(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0131237
(43) 공개일자 2024년08월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 29/872 (2006.01) *H01L 29/24* (2006.01)
H01L 29/66 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 29/872 (2013.01)
H01L 29/24 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0133218
(22) 출원일자 2023년10월06일
심사청구일자 2023년10월06일
(30) 우선권주장
1020230024281 2023년02월23일 대한민국(KR)

(71) 출원인
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
임유승
서울특별시 송파구 양재대로 1218 올림픽선수기자촌 246-904
쵸우담 벤카타 프라사드
서울시 광진구 능동로 209 세종대학교 대양AI센터 328호
(74) 대리인
홍승훈

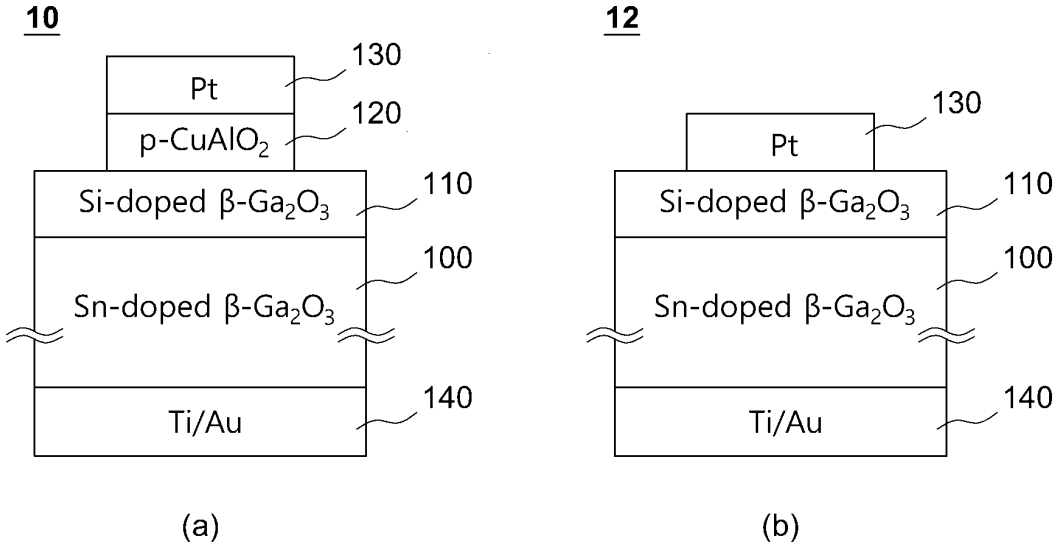
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 **구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 및 그 제조 방법**

(57) 요 약

구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 제조 방법은 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 주면에 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층을 성장시키는 단계, 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 이면에 하부 전극층을 증착하는 단계, 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 가스 분위기에서 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층상에 제2 도전형 구리알루미늄산화물층을 증착하는 단계 및 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층상에 상부 전극층을 증착하는 단계를 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H01L 29/66969 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1415181684
과제번호 00144027
부처명 산업통상자원부
과제관리(전문)기관명 한국산업기술평가관리원
연구사업명 화합물 소재 기반 차세대 전력반도체 기술개발사업(R&D)
연구과제명 1.2kV급 저손실 산화갈륨 트랜지스터 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 파워큐브세미(주)
연구기간 2022.04.01 ~ 2022.12.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1415179025
과제번호 20016102
부처명 산업통상자원부
과제관리(전문)기관명 한국산업기술평가관리원
연구사업명 소재부품기술개발
연구과제명 1.2kV급 산화갈륨 전력반도체 소자 기술개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 파워큐브세미 (주)
연구기간 2022.01.01 ~ 2022.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 주면에 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층을 성장시키는 단계;

상기 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 이면에 하부 전극층을 증착하는 단계;

불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 가스 분위기에서 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층상에 제2 도전형 구리알루미늄산화물층을 증착하는 단계; 및

상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층상에 상부 전극층을 증착하는 단계를 포함하는 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 제조 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서, 상기 혼합 가스에서 산소 유량은 6.7% 내지 30%인, 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 제조 방법.

청구항 3

청구항 2에 있어서, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층의 두께는 상기 산소 유량이 증가할수록 감소하는, 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 제조 방법.

청구항 4

청구항 1에 있어서, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층은 상기 상부 전극층보다 얇게 증착되어 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층과 상기 상부 전극층간 계면 상태 밀도의 에너지 분포 프로파일을 감소시키는 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 제조 방법.

청구항 5

청구항 1에 있어서, 상기 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 가스 분위기에서 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층상에 제2 도전형 구리알루미늄산화물층을 증착하는 단계 이전에,

구리알루미늄산화물 타겟 표면을 청소하는 사전 스퍼터링을 수행하는 단계를 더 포함하는 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 제조 방법.

청구항 6

제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼;

상기 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 주면에 에피택셜 성장된 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층;

불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 가스 분위기에서 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층상에 증착된 제2 도전형 구리알루미늄산화물층;

상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층상에 증착된 상부 전극층; 및

상기 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 이면에 오믹 접촉하는 하부 전극층을 포함하는 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드.

청구항 7

청구항 6에 있어서, 상기 혼합 가스에서 산소 유량은 6.7% 내지 30%인, 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드.

청구항 8

청구항 6에 있어서, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층의 두께는 상기 산소 유량이 증가할수록 감소하는, 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드.

청구항 9

청구항 6에 있어서, 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층과 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층간 계면은 저전압 영역에서 옴 특성을 나타내며, 고전압 영역에서 공간 전하 제한 전류의 생성에 기여하는 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드.

청구항 10

청구항 6에 있어서, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층은 상기 상부 전극층보다 얇게 증착되어 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층과 상기 상부 전극층간 계면 상태 밀도의 에너지 분포 프로파일을 감소시키는 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 구리알루미늄산화물과 산화갈륨간 이종 접합에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 이종접합(Heterojunction)은 고성능 전자장치 및 전력 장치를 개발하기 위한 중요한 기술로 인식되고 있다. 반도체 에너지 밴드 기술을 통해 생성된 이종접합은 계면에서 캐리어 전송 및 재결합을 관리하여 누설 전류를 최소화하고 반도체 소자 성능을 강화하는 데 효과적이다. 단사정계 베타-산화갈륨(β_2O_3)은 차세대 초광대역갭 반도체에서 최근 부상한 소재이다. 고성능 반도체, 고전력 장치, 고온 가스 센서 및 태양광 블라인드 광검출기와 같은 광전자 장치에 대한 상당한 관심을 불러일으켰다. β_2O_3는 약 4.9eV의 넓은 밴드갭과 약 ~8MV/cm의 높은 이론적 항복 전기장을 갖는다. 높은 밴드갭은 고온에서 소자의 동작을 가능하게 하는 반면, 큰 전기장 세기는 고전압 동작을 가능하게 한다.

[0003] Baliga 성능 지수(Baliga's figure of merit, BFOM)는 전력 장치 응용 분야에서 반도체 재료의 사용을 크게 결정한다. Ga_2O_3의 성능 지수는 GaN 및 SiC를 능가하며, 따라서 고전력 전자 장치에 적용될 경우에도 이들보다 뛰어난 성능을 보일 것으로 예측된다. EFG(Edge-defined Film-fed Growth), 플로팅 존(Floating zone) 및 초크랄스키(Czochralski) 공정과 같은 저비용 용융 방법을 사용하여 벌크 단결정에서 고품질 기본 기판을 제조할 수 있는 점은 Ga_2O_3의 중요한 특징이다. 이를 통해 간단한 대량 생산이 가능하여, Ga_2O_3 소재 상용화로 이어질 수 있다. Ga_2O_3의 이러한 장점은 더 나은 장치 성능과 비용 효율성으로 고전력 장치에 적용하는데 가장 적합하다.

[0004] 전력 분야에 적용되는 단극 장치의 성능이 크게 향상되었지만, 이상적인 Ni 또는 Pt 금속 쇼트키 접촉을 사용할 때 상대적으로 작은 쇼트키 장벽 높이(SBH)로 인한 열악한 역 바이어스 성능은 고온 분야에 적용할 수 있는 β-Ga_2O_3 소재의 잠재력을 최대로 사용할 수 없게 한다. 또한 복잡한 현장 장치 제조 공정은 엔지니어링 기술을 사용함으로써 방해 받는다. 바이폴라 장치에 대한 연구는 β-Ga_2O_3 장치의 역 바이어스 성능을 추가로 개선하기 위해 도전하고 있다.

[0005] 그러나 적절한 p형 도펀트와 폴라로닉 정공 수송의 부족으로 인해서 고품질 p-n 동종 접합 기반 β-Ga_2O_3 장치를 구현하는 것은 매우 어렵다. p-n 접합을 갖는 β-Ga_2O_3 장치를 제조할 수 있는 유망 기술은 β-Ga_2O_3와 p형 금속 산화물 반도체 사이의 이종 접합을 사용하는 것으로, 비산화물 재료와의 이종접합에서 발생할 수 있는 계면 산화 과정을 방지하고 보다 편리한 소자 제작 절차를 가능하게 한다. 그러나 β-Ga_2O_3와 Cu_2O, NiOx, SnO와 같은 p형 금속 산화물 반도체를 포함하는 모든 산화물 이종접합 장치의 제조에 대한 연구는 극히 드물다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드를 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0007] 본 발명의 일 측면에 따르면, 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 제조 방법이 제공된다. 상기 방법은 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 주면에 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층을 성장시키는 단계, 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 이면에 하부 전극층을 증착하는 단계, 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 가스 분위기에서 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층상에 제2 도전형 구리알루미늄산화물층을 증착하는 단계 및 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층상에 상부 전극층을 증착하는 단계를 포함할 수 있다.

[0008] 일 실시예로, 상기 혼합 가스에서 산소 유량은 6.7% 내지 30%일 수 있다.

[0009] 일 실시예로, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층의 두께는 상기 산소 유량이 증가할수록 감소할 수 있다.

[0010] 일 실시예로, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층은 상기 상부 전극층보다 얇게 증착되어 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층과 상기 상부 전극층간 계면 상태 밀도의 에너지 분포 프로파일을 감소시킬 수 있다.

[0011] 일 실시예로, 상기 방법은 상기 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 가스 분위기에서 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층상에 제2 도전형 구리알루미늄산화물층을 증착하는 단계 이전에, 구리알루미늄산화물 타겟 표면을 청소하는 사전 스퍼터링을 수행하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0012] 본 발명의 다른 측면에 따르면, 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드가 제공된다. 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드는, 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼, 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 주면에 에피택셜 성장된 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층, 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 가스 분위기에서 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층상에 증착된 제2 도전형 구리알루미늄산화물층, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층상에 증착된 상부 전극층 및 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 웨이퍼의 이면에 오믹 접촉하는 하부 전극층을 포함할 수 있다.

[0013] 일 실시예로, 상기 혼합 가스에서 산소 유량은 6.7% 내지 30%일 수 있다.

[0014] 일 실시예로, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층의 두께는 상기 산소 유량이 증가할수록 감소할 수 있다.

[0015] 일 실시예로, 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층과 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층간 계면은 저전압 영역에서 옴 특성을 나타내며, 고전압 영역에서 공간 전하 제한 전류의 생성에 기여할 수 있다.

[0016] 일 실시예로, 상기 제2 도전형 구리알루미늄산화물층은 상기 상부 전극층보다 얇게 증착되어 상기 제1 도전형 β-산화갈륨 에피층과 상기 상부 전극층간 계면 상태 밀도의 에너지 분포 프로파일을 감소시킬 수 있다.

발명의 효과

[0017] 본 발명의 실시예에 따르면, 구리알루미늄산화물로 구성된 중간층으로 인해 이종접합 다이오드의 전기적 특성이 향상되었다.

도면의 간단한 설명

[0018] 이하에서, 본 발명은 첨부된 도면에 도시된 실시예를 참조하여 설명된다. 이해를 돕기 위해, 첨부된 전체 도면에 걸쳐, 동일한 구성 요소에는 동일한 도면 부호가 할당되었다. 첨부된 도면에 도시된 구성은 본 발명을 설명하기 위해 예시적으로 구현된 실시예에 불과하며, 본 발명의 범위를 이에 한정하기 위한 것은 아니다. 특히, 첨부된 도면들은, 발명의 이해를 돕기 위해서, 일부 구성 요소를 다소 과장하여 표현하고 있다. 도면은 발명을 이해하기 위한 수단이므로, 도면에 표현된 구성 요소의 폭이나 두께 등은 실제 구현시 달라질 수 있음을 이해하여야 한다. 한편, 발명의 상세한 설명 전체에 걸쳐서 동일한 구성 요소는 동일한 도면 부호를 참조하여 설명된다.

도 1은 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 및 백금-산화갈륨 쇼트키 접합 다이오드를 예시적으로 도시한 도면이다.

도 2는 p-$CuAlO_2$ 박막의 2차원 및 3차원 AFM 이미지를 나타낸다.

도 3은 p-$CuAlO_2$ 박막의 XRD 패턴을 나타낸 그래프이다.

도 4는 p-$CuAlO_2$ 박막의 광투과율 스펙트럼을 나타낸 그래프이다.

도 5는 p-$CuAlO_2$ 박막의 XPS 분석 결과를 나타낸 그래프이다.

도 6은 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 이종접합의 미세 구조를 측정하기 위한 TEM 이미지를 나타낸다.

도 7은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 전기적 특성을 나타낸 그래프이다.

도 8은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 접합 저항을 나타낸 그래프이다.

도 9는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 Z(V)-V_d 그래프이다.

도 10은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 dV/d(lnI)-I 및 H(I)-I 그래프이다.

도 11은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 a(V)-V 프로파일을 나타낸 그래프이다.

도 12는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 F(V)-V 그래프이다.

도 13은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 Chot 함수 그래프이다.

도 14는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 표면 전위 그래프이다.

도 15는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 에너지 전도대를 나타낸다.

도 16은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 C-V 그래프이다.

도 17은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 N_{ss} 함수 그래프이다.

도 18은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 순방향 log(I)-log(V) 특성을 나타낸 그래프이다.

도 19는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 $\ln(I/V^2)$- 1/V 특성을 나타낸 그래프이다.

도 20은 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$ 박막의 2차원 및 3차원 AFM 이미지를 나타낸다.

도 21은 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$ 박막의 광투과율 스펙트럼을 나타낸다.

도 22는 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 계면의 XPS 분석 결과를 나타낸 그래프이다.

도 23은 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$ 및 β-Ga_2O_3의 밴드 다이어그램이다.

도 24는 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ 이종접합의 미세 구조를 측정하기 위한 TEM 이미지를 나타낸다.

도 25는 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 다이오드의 전기적 특성을 나타낸 그래프이다.

도 26은 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 다이오드의 접합 저항-V 그래프이다.

도 27은 상이한 산소 유량으로 증착된 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드의 C-V 그래프이다.

도 28은 상이한 산소 유량으로 증착된 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드의 N_{ss} 함수 그래프이다.

도 29는 상이한 산소 유량으로 증착된 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드의 $\ln(I/V^2)$- 1/V 특성을 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0019] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 이를 상세한 설명을 통해 상세히 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로

이해되어야 한다.

[0020] 제1, 제2 등의 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다.

[0021] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 출원에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0022] 층, 영역 또는 기판과 같은 요소가 다른 요소 "위(on)"에 존재하는 것으로 또는 "위로(onto)" 확장되는 것으로 기술되는 경우, 그 요소는 다른 요소의 직접 위에 있거나 직접 위로 확장될 수 있고, 또는 중간의 개입 요소가 존재할 수도 있다. 반면에, 하나의 요소가 다른 요소 "바로 위(directly on)"에 있거나 "바로 위로(directly onto)" 확장된다고 언급되는 경우, 다른 중간 요소들은 존재하지 않는다. 또한, 하나의 요소가 다른 요소에 "연결(connected)"되거나 "결합(coupled)"된다고 기술되는 경우, 그 요소는 다른 요소에 직접 연결되거나 직접 결합될 수 있고, 또는 중간의 개입 요소가 존재할 수도 있다. 반면에, 하나의 요소가 다른 요소에 "직접 연결(directly connected)"되거나 "직접 결합(directly coupled)"된다고 기술되는 경우에는 다른 중간 요소가 존재하지 않는다.

[0023] "아래의(below)" 또는 "위의(above)" 또는 "상부의(upper)" 또는 "하부의(lower)" 또는 "수평의(horizontal)" 또는 "측면의(lateral)" 또는 "수직의(vertical)"와 같은 상대적인 용어들은 여기에서 도면에 도시된 바와 같이 하나의 요소, 층 또는 영역의 다른 요소, 층 또는 영역에 대한 관계를 기술하는데 사용될 수 있다. 이들 용어들은 도면에 묘사된 방향(orientation)에 부가하여 장치의 다른 방향을 포괄하기 위한 의도를 갖는 것으로 이해되어야 한다.

[0024] 투명 전도성 산화물(TCO)은 투명 전자 장치에 널리 사용되며 다양한 응용 분야에 필수적이다. TCO는 가시광선 범위에서 낮은 전기 저항과 뛰어난 투명도로 인해 다양한 실제 응용 분야에서 적용 가능하다. 다양한 p형 TCO 중 p-$CuAlO_2$의 직접적인 밴드갭이 넓고 투명도가 우수한 장점은 반도체 장치 용도로 주목을 받고 있다. p-$CuAlO_2$는 주변 온도에서 약 3.5 eV 이상의 직접 밴드갭 E_g를 갖는다. p-$CuAlO_2$는 다음과 같은 이유로 β-Ga_2O_3와의 p-n 접합을 구성하는 데 적합하다. i) β-Ga_2O_3는 고유한 전자 구조로 인해 정공 이동도가 낮지만 p-$CuAlO_2$의 빠른 정공 확산 계수는 정공 수송을 보장할 수 있다. ii) p-$CuAlO_2$의 밴드 정렬은 n형 β-Ga_2O_3의 밴드 정렬과 엇갈리기 때문에 전자와 정공은 계면을 통해 반대 방향으로 이동하는 경향이 있어 전하 캐리어의 공간적 분리가 발생한다. iii) 고결정성 p-$CuAlO_2$는 상용화된 그리고 비용 효율적인 기술을 통해 얻을 수 있다. 결과적으로 널리 사용되는 p형 재료와 비교할 때 p-$CuAlO_2$는 β-Ga_2O_3와 이종 접합을 형성하는 데 탁월한 선택일 수 있다.

[0025] 이하, 본 발명의 실시예에 대해 관련 도면들을 참조하여 상세히 설명하기로 한다.

[0026] 도 1은 구리알루미늄산화물-산화갈륨 이종접합 다이오드 및 백금-산화갈륨 쇼트키 접합 다이오드를 예시적으로 도시한 도면이다.

[0027] 도 1(a) 및 (b)를 함께 참조하면, 구리알루미늄산화물-산화갈륨($CuAlO_2$-Ga_2O_3) 이종접합(Heterojunction, HJ) 다이오드(10) 및 백금-산화갈륨(Pt-Ga_2O_3) 쇼트키 접합(Schottky junction, SJ) 다이오드(12)는 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100) 및 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110)을 공통적으로 포함한다. $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)는 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110) 상에 형성된 p-$CuAlO_2$ 층(120) 및 p-$CuAlO_2$ 층(120) 상에 형성된 Pt 층(130)을 포함하며, Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)는 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110) 상에 형성된 Pt 층(130)을 포함한다. 이하에서 제1 도전형은 n형을, 제2 도전형은 p형을 지칭한다.

[0028] 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)는 제1 도전형 도펀트로 도핑된 단결정 β-산화갈륨(β-Ga_2O_3)으로 형성된다. 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)의 두께는 약 650 μm이다. 제1 도전형 도펀트는, 예를 들어, 주석(Sn), 규소(Si)일 수 있으며, 제1 도전형 도펀트의 농도(N_d-N_a)는 약 1.0×10^{18} cm^{-3}일 수 있다. 매끄러운 표면을 형성하기

위해서, 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)의 주면과 이면은 화학기계적 연마되었다. 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110) 형성 이전에 약 15분 동안 아세톤과 이소프로판올로 초음파 세척한 후 N_2 가스로 건조하는 세척 공정이 수행되었다. 세척 공정은 이후 매 단계마다 수행될 수 있다.

[0029] 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110)은 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)의 주면에 에피택셜 성장된 제1 도전형 도펀트로 도핑된 β-산화갈륨이다. 제1 도전형 도펀트는, 예를 들어, 규소(Si)일 수 있으며, 제1 도전형 도펀트의 농도(N_d-N_a)는 약 3.0×10^{16} cm^{-3}일 수 있다. 한편, 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110)의 두께는 약 10.0 μm일 수 있다. 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110)은, 예를 들어, HVPE(Halide vapor phase epitaxy), MOCVD(Metalorganic chemical vapor deposition), Mist CVD, MBE(Molecular Beam Epitaxy), PLD(Pulsed laser deposition) 등에 의해 증착될 수 있다.

[0030] 하부 전극층(140)은 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)의 이면에 형성된 오믹 컨택층이다. 하부 전극층(140)은, 예를 들어, 티타늄(Ti)과 금(Au)을 순서대로 전자 빔 증발(Electron-beam evaporation)에 의해 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)의 이면에 증착시켜 형성될 수 있다. 여기서, Ti층의 두께는 약 20nm이며, Au층의 두께는 약 80nm일 수 있다. 하부 전극층(140)은 이후 Ar 분위기에서 약 1 분동안 약 470℃에서 급속 열 처리(Rapid thermal treatment)되었다.

