(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2018-0109309
(43) 공개일자 2018년10월08일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01B 3/10 (2006.01) *C30B 29/22* (2006.01)
C30B 29/68 (2006.01) *H01B 13/00* (2006.01)
H01B 5/14 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01B 3/10 (2013.01)
C30B 29/22 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2017-0038712
(22) 출원일자 2017년03월27일
심사청구일자 2018년03월14일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
광주과학기술원
광주광역시 북구 첨단과기로 123 (오룡동)
(72) 발명자
이준희
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이현재
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
리앤목특허법인

전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 **초격자 구조를 가지는 유전체 소재, 전자 소자 및 전자 소자의 제조 방법**

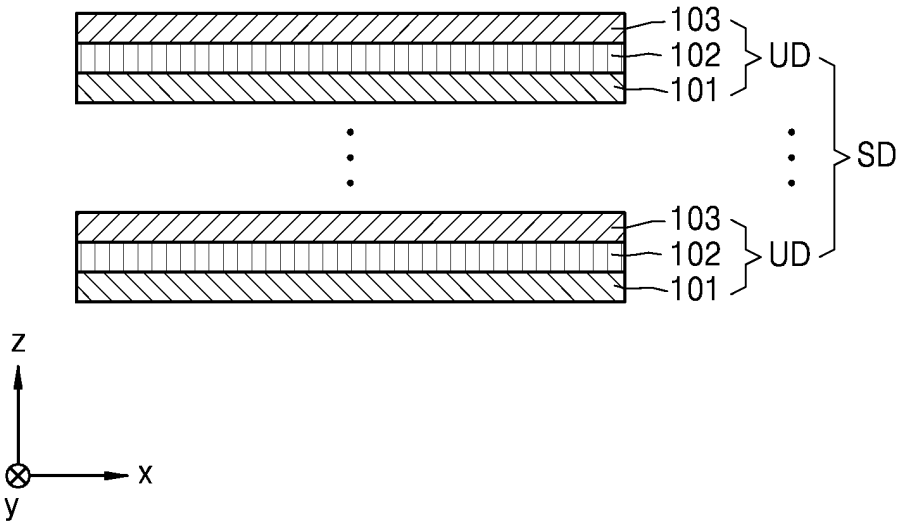
(57) 요 약

본 발명의 일 실시예는, 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층을 반복 적층시킨, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재를 제공한다.

본 발명의 다른 실시예는 기판 및 상기 기판 상에 배치되고, 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층을 반복 적층시킨 유전층을 포함하는 전자 소자를 제공한다.

본 발명의 다른 실시예는 상기 전자 소자를 제조하는 방법을 제공한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
C30B 29/68 (2013.01)
H01B 13/0026 (2013.01)
H01B 5/14 (2013.01)
(72) 발명자
강민수
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
박영진
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
민중근
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
함문호
광주광역시 북구 첨단과기로 123 (오룡동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 NN17540
부처명 미래창조과학부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 미래소재디스커버리사업
연구과제명 멤커패시터 아키텍쳐 구현을 위한 다중 정전용량 소재 개발
기 여 율 1/2
주관기관 광주과학기술원
연구기간 2016.12.29 ~ 2017.03.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2.160650.01
부처명 미래창조과학부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 신진연구사업
연구과제명 양자 산화물의 물질 게놈 연구
기 여 율 1/2
주관기관 울산과학기술원
연구기간 2015.11.01 ~ 2018.10.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층을 반복 적층시킨, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 3개 이상의 강유전성 물질은 결정 구조가 같은, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 결정 구조는 페로브스카이트(perovskite) 구조인, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 3개 이상의 강유전성 물질 각각은 $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $CaTiO_3$, $KNbO_3$, $KTaO_3$, $PbTiO_3$, $PbZrO_3$에서 선택된 어느 하나인, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 3개 이상의 강유전성 물질의 단위 격자가 적층된 횟수는 서로 다른, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 단위 유전층은 상하 반전 대칭성(inversion symmetry)을 가지지 않는, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 유전체 소재는

외부에서 제1전기장이 인가되었을 때 제1유전율을 가지고,

상기 제1전기장과 크기는 같고 방향이 다른 제2전기장이 인가되었을 때 제2유전율을 가지며,

상기 제1유전율과 상기 제2유전율은 다른 값을 가지는, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 제1유전율과 상기 제2유전율의 차이값과 상기 제1유전율의 비율은 5% 이상 300% 이하인, 초격자 구조를 가지는 유전체 소재.

청구항 9

기판; 및

상기 기판 상에 배치되고, 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층을 반복 적층시킨 유전층;을 포함하는, 전자 소자.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 3개 이상의 강유전성 물질 및 상기 기판을 이루는 물질은 같은 결정 구조를 가지는, 전자 소자.

청구항 11

제9항에 있어서,

상기 기판을 이루는 물질과 상기 강유전성 물질의 격자 상수(lattice constant)의 비율은 96% 이상 104% 이하인, 전자 소자.

청구항 12

제9항에 있어서,

상기 기판은 상기 유전층에 인장력(tensile)을 가하는, 전자 소자.

청구항 13

제9항에 있어서, 상기 유전층은

외부에서 제1전기장이 인가되었을 때 제1유전율을 가지고,

상기 제1전기장과 크기는 같고 방향이 다른 제2전기장이 인가되었을 때 제2유전율을 가지며,

상기 제1유전율과 상기 제2유전율은 다른 값을 가지는, 전자 소자.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 제1유전율과 상기 제2유전율의 차이값과 상기 제1유전율의 비율은 5% 이상 300% 이하인, 전자 소자.

청구항 15

제9항에 있어서,

상기 유전층을 사이에 두는 상부 전극 및 하부 전극을 더 포함하는, 전자 소자.

청구항 16

제15항에 있어서,

상기 하부 전극은 $LaNiO_3$(LNO), $La(Sr,Co)O_3$(LSCO), $La(Sr,Mn)O_3$(LSMO)에서 선택된 어느 하나를 포함하는, 전자 소자.

청구항 17

기판을 준비하는 단계; 및

상기 기판 상에, 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층을 반복 적층시켜 유전층을 형성하는 단계;를 포함하는, 전자 소자의 제조 방법.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 유전층을 형성하는 단계는, 상기 강유전성 물질을 에피텍시 성장시키는 단계를 포함하는, 전자 소자의 제조 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 초격자 구조를 가지는 유전체 소재, 전자 소자 및 전자 소자의 제조 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 적층시켜 반전 대칭성(inversion symmetry)을 깨 외부 전기장 인가 방향에 따라 물성이 변하도록 한 유전체 소재, 전자 소자 및 전자 소자의 제조 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 초격자(superlattice) 구조란 2개 이상의 물질이 주기적으로 적층된 인공 격자 구조를 말한다. 초격자 구조는 자연 상태에서는 존재하지 않으므로, 자연 상태에 존재하는 물질의 한계를 넘는 뛰어난 물성 및 새로운 물리 현상을 보여준다. 이에 따라 자연 상태에서 일정한 패턴을 가지는 결정성(crystalline) 물질이 나타내는 특성을, 스퍼터링증착 등 다양한 방법을 통해 변형하여 새로운 형태의 초격자 구조를 만들어내는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

[0003] 예를 들어 한국 공개특허 제2016-0079214호는 초격자 구조를 적용하여 전기적 특성을 향상시킨 산화아연계 투명 전극에 관해, 한국 공개특허 제2015-0061014호는 초격자 구조를 이용하여 강유전체를 사용하지 않아도 전체로서 강유전성을 발휘하는 막을 형성하는 방법에 관해 서술하고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) 한국 공개특허 제2016-0079214호 (공개일 2016.07.06.)

(특허문헌 0002) 한국 공개특허 제2015-0061014호 (국제공개일 2012.04.19.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명은 전기장 인가 방향에 따라 유전율의 크기가 달라져, 다중 정전 용량 소재로 활용할 수 있는 초격자 구조를 가지는 유전체 소재, 전자 소자 및 전자 소자의 제조 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다. 그러나 이러한 과제는 예시적인 것으로, 이에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

과제의 해결 수단

[0006] 본 발명의 일 실시예에 따른 초격자 구조를 가지는 유전체 소재는, 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층을 반복 적층시킨 구조를 포함한다.

