 분극(polarization)을 갖는 도메인 장벽을 포함하고,

상기 도메인 장벽의 호핑(hopping)에 의해, 상기 강유전 도메인의 상기 포논의 변위가 변경되는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 3

제1 항에 있어서,

사방정계(orthombic) 결정 구조를 갖는 하프늄 산화물(HfO_2)을 포함하고,

사방정계에서 상기 제1 축 방향에 직각인 제2 축 방향으로 배열된, 하나의 상기 강유전 도메인 및 하나의 상기 스페이서는 상기 하프늄 산화물의 유닛셀을 구성하는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 4

제1 항에 있어서,

$Pca2_1$ 공간군에 대응되는 사방정계(orthorhombic) 결정 구조를 갖고,

사방정계의 상기 제1 축 방향에 직각인 제2 축 방향으로 배열된 하나의 상기 강유전 도메인 및 하나의 상기 스페이서는 사방정계 결정 구조의 상기 유전 박막의 유닛셀을 구성하는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 5

제1 항에 있어서,

$Pca2_1$공간군에 대응되는 사방정계(orthombic) 결정 구조를 갖는 금속 산화물을 포함하고,

상기 강유전 도메인은, 상기 제2 축을 따라 상기 금속 산화물의 유닛셀의 절반(half unit-cell)의 폭(width)을 갖고,

상기 스페이서는, 상기 강유전 도메인과 동일한 폭을 갖고,

하나의 상기 강유전 도메인 및 하나의 상기 스페이서는 상기 금속 산화물의 유닛셀을 구성하는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 6

제1 항에 있어서,

$Pca2_1$ 공간군에 대응되는 사방정계(orthormbic) 결정 구조를 갖는 하프늄 산화물(HfO_2)을 포함하고,

상기 강유전 도메인은, 상기 제2 축을 따라 3Å 이하의 폭을 갖고,

하나의 상기 강유전 도메인 및 하나의 상기 스페이서는 상기 하프늄 산화물의 유닛셀을 구성하는 것을 포함하는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 7

제1 항에 따른 유전 박막;

상기 제1 축을 따라 상기 유전 박막 상에 배치되는 상부 전극; 및

상기 제1 축을 따라 상기 유전 박막의 하부에 배치되는 하부 전극을 포함하되,

상기 유전 박막은, 각각의 상기 강유전 도메인 내의 상기 포논이 상기 제1 축을 따라 일방향 또는 상기 일방향에 반평행한 방향으로 변위를 갖는 다중 유전 박막을 포함하는 멤커패시터.

청구항 8

외부에서 인가된 전기장으로부터 고정된 분극(polarization)을 갖는 스페이서, 및 외부에서 인가된 전기장에 의해 분극(polarization)이 제어되는 강유전 도메인이 교대로 그리고 반복적으로 제공되고,

하나의 상기 스페이서 및 하나의 상기 강유전 도메인이 유닛셀을 구성하는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 9

제8 항에 있어서,

제1 분극 값을 갖고, 복수의 상기 유닛셀을 포함하는 제1 영역; 및

제2 분극 값을 갖고, 복수의 상기 유닛셀을 포함하는 제2 영역을 포함하되,

상기 제1 영역에 포함된 복수의 상기 유닛셀의 상기 스페이서가 상기 강유전 도메인보다 낮은 분극을 가져, 상기 제1 영역의 분극 값이 제1 펄스 값을 갖고,

상기 제2 영역에 포함된 복수의 상기 유닛셀의 상기 스페이서가 상기 강유전 도메인보다 높은 분극을 가져, 상기 제2 영역의 분극 값이 제2 펄스 값을 갖는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 10

제9 항에 있어서,

상기 제1 영역의 평균 분극 값은, 상기 제1 영역에 포함된 복수의 상기 강유전 도메인의 분극 값보다 낮고,

상기 제2 영역의 평균 분극 값은, 상기 제2 영역에 포함된 복수의 상기 강유전 도메인의 분극 값보다 높은 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 11

제9 항에 있어서,

상기 제1 영역 또는 상기 제2 영역의 평균 분극 값은, 복수의 상기 강유전 도메인 각각의 분극 값의 반값(half value)인 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 12

제8 항에 있어서,

사방정계의 유닛셀 단위로, 분극이 제어되어 다중 유전율 갖는 것을 포함하는 유전 박막.

청구항 13

제1 전극;

제2 전극; 및

상기 제1 전극과 상기 제2 전극의 사이에 배치되는 제8 항에 따른 유전 박막을 포함하되,

상기 유전 박막 내의 복수의 상기 강유전 도메인 및 복수의 상기 스페이서는, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에서 교대로 횡방향으로 적층(lateral stacking)되는 것을 포함하는 멤커패시터.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 출원은 유전박막, 및 이를 포함하는 멤커패시터에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 변위를 가질 수 있는 포논(phonon)을 포함하는 강유전 도메인, 및 상기 탄성 상호 작용(elastic interaction)을 차단하는 스페이서를 포함하고, 복수의 상기 강유전 도메인 및 복수의 상기 스페이서가 교대로 그리고 반복하여 배열된 유전박막, 및 이를 포함하는 멤커패시터에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 일반적으로 주로 사용되는 강유전 물질인 페로브스카이트는 전기 쌍극자를 갖는 금속 원소를 포함하고, 외부에서 인가되는 전기장에 의해 전기 쌍극자 간의 상호작용으로 자발적 자화가 일어날 수 있다. 외부 전기장이 제거된 후에도 자발적 자화가 안정적으로 유지될 수 있고, 또한, 반평행 방향으로 자화시켜, 이진법적인 코팅이 가능하다. 이에 따라, 페로브스카이트는 강유전체 램(FeRAM)으로 사용된다.

[0003] 하지만, 강유전체는 표면 전하에 의한 탈분극(depolarization)될 수 있고, 이에 따라, 크기가 작아지는 경우, 표면 전하가 증가되어 강유전 특성이 저하될 수 있다. 따라서, 메모리 소자의 소형화에 발맞춰, 크기 감소에도 강유전 특성이 안정적으로 유지될 수 있는 소재 또는 소자 구조의 연구가 진행 중에 있다.

[0004] 예를 들어, 대한민국 등록 공보 10-13011251(출원번호 10-2011-0118134)에는 자가 스택(magnetic stack)으로서, 터널 정션(tunnel junction), 강자성 프리층(free layer), 핀드층(pinned layer), 및 적어도 하나의 절연층을 포함하며, 상기 적어도 하나의 절연층은 하나의 전도성 피처(conductive feature)를 통한 전기 전달(electrical transmission)을 허용하면서 포논들을 차단하는 전기적 및 열적 절연성 물질로 구성되는 자가 스택이 개시된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 출원이 해결하고자 하는 일 기술적 과제는변위를 가질 수 있는 포논을 포함하여, 외부에서 인가되는 전기장에 따라 변화되는 분극 값을 갖는 복수의 강유전 도메인, 및 상기 포논의 이동을 차단하고, 외부에서 인가되는 전기장에 의해 일정한 분극 값을 갖는 복수의 스페이서를 포함하고, 복수의 상기 강유전 도메인 및 복수의 상기 스페이서가 교대로 그리고 반복적으로 적층된 유전박막, 및 이를 포함하는 멤커패시터를 제공하는 데 있다.

[0006] 본 출원이 해결하고자 하는 다른 기술적 과제는 유닛셀 단위로 분극이 제어되어 다중 유전 특성을 갖는 유전박막, 및 이를 포함하는 멤커패시터를 제공하는 데 있다.

[0007] 본 출원이 해결하고자 하는 기술적 과제는, 상술된 것에 제한되지 않는다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기 기술적 과제를 해결하기 위해, 본 출원은, 유전 박막을 제공한다.

[0009] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막은, 제1 축 방향으로 변위를 가질 수 있는 포논(phonon)을 포함하는 복수의 강유전 도메인, 및 상기 포논의 탄성 상호 작용(elastic interaction)을 차단하는 복수의 스페이서를 포함하되, 복수의 상기 강유전 도메인 및 복수의 상기 스페이서는, 상기 제1축에 직각인 제2 축을 따라 교대로 그리고 반복하여 배열되는 것을 포함할 수 있다.

[0010] 일 실시 예에 따르면, 복수의 상기 스페이서는, 외부에서 인가된 전기장으로부터 고정된 분극(polarization)을 갖는 도메인 장벽을 포함하고, 상기 도메인 장벽의 호핑(hopping)에 의해, 상기 강유전 도메인의 상기 포논의 변위가 변경되는 것을 포함할 수 있다.

[0011] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막은, 사방정계(orthombic) 결정 구조를 갖는 하프늄 산화물(HfO_2)을 포함하고, 상기 강유전 도메인의 상기 포논은, 상기 하프늄 산화물의 산소 원소에 포함할 수 있다.

[0012] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막은, Pbca 공간군에 대응되는 사방정계(orthorhombic) 결정 구조를 갖는 것을 포함할 수 있다.

[0013] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막은, Pbca 공간군에 대응되는 사방정계(orthombic) 결정 구조를 갖는 금속 산화물을 포함하고, 상기 강유전 도메인은, 상기 제2 축을 따라 상기 금속 산화물의 유닛셀의 절반(half unit-cell)의 폭(width)을갖고, 상기 스페이서는, 상기 강유전 도메인과 동일한 폭(width)을 갖는 것을 포함할 수 있다.

[0014] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막은, 사방정계(orthombic) 결정 구조를 갖는 하프늄 산화물(HfO_2)을 포함하고, 상기 강유전 도메인은, 상기 제2 축을 따라 3Å 이하의 폭을 갖는 것을 포함할 수 있다.

[0016] 상기 기술적 과제를 해결하기 위해, 본 출원은, 멤커패시터를 제공한다.

[0017] 일 실시 예에 따르면, 상기 멤커패시터는, 상기 유전 박막, 상기 제1 축을 따라 상기 유전 박막 상에 배치되는 상부 전극, 및상기 제1 축을 따라 상기 유전 박막의 하부에 배치되는 하부 전극을 포함하되,상기 유전 박막은, 각각의 상기 강유전 도메인 내의 상기 포논이 상기 제1 축을 따라 일방향 또는 상기 일방향에 반평행한 방향으로 변위를 갖는 다중 유전 박막을 포함할 수 있다.

[0019] 상기 기술적 과제를 해결하기 위해, 본 출원은, 유전 박막을 제공한다.

[0020] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막은, 외부에서 인가된 전기장으로부터 고정된 분극(polarization)을 갖는 스페이서, 및 외부에서 인가된 전기장에 의해 분극(polarization)이 제어되는 강유전 도메인이 교대로 그리고 반복적으로 제공되고,하나의 상기 스페이서 및 하나의 상기 강유전 도메인이 유닛셀을 구성하는 것을 포함할 수 있다.

[0021] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막은, 제1 분극 값을 갖고, 복수의 상기 유닛셀을 포함하는 제1 영역, 및제2 분극 값을 갖고, 복수의 상기 유닛셀을 포함하는 제2 영역을 포함하되,상기 제1 영역에 포함된 복수의 상기 유닛셀의 상기 스페이서가 상기 강유전 도메인보다 낮은 분극을 가져, 상기 제1 영역의 분극 값이 제1 펄스 값을 갖고,상기 제2 영역에 포함된 복수의 상기 유닛셀의 상기 스페이서가 상기 강유전 도메인보다 높은 분극을 가져, 상기 제2 영역의 분극 값이 제2 펄스 값을 갖는 것을 포함할 수 있다.

[0022] 일 실시 예에 따르면, 상기 제1 영역의 평균 분극 값은, 상기 제1 영역에 포함된 복수의 상기 강유전 도메인의 분극 값보다 낮고,상기 제2 영역의 평균 분극 값은, 상기 제2 영역에 포함된 복수의 상기 강유전 도메인의 분극 값보다 높은 것을 포함할 수 있다.

[0023] 일 실시 예에 따르면, 상기 제1 영역 또는 상기 제2 영역의 평균 분극 값은, 복수의 상기 강유전 도메인 각각의 분극 값의 반값(half value)인 것을 포함할 수 있다.

[0024] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막은, 상기 유닛셀 단위로, 분극이 제어되어 다중 유전율 갖는 것을 포함할

수 있다.

[0026] 상기 기술적 과제를 해결하기 위해, 본 출원은, 멤커패시터를 제공한다.

[0027] 일 실시 예에 따르면, 상기 멤커패시터는, 제1 전극, 제2 전극, 및상기 제1 전극과 상기 제2 전극의 사이에 배치되는 상기 유전 박막을 포함하되,상기 유전 박막 내의 복수의 상기 강유전 도메인 및 복수의 상기 스페이서는, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극 사이에서 교대로 횡방향으로 적층(lateral stacking)되는 것을 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0028] 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막은, 제1 축 방향으로 변위를 가질 수 있는 포논(phonon)을 포함하는 복수의 강유전 도메인, 및 상기 포논의 탄성 상호 작용(elastic interaction)을 차단하는 복수의 스페이서를 포함할 수 있고, 이 때, 복수의 상기 강유전 도메인과 복수의 상기 스페이서는 상기 제1 축에 직각인 제2 축을 따라 교대로 그리고 반복적으로 배열될 수 있다.