[0031] $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)는 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110) 상에 p-$CuAlO_2$ 층(120) 및 Pt 층(130)을 순서대로 증착하여 제조한다. p-$CuAlO_2$ 층(120)은 제2 도전형을 가져서 제1 도전형의 산화갈륨 에피층(110)과 p-n 접합을 형성하며, Pt 층(130)은 상부 전극이 된다. 상온에서 p-$CuAlO_2$ 층(120)에 대한 van der Pauw 구성의 홀 효과 측정에 의하면, P-$CuAlO_2$ 층(120)의 홀 농도 N_h, 이동도 및 저항률은 각각 2.34×10^{15} cm^{-3}, 10.4 cm^2/Vs, 4.12×10^{2} Ω · cm이다.

[0032] p-$CuAlO_2$ 층(120)은 RF(radio frequency) 마그네트론 스퍼터링에 의해 약 100 nm 두께로 증착된다. 일 실시예로, 약 600 μm 직경을 갖도록 패터닝된 새도우 마스크를 통해 고순도의 P-$CuAlO_2$ 타겟을 이용하여 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110) 상에 P-$CuAlO_2$ 층(120)을 증착한다. 스퍼터링 압력은 약 5 mTorr이며, RF 전력 밀도는 약 12.34 W/cm^2로 유지되었다. 사전 스퍼터링(Pre-sputtering) 방법을 이용하여, 증착 전 약 10분 동안 타겟 표면을 청소하여 오염 물질을 제거하였다. 스퍼터링은 Ar 및 O_2 혼합 가스 분위기에서 진행되었으며, Ar의 유량은 약 70 sccm이며 O_2의 유량은 약 5 sccm이다. O_2의 유량을 약 5 sccm(또는 6.7%)으로 고정하여 증착된 p-$CuAlO_2$ 층(120)의 전기적 특성은 이하에서 도 2 내지 도 19를 참조하여 설명한다.

[0033] 한편, p-$CuAlO_2$ 층(120)은 Ar의 유량을 약 70 sccm로 고정하며, O_2의 유량을 0sccm 내지 30sccm으로 변경하면서 증착될 수 있다. 많은 논문에서는 유량을 sccm 단위로 표기하지만, 산소 농도를 백분율(%)로 표기할 수도 있다. 다음 식을 사용하여 두 측정 단위를 변환할 수 있다. O_2의 유량을 변경하면서 증착된 p-$CuAlO_2$ 층(120)의 전기적 특성은 이하에서 도 20 내지 도 29를 참조하여 설명한다.

수학식 1

[0034] $$O_2\,(\%) = \frac{O_2\ flux}{Ar\ flux + O_2\ flux} \times 100$$

[0035] 증착 공정의 스퍼터링 조건은 표 1에 제시되어 있다.

표 1

[0036]

증착 파라미터	샘플 1 (O_2:0%)	샘플 2 (O_2:17.6%)	샘플 3 (O_2:30%)
증착방법	RFMS	RFMS	RFMS
타겟-기판 거리(mm)	70	70	70

스퍼터링 전력(W/cm^2)	12.34	12.34	12.34
작동 압력(mTorr)	5	5	5
전체 압력(Torr)	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-7}
Ar 유량(sccm)	70	70	70
O_2 유량(sccm)	0	15	30
증착 시간(minutes)	30	30	30
박막 두께(nm)	310	170	130
증착율(nm/minute)	10.33	5.66	4.33

[0037] Pt 층(130)은 양면(two-faced) 스퍼터링에 의해 약 300 nm 두께로 증착된다. $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)의 경우, 약 600 μm 직경을 갖도록 패터닝된 새도우 마스크를 통해 고순도의 Pt 타겟을 이용하여 P-$CuAlO_2$ 층(120) 상에 Pt 층(130)을 증착한다. Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 경우, 약 600 μm 직경을 갖도록 패터닝된 새도우 마스크를 통해 고순도의 Pt 타겟을 이용하여 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110) 상에 Pt 층(130)을 증착한다. 스퍼터링 압력은 약 3 mTorr이며, 스퍼터링 전력 밀도는 약 3.95 W/cm^2로 유지되었다. 스퍼터링은 Ar 분위기에서 진행되었으며, Ar의 유량은 약 10 sccm이다.

[0038] 이하에서는 복수의 분석 방법에 의해 측정된 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 및 Pt-Ga_2O_3 SJ의 장벽 높이 BH, 이상 계수 n, 직렬 저항 Rs, 션트 저항 Rsh에 대해 설명한다.

[0039] 도 2는 p-$CuAlO_2$ 박막의 2차원 및 3차원 AFM 이미지를 나타낸다.

[0040] 유리 기판에 증착된 p-$CuAlO_2$ 층(120) 또는 박막의 표면 형태는 원자힘 현미경(Atomic force microscopy; AFM) 측정에 의해 특징지어질 수 있다. 도 2의 (a)는 p-$CuAlO_2$ 박막의 2차원 AFM 이미지이며, (b)는 p-$CuAlO_2$ 박막의 2차원 AFM 이미지이다. p-$CuAlO_2$ 박막의 표면 형태는 약 1.7 nm의 RMS로 상당히 매끄럽다. p-$CuAlO_2$ 박막의 3차원 AFM 이미지는 작은 입자들의 유착으로 인해 입자들이 수직으로 배향되어 있고 다양한 크기를 가지고 있음을 보여준다.

[0041] 도 3은 p-$CuAlO_2$ 박막의 XRD 패턴을 나타낸 그래프이다.

[0042] 도 3을 참조하면, 유리 기판에 RF 마그네트론 스퍼터링에 의해 증착된 p-$CuAlO_2$ 박막의 X선 회절(XRD) 패턴을 볼 수 있다. p-$CuAlO_2$ 박막의 회절 피크는 각각 (003), (006), (0012) 반사에 해당하는 15.73° , 31.75° 및 66.30° 에 위치한다. 검출된 모든 피크는 능면체 결정 구조를 가진 p-$CuAlO_2$(X'Pert High Score Card no: PDF 35-1401)의 반사로 식별될 수 있다.

[0043] 도 4는 p-$CuAlO_2$ 박막의 광투과율 스펙트럼을 나타낸 그래프이다.

[0044] 도 4를 참조하면, (a)는 p-$CuAlO_2$ 박막의 광투과율 스펙트럼을 나타내며, (b)는 $(\alpha hn)^2$와 양자 에너지 hv 관계를 나타낸다. 광학 밴드갭 E_g는 광흡수계수 α와 입사광자 에너지 hv로부터 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

수학식 2

[0045] $$(\alpha h\nu)^{1/n} = A(h\nu - E_g)$$

[0046] 여기서, A는 흡수 엣지 폭 파라미터이고, 직접 허용된 전환의 경우 n = 1/2이고, 간접 허용된 전환의 경우 n = 2이다. $(\alpha hn)^2$-hv 그래프에서, 선형 부분을 α=0으로 확장하면, 밴드 갭을 추정할 수 있다. 추정 결과, p-$CuAlO_2$ 박막의 밴드 갭 E_g는 공지의 값과 실질적으로 일치하는 약 4.33 eV로 결정되었다.

[0047] 도 5는 p-$CuAlO_2$ 박막의 XPS 분석 결과를 나타낸 그래프이다.

[0048] 도 5를 참조하면, X선 광전자 방출 분광법(X-ray photoemission spectroscopy, XPS) 분석을 사용하여 제1 도전형 β-산화갈륨층(110)에 RF 스퍼터링된 p-$CuAlO_2$ 층(120)의 표면 원소 조성과 화학적 상태를 확인할 수 있다. 도 5(a)는 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 계면의 넓은 범위의 고해상도 XPS 스펙트럼을 나타낸다. Cu LMM 및 O KLL은 각각 Cu 및 O 원소의 Auger 피크에 대응한다. 도 5(b)는 약 286.3 eV에서의 C1s 피크를 취하여 보정된 XPS 스펙트럼을 나타내며, 이는 표면 탄소 오염에서 비롯된 것이다. 도 5(c)는 Cu 2p 스펙트럼을 나타내며, Cu $2p_{3/2}$ 및 Cu $2p_{1/2}$ 피크는 각각 약 935.43 및 약 955.23 eV에 위치한다. 특히, 위성(Satellite) 피크가 Cu 2p 스펙트럼에서 존재하지 않는 점은 Cu^{+2} 관련 불순물이 소결된 $CuAlO_2$ 분말에서 발견되지 않았다는 점을 의미한다. 일반적으로 약 942 내지 약 946 eV 범위에서 관찰된 두 개의 위성 피크는 Cu^{+2} 이온과 연관될 수 있으며, 도 5(c)에서도 동일한 결과를 관찰할 수 있다. 따라서 RF 스퍼터링된 p-$CuAlO_2$ 박막에 Cu^{+2} 이온이 존재함을 확인할 수 있다. 도 5(d)는 약 74.93 eV에서 Al 2p 및 Cu^{+}의 피크인 약 77.33 eV에서 Cu $3p_{3/2}$, 약 79.68 eV에서 Cu $3p_{1/2}$의 결합 에너지를 갖는 Al 2p 및 Cu 3p 코어 스펙트럼을 나타낸다. 이 결과는 Al 원소가 Al^{+3}으로 거의 독점적으로 존재함을 나타내며 이는 J. Cai et al, The influence of Cu/Al ratio on properties of chemical-vapor-deposition-grown p-type Cu-Al-O transparent semiconducting films, J. Appl. Phys. 98 (2005) 033707(1-5), R. Liu et al, Shallow acceptor state in Mg-doped CuAlO2 and its effect on electrical and optical properties: An experimental and first-principles study, ACS Appl. Mater. Interfaces 9(14) (2017) 12608-12616 등 여러 논문을 통해 알려진 내용과 유사하다. 도 5(e)는 O 1s 스펙트럼이 Cu-O, Ga-O 및 Al-O 결합에 해당하는 약 531.0, 약 531.7 및 약 532.4 eV에서 3개의 피크로 디컨볼루션될 수 있음을 나타낸다. 이 결과는 S. Du et al, Facile fabrication and enhanced photoresponse of CuO/β-Ga_2O_3 nanostructure photodetector, Semicond. Sci. Technol. 37 (2022) 065028 (8pp), L. Ma et al, Room-temperature power factor of $CuAlO_2$ composite tablets enhanced by MWCNTs, Curr. Appl. Phys. 33 (2022) 27-32 등 여러 논문을 통해 알려진 내용과 실질적으로 일치한다. 도 5(f)는 Ga 2p 스펙트럼을 나타낸다. 도 5(f)에서, Ga $2p_{3/2}$ 와 Ga $2p_{1/2}$의 대칭적인 두 피크가 각각 약 1119.59 eV와 약 1146.39 eV에 위치하는 것을 관찰할 수 있다. 두 피크의 분리 거리는 약 26.8 eV이며, 이는 Ga 2p(D=27 eV)의 결합 에너지와 실질적으로 일치한다. 또한 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 계면에서의 원소 분포에, XPS 깊이 프로파일이 적용되었다. 도 5(g)는 β-Ga_2O_3에 증착된 p-$CuAlO_2$ 박막의 XPS 깊이 프로파일을 나타낸다. 깊이 프로파일은 Cu, Al, O, Si 및 Ga 층이 잘 정의되어 있음을 나타내는 선명한 계면을 나타낸다.

[0049] 도 6은 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 이종접합의 미세 구조를 측정하기 위한 TEM 이미지를 나타낸다.

[0050] 도 6(a)는 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ로부터 얻은 단면 명시야(cross-sectional bright field) 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM) 이미지를 나타낸다. 도 6(a)에서, p-$CuAlO_2$와 β-Ga_2O_3 계면의 우수한 특성을 관찰할 수 있으며, β-Ga_2O_3 상에서 p-$CuAlO_2$의 결정질이 관찰된다. 도 6(b)는 대응하는 고해상도 주사 투과 전자 현미경(scanning transmission electron microscope, STEM) 이미지를 나타낸다. 명시야 TEM 및 STEM 이미지는 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 계면이 계면층(interfacial layer)의 형성 없이 매우 균일함을 분명하게 보여준다. 도 6(c)는 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 조성 분포 프로파일을 나타내며, 상단의 고각 환형 암시야(high-angle annular dark-field, HAADF) 이미지에서 EDX 선은 녹색 선으로 표시되어 있다. p-$CuAlO_2$와 β-Ga_2O_3의 중간 영역(intermediate region)에는 Cu, Al, O, Si, Ga 원소가 공존한다. 중간층(interlayer)은 도 6(a)와 6(b)에서 명확하게 보여진다. 도 6(d)는 Cu, Al, O 및 Ga 원소의 STEM-EDX 매핑을 나타낸다. β-Ga_2O_3 영역의 갈륨 원소는 p-$CuAlO_2$ 영역과 명확한 경계를 가지며, STEM-EDX 매핑 결과 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)의 원소 사이에 유의미한 상호확산이 나타나지 않았다. EDX 맵은 STEM 이미지에서 볼 수 있는 맵과 일치한다. 도 6(e)는 β-Ga_2O_3 반도체, 즉, 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110) 상에 적층된 p-$CuAlO_2$ 박막의 전형적인 EDX 스펙트럼을 나타낸다. EDX 스펙트럼은 Cu, Al, O, Si 및 Ga 원소의 존재를 명확하게 나타낸다. 또한, EDX 결과는 β-Ga_2O_3

반도체 상의 RF 스퍼터링된 p-$CuAlO_2$ 박막에 다른 이물질이 존재하지 않음을 확인시켜준다.

[0051] 도 7은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 전기적 특성을 나타낸 그래프이다.

[0052] 도 7(a)를 참조하면, $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 실험적 반대수(semi-logarithmic) 순방향 및 역방향 바이어스 전류-전압(I-V) 특성은 실온에서 약 -5V 내지 약 +5V의 전압 범위에서 측정되었다. 구체적으로 약 -1V에서 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)의 누설 전류는 약 2×10^{-12}A이며, Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 누설 전류는 5.8×10^{-10}A로 측정되며, HJ가 SJ보다 낮은 누설전류를 보이는 것을 알 수 있다. 약 -5V 내지 약 +5V의 전압 범위에서, HJ의 전류 정류비는 약 9.8×10^{8}이며, SJ의 전류 정류비는 약 7.6×10^{4}로서, HJ가 SJ보다 더 높은 전류 정류비를 달성하는 것을 알 수 있다. 즉, 금속과 반도체 사이의 중간층으로 p-$CuAlO_2$를 삽입함으로써, HJ의 전기적 특성이 향상되었음을 알 수 있다. 열이온 방출(thermionic emission) 이론에 따르면, 직렬 저항 R_S와 순방향 바이어스(V>3kT/q)에서 계면층을 갖는 SJ 다이오드를 통과하는 전류는 다음 수학식을 이용하여 산출할 수 있다.

수학식 3

$$I = I_0 \exp\left[\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right]\left\{1-\exp\left[\frac{q(V-IR_S)}{kT}\right]\right\}$$

[0053]

[0054] 여기서, V는 접합에 적용된 전압, IR_S는 다이오드의 직렬 저항 R_S에 걸린 전압 강하, q는 전자 전하, k는 볼츠만 상수, T는 켈빈 단위의 절대 온도, n은 이상 계수, I_0는 역포화 전류이다. 역포화 전류 I_0는 V = 0에서 ln I 대 V 그래프의 절편에서 획득할 수 있다.

수학식 4

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right)$$

[0055]

[0056] 여기서 F_b는 제로 바이어스 장벽 높이 BH, A는 다이오드 면적, A*는 유효 Richardson 상수로 41.1$Acm^{-2}K^{-2}$이다. 장벽 높이 BH 는 쇼트키 접합에서 전기 전도를 제어하는 중요한 파라미터수이다. 역포화 전류 I_0가 결정되면 다음 식을 사용하여 장벽 높이 F_b를 산출할 수 있다.

수학식 5

$$\Phi_b = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right)$$

[0057]

[0058] 이상 계수 n은 순수 열이온 방출에 대한 다이오드의 적합성을 측정한 것으로, 다음 수학식을 사용하여 순방향 바이어스 ln I-V의 선형 영역 기울기에서 결정된다.

수학식 6

$$n = \frac{q}{kT}\left(\frac{dV}{d(\ln I)}\right)$$

[0059]

[0060] 순방향 바이어스된 I-V 영역의 선형 피팅은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 턴온 전압 V_{on}이 각각 약 1.1V 및 약 2.3V가 되도록 한다. 대신 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)은 약 2.3V의 V_{on}을 가지며, 이는 캐리어에 대한 더 높은 장벽 높이를 의미한다. $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 온 저항 R_{on}은 각각 10.6 Ω · cm^2 (10,600 mΩ · cm^2) 및 1.66 Ω · cm^2 (1,660 mΩ · cm^2)를 나타낸다. 이 결과는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 계면에 재결합 중심이 존재하기 때문에 HJ의 R_{on}이 SJ보다 낮다는 것을 나타낸다. 상당한 양의 전자와 정공이 소자 순방향 바이어스 동안 계면에서 재결합하여 높은 순방향 전류와 낮은 R_{on}을 생성할 가능성이 높다. 또한, SJ는 자체 발열 효과로 인해 2V 이상의 전압에 도달한 후 떨어지는 것처럼 보이지만, HJ는 높은 순방향 전류를 나타낸다. 더 많은 전자가 드리프트 영역에 집중되도록 하고 양극성 전류 전도 능력을 향상시키는 높은 수준의 전도도 변조를 일으키는 소수 캐리어(정공) 주입은 HJ의 전도 성능을 개선한다. 장벽 높이 BH 및 이상 계수 n은 SJ의 경우 각각 약 0.93 eV 및 약 1.51로, HJ의 경우 약 1.02 eV 및 약 1.65로 측정되었다. HJ는 캐리어에 대한 더 높은 장벽 높이 때문에 SJ보다 더 낮은 누설 전류를 보였다. 1보다 큰 SJ 및 HJ의 이상 계수 값은 계면을 통한 전자의 확산, 계면 재결합, 계면 상태에 의한 전류 터널링, 극성 불연속, 양이온 상호 확산 및 공간 전하로 인한 제한된 전도로 인한 것일 수 있으며, 캐리어 운송에 기여할 수 있다.

[0061] 도 7(b)를 참조하면, $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 역항복 특성이 도시되어 있다. SJ 및 HJ에 대한 항복 전압 BV는 각각 약 578V 및 약 922V으로 측정되었다.

[0062] 도 7(c)는 수직형 β-Ga_2O_3 HJ에 대한 R_{on} 대 항복 전압(Vbr)의 벤치마크 그래프이다. 상단의 적색 별은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)를 나타낸다.

[0063] 도 8은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 접합 저항을 나타낸 그래프이다.

[0064] 다이오드의 직렬 저항 R_S과 션트 저항 R_{Sh}는 모두 필수 파라미터이며 다이오드의 성능과 신뢰성에 큰 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다. 낮은 R_S는 높은 전류 흐름을 허용하는 반면 큰 션트 저항 R_{Sh}는 장치의 누설 전류를 줄이며, 이들은 모두 이상적인 장치에 필요하다. SJ 및 HJ의 직렬 저항 R_S 및 션트 저항 R_{Sh} 값은 옴의 법칙을 다음 수학식으로 사용하여 역방향 및 순방향 바이어스 I-V 특성 모두에서 결정된 접합 저항 R_j 대 인가된 바이어스 전압 V 그래프에서 획득할 수 있다.

수학식 7

$$R_j = \frac{\partial V}{\partial I}$$

[0065]

[0066] 여기서, V는 인가된 바이어스 전압이고, I는 다이오드의 전류 값이다. 따라서 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 접합 저항 대 전압 프로파일은 수학식 7의 옴의 법칙을 사용하여 I-V 데이터에서 얻어지며, 도 8과 같이 표시된다. 도 8(a)와 8(b)를 참조하면, 저항 값은 전압이 증가함에 따라 감소하고 직렬 저항 R_S 값은 충분히 높은 순방향 바이어스 영역에서 바이어스 전압에 거의 무관하다. 반면에 션트 저항 R_{Sh}는 충분히 높은 역 바이어스 영역에 대해 바이어스 전압에 무관하다. 순방향 바이어스 영역에서 R_j 대 V 그래프의 더 낮은 영역은 직렬 저항 R_S를 나타내는 반면 역방향 바이어스 영역에서 가장 높은 피크 저항은 각각 션트 저항

R_{Sh}로 간주된다. 도 8(a)와 8(b)에서, 직렬 저항 R_S와 션트 저항 R_{Sh}의 값은 SJ의 경우 각각 6,502 Ω 및 6.2×10^{9} Ω HJ의 경우 1,684 Ω 및 1.6×10^{12} Ω임을 알 수 있다.

[0067] 도 9는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 Z(V)-V_d 그래프이다.

[0068] Hernandez가 제안한 누설 전류가 낮은 비이상적인 SJ 다이오드의 유효 장벽 높이 BH를 결정하는 방법은 비균질 SJ의 장벽 높이 분포를 고려하여 장벽 높이 BH 및 이상 계수 n이 전압에 종속적인 값이라는 가정을 기반한다. 전압 종속 Z(V, T) 함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

수학식 8

[0069]
$$Z\,(V,T)_i = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_i}{AA^*T^2\left[1-\exp\left(-qV_d/kT\right)\right]}\right)$$

수학식 9

[0070]
$$Z(V,T)_i = -\Phi_b\,(V,T)_i + \frac{V_d}{n(V,T)_i}$$

[0071] 여기서 Vd는 다이오드 전압이다. Z(V)-V_d 그래프는 수학식 8을 이용한 선형 영역 I-V 특성에서 획득한다. $Z(V,T)_i$가 i번째 전압 구간에서 다이오드 전압 V_d에 선형적으로 변하는 경우 $F_b(V,T)_i$ 및 $n(V,T)_i$는 상수이며 각각 기울기 및 절편에서 획득할 수 있다. $F_b(V,T)_i$ 및 $n(V,T)_i$의 값은 SJ 및 HJ에 대해 각각 0.92eV, 1.54 및 1.40eV, 1.62로 획득되었다. Z(V)-V_d 그래프와 기존의 순방향 바이어스 I-V 방법에서 구한 장벽 높이 BH와 이상 계수 n이 유사함을 알 수 있다.