[0007] 상기 3개 이상의 강유전성 물질의 결정 구조는 같을 수 있다.

[0008] 상기 결정 구조는 페로브스카이트(perovskite) 구조일 수 있다.

[0009] 상기 3개 이상의 강유전성 물질 각각은 $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $CaTiO_3$, $KNbO_3$, $KTaO_3$, $PbTiO_3$, $PbZrO_3$에서 선택된 어느 하나일 수 있다.

[0010] 상기 3개 이상의 강유전성 물질의 단위 격자가 적층된 횟수는 서로 다를 수 있다.

[0011] 상기 단위 유전층은 상하 반전 대칭성(inversion symmetry)을 가지지 않을 수 있다.

[0012] 상기 유전체 소재는 외부에서 제1전기장이 인가되었을 때 제1유전율을 가지고, 상기 제1전기장과 크기가 비슷하고 방향이 다른 제2전기장이 인가되었을 때 제2유전율을 가지며, 상기 제1유전율과 상기 제2유전율은 다른 값을 가질 수 있다.

[0013] 상기 제1유전율과 상기 제2유전율의 차이값과 상기 제1유전율의 비율은 5% 이상 300% 이하일 수 있다.

[0014] 본 발명의 다른 실시예에 따른 전자 소자는, 기판; 및 상기 기판 상에 배치되고, 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층을 반복 적층시킨 유전층;을 포함한다.

[0015] 상기 3개 이상의 강유전성 물질 및 상기 기판을 이루는 물질은 같은 결정 구조를 가질 수 있다.

[0016] 상기 기판을 이루는 물질과 상기 강유전성 물질의 격자 상수(lattice constant)의 비율은 96% 이상 104% 이하일 수 있다.

[0017] 상기 기판은 상기 유전층에 인장력(tensile)을 가할 수 있다.

[0018] 상기 유전층은 외부에서 제1전기장이 인가되었을 때 제1유전율을 가지고, 상기 제1전기장과 크기가 비슷하고 방향이 다른 제2전기장이 인가되었을 때 제2유전율을 가지며, 상기 제1유전율과 상기 제2유전율은 다른 값을 가질 수 있다.

[0019] 상기 제1유전율과 상기 제2유전율의 차이값과 상기 제1유전율의 비율은 5% 이상 300% 이하일 수 있다.

[0020] 일 실시예에 따른 전자 소자는 상기 유전층을 사이에 두는 상부 전극 및 하부 전극을 더 포함할 수 있다.

[0021] 상기 하부 전극은 $LaNiO_3$(LNO), $La(Sr,Co)O_3$(LSCO), $La(Sr,Mn)O_3$(LSMO) 에서 선택된 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0022] 본 발명의 다른 실시예에 따른 전자 소자의 제조 방법은, 기판을 준비하는 단계; 및 상기 기판 상에, 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층을 반복 적층시켜 유전층을 형성하는 단계;를 포함한다.

[0023] 상기 유전층을 형성하는 단계는, 상기 강유전성 물질을 에피텍시 성장(epitaxial growth)시키는 단계를 포함할 수 있다.

[0024] 전술한 것 외의 다른 측면, 특징, 이점이 이하의 도면, 특허청구범위 및 발명의 상세한 설명으로부터 명확해질 것이다.

발명의 효과

[0025] 상기한 바와 같이 이루어진 본 발명의 일 실시예에 따르면, 전기장 인가 방향에 따라 유전율의 크기가 달라져, 다중 정전 용량(capacitance) 소자 등에 응용할 수 있는 초격자 구조를 가지는 유전체 소재, 전자 소자 및 전자 소자의 제조 방법을 제공할 수 있다. 물론 이러한 효과에 의해 본 발명의 범위가 한정되는 것은 아니다.

도면의 간단한 설명

[0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 초격자 구조를 가지는 유전체 소재를 개략적으로 나타낸 그림이다.

도 2는 도 1의 단위 유전층의 결정 구조를 간략하게 예시한 그림이다.

도 3은 페로브스카이트(perovskite) 결정 구조를 나타낸 그림이다.

도 4 및 도 5는 단위 유전층의 다양한 구조를 예시한 그림이다.

도 6은 전기장의 인가 방향에 따라 유전체 소재의 유전율이 달라지는 원리를 설명한 그림이다.

도 7은 $CaTiO_3/SrTiO_3/BaTiO_3$ 적층 구조의 분극(polarization)에 대한 에너지 크기를 나타낸 계산 그래프이다.

도 8은 본 발명의 다른 실시예에 따른 전자 소자를 개략적으로 나타낸 단면도이다.

도 9는 기판과 유전층의 경계면에서, 유전층을 이루는 원자에 인장력이 작용하는 메커니즘을 설명하기 위한 그림이다.

도 10은 유전층에 작용하는 인장력을 변화시켰을 때의 유전율 변화를 나타낸 실험그래프이다.

도 11은 기판과 유전층의 경계면에서, 유전층을 이루는 원자에 압축력이 작용하는 메커니즘을 설명하기 위한 그림이다.

도 12는 유전층에 작용하는 압축력을 변화시켰을 때의 유전율 변화를 나타낸 실험그래프이다.

도 13 및 도 14는 각각 본 발명의 다른 실시예에 따른 전자 소자가 커패시터(capacitor)로 기능하는 경우를 나타낸 그림이다.

도 15 및 도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 전자 소자를 제조하는 방법을 차례대로 나타낸 단면도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0027] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 설명하고자 한다. 본 발명의 효과 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예들에 한정되는 것이 아니라 다양한 형태로 구현될 수 있다.

[0028] 이하의 실시예에서, 제1, 제2 등의 용어는 한정적인 의미가 아니라 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소와 구별하는 목적으로 사용된다.

[0029] 이하의 실시예에서, 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다.

[0030] 이하의 실시예에서, 포함하다 또는 가지다 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 또는 구성요소가 존재함을 의미하는 것이고, 하나 이상의 다른 특징들 또는 구성요소가 부가될 가능성을 미리 배제하는 것은 아니다.

[0031] 이하의 실시예에서, 막, 영역, 구성 요소 등의 부분이 다른 부분 '위'에 또는 '상'에 있다고 할 때, 다른 부분의 바로 위에 있는 경우뿐만 아니라, 그 중간에 다른 막, 영역, 구성 요소 등이 개재된 경우도 포함한다.

[0032] 도면에서는 설명의 편의를 위하여 구성 요소들이 그 크기가 과장 또는 축소될 수 있다. 예컨대, 도면에서 나타난 각 구성의 크기 및 두께는 설명의 편의를 위해 임의로 나타내었으므로, 본 발명이 반드시 도시된 바에 한정되지 않는다.

[0033] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들을 상세히 설명하기로 하며, 도면을 참조하여 설명할 때 같거나 대응하는 구성 요소는 같은 도면부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.

[0034] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 초격자 구조를 가지는 유전체 소재(SD)를 개략적으로 나타낸 그림이다.

[0035] 도 1을 참조하면, 서로 다른 유전 상수(dielectric constant)를 가지는 3개의 강유전성(ferroelectric) 물질 각각이 원자 단위로 적층되어 별도의 층(101, 102, 103)을 이룬다. 이때 '원자 단위로 적층'된다는 것은 강유전성 물질층(101, 102, 103)의 원자가 수개~수십개 단위로 적층된다는 것을 의미한다.

[0036] 각각의 강유전성 물질은 단위 격자(unit cell)가 주기적으로 반복되는 결정 구조를 가질 수 있다. 이때 즉 수개~수십개 단위 격자(unit cell)가 z방향으로 적층되어 강유전성 물질층(101, 102, 103)을 구성할 수 있다. 각각의 강유전성 물질층의 두께는 0.3nm 이상 30nm 이하일 수 있다.

