(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2025년06월27일
(11) 등록번호 10-2826939
(24) 등록일자 2025년06월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H10F 71/00 (2025.01) *H10F 30/227* (2025.01)
(52) CPC특허분류
H10F 71/00 (2025.01)
H10F 30/227 (2025.01)
(21) 출원번호 10-2024-0038909
(22) 출원일자 2024년03월21일
심사청구일자 2024년03월21일
(56) 선행기술조사문헌
CN105576073 A
CN115312617 A
KR1020180051602 A

(73) 특허권자
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
임유승
서울특별시 송파구 양재대로 1218 올림픽선수기자촌 236-602
라비드 마다니
서울특별시 광진구 능동로 209 대양AI센터 328호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
홍승훈

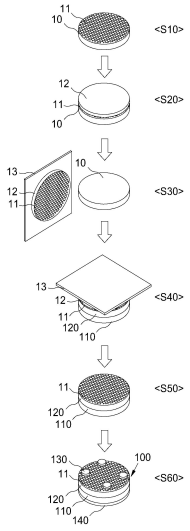
전체 청구항 수 : 총 11 항 심사관 : 허영한

(54) 발명의 명칭 **쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 및 그 제조 방법**

(57) 요 약

쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법은, 그래핀 단일층을 실리콘카바이드 기판 상에 성장시키는 단계, 상기 그래핀 단일층을 n형 산화갈륨 에피층이 형성된 n형 산화갈륨 기판에 에 전사하는 단계, 상기 n형 산화갈륨 기판의 하면에 오믹 접촉층을 증착하는 단계 및 상기 그래핀 단일층이 전사된 n형 산화갈륨 에피층에 쇼트키 접촉층을 증착하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도1



(72) 발명자

민지영

서울특별시 광진구 광나루로 454

박장혁

서울특별시 광진구 동일로56라길 20, B01호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415184164
과제번호	00144027
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술기획평가원
연구사업명	화합물소재기반차세대전력반도체기술개발사업(R&D)
연구과제명	1.2kV급 저손실 산화갈륨 트랜지스터 개발
과제수행기관명	파워큐브세미(주)
연구기간	2022.04.01 ~ 2025.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415189278
과제번호	P0012451
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술진흥원
연구사업명	산업혁신인재성장지원
연구과제명	차세대전력반도체 소자제조 전문인력양성
과제수행기관명	한국반도체연구조합
연구기간	2020.03.01 ~ 2025.02.28

공지예외적용 : 있음

명 세 서

청구범위

청구항 1

그래핀 단일층을 실리콘카바이드 기판 상에 성장시키는 단계;

상기 그래핀 단일층을 n형 산화갈륨 에피층이 형성된 n형 산화갈륨 기판에 에 전사하는 단계;

상기 n형 산화갈륨 기판의 하면에 오믹 접촉층을 증착하는 단계; 및

상기 그래핀 단일층이 전사된 n형 산화갈륨 에피층에 쇼트키 접촉층을 증착하는 단계를 포함하는 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서, 상기 그래핀 단일층을 n형 산화갈륨 에피층이 형성된 n형 산화갈륨 기판에 전사하는 단계는,

니켈을 상기 그래핀 단일층이 형성된 상기 실리콘카바이드 기판 상에 증착하여 니켈 박막을 형성하는 단계;

열 분리 테이프를 상기 니켈 박막에 부착하는 단계;

상기 열 분리 테이프를 이용하여 상기 니켈 박막을 상기 실리콘카바이드 기판에서 박리하는 단계;

박리된 니켈 박막을 n형 산화갈륨 에피층이 형성된 n형 산화갈륨 기판에 배치하는 단계; 및

상기 니켈 박막을 식각하는 단계를 포함하는, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법.

청구항 3

청구항 1에 있어서, 상기 그래핀 단일층이 전사된 n형 산화갈륨 에피층에 쇼트키 접촉층을 증착하는 단계 이후에,

상기 쇼트키 접촉층, 상기 n형 산화갈륨 에피층, 상기 n형 산화갈륨 기판 및 상기 오믹 접촉층으로 구성된 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드를 후열처리하는 단계를 더 포함하는, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법.

청구항 4

청구항 3에 있어서, 상기 후열처리는 600℃에서 실행되는, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법.

청구항 5

청구항 1에 있어서, 상기 그래핀 단일층을 실리콘카바이드 기판 상에 성장시키는 단계는,

상기 실리콘카바이드 기판을 세척하는 단계;

세척된 실리콘카바이드 기판을 공기 분위기에서 흑연화하여 상기 그래핀 단일층을 형성하는 단계;

형성된 그래핀 단일층을 아르곤 분위기에서 열처리하는 단계를 포함하는, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법.

청구항 6

청구항 1에 있어서, 상기 쇼트키 접촉층은 텅스텐 타겟으로 스퍼터링하여 상기 n형 산화갈륨 에피층에 부분적으로 증착된 텅스텐 박막인, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법.

청구항 7

n형 산화갈륨 기판;

상기 n형 산화갈륨 기판에 에피택셜 성장된 n형 산화갈륨 에피층;

상기 n형 산화갈륨 에피층에 전사된 그래핀 단일층;

상기 그래핀 단일층이 전사된 상기 n형 산화갈륨 에피층 표면에 패터닝된 쇼트키 접촉층; 및

상기 n형 산화갈륨 기판의 하면에 증착된 오믹 접촉층을 포함하는 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드.

청구항 8

청구항 7에 있어서, 상기 그래핀 단일층은 층 분해 그래핀 전사 방식에 의해 상기 n형 산화갈륨 에피층에 전사되는, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드.

청구항 9

청구항 8에 있어서, 상기 층 분해 그래핀 전사는

상기 그래핀 단일층이 성장된 실리콘카바이드 기판 상에 니켈 박막을 증착하고, 상기 니켈 박막을 상기 실리콘카바이드 기판에서 박리하고, 박리된 니켈 박막을 상기 n형 산화갈륨 에피층에 배치한 후, 상기 니켈 박막을 식각하는 과정을 포함하는, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드.

청구항 10

청구항 8에 있어서, 상기 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드는 600℃에서 후열처리되는, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드.

청구항 11

청구항 7에 있어서, 상기 쇼트키 접촉층은 텅스텐 타겟으로 스퍼터링하여 상기 n형 산화갈륨 에피층에 부분적으로 증착된 텅스텐 박막인, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 심자외선 포토다이오드에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 초광폭 밴드갭 반도체(Ultrawide bandgap)는 280~315nm 파장대의 UVB(Ultraviolet B) 부터 100~280nm 파장대의 UVC(Ultraviolet C) 까지를 포함하는 심자외선(Deep ultraviolet; DUV) 광 검출기 영역에서 혁신적인 기술로 부상하여, 까다로운 DUV에서 독보적인 이점을 제공하고 있다. 질화갈륨(GaN), 질화알루미늄(AlN), 산화갈륨(Ga_2O_3) 및 기타 반도체와 같은 재료로 대표되는 초광폭 밴드갭 반도체는 광폭 및 초광폭 밴드갭을 가지고 있어서, UVA부터 UVC까지의 빛을 탁월한 감도와 정밀도로 감지할 수 있다.

[0003] 그러나 초광폭 밴드갭 반도체 채택에는 특별한 어려움이 있다. GaN 기반 광검출기는 재료 품질 및 성장에 문제가 있어서, 고품질의 GaN 재료를 양산하기 쉽지 않다. GaN(~3.5eV)과 AlN(~6.2eV)의 밴드갭이 상이하기 때문에, 더 높은 Al 함량(x > 0.4)을 가진 AlxGayN 기반 장치가 UVB 및 UVC에서 최대 검출성(detectivity)을 달성하는 밴드갭을 위해 사용되고 있다. AlGaN은 일반적으로 $10^7 cm^{-2}$ 이상의 높은 전위 밀도로 인해 높은 트랩 밀도가 밴드갭 엔지니어링 및 광검출기 응답에 영향을 미친다. 또한 AlGaN는 p형 반도체로 동작하기 어렵다. 그럼에도 불구하고 GaN 및 AlGaN 기반 UV 광검출기는 해당 분야에서 가장 중요한 광검출기 중 하나로 간주되고 있다.