[0029] 외부에서 인가되는 전기장에 의해, 복수의 상기 강유전 도메인의 상기 포논은 상기 제1 축을 따라 일방향 또는 일방향의 반평행한 방향으로 변위를 가질 수 있다. 즉, 외부에서 인가되는 전기장에 따라 복수의 상기 강유전 도메인의 분극이 제어될 수 있다.

[0030] 반면, 복수의 상기 스페이서는 외부에서 인가된 전기장에 의해 고정된 분극 값을 가질 수 있고, 서로 반평행한 방향의 변위를 갖는 상기 강유전 도메인의 사이에서 도메인 장벽을 형성할 수 있다. 즉, 서로 반대 방향의 변위를 갖는 상기 강유전 도메인 사이에 배치된 적어도 하나의 상기 스페이서는 상기 도메인 장벽을 포함할 수 있다. 또한, 상술된 바와 같이, 상기 스페이서는 상기 포논 간의 탄성 상호 작용을 차단할 수 있어, 상기 도메인 장벽에서 상기 포논의 이동이 차단될 수 있다.

[0031] 따라서, 상기 강유전 도메인의 상기 포논 사이의 전기 쌍극자 간의 상호작용이 억제될 수 있고, 이에 따라, 상기 도메인 장벽의 호핑에 의해, 반평행 방향으로 분극된 상기 강유전 도메인을 포함하는 분극 영역이 확장될 수 있다.

[0032] 즉, 분극된 하나의 상기 강유전 도메인은 안정적으로 분극 값을 유지할 수 있고, 이에 따라, 복수의 상기 강유전 도메인에 대하여, 하나의 상기 강유전 도메인만의 분극이 제어될 수 있다. 따라서, 상기 강유전 도메인, 및 상기 스페이서를 포함하는 상기 유전 박막은 다중 유전 특성을 가질 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0033] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 개략적인 모식도이다.

도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 고체 원자 구조를 나타내는 도면이다.

도 3 내지 도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 제조 방법을 설명하기 위한 입방정계 결정 구조를 갖는 하프늄 산화물의 포논 분포 및 포논 모드를 나타내는 도면이다.

도 5는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 유닛셀의 분자 구조를 나타내는 도면이다.

도 6은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 공간군을 나타내는 도면이다.

도 7은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 분극화 후의 분자구조 및 도메인 장벽의 형성을 나타내는 도면이다.

도 8은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막을 포함하는 멤커패시터의 개략적인 단면도를 나타내는 도면이다.

도 9 내지 도 10은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 도메인 장벽 형성에 의한 분극 곡선(polarization curve)을 나타내는 도면이다.

도 11 내지 도 12는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 국부 분극(local polarization)에 의한 분극 곡선(polarization curve)을 나타내는 도면이다.

도 13 내지 도 14는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 도메인 장벽 에너지를 나타내는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0034] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시 예를 상세히 설명할 것이다. 그러나 본 발명의 기술적 사상은 여기서 설명되는 실시 예에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화 될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시 예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다.

[0035] 본 명세서에서, 어떤 구성요소가 다른 구성요소 상에 있다고 언급되는 경우에 그것은 다른 구성요소 상에 직접 형성될 수 있거나 또는 그들 사이에 제3의 구성요소가 개재될 수도 있다는 것을 의미한다. 또한, 도면들에 있어서, 막 및 영역들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다.

[0036] 또한, 본 명세서의 다양한 실시 예 들에서 제1, 제2, 제3 등의 용어가 다양한 구성요소들을 기술하기 위해서 사용되었지만, 이들 구성요소들이이 같은 용어들에 의해서 한정되어서는 안 된다. 이들 용어들은 단지 어느 구성요소를 다른 구성요소와 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다. 따라서, 어느 한 실시 예에 제 1구성요소로 언급된 것이 다른 실시 예에서는 제 2 구성요소로 언급될 수도 있다. 여기에 설명되고 예시되는 각 실시 예는 그것의 상보적인 실시 예도 포함한다. 또한, 본명세서에서 '및/또는'은 전후에 나열한 구성요소들 중 적어도 하나를 포함하는 의미로 사용되었다.

[0037] 명세서에서 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한 복수의 표현을 포함한다. 또한, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 구성요소 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징이나 숫자, 단계, 구성요소 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 배제하는 것으로 이해되어서는 안 된다.

[0038] 또한, 하기에서 본 발명을 설명함에 있어 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명은 생략할 것이다.

[0040] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 개략적인 모식도이고, 도 2는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 고체 원자 구조를 나타내는 도면이고, 도 3 내지 도 4는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 제조 방법을 설명하기 위한 입방정계 결정 구조를 갖는 하프늄 산화물의 포논 분포 및 포논 모드를 나타내는 도면이다.

[0041] 도 1 내지 도 4를 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막(100)은,스페이서(110) 및 강유전 도메인(120)이 교대로 그리고 반복적으로 적층된 것을 포함할 수 있다.

[0042] 일 실시 예에 따르면, 상기 강유전 도메인(120)은 제1 축(z) 방향으로 변위를 가질 수 있는 포논(phonon)을 포함할 수 있고, 이 때, 상기 유전 박막(100)은 상기 강유전 도메인(120), 및 상기 스페이서(110)가 상기 제1 축(z) 방향에 직각인 제2 축(y) 방향으로 교대로 그리고 반복적으로 배열된 구조를 가질 수 있다.

[0043] 상술된 바와 같이, 상기 강유전 도메인(120)은 제1 축(z) 방향으로 이동될 수 있는 포논(phonon)을 포함할 수 있다. 이에 따라, 외부에서 인가되는 전기장에 의해, 상기 강유전 도메인(120)의 상기 포논은 상기 제1 축(z) 방향을 따라 일방향(+z) 또는 상기 일방향의 반평행(-z) 방향으로 변위를 가질 수 있다.

[0044] 반면, 상기 스페이서(110)는 실질적으로 상기 포논을 포함하지 않을 수 있다. 이에 따라, 상기 스페이서(110)는 상기 강유전 도메인(120)의 상기 포논 간의 탄성 상호 작용(elastic interaction)을 차단할 수 있고, 또한, 상기 스페이서(110)는 외부에서 인가되는 전기장에 의해 분극화(polarization)되지 않을 수 있다.

[0045] 따라서, 상기 유전 박막(100)은 상기 스페이서(110)에 의해 분리된 상기 강유전 도메인(120)의 주기적인 배열(array)을 가질 수 있다.

[0046] 일 실시 예에 따르면, 도 2에 도시된 바와 같이, 상기 유전 박막(100)은 $Pca2_1$ 공간군에 대응되는 사방정계(orthorhombic) 결정 구조를 갖는 금속 산화물일 수 있고, 이 경우, 상기 강유전 도메인(120)의 상기 포논은 상기 금속 산화물의 산소 원소에 포함될 수 있다. 구체적으로, 도 3에 도시된 바와 같이, 상기 유전 박막(100)은 Γ-포인트와 Y-포인트 잇는 플랫 밴드(flat band)를 가질 수 있다. 즉, 상기 유전 박막(100)은 상기 Γ-포인트와 상기 Y-포인트잇는 방향으로 동일한 에너지를 가질 수 있다.

[0047] 이 때, 상기 Y-포인트에서 상기 유전 박막(100)의 금속 원소는 상기 제1 축(z)에 직각인 평면을 기준으로 반평행(anti-parallel) 방향으로 이동(displacement)될 수 있고, 이에 따라, 상기 유전 박막(100)의 상기 산소 원소가 이동(sliding) 가능한 입체 공간(steric space)이 제공될 수 있다. 따라서, 상술된 바와 같이, 상기 제1 축(z)을 따라 이동 가능한 상기 포논을 포함하는 상기 강유전 도메인(120)이 제공될 수 있다.

[0048] 본 발명의 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막(100)은 사방정계 결정 구조를 갖는 하프늄 산화물일 수 있다. 일

반적으로, 상기 하프늄 산화물은 상온에서 사방정계 결정 구조를 가질 수 있으나, 온도가 증가함에 따라 정방정계(tetragonal) 결정 구조, 및 입방정계(cubic) 결정 구조를 차례로 가질 수 있다. 예를 들어, 상기 하프늄 산화물은 2870K의 온도에서 정방정계 결정 구조를 가질 수 있고, 2870K 초과의 온도에서 입방정계 결정 구조를 가질 수 있다.

[0049] 구체적으로 예를 들어, 상기 유전 박막(100)이 하프늄 산화물인 경우, 하프늄 산화물은 기판 상에 800℃ 이상의 온도에서 펄스 레이저 증착법(PLD)에 의해 제조될 수 있다. 상기 펄스 레이저 증착법 직후, 상기 하프늄 산화물은 상온으로 냉각될 수 있고, 이에 따라, 상기 하프늄 산화물은 상기 사방정계 결정상을 주로 포함할 수 있다. 이 때, 상기 하프늄 산화물에 포함된 상기 사방정계 결정상의 양이 증가될수록, 상기 하프늄 산화물은 상기 스페이서(110) 및 강유전 도메인(120)이 교대로 그리고 반복적으로 적층된 상기유전 박막(100) 구조를 가질 수 있다.

[0050] 상술된 바와 같이, 상기 유전 박막(100)이 하프늄 산화물인 경우, 상기 하프늄 산화물이 증착되는 상기 기판은, 상기 하프늄 산화물보다 큰 격자 상수를 가질 수 있다. 예를 들어, 상기 하프늄 산화물은, 약 5.12Å의 격자 상수를 갖는 이트리아 안정화 지르코니아(YSZ), 또는 약 5.5Å의 격자 상수를 갖는 스트론튬 타이타네이트($SrTiO_3$)의 (111)면 상에 형성될 수 있다. 이에 따라, 후술되는 Γ-포인트에서 Γ_{15}^{z}포논 모드 및 Y_5^{z}포논 모드가 강화되어, 상기 하프늄 산화물 내에, 상기 스페이서(110) 및 상기 강유전 도메인(120)이 용이하게 생성될 수 있다.

[0051] 상기 하프늄 산화물이 입방정계 결정 구조를 갖는 경우, 상기 하프늄 산화물은 도 3에 도시된 바와 같은 포논 분포(phonon distribution)을 가질 수 있다. 이 때, 도 4에 도시된 바와 같이, 입방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물은 X_2', Γ_{15}^{z}, X_5^{y}, Y_5^{z}, 또는 Z_5^{x} 중에서 어느 하나의 포논 모드를 가질 수 있다.

[0052] 일반적으로, 입방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물은 가장 에너지가 낮는 상기 X_2'포논 모드를 주로 가질 수 있다. 도 4에 도시된 바와 같이, 상기 X_2'포논 모드는 상기 제1 축(z) 및 상기 제2 축(y) 모두와 직각인 제3 축(x) 방향으로 평행(+x) 및 반평행(anti-parallel, -x) 방향으로 변위를 가질 수 있는 상기 산소 원소를 포함할 수 있다.

[0053] 또한, 도 3에 도시된 바와 같이, 입방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물은 200 내지 300cm^{-1}의 주파수 범위에서 플랫 밴드를 가질 수 있고, 이 때, 입방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물은 상기 플랫 밴드의 Γ-포인트에서 Γ_{15}^{z}포논 모드(이하, 제1 포논 모드)를 가질 수 있고, 또한, X-포인트에서 Y_5^{z}포논 모드(이하, 제2 포논 모드)를 가질 수 있다.

[0054] 도 4에 도시된 바와 같이, 상기 제1 포논 모드는 상기 제1 축(z)을 포함하는 평면(즉, xz평면)을 중심으로 상기 제1 축(z)에 평행한 방향(+z)으로 이동 가능한 상기 산소 원소를 포함할 수 있다. 즉, 상기 xz평면을 중심으로 입방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물의 유닛셀(130)이 제1 반-유닛셀(half-unit-cell), 및 제2 반-유닛셀을 포함하는 경우, 상기 제1 포논 모드는 상기 제1 반-유닛셀 내의 상기 산소 원소와 상기 제2 반-유닛셀 내의 상기 산소 원소가 동일한 방향(+z)으로 변위를 가질 수 있다.

[0055] 반면, 상기 제2 포논 모드는 상기 xz평면을 중심으로 상기 제1 축(z)에 평행(+z) 및 반평행(-z) 방향으로 이동 가능한 상기 산소 원소를 포함할 수 있다. 즉, 상기 제2 포논 모드는 상기 제1 반-유닛셀 내의 상기 산소 원소(-z)와 상기 제2 반-유닛셀 내의 상기 산소 원소(+z)가 서로 반평행한 방향으로 변위를 가질 수 있다.