[0072] 도 10은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 dV/d(lnI)-I 및 H(I)-I 그래프이다.

[0073] 충분히 높은 전류에서 순방향 바이어스 I-V 특성의 편차는 직렬 저항 R_S, 계면 상태의 밀도 및 계면층의 존재에 의해 영향을 받는다. 장벽 높이 BH, 이상 계수 n 및 직렬 저항 R_S와 같은 다이오드의 전기적 파라미터는 Cheung과 Cheung이 개발한 방법을 사용하여 고전류 범위에서 계산될 수 있다. Cheung과 Cheung에 따르면 F_b, 이상 계수 n 및 직렬 저항 R_S의 값은 다음에 의해 결정할 수 있다.

수학식 10

[0074]
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_S$$

수학식 11

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^{**}T^2}\right)$$

[0075]

[0076] H(I)는 다음과 같다.

수학식 12

$$H(I) = n\Phi_b + IR_S$$

[0077]

[0078] dV/d(lnI)-I 그래프는 선형이며, R_S는 기울기, nkT/q는 y축 절편이다. R_S 및 이상 계수 n 값은 SJ의 경우 각각 15.65 kΩ 및 6.07, HJ의 경우 3.49 kΩ 및 6.46인 것을 알 수 있다. 수학식 11 및 12로부터, 곡선의 선형 곡선 피팅은 수학식 10에서 이상 계수 n 값을 사용하여 기울기로부터 직렬 저항 R_S를 산출하며, 장벽 높이 BH는 H(I)-I 그래프의 절편에서 획득할 수 있다. 도 10(b)에서, H(I)-I 그래프에서 획득한 직렬 저항 R_S 및 장벽 높이 BH는 SJ의 경우 17.15kΩ 및 0.67eV이며, HJ의 경우 3.96kΩ 및 0.80eV이다. H(I)-I 그래프에서 결정된 직렬 저항 RS 값은 dV/d(lnI)-I 그래프에서 얻은 직렬 저항 RS 값과 매우 유사하다. 이것은 Cheung 함수의 신뢰성에 기인할 수 있다.

[0079] 순방향 바이어스 I-V 그래프의 선형 영역과 비선형 영역에서 계산된 이상 계수 값은 서로 상이하다. 이것은 직렬 저항 R_S와 계면 상태에 의해 야기되는 p-$CuAlO_2$ 중간층의 전압 강하의 조합 때문일 수 있다.

[0080] 도 11은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 α(V)-V 프로파일을 나타낸 그래프이다.

[0081] 장벽 높이 F_b, 이상 계수 n 및 직렬 저항 R_S도 Mikhelashvili에 의해 개발된 기법에 기반한 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 순방향 바이어스 I-V 특성에서 유도되었으며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

수학식 13

$$\alpha(V) = d(\ln I)/d(\ln V)$$

[0082]

[0083] Mikhelashvili 기법에 따르면 α(V)-V 프로파일은 인가 전압 V의 특정 값에서 최대값을 가져야 한다. α(V)-V 프로파일의 최대값에서 SJ 및 HJ 파라미터는 다음 수학식을 사용하여 획득할 수 있다.

수학식 14

$$\Phi_b = \frac{kT}{q}\left[\alpha_{max} + 1 - \ln\left(\frac{I_{max}}{AA^{*}T^2}\right)\right]$$

[0084]

수학식 15

[0085] $$n = \frac{qV_{max}(\alpha_{max}-1)}{\alpha_{max}^2 kT}$$

수학식 16

[0086] $$R_S = \frac{V_{max}}{\alpha_{max}^2 I_{max}}$$

[0087] 여기서 a_{max} 및 V_{max}는 a(V)-V 프로파일의 최대점 좌표이고 I_{max}는 전압 V_{max}에서의 전류 값이다. α(V)-V 프로파일에서 이러한 방식으로 추출된 장벽 높이 BH, 이상 계수 n 및 직렬 저항 R_s 값은 SJ의 경우 각각 1.03 eV, 1.87 및 0.95 MΩ이며, HJ의 경우 1.87 eV, 1.76 및 8.13 MΩ이다. SJ 및 HJ에 대해 추출된 이상 계수 n이 다른 방법으로 예측한 큰 원인으로, 계면 상태, 캐리어의 생성-재결합, 높은 주입 전류 및 접합 직렬 저항 등을 들 수 있다.

[0088] 도 12는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 F(V)-V 그래프이다.

[0089] 더욱이, Norde 함수의 대안적인 접근법이 SJ에 대한 장벽 높이 BH 및 직렬 저항 R_S 값을 결정하기 위해 적용되었다. F(V)는 다음과 같이 정의된다.

수학식 17

[0090] $$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right)$$

[0091] 여기서 I(V)는 I-V 실험 데이터에서 얻은 전류이고 g는 ln(I)-V 특성에서 얻은 n 값보다 큰 무차원 임의의 정수이다. F(V)-V 그래프의 최소값이 결정되면 장벽 높이 BH 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

수학식 18

[0092] $$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q}$$

[0093] 여기서 $F(V_0)$ 최소값은 F(V)의 지점이고 V_0는 해당 전압이다. Norde의 함수에서 직렬 저항 R_S 값의 값은 다음과 같이 결정할 수 있다.

수학식 19

[0094] $$R_S = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_0}$$

[0095] 여기서 I_0는 $F(V_0)$의 최소 지점에서 해당하는 전류이다. 장벽 높이 BH 및 직렬 저항 R_S 값은 Norde 그래프에서

추출되었으며 SJ의 경우 각각 1.05 eV 및 0.41 MΩ, HJ의 경우 1.78 eV 및 4.41 MΩ이다. 분석 결과, 순방향 바이어스 ln(I)-V, Cheung 함수 및 Norde 함수에서 유도된 장벽 높이 BH 값에 약간의 차이가 있는데, 이는 순방향 바이어스 ln(I)-V 특징의 다양한 영역에서 추출한 결과로 인한 것일 수 있다. 그러나 Norde 함수에서 얻은 직렬 저항 R_S 값은 Cheung 함수에서 얻은 직렬 저항 R_S 값보다 높다. Cheung의 함수는 순방향 바이어스 ln(I)-V 특성의 고전압 구간에서 비선형 영역에만 적용되는 반면, Norde 함수는 접합의 ln(I)-V 특성의 전체 순방향 바이어스 영역에 적용된다. 결과적으로 여기에 사용된 접근 방식은 신뢰할 수 있고 효율적이다.

[0096] 도 13은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 Chot 함수 그래프이다.

[0097] 적당히 높은 전류에서 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 I-V 특성은 선형에서 비선형성으로 벗어나기 시작하여 직렬 저항 R_S가 다이오드 저항에 미치는 주요 영향을 나타낸다. 일반적으로 SJ와 HJ의 실험적인 I-V 특성은 전압이 순방향으로 인가되는 낮은 바이어스 전압의 약 0.05V 내지 약 1.95V 영역에서 전류의 지수 의존성과 비대칭한다. 이를 위해 확산이나 터널링의 증거가 없다고 가정하면, 캐리어 수송이 열이온 방출에 의해 수행된다고 가정할 수 있다. 모델을 결정하기 위해 수정된 Norde 그래프, 즉 Chot 그래프를 사용할 수 있다. Chot 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학식 20

[0098]
$$F_{CH} = \left(\frac{q}{2nkT}\right)V - \ln\left(\frac{I}{T^2B}\right)$$

[0099] 여기서 B는 단위 상수(1 AK^{-2})이다. 도 13을 참조하면, SJ 및 HJ에 대해 각각 0.5V 및 1.35V까지의 전압 범위에서 인가 전압이 증가함에 따라 Chot 함수의 감소는 접합이 다이오드의 I-V 특성을 주로 제어함을 나타낸다. Chot 함수의 최소값에서의 전압 V_{minFCH}는 다이오드 저항이 지배하는 전류와 직렬 저항 사이의 전환에 대한 바이어스를 나타낸다. 직렬 저항이 우세하면 순방향 바이어스와 함께 증가한다. 따라서 열이온 방출은 이전에 가정된 주요 전도 과정이라고 추정된다.

[0100] 도 14는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 표면 전위 그래프이다.

[0101] 금속/반도체 접합부 양단의 전류는 반도체 표면의 절연 산화물이 다음과 같이 정의됨을 고려하여 설명할 수 있다.

수학식 21

[0102]
$$I = AA^*T^2\exp\left(-\frac{q\Psi_s}{kT}\right)\left[\exp\left(-\frac{qV_n}{nkT}\right)\right]$$

[0103] Chattopadhyay의 모델에 따르면 장벽 높이 BH는 실험적으로 알려진 임계 표면 전위 $\psi_s(I_c,V_c)$의 값에서 얻을 수 있으며 임계 전압 V_c 및 α는 n의 인버스 파라미터이다. ψ_s는 표면 전위이며 다음과 같이 표현된다.

수학식 22

[0104]
$$\psi_s = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{AA^{**}T^2}{I}\right) - V_n$$

[0105] 여기서 V_n은 전도대와 페르미 에너지 준위 간의 전위차이며, V_n= kT/q ln(Nc/Nd)에서, N_c는 전도대의 유효 밀도이며 N_d는 캐리어 농도이다. 따라서 Ψ_s는 V_n 값을 사용하여 추정된다. $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)에 대한 순방향 바이어스 전압에 대해 계산된 Ψ_s 값은 도 14에 도시되어 있다. Ψ_s-V 그래프에서 임계 표면 전위 $\Psi_s(I_c,V_c)$, 임계 전압 V_c를 얻은 다음 장벽 높이 BH를 추정할 수 있다. 도 14는 V가 임계값 V_c에 도달할 때까지 Ψ_s 값이 선형적으로 감소함을 나타낸다. 장벽 높이 BH(F_b)는 다음과 같이 표현된다.

수학식 23

[0106] $$\Phi_b = \Psi_s(I_c,V_c) + \alpha V_c + V_n$$

[0107] 또한, α는 다이오드 이상 계수 n의 인버스 파라미터이며 다음과 같이 정의된다.

수학식 24

[0108] $$-\alpha = \frac{1}{n} = \left(\frac{d\psi_s}{dV}\right)_{I_c,V_c}$$

[0109] 수학식 23 및 24을 이용하면, SJ와 HJ의 장벽 높이 BH와 이상 계수 n 값은 각각 0.94 eV와 1.51, 1.31 eV와 1.63으로 추정된다. Ψ_s-V 그래프에서 얻은 장벽 높이 BH 값은 순방향 바이어스 I-V 특성, Z(V)-V_d 그래프, Cheung의 α(V)-V 플롯 및 Norde 방법에서 얻은 값과 비교하여 다소 차이가 있음을 나타내며, 이는 사용된 방법이 신뢰할만하고 유효함을 나타낸다. 또한 Ψ_s-V 그래프에서 유도된 이상 계수 n 값은 I-V 특성에서 유도된 값과 거의 유사하다.

[0110] 도 15는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 에너지 전도대를 나타낸다.

[0111] $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)의 에너지 밴드 다이어그램은 Anderson 모델에서 유도되었다. 도 15(a)는 분리된 p-$CuAlO_2$ 및 β-Ga_2O_3, 15(b)는 열평형 상태의 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10)에 대한 예상 에너지 밴드 다이어그램을 각각 나타낸다. β-Ga_2O_3의 전자 친화도 c와 밴드갭은 각각 χ_{Ga2O3} = 4 eV 및 E_{gGa2O3} = 4.9 eV이다. p-$CuAlO_2$의 밴드갭 $E_{gCuAlO2}$은 약 3.5eV인 반면 전자 친화도 $\chi_{gCuAlO2}$는 약 2.5eV이다. 따라서 전도대와 가전자대에서 밴드갭 불연속성은 각각 DE_C= χ_{CAO}-χ_{Ga2O3} = -1.5 eV 및 DE_V = E_{gCAO}-E_{gGa2O3}+ΔE_C =2.9 eV와 같다. 이러한 결과는 p-$CuAlO_2$의 전도대 가장자리와 가전자대 가장자리가 각각 β-Ga_2O_3보다 위에 위치함을 의미한다. 그 결과, 도 15(b)와 같이 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 사이의 계면에서 type-II 밴드 정렬이 발생한다.

[0112] 도 16은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 C-V 그래프이다.

[0113] 제작된 수직형 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 정전용량-전압 C-V 특성을 도 16(a)와 같이 암실 상온에서 1MHz에서 측정하였다. SJ와 HJ의 C^{-2}-V 그래프는 도 16(b)에 나와 있으며 선형 거동을 나타낸다. SJ 및 HJ의 C-V 특성을 사용하여 확산 전위, 장벽 높이 및 도핑 농도를 결정한다. 계면층이 있는 쇼트키 다이오드의 공핍층 정전용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 25

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_0+V_R)}{q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_D A^2}$$

[0114]

수학식 26

$$\frac{d(C^{-2})}{dV_R} = \frac{2}{q\varepsilon_s\varepsilon_0 N_D A^2}$$

[0115]

[0116] 여기서 V_R은 역 바이어스 전압, V_0은 확산 전위, N_D는 도핑 농도, e_s는 β-Ga_2O_3의 반도체 유전율이다(e_s=10e_0, 여기서 e_0는 자유 공간의 유전 상수로, 8.85×10^{-14}F/cm). C^{-2}-V 그래프를 x축으로 외삽하여 확산 전위 V_0를 구하며 다음 관계식 V_{bi} = V_0 + kT/q에 의해 내장 전위와 관련된다. 장벽 높이의 값은 다음 관계에 의해 결정될 수 있다.

수학식 27

$$\Phi_b\,(C\text{-}V) = V_{bi} + V_n$$

[0117]

[0118] 내장 전위 및 장벽 높이 BH 값은 SJ의 경우 각각 약 0.95V 및 약 1.06eV, HJ의 경우 약 1.89V 및 약 1.99eV이다. 더욱이, SJ와 HJ의 추정 도너 농도 N_D는 각각 5.36×10^{16} cm^{-3} 및 5.30×10^{16} cm^{-3}이다. 실험 결과에 따르면 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12) 모두 C-V 특성에서 파생된 장벽 높이의 관찰 값이 I-V 데이터에서 추출한 장벽 높이보다 크다. 이러한 변이는 깊은 불순물 수준, 중간 절연층, 엣지 누설 전류 또는 계면의 오염으로 인해 발생할 수 있다. I-V 동작은 또한 결함이 트랩 보조 터널 전류에 대한 재결합 중심 또는 중간 상태 역할을 할 수 있기 때문에 계면 손상의 영향을 받을 수 있다. C-V 특성에서 결함은 공간 전하 영역의 폭을 변경할 수 있으며, 이는 차례로 차단 전압에 영향을 미친다. 결과적으로 I-V 방법은 특히 전류 전달 결함에 취약하여 장벽 높이 BH가 감소한다. 반면에 C-V 측정은 유전체에 의해 유도된 전하에 연결되어 더 높은 장벽 높이 BH를 초래한다.

[0119] 도 17은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 N_{ss} 함수 그래프이다.

[0120] $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)에 대한 계면 상태 밀도의 에너지 분포 프로파일 N_{SS}는 전압 종속 이상 계수 n(V) 및 유효 장벽 높이 F_e을 고려하여 순방향 I-V 데이터에서 추정할 수 있다. N_{SS}는 다음과 같이 표현된다.

수학식 28

$$N_{SS} = \frac{1}{q}\left[\frac{\varepsilon_i}{\delta}\left(n(V)-1\right) - \frac{\varepsilon_s}{W_D}\right]$$

[0121]

[0122] 여기서 W_D는 공간 전하 폭, e_s는 반도체의 유전율, e_i는 중간층의 유전율, d는 중간층의 두께, n(V)는 전압 종속

이상 계수로, n(V)=(q/kT)[V/(ln(I/Io))]로 같이 표현할 수 있다. n형 반도체에서 반도체 표면의 전도대 E_C의 바닥에 대한 계면상태 에너지 E_{SS}는 다음과 같이 표현된다.

수학식 29

[0123] $$E_C - E_{SS} = q(\Phi_e - V)$$

[0124] 여기서 E_C는 전도대의 하단, V는 공핍층에 걸친 전압 강하, F_e는 유효 장벽 높이다.

수학식 30

[0125] $$\Phi_e = \Phi_b + \beta V$$

수학식 31

[0126] $$\frac{d\Phi_e}{dV} = \beta = 1 - \frac{1}{n(V)}$$

[0127] 도 17을 참조하면, $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드에 대한 N_{SS} 대 E_C-E_{SS} 그래프를 나타낸다. 도 17에서 SJ와 HJ 모두에 대해 반도체의 중간 갭에서 전도대의 바닥으로 갈수록 N_{SS}가 기하급수적으로 증가함을 알 수 있다. 결정된 N_{SS} 값은 SJ의 경우 약 3.94×10^{12} eV^{-1} cm^{-2} (E_C-0.42 eV) 내지 약 7.02×10^{11} eV^{-1} cm^{-2} (E_C-0.93 eV)이며, HJ의 경우 2.98×10^{12} eV^{-1} cm^{-2} (E_C-0.38 eV) 내지 1.18×10^{10} eV^{-1} cm^{-2} (E_C-1.03 eV)이다. 결과는 HJ의 NSS 값이 SJ의 NSS 값보다 두 차수 낮음을 나타낸다. 이것은 p-$CuAlO_2$ 중간층이 β-Ga_2O_3의 표면을 효율적으로 패시베이션하여 N_{SS}로 인해 β-Ga_2O_3 표면의 댕글링 결합을 포화시킨다는 것을 보여준다. HJ의 p-$CuAlO_2$ 중간층은 포화 전류를 감소시키는 동시에 쇼트키 계면에서 유효 장벽 높이를 증가시킨다. 결과적으로 N_{SS} 값은 p-$CuAlO_2$ 층의 영향을 받는다고 결론지을 수 있다. I-V 및 C-V 특성에서 추정된 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)의 다양한 전자 매개변수는 표 1에 요약되어 있다.

표 2

[0128]

파라미터	Pt-Ga_2O_3 SJ	$CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ
I-V method		
장벽 높이 F_b (eV)	0.93	1.02
이상 계수 n	1.51	1.65
누설 전류 (A) at -1V	5.8×10^{-10}	2×10^{-12}
직렬 저항 R_S (Ω)	6,502	1,684
션트 저항 R_{Sh} (Ω)	6.2×10^{9}	1.6×10^{12}
정류비 at ±5 V	7.6×10^{4}	9.8×10^{8}
역방향 항복 전압 (V)	578	922
턴온 전압 V_{on} (V)	1.1	2.3
온 저항 R_{on} (mΩ · cm^2)	10,600	1,660
Hernandez method		

장벽 높이 F_b (eV)	0.92	1.40
이상 계수 n	1.54	1.62
Cheung's method		
dV/d(lnI)-I		
직렬 저항 R_S (kΩ)	15.65	3.49
이상 계수 n	6.07	6.46
H(I)-I		
장벽 높이 F_b (eV)	0.67	0.80
직렬 저항 R_S (kW)	17.15	3.96
Mikhelashvili method		
장벽 높이 F_b (eV)	1.03	1.87
이상 계수 n	1.87	1.76
직렬 저항 R_S (MΩ)	0.95	8.13
Norde method		
장벽 높이 F_b (eV)	1.05	1.78
직렬 저항 R_S (MΩ)	0.41	4.41
Surface potential method		
장벽 높이 F_b (eV)	0.94	1.31
이상 계수 n	1.51	1.63
C-V method		
내장 전위 V_{bi} (V)	0.95	1.89
장벽 높이 F_b (eV)	1.06	1.99
도너 농도 N_D (cm^{-3})	5.36×10^{16}	5.30×10^{16}

[0129] 도 18은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 순방향 log(I)-log(V) 특성을 나타낸 그래프이다.$CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드(10) 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드(12)에 대한 전체 순방향 바이어스 영역에서 지배적인 전류 전도 메커니즘은 I-V 특성에 의해 조사되며 이중 로그 스케일로 도 18에 도시된 그래프와 같이 나타낼 수 있다. 도 18(a)를 참조하면, log(I)-log(V) 그래프는 3개의 서로 다른 선형 영역을 가지며 각각은 고유한 기울기를 가진다(영역 I로 표시: 0.05 V < V < 0.2V, 영역 II: 0.25 V < V < 0.6 V 및 영역 III: 0.7 V < V < 5V), $I \propto V^m$ 관계를 따른다. 여기서 m은 각 영역의 선형 부분의 기울기를 나타내며, 전류는 인가된 바이어스 전압에 비례한다. 한편, HJ는 도 18(b)에서와 같이 3개의 서로 다른 선형 영역(I영역: 0.5V < V < 0.9V, II영역: 0.94V < V < 1.75V 및 III영역: 1.85V < V < 5V)을 나타낸다. 이 세 개의 선형 영역은 서로 다른 전도 메커니즘의 존재를 나타낸다. SJ와 HJ의 경우 m 값은 I, II, III 영역에서 각각 1.5, 8.09, 2.66, 1.6, 7.32, 5.25로 나타났다. 분명히 저 바이어스 영역(영역 1)에서 두 접합의 전류 전도는 옴 특성을 나타낸다. 즉, 전류는 인가된 바이어스 전압에 비례한다. 이 거동은 주입된 자유 캐리어에 의해 생성된 것보다 더 많은 양의 전류가 필름에서 생성된다는 사실에 기인할 수 있다. 영역 II에서 두 접합에 대해 I-V 관계는 거듭제곱 법칙 종속성을 특징으로 할 수 있다. 이 영역에서 기울기 값은 2보다 크며 이러한 동작은 지수 트랩 분포를 갖는 트랩 전하 제한 전류 메커니즘(TCLC)으로 해석될 수 있다. 이 경우 주입된 전자의 수가 증가하면 트랩이 채워지고 공간 전하가 상승한다. 고 바이어스 영역(영역 III)에서 전자는 강한 전자 주입으로 인해 트랩을 벗어나 공간 전하 제한 전류(SCLC)에 기여한다.