[0004] 지난 몇 년간 연구진들은 DUV 영역의 광학적 밴드갭(약 ~4.8 eV의 초광대역갭)과 ~8 MV/cm의 높은 파괴 전기장, 높은 포화 속도 등 우수한 전기적 특성을 보이는 Ga_2O_3와 같은 소재 외에 다른 광폭 및 초광폭 밴드갭 반도체를 사용할 가능성을 연구해 왔다. 또한 Ga_2O_3는 열적으로 안정할 뿐 아니라 양산이 가능하다. Ga_2O_3는 다양한 상에 존재하며, 그 중 베타(β) 상은 열역학적으로 가장 안정적이며, 그로 인해 광범위하게 연구되고 있다. β-Ga_2O_3의 뛰어난 고유 특성은 솔라 블라인드 광검출기(solar-blind photodetector)와 같은 전력 전자공학 및 광전자공학을 포함한 다양한 응용 분야에서 β-Ga_2O_3를 잠재적인 후보가 될 수 있게 했다. 특히, 솔라 블라인드 응

용 분야에서 고도로 선택적인 자외선을 감지하는 기능은 UV 이미징, 화염 모니터링, 오존 탐지, 우주 통신, 미사일 유도 및 기타 응용 분야에서 가장 중요한 기능이다.

[0005] 금속-반도체-금속(MSM), 쇼트키 장벽 광 다이오드(Schottky barrier photodiodes; SBPD), 다른 물질과 이종 구조를 형성하는 NiO, Cu_2O, Ag_2O와 같은 p형 산화물 반도체를 사용한 p-n 다이오드 등 다양한 구조의 β-Ga_2O_3 광검출기가 연구되고 있다. β-Ga_2O_3 기반 SBPD는 제작의 용이성, 빠른 광 반응, 자체 전력 작동으로 인해 큰 관심을 받고 있다. β-Ga_2O_3를 이용한 쇼트키 장벽 형성에는 백금, 니켈, 금, 은 및 텅스텐과 같은 일부 금속이 사용된다.

[0006] 텅스텐은 탁월한 특성으로 인해 반도체 응용 분야에서 중요한 역할을 한다. 융점이 매우 높아 고온 환경에 탁월하므로 전력 전자 장치에 이상적이다. 또한 뛰어난 열 안정성과 전기 전도성은 효율적인 전하 이동을 지원한다. 이러한 특성으로 인해 텅스텐은 안정적인 고성능 반도체 컨택을 위한 핵심 소재로 자리매김하고 있다. 예를 들어, *Fares et al, Temperature-Dependent Electrical Characteristics of β-Ga_2O_3 Diodes with W Schottky Contacts up to 500° C. ECS J. Solid State Sci. Technol. 2019, 8 (7), Q3007. https://doi.org/10.1149/2.0011907jss*에서는 500° C를 초과하는 온도에서 작동할 수 있는 W/β-Ga_2O_3 SBD에 대한 연구를 수행하여 반도체 응용 분야에서 텅스텐의 놀라운 열 성능을 입증했다. 그러나 β-Ga_2O_3 SBPD는 빛 아래에서 불안정하고 낮은 반응성을 포함하여 몇 가지 문제를 가지고 있다. 특히, 한 가지 중요한 단점은 쇼트키 장벽과 쇼트키 장벽 계면의 불균일성으로 인해 SBPD에서 관찰되는 암전류가 상대적으로 높다는 점이다.

[0007] 금속/β-Ga_2O_3 계면에 높은 전하 트랩이 존재하여 발생하는 쇼트키 장벽 계면의 불균일성은 표면 재결합으로 인한 전자-정공 쌍의 분리 및 추출 성능에 큰 영향을 미친다. 이 효과는 SBPD의 상승 및 감쇠 시간뿐만 아니라 반응성에도 영향을 주로 미친다. 이러한 문제를 해결하기 위해 β-Ga_2O_3 표면 도핑, 2차원 중간층, 양자점 및 기타 나노 물질 등 여러 가지 접근 방식이 모색되고 있다. 그 중에서도 그래핀은 넓은 스펙트럼 범위, 단일 원자층이 여러 광 경로를 허용하는 높은 빛 흡수율, 초고속 응답, 큰 전자-정공 쌍으로 높은 양자 효율로 인해 독특한 광응답 특성을 나타낸다. 이러한 그래핀의 고유한 특성에도 불구하고, 다양한 응용 분야에서 결함 없는 그래핀을 위한 전사 기술(transferring technology)과 후처리 과정에서의 손상 완화 등의 과제가 남아 있다. 예를 들어 습식으로 전사된 그래핀은 주름, 찢김, 잔여물로 인한 오염 또는 표면 산화 가능성이 있을 수 있다. 또한 화학 기상 증착 기법으로 직접 성장한 그래핀은 일반적으로 다결정 특성을 나타내며 후속 공정 중에 손상되기 쉽다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 중국 특허공개공보 제115312617호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드의 감도와 스펙트럼 응답을 향상시키고자 한다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명의 일측면에 따르면, 그래핀 단일층을 실리콘카바이드 기판 상에 성장시키는 단계, 상기 그래핀 단일층을 n형 산화갈륨 에피층이 형성된 n형 산화갈륨 기판에 에 전사하는 단계, 상기 n형 산화갈륨 기판의 하면에 오믹 접촉층을 증착하는 단계 및 상기 그래핀 단일층이 전사된 n형 산화갈륨 에피층에 쇼트키 접촉층을 증착하는 단계를 포함하는 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법이 제공된다.

[0011] 일 실시예로, 상기 그래핀 단일층을 n형 산화갈륨 에피층이 형성된 n형 산화갈륨 기판에 전사하는 단계는, 니켈을 상기 그래핀 단일층이 형성된 상기 실리콘카바이드 기판 상에 증착하여 니켈 박막을 형성하는 단계, 열 분리 테이프를 상기 니켈 박막에 부착하는 단계, 상기 열 분리 테이프를 이용하여 상기 니켈 박막을 상기 실리콘카바이드 기판에서 박리하는 단계, 박리된 니켈 박막을 n형 산화갈륨 에피층이 형성된 n형 산화갈륨 기판에 배치하

는 단계 및 상기 니켈 박막을 식각하는 단계를 포함할 수 있다.

[0012] 일 실시예로, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 방법은, 상기 그래핀 단일층이 전사된 n형 산화갈륨 에피층에 쇼트키 접촉층을 증착하는 단계 이후에, 상기 쇼트키 접촉층, 상기 n형 산화갈륨 에피층, 상기 n형 산화갈륨 기판 및 상기 오믹 접촉층으로 구성된 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드를 후열처리하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0013] 일 실시예로, 상기 후열처리는 600℃에서 실행될 수 있다.

[0014] 일 실시예로, 상기 그래핀 단일층을 실리콘카바이드 기판 상에 성장시키는 단계는, 상기 실리콘카바이드 기판을 세척하는 단계, 세척된 실리콘카바이드 기판을 공기 분위기에서 흑연화하여 상기 그래핀 단일층을 형성하는 단계, 형성된 그래핀 단일층을 아르곤 분위기에서 열처리하는 단계를 포함할 수 있다.

[0015] 일 실시예로, 상기 쇼트키 접촉층은 텅스텐 타겟으로 스퍼터링하여 상기 n형 산화갈륨 에피층에 부분적으로 증착된 텅스텐 박막일 수 있다.