[0056] 이 때, 상기 제2 포논 모드에서 상기 산소 원소의 변위 크기는 상기 제1 포논 모드에서 상기 산소 원소의 변위와 실질적으로 서로 동일할 수 있다. 즉, 상기 제1 포논 모드와 상기 제2 포논 모드에서 상기 산소 원소 내에 포함된 상기 포논은 동일한 진폭으로 이동될 수 있다.

[0057] 이에 따라, 입방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물이 플랫 밴드에 해당하는 에너지를 갖는 경우, 동일한 진폭을 갖는 상기 제1 포논 모드와 상기 제2 포논 모드가 선형 결합(linear combination)되어 제3 포논 모드를 가질 수 있다. 따라서, 상기 제3 포논 모드는 상기 제1 반-유닛셀 또는 상기 제2 반-유닛셀 중의 어느 하나에서, 상기 제1 포논 모드 또는 상기 제2 포논 모드와 동일한 방향의 변위를 갖는 상기 포논을 포함할 수 있고, 또한, 상기 제1 반-유닛셀 또는 상기 제2 반-유닛셀 중의 다른 하나에서, 실질적으로 변위가 없는 상기 포논을 포함할 수 있다.

[0058] 상술된 바와 같이, 상기 하프늄 산화물은 온도가 감소함에 따라 입방정계 결정 구조에서 결정 격자가 응축(condense)되며, 정방정계 결정 구조, 및 사방정계 결정 구조를 차례로 가질 수 있고, 도 1 내지 도 2를 참조하여 상술된 바와 같이, 사방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물은 상기 스페이서(110), 및 상기 강유전 도메인(120)이 교대로 그리고 연속적으로 배열된 구조를 가질 수 있다.

[0059] 따라서, 사방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물은 상기 제1 포논 모드, 및 상기 제2 포논 모드가 선형 결합하여 형성된 상기 제3 포논 모드의 결정 격자가 응축되어 형성될 수 있다.

[0060] 상술된 바와 달리, 입방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물이 주로 갖는 상기 X_2'포논 모드의 결정 격자가 응축되어 사방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물이 형성될 수 있다. 하지만, 상기 X_2'포논 모드의 모든 포논은 변위를 가질 수 있고, 이에 따라, 상기스페이서(110), 및 상기 강유전 도메인(120)을 포함하는 상기 유전 박막(100)이 형성되는 것이 용이하지 않을 수 있다.

[0061] 하지만, 상술된 바와 같이, 사방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물은 상기 제3 포논 모드의 결정 격자가 응축되어 형성될 수 있고, 이에 따라, 상기 스페이서(110), 및 상기 강유전 도메인(120)을 포함하는 상기 유전 박막(100)이 형성될 수 있다.구체적으로, 상기 제3 포논 모드에서 실질적으로 변위를 갖지 않는 포논을 포함하는 반-유닛셀들 중에서 어느 하나가 응축되어 상기 스페이서(110)가 형성될 수 있고, 또한, 상기 제3 포논 모드에서 상기 제1 포논 모드 또는 상기 제2 포논 모드와 동일한 방향의 변위를 갖는 포논을 포함하는 반-유닛셀들 중에서 다른 하나가 응축되어 상기 강유전 도메인(120)이 형성될 수 있다.

[0062] 따라서, 본 발명의 실시 예에 따르면, 상술된 바에 따라 형성된 상기 강유전 도메인(120) 및 상기 스페이서(110) 각각은사방정계 결정 구조를 갖는 상기 하프늄 산화물의 유닛셀(130)의 절반의 폭(width)을 가질 수 있다. 구체적으로 예를 들어, 상기 강유전 도메인(120) 및 상기 스페이서(110) 각각은 상기 제2 축(y)을 따라 3 Å 이하의 폭을 가질 수 있다.

[0063] 일 실시 예에 따르면, 도 2에 도시된 바와 같이, 상기 강유전 도메인(120)은 제1 축(z)을 따라 일방향으로 변위를 가질 수 있는 제1 상, 또는 상기 일방향의 반평행 방향으로 변위를 가질 수 있는 제2 상을 포함할 수 있다.

[0064] 구체적으로, 도 2의 (a)에 도시된 바와 같이, 상기 강유전 도메인(120a)이 제1 상을 포함하는 경우, 상기 포논은 위쪽(up) 방향으로 입체 공간을 가질 수 있고, 또한, 도 2의 (b)에 도시된 바와 같이, 상기 강유전 도메인(120b)이 제2 상을 포함하는 경우, 상기 포논은 아래쪽(down) 방향으로 입체 공간을 가질 수 있다. 상술된 바와 같이, 상기 포논은 상기 입체 공간으로 이동될 수 있고, 이에 따라, 외부에서 인가되는 전기장에 따라, 제1 상을 갖는 상기 강유전 도메인(120a)은 위쪽 방향의 분극(up polarization)을 가질 수 있고, 또한, 제2 상을 갖는 상기 강유전 도메인(120b)은 아래쪽 방향의 분극(down polarization)을 가질 수 있다.

[0065] 도 5는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 유닛셀의 분자 구조 및 도메인 장벽의 형성을 나타내는 도면이고, 도 6은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 공간군을 나타내는 도면이고, 도 7은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 분극화 후의 분자구조를 나타내는 도면이다.

[0066] 도 5를 참조하면, 도 1 내지 도 4를 참조하여 상술된 바와 같이, 상기 스페이서(110)는 이동 가능한 상기 포논을 포함하지 않을 수 있다. 구체적으로, 도 5에 도시된 바와 같이, 하나의 상기 스페이서(110) 및 하나의 상기 강유전 도메인(120)을 포함하는 유닛셀(130) 내에서, 상기 스페이서(110)는 01, 04, 05, 및 08로 표기되는 4개의 상기 산소 원소를 포함할 수 있고, 상기 강유전 도메인(120)은 02, 03, 06, 및 07로 표기되는 4개의 상기 산소 원소를 포함할 수 있다.

[0067] 여기서, 상기 스페이서(110) 내에 포함된 상기 산소 원소들은 상기 제1 축(z)을 따라서 중심대칭(centrosymmetry)을 가질 수 있다. 즉, 상기 제1 산소 원소(01)와 상기 제8 산소 원소(08)가 상기 제1 축(z)을 따라서 중심대칭을 가질 수 있고, 또한, 상기 제4 산소 원소(04)와 상기 제4 산소 원소(05)가 상기 제1 축(z)을 따라서 중심대칭을 가질 수 있다.

[0068] 따라서, 상기 스페이서(110)는 비극성(non-polar)일 수 있고, 이에 따라, 도 1 내지 도 4를 참조하여 상술된 바와 같이, 상기 스페이서(110)는 외부에서 인가되는 전기장에 따라 분극되지 않을 수 있다.

[0069] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막(100)은 복수의 상기 스페이서(110) 및 복수의 상기 강유전 도메인(120)을 포함할 수 있고, 이에 따라, 상기 유전 박막(100)은 Pbca 공간군에 대응되는 사방정계 결정 구조를 가질 수 있다.

[0070] 도 6의 (a)에 도시된 바와 같이, 상기 유전 박막(100)은 $Pca2_1$ 공간군에 대응되는 사방정계 결정 구조를 가질 수 있다. 하지만, 제1 상 또는 제2 상 중에서 어느 하나의 상만을 갖는 상기 강유전 도메인(120)이 상기 스페이서(110)를 중심으로 분리된 상기 유전 박막(100)이 형성되는 경우, 상기 강유전 도메인(120), 및 상기 스페이서(110)가 교대로 적층되는 횟수가 많아질수록, 복수의 상기 강유전 도메인(120) 간의 쌍극자-쌍극자 상호작용(dipole-dipole interaction)이 증가될 수 있다.

[0071] 따라서, 도 6의 (b)에 도시된 바와 같이, 상기 유전 박막(100)은 분극화(polarization)될 수 있고, 이에 따라, 제1 상을 갖는 하나의 상기 강유전 도메인(120a), 및 제2 상을 갖는 하나의 상기 강유전 도메인(120b)이 하나의 상기 스페이서(110)를 사이에 두고 배열되는 구조를 가질 수 있다. 다시 말하면, 분극화된 상기 유전 박막(100)은 하나의 상기 스페이서(110)를 사이에 두고 반평행한 분극 방향을 갖는 2개의 상기 강유전 도메인(120)이 배열되는 구조를 가질 수 있다.

[0072] 따라서, 분극화된 상기 유전 박막(100)내에서 실질적으로 쌍극자-쌍극자 상호작용(dipole-dipole interaction)이 발생되지 않을 수 있다. 구체적으로, 도 6의 (b)에 도시된 바와 같이, 분극화된 상기 유전 박막(100)은 Pbca 공간군에 대응되는 사방정계 결정 구조를 가질 수 있고, 예를 들어, 상기 Pbca 공간군에 대응되는 사방정계 결정 구조(즉, 분극화된 상기 유전 박막(100))는 $Pca2_1$ 공간군에 대응되는 사방정계 결정 구조(즉, 분극화되지 않은 상기 유전 박막(100))보다 0.09eV의 낮은 에너지를 가질 수 있다.

[0073] 일 실시 예에 따르면, 분극화된 상기 유전 박막(100)은 반평행한분극 방향을 갖는 2개의 상기 강유전 도메인(120) 사이에 배치된 하나의 상기 스페이서(110) 내에 도메인 장벽(domain wall)(140)이 형성될 수 있다.

[0074] 구체적으로, 도 6의 (a)에 도시된 바와 같이, 동일한 분극 방향만을 갖는 복수의 상기 강유전 도메인(120)을 포함하는 상기 유전 박막(100)은 외부에서 인가된 전기장에 의해, 복수의 상기 강유전 도메인(120) 중에서 적어도 어느 하나의 상기 강유전 도메인(120)의 분극 방향이 반평행 방향으로 변화되며 분극화될 수 있다.

[0075] 즉, 도 7에 도시된 바와 같이, 분극화된 상기 유전 박막(100)은 상기 제1 상을 포함하는 상기 강유전 도메인(120a)만이 연속적으로 배열된 제1 영역, 및 상기 제2 상을 포함하는 상기 강유전 도메인(120b)만이 연속적으로 배열된 제2 영역을 포함할 수 있고, 이 때, 상기 제1 영역과 상기 제2 영역 사이의 상기 스페이서(110) 내에 상기 도메인 장벽(140)이 형성될 수 있다.

[0076] 상술된 바에 따라 제조된 상기 도메인 장벽(140)은 실질적으로 상기 스페이서(110)의 구조를 변화시키지 않을 수 있다. 즉, 분극화된 상기 유전 박막(100)은 분극화 전에 비하여, 상기 포논을 포함하는 상기 산소 원소의 위치만 변화될 수 있고, 또한, 분극화 전과 후의 상기 유전 박막(100)의 부피는 실질적으로 거의 동일할 수 있다.

[0077] 상술된 바와 달리, 일반적으로 강유전 물질로서 주로 사용되는 페로브스카이트는 상기 스페이서(110)를 포함하지 않을 수 있고, 변위를 가질 수 있는 금속 원소를 포함하는 유닛셀(130)이 연속적으로 배열된 구조를 가질 수 있다. 이에 따라, 외부에서 인가된 전기장에 의해, 하나의 변을 공유하며 인접한 유닛셀(130)의 금속 원소들 사이의 전기 쌍극자(강유전 분극) 상호작용이 발생할 수 있다. 즉, 인접한 상기 유닛셀(130)의 상기 금속 원소들 간의 극성 원자 변위(polar atomic displacement)가 공유(shared)될 수 있다.

[0078] 구체적으로, 상기 페로브스카이트는 외부에서 인가된 전기장에 의해, 위쪽 방향의 분극을 갖는 제1 구역(region), 아래쪽 방향의 분극을 갖는 제2 구역, 및 상기 제1 구역과 상기 제2 구역 사이에 장벽 영역을 포함할 수 있다. 이 때, 상기 장벽 영역은 상기 제1 구역의 분극에서 점진적으로 상기 제2 구역의 분극으로 변화되는 영역을 포함할 수 있다. 즉, 상기 장벽 영역은 다수의 페로브스카이트의 유닛셀(130)을 포함할 수 있고, 상기 장벽 영역에 포함된 다수의 상기 유닛셀(130)은 서로 다른 변위를 갖는 금속 원소를 포함할 수 있고, 이에 따라, 상기 페로브스카이트는 외부에서 인가된 전기장에 의해, 구조의 변화가 발생할 수 있다.

[0079] 하지만, 일 실시 예에 따르면, 상술된 바와 같이, 상기 유전 박막(100)은 스페이서(110)를 포함할 수 있고, 이에 따라, 외부에서 인가된 전기장에 의해, 실질적으로 변형이 없는(strain-free) 분극화된 상기 유전 박막(100)이 형성될 수 있다.