[0037] 각각의 강유전성 물질층(101, 102, 103)이 적층된 구조는 단위 유전층(unit dielectric layer, UD)을 구성한다. 단위 유전층(UD)은 같은 구조를 가지고 반복 적층되어 초격자(superlattice) 구조를 가지는 유전체 소재(SD)를 이루게 된다. 초격자 구조란 2개 이상의 물질이 주기적으로 적층된 인공 격자 구조를 의미한다. 초격자 구조를 통해, 자연계에 존재하는 물질의 한계를 극복하여 독특한 유전 특성을 가지는 나노 단위의 유전체 소재(SD)를 구현할 수 있다.

[0038] 단위 유전층(UD)은 1회 이상 반복적으로 적층된다. 적층 횟수는 유전체 소재(SD)가 사용되는 응용 소자의 구동 특성에 맞게 조절될 수 있다. 단위 유전층(UD)이 반복 적층된 유전체 소재(SD)의 전체 두께는 나노미터 또는 마이크로미터 단위일 수 있다.

[0039] 도 2는 도 1의 단위 유전층(UD)의 결정 구조를 간략하게 예시한 그림이다. 도 2에서는 설명의 편의를 위하여 결정 구조가 2차원의 직방정계(rectangular) 격자인 것을 가정하였으나, 실제 강유전성 물질의 결정 구조는 이에 한정되지 않는다.

[0040] 일 실시예에 따르면, 3개 이상의 강유전성 물질의 결정 구조는 같을 수 있다. 도 2를 참조하면, 제1층(101)에 포함되는 제1원자(101'), 제2층(102)에 포함되는 제2원자(102'), 제3층(103)에 포함되는 제3원자(103')가 직사각형의 꼭짓점에, 원자 X가 정사각형의 모서리에, 원자 B가 정사각형의 중심에 배치된 결정 구조가 예시되어 있다.

[0041] 3개 이상의 강유전성 물질의 결정 구조가 모두 같다는 것은, 강유전성 물질이 따로 존재하였을 때의 결정 구조가 모두 같다는 것을 의미한다. 예컨대 단위 유전층(UD)의 제1층(101)이 ABX_3의 결정 구조를 가지는 경우, 제2층(102), 제3층(103) 역시 ABX_3의 결정 구조를 가진다. 제1층(101), 제2층(102), 제3층(103)의 결정 구조가 같음에 따라, 단위 유전층(UD)의 결정 구조가 하나로 명확하게 정의되어 유전체 소재(SD)의 물성을 예측제어할 수

있다.

[0042] 한편, 제1층(101), 제2층(102) 및 제3층(103)의 결정 구조의 격자 상수(lattice constant)는 거의 같거나 2~3%의 차이를 보일 수 있다. 이에 따라 각각의 층을 에피텍시 성장(epitaxial growth)시킬 수 있으며, 이를 통해 도 2의 우측에 그려진 원자 구조가 반복적으로 배열되는 초격자 구조를 인위적으로 얻을 수 있게 된다.

[0043] 도 3은 페로브스카이트(perovskite) 결정 구조를 나타낸 그림이다.

[0044] 일 실시예에 따르면, 3개 이상의 강유전성 물질의 결정 구조는 페로브스카이트(perovskite) 구조일 수 있다.

[0045] 도 3을 참조하면, 사방결정계(orthorhombic system)의 체심(body center)에 원자 B가, 면심(face center)에 원자 X가, 꼭짓점에 원자 A가 배치된 페로브스카이트 구조(ABX_3)가 나타나 있다. 특히 원자 X가 산소인 페로브스카이트 산화물(ABO_3)은 대부분 유전율이 높고 강유전성을 가진다. 일 실시예에 따르면, 상기 3개의 강유전성 물질 각각은 $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $CaTiO_3$, $KNbO_3$, $KTaO_3$, $PbTiO_3$, $PbZrO_3$에서 선택된 어느 하나일 수 있다.

[0046] 한편, 여러 원자를 규칙적, 주기적으로 쌓을 수 있다면 페로브스카이트 외에도 다양한 결정 구조를 가지는 강유전성 물질을 사용할 수 있다.

[0047] 도 4 및 도 5는 단위 유전층(UD)의 다양한 구조를 예시한 그림이다.

[0048] 일 실시예에 따르면, 3개 이상의 강유전성 물질의 단위 격자(unit cell)가 적층된 횟수는 서로 다를 수 있다. 도 4를 참조하면, 제1층(101) 및 제3층(103)에 포함되는 단위 격자는 하나의 층으로, 제2층(102)에 포함되는 단위 격자는 두 층으로 적층된 경우가 예시되어 있다. 즉 이 경우 3개의 강유전성 물질의 단위 격자를 A, B, C라 할 때 단위 유전층(UD)은 아래에서부터 ABBC의 적층 구조를 가진다. 단위 유전층(UD)은 도 4에서 예시한 적층 구조 뿐만 아니라 ABC, ABBC, ABCC, AAABC ... 등 다양한 적층 구조를 가질 수 있다.

[0049] 한편, 도 5를 참조하면 서로 다른 4개의 강유전성 물질의 단위 격자가 적층된 단위 유전층(UD)이 예시되어 있다. 즉 단위 유전층(UD)은 제4층(104)을 포함한다. 이 경우 4개의 강유전성 물질의 단위 격자를 A, B, C, D라 할 때, 단위 유전층(UD)은 아래에서부터 ABCD의 적층 구조를 가진다. 단위 유전층(UD)은 도 5에서 예시한 적층 구조뿐만 아니라 ABCDD, ABCDE ... 등 다양한 적층 구조를 가질 수 있다.

[0050] 일 실시예에 따르면, 단위 유전층(UD)은 상하 반전 대칭성(inversion symmetry)을 가지지 않을 수 있다. 다시 도 1을 참조하면, 단위 유전층(UD)의 가운데 배치된 제2층(102)을 기준으로 제1층(101)과 제3층(103)이 서로 다른 강유전성 물질로 이루어져 있기 때문에, 단위 유전층(UD)이 적층되는 방향(z방향, 상하 방향)에 수직이고 단위 유전층(UD)의 가운데를 지나는 평면을 대칭면으로 하여 단위 유전층(UD)을 반전시키더라도 원래의 단위 유전층(UD)을 얻을 수 없다.

[0051] 즉 단위 유전층(UD)이 서로 다른 3개 이상의 층으로 구성되는 경우, 단위 유전층(UD)이 ABCBA 등과 같이 상하 대칭으로 구성되는 일부 예외적인 경우를 제외하고는 상하 반전 대칭성이 깨지게 된다. 이러한 대칭성 깨짐에 의해, 단위 유전층(UD)의 z방향 및 -z방향으로의 물리적 변화 양상이 달라진다.

[0052] 도 6은 전기장의 인가 방향에 따라 유전체 소재(SD)의 유전율이 달라지는 원리를 설명한 그림이다. 도 6에서는 강유전성 물질이 아래에서부터 각각 페로브스카이트 구조의 $CaTiO_3$, $SrTiO_3$, $BaTiO_3$인 것을 예시로 설명하나, 본 발명이 이에 제한되는 것은 아니다.

[0053] 일 실시예에 따르면, 유전체 소재(SD)는 외부에서 제1전기장이 인가되었을 때 제1유전율을 가지고, 제1전기장과 크기는 같고 방향이 다른 제2전기장이 인가되었을 때 제2유전율을 가지며, 제1유전율과 제2유전율은 다른 값을 가질 수 있다.

[0054] 도 6의 (a)를 참조하면, -z방향의 제1전기장(E-)이 인가되어 있다. 이러한 제1전기장에 의해, B 자리에 있던 Ti 원자는 중앙에서 벗어나게(off-centered) 된다. 이때 단위 유전층(UD) 내의 $CaTiO_3/SrTiO_3/BaTiO_3$가 하나씩 적층된 단위 구조를 하나의 전기 쌍극자(electric dipole)로 취급하면, Ti 원자가 중앙에서 벗어나 아래쪽으로 치우진 상태에서의 $CaTiO_3/SrTiO_3/BaTiO_3$ 구조는 특정 쌍극자 모멘트값을 가지며, 이러한 단위 구조가 xy평면, z방향으로 반복 적층된 유전체 소재(SD) 전체는 제1유전율(ε_-)을 가진다.