[0016] 본 발명의 다른 측면에 따르면, n형 산화갈륨 기판, 상기 n형 산화갈륨 기판에 에피택셜 성장된 n형 산화갈륨 에피층, 상기 n형 산화갈륨 에피층에 전사된 그래핀 단일층, 상기 그래핀 단일층이 전사된 상기 n형 산화갈륨 에피층 표면에 패터닝된 쇼트키 접촉층 및 상기 n형 산화갈륨 기판의 하면에 증착된 오믹 접촉층을 포함할 수 있다.

[0017] 일 실시예로, 상기 그래핀 단일층은 층 분해 그래핀 전사 방식에 의해 상기 n형 산화갈륨 에피층에 전사될 수 있다.

[0018] 일 실시예로, 상기 층 분해 그래핀 전사는 상기 그래핀 단일층이 성장된 실리콘카바이드 기판 상에 니켈 박막을 증착하고, 상기 니켈 박막을 상기 실리콘카바이드 기판에서 박리하고, 박리된 니켈 박막을 상기 n형 산화갈륨 에피층에 배치한 후, 상기 니켈 박막을 식각하는 과정을 포함할 수 있다.

[0019] 일 실시예로, 상기 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드는 600℃에서 후열처리될 수 있다.

[0020] 일 실시예로, 상기 쇼트키 접촉층은 텅스텐 타겟으로 스퍼터링하여 상기 n형 산화갈륨 에피층에 부분적으로 증착된 텅스텐 박막일 수 있다.

발명의 효과

[0021] 본 발명의 실시예에 따르면, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드에서 높은 감도와 넓은 스펙트럼 응답을 구현할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0022] 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 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 과정을 예시적으로 도시한 도면이다.

도 2a는 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드의 라만 스펙트럼이고, 도 2b 내지 도 2d는 제1 샘플 내지 제3 샘플의 TEM 이미지이다.

도 3a은 그래핀 단일층이 전사된 n형 산화갈륨 에피층의 SEM 이미지이고, 도 3b는 제1 샘플의 STEM-EDS 이미지이며, 도 3c 및 도 3d는 제2 샘플 및 제3 샘플의 HR-TEM 이미지 및 STEM-EDS 이미지이다.

도 4a는 β-Ga_2O_3의 KPFM 이미지이고, 도 4b는 그래핀의 KPFM 이미지이고, 도 4c는 β-Ga_2O_3와 그래핀의 대응하는 전위 프로파일이며, 도 4d는 그래핀/β-Ga_2O_3의 에너지 밴드 다이어그램이다.

도 5a 내지 도 5f는 그래핀 단일층에 의한 광검출기의 광전류 변화를 나타낸 그래프이다.

도 6은 제1 샘플 내지 제4 샘플의 전류-잡음 스펙트럼이다.

도 7a 및 도 7b는 제1 샘플 내지 제4 샘플의 EQE 그래프이다.

도 8a 내지 도 8f는 후열처리에 의한 광검출기의 광전류 변화를 나타낸 그래프이다.

도 9는 제3 샘플 및 제4 샘플의 전류-전압 그래프이다.

도 10a 내지 도 10f는 제1 내지 제4 샘플 시간 의존적 광전류 밀도 그래프이다.

도 11a 내지 도 11d는 제1 내지 제4 샘플에 대해 측정된 상승 및 감쇠 시간 그래프이다.

도 12a 및 12b는 제1 내지 제4 샘플에 대해 측정된 커패시턴스-전압 그래프이다.

도 13a 내지 13d는 제1 내지 제4 샘플에 대해 측정된 광전류 밀도 그래프이다.

도 14a 및 도 14b는 동작 온도에 따른 제2 샘플 및 제3 샘플의 광전류 밀도 그래프이다.

도 15a 내지 도 15f는 제1 샘플 및 제2 샘플에 대한 재결합률, 광생성률 및 정공 프로파일의 시뮬레이션 결과를 나타낸 도면이다.

도 16a 내지 도 16f는 상이한 온도로 후열처리된 샘플을 상이한 작동 온도에서 구동하여 측정한 전압-전류 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 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.

[0024] 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.

[0025] 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.

[0026] 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.

[0027] "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.

[0028] 이하, 본 발명의 실시예에 대해 관련 도면들을 참조하여 상세히 설명하기로 한다. 상세한 설명 전체에 걸쳐, 동일하거나 유사한 구성 요소는 동일한 도면 번호를 참조하여 설명한다.

[0029] 도 1은 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드 제조 과정을 예시적으로 도시한 도면이다.

[0030] 도 1을 참조하면, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(100)는 n형 산화갈륨 기판(110), n형 산화갈륨 기판(110)의 상면에 형성된 n형 산화갈륨 에피층(120), n형 산화갈륨 에피층(120)의 상면에 전사된 그래핀 단일층(11), 그래핀(11) 상에 형성된 텅스텐 전극(130) 및 n형 산화갈륨 기판(110)의 하면에 형성된 하부 전극(140)을 포함할 수 있다.

[0031] S10에서, n형 산화갈륨 에피층(120)에 전사될 그래핀 단일층(11)을 성장시킨다. 축상 반절연(On-axis semi-insulating) 4H-SiC(0001) 웨이퍼(10)를 황산과 과산화수소 용액의 혼합물을 사용하여 20분간 세척(cleaning)한다. 세척한 4H-SiC 웨이퍼(10)를 아세톤, 이소프로판올 및 탈이온수에서 각각 5분간 초음파 처리한다. 초음파 처리된 4H-SiC 웨이퍼(10)는 흑연화(graphitization)를 위해 퍼니스에 로딩된다. 흑연화 공정은 공기 분위기에서 진행되되, 약 1,600℃의 인-시츄 수소 세척을 포함하며, 이후 그래핀 성장을 위해 4H-SiC 웨이퍼(10)를 아르곤 분위기에서 약 1,770℃로 열처리한다. 4H-SiC 웨이퍼(10) 상에서 성장된 그래핀은 단일층(monolayer)이다.

[0032] S20 내지 S50은 그래핀 단일층(11)을 박리(exfoliation) 및 전사(transfer)하는 층 분해 그래핀 전사(Layer-Resolved Graphene Transfer, LRGT) 과정을 상세하게 나타낸다.

[0033] S20에서, 니켈을 그래핀 단일층(11)이 형성된 4H-SiC 웨이퍼(10) 상면에 증착한다. 스퍼터링에 의해 증착된 니켈 박막(12)은 인장 응력(tensile stress)을 받는 응력 인자(stressor)이다. 그래핀 단일층(11)은 니켈 박막(12)과 4H-SiC 웨이퍼(10)의 접합면부터 니켈 박막(12)의 내부에 위치하게 된다.

[0034] S30에서, 그래핀 단일층(11)을 4H-SiC 웨이퍼(10)에서 박리한다. 열 분리 테이프(thermal release tape, TRT)(13)를 니켈 박막(12)에 부착한 후, TRT(13)를 잡아 당겨서 니켈 박막(12)을 4H-SiC 웨이퍼(10)에서 분리한다. 그 결과, 니켈 박막(12)에 의해 보호되는 그래핀 단일층(11)이 4H-SiC 웨이퍼(10)에서 박리된다.

[0035] S40에서, TRT(13)에 부착된 니켈 박막(12)을 n형 산화갈륨 에피층(120)과 접하도록 배치한다. n형 산화갈륨 에피층(120)이 형성된 n형 산화갈륨 기판(110)은 아세톤, 이소프로판올 및 탈이온수에서 각각 5분간 초음파 처리될 수 있다. 이후, n형 산화갈륨 에피층(120)은 산소 플라즈마로 약 5분간 처리되며, 플라즈마 처리 후 니켈 박막(12)이 n형 산화갈륨 에피층(120)과 접하도록 배치된다.