[0130] 도 19는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 $\ln(I/V^2)$-1/V 특성을 나타낸 그래프이다.

[0131] 역방향 바이어스에서 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 의 전류 전달 메커니즘을 이해하기 위해 Fowler-Nordheim(FN), Poole-Frenkel 방출(PFE) 및 쇼트키 방출(SE)이 접합을 통해 고려된다. 상이한 인가 전압에서 상이한 전도 메커니즘이 발생할 수 있다. 결과적으로 FN, PFE 및 SE에 대한 실제 전류 전도 메커니즘을 완전히 실현하고 추정하는 것은 어렵다. F-N 터널링 전류(I_{FN})는 다음 식으로 설명할 수 있다.

수학식 32

[0132] $$I_{FN} = AV^2 \exp\left(-\frac{B}{V}\right)$$

[0133] 여기서, $A = q^3 m/8\pi hm^* \Phi_b$, $B = 8\pi(q\Phi_b)^{3/2}\sqrt{2}\, m^*/3qh$, q는 전자 전하, h는 플랭크 상수, m은 전자 질량, m*은 전자의 유효 질량이다.

[0134] 도 19(a)는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드에 대한 $\ln(I/V^2)$-1/V 그래프를 나타내며, 양의 기울기를 갖는 선형 곡선이다. 기울기는 음수여야 하므로 FN 터널링의 영향은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드 모두에서 전도 메커니즘에 국한될 수 있다. PFE가 지배할 때 역방향 누설 전류는 다음과 같이 주어진다.

수학식 33

[0135] $$I_R = I_0 \exp\left(\frac{\beta_{PF} V^{1/2}}{kTd^{1/2}}\right)$$

[0136] 쇼트키 방출(SE) 메커니즘의 경우

수학식 34

[0137] $$I_R = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{\beta_{SC} V^{1/2}}{kTd^{1/2}}\right)$$

[0138] 여기서 Φ_b 는 주입 전극 계면의 쇼트키 장벽 높이이고, A*는 유효 Richardson 상수, β_{PF} 및 β_{SC}는 각각 PFE 및 SE 필드 하강 계수이다. β_{PF} 및 β_{SC}의 이론적 값은 다음 식으로 계산할 수 있다.

수학식 35

[0139] $$2\beta_{SC} = \beta_{PF} = \left(\frac{q^3}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\right)^{1/2}$$

[0140] β_{PF}는 항상 β_{SC} 값의 두 배이다. 두 메커니즘을 구별하는 가장 쉬운 방법은 이론적인 β 값과 실험적인 β 값을 비교하는 것이다. 수학식 35에 따르면 SJ에 대해 β_{PF} 및 β_{SC}의 이론적인 값은 각각 7.58×10^{-5} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$ 및 3.79×10^{-5} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$ 이다. 마찬가지로 HJ의 경우 각각 9.79×10^{-6} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$ 및 4.89×10^{-6} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$이다.

[0141] 도 19(b)는 실온에서 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 역전류(I_R)와 $V_R^{1/2}$ 사이의 semi-logarithmic 관계를 제시하고 있다. 도 19(b)에서 역전류는 서로 다른 기울기를 갖는 SJ 및 HJ 접합의 두 가지 서로 다른 선형 영역을 특징으로 하며, 이는 접합에서 Poole-Frenkel 또는 Schottky 장벽 낮추기 메커니즘의 역할로 설명할 수 있다. 영역 I(낮은 바이어스 영역)과 영역 II(높은 바이어스 영역)의 SJ에 대한 실험적 기울기 값은 각각 5.27×10^{-5} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$, 2.63×10^{-5} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$ 및 7.37×10^{-6} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$, 3.68×10^{-6} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$이다. SJ와 HJ에 대해 영역 I(낮은 바이어스 영역)에서 추출된 기울기 값은 이론적인 β_{PF} 값에 가깝고, 영역 II(고바이어스

영역)에서 추출된 기울기 값은 이론적인 값 β_{SC}에 가깝다. $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 낮은 바이어스 영역은 모두 Poole-Frenkel 방출에 의해 지배된다. $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드의 경우 쇼트키 방출은 영역 II(고바이어스 영역)에서 지배적이다. 실험 결과는 Poole-Frenkel 방출로 설명할 수 있으며 이는 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드 모두에 대해 낮은 바이어스 영역에서 지배적이다. 여기서는 중간층의 밴드갭에 분포된 트랩이 사용된다. 트랩은 전하 캐리어의 트랩핑/디트랩핑 성능을 향상시키는 구조적 결함 및/또는 불순물로 인해 발생할 수 있다. 쇼트키 방출은 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드 및 Pt-Ga_2O_3 SJ 다이오드 모두에 대해 더 높은 바이어스 영역에서 지배적이며, 여기서 전류 전도는 중간층의 불균일성 및 아원자 구조로 인해 벌크 재료가 아닌 접촉 인터페이스를 통해 발생한다.

[0142] 도 20은 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$ 박막의 2차원 및 3차원 AFM 이미지를 나타낸다.

[0143] 도 20(a) 내지 20(c)는 약 1.8, 2.1 및 4.09nm RMS(root-mean-square) 조도(roughness)를 갖는 4×4 μm^2의 스캔 영역에 걸쳐 산소 유량을 약 0%, 17.6%, 30%로 조절하여 증착된 p-$CuAlO_2$ 박막의 표면 형태(Surface morphology)를 나타낸다. 산소 유량이 변경됨에 따라 표면 형태가 매끄러운 것에서 거친 것으로 증가한다. 더욱이, 증착 챔버의 산소 함량이 증가함에 따라 플라즈마와 스퍼터링 원자 사이에 더 많은 충돌이 발생한다. 이러한 충돌은 스퍼터링 원자의 이동성을 방해하여 궁극적으로 증착 속도를 감소시킬 수 있다. 증착 속도는 주로 타겟 물질이 더 많은 산소로 산화되어 추가 스퍼터링을 억제하는 조밀한 산화물 층을 형성하는 경향이 있기 때문에 산소 함량이 증가함에 따라 감소한다. 산소 유량이 증가하면 원자의 이동성이 향상될 수 있다는 것이 일반적으로 알려져 있다. 그 결과 더 많은 수의 원자가 핵을 향해 이동하여 근처 원자가 합쳐지고 표면 형태가 매끄러운 것에서 거친 것으로 변경된다. 추가적으로, 이 과정은 결정 크기의 변화로 이어질 수도 있다.

[0144] 도 21은 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$ 박막의 광투과율 스펙트럼을 나타낸다.

[0145] 도 21(a) 내지 21(c)는 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$ 박막의 광투과율 스펙트럼을 나타낸다. p-$CuAlO_2$ 박막의 광학 밴드갭 E_g는 광흡수계수 a와 입사광자 에너지 hn로부터 수학식 2를 이용하여 구할 수 있다.

[0146] 도 21(d) 내지 21(f)의 Tauc 그래프에서, p-$CuAlO_2$ 박막의 $E_{g\text{-direct}}$ 및 $E_{g\text{-indirect}}$는, 표 3과 같이, 각각 약 3.7~4.35eV 및 약 2.6~3.3eV로 다양하다. p-$CuAlO_2$ 박막의 광학 밴드갭은 산소 결손 및 산소 관련 결함의 영향으로 인해 산소 유량이 증가함에 따라 증가할 수 있다. 성장 과정에서 산소의 가용성은 산소 유량의 영향을 받는다. 산소 유량이 높을 때 박막의 산소 결손은 산소 공급을 향상시키기 때문에 발생할 가능성이 적다. 도너 유사 결함(Donor-like defect)과 같이, 산소 결손은 밴드갭에 에너지 수준을 도입한다. 이러한 결함 상태는 전자를 포획하고 재료의 광학 특성을 변경할 가능성이 있다. 산소 유량이 증가하면 산소 결손 밀도가 감소하고 광학 밴드갭이 증가한다. 따라서 p-$CuAlO_2$ 박막의 Eg 값은 산소 유량이 증가함에 따라 증가했으며, 이는 알려진 값과 일치한다.

표 3

[0147]

산소 유량(%)	박막 두께 (nm)	증착율 (nm/min.)	$E_{g\text{-direct}}$ (eV)	$E_{g\text{-indirect}}$ (eV)
0	310	10.33	3.7	2.6
17.6	170	5.66	4.05	3.1
30	130	4.33	4.35	3.3

[0148] 도 22는 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 계면의 XPS 분석 결과를 나타낸 그래프이다.

[0149] 도 22(a)에서, Ga 3d, Al 2p, Cu 2p, Al 2s, Cu 2s, C 1s, O 1s, Cu 2p 및 Ga의 광전자선 2p는 p-$CuAlO_2$/β_2O_3 계면의 넓은 범위 및 고해상도 XPS 스펙트럼에서 볼 수 있으며, 다른 요소가 감지되지 않았다. 추가로, Cu LMM 및 O KLL은 각각 Cu 및 O 원소의 Auger 피크에 해당한다. β-Ga_2O_3 벌크 재료의 표면에는 탄소가 흡착되어 있어서, XPS 분석 중에 관찰된 C 1s 신호에 기여했다. 따라서, 결과의 정확성과 재현성을 보장하기 위해 C 1s 표준값 286.28eV를 사용하여 모든 피크의 위치를 보정했다.

[0150] 도 22(b)의 Cu 2p 스펙트럼에서, Cu 2p3/2 및 Cu 2p1/2 피크는 각각 약 935.41 및 약 955.47 eV에서 발견되었다. 또한, Cu 2p 스펙트럼에서 위성 피크가 없다는 점은 소결된 $CuAlO_2$ 분말에 Cu^{2+} 관련 불순물이 포함되어 있지 않음을 의미한다. Cu^{2+} 화합물의 코어 준위 스펙트럼은 Cu^{+1} 화합물의 코어 준위 스펙트럼에는 없는 강력한 위성 특성(shake-up satellite)을 가지고 있다.

[0151] 도 22(c)는 Al 2p 및 Cu 3p 코어 스펙트럼에서 Al 2p(약 74.98-75.08 eV), Cu^{+1}의 Cu 3p3/2(77.63-77.73 eV) 및 Cu 3p1/2(79.78-79.93 eV) 피크의 공존을 나타낸다. 이는 Al 원소가 거의 독점적으로 Al^{+3}로 나타나는 것을 보여주며, 이는 알려진 사실과 일치한다.

[0152] 도 22(d)에서, O 1s 스펙트럼은 Cu-O(약 530.92-531.34eV), Ga-O(약 531.82-531.98eV) 및 Al-O(약 532.52-532.94eV) 결합에 해당하는 세 개의 피크로 분리될 수 있다. 이러한 결과는 본질적으로 알려진 사실과 일치한다.

[0153] 도 22(e)에서, Ga 2p3/2 및 Ga 2p1/2의 광전자 피크는 각각 약 1119.54 및 약 1146.48 eV에 위치하며, 두 피크의 에너지 차이는 약 26.94로, 알려진 사실과 일치한다.

[0154] 도 22(f)는 상이한 산소 유량에서 β-Ga_2O_3 위에 증착된 $CuAlO_2$ 박막의 XPS 깊이 프로파일이다. Cu, Al, O, Si 및 Ga 층은 깊이 프로파일의 날카로운 경계면으로 보이는 것과 같이, 명확하게 구분된다.

[0155] 도 23은 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$ 및 β-Ga_2O_3의 밴드 다이어그램이다.

[0156] p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 산소 유량 의존 에너지 밴드 오프셋은 다음 식을 사용하여 추출되었다.

수학식 36

[0157] $$\Delta E_V = \left(E_{Cu2p_{3/2}}^{CuAlO_2} - E_{Ga2p_{3/2}}^{Ga_2O_3}\right) + \left(E_{VBM}^{CuAlO_2} - E_{Cu2p_{3/2}}^{CuAlO_2}\right) - \left(E_{VBM}^{Ga_2O_3} - E_{Ga2p_{3/2}}^{Ga_2O_3}\right)$$

[0158] $$\Delta E_C = E_g^{Ga_2O_3} - E_g^{CuAlO_2} + \Delta E_V$$

[0159] 여기서, Δ_V와 Δ_C는 각각 가전자대와 전도대 오프셋을 나타낸다. $\left(E_{Cu2p_{3/2}}^{CuAlO_2} - E_{Ga2p_{3/2}}^{Ga_2O_3}\right)$는 p-$CuAlO_2$ 및 β-Ga_2O_3에 대한 $Cu2p_{3/2}$ 코어 레벨과 $Ga2p_{3/2}$ 코어 레벨 간의 차이를 나타낸다. $\left(E_{VBM}^{CuAlO_2} - E_{Cu2p_{3/2}}^{CuAlO_2}\right)$는 $CuAlO_2$의 가전자대 최대값 VBM(Valence band maximum)과 $Cu2p_{3/2}$ 코어 레벨 사이의 에너지 차이를 나타낸다. $\left(E_{VBM}^{Ga_2O_3} - E_{Ga2p_{3/2}}^{Ga_2O_3}\right)$는 β-$Ga_2O_3$의 VBM과 $Ga2p_{3/2}$ 코어 레벨 사이의 에너지 차이를 나타낸다. 각 경우에 대한 $\left(E_{Cu2p_{3/2}}^{CuAlO_2} - E_{Ga2p_{3/2}}^{Ga_2O_3}\right)$, $\left(E_{VBM}^{CuAlO_2} - E_{Cu2p_{3/2}}^{CuAlO_2}\right)$, $\left(E_{VBM}^{Ga_2O_3} - E_{Ga2p_{3/2}}^{Ga_2O_3}\right)$의 값은 표 4와 도 22(b) 및 (e)에 나와 있다.

표 4

[0160]

결합 에너지 차이(eV)	샘플 1 (O_2:0%)	샘플 2 (O_2:17.6%)	샘플 3 (O_2:30%)
$\left(E_{Cu2p_{3/2}}^{CuAlO_2} - E_{Ga2p_{3/2}}^{Ga_2O_3}\right)$	-184.13	-184.13	-184.13
$\left(E_{VBM}^{CuAlO_2} - E_{Cu2p_{3/2}}^{CuAlO_2}\right)$	-933.91	-933.28	-933.38
$\left(E_{VBM}^{Ga_2O_3} - E_{Ga2p_{3/2}}^{Ga_2O_3}\right)$	-1116.31	-1116.31	-1116.31

[0161] $E_{VBM}^{Ga_2O_3}$ 값은 약 3.23eV이고 산소 유량에 의존하는 $E_{VBM}^{CuAlO_2}$ 는 도 23(a) 및 23(b)에 나와 있다. 이러한 고려 사항을 고려하여 각 경우에 대한 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 Δ는 도 23(c) 내지 23(e)에 나와 있다. 따라서 수학식 37을 이용하여 전도대 오프셋을 추출할 수 있으며, $E_g^{Ga_2O_3} = 4.9\ \mathrm{eV}$ 및 도 21의 Tauc 그래프로 얻은 광투과율로부터 추출된 밴드갭을 고려하여, 세 경우에 대해서 도 23(c) 내지 23(e)에 나와 있다. $CuAlO_2$에서, 하이브리드 Cu와 O 전자는 전도대 최대값(CBM)과 가전자대 최대값(VBM)의 전자 대부분을 구성한다. Ga_2O_3에서 Ga 4s 전자는 CBM의 대부분에 기여하는 반면, O 2p 전자는 VBM에서 지배적이다. Ga_2O_3의 VBM 및 CBM은 $CuAlO_2$의 VBM 및 CBM과 차이가 있다. 도 23(c)와 23(d)에서 볼 수 있듯이, 산소 유량이 0%에서 17.6%로 증가함에 따라, 가전자대 오프셋 VBO와 전도대 오프셋 CBO는 각각 약 1.73eV에서 약 1.23eV로, 약 0.53eV에서 약 0.38eV로 감소했다. 접합부를 가로질러 흐르는 전류는 더 작은 CBO와 더 큰 VBO에서 알 수 있듯이 전자 전도에 의해 지배된다. 이러한 감소는 이하에서 설명할 순방향 전류의 증가와 누설 전류의 증가로부터 확인할 수 있다. VBO 및 CBO의 이러한 감소는 p-$CuAlO_2$ 밴드갭 증가와 관련있다. 고밀도 계면 상태 및 결함/산소 결손(VO)의 형성은 풀-프렌켈 효과(PFE)를 통해 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 CBO를 필연적으로 감소시킨다. 그런 다음 도 23(e)와 같이 산소 유량이 17.6%에서 30%로 증가함에 따라 VBO는 약 1.23eV에서 약 1.13eV로 감소한 반면 CBO는 약 0.38eV에서 약 0.58eV로 증가했다. 이러한 CBO 증가는 산소 패시베이션이 PFE를 감소시키고 장벽이 더 높게 나타나기 때문에 산소 결손(VO) 밀도 감소로 인한 계면 상태 수준의 감소와 관련될 수 있다. 따라서 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 VBO와 CBO는 상이한 산소 유량에 영향받는 것으로 결론지을 수 있다. CBO와 비교하면, 측정된 VBO는 상이한 산소 유량에서 더 크다. p-n 접합을 가로지르는 얇은 터널링 장벽은 계면에서 코어-쉘 이종접합의 실질적인 VBO에 의해 생성되어야 한다. 이종 구조 전계 효과 트랜지스터 또는 LED와 같은 장치 애플리케이션의 경우 캐리어 감금은 VBO의 큰 값의 결과도 중요하게 한다.

[0162] 도 24는 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ 이종접합의 미세 구조를 측정하기 위한 TEM 이미지를 나타낸다.

[0163] 도 24(a) 내지 24(c)는 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ의 계면 영역의 단면 명시야 TEM 이미지이며, 상이한 산소 유량이 증가할수록 p-$CuAlO_2$ 박막의 두께가 감소함을 알 수 있다.

[0164] 도 24(d)는 높은 계면 접촉 품질을 보여주는 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 계면의 단면 고해상도 TEM(HRTEM) 이미지이다.

[0165] Gatan Digital Micrograph Software를 사용하여 격자 줄무늬의 d-간격 값을 평가했다. β-Ga_2O_3에 대한 우수한 격자 줄무늬가 처리된 현미경 사진에서 볼 수 있으며 이는 도 24(e)에 나타난 결정성을 뒷받침한다. β-Ga_2O_3에서 인접한 격자면 사이의 d-간격은 약 0.59nm이며, 도 24(f)에 나와 있다.

[0166] 도 24(g) 내지 24(i)는 라인 스캔 영역 및 상이한 산소 유량에서 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ의 중간층 영역에서 Cu, Al, O 및 Ga 원소 분포를 나타내며, 매핑 이미지의 스캔 라인에서 균일하게 분포되어 있다.

[0167] 도 24(j)는 Cu, Al, O 및 Ga 원소의 EDX 매핑을 보여 주며, 이는 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ내 원소의 눈에 띄는 상호 확산이 없음을 나타낸다.

[0168] 도 24(k) 내지 24(m)은 상이한 산소 유량에서 β-Ga_2O_3 반도체 위의 p-$CuAlO_2$ 박막의 대표적인 EDX 스펙트럼을 나타낸다. EDX 스펙트럼은 Cu, Al, O 및 Ga 원소의 존재를 명확하게 보여준다.

[0169] 도 25는 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 다이오드의 전기적 특성을 나타낸 그래프이다.

[0170] 도 25(a)는 상이한 산소 유량에서 측정된 Pt/p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 다이오드의 I-V 특성을 나타낸다. 0%, 17.6%, 30%의 산소 유량에 대한 역바이어스 누설전류 및 정류비는, -1V에서 약 1.1×10^{-11}A, 3.8×10^{-9}A, 9.1×10^{-12}A이며, ±5V에서, 약 6.1×10^{6}, 9.8×10^{4}, 9.8×10^{7}이다.