[0055] 도 6의 (b)를 참조하면, +z방향의 제2전기장(E+)이 인가되어 있다. 이러한 제2전기장에 의해, B 자리에 있던 Ti 원자는 중앙에서 벗어나게 되는데, Ti 원자의 이동 방향은 (a)의 경우와 반대가 된다. (a)와 (b) 각각의

경우에, Ti 원자가 이동한 거리가 같다고 하여도, 단위 유전체의 상하 반전 대칭성이 깨져 있는 상태이기 때문에 (a)의 배열 상태와 (b)의 배열 상태는 다르게 된다. 즉 (a)의 경우에는 Ti 원자가 Ca 원자에 더 치우쳐 있는 상태이고, (b)의 경우에는 Ti 원자가 Ba 원자에 더 치우쳐 있는 상태이기 때문에, $CaTiO_3/SrTiO_3/BaTiO_3$ 단위 구조에서의 쌍극자 모멘트값은 (a)에서의 값과 다르게 된다. 따라서 유전체 소재(SD) 전체의 제2유전율(ε_+)은 제1유전율(ε_-)과 다른 값을 가진다.

[0056] 도 7은 $CaTiO_3/SrTiO_3/BaTiO_3$ 적층 구조의 분극(polarization)에 대한 에너지 크기를 나타낸 계산 그래프이다. 도 7을 참조하면, +z, -z 방향으로 각각 같은 크기의 전기장을 인가하여 분극의 크기가 같은 경우라 하더라도, 반전 대칭성 깨짐으로 인하여 격자 총 에너지(Total energy)의 값이 달라짐을 확인할 수 있다. 이때 (a)와 (b)의 경우의 -z방향 유전율(ε_z)은 약 31%의 차이를 보였다. 한편, 평면 방향 유전율($\varepsilon_{x,y}$) 역시 차이를 보이는데, 이는 Ti 원자의 이동으로 인한 원자 구조의 뒤틀림으로 인한 것으로 해석된다.

[0057] 이렇게 전기장 인가 방향에 따라 유전율의 크기가 차이를 보이는 것은, 단위 유전체가 서로 다른 3개 이상의 물질이 적층되어 반전 대칭성이 깨져 있기 때문이다. 만약 1개 또는 2개의 물질만이 적층되어 반전 대칭성을 가지고 있는 유전체 소재에서는 이러한 현상이 발생하지 않는다.

[0058] 일 실시예에 따르면, 제1유전율(ε_1)과 제2유전율(ε_2)의 차이값과 제1유전율(ε_1)의 비율, 즉 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$의 값은 5% 이상 300% 이하일 수 있다. 단위 유전체에 포함되는 강유전성 물질의 종류 및 격자 구조를 다르게 하여, 제1유전율(ε_1)과 제2유전율(ε_2)의 비를 제어할 수 있다.

[0059] 도 8은 본 발명의 다른 실시예에 따른 전자 소자를 개략적으로 나타낸 단면도이다.

[0060] 본 발명의 다른 실시예에 따른 전자 소자는, 기판(200), 기판(200) 상에 배치되고 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 단위 유전층(UD)을 반복 적층시킨 유전층(100)을 포함한다.

[0061] 도 8을 참조하면, 기판(200) 상에 유전층(100)이 배치된다. 유전층(100)은 단위 유전층(UD)을 반복하여 적층시킨 것이다. 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시킨 각각의 층(101, 102, 103)이 적층되어 하나의 단위 유전층(UD)을 이룬다.

[0062] 이때 일 실시예에 따르면 기판(200)을 이루는 물질과 각각의 강유전성 물질은 같은 결정 구조를 가질 수 있다. 도 2에서 서술한 것과 비슷하게, 기판(200)을 이루는 물질 및 3개 이상의 강유전성 물질 각각의 결정 구조가 모두 같다는 것은, 기판(200)을 이루는 물질 및 강유전성 물질이 따로 존재하였을 때의 결정 구조가 모두 같다는 것을 의미한다. 이를 통해 원자 구조가 반복적으로 배열되는 초격자 구조를 인위적으로 얻을 수 있게 된다.

[0063] 일 실시예에 따르면, 기판(200)의 결정 구조는 페로브스카이트 구조일 수 있고, 기판(200)을 이루는 물질은 $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $CaTiO_3$, $KNbO_3$, $KTaO_3$, $PbTiO_3$, $PbZrO_3$에서 선택된 어느 하나일 수 있다.

[0064] 한편, 기판(200) 및 유전층(100)의 결정 구조는 같으나, 격자 상수는 서로 다를 수 있다. 이때 기판(200)과 유전층(100)의 경계면에서의 격자 상수의 차이로 인하여 유전층(100)에는 인장력 또는 압축력이 작용하게 된다.

[0065] 도 9는 기판(200)과 유전층(100)의 경계면에서, 유전층(100)을 이루는 원자에 인장력이 작용하는 메커니즘을 설명하기 위한 그림이다. 도 9를 참조하면, 기판(200)을 이루는 원자(200') 간의 격자 상수(a_{200})가 유전층(100)을 이루는 원자(100') 간 격자 상수(a_{100})보다 크다. 따라서 기판(200) 및 유전층(100)이 서로 같은 격자 구조를 가지며 결합하기 위해서는, 유전층(100)의 격자 상수(a_{100})가 늘어나야 하므로 유전층(100)에 인장력이 작용하게 된다. 즉 유전층(100)과 기판(200)의 결합으로 인하여 유전층(100)은 인장력을 받아 뒤틀려 원자 구조가 변형되므로, 유전층(100) 자체로만 있는 경우와는 다른 물성을 가지게 된다.

[0066] 도 10은 유전체에 작용하는 인장력을 변화시켰을 때의 유전율 변화를 나타낸 실험그래프이다. 도 10의 실험예에서 유전층(100)은 단위 유전층(UD)인 $CaTiO_3/SrTiO_3/BaTiO_3$가 반복 적층된 구조를 가졌고, 기판(200)으로는 $SrTiO_3$가 이용되었다. 이후, 전기장을 인가하여 B 자리(도 3 참조)에 있는 Ti 원자의 움직임(B site movement parameter)에 따른 에너지 및 유전율의 변화를 살펴보았다. 이때 유전율의 변화란 제1전기장에 따른 유전층(100)의 제1유전율(ε_1) 및 제2전기장에 따른 유전층(100)의 제2유전율(ε_2) 차이의 비율인 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$을 의미

한다.

[0067] 도 10의 (a)를 참조하면, 대조를 위한 레퍼런스(reference) 상태에서 유전율의 변화 비율 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$은 46.98%로 나타났다.

[0068] 도 10의 (b)를 참조하면, 기판(200)의 격자 상수를 변화시켜 유전층(100)에 걸리는 인장력을 0.2% 증가시켰을 때, 유전율의 변화 비율 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$은 57.72%로 나타났다. 이때 기판에 in-situ 전압을 가하여 이러한 인장력의 변화를 유도할 수 있다.

[0069] 도 10의 (c)를 참조하면, 기판(200)의 격자 상수를 변화시켜 유전층(100)에 걸리는 인장력을 0.43% 증가시켰을 때, 유전율의 변화 비율 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$은 176.66%로 나타났다.

[0070] 도 11은 기판(200)과 유전층(100)의 경계면에서, 유전층(100)을 이루는 원자에 압축력이 작용하는 메커니즘을 설명하기 위한 그림이다. 도 11을 참조하면, 기판(200)을 이루는 원자(200') 간의 격자 상수(a_{200})가 유전층(100)을 이루는 원자(100') 간 격자 상수(a_{100})보다 작다. 따라서 기판(200) 및 유전층(100)이 서로 같은 격자 구조를 가지며 결합하려면, 유전층(100)의 격자 상수(a_{100})가 작아져야 하므로 유전층(100)에 압축력이 작용하게 된다. 즉 유전층(100)과 기판(200)의 결합으로 인하여 유전층(100)은 압축력을 받아 뒤틀려 원자 구조가 변형되므로, 유전층(100) 자체로 있는 경우와는 다른 물성을 가지게 된다.