[0036] n형 산화갈륨 에피층(120)은 Sn 도핑된 β-Ga_2O_3를 n형 산화갈륨 기판(110) 상에 에피택셜 성장시켜 형성될 수 있다. n형 산화갈륨 기판(110)은 Si 도핑된 β-Ga_2O_3일 수 있다. n형 산화갈륨 에피층(120)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 형성될 수 있다. 다음 표 1은 n형 산화갈륨 기판(110) 및 n형 산화갈륨 에피층(120)의 특성을 예시한다.

표 1

[0037]

파라미터	n형 산화갈륨 기판	n형 산화갈륨 에피층
Bandgap (eV)	4.8	4.8
Affinity (eV)	4	4
Hole mobility ($cm^2 V^{-1}s^{-1}$)	10	10
Electron mobility ($cm^2 V^{-1}s^{-1}$)	172	300
Ionization energy (eV)	E_c - 0.21	E_c - 0.11
Relative permittivity	12.6	11
N_c (cm^{-3})[1)]	3.7×10^{18}	3.7×10^{18}
N_v (cm^{-3})[2)]	5.0×10^{18}	5.0×10^{18}
Minority carrier lifetime (ns)	0.21	0.21

[0038] 여기서, N_c는 Effective Density of States in the Conduction Band이며, N_v는 Effective Density of States in the Valence Band이다.

[0039] S50에서, TRT(13) 및 니켈 박막(12)을 제거하여 그래핀 단일층(11)을 n형 산화갈륨 에피층(120)에 건식 전사한다. TRT(13)/니켈 박막(12)/그래핀(11)/n형 산화갈륨 에피층(120)/n형 산화갈륨 기판(110)을 약 120℃의 핫 플레이트 위에 배치한 후, 염화제이철 용액을 사용하여 니켈 박막(12)을 식각한다. 전사된 그래핀 단일층(11)은

심자외선 반사 방지층의 역할을 한다.

[0040] 단계 S60에서, 쇼트키 접촉층(130)을 그래핀 단일층(11)이 전사된 n형 산화갈륨 에피층(120) 상에 부분적으로 형성한다. 쇼트키 접촉층(130)은 아르곤 분위기에서 약 1mTorr의 작동 압력과 1.02W/cm^2의 전력 밀도로 텅스텐 타겟을 제한 자기장 기반 스퍼터링(confined magnetic-field based sputtering, CMFS)하여 형성될 수 있다. 쇼트키 접촉층(130)은 n형 산화갈륨 에피층(120) 상에 부분적으로 증착되도록 새도우 마스크를 이용하여 패터닝될 수 있다.

[0041] 한편, 쇼트키 접촉 형성과는 별도로, n형 산화갈륨 기판(110)의 하면에 오믹 접촉층(140)을 형성한다. 오믹 접촉층(140)은 Ti/Au(20 nm/80 nm)층을 E-빔 증발에 의해 n형 산화갈륨 기판(110)의 하면에 증착하여 형성될 수 있다.

[0042] 층 분해 그래핀 전사 방식에 의해 4H-SiC 웨이퍼(10)로부터 박리된 그래핀 단일층(11)을 텅스텐에 의해 형성된 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120) 사이에 전사하며, 저손상 스퍼터링 방식을 적용하여 광응답성을 향상시킬 수 있다. 텅스텐은 금속 중에서 녹는점이 높기 때문에 스퍼터링 기술은 텅스텐 증착에 일반적으로 사용되는 방법이다. 하지만 고에너지 입자의 이온 충격으로 인해 그래핀이 손상될 수 있으며, 경우에 따라서는 스퍼터링 공정 중에 그래핀이 제거될 수도 있다. 이를 극복하기 위해 CMFS 방식을 이용해 그래핀 단일층(11)이 전사된 n형 산화갈륨 에피층(120) 상에 텅스텐 박막을 증착한 결과, 스퍼터링 중 손상 없이 그래핀이 생존하는 것을 확인했다. CMFS는 마주보는 두 개의 타겟으로 구성되며, 자기장 결과를 직접 반사하여 제한된 플라즈마를 형성하며, 그래핀 단일층(11)/n형 산화갈륨 에피층(120)/n형 산화갈륨 기판(110)은 마주 보는 두 타겟의 중심에서 수직 방향으로 분리된다. 따라서 이온 폭격(ion bombardment)을 효과적으로 억제할 수 있다.

[0043] 쇼트키 접촉층(130) 및 오믹 접촉층(140)을 형성한 후, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(100)를 RTA(Rapid thermal annealing) 방식에 의해 후열처리(Post-annealing)한다. 후열처리는 아르곤 분위기에서 약 600℃로 약 2분간 실행될 수 있다.

[0044] 그래핀 단일층(11)이 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120) 사이에 개재된 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(100)에서, 계면 상태 밀도(Interfacial state density)의 실질적인 감소로 인해 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(100)의 암전류가 크게 감소했으며, 쇼트키 장벽 높이(SBH)도 이상적인 값에 도달했다. 이하에서는, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(100)의 광응답을 평가하기 위해서, 후열처리되지 않은 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 구조의 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(이하, 제1 샘플), 후열처리되지 않은 쇼트키 접촉층(130)/그래핀 단일층(11)/n형 산화갈륨 에피층(120) 구조의 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(이하 제2 샘플), 후열처리된 쇼트키 접촉층(130)/그래핀 단일층(11)/n형 산화갈륨 에피층(120) 구조의 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(이하 제3 샘플) 및 후열처리된 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 구조의 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(이하 제4 샘플)의 상승 및 감쇠 시간, 외부 양자 효율(External quantum efficiency, EQE) 및 선형 동적 범위(Linear dynamic range, LDR) 측면에서 비교하여, 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(100)의 향상된 광응답을 확인한다.

[0045] 도 2a는 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드의 라만 스펙트럼이고, 도 2b 내지 도 2d는 제1 샘플 내지 제3 샘플의 TEM 이미지이며, 도 3a은 그래핀 단일층이 전사된 n형 산화갈륨 에피층의 SEM 이미지이고, 도 3b는 제1 샘플의 STEM-EDS 이미지이며, 도 3c 및 도 3d는 제2 샘플 및 제3 샘플의 HR-TEM 이미지 및 STEM-EDS 이미지이다.

[0046] 도 2a에서, n형 산화갈륨 에피층(120)에 전사된 그래핀 단일층(11)의 라만 스펙트럼은 약 2,683cm^{-1}의 2D 피크 위치와 30.5cm^{-1}의 반치폭(full width at half maximum), 2D 피크와 G 피크의 강도비(I_{2D}/I_G)가 1.8로 나타나 그래핀 단일층(11)이 성공적으로 전사되었음을 확인할 수 있다. 또한, 평균 I_D/I_G 비율 0.16은 전사된 그래핀 단일층(11)의 결함 밀도(defect density)가 3.5 x 10^{10} cm^{-2}임을 나타낸다.

[0047] 주사 전자 현미경(Scanning electron microscope, SEM)과 투과 전자 현미경(Transmission electron microscope, TEM) 분석으로부터, n형 산화갈륨 에피층(120)에 전사된 그래핀 단일층(11)이 존재하는지를 확인할 수 있다.

[0048] 도 2b는 그래핀 단일층(11)이 개재되지 않은 제1 샘플의 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120)의 계면을 촬영한 TEM 이미지이며, 도 3b는 제1 샘플의 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120)의 계면을 촬영한 STEM-EDS 이미지이다.

[0049] 도 3a는 그래핀 단일층(11)이 전사된 n형 산화갈륨 에피층(120)을 촬영한 평면 SEM 이미지이다.

[0050] 도 2c는 그래핀 단일층(11)이 개재되며 후열처리하지 않은 제2 샘플의 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120)의 계면을 촬영한 TEM 이미지이고, 도 3c는 제2 샘플의 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120)의 계면을 촬영한 단면 HR-TEM 이미지이다. 쇼트키 접촉층(130)의 형성 후에도, 그래핀 단일층(11)이 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120)에 존재함을 확인할 수 있다.