[0171] 도 25(b)는 상이한 산소 유량에서 Pt/p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 다이오드에 대한 명백한 정류 I-V 특성을 선형 범위에서 나타낸다. 순방향 바이어스 I-V 영역의 선형 피팅은 각각 0%, 17.6% 및 30%의 산소 유량에 대해 약 2.25V,

1.6V 및 1.5V의 턴온 전압(Von)을 생성한다. 또한 도 25(b)에 나타낸 것처럼, 상이한 산소 유량에서의 온 상태 저항 R_{on}은 각각 약 113.21 Ω-cm^2, 6.21 Ω-cm^2, 및 17.5 Ω-cm^{2}로 추정된다. Pt/p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 다이오드의 R_{on}에 기여하는 주요 요인은 p-$CuAlO_2$ 중간층의 벌크 저항과 Pt와 p-$CuAlO_2$ 중간층 사이의 쇼트키 접촉 저항이다. Pt/p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 다이오드의 장벽 높이 BH와 이상 계수는 열이온 방출(thermionic emission; TE) 이론을 가정하여 I-V 곡선에서 유도할 수 있다. ln(I)-V 그래프의 기울기와 절편을 사용하여 이상 계수와 BH를 결정하는 것이 가능하다. 추출된 BH는 0%, 17.6%, 30%의 산소 유량에 대해 각각 약 0.93eV, 0.80eV, 0.94eV이다. 열이온 방출은 β-Ga_2O_3에서 p-$CuAlO_2$로 흐르는 전자에 대한 장벽과 p-$CuAlO_2$에서 β-Ga_2O_3로 흐르는 정공에 대한 장벽으로 구성된 전체 장벽에 의존한다. 상술한 XPS 분석에 의해 결정된 것처럼 VBO(Δ_V)는 항상 CBO(Δ_C)보다 크며, 이는 전자보다 정공의 BH가 훨씬 더 높아지게 한다. 이 때문에 열이온 정공을 무시하는 것이 가능하며, 전체 BH는 대부분 전자의 BH에 의해 지배되고, 인가된 전압이 V_{on}에 가까울 때 열이온 전자 방출이 전류 전달을 지배한다. 추정된 이상 계수는 0%, 17.6%, 30%의 산소 유량에 대해 각각 1.9, 2.5, 1.5이다. 이상 계수가 1보다 높다는 것은 HJ 계면에 결함이 많다는 것을 의미하며, 이는 마그네트론 스퍼터링에 의해 고산소 환경에서 성장한 p-$CuAlO_2$ 박막의 품질과 결함 상태로 인한 계면 재결합과 관련이 있는 것으로 보이고, 전류는 주로 계면을 통한 전자의 확산에 기인하며, p-$CuAlO_2$의 결함 상태의 존재, 지배적인 캐리어 수송은 열이온 방출이 아니며 전류 수송 메커니즘은 이하에서 상세히 설명한다.

[0172] 도 25(c)는 산소 유량의 함수로서 Pt/p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 BH, 이상 인자 및 온-저항을 나타낸다. p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 전기적 특성은 산소 결손의 제거가 HJ의 계면 특성 향상에 크게 기여한다는 것을 강력히 시사한다. 결과적으로 더 큰 결함 농도, 더 높은 표면 거칠기, 더 높은 인터페이스 상태 및 높은 산소 농도의 증가는 산소 유량 증가에 따른 BH, 이상 계수 및 온저항의 변화를 설명하는 데 사용될 수 있다.

[0173] 도 25(d)는 각각 0%, 17.6%, 30%의 상이한 산소 유량에서 형성된 HJ의 항복 전압 BV가 약 937V, 924V 및 1000V로 증가함을 나타낸다. 이러한 추세는 산소 유량이 높을수록 전도성이 낮아지고 결과적으로 시스템에서 방전 또는 항복을 시작하려면 더 높은 항복 전압이 필요함을 시사한다. p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ 장치의 성능은 p-$CuAlO_2$ 박막의 증착 파라미터에 의해 크게 영향을 받는다. 이는 증착 파라미터를 최적화하면 장치 성능 및 항복전압을 향상시킬 수 있음을 의미한다. 또한, 이 결과는 동일한 방식으로 준비되었음에도 불구하고 항복 전압(BV)이 접합마다 다르다는 것을 나타낸다. 따라서 통계적 분포 분석을 통해 상이한 산소 유량에서 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 BV 평균값을 산출할 필요가 있다.

[0174] 도 25(e) 내지 25(g)는 역방향 바이어스 I~V 데이터에서 추출한 상이한 산소 유량에서 20개의 제작된 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ에 대한 BV의 통계적 분포를 나타낸다. 추출된 BV는 실험적으로 가우스 함수에 의해 피팅되었다. 도 25(e) 내지 25(g)에서, 통계 결과에 따르면, 0%, 17.6%, 30%의 상이한 산소 유량에서 각각 형성된 p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 평균 BV는 약 850V, 880V 및 960V이며 표준 편차는 약 0.56878V, 0.4868V 및 0.47871V이다. V_O 결함과 V_O 결함의 트래핑 효과로 인해 생성된 잉여 전자는 결과적으로 캐리어 밀도가 화학량론적 비율에서 산소 함량의 편차에 의해 영향을 받을 수 있다. 즉, 캐리어 밀도의 변화는 p-$CuAlO_2$ 박막의 전도도 변화에 주로 중요하다. 결과적으로, p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ 계면의 항복 성능은 V_O 결함 농도에 따라 달라질 수 있다. p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ 계면의 산소 결손이 감소함에 따라 공핍층의 폭이 넓어져 항복 성능이 향상될 수 있다. p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ에서 탁월한 성능을 발휘하는 원인을 이해하려면 캐리어 수송 메커니즘과 공핍 영역에서 생성된 내장 전기장을 고려해야 한다. 전도대 최소값 CBM과 가전자대 최대값 VBM은 각각 결정질 Ga_2O_3 기반 이종접합에서 전자와 정공의 수송 경로이다. 그러나 결정 구조와 격자가 양립할 수 없기 때문에, 전위(dislocation)와 결함이 박막에 자주 발생한다. 파괴되어 누설 전류가 입자 경계 및/또는 도메인 경계를 통해 흐르도록 허용하기 전에 이종접합은 상당한 역바이어스를 견딜 수 없었다. 따라서 캐리어 증폭 과정은 계면 근처의 제한된 공핍 영역 내부에 무시할 수 있을 정도로 작은 내장 전기장에 의해 제한된다. 대조적으로, 등방성 형태를 갖는 Ga 4s 오비탈은 강한 상징성을 지닌 Ga_2O_3의 CBM의 대부분을 구성한다. 화학 결합의 변형을 받지 않는 Ga 4s 오비탈의 직접적인 중첩은 캐리어 수송 경로가 시작되는 곳이다. 그러나 Pt/p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 추정된 Baliga 성능

지수(BFOM = BV^2/R_{on}) 값은 상이한 산소 유량 0%, 17.6%, 30%에 대해 각각 약 7.75kW/cm^2, 137.38kW/cm^2 및 57.13kW/cm^2이다.

[0175] 도 25(h)는 최첨단 β-Ga_2O_3 기반 이종 접합에 대한 온 저항 R_{on} 대 항복 전압(V)의 벤치마크 그래프를 나타낸다.

[0176] 도 26은 상이한 산소 유량으로 증착된 p-$CuAlO_2$/β$_2O_3$ HJ 다이오드의 접합 저항-V 그래프이다.

[0177] 다이오드의 성능과 신뢰성은 직렬 저항 R_S과 션트 저항 R_{Sh}, 특히 쇼트키 배리어 다이오드 SBD의 영향을 크게 받는다. 장치를 통한 높은 전류 흐름에는 낮은 R_S가 바람직하고, 장치의 누설 전류를 줄이려면 큰 R_{Sh}가 필요하다. 이 요소들은 장치의 이상적인 성능에 매우 중요하다. 도 26에 도시된 바와 같이, 상이한 산소 유량으로 형성된 Pt/p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 R_S 및 R_{Sh} 값은 접합 저항 Rj(= ∂∂대 전압(V) 그래프에서 얻을 수 있다. 순방향 바이어스 영역에서 Rj 대 V 그래프의 하위 영역은 R_S에 해당하는 반면 역방향 바이어스 영역에서 가장 높은 피크 저항은 R_{Sh}이다. R_S 및 R_{Sh} 값은 0%, 17.6% 및 30% 산소 유량에 대해 약 40kΩ, 2.1kΩ 및 6.1kΩ과 약 2.44×1011Ω, 1.24×109Ω 및 2.94×1011Ω으로 보고되었다.

[0178] 도 27은 상이한 산소 유량으로 증착된 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드의 C-V 그래프이다.

[0179] 도 27(a)는 1 MHz 주파수에서 상이한 산소 유량에서 형성된 Pt/p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 정전용량-전압(C-V) 특성을 나타내며, 도 27(b)는 상이한 산소 유량에서 형성된 HJ에 대한 C^{-2}-V 그래프이다. p-n HJ의 커패시턴스는 다음과 같이 주어진다.

수학식 37

[0180] $$C = \left[\frac{q\varepsilon_n\varepsilon_p\varepsilon_0 N_D N_A}{2(\varepsilon_n N_D+\varepsilon_p N_A)}\right]^{1/2}(V_{bi}-V_A)^{-1/2}$$

[0181] 여기서 N_D, N_A, ε_n, ε_p, ε_0, q, V_{bi} 및 V_A는 일반적인 의미를 갖는다. C^{-2}-V 그래프를 x축에 외삽하여 확산 전위 V_0를 구하고, 이는 내장 전위와 다음 관계식 $V_{bi} = V_0 + kT/q$로 관련된다. V_{bi}는 상이한 산소 유량으로 형성된 HJ의 경우 약 1.16V, 0.96V 및 1.22V로 발견되었다. V_{bi} 값은 p-$CuAlO_2$ 박막의 높은 저항으로 인해 I-V 특성에서 추정된 V_{on} 값보다 낮았으며, 이는 재성장 계면의 불순물 및 결함으로 인한 추가 밴드 굽힘에 의해 발생할 수 있다. HJ의 N_A 값은 상이한 산소 유량에서 각각 1.93×10^{16} cm^{-3}, 1.61×10^{16} cm^{-3} 및 4.01×10^{16} cm^{-3}으로 발견되었다. C-V 분석에서 추정된 N_A 값은 홀 측정에서 추출된 홀 밀도보다 높다. p-$CuAlO_2$ 성능은 격자간 산소에 의해 영향을 받을 수 있으며 p형 결함의 형성은 p-$CuAlO_2$ 박막의 산화 제어를 통해 조정될 수 있다는 점에 주목하여야 한다. HJ의 BH 값은 상이한 산소 유량에서 각각 약 1.3eV, 0.98eV 및 1.28eV으로 발견되었다. I-V 및 C-V 방식을 사용하여 얻은 BH 값은 서로 매우 상이하다. 이는 I-V 및 C-V 방식이 근본적으로 서로 다르기 때문일 수 있다. 또한 다음 설명은 I-V 및 C-V 방법으로 찾은 BH 값이 다른 이유를 설명하는 데 도움이 될 수 있다. (i) 인터페이스 전하의 분포, (ii) 계면층 두께의 불균일성, (iii) 깊은 불순물의 존재, (iii) 이미지-포스 장벽의 저하, (iv) 장벽 불균일성의 존재, (vi) 가장자리 누설 전류. I-V 및 C-V 특성으로부터 추정된 상이한 산소 유량에서 형성된 Pt/p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ의 다양한 전자 파라미터가 표 5에 요약되어 있다.

표 5

[0182]

파라미터	샘플 1 (O_2:0%)	샘플 2 (O_2:17.6%)	샘플 3 (O_2:30%)
I-V			
장벽 높이 F_b (eV)	0.93	0.80	0.94
이상 계수 n	1.9	2.5	1.5

누설 전류 (A) at -1V	$1.1X10^{-11}$	$3.8X10^{-9}$	$9.1X10^{-12}$
직렬 저항 R_S (W)	40	2.1	6.1
션트 저항 R_{Sh} (W)	$2.4X10^{11}$	$1.2X10^{9}$	$2.9X10^{11}$
정류비 at ±5 V	$6.1X10^{6}$	$9.8X10^{4}$	$9.8X10^{7}$
역방향 항복 전압 (V)	937	924	1000
턴온 전압 V_{on} (V)	2.25	1.6	1.5
온 저항 R_{on} (mW-cm^2)	113.21	6.21	17.5
벨리가 성능 지수(W/cm^2)	7.75	137.38	57.13
C-V			
내장 전위 V_{bi} (V)	1.16	0.96	1.22
장벽 높이 F_b (eV)	1.3	0.98	1.28
억셉터 농도 N_A (cm^{-3})	$1.93X10^{16}$	$1.61X10^{16}$	$4.01X10^{16}$

[0183] Card와 Rhoderick에 따르면, 이상 계수 n은 반도체와 평형인 계면 상태를 갖는 Pt/p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ에 대해 1보다 높아진다.

수학식 38

[0184] $$n(V) = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i}\left[\frac{\varepsilon_S}{W_D} + qN_{SS}\right]$$

[0185] 여기서, W_D, ε_s, ε_i, δ 및 n(V)는 일반적인 의미를 갖는다. 전압에 따른 이상 계수는 n(V)=(q/kT)[V/(ln(I/I_o)]로 나타낼 수 있다. 반도체 표면의 전도대 E_C의 바닥에 대한 n형 반도체의 계면 상태 에너지 E_{SS}는 다음과 같이 표현된다.

수학식 39

[0186] $$\mathbf{E_C - E_{SS} = q\ (\Phi_e - V)}$$

[0187] 여기서, $\Phi_e = \Phi_b + \beta$이고, $\frac{d\Phi_e}{dV} = \beta = 1 - \frac{1}{n(V)}$ 이다.

[0188] 도 28은 상이한 산소 유량으로 증착된 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드의 N_{ss} 함수 그래프이다.

[0189] N_{SS} 값은 0%, 17.6%, 30%의 상이한 산소 유량으로 형성된 HJ에 대해 각각 약 6.66×10^{12} eV^1 cm^2 (E_C-0.46 eV) 내지 약 6.78×10^{11} eV^1 cm^2 (E_C-0.93 eV), 약 1.39×10^{13} eV^1 cm^2 (E_C-0.39 eV) 내지 4.51×10^{12} eV^1 cm^2 (E_C-0.82 eV), 및 약 2.79×10^{12} eV^1 cm^2 (E_C-0.42 eV) 내지 7.45×10^{10} eV^1 cm^2 (E_C-0.94 eV)이다. 이는 p-$CuAlO_2$ 중간층이 β-Ga_2O_3의 표면을 성공적으로 패시베이팅하여 N_{SS}에 의해 유도된 댕글링 밴드의 포화를 감소시킨다는 것을 입증한다. 산소 유량이 증가하면 N_{SS}가 감소한다. N_{SS} 값의 감소는 두 가지 현상이 동시에 일어나고 있음을 의미한다. (i) 산소 결손이 감소하여 캐리어 농도가 감소하고 (ii) 억제 계면 상태가 이종접합의 안정성을 향상시킨다. 산소 결합으로 인한 N_{SS} 값의 감소는 계면에서 산소 관련 패시베이션 층의 형성에 기인하며, 이는 밴드갭 전체에서 N_{SS} 값을 감소시킬 수 있다. 또한, 산소 유량이 증가하면 결정성 p-$CuAlO_2$ 중간층의 두께가 줄어들어 N_{SS}가 낮아진다. p-$CuAlO_2$ 중간층의 두께가 감소함에 따라 깊은 경계면 상태의 이온화도

마찬가지로 감소한다. 이는 p-$CuAlO_2$ 층의 개발에 의해 계면 상태가 성공적으로 감소되었음을 의미한다.

[0190] 도 29는 상이한 산소 유량으로 증착된 $CuAlO_2$-Ga_2O_3 HJ 다이오드의 $\ln(I/V^2)$- 1/V 특성을 나타낸 그래프이다.

[0191] Pt/p-$CuAlO_2$/β-Ga_2O_3 HJ에 걸친 역방향 전류 전송 메커니즘을 이해하기 위해 Fowler-Nordheim(FN)과 같은 별도의 방법을 사용하여 조사할 수 있다. F-N 터널링 전류 I_{FN}은 다음 식으로 설명할 수 있다.

수학식 40

[0192] $$I_{FN} = AV^2 \exp\left(-\frac{B}{V}\right), \text{where } A = q^3 m/8\pi hm^* \Phi_b, B = 8\pi(q\Phi_b)^{3/2}\sqrt{2}\, m^*/3qh$$

[0193] 여기서 q, h, m*은 일반적인 의미를 갖는다.

[0194] 도 29(a)에 도시된 그래프는 양의 기울기를 갖는 선형 곡선을 나타낸다. 그러나 기울기는 음수여야 하며 이는 FN 터널링의 영향이 HJ의 전도 메커니즘이 제한될 수 있음을 나타낸다. 역방향 누설 전류 I_R이 Poole-Frenkel 방출(PFE)에 의해 지배된다면 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

수학식 41

[0195] $$I_R = I_0 \exp\left(\frac{\beta_{PF} V^{1/2}}{kTd^{1/2}}\right)$$

[0196] 쇼트키 방출(SE) 메커니즘의 경우 역방향 누설 전류 I_R은 다음과 같이 표현될 수 있다.

수학식 42

[0197] $$I_R = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{\beta_{SC} V^{1/2}}{kTd^{1/2}}\right)$$

[0198] 여기서 ΦA*, β및 β는 일반적인 의미를 갖는다. β_{PF}와 β_{SC}의 이론적 값을 추정하기 위해 다음 식을 사용할 수 있다.

수학식 43

[0199] $$2\beta_{SC} = \beta_{PF} = \left(\frac{q^3}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}\right)^{1/2}$$

[0200] PFE의 β_{PF}는 항상 β_{SC} 값의 두 배이다. 수학식 43에 따르면, HJ에 대해 구해진 β_{PF}와 β_{SC}의 이론적인 값은 각각 약 9.79×10^{-6} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$와 4.89×10^{-6} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$이다. 도 29(b)는 상이한 산소 유량에서 HJ의 $\ln(I_R)$ 대 $V_R^{1/2}$를 나타낸다. 여기서 HJ는 선형성을 나타내며 이는 접합에서 PFE 또는 SE의 역할에 기인한다. HJ 기울기 값은 상이한 산소 유량에서 약 5.71×10^{6} $eVm^{1/2}V^{1/2}$, 7.8×10^{8} $eVm^{1/2}V^{1/2}$, 및 4.32×10^{6} $eVm^{1/2}V^{-1/2}$ 이다. HJ의 기울기에서 추출된 값은 β_{SC}보다는 이론적인 β_{PF} 값에 더 가깝다. I_R은 PFE 메커니즘에 의해 지배될 수 있으며, 이는 반도체 밴드 갭의 불순물로 인해 트랩 상태가 발생하여 구조적 결함 또는 고밀도 트랩 수준으로 인해 전하 캐리어의 트랩핑/디트랩핑 성능이 향상되는 것으로 설명할 수 있다.

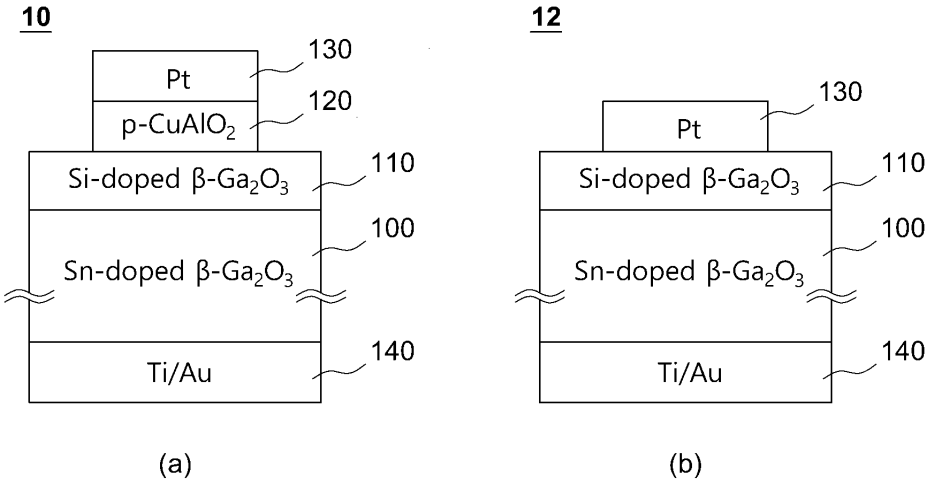
[0201] 전술한 본 발명의 설명은 예시를 위한 것이며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본 발명

의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 쉽게 변형이 가능하다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시 예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다.