[0071] 도 12는 유전체에 작용하는 압축력을 변화시켰을 때의 유전율 변화를 나타낸 실험그래프이다. 이때 레퍼런스(reference) 상태보다 인장력의 크기보다 감소하는 것을 '압축력을 증가'시킨다고 표현하였다.

[0072] 도 12의 실험예에서 유전층(100)은 단위 유전층(UD)인 $CaTiO_3/SrTiO_3/BaTiO_3$가 반복 적층된 구조를 가졌고, 기판(200)으로는 $SrTiO_3$가 이용되었다. 이후, 전기장을 인가하여 B 자리(도 3 참조)에 있는 Ti 원자의 움직임(B site movement parameter)에 따른 에너지 및 유전율의 변화 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$을 살펴보았다.

[0073] 도 12의 (a)를 참조하면, 대조를 위한 레퍼런스(reference) 상태에서 유전율의 변화 비율 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$은 46.98%로 나타났다.

[0074] 도 12의 (b)를 참조하면, 기판(200)의 격자 상수를 변화시켜 유전층(100)에 걸리는 압축력을 1.3% 증가(인장력을 1.3% 감소)시켰을 때, 유전율의 변화 비율 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$은 13.72%로 나타났다.

[0075] 도 12의 (c)를 참조하면, 기판(200)의 격자 상수를 변화시켜 유전층(100)에 걸리는 압축력을 2.3% 증가(인장력을 2.3% 감소)시켰을 때, 유전율의 변화 비율 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$은 5.51%로 나타났다.

[0076] 즉 기판(200)의 격자 상수를 변화시켜 유전층(100)에 걸리는 인장력 또는 압축력을 조절하여, 전자 소자의 특성에 맞추어 유전율의 변화 비율을 선택할 수 있다. 이때 기판(200)을 이루는 물질과 강유전성 물질의 격자 상수(lattice constant)의 비율은 약 96% 이상 104% 이하일 수 있고, 이때 유전율의 변화 비율 $(\varepsilon_1-\varepsilon_2)/\varepsilon_1$은 약 5~300%가 될 수 있다.

[0077] 특히 기판(200)이 유전층(100)에 인장력을 가하는 경우 유전율의 변화 비율이 커지게 되며, 이 경우 방향에 따른 유전율 차이를 이용하는 전자 소자의 기능이 극대화될 수 있다.

[0078] 도 13 및 도 14는 각각 본 발명의 다른 실시예에 따른 전자 소자가 커패시터(capacitor)로 기능하는 경우를 나타낸 그림이다.

[0079] 일 실시예에 따른 전자 소자는 유전층(100)을 사이에 두는 상부 전극(320) 및 하부 전극을 포함할 수 있다.

[0080] 도 13을 참조하면, 하부 전극(310)상에 기판(200)이, 기판(200) 상에 유전층(100)이, 유전층(100) 상에 상부 전극(320)이 배치된다. 상부 전극(320) 및 하부 전극(310) 사이에 유전층(100)이 배치되어 있으므로, 전자 소자는 커패시터로 기능할 수 있다.

[0081] 상부 전극(320) 및 하부 전극(310)은 도체를 포함하며, 알루미늄(Al), 백금(Pt), 팔라듐(Pd), 은(Ag), 마그네슘(Mg), 금(Au), 니켈(Ni), 네오디뮴(Nd), 이리듐(Ir), 크롬(Cr), 리튬(Li), 칼슘(Ca), 몰리브덴(Mo), 티타늄(Ti), 텅스텐(W), 구리(Cu) 중 하나 이상의 물질로 단층 또는 다층으로 형성될 수 있다.

[0082] 이때 기판(200)은, 격자 상수 조절을 통해 제1유전율 및 제2유전율의 비율을 조절할 수 있게 하는 기능을 수행

할 수 있다. 따라서 상하 반전 대칭성이 깨진 단위 유전층(UD)을 반복 적층시킨 유전층(100)이 전극(310, 320) 사이에 배치되어, 전압의 인가 방향에 따라 다른 정전 용량(capacitance)을 가지는 커패시터를 구현할 수 있다.

[0083] 도 14를 참조하면, 기판(200) 상에 하부 전극(310)이, 하부 전극(310) 상에 유전층(100)이, 유전층(100) 상에 상부 전극(320)이 배치된다. 상부 전극(320) 및 하부 전극(310) 사이에 유전층(100)이 배치되어 있으므로, 전자 소자는 커패시터로 기능할 수 있다.

[0084] 이때 특히 하부 전극(310)은 유전층(100)과 같은 결정 구조를 가질 수 있다. 예컨대 유전층(100)이 $BaTiO_3$와 같은 페로브스카이트 산화물인 경우, 하부 전극은 같은 페로브스카이트 구조를 가지되 전극으로 기능할 수 있는 $LaNiO_3$(LNO), $La(Sr,Co)O_3$(LSCO), $La(Sr,Mn)O_3$ (LSMO) 중 어느 하나를 포함할 수 있다. 이처럼 하부 전극과 유전층(100)이 같은 결정 구조를 가지는 경우, 유전층(100)을 하부 전극(310) 상에 에피텍시 성장시킬 수 있고, 기판(200)의 경우와 비슷하게 하부 전극의 격자 상수를 조절하여 유전층(100)의 유전율 변화를 조절할 수 있다.

[0085] 한편, 이때 도시되지는 않았으나 상부 전극(320)이 패터닝되는 경우 전자 소자는 복수 개의 커패시터를 포함할 수 있게 된다.

[0086] 도 15 및 도 16은 본 발명의 일 실시예에 따른 전자 소자를 제조하는 방법을 차례대로 나타낸 단면도이다.

[0087] 도 15를 참조하면, 기판(200)을 준비하는 단계가 수행된다. 기판(200)은 향후 기판(200) 상에 적층될 강유전성 물질과 같은 격자 구조를 가지는 것이 바람직하다. 기판(200)을 이루는 물질은 $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $CaTiO_3$, $KNbO_3$, $KTaO_3$, $PbTiO_3$, $PbZrO_3$에서 선택된 어느 하나일 수 있다. 한편, 기판(200) 자체를 전극으로 활용하는 경우, 기판(200)은 $LaNiO_3$(LNO), $La(Sr,Co)O_3$(LSCO), $La(Sr,Mn)O_3$ (LSMO) 중 어느 하나를 포함할 수도 있다.

[0088] 도 16을 참조하면, 기판(200) 상에 유전층(100)을 형성하는 단계가 수행된다. 유전층(100)은 단위 유전층(UD)을 반복하여 적층하여 형성할 수 있다. 각각의 단위 유전층(UD)은 서로 다른 유전 상수를 가지는 3개 이상의 강유전성 물질을 원자 단위로 적층시켜 형성할 수 있다.

[0089] 이때 각각의 강유전성 물질은 에피텍시 성장(epitaxial growth)할 수 있다. 예를 들어 분자 빔 에피텍시(Molecular Beam Epitaxy, EBE) 기법을 이용하여 각각의 단위 유전층(UD)에 포함되는 제1층(101), 제2층(102), 제3층(103)을 번갈아가면서 차례로 형성시켜, 유전층(100)이 원래 의도했던 초격자 구조를 가지도록 할 수 있다.

[0090] 상기한 바와 같이 이루어진 본 발명의 일 실시예에 따르면, 전기장 인가 방향에 따라 유전율의 크기가 달라져, 다중 정전 용량 소자 등에 응용할 수 있는 초격자 구조를 가지는 유전체 소재, 전자 소자 및 전자 소자의 제조 방법을 제공할 수 있다. 이때 기판의 격자 상수 조절을 통해 유전층에 작용하는 인장력 또는 압축력을 조절하여, 유전율의 변화 비율 또는 정전 용량의 변화 비율을 조절할 수 있다.