[0051] 도 2d는 그래핀 단일층(11)이 개재되며 후열처리한 제3 샘플의 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120)의 계면을 촬영한 TEM 이미지이고, 도 3d는 제3 샘플의 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120)의 계면을 촬영한 단면 HR-TEM 이미지이다. 제3 샘플의 inter-distance는 약 0.65Å로, 도 2a의 라만 스펙트럼과 일치하여, 후열처리 이후에도, 그래핀 단일층(11)이 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120)에 존재함을 확인할 수 있다.

[0052] 도 4a는 β-Ga_2O_3의 KPFM 이미지이고, 도 4b는 그래핀의 KFPM 이미지이고, 도 4c는 β-Ga_2O_3와 그래핀의 대응하는 전위 프로파일이며, 도 4d는 그래핀/β-Ga_2O_3의 에너지 밴드 다이어그램이다.

[0053] 그래핀 단일층(11)/n형 산화갈륨 에피층(120)의 밴드 정렬을 추정하기 위해 켈빈 프로브 포스 현미경(Kelvin probe force microscopy, KPFM)을 사용하여 그래핀 단일층(11)/n형 산화갈륨 에피층(120)의 표면 전위 차이를 정량적으로 분석했다. 프로브 팁과 샘플 사이의 접촉 전위(V_{CPD})와 접촉 전위차(Δ_{CPD})는 다음과 같다.

[0054] V_{CPD}(그래핀) = $(W_{tip}-W_{graphen})/q$ 및 V_{CPD}(β-Ga_2O_3) = $(W_{tip}-W_{\beta-Ga2O3})/q$

[0055] ΔV_{CPD}= V_{CPD} (β-Ga_2O_3)- V_{CPD}(그래핀)

[0056] 여기서, q는 기본 전하이고, W_{tip}, $W_{graphen}$, $W_{\beta-Ga2O3}$는 각각 KPFM 팁, 그래핀 및 β-Ga_2O_3의 일함수이다. 도 4a는 그래핀의 접촉 전위 V_{CPD}를, 도 4b는 β-Ga_2O_3의 접촉 전위 V_{CPD}를 각각 나타낸다. 그래핀과 β-Ga_2O_3 사이의 계산된 접촉 전위차는 도 4c에 표시된 것처럼 약 0.2eV이다. β-Ga_2O_3의 E_c-E_f=0.124eV를 고려할 때, 추출된 오프셋은 도 4d에 개략적으로 표시된 바와 같이 약 0.324eV 이하이다.

[0057] 그래핀 단일층(11)을 삽입한 후 관찰된 향상된 성능은 패시베이션을 통한 계면 상태 밀도 감소에 기인할 수 있다. 패시베이션은 서피스 댕글링 본드(Surface dangling bond)가 그래핀 단일층(11)을 장식하는 다양한 작용기에 의해 포화되면서 발생한다. 결과적으로 이 과정은 n형 산화갈륨 에피층(120)의 쇼트키 접촉이 형성되지 않은 표면과 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 계면 모두에서 재결합 부위를 감소시킨다. 또한 그래핀 단일층(11)은 n형 산화갈륨 에피층(120) 표면을 주변 가스와의 반응 및 텅스텐 금속과의 반응으로부터 보호할 수 있다. 이는 n형 산화갈륨 에피층(120) 표면과 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 계면 의 표면 및 계면 상태를 감소시키고 제2 샘플 및 제3 샘플의 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 그래핀 단일층(11)은 캐리어 추출을 향상시키고 쇼트키 접촉층(130)으로의 정공 수송을 촉진할 수 있다. 특히 그래핀 단일층(11)은 n형 산화갈륨 에피층(120)과 오믹 접촉을 형성할 것으로 예상되며, 도 4d에서 그래핀 단일층(11)과 n형 산화갈륨 에피층(120) 사이에 낮은 장벽(오프셋)이 형성된 것으로부터 확인할 수 있다. 이 장벽 값은 *Yuan, H et. al., Contact Barriers Modulation of Graphene/β Interface for High-Performance Ga2O3 Devices. Appl. Surf. Sci. 2020, 527, 146740*에 개시된 값과 일치한다.

[0058] 도 5a 내지 도 5f는 그래핀 단일층에 의한 광검출기의 광전류 변화를 나타낸 그래프이고, 도 6은 제1 샘플 내지 제4 샘플의 전류-잡음 스펙트럼이며, 도 7a 및 도 7b는 제1 샘플 내지 제4 샘플의 EQE 그래프이다.

[0059] 도 5a는 그래핀 단일층(11)이 개재되지 않은 제1 샘플 및 그래핀 단일층(11)이 개재되며 후열처리하지 않은 제2 샘플의 암전류를 나타내고, 도 5b는 제1 샘플의 암전류 및 255nm 파장을 인가하여 생성된 광전류를 나타내고, 도 5c는 제2 샘플의 암전류 및 255nm 파장을 인가하여 생성된 광전류를 나타내고, 도 5d는 광 출력 밀도(Photo power density) P_i에 의존적인 제1 샘플 및 제2 샘플의 광전류를 나타내고, 도 5e는 제1 샘플 및 제2 샘플의 검출성(Detectivity) 및 반응성(Responsivity)을 나타내며, 도 5f는 -10V에서 제1 샘플 및 제2 샘플의 LDR을 나타낸다.

[0060] 도 5a에서, 그래핀 단일층(11)을 쇼트키 접촉층(130)과 n형 산화갈륨 에피층(120) 사이에 개재하면, -10V에서 측정된 암 누설 전류는 약 4.64×10^{-1}mA/cm² 에서 4.38×10^{-2}mA/cm² 로 감소했다. 이러한 누설 전류의 감소는 페

르미 레벨 피닝과 계면 상태 밀도의 감소로 설명할 수 있다. 이로 인해 쇼트키 장벽 높이(Schottky barrier height, SBH)가 약 0.30eV에서 약 0.53eV로 증가했고, 이상 계수는 1.70에서 1.45로 감소하여 인터페이스 품질이 개선되었음을 나타낸다. SBH가 제1 샘플의 금속 일함수에 약하게 의존하며, 약 4.6eV의 텅스텐 일함수와 4.0eV의 β-Ga_2O_3 전자 친화도를 고려할 때 이상적인 값인 0.60eV 이하에 비해 매우 낮다는 점을 관찰할 수 있다. 이는 금속 페르미 레벨이 β-Ga_2O_3 표면에 거의 완전히 고정되었음을 나타낸다. 또한, 제2 샘플의 온 전압 V_{on}이 그래핀 단일층(11)에 비해 약 0.1V로 매우 낮다는 점을 확인했다. 매우 낮은 V_{on}과 높은 누설 전류, 그리고 제1 샘플의 금속 작업 함수에 대한 약한 SBH 의존성은 높은 계면 상태 밀도의 효과로 설명할 수 있다. 그래핀 단일층(11)을 삽입한 후 정류비(순방향/역방향)는 약 5.37×10^5에서 4.56×10^6으로 증가했다. 제1 샘플 내지 제4 샘플에 대해 추출된 파라미터는 표 2에 정리되어 있다.