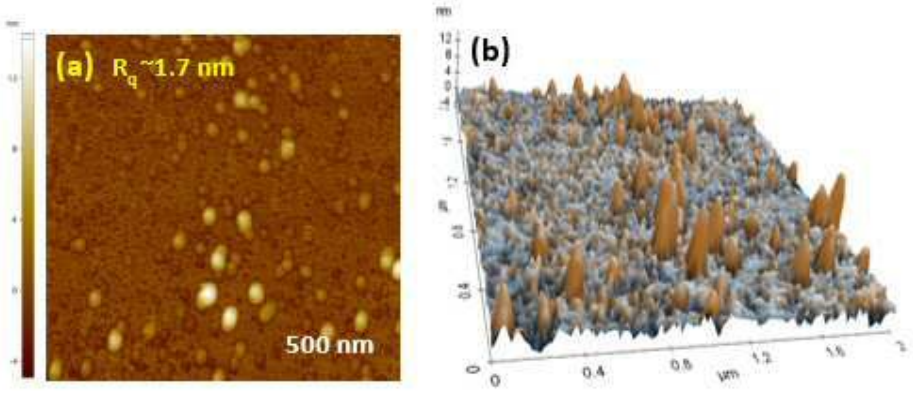
[0202] 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타나며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

도면

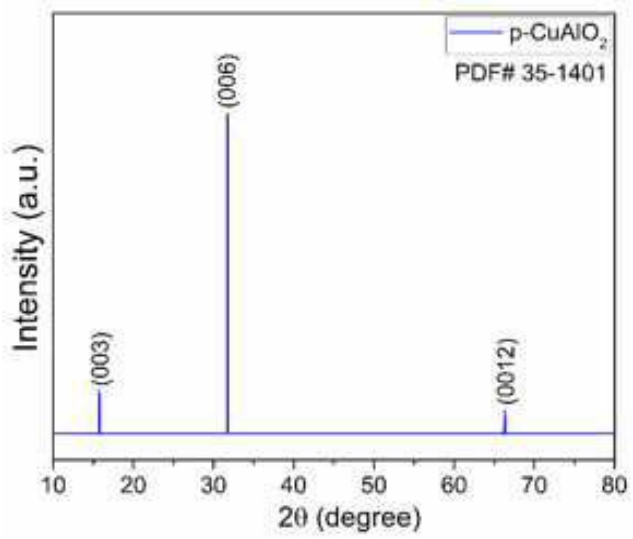
도면1



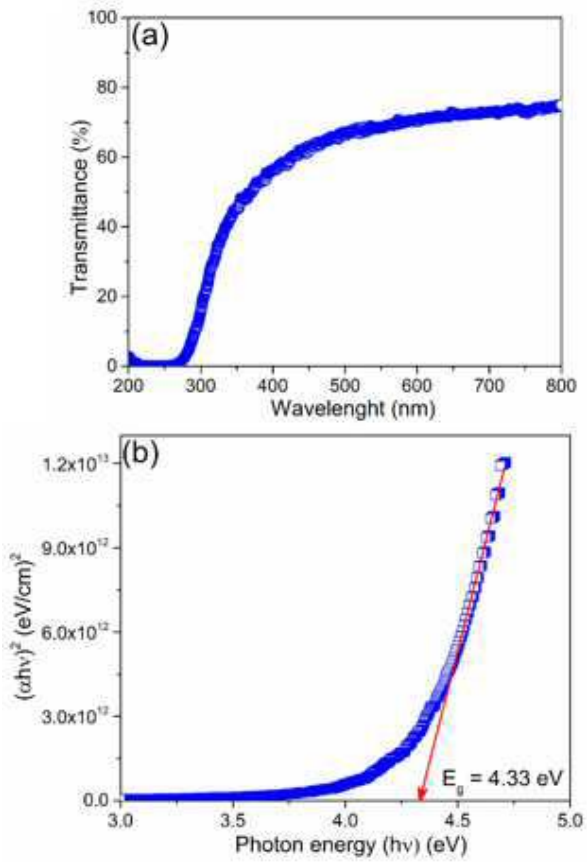
도면2



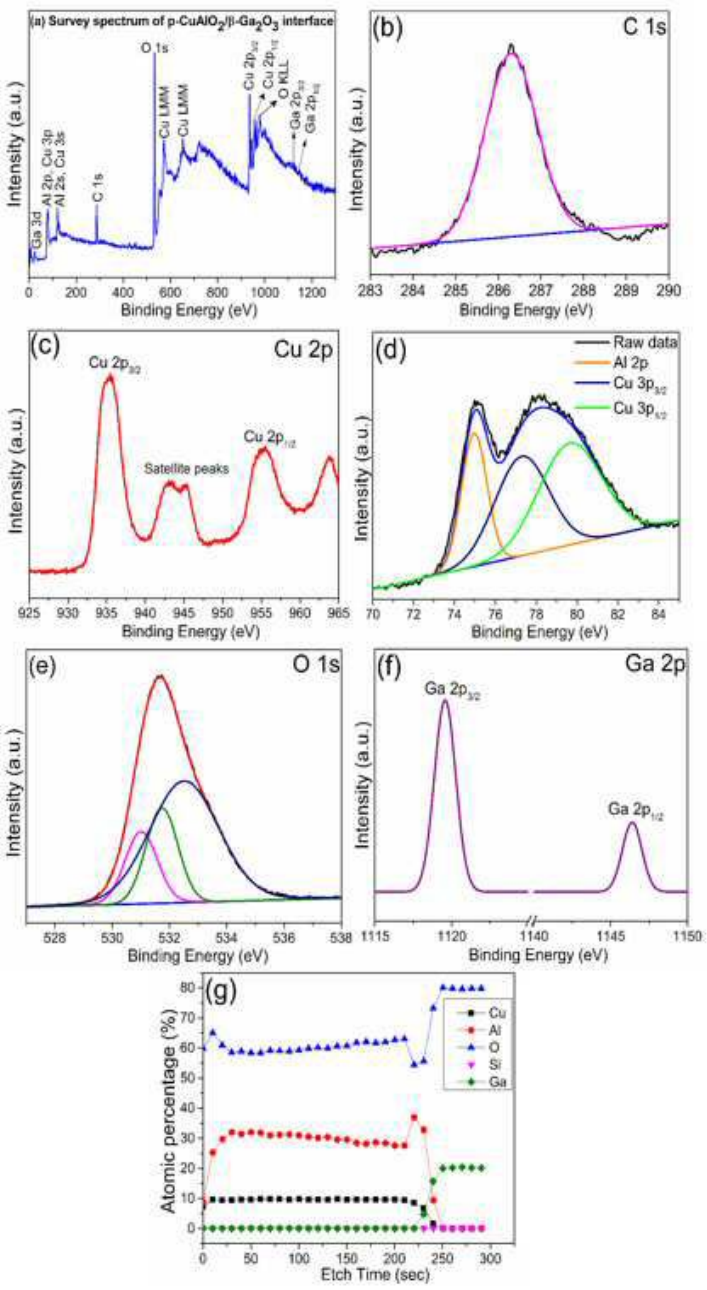
도면3


p-CuAlO2
PDF# 35-1401
(006)
(003)
(0012)
Intensity (a.u.)
10
20
30
40
50
60
70
80
2θ (degree)

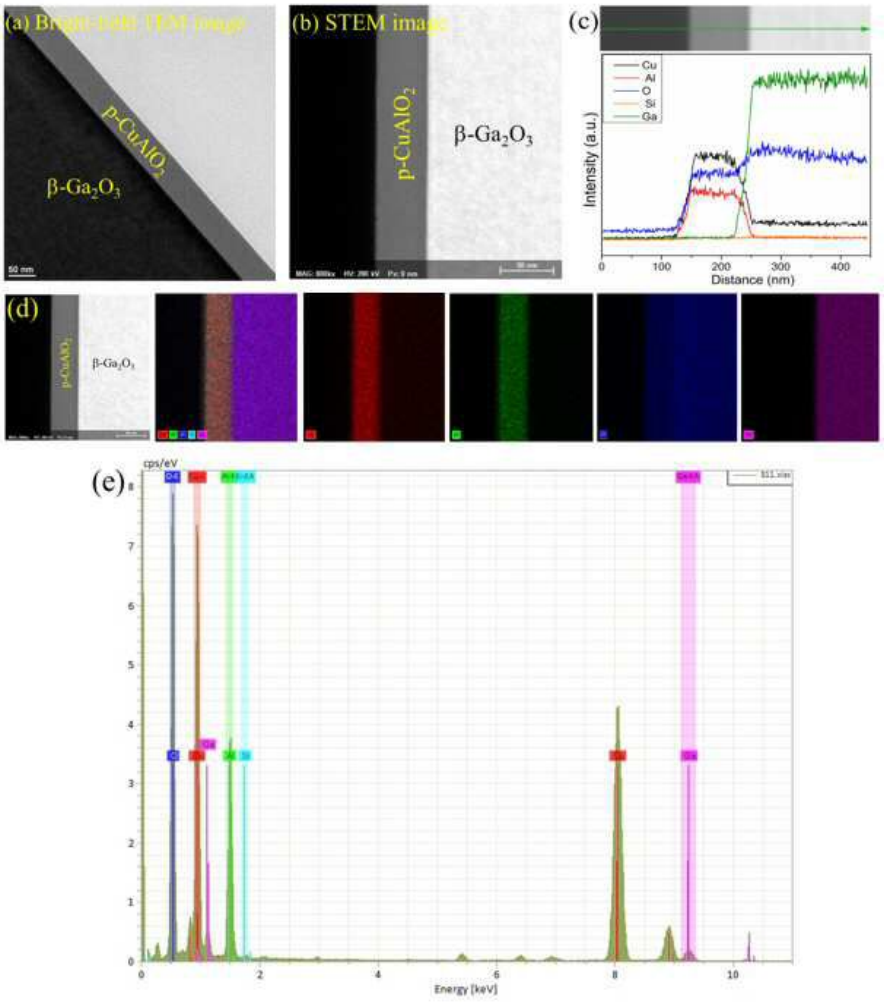
도면4


(a)
Transmittance (%)
0
20
40
60
80
100
200
300
400
500
600
700
800
Wavelenght (nm)
(b)
(αhν)² (eV/cm)²
0.0
3.0x10¹²
6.0x10¹²
9.0x10¹²
1.2x10¹³
E₀ = 4.33 eV
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0
Photon energy (hν) (eV)

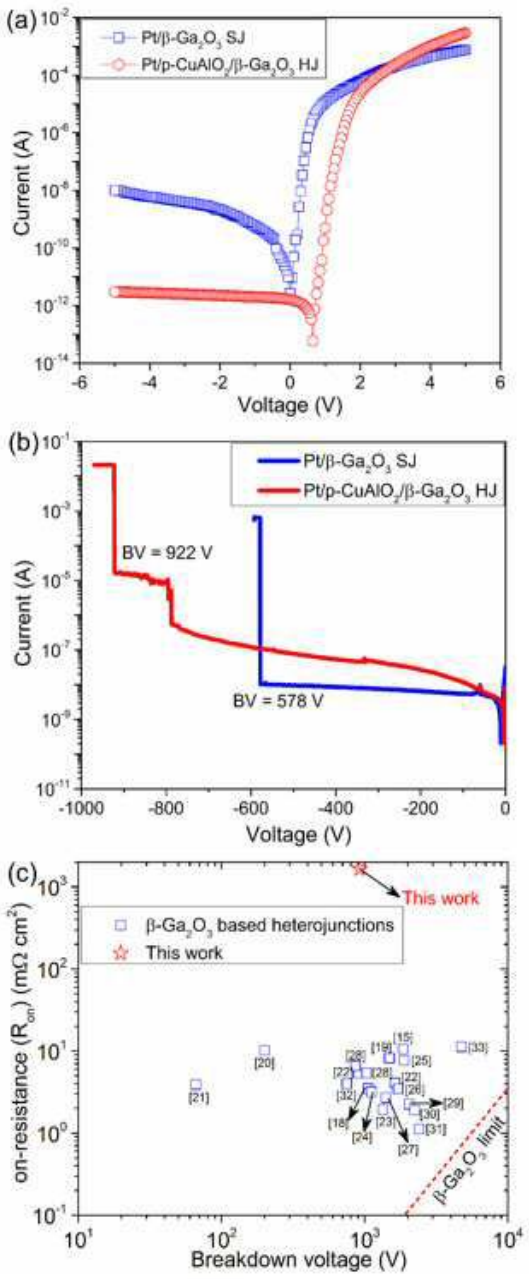
도면5


(a) Survey spectrum of p-CuAlO2/β-Ga2O3 interface
O 1s
Cu LMM
Cu LMM
Cu 2p3/2
Cu 2p1/2
O KLL
Ga 2p3/2
Ga 2p1/2
Ga 3d
Al 2p, Cu 3p
Al 2s, Cu 3s
C 1s
Intensity (a.u.)
Binding Energy (eV)
(b) C 1s
(c) Cu 2p
Satellite peaks
(d) Raw data
Al 2p
Cu 3p3/2
Cu 3p1/2
(e) O 1s
(f) Ga 2p
Ga 2p3/2
Ga 2p1/2
(g)
Cu
Al
O
Si
Ga
Atomic percentage (%)
Etch Time (sec)

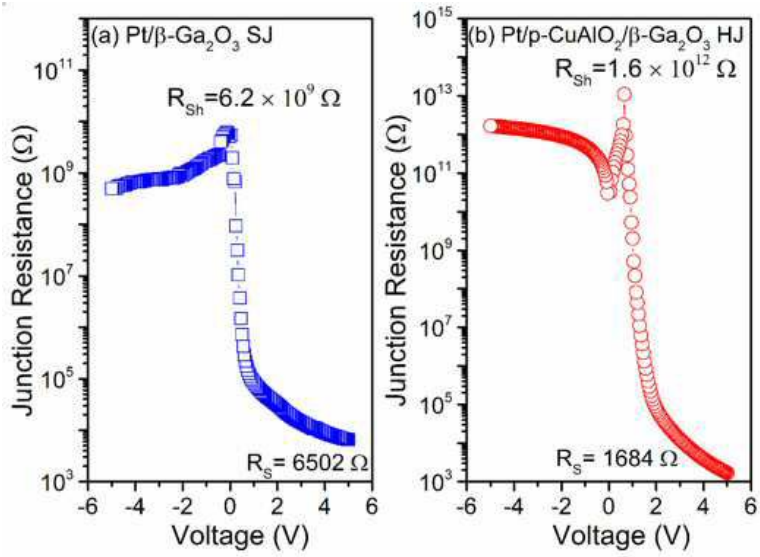
도면6


(a) Bright-field TEM image
p-CuAlO2
β-Ga2O3
50 nm
(b) STEM image
p-CuAlO2
β-Ga2O3
(c)
Cu
Al
O
Si
Ga
Intensity (a.u.)
0
100
200
300
400
Distance (nm)
(d)
p-CuAlO2
β-Ga2O3
(e)
cps/eV
0
1
2
3
4
5
6
7
0
2
4
6
8
10
Energy [keV]

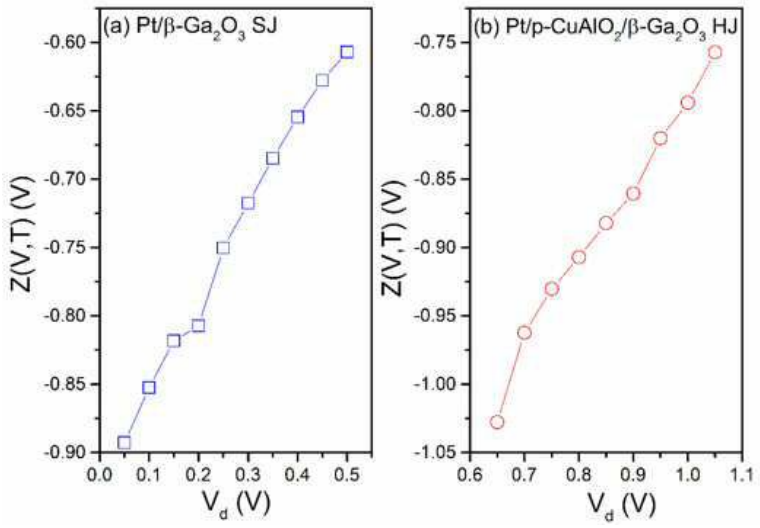
도면7


(a)
Pt/β-Ga2O3 SJ
Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
Current (A)
Voltage (V)
(b)
Pt/β-Ga2O3 SJ
Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
BV = 922 V
BV = 578 V
Current (A)
Voltage (V)
(c)
This work
β-Ga2O3 based heterojunctions
This work
β-Ga2O3 limit
on-resistance (Ron) (mΩ cm2)
Breakdown voltage (V)

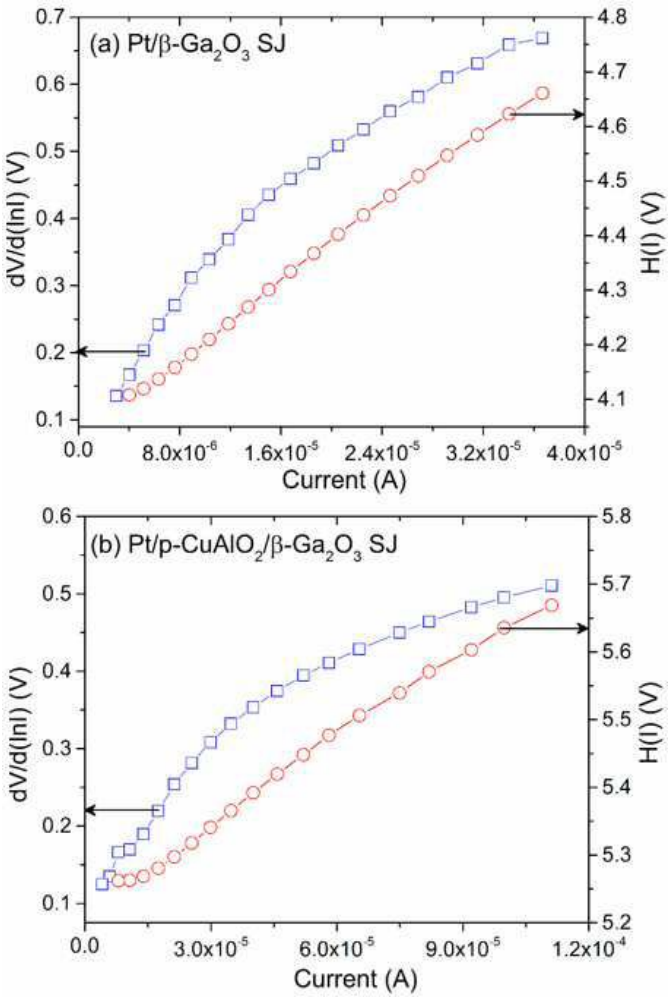
도면8


(a) Pt/β-Ga2O3 SJ
RSh=6.2 × 10^9 Ω
RS= 6502 Ω
Junction Resistance (Ω)
Voltage (V)
(b) Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
RSh=1.6 × 10^12 Ω
RS= 1684 Ω
Junction Resistance (Ω)
Voltage (V)

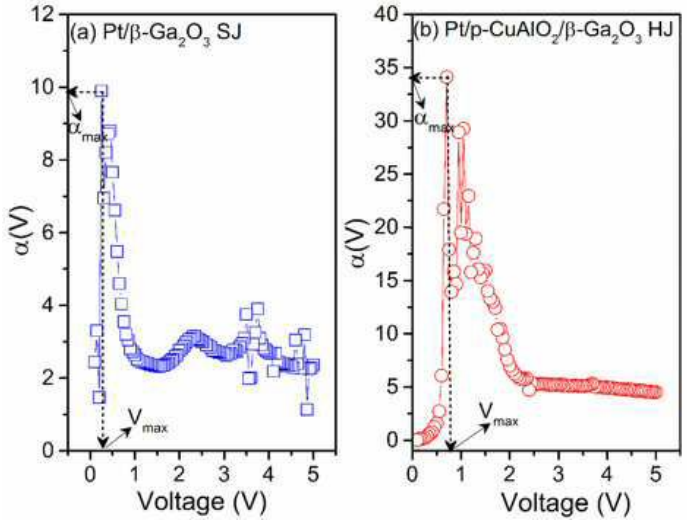
도면9


(a) Pt/β-Ga2O3 SJ
Z(V,T) (V)
Vd (V)
(b) Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
Z(V,T) (V)
Vd (V)

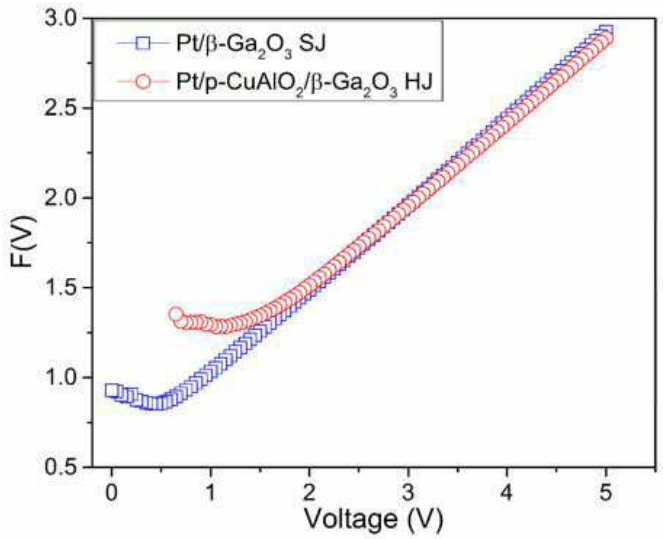
도면10


(a) Pt/β-Ga2O3 SJ
dV/d(lnI) (V)
H(I) (V)
Current (A)
(b) Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 SJ
dV/d(lnI) (V)
H(I) (V)
Current (A)

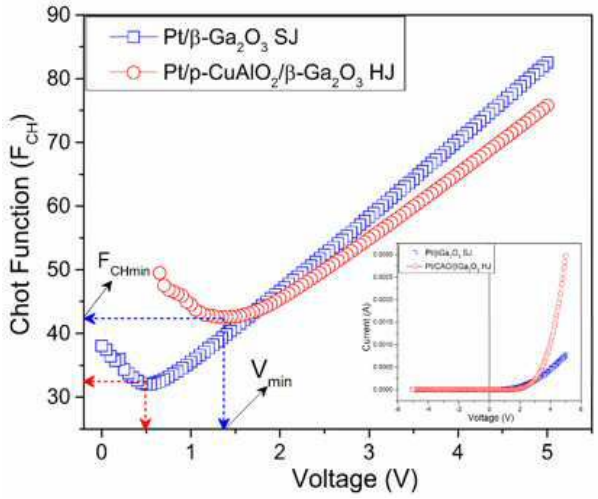
도면11


(a) Pt/β-Ga2O3 SJ
α(V)
Voltage (V)
(b) Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
α(V)
Voltage (V)