[0091] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시 예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

부호의 설명

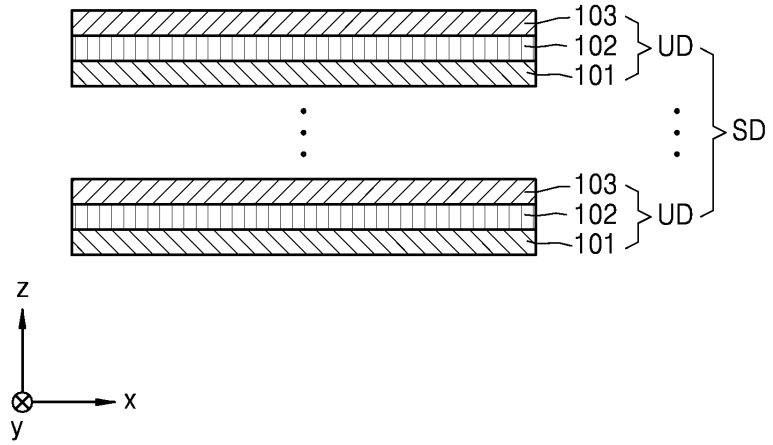
[0092] 100: 유전층 200: 기판

310: 하부 전극 320: 상부 전극

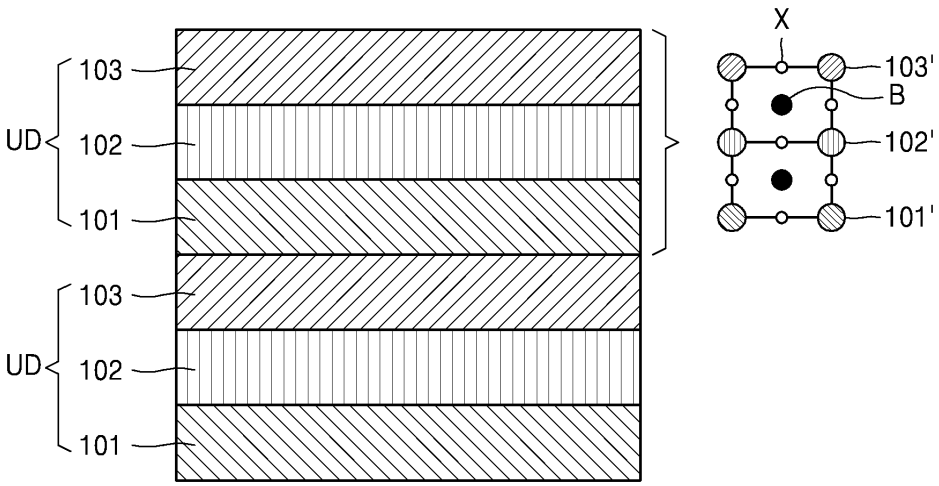
UD: 단위 유전층 SD: 유전체 소재

도면

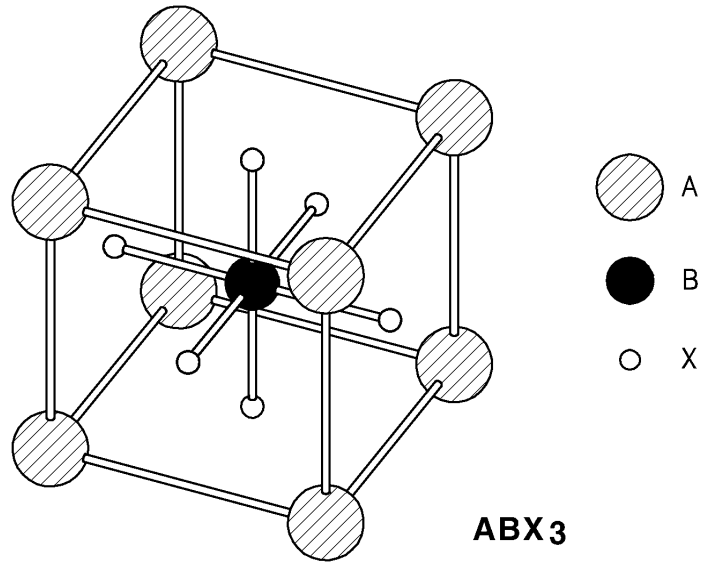
도면1


103
102
101
UD
SD
103
102
101
UD
z
x
y

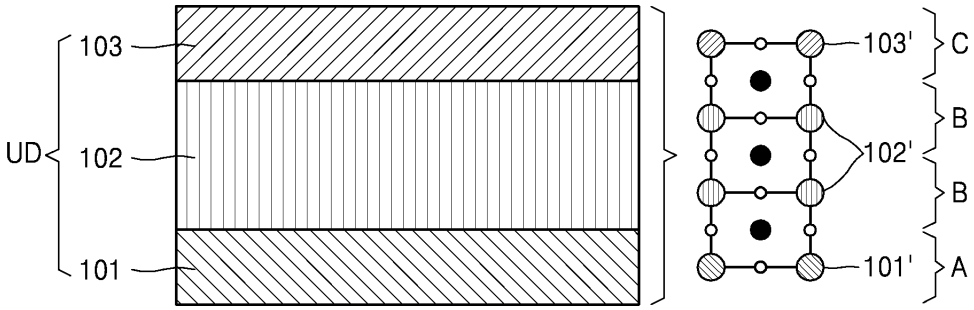
도면2


103
UD
102
101
103
UD
102
101
X
103'
B
102'
101'

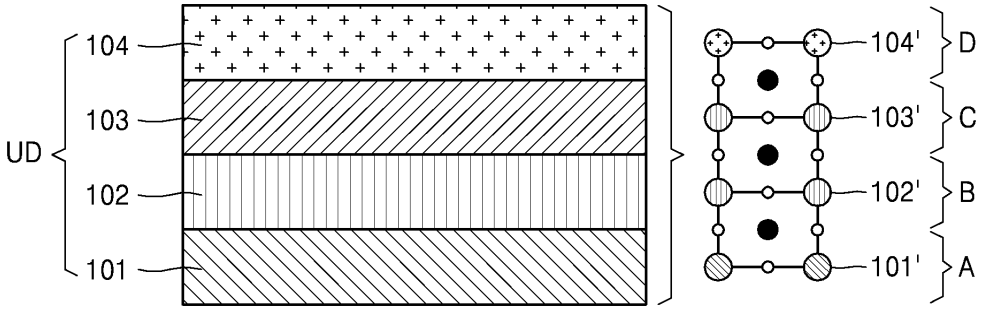
도면3


A
B
X
ABX3

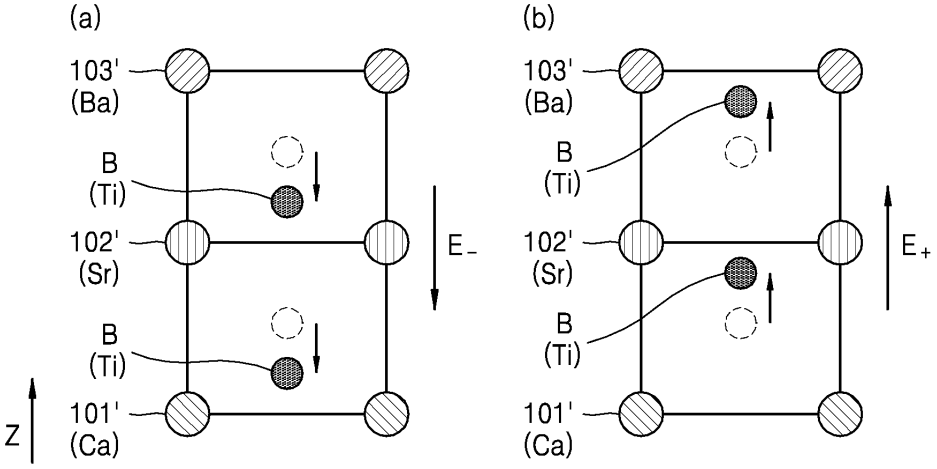
도면4


103
UD
102
101
103'
102'
101'
C
B
B
A

도면5