표 2

[0061]

샘플#	후열처리 온도(℃)	SBH (eV)	이상계수	R_{on} ($m\Omega.cm^2$)	Von (V)	정류비
제1 샘플	w/o	0.30	1.70	16.73	0.10	5.37×10^5
제2 샘플	w/o	0.53	1.45	20.84	0.50	4.56×10^6
제3 샘플	600	0.58	1.12	20.17	0.40	1.00×10^9
제4 샘플	600	0.51	1.20	80.14	0.31	2.20×10^8

[0062] 도 5b와 도 5c는 각각 255nm 파장에서 1W/cm^2 내지 10mW/cm^2 의 다양한 광 출력 밀도 P_i에 대한 제1 샘플 및 제2 샘플의 J-V 특성을 나타낸다. 제2 샘플은 제1 샘플보다 상대적으로 높은 광전류 밀도 J_{Ph}를 나타낸다. 도 5d에서 볼 수 있듯이, 광전류 밀도는 $J_{Ph} \propto P_i^{\alpha}$ 에 따라 달라진다. 여기서, α는 전극으로 이동하는 동안 광 생성 캐리어의 재결합 확률과 관련이 있다. 제2 샘플의 α는 0.252로, 제1 샘플의 0.125보다 두 배 이상 높다. 이는 제2 샘플의 광전류와 광전효과가 계면 상태에 덜 의존한다는 것을 의미한다. 지수 α의 증가는 또한 정공-전자 쌍의 빠른 분리와 표면 재결합의 감소로 설명될 수 있다. 제1 샘플과 제2 샘플의 반응성은 $R = (J_{light}-J_{dark})/P_i$를 사용하여 추출되었다. 여기서 J_{light}, J_{dark}, P_i는 각각 광전류 밀도, 암전류 밀도 및 광출력 밀도이다. 도 5e에서 볼 수 있듯이 제2 샘플의 응답성은 광 출력 밀도가 증가함에 따라 증가하지만, 높은 계면 상태 밀도와 관련된 높은 표면 재결합률로 인해 제1 샘플의 응답성은 영향을 덜 받는다. 제2 샘플의 응답성은 14,485.62mA/W에 달해 제1 샘플의 141.62mA/W보다 102배 높다.

[0063] 도 6을 참조하면, 저주파수에서의 잡음은 주로 1/f 잡음인 것이 특징이다. 이 저주파 플리커 잡음은 2D 소재에 널리 퍼져 있는 결함(detect) 및 무질서(disorder)에 의해 트랩(trapped) 및 디트랩(detrapped)되는 캐리어의 변동(fluctuation)으로 인해 발생한다. 응답성 R 및 잡음 전류 i_n에 비례하는 검출성 D로 알려진 또 다른 임계 수치는 다음과 같이 계산할 수 있다.

수학식 1

[0064] $$D = R\sqrt{A \bullet B}/i_n$$

[0065] 여기서, A는 샘플에 구현된 소자의 면적($7.07\times10^{-4}cm^2$)이고, B는 전기 밴드갭(2kHz)이다. 제2 샘플의 검출성 D 또한 제1 샘플에 비해 약 1.52 × 10^{10}Jones에서 약 1.48 × 10^{12}Jones로 향상되었다. 제1 샘플 및 제2 샘플에 대해 서로 다른 광 세기에서 추출된 검출 효율은 도 5e에 표시되어 있다.

[0066] 도 7a를 참조하면, EQE는 광전류 밀도 변환 효율을 추정하는 데 중요한 파라미터로, $EQE=R\cdot hc/q\lambda$으로 정의된다. 계산된 EQE는 68.87%에서 7,044%로 현저하게 증가했다. 반면, 도 7b에서, 제1 샘플 및 제2 샘플의 EQE는 광

세기가 증가에 따른 변화가 미미했다.

[0067] 다시 도 5f를 참조하면, LDR도 감지 가능한 광전류 밀도와 입사 광출력 밀도의 최대 및 최소값을 사용하여 $LDR=20\log_{10}(J_{max}/J_{min})$에서 추출했으며 제2 샘플의 LDR은 75dB로, 제1 샘플에 비해 약 5배 더 높았다. 제1 샘플의 최소 감지 가능한 광전류 밀도는 0.1mW/cm² 였지만 제2 샘플의 경우는 3×10-2mW/cm² 이다. 한 가지 주목할 점은 넓은 LDR은 광범위한 입사광 세기에 걸쳐 일관된 광전 변환 효율을 유지할 수 있는 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드의 능력을 의미한다는 점이다. 예를 들어, 상당히 넓은 LDR을 사용하면 과다 노출이나 노출 부족과 같은 문제 없이 선명한 이미지를 캡처할 수 있어 어두운 밤부터 밝은 낮까지 뛰어난 이미지 품질을 보장할 수 있다.

[0068] 도 8a 내지 도 8f는 후열처리에 의한 광검출기의 광전류 변화를 나타낸 그래프이며, 도 9는 제3 샘플 및 제4 샘플의 전류-전압 그래프이다. 도 8a는 그래핀 단일층(11)이 개재되며 후열처리된 제3 샘플 및 그래핀 단일층(11)이 개재되지 않으며 후열처리된 제4 샘플의 암전류를 나타내고, 도 8b는 제3 샘플의 암전류 및 255nm 파장을 인가하여 생성된 광전류를 나타내고, 도 8c는 제4 샘플의 암전류 및 255nm 파장을 인가하여 생성된 광전류를 나타내고, 도 8d는 광 출력 밀도 P_i에 의존적인 제3 샘플 및 제4 샘플의 광전류를 나타내고, 도 8e는 제3 샘플 및 제4 샘플의 검출성 및 반응성을 나타내며, 도 8f는 -10V에서 제3 샘플 및 제4 샘플의 LDR을 나타낸다.

[0069] 후열처리는 아르곤 분위기에서 약 600℃로 약 2분간 진행되었다. 도 8a와 도 5a를 함께 참조하면, 제3 샘플 및 제4 샘플의 누설 전류는 후열처리 공정을 거치지 않은 샘플들에 비해 100배 이상 크게 감소했다. 후열처리된 제3 샘플 및 제4 샘플 모두 SBH와 Von이 증가했으며, 제3 샘플이 제4 샘플보다 높다. 주목할 점은 제3 샘플의 SBH 값은 약 0.58eV에 도달하여 이상적인 값(0.60eV)에 매우 근접했다. 제3 샘플 및 제4 샘플의 이상 계수도 1.12와 1.20으로 감소했다. 이는 텅스텐 박막으로 형성된 쇼트키 접촉층(130)의 결정 구조를 개선하고, n형 산화갈륨 에피층(120) 표면의 불순물을 감소시킴으로써 n형 산화갈륨 에피층(120)의 표면 상태와 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 계면의 상태 밀도가 감소했기 때문이다.

[0070] 제3 샘플 및 제4 샘플의 자세한 파라미터는 표 2에 나와 있다. 제3 샘플 및 제4 샘플의 광전류 밀도는 동일한 조명 테스트에서 도 8b 및 도 8c와 같이 개선되었으며, 특히 제3 샘플의 광전류 밀도는 제4 샘플에 비해 크게 변화했다. 후열처리 공정의 효과를 확인하기 위해, 제3 샘플 및 제4 샘플에 대한 α 피팅 파라미터를 추출하여 도 8d에 표시했으며, 이로부터 제2 샘플에 비해 6배 이상 증가했음을 알 수 있다. 또한 α 피팅 파라미터는 제3 샘플이 제4 샘플에 비해 훨씬 높았으며, 각각 1과 0.70이다. 이는 제3 샘플의 광전류 밀도가 계면 상태 밀도 및 표면 재결합의 영향을 훨씬 덜 받는다는 점을 의미한다. 또한, 도 8d와 같이 분리된 두 개의 선형 곡선을 사용하여 제4 샘플의 광전류 밀도가 피팅되었음을 확인할 수 있다. 광 출력 밀도 6mW/cm^{2}에서 α 피팅 파라미터는 약 0.54로 낮은 광출력 밀도(0.70)보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 높은 광 출력 밀도에서 트래핑 또는 재결합 메커니즘이 더 분명해졌다는 점을 의미한다.