[0080] 일 실시 예에 따르면, 상술된 바와 같이, 분극화된 상기 유전 박막(100)은 분극화 전에 비하여, 실질적으로 부피의 변화가 없을 수 있고, 이에 따라, 상기 제2 축(y)을 따른 상기 도메인 장벽(140)의 폭은 실질적으로 0에 수렴할 수 있다. 반면, 상기 도메인 장벽(140)을 중심으로, 상기 제1 영역과 상기 제2 영역은 서로 반대 방향의 분극을 가질 수 있다. 일반적으로, 상기 도메인 장벽(140)의 에너지는 아래의 <수식 1>과 같이, 상기 도메인 장벽(140)의 에너지는 아래의 <수식 1>과 같이, 상기 분극(P)의 미분 값에 의해 계산될 수 있다.

[0081] <수식 1>

[0082] $$E \propto g\left|\frac{\partial P_z}{\partial y}\right|^2 = g|\vec{v} \times \vec{P}|^2$$

[0083] 여기서, g는 상기 포논의 군 속도(group velocity)를 나타낸다.

[0084] 따라서, 상기 도메인 장벽(140)의 에너지는 실질적으로 무한대의 값에 수렴할 수 있다. 구체적으로 예를 들어, 분극화된 상기 유전 박막(100)이 사방정계 결정 구조를 갖는 하프늄 산화물인 경우, 상기 도메인 장벽(140)의 에너지는 1.34eV 이상일 수 있다.

[0085] 반면, 분극화된 상기 유전 박막(100)은 플랫 밴드를 가질 수 있고, 이에 따라, 상기 도메인 장벽(140)에서 상기 포논의 군 속도는 실질적으로 0에 수렴할 수 있다.

[0086] 상술된 바와 달리, 상기 유전 박막(100)은 상기 페로브스카이트일 수 있다. 이 경우, 상술된 바와 같이, 상기 페로브스카이트의 상기 장벽 영역은 서로 반대 방향의 분극을 갖는 상기 제1 구역과 상기 제2 구역의 사이에 배치될 수 있고, 상기 제1 구역의 분극에서 상기 제2 구역의 분극으로 점진적으로 변화되는 분극을 가질 수 있다. 따라서, 상기 장벽 영역의 에너지는 유한한 값을 가질 수 있다. 구체적으로 예를 들어, 상기 페로브스카이트가 납타이타네이트($PbTiO_3$)인 경우, 상기 장벽 영역의 에너지는 0.024eV일 수 있다.

[0087] 또한, 상술된 바와 같이, 상기 장벽 영역은 상기 포논을 갖는 상기 금속 원소 간의 전기 쌍극자 상호작용을 가질 수 있고, 이에 따라, 상기 장벽 영역 내에서 상기 포논의 군 속도는 0이 아닌 유한한 값을 가질 수 있다.따라서, 외부에서 인가되는 전기장에 의한 상기 페로브스카이트의 분극화는 상기 도메인 장벽(140)의 전파(propagation)에 의해 수행될 수 있다. 다시 말하면, 외부에서 인가되는 전기장에 의해, 상기 페로브스카이트 내에 분극화된 구역이 형성될 수 있고, 이 때, 상기 장벽 영역의 전파(propagation)에 의해, 상기 분극화된 구역이 확장될 수 있다.

[0088] 하지만, 상술된 바와 같이, 본 발명의 실시 예에 따라 형성된 분극화된 상기 유전 박막(100)은 실질적으로 0의 폭을 갖는 상기 도메인 장벽(zero width domain wall)(140)을 포함할 수 있고, 이에 따라, 상기 페로브스카이트에 비하여 높은 도메인 장벽(140)의 에너지를 가질 수 있다. 따라서, 외부에서 인가되는 전기장에 의한 상기 유전 박막(100)의 분극화는 상기 도메인 장벽(140)의 호핑(hopping)에 의해 수행될 수 있다.

[0089] 즉, 외부에서 인가된 전기장에 의해, 복수의 상기 강유전 도메인(120) 중에서 적어도 어느 하나의 상기 강유전 도메인(120)이 분극화될 수 있고, 상기 도메인 장벽(140)의 호핑에 의해서, 분극화된 상기 강유전 도메인(120)과 인접한 다른 상기 강유전 도메인(120)의 분극화가 수행될 수 있다.

[0090] 일 실시 예에 따르면, 도 1 내지 도 4를 참조하여 상술된 바와 같이, 상기 스페이서(110)는 외부에서 인가되는 전기장에 의해 분극화되지 않을 수 있고, 반면, 상기 강유전 도메인(120)은 외부에서 인가되는 전기장에 따라 분극 값을 가질 수 있다.

[0091] 또한, 상술된 바와 같이, 상기 유전 박막(100)은 분극 값이 없는 상기 스페이서(110), 및 분극 값을 가질 수 있는 상기 강유전 도메인(120)이 교대로 그리고 반복적으로 배열된 구조를 가질 수 있다.

[0092] 따라서, 분극화된 상기 유전 박막(100)의 제1 영역의 분극 값과 상기 제2 영역의 분극 값은 펄스 값을 가질 수 있다. 즉, 상기 제1 영역이 제1 분극 값을 갖는 경우, 상기 제1 분극 값은 제1 펄스 값일 수 있고, 상기 제2 영역이 제2 분극 값을 갖는 경우, 상기 제2 분극 값은 제2 펄스 값일 수 있다.

[0093] 일 실시 예에 따르면, 상술된 바와 같이, 상기 제1 영역과 상기 제2 영역은 펄스 형태의 분극 값을 가질 수 있다. 이 때, 상기 제1 영역은 위쪽 방향의 분극을 가질 수 있고, 상기 제2 영역은 아래쪽 방향의 분극을 가질 수 있고, 이에 따라, 상기 제1 분극 값은 양의 부호를 가질 수 있고, 상기 제2 분극 값은 음의 부호를 가질 수 있다.

[0094] 따라서, 상기 제1 영역의 평균 분극 값은 상기 제1 영역에 포함된 복수의 상기 강유전 도메인(120a)의 분극 값보다 낮을 수 있고, 상기 제2 영역의 평균 분극 값은 상기 제2 영역에 포함된 복수의 상기 강유전 도메인(120b)의 분극 값보다 높을 수 있다. 상술된 바와 같이, 상기 제2 영역은 음의 부호를 가지므로, 실질적으로, 상기 제1 영역의 평균 분극 값 또는 상기 제2 영역의 평균 분극 값의 절대값은 각각의 영역에 포함된 상기 강유전 도메인(120)의 분극의 절대값보다 낮은 값을 가질 수 있다.

[0095] 일 실시 예에 따르면, 상술된 바와 같이, 상기 스페이서(110)는 분극화되지 않을 수 있고, 이에 따라, 상기 스페이서(110)는 외부에서 인가되는 전기장에 상관없이 분극 값이 0을 가질 수 있다. 따라서, 상기 제1 영역 또는 상기 제2 영역의 평균 분극 값은, 상기 제1 영역 또는 상기 제2 영역 내의 복수의 상기 유닛셀(130)의 개수에 상관없이, 각각의 영역에 포함된 복수의 상기 강유전 도메인(120)의 분극 값의 반값(half value)를 가질 수 있다.

[0096] 일 실시 예에 따르면, 상기 유전 박막(100)은 상기 유닛셀(130) 단위로 분극이 제어될 수 있고, 이에 따라, 상기 유전 박막(100)은 다중 유전 특성을 가질 수 있다. 일반적으로, 상기 강유전 물질의 분극화에 필요한 활성화 에너지는 상기 강유전 물질 고유의 보자력에 비례하여 결정될 수 있다. 하지만, 상기 활성화 에너지에 의해, 상기 강유전 물질 내에 분극화된 구역이 형성되는 경우, 분극화된 구역의 확장은 상기 장벽 영역의 전파 또는 호핑에 의해 수행될 수 있다. 이 때, 상기 페로브스카이트에서와 같이, 상기 장벽 영역의 폭이 두꺼운 경우, 분극화된 구역의 확장에 필요한 에너지는 상기 장벽 영역의 폭에 비례하여 감소될 수 있다.

[0097] 반면, 본 발명의 실시 예에 따르면, 상기 장벽 영역은 폭이 0으로 수렴하는 상기 도메인 장벽(140)일 수 있고, 이에 따라, 상기 분극화된 영역의 확장에 필요한 에너지는 상기 활성화 에너지와 실질적으로 동일한 값을 가질 수 있다. 다시 말하면, 상기 제1 영역과 맞닿는 상기 제2 영역의 하나의 상기 강유전 도메인(120)의 분극 방향을 변화시키는 에너지와, 상기 제1 영역과 직접적으로 맞닿지 않는 상기 제2 영역의 하나의 상기 강유전 도메인(120)의 분극 방향을 변화시키는 데에 필요한 에너지가 실질적으로 동일할 수 있다. 따라서, 상기 유전 박막(100)은 상기 유닛셀(130) 단위로 분극이 제어될 수 있다. 이에 따라, 상기 제1 영역와 상기 제2 영역의 개수 또는 폭이 용이하게 제어될 수 있어, 상기 유전 박막(100)은 다중 유전 특성을 나타낼 수 있다.

[0099] 도 8은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막을 포함하는 멤커패시터의 개략적인 단면도를 나타내는 도면이다.

[0100] 도 8를 참조하면, 제1 전극(210), 제2 전극(220) 및 상기 제1 전극(210)과 상기 제2 전극(220) 사이에 도 1 내지 도 7을 참조하여 상술된 상기 유전 박막(100)을 포함하는 멤커패시터가 제조될 수 있다.

[0101] 예를 들어, 상기 제1 전극(210)과 상기 제2 전극(220)은 백금(Pt), 알루미늄(Al), 카드뮴(Cd), 코발트(Co), 구리(Cu), 철(Fe), 게르마늄(Ge), 인듐(In), 마그네슘(Mg), 망간(Mn), 몰리브덴(Mo), 니오븀(Nb), 니켈(Ni), 납(Pb), 안티모니(Sb), 셀레늄(Se), 실리콘(Si), 주석(Sn), 탄탈륨(Ta), 텔룰륨(Te), 티타늄(Ti), 텅스텐(W), 아연(Zn), 또는 지르코늄(Zr) 중에서 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0102] 이 때, 상기 유전 박막(100) 내의 복수의 상기 강유전 도메인(120) 및 복수의 상기 스페이서(110)는 상기 제1 전극(210)과 상기 제2 전극(220) 사이에서 교대로 횡방향으로 적층(lateral stacking)될 수 있다. 상기 강유전 도메인(120)의 상기 포논은 복수의 상기 강유전 도메인(120)과 상기 스페이서(110)가 적층되는 상기 제2 축(y) 방향에 직각인 상기 제1 축(z) 방향으로 변위를 가질 수 있다. 따라서, 상기 멤커패시터는 상기 제1 전극(210), 상기 유전 박막(100), 및 상기 제2 전극(220)은 상기 제1 축(z) 방향을 따라 순차적으로 적층된 구조를 가질 수 있다.

[0103] 도 1 내지 도 7을 참조하여 상술된 바와 같이, 상기 유전 박막(100)은 외부 전기장에 따라 가변적인 분극 값을 가질 수 있는 복수의 상기 강유전 도메인(120), 및 외부 전기장에 상관없이 일정한 분극 값을 갖는 복수의 상기 스페이서(110)를 포함하되, 복수의 상기 강유전 도메인(120) 및 복수의 상기 스페이서(110)가 교대로 그리고 반복적으로 적층된 구조를 가질 수 있다.

[0104] 상기 스페이서(110)는 상기 분극 값을 나타낼 수 있는 상기 포논의 이동을 차단할 수 있고, 실질적으로 0의 분극 값을 가질 수 있다. 이에 따라, 상기 유전 박막(100)에 활성화 에너지 이상의 외부 전기장이 인가된 경우, 상기 스페이서(110) 내에 높은 에너지를 갖는 상기 도메인 장벽(140)이 형성될 수 있다.

[0105] 상술된 바와 같이, 상기 도메인 장벽(140)은 높은 에너지를 가져, 상기 포논의 이동을 차단할 수 있고, 이에 따라, 상기 포논의 변위는 상기 도메인 장벽(140)의 호핑에 의해 전달될 수 있다. 이 때, 상기 도메인 장벽(140)의 호핑에 필요한 에너지는 상기 활성화 에너지와 실질적으로 유사할 수 있다. 따라서, 상기 분극화된 하나의 상기 강유전 도메인(120)의 분극 값은 안정적으로 유지될 수 있고, 이에 따라, 하나의 상기 강유전 도메인(120) 각각의 분극 값이 제어될 수 있다.