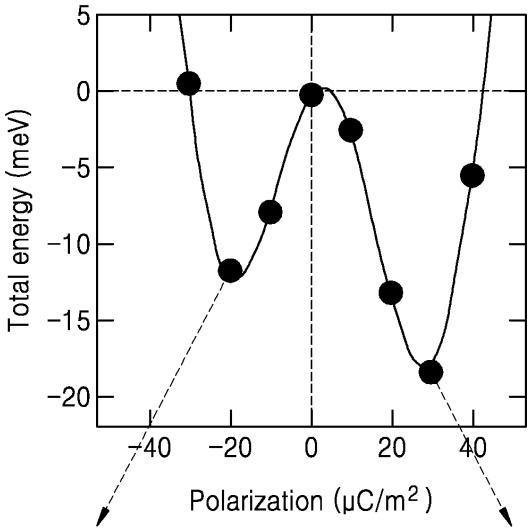

104
103
UD
102
101
104'
103'
102'
101'
D
C
B
A

도면6



유전율 : ε_- 유전율 : ε_+

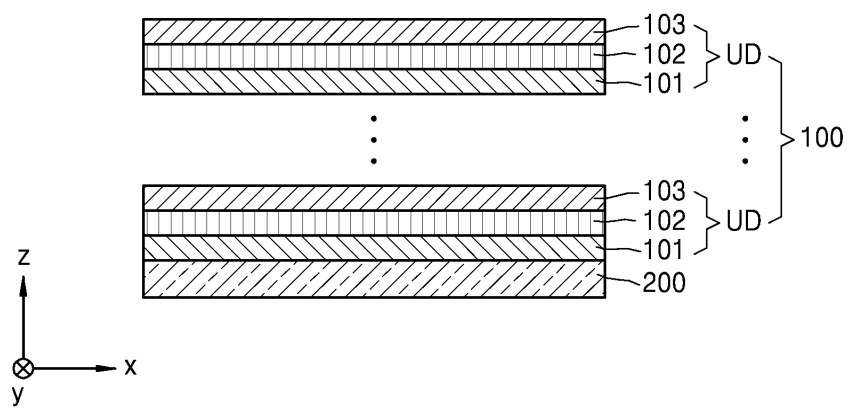
도면7



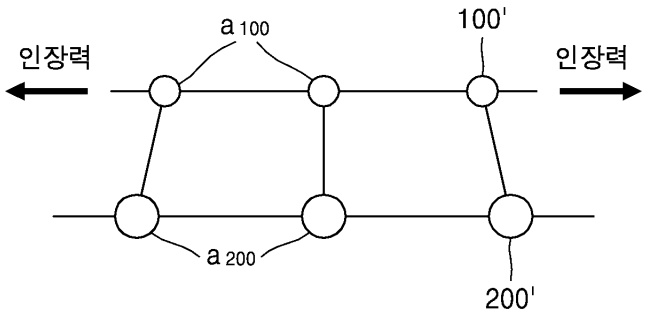
(a)
$\varepsilon_{x,y} = 172$
$\varepsilon_z = 144$

(b)
$\varepsilon_{x,y} = 151$
$\varepsilon_z = 110$

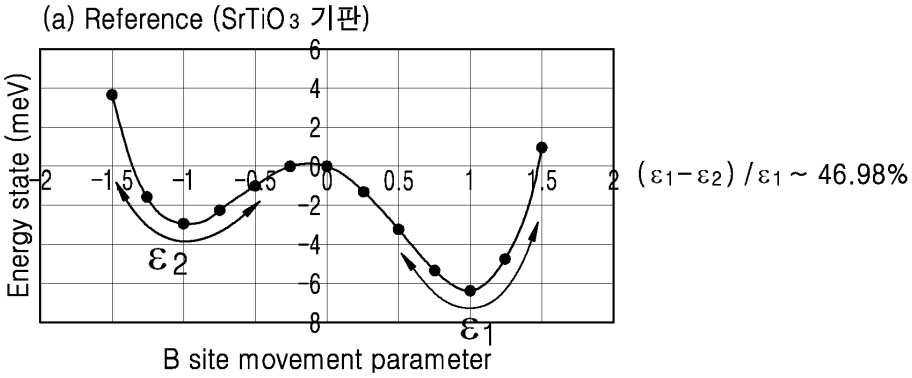
도면8

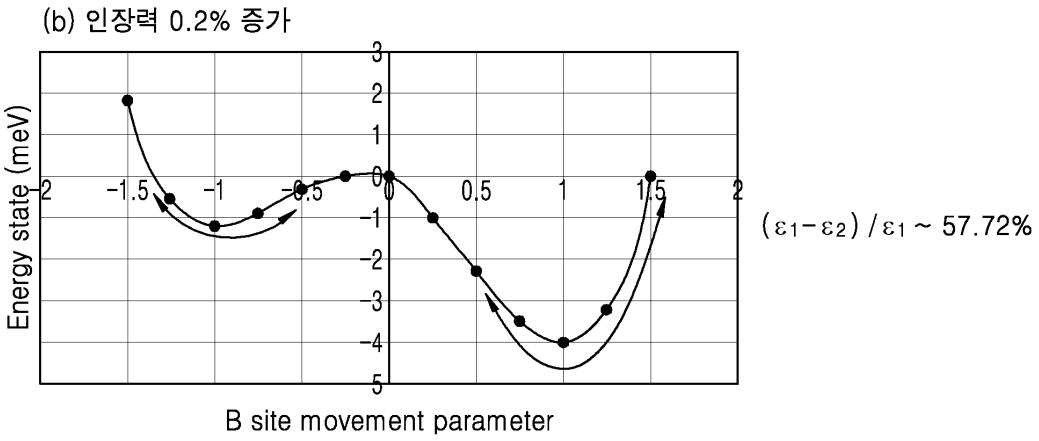


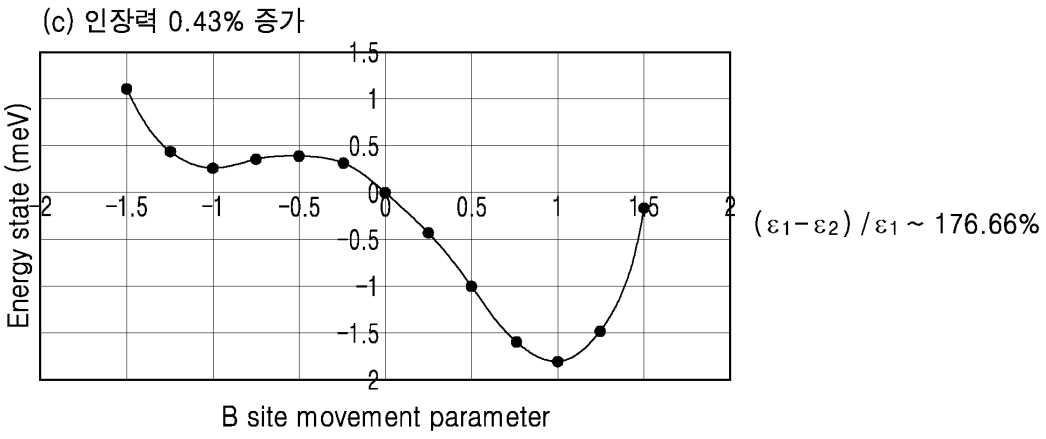
도면9


인장력
a 100
100'
인장력
a 200
200'

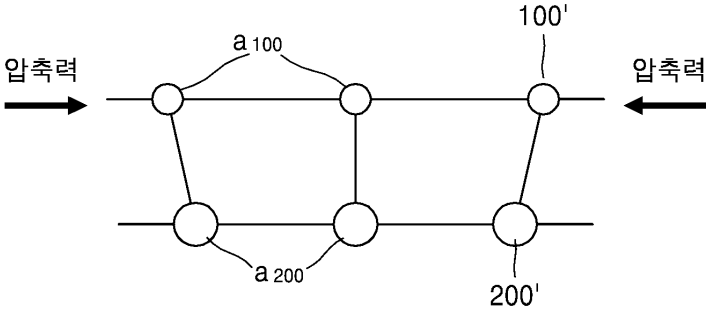
도면10


(a) Reference (SrTiO3 기판)
Energy state (meV)
B site movement parameter
ε2
ε1
(ε1−ε2) /ε1 ~ 46.98%