[0071] 후열처리된 제3 샘플 및 제4 샘플의 반응성은 도 8e와 같이 감소했으며, 이는 도 9에서 알 수 있듯이, 600℃ 후열처리에 의해 형성된 TiOx로 인해서, Ti/Au와 β_2O_3의 접촉 저항이 10.8Ω에서 39.6Ω으로 증가한 것으로 설명할 수 있다. 그러나 제3 샘플은 여전히 제4 샘플에 비해 더 높은 성능을 나타낸다. 후열처리에 의해 제3 샘플의 반응성은 10mW/cm² 에서 3,145mA/W로, 제4 샘플의 39.24mA/W 보다 높았다. 반면, 도 8f 및 표 3(V=-10V)에서 볼 수 있듯이 제3 샘플의 검출성 및 LDR은 증가했다. 이는 후열처리가 매우 낮은 암전류 밀도와 관련이 있음을 의미한다.

표 3

[0072]

샘플#	후열처리 온도 (℃)	λ (nm)	반응성 (mA/W)	D^* (Jones)	LDR (dB)	EQE (%)
제1 샘플	w/o	255	141.62	1.52×10^{10}	15	68.87
제2 샘플	w/o	255	14485.62	1.48×10^{12}	75	7043.80
제3 샘플	600	255	3145.03	3.80×10^{11}	103	1529.73
제4 샘플	600	255	39.24	3.59×10^{9}	64	19.08

[0073] 도 10a는 제1 샘플 시간 의존적 광전류 밀도 그래프이고, 도 10b는 제2 샘플 시간 의존적 광전류 밀도 그래프이고, 도 10c는 제1 샘플 및 제2 샘플의 계면 상태 밀도 그래프이고, 도 10d는 제3 샘플 시간 의존적 광전류 밀도 그래프이고, 도 10e는 제4 샘플 시간 의존적 광전류 밀도 그래프이고, 도 10f는 제3 샘플 및 제4 샘플의 계면 상태 밀도 그래프이다. 도 11a 내지 도 11d는 제1 내지 제4 샘플에 대해 측정된 상승 및 감쇠 시간 그래프이며, 도 12a 및 12b는 제1 내지 제4 샘플에 대해 측정된 커패시턴스-전압 그래프이다.

[0074] 도 10b와 도 10e는 광 출력 밀도가 다른 255nm 파장에서 제2 샘플 및 제4 샘플의 시간 분해 광전류 밀도를 각각 나타낸다. 제2 샘플의 온/오프 비율은 1mW/cm^2의 광 출력 밀도에서 3.30×10^3이며, 이는 제4 샘플보다 약 1000배 더 높다. 제2 샘플의 동적 전류 거동은 도 11b와 같이 상승 시간 t_r 및 감쇠 시간 t_d가 각각 약 139ms 및 200ms인 사각파 형태이다. 그러나 제1 샘플은 도 11a에서 각각 약 2000ms 및 약 3000ms의 상승 시간 t_r 및 감쇠 시간 t_d를 보였다. 이는 계면 트랩 수준에서 캐리어 디트랩 메커니즘의 효과로 인한 지속 광전도도(persistent photoconductivity)로 설명할 수 있다. 이는 그래핀 단일층(11)을 가진 샘플이 그래핀 단일층(11)이 없는 샘플보다 훨씬 빠른 응답을 보인다는 것을 나타낸다.

[0075] 계면 상태 밀도 Nss는 도 12a 및 도 12b에 예시된 바와 같이, 저주파 커패시턴스 C_{LF}와 고주파 커패시턴스 C_{HF}의 차이에서 추출했다. Nss는 $(C_{LF}-C_{HF})/q.A$로 정의되며, A는 샘플에 구현된 소자의 면적(7.07×10^{-4} cm^2)이고 q는 원소 전하(1.6×10^{-19} c)이다. 도 10c에서, 제2 샘플의 Nss는 제1 샘플보다 훨씬 작다. Nss의 감소는 광 검출기 기반 소자에서 캐리어 분리 및 추출을 향상시키는데 매우 중요하다. 그러나 그래핀 단일층(11)과 관련된 다른 트랩이 트랩 및 디트랩 과정을 통해 캐리어 추출 메커니즘을 향상시켜 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드의 성능을 개선하는 데 중요한 역할을 하는 경우도 있다는 점에 주목할 필요가 있다.

[0076] 후열처리된 제3 샘플 및 제4 샘플의 감쇠 시간은 도 11c 및 도 11d에서와 같이 각각 100ms 및 270ms로 감소했다. 제3 샘플 및 제4 샘플의 감쇠 시간 개선은 도 10f에서 확인할 수 있는 것과 같이, Nss가 크게 감소했기 때문으로 볼 수 있다. 제2 샘플 및 제3 샘플을 비교한 결과, 도 10d와 같이 광전류 곡선의 날카로운 과도 피크가 특징인 높은 광도에서 후열처리된 제3 샘플에서 초기 오버슈트 현상이 관찰되었다. 이 현상은 종종 전하 축적 및 트래핑/디트랩 메커니즘과 같은 트랩 관련 현상과 관련이 있다. 높은 광도에서 생성된 자유 캐리어의 풍부함이 그래핀 단일층(11)에서 전하 트래핑 및 디트랩에 영향을 미칠 수 있음을 추측할 수 있다. 그러나 증착에 대해서는, 이 트랩 레벨은 영향을 덜 미칠 수 있어서, 제2 샘플에서는 이러한 현상이 나타나지 않거나, 제3 샘플의 경우 높은 광도에서 생성된 자유 캐리어가 제2 샘플보다 낮음을 설명할 수 있다.

[0077] 도 13a 내지 13d는 제1 내지 제4 샘플에 대해 측정된 광전류 밀도 그래프이며, 도 14a 및 도 14b는 동작 온도에 따른 제2 샘플 및 제3 샘플의 광전류 밀도 그래프이다.

[0078] 도 13a 내지 13d는 광범위한 스펙트럼 반응을 확인하기 위해, 제1 샘플 내지 제4 샘플에 255nm 내지 700nm의 다양한 파장 범위의 광을 조사하여 측정한 광 전류 밀도를 나타낸다. 도 13a 및 도 13d를 참조하면, 제1 샘플 및 제4 샘플은 광의 파장에 따른 영향을 덜 받는다. 반면, 도 13b 및 도 13c를 참조하면, 제2 샘플 및 제3 샘플은 상이한 모든 파장의 영향을 받으며, 255nm의 파장에서 가장 높은 광 반응성을 보인다. 한편, 제2 샘플 및 제3 샘플은 700nm의 파장에서도 반응을 보인다. 또한 도 14a 및 도 14b에서 볼 수 있듯이, 제2 샘플 및 제3 샘플은 150° C의 온도에서도 작동한다.

[0079] 표 4는 보고된 β_2O_3 기반 포토다이오드(Photodiode, PD)의 성능 파라미터를 요약한 것이다. 이전 연구와 비교하면, 제2 샘플과 제3 샘플은 각각 약 33.73nA 및 약 0.17nA의 낮은 암전류를 보였으며, 이는 Ag/그래핀/β-Ga_2O_3 PD의 1,100nA보다 낮다(*Kong, W.-Y. et. al., Graphene-β_2O_3 Heterojunction for Highly Sensitive Deep UV Photodetector Application. Adv. Mater. 2016, 28 (48), 10725-10731.* 참조). 이는 습식 전사된 그래핀에 비해 전사 후 낮은 결함 밀도를 제공하는 건식 전사 LRGT를 통한 그래핀 단일층(11)의 패시베이션 역할로 인한 높은 계면 상태 밀도 억제로 설명할 수 있다. 또한, 이는 텅스텐 증착에 대한 저손상 증착 기술로 그래핀 단일층(11)에 대한 이온 충격 효과를 감소시켰기 때문일 수 있다. 이는 동일한 작업에서 감쇠시간과 상승시간이 각각 94,830ms와 219,190ms로 매우 높은 것에서도 확인할 수 있다. 반면, 제2 샘플 및 제3 샘플은 낮은 감쇠시간과 상승시간을 제공한다. 또한 다른 작업에 비해 높은 검출성, 높은 반응성, 255nm 광선에 대한 상대적으로 빠른 광반응을 얻을 수 있었다. 이러한 개선은 정공 추출의 개선과 관련이 있을 수 있으며, 고품질 그래핀이 βGa_2O_3에서 흡수 및 생성을 개선하기 위해 DUV 반사 방지층을 제공할 수 있음을 나타낸다. 또한, 제2 샘플 및 제3 샘

플은 상용 GaN 기반 UV PD(모델: GT-ABC-L GT-ABC-L)에 비해 더 높은 성능을 보였다.