[0106] 따라서, 복수 개의 유전 상수를 갖는 상기 유전 박막(100)을 포함하여, 데이터 처리 용량이 증대된 상기 멤커패시터가 제공될 수 있다.

[0108] 이하, 본 발명의 구체적인 실험 예에 따른 유전 박막의 특성 평가 결과가 설명된다.

[0109] 도 9 내지 도 10은 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 도메인 장벽 형성에 의한 분극 곡선(polarization curve)을 나타내는 도면이다.

[0110] 도 9 내지 도 10을 참조하면, 본 발명의 실험 예 및 비교 예에 따른 유전 박막은 분극되며, 서로 다른 분극 곡선을 나타내는 것을 확인하였다.

[0111] 도 1 내지 도 7을 참조하여 상술된 바와 같이, 본 발명의 실험 예에 따른 유전 박막인 하프늄 산화물은 변위를 갖는 상기 강유전 도메인(120)과, 외부에서 인가되는 전기장에 상관없이 실질적으로 0의 분극 값을 갖는 상기 스페이서를 포함할 수 있다. 이에 따라, 도 9에 도시된 바와 같이, 상기 하프늄 산화물은 일방향의 분극을 나타내는 제1 영역, 상기 제1 영역과 반평행 방향의 분극을 나타내는 제2 영역, 및 상기 제1 영역과 상기 제2 영역의 사이에 실질적으로 폭이 0인 도메인 장벽을 갖는 것을 확인하였다.

[0112] 이 때, 상술된 바와 같이, 상기 도메인 장벽을 기준으로 상기 분극 값이 불연속적이고, 상기 분극이 서로 반대 방향을 갖는 것을 알 수 있고, 이에 따라, 상기 분극의 미분 값($\vec{\nabla} \times \vec{P}$)이 무한대의 값에 수렴하고, 상기 도메인 장벽에서 변위를 나타내는 상기 포논의 군 속도가 0에 수렴하는 것을 알 수 있다.

[0113] 반면, 도 1 내지 도 7을 참조하여 상술된 바와 같이, 본 발명의 비교 예에 따른 유전 박막인 납타이타네이트($PbTiO_3$)는 상기 스페이서를 포함하지 않을 수 있고, 이에 따라, 도 10에 도시된 바와 같이, 일방향의 분극을 나타내는 제1 구역, 상기 제1 구역과 반대의 분극 방향을 갖는 제2 구역, 및 상기 제1 구역과 상기 제2 구역 사이에 상기 제1 구역의 분극에서 상기 제2 구역의 분극으로 분극 방향이 점진적으로 변화되는 상기 장벽 영역을 갖는 것을 알 수 있다.

[0114] 또한, 상술된 바와 같이, 상기 도메인 장벽 내에서 상기 분극 값이 연속적으로 변화되므로, 상기 분극의 미분 값이 일정한 값을 가지고, 상기 도메인 장벽에서 상기 포논의 군 속도 또한 일정한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

[0116] 도 11 내지 도 12는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 국부 분극(local polarization)에 의한 분극 곡선(polarization curve)을 나타내는 도면이고, 도 13 내지 도 14는 본 발명의 실시 예에 따른 유전 박막의 도메인 장벽 에너지를 나타내는 도면이다.

[0117] 도 11 내지 도 14를 참조하면, 도 9 내지 도 10을 참조하여 상술된 본 발명의 실험 예 및 비교 예에 따른 유전 박막에 대하여, 하나의 상기 유닛셀이 분극되었을 때의 분극 곡선과, 하나의 상기 유닛셀(130)을 포함하는 분극화된 영역의 확장에 필요한 에너지가 확인되었다.

[0118] 도 11을 참조하면, 도 9를 참조하여 상술된 바와 같이, 본 발명의 실험 예에 따른 유전 박막인 상기 하프늄 산화물은 하나의 상기 유닛셀 중에서 분극을 갖는 하나의 상기 강유전 도메인에서만 반평행 방향의 분극 값을 갖는 것을 알 수 있다.

[0119] 구체적으로, 도 13에 도시된 바와 같이, 상기 하나의 유닛셀이 분극되는 데에 필요한 에너지는 1.34eV인 것을 알 수 있다. 도 1 내지 도 7을 참조하여 상술된 바와 같이, 상기 하프늄 산화물은 상기 도메인 장벽이 형성됨에 따라, $Pca2_1$ 공간군에서 에너지적으로 더 안정적인 Pbca 공간군을 갖는 사방정계 결정 구조를 갖는 것을 알 수 있고, 이에 따라, 분극된 하나의 상기 유닛셀을 포함하는 상기 제2 영역이 확장되는 데에 필요한 에너지는 1.38eV로 증가되는 것을 알 수 있다.

[0120] 또한, 상술된 바와 같이, 상기 하프늄 산화물은 상기 분극에 필요한 에너지 및 상기 분극화된 영역이 확장되는 데에 필요한 에너지가 높고, 상기 도메인 장벽에서 상기 포논의 이동이 차단될 수 있고, 이에 따라, 상기 분극화된 영역의 확장은 상기 도메인 장벽의 호핑에 의해 수행되는 것을 알 수 있다.

[0121] 반면, 도 10을 참조하여 상술된 바와 같이, 본 발명의 비교 예에 따른 유전 박막인 상기 납타이타네이트는 분극이 점진적으로 변화되는 도메인 영역을 갖는 것을 알 수 있고, 이에 따라, 도 12에 도시된 바와 같이, 분극된 상기 하나의 유닛셀에 대하여, 하나의 상기 유닛셀의 분극 방향은 반대이지만, 분극의 값은 반평행한 값을 갖지 않는 것을 알 수 있다.

[0122] 구체적으로, 도 14에 도시된 바와 같이, 하나의 상기 유닛셀이 분극되는 데에 필요한 에너지는 0.76eV인 것을 확인하였다. 이에 따라, 상기 스페이서를 포함하는 상기 하프늄 산화물에 비하여, 상기 스페이서를 포함하지 않는 상기 납타이타네이트는 낮은 활성화 에너지(다시 말하면, 하나의 상기 유닛셀이 분극되는 데에 필요한 에너지)를 갖는 것을 알 수 있다.

[0123] 또한, 도 1 내지 도 7을 참조하여 상술된 바와 같이, 상기 납타이타네이트는 0 초과의 폭을 갖는 상기 장벽 영역을 포함하고, 이에 따라, 상기 분극화된 영역의 확장에 필요한 에너지는 상기 장벽 영역의 폭의 길이에 따라 감소하여, 도 14에 도시된 바와 같이, 0.024eV의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 발명의 비교 예에 따른 유전 박막에서 상기 분극화된 영역의 확장 속도는 실험 예에 따른 유전 박막에서 상기 분극화된 영역의 확장 속도에 비하여 빠른 것을 알 수 있다.

[0124] 따라서, 본 발명의 실험 예에 따른 유전 박막인 상기 하프늄 산화물은 하나의 상기 강유전 도메인의 분극 방향만을 변화시킬 수 있고, 분극된 하나의 상기 강유전 도메인을 포함하는 분극화된 영역의 전파에 높은 에너지가 소모되는 것을 일 수 있다. 즉, 분극된 하나의 상기 강유전 도메인은 안정적으로 분극 방향이 유지될 수 있고, 이에 따라, 상기 하프늄 산화물은 각각의 상기 강유전 도메인의 분극 방향이 제어되어, 다중 유전 특성을 나타낼 수 있다.

[0126] 이상, 본 발명을 바람직한 실시 예를 사용하여 상세히 설명하였으나, 본 발명의 범위는 특정 실시 예에 한정되는 것은 아니며, 첨부된 특허청구범위에 의하여 해석되어야 할 것이다. 또한, 이 기술분야에서 통상의 지식을 습득한 자라면, 본 발명의 범위에서 벗어나지 않으면서도 많은 수정과 변형이 가능함을 이해하여야 할 것이다.