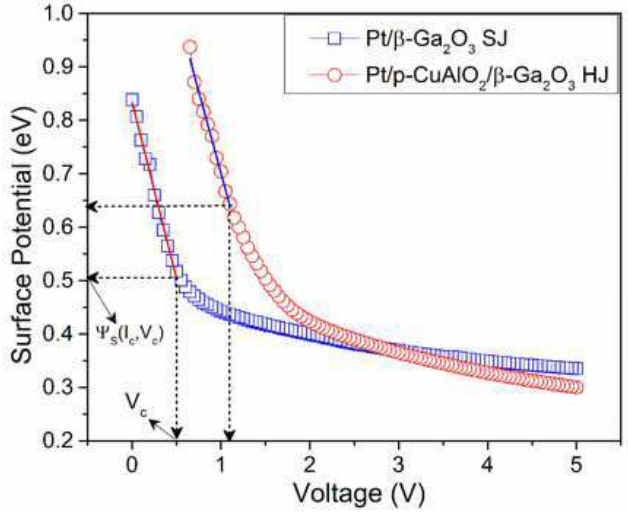
도면12



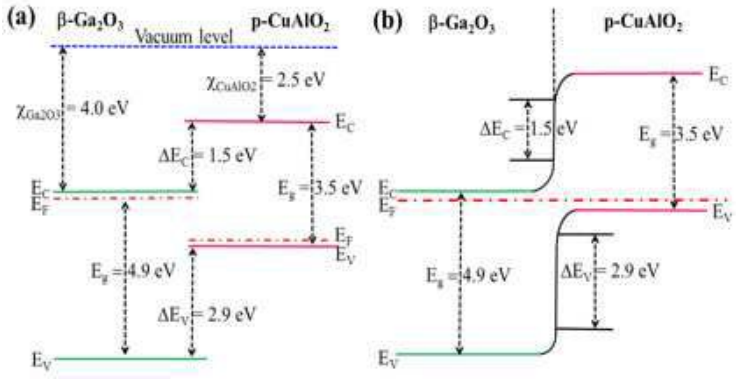
도면13



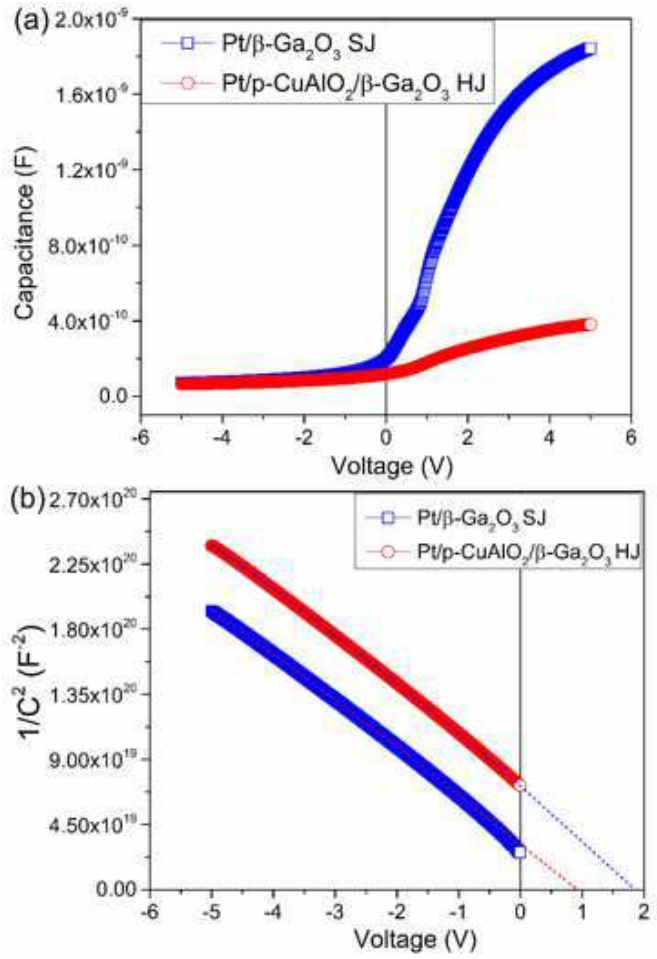
도면14



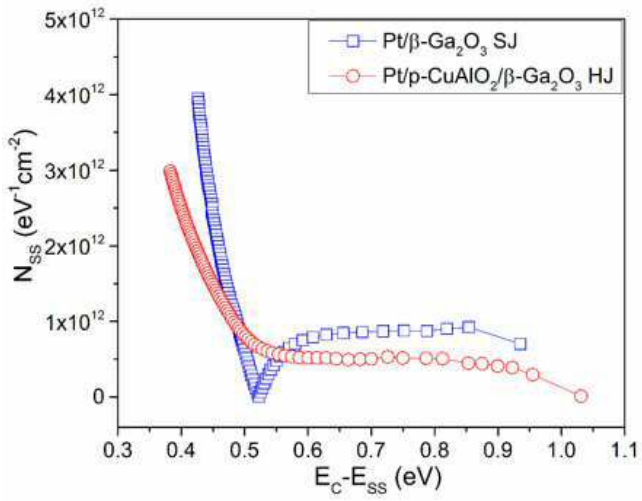
도면15


(a)
β-Ga2O3
Vacuum level
p-CuAlO2
χGa2O3 = 4.0 eV
χCuAlO2 = 2.5 eV
EC
ΔEC = 1.5 eV
Eg = 3.5 eV
EF
EV
Eg = 4.9 eV
ΔEV = 2.9 eV
(b)
β-Ga2O3
p-CuAlO2
ΔEC = 1.5 eV
Eg = 3.5 eV
Eg = 4.9 eV
ΔEV = 2.9 eV

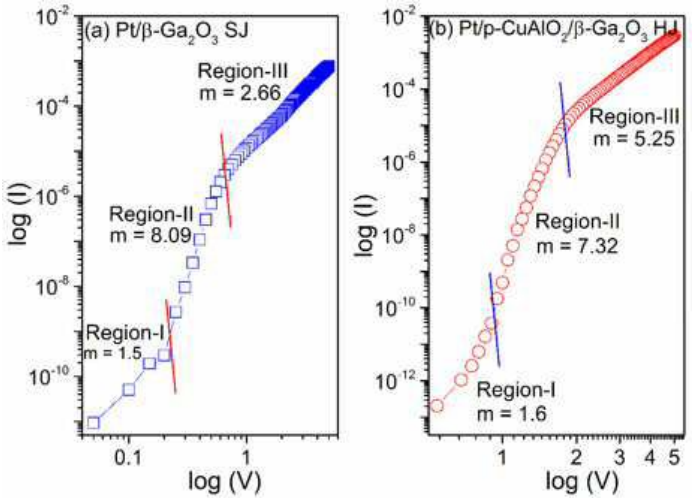
도면16


(a)
Pt/β-Ga2O3 SJ
Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
Capacitance (F)
Voltage (V)
(b)
Pt/β-Ga2O3 SJ
Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
1/C2 (F-2)
Voltage (V)

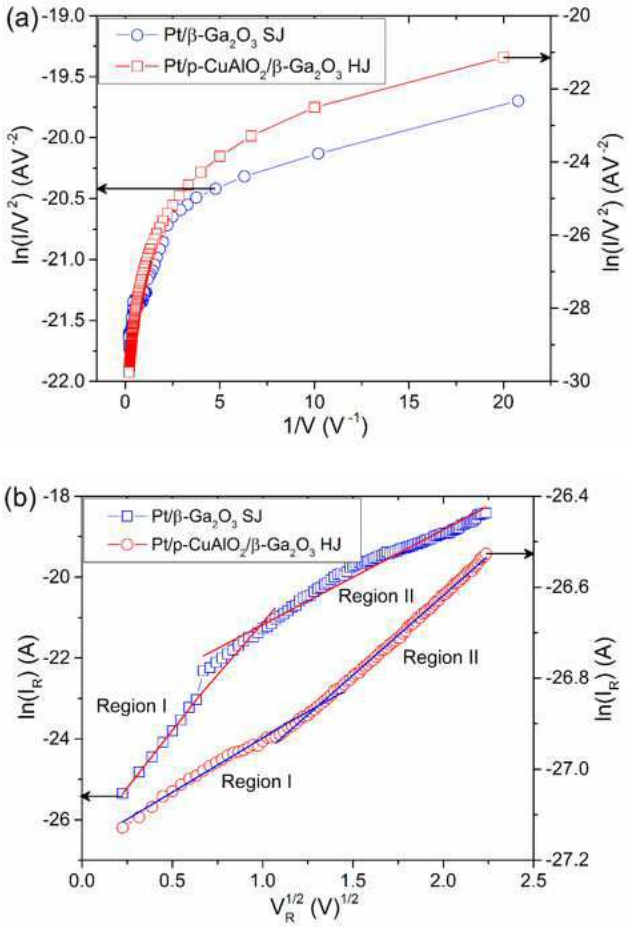
도면17


Pt/β-Ga2O3 SJ
Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
Nss (eV-1cm-2)
EC-ESS (eV)

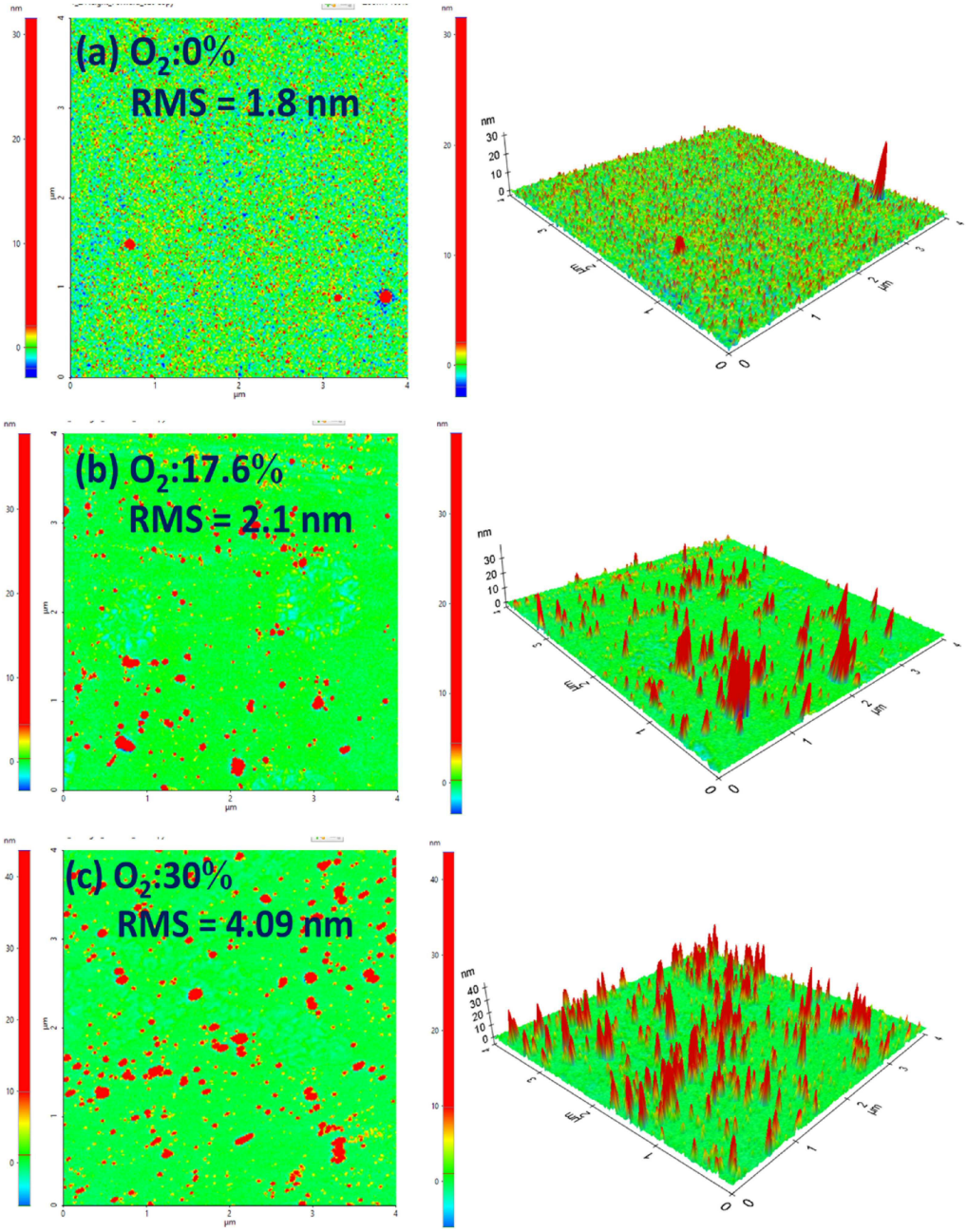
도면18


(a) Pt/β-Ga2O3 SJ
Region-III
m = 2.66
Region-II
m = 8.09
Region-I
m = 1.5
log (I)
log (V)
(b) Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
Region-III
m = 5.25
Region-II
m = 7.32
Region-I
m = 1.6
log (I)
log (V)

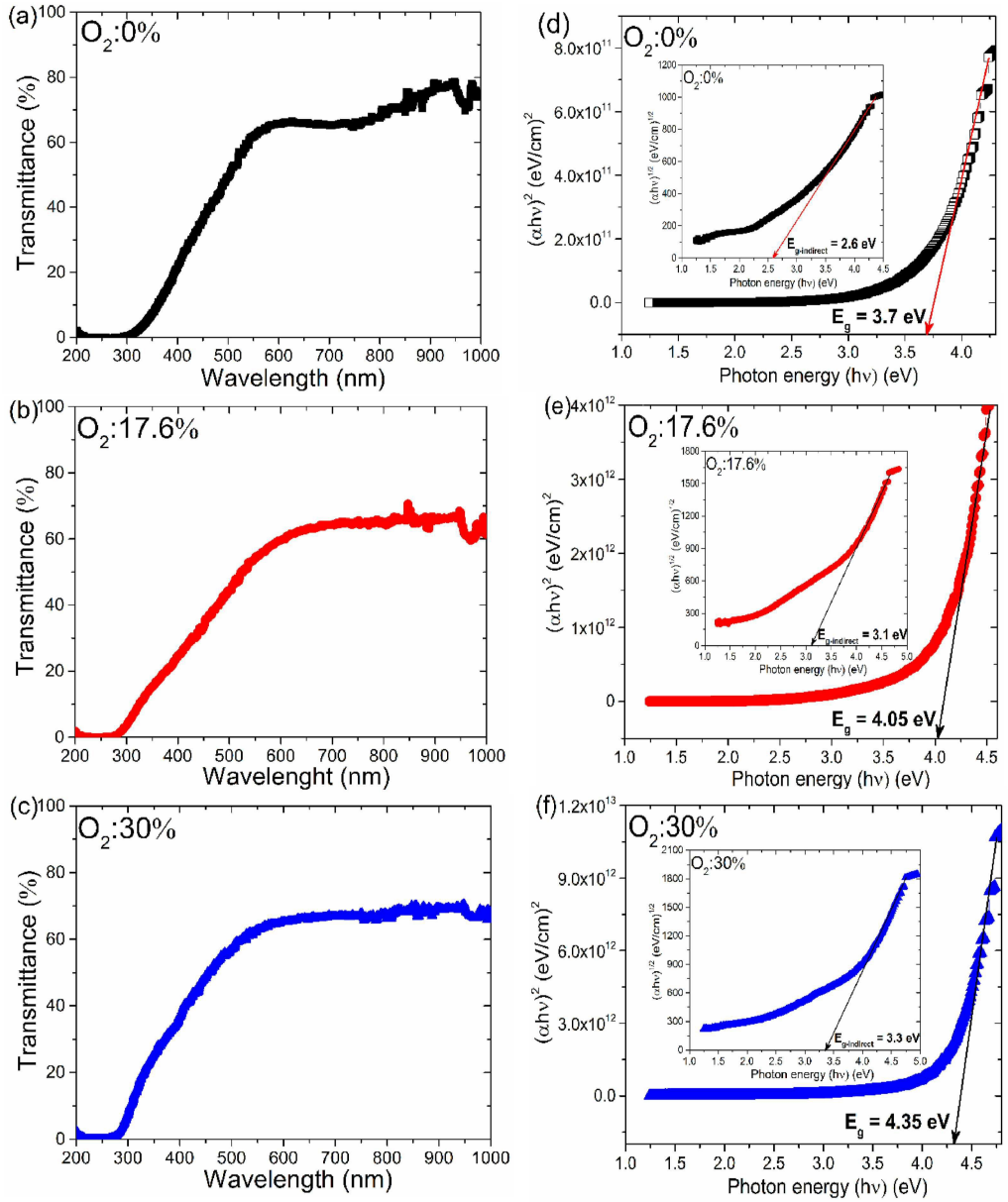
도면19


(a)
Pt/β-Ga2O3 SJ
Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
ln(I/V2) (AV-2)
ln(I/V2) (AV-2)
1/V (V-1)
(b)
Pt/β-Ga2O3 SJ
Pt/p-CuAlO2/β-Ga2O3 HJ
Region I
Region II
Region I
Region II
ln(IR) (A)
ln(IR) (A)
VR1/2 (V)1/2