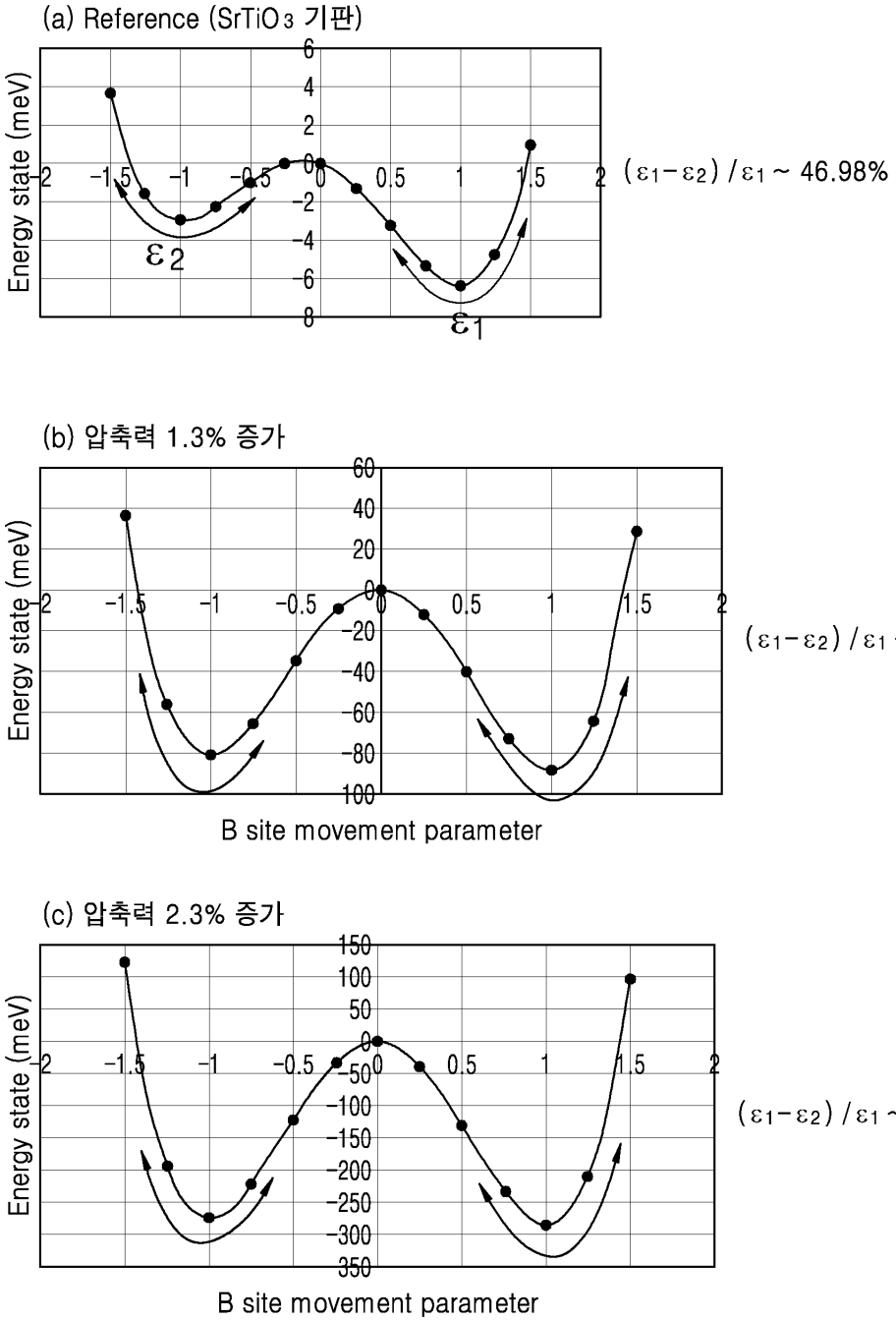

(b) 인장력 0.2% 증가
Energy state (meV)
B site movement parameter
(ε1−ε2) /ε1 ~ 57.72%


(c) 인장력 0.43% 증가
Energy state (meV)
B site movement parameter
(ε1−ε2) /ε1 ~ 176.66%

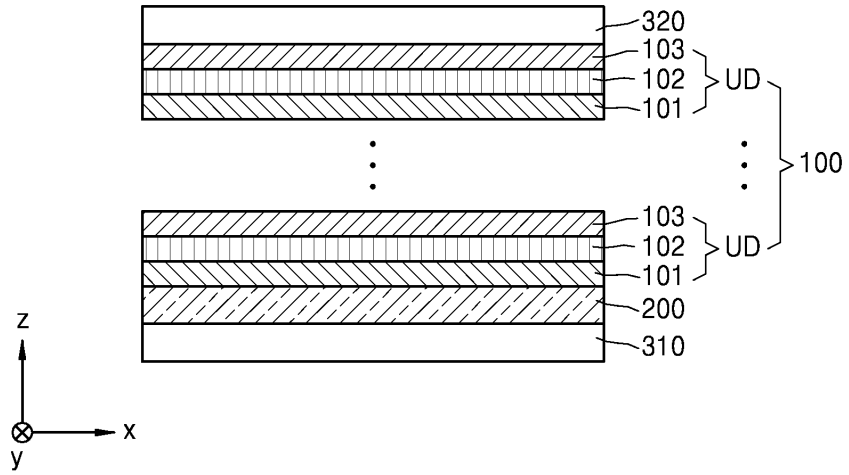
도면11


100'
a 100
압축력
압축력
a 200
200'

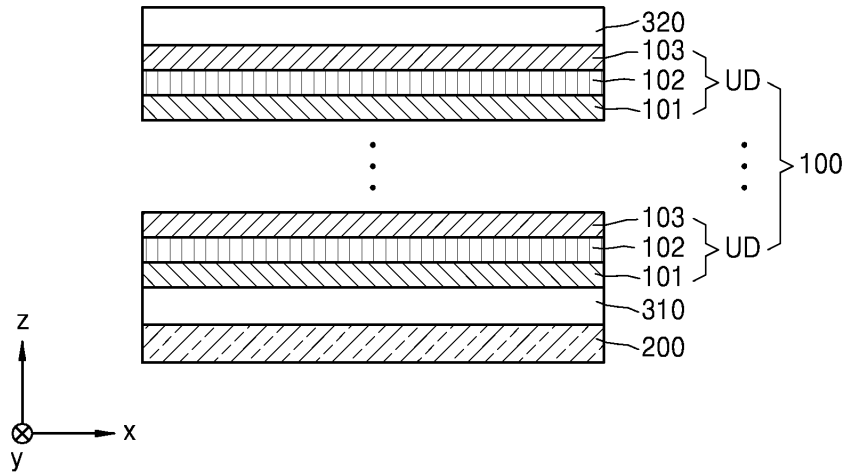
도면12


(a) Reference (SrTiO3 기판)
Energy state (meV)
ε2
ε1
(ε1−ε2) / ε1 ~ 46.98%
(b) 압축력 1.3% 증가
Energy state (meV)
(ε1−ε2) / ε1 ~ 13.72%
B site movement parameter
(c) 압축력 2.3% 증가
Energy state (meV)
(ε1−ε2) / ε1 ~ 5.51%
B site movement parameter

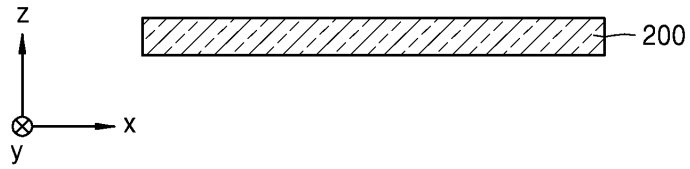
도면13



도면14



도면15



도면16