부호의 설명

[0127] 100:유전 박막

110; 스페이서

120: 강유전 도메인

120a: 제1 상을 갖는 강유전 도메인

120b: 제2 상을 갖는 강유전 도메인

130: 유닛셀

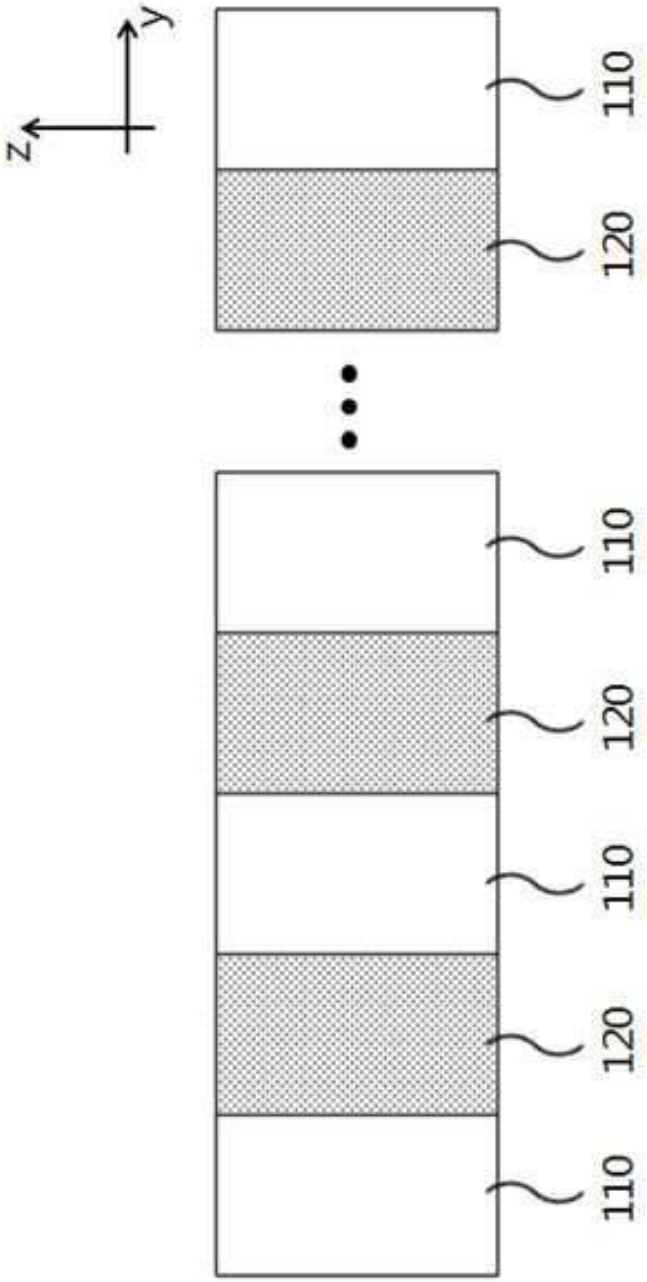
140: 도메인 장벽

210: 제1 전극

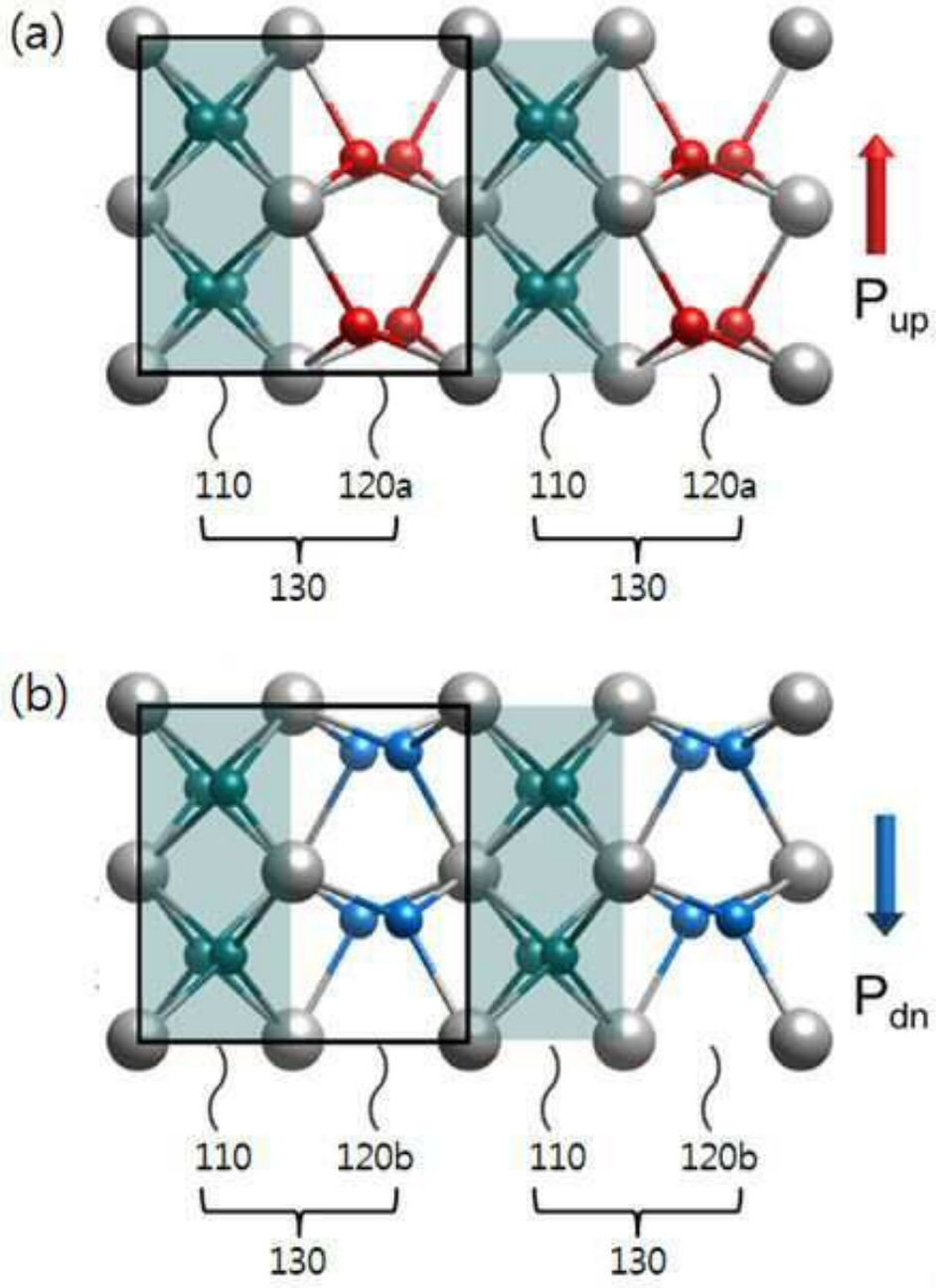
220: 제2 전극

도면

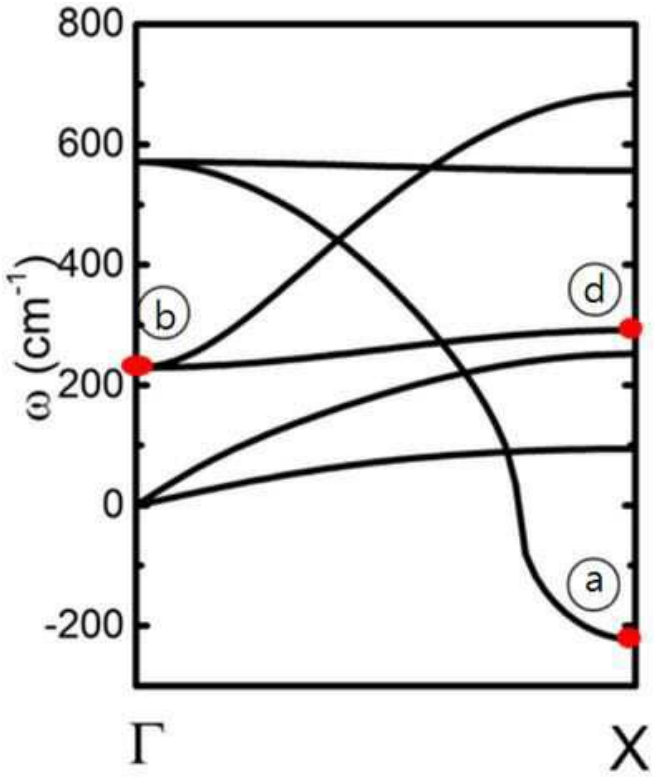
도면1



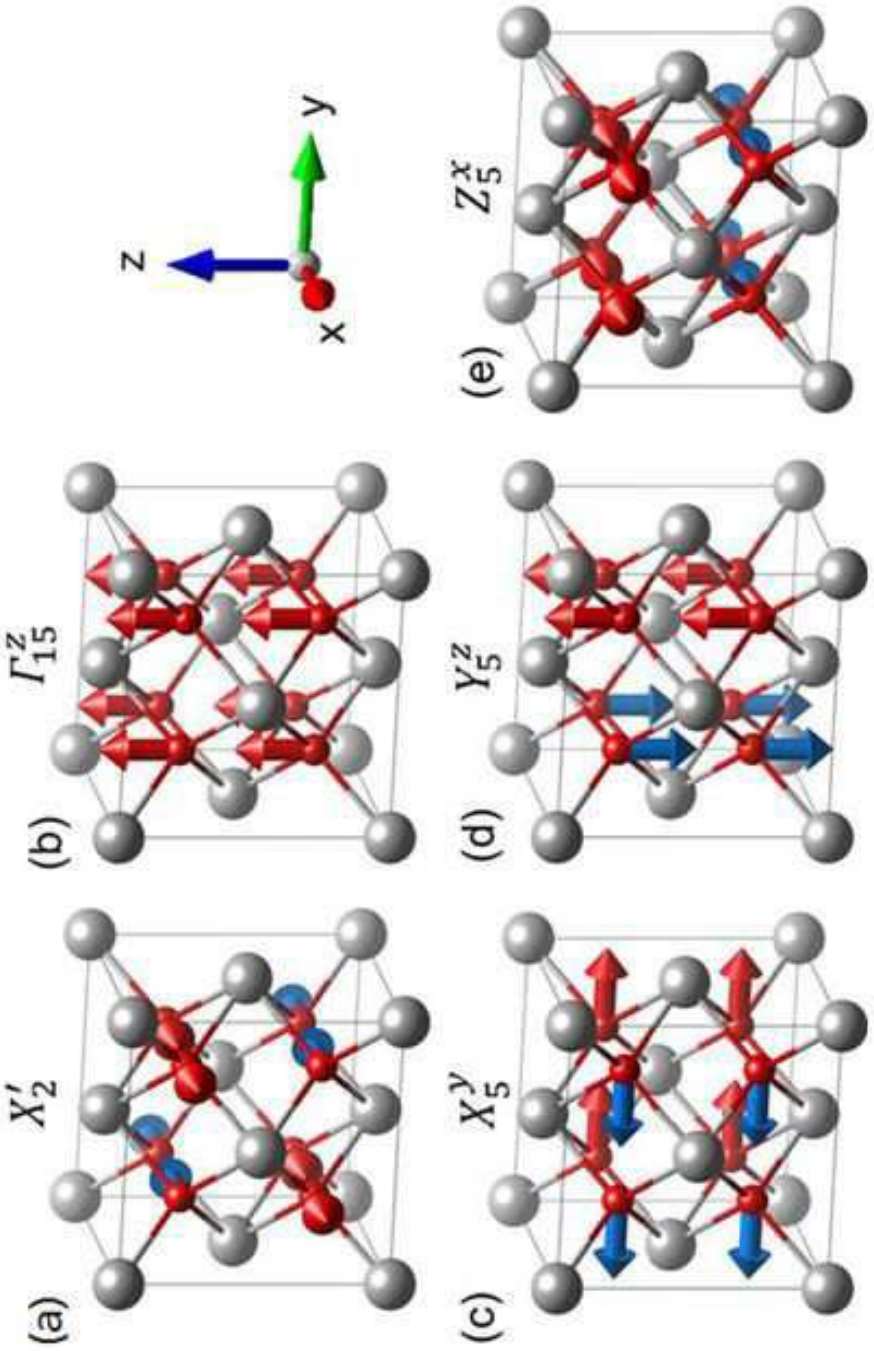
도면2