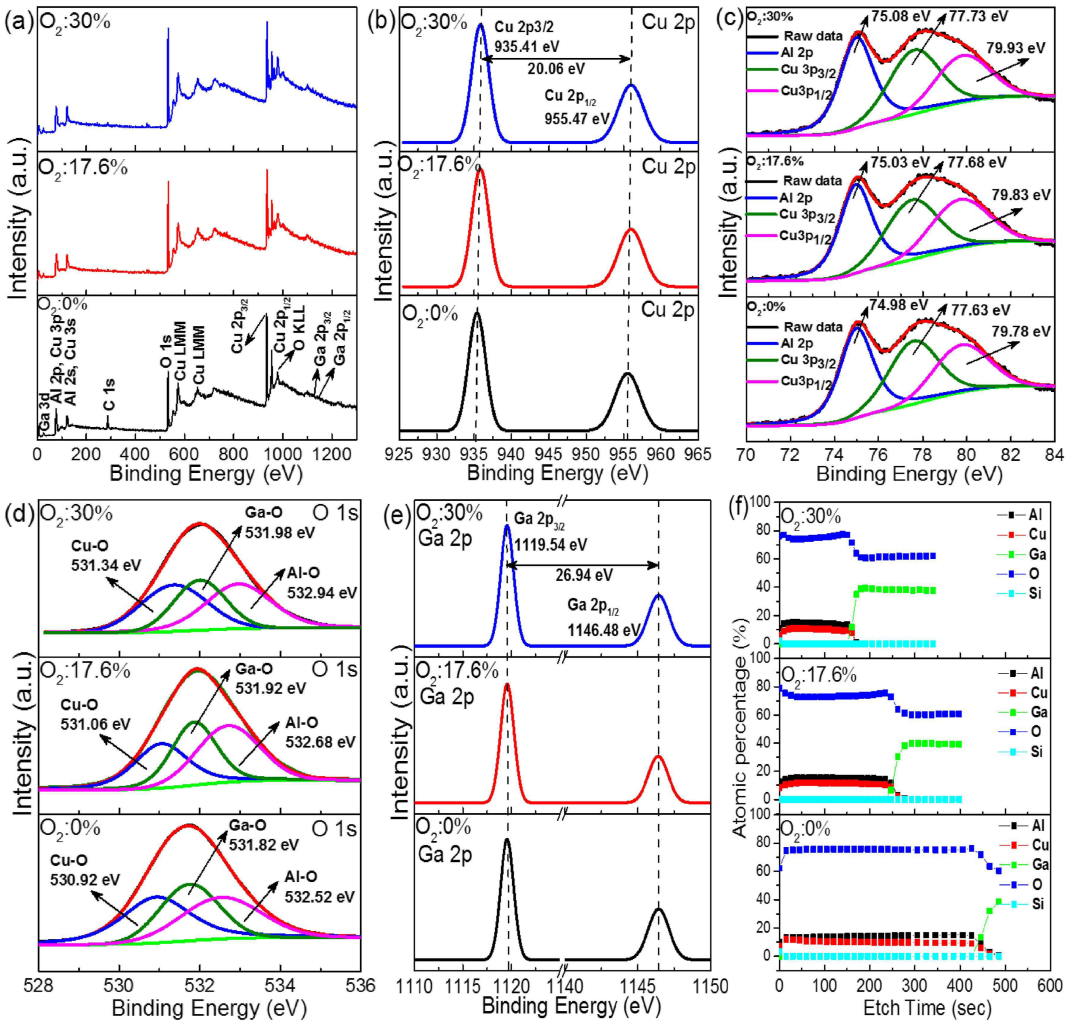
도면20



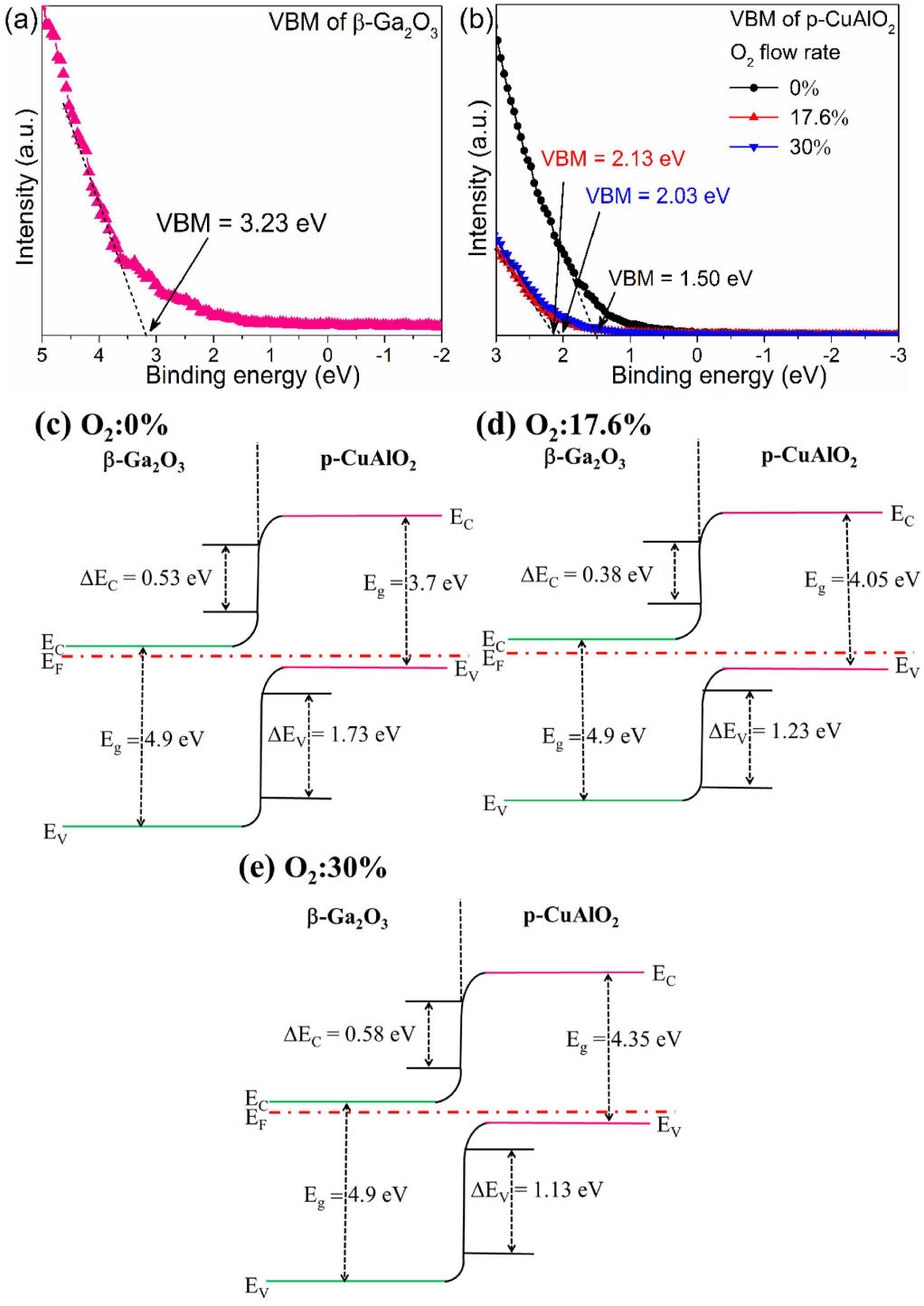
도면21


(a)
O2:0%
Transmittance (%)
Wavelength (nm)
(b)
O2:17.6%
Transmittance (%)
Wavelenght (nm)
(c)
O2:30%
Transmittance (%)
Wavelength (nm)
(d)
O2:0%
(αhν)2 (eV/cm)2
Photon energy (hν) (eV)
Eg-indirect = 2.6 eV
Eg = 3.7 eV
(e)
O2:17.6%
(αhν)2 (eV/cm)2
Photon energy (hν) (eV)
Eg-indirect = 3.1 eV
Eg = 4.05 eV
(f)
O2:30%
(αhν)2 (eV/cm)2
Photon energy (hν) (eV)
Eg-indirect = 3.3 eV
Eg = 4.35 eV

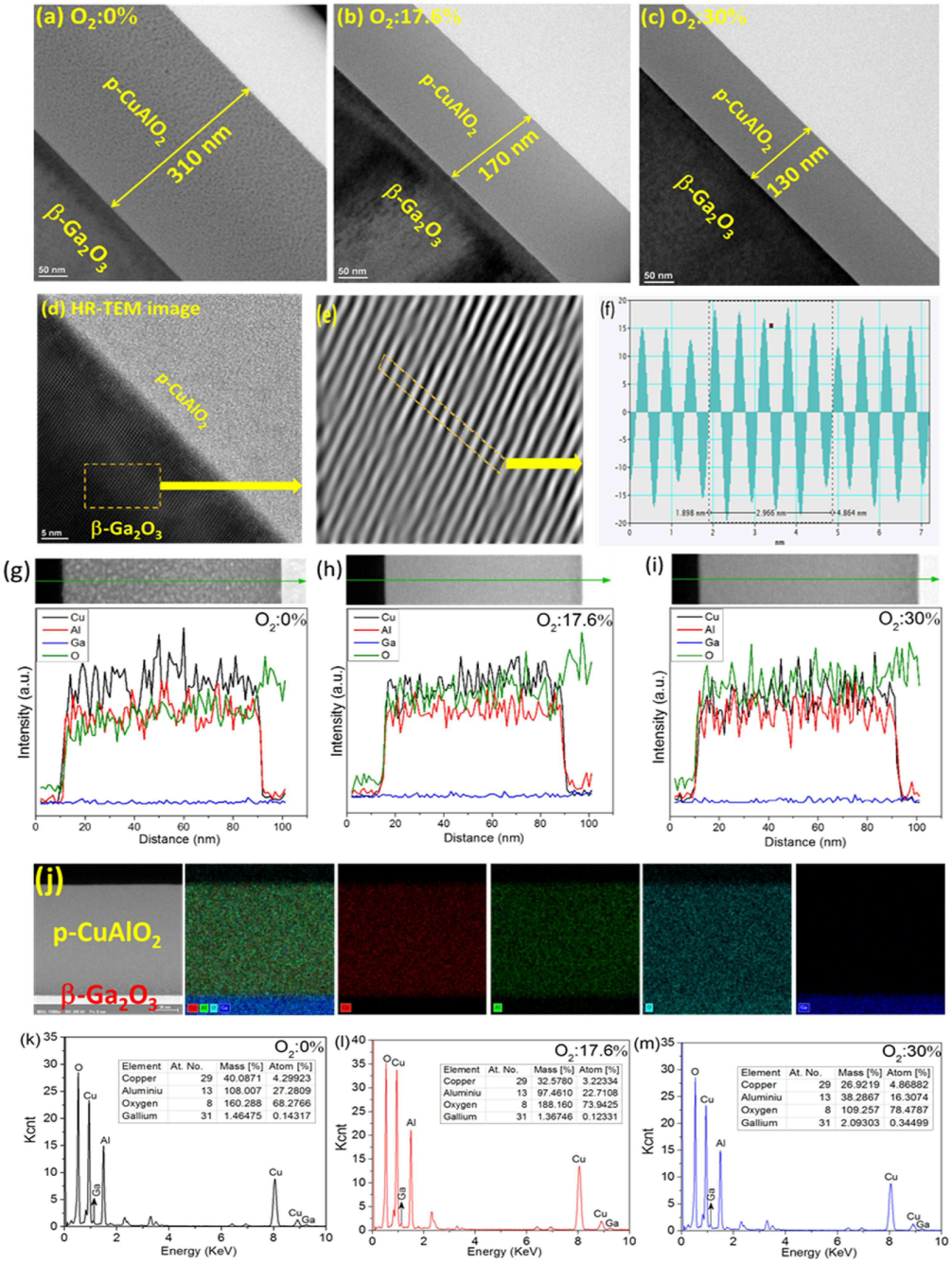
도면22


(a)
O2:30%
O2:17.6%
O2:0%
Intensity (a.u.)
Ga 3d
Al 2p, Cu 3p
Al 2s, Cu 3s
C 1s
O 1s
Cu LMM
Cu LMM
Cu 2p3/2
Cu 2p1/2
O KLL
Ga 2p3/2
Ga 2p1/2
Binding Energy (eV)
(b)
O2:30%
Cu 2p3/2
935.41 eV
20.06 eV
Cu 2p1/2
955.47 eV
Cu 2p
O2:17.6%
Cu 2p
O2:0%
Cu 2p
Intensity (a.u.)
Binding Energy (eV)
(c)
O2:30%
75.08 eV
77.73 eV
79.93 eV
Raw data
Al 2p
Cu 3p3/2
Cu3p1/2
O2:17.6%
75.03 eV
77.68 eV
79.83 eV
Raw data
Al 2p
Cu 3p3/2
Cu3p1/2
O2:0%
74.98 eV
77.63 eV
79.78 eV
Raw data
Al 2p
Cu 3p3/2
Cu3p1/2
Intensity (a.u.)
Binding Energy (eV)
(d)
O2:30%
O 1s
Ga-O
531.98 eV
Cu-O
531.34 eV
Al-O
532.94 eV
O2:17.6%
O 1s
Ga-O
531.92 eV
Cu-O
531.06 eV
Al-O
532.68 eV
O2:0%
O 1s
Ga-O
531.82 eV
Cu-O
530.92 eV
Al-O
532.52 eV
Intensity (a.u.)
Binding Energy (eV)
(e)
O2:30%
Ga 2p
Ga 2p3/2
1119.54 eV
26.94 eV
Ga 2p1/2
1146.48 eV
O2:17.6%
Ga 2p
O2:0%
Ga 2p
Intensity (a.u.)
Binding Energy (eV)
(f)
O2:30%
O2:17.6%
O2:0%
Al
Cu
Ga
O
Si
Atomic percentage (%)
Etch Time (sec)

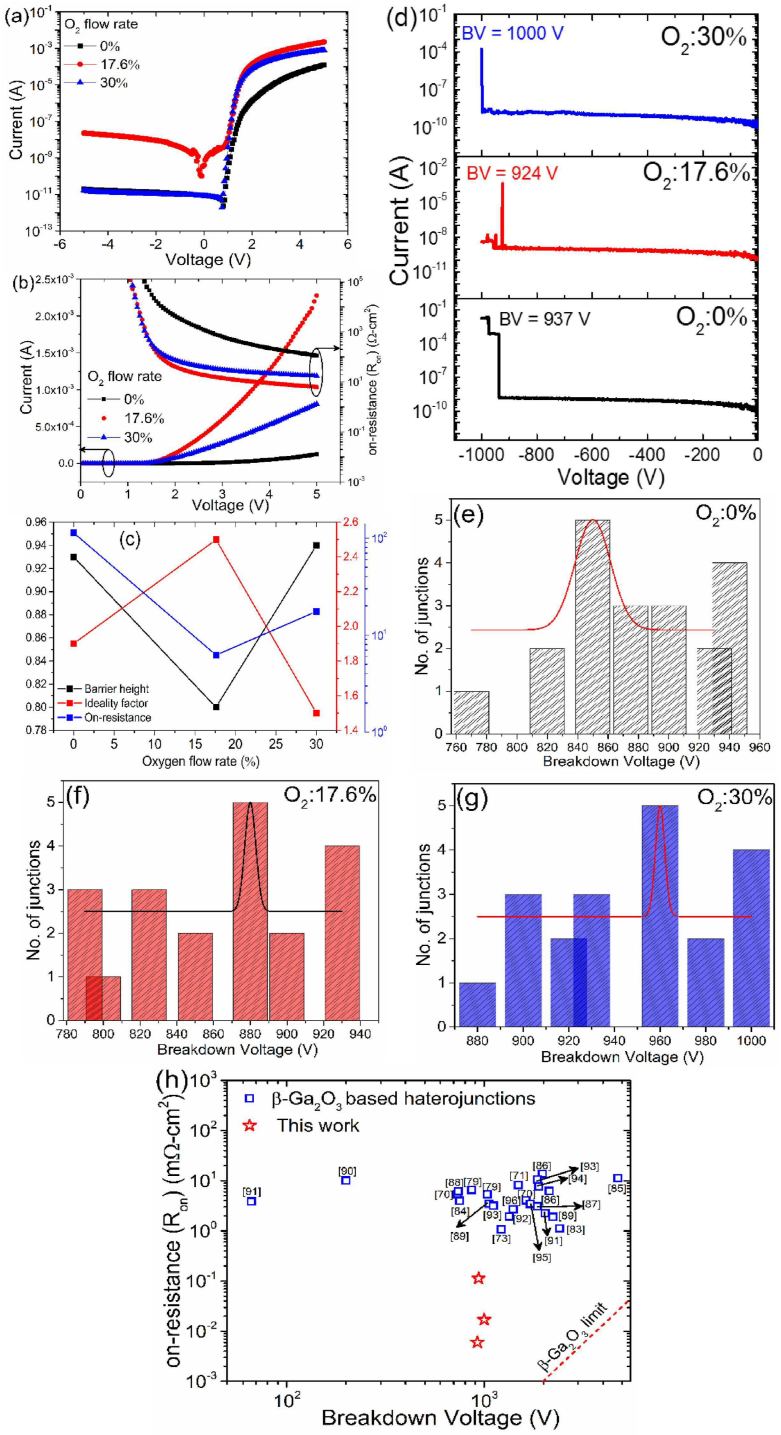
도면23


(a)
VBM of β-Ga2O3
Intensity (a.u.)
VBM = 3.23 eV
Binding energy (eV)
(b)
VBM of p-CuAlO2
O2 flow rate
0%
17.6%
30%
VBM = 2.13 eV
VBM = 2.03 eV
VBM = 1.50 eV
Intensity (a.u.)
Binding energy (eV)
(c) O2:0%
β-Ga2O3
p-CuAlO2
ΔEC = 0.53 eV
Eg = 3.7 eV
Eg = 4.9 eV
ΔEV = 1.73 eV
(d) O2:17.6%
β-Ga2O3
p-CuAlO2
ΔEC = 0.38 eV
Eg = 4.05 eV
Eg = 4.9 eV
ΔEV = 1.23 eV
(e) O2:30%
β-Ga2O3
p-CuAlO2
ΔEC = 0.58 eV
Eg = 4.35 eV
Eg = 4.9 eV
ΔEV = 1.13 eV

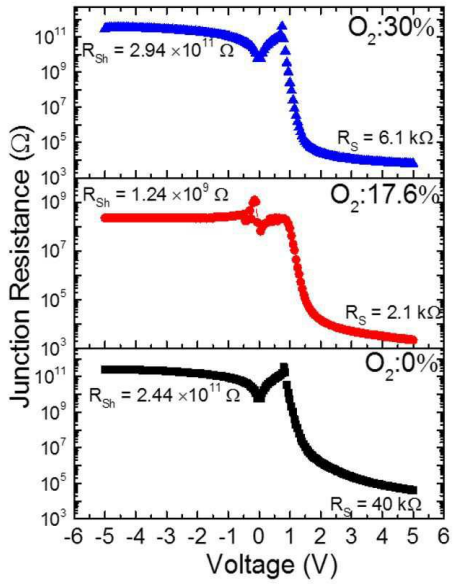
도면24


(a) O2:0%
p-CuAlO2
310 nm
β-Ga2O3
50 nm
(b) O2:17.6%
p-CuAlO2
170 nm
β-Ga2O3
50 nm
(c) O2:30%
p-CuAlO2
130 nm
β-Ga2O3
50 nm
(d) HR-TEM image
p-CuAlO2
β-Ga2O3
5 nm
(e)
(f)
1.898 nm
2.966 nm
4.864 nm
nm
(g)
(h)
(i)
Cu
Al
Ga
O
O2:0%
O2:17.6%
O2:30%
Intensity (a.u.)
Distance (nm)
(j)
p-CuAlO2
β-Ga2O3
(k)
(l)
(m)
O2:0%
O2:17.6%
O2:30%
Element At. No. Mass [%] Atom [%]
Copper 29 40.0871 4.29923
Aluminiu 13 108.007 27.2809
Oxygen 8 160.288 68.2766
Gallium 31 1.46475 0.14317
Copper 29 32.5780 3.22334
Aluminiu 13 97.4610 22.7108
Oxygen 8 188.160 73.9425
Gallium 31 1.36746 0.12331
Copper 29 26.9219 4.86882
Aluminiu 13 38.2867 16.3074
Oxygen 8 109.257 78.4787
Gallium 31 2.09303 0.34499
Kcnt
Energy (KeV)

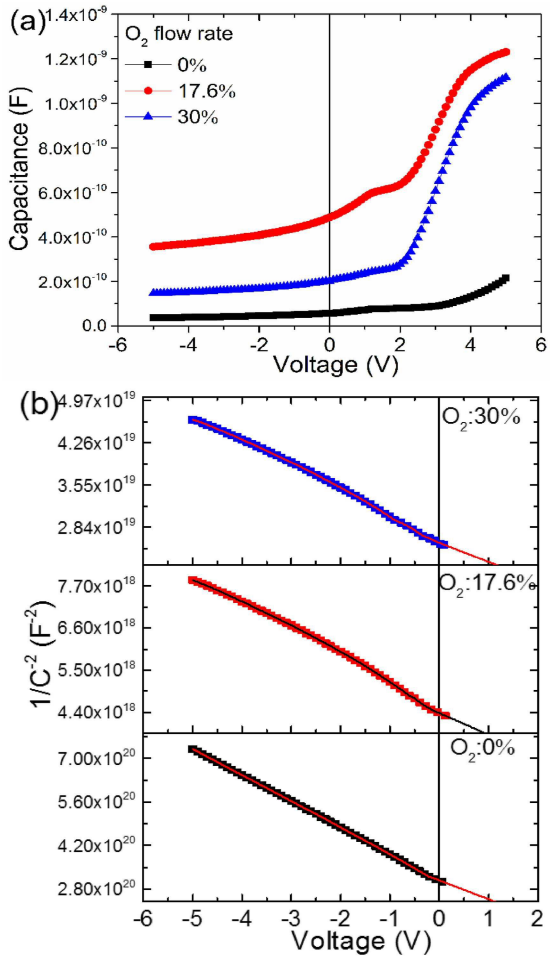
도면25


(a)
O2 flow rate
0%
17.6%
30%
Current (A)
Voltage (V)
(b)
Current (A)
on-resistance (Ron) (Ω-cm2)
O2 flow rate
0%
17.6%
30%
Voltage (V)
(c)
Barrier height
Ideality factor
On-resistance
Oxygen flow rate (%)
(d)
BV = 1000 V
O2:30%
BV = 924 V
O2:17.6%
BV = 937 V
O2:0%
Current (A)
Voltage (V)
(e)
O2:0%
No. of junctions
Breakdown Voltage (V)
(f)
O2:17.6%
No. of junctions
Breakdown Voltage (V)
(g)
O2:30%
No. of junctions
Breakdown Voltage (V)
(h)
β-Ga2O3 based haterojunctions
This work
β-Ga2O3 limit
on-resistance (Ron) (mΩ-cm2)
Breakdown Voltage (V)

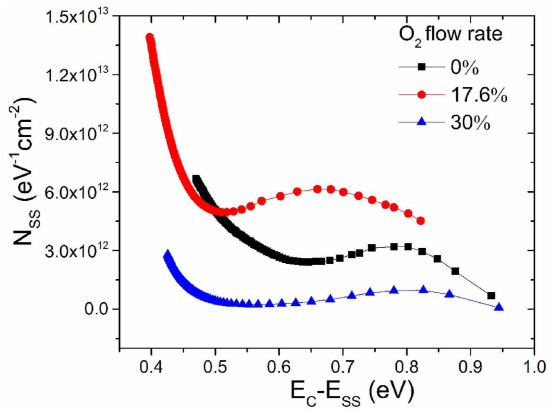
도면26


Junction Resistance (Ω)
Voltage (V)
O2:30%
RSh = 2.94 ×10^11 Ω
RS = 6.1 kΩ
O2:17.6%
RSh = 1.24 ×10^9 Ω
RS = 2.1 kΩ
O2:0%
RSh = 2.44 ×10^11 Ω
RS = 40 kΩ

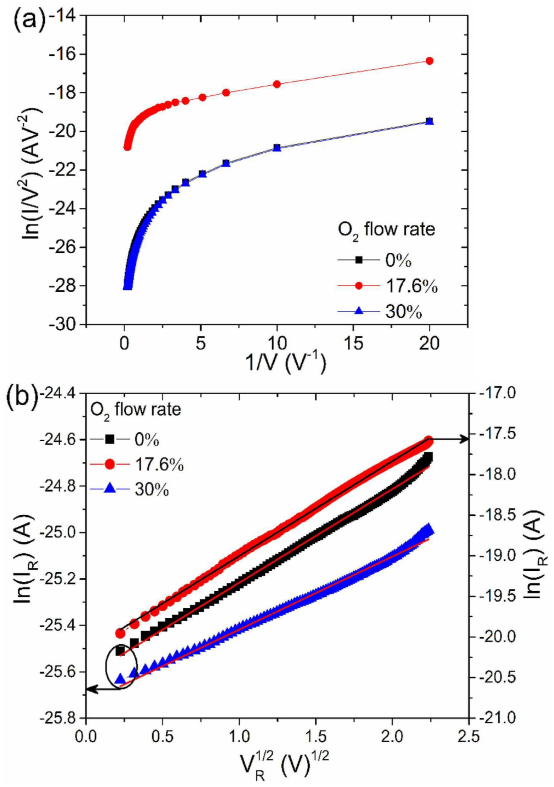
도면27


(a)
Capacitance (F)
O2 flow rate
0%
17.6%
30%
Voltage (V)
(b)
1/C-2 (F-2)
O2:30%
O2:17.6%
O2:0%
Voltage (V)

도면28


O2 flow rate
0%
17.6%
30%
NSS (eV-1cm-2)
EC-ESS (eV)

도면29


(a)
O2 flow rate
0%
17.6%
30%
ln(I/V2) (AV-2)
1/V (V-1)
(b)
O2 flow rate
0%
17.6%
30%
ln(IR) (A)
ln(IR) (A)
VR1/2 (V)1/2