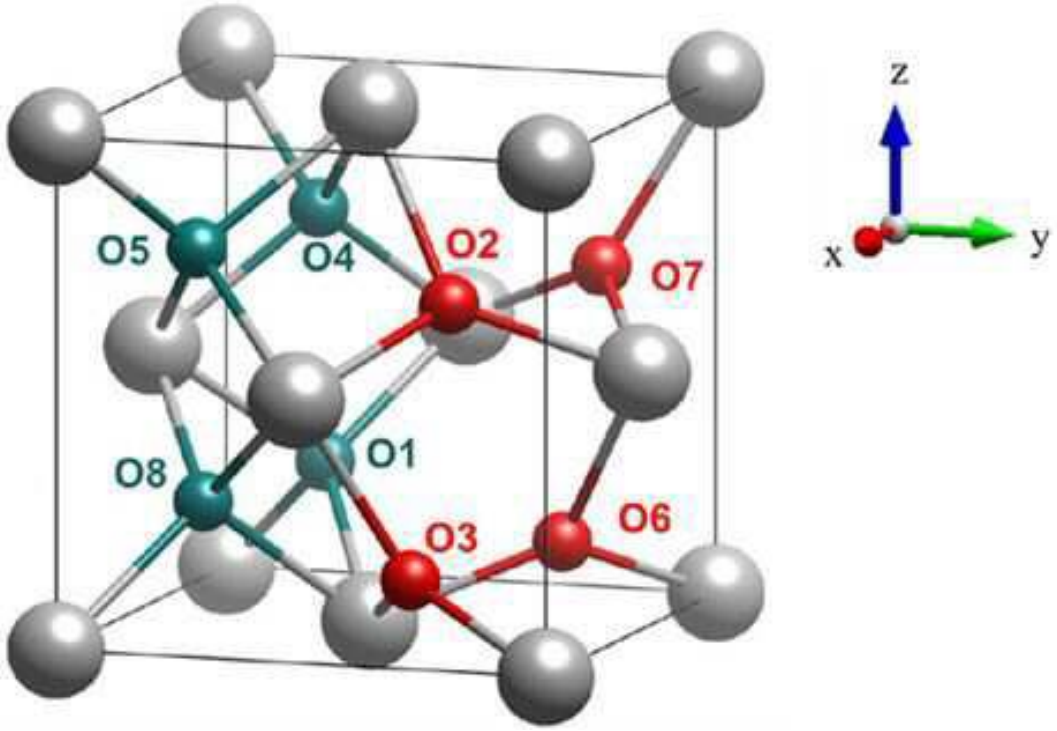
도면3



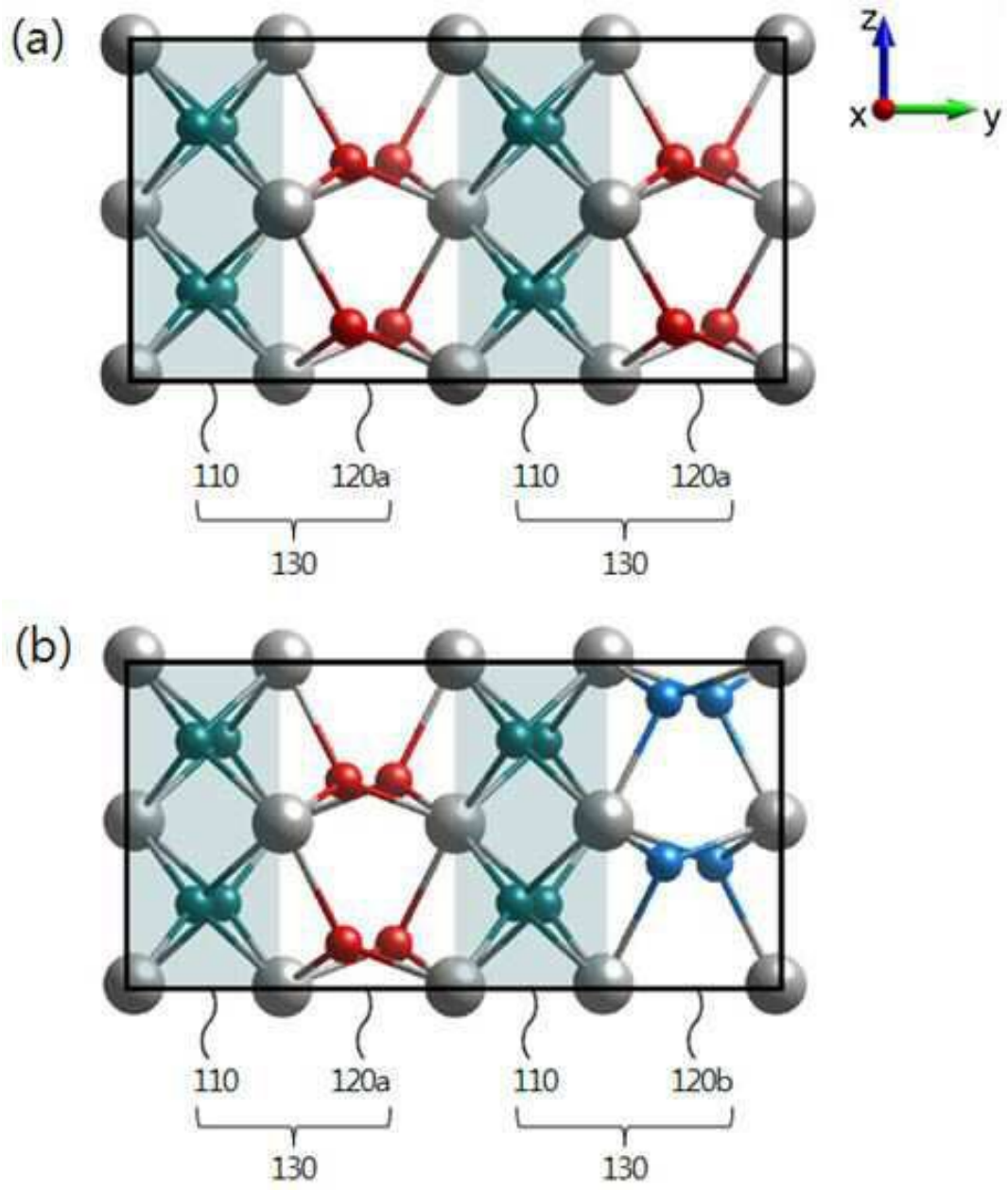
도면4



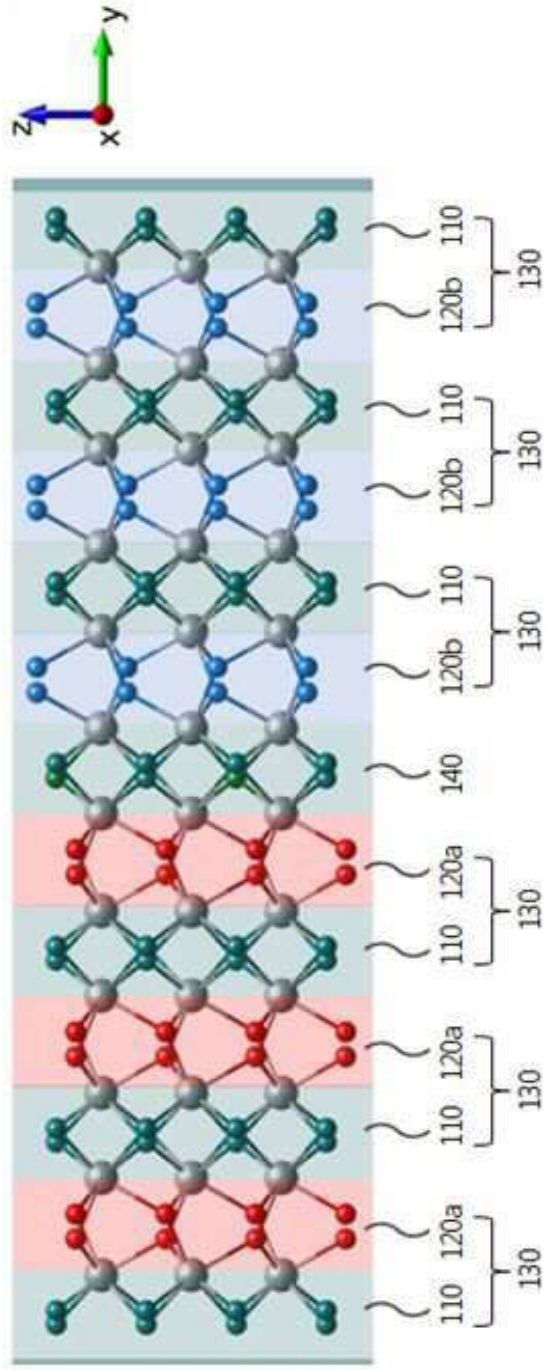
도면5



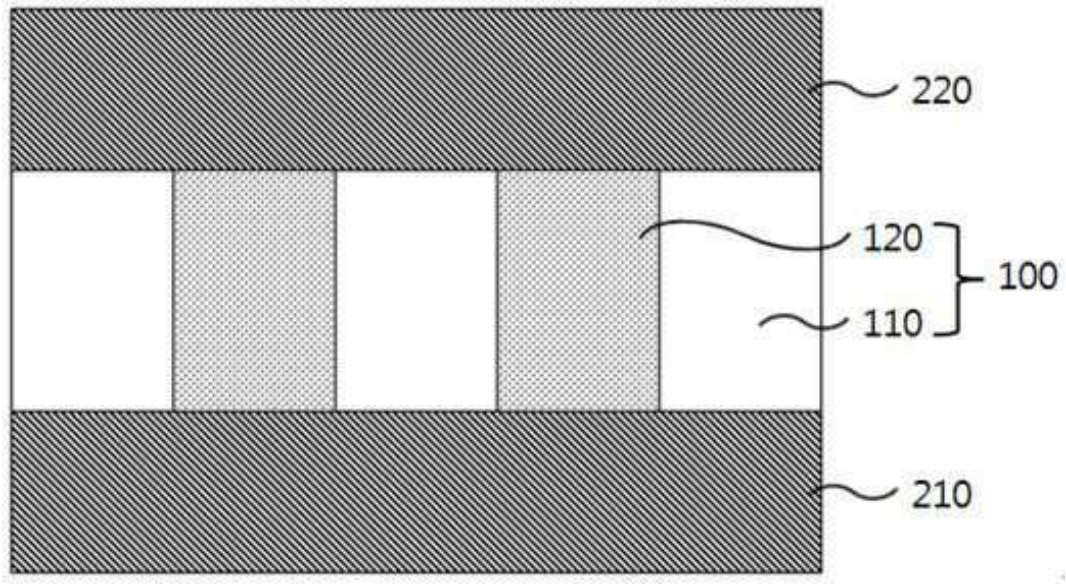
도면6



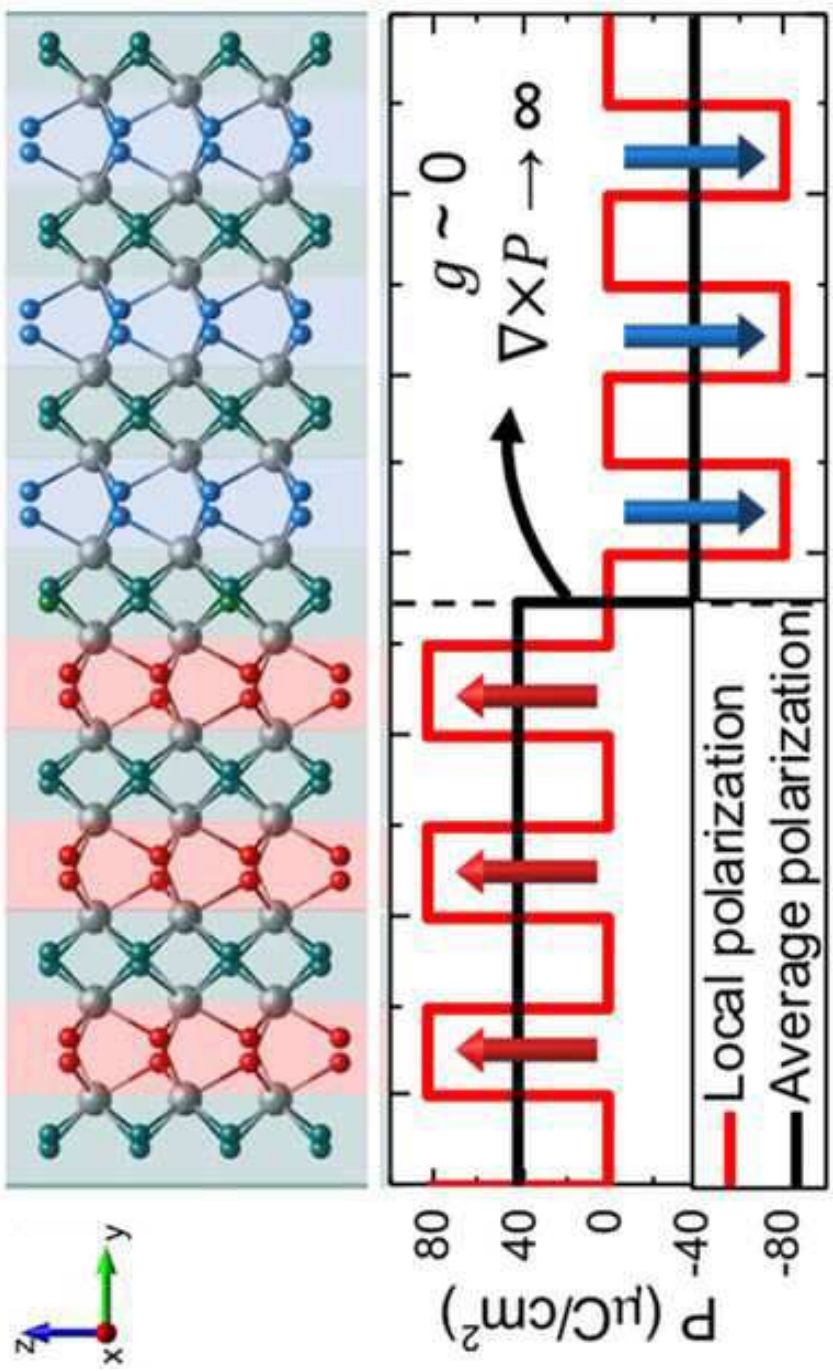
도면7


y
z
x
110
120b
130
110
120b
130
110
120b
130
140
120a
110
130
120a
110
130
120a
110
130

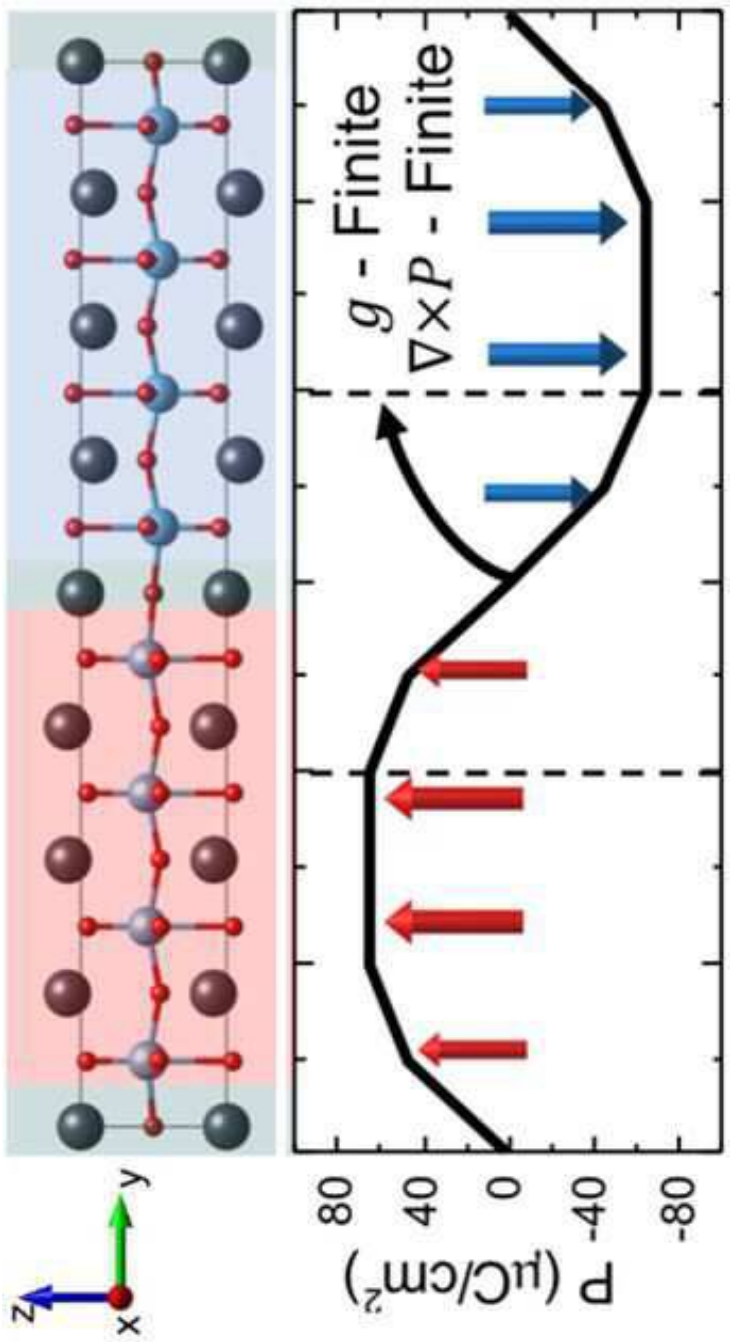
도면8



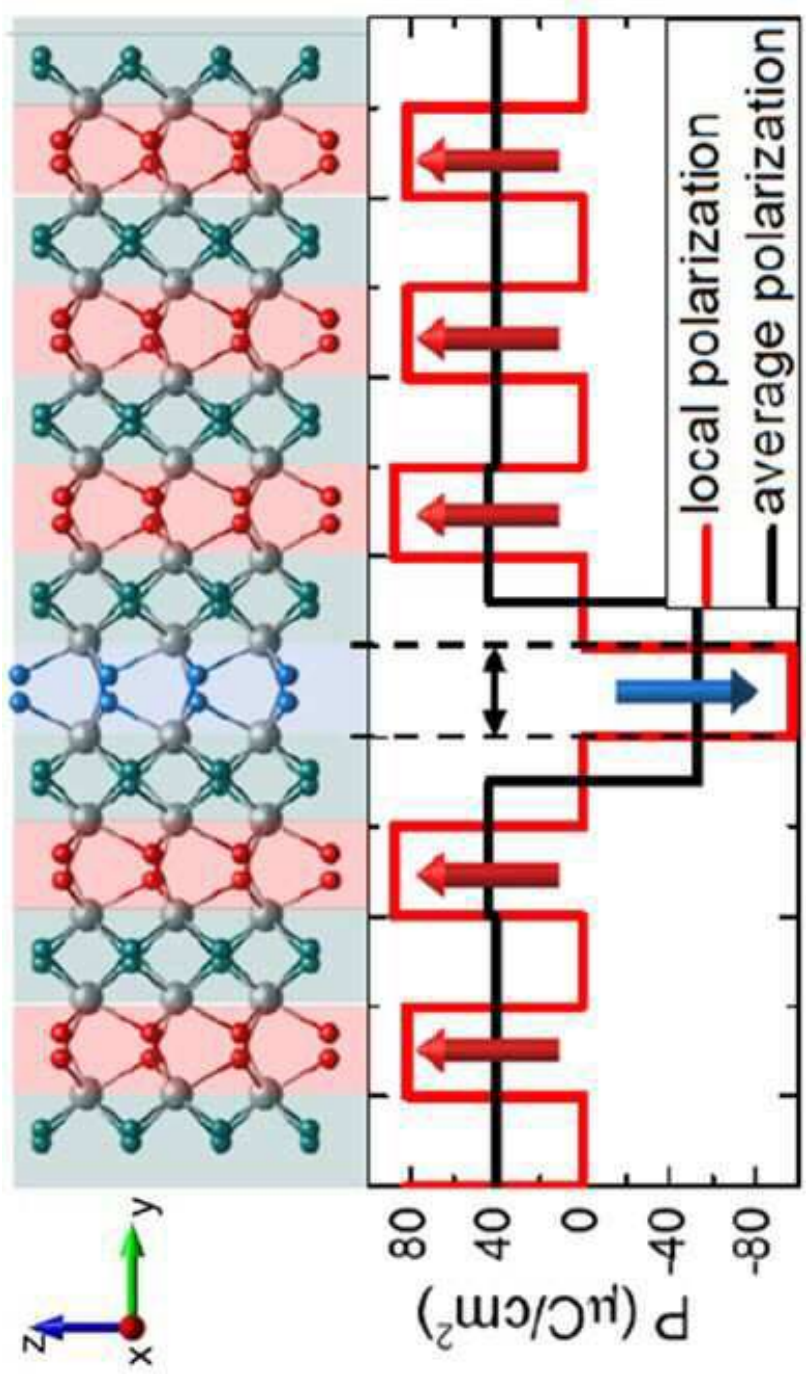
도면9


y
z
x
80
40
0
-40
-80
P (μC/cm²)
g ~ 0
∇×P → ∞
Local polarization
Average polarization

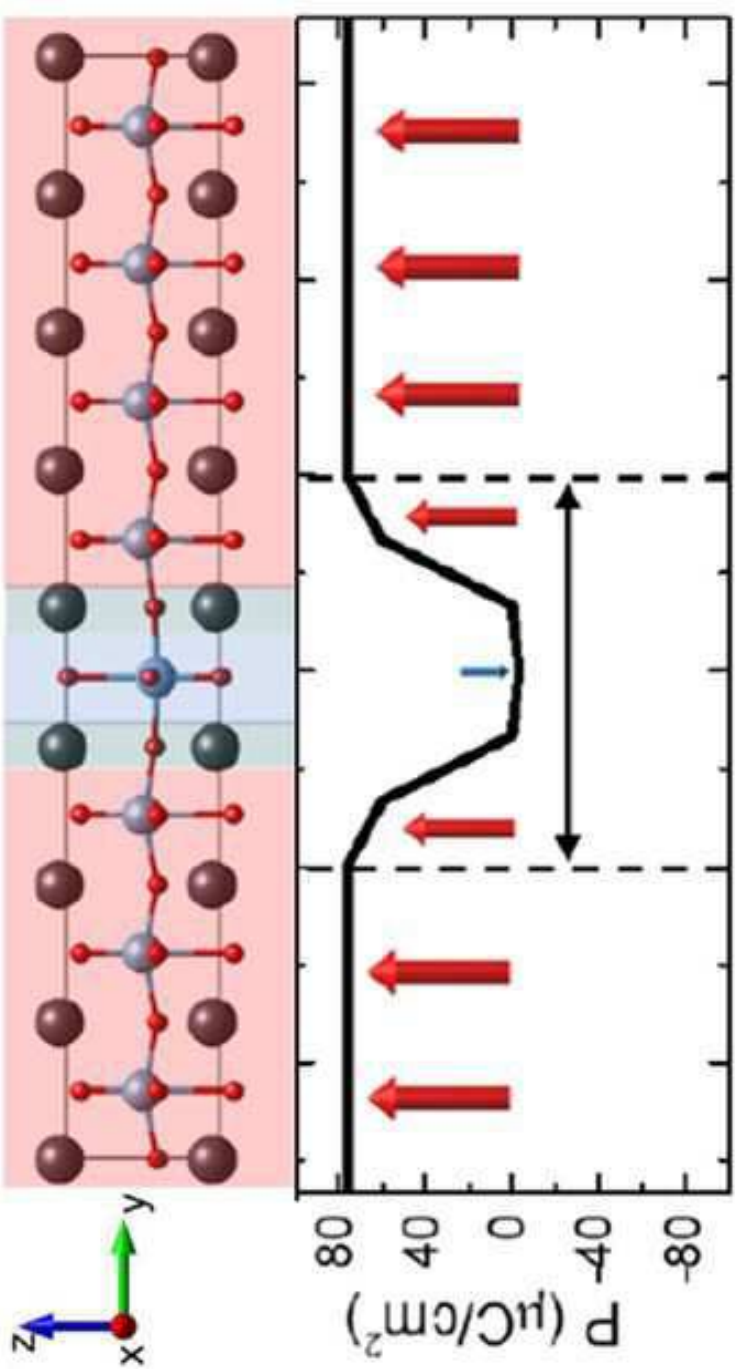
도면10



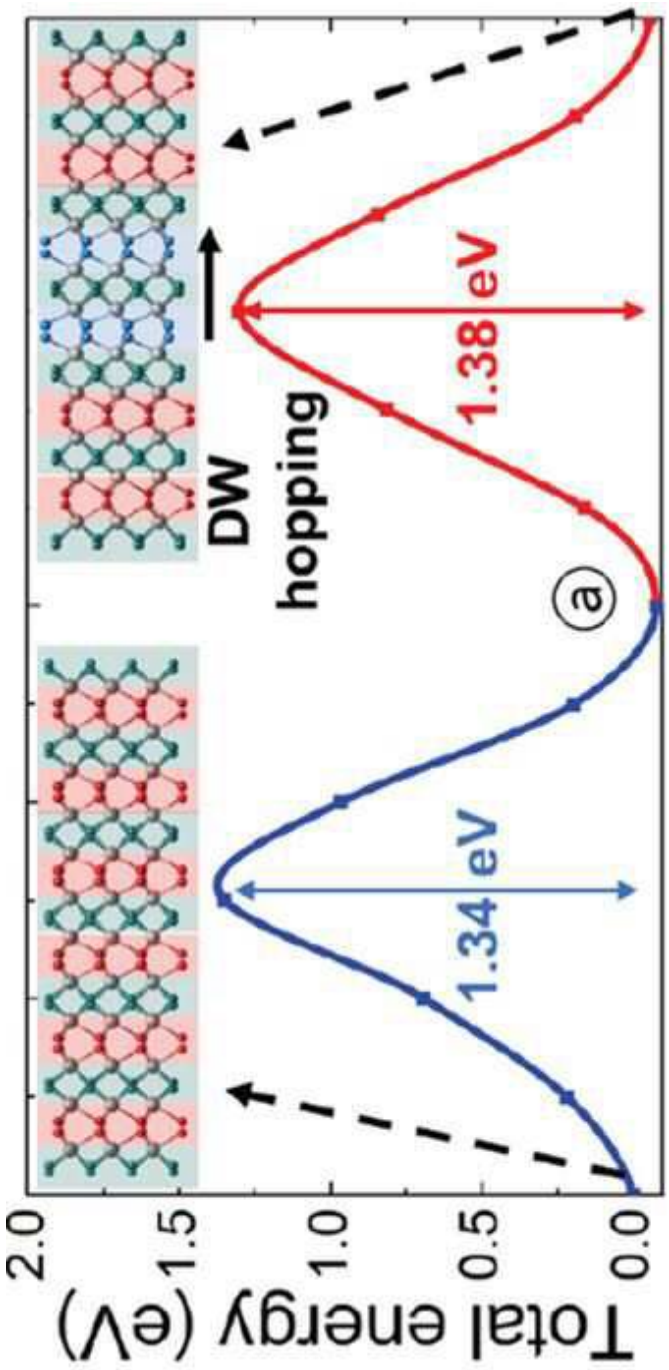
도면11


local polarization
average polarization
P (μC/cm²)
80
40
0
-40
-80
y
z
x

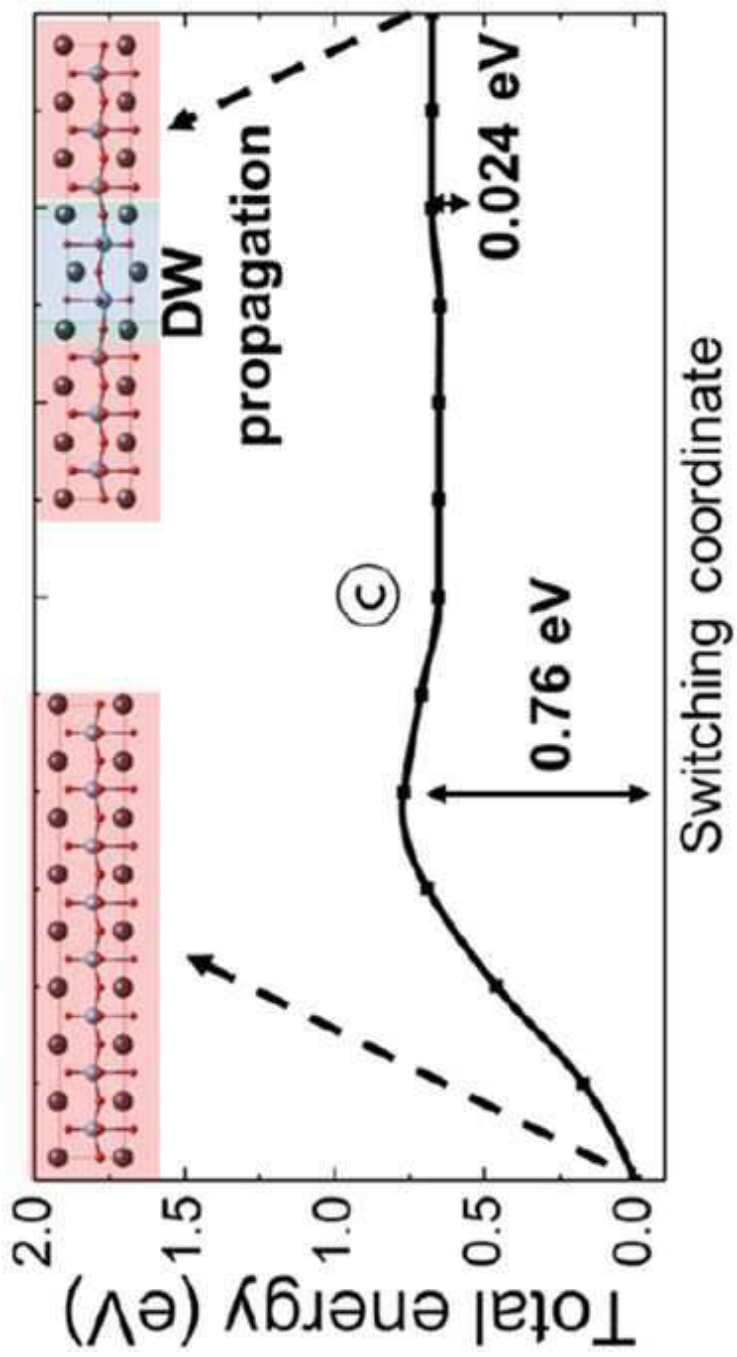
도면12



도면13



도면14


Total energy (eV)
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
Switching coordinate
0.76 eV
0.024 eV
propagation
DW
ⓒ