표 4

[0080]

Device structure	Dark current (nA)	D^* (Jones)	R (mA/W)	t_r (ms) / t_d (ms)
PEDOT:PSS/β-Ga_2O_3	0.0037 (-1V)	9.2×10^{12}	2.05	3.3×10^{-4} / 0.0712
MXenes/β-Ga_2O_3	0.00055	6.1×10^{12}	12.2	0.08 / 0.131
Gr/$PtSe_2$/β-Ga_2O_3	~ 100 (-1V)	$\sim 10^{13}$	76.2	0.012/0.212
β-Ga_2O_3- MXenes NWs	0.026 (6V)	4.9×10^{12}	140.57	52 /91
Gr/β-Ga_2O_3/SiC	0.509 (0V)	-	180	650/1730
Gr/β-Ga_2O_3	-	-	6100	620/670
Gr/β-Ga_2O_3	1100	5.9×10^{13}	39300	94,830/219,190
제2 샘플(W/Gr/β-Ga_2O_3)	33.73 (-10V)	1.48×10^{12}	14485.62	139/200
제3 샘플(W/Gr/β-Ga_2O_3)	0.17 (-10V)	3.80×10^{11}	3145	100/230

[0081] 예를 들어, 제2 샘플은 상용 GaN 기반 UV PD보다 100배 더 높은 응답성을 보였다. 또한 도 14a 및 도 14b에서 설명한 바와 같이, 최대 작동 온도가 85℃ 미만인 상용 GaN 기반 UV PD와 달리, 제2 샘플 및 제3 샘플은 150℃에서도 높은 열 안정성을 가진다는 점을 확인할 수 있다. 또한, 표 5에 요약된 바와 같이 제2 샘플 및 제3 샘플은 매우 낮은 전압(V = -0.1V)에서 작동할 수 있으며, 제1 샘플 및 제4 샘플에 비해 높은 성능을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

표 5

[0082]

샘플#	후열처리 온도 (℃)	λ (nm)	Responsivity (mA/W)	D^* (Jones)	LDR (dB)	EQE (%)
제1 샘플	-	255	8.08	8.62×10^8	3	3.94
제2 샘플	-	255	1239.44	1.27×10^{11}	67	603.87
제3 샘플	600	255	164.07	1.98×10^{10}	71	79.94
제4 샘플	600	255	0.60	5.34×10^7	41	0.30

[0083] 도 15a 내지 도 15f는 제1 샘플 및 제2 샘플에 대한 재결합률, 광생성률 및 정공 프로파일의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. β-Ga_2O_3 기반 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드(100)의 성능을 향상시키는데 있어 그래핀 단일층(11)의 역할을 이해하기 위해 표 1에 제시된 것처럼 실험 기반 파라미터 추출을 수행했다. 또한 도 15a 내지 도 15f와 같이 재결합률(recombination rate), 광생성률(photogeneration rate) 및 정공 캐리어 밀도 프로파일을 평가하기 위해 TCAD 시뮬레이션을 수행했다. 상술한 바와 같이, 그래핀 단일층(11)은 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 계면의 표면 패시베이션 중간층으로 간주될 수 있으며, 이는 계면 상태 밀도의 높은 감소로 확인할 수 있다. 그래핀 단일층(11)은 댕글링 본드와 표면 트랩을 줄이거나 텅스텐 금속과 β-Ga_2O_3 사이의 직접 접촉을 방지하여 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 계면을 패시베이션 할 수 있다. 이 점을 확인하기 위해 제1 샘플 및 제2 샘플의 재결합률을 추출했다. 도 15a 및 도 15b에서 볼 수 있듯이 제2 샘플에서 추출된 재결합률은 255nm 광 조명 하에서 제1 샘플에 비해 크게 감소했다. 그래핀 단일층(11) 삽입 후 재결합률의 감소는 정공이 생성된 후 빠르게 추출되기 때문이다.

[0084] 한편, 그래핀은 다양한 파장에 투명하다. 따라서 그래핀 단일층(11)을 사용하여 DUV 반사를 방지하고 n형 산화갈륨 에피층(120) 표면에서 광생성률을 향상시킬 수 있다. 이 점을 검증하기 위해 제1 샘플과 제2 샘플의 광생성률을 추출했다. 도 15c와 도 15d에서 볼 수 있듯이, 제1 샘플에 비해 광생성률의 증가가 관찰되었고, DUV 광

투과 깊이가 증가했다.

[0085] 또한 그래핀의 높은 정공 이동도와 우수한 전기적 특성, 그리고 그래핀 단일층(11)과 n형 산화갈륨 에피층(120) 사이의 매우 낮은 장벽으로 인해 정공 추출이 개선된 것도 또 다른 주요 요인이다. 도 15e와 도 15f에서 볼 수 있듯이, 역전압(-1V)을 인가한 후 제2 샘플의 그래핀 단일층(11)에서 제1 샘플에 비해 정공 밀도가 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 그래핀 단일층(11)을 삽입하기 전 n형 산화갈륨 에피층(120)에서 생성된 정공은 소수 수명(minority lifetime)이 매우 짧기 때문에 n형 산화갈륨 에피층(120) 표면에서 쉽게 재결합한다. 그러나 그래핀 단일층을 사용하면 추출이 매우 향상되고 추출된 정공이 그래핀 단일층(11)에서 쇼트키 접촉층(130)으로 쉽게 이동할 수 있다. 도 15e는 n형 산화갈륨 에피층(120)에서 그래핀 단일층(11)으로, 그래핀 단일층(11)에서 쇼트키 접촉층(130)으로 이동하는 정공의 흐름 방향을 보여준다.

[0086] 그래핀 단일층(11)에서 n형 산화갈륨 에피층(120)으로의 예상되는 수송 메커니즘은 첫째, n형 산화갈륨 에피층(120)의 원자가 밴드 최대치 VBM에서 그래핀 단일층(11)으로 정공이 직접 확산된 다음 쇼트키 접촉층(130)으로 확산되는 것이다. 또 다른 메커니즘은 n형 산화갈륨 에피층(120)의 VBM에서 계면 트랩 수준으로 생성된 정공이 그래핀 단일층(11)으로 터널링되는 트랩 보조 터널링(Trap assisted tunneling) 방식이다. 캐리어에 의한 그래핀 단층의 트랩과 관련된 추가 운송 메커니즘은, 예를 들어, 트래핑 및 디트랩 메커니즘이다. 그러나 600° C에서 어닐링한 후 두 소자 모두 성능에 영향을 받았다. 이는 후열처리로 인해 생성된 TiOx로 인한 오믹 접촉 저항 증가로 설명할 수 있으며, 이는 전자 추출 성능에 영향을 줄 수 있다.

[0087] 도 16a 내지 도 16f는 상이한 온도로 후열처리된 샘플을 상이한 작동 온도에서 구동하여 측정한 전압-전류 그래프이다.

[0088] 도 16a는 그래핀 단일층(11)이 삽입되지 않으며 후열처리되지 않은 제1 샘플의 전압-전류 그래프이고, 도 16b는 그래핀 단일층(11)이 삽입되며 후열처리되지 않은 제2 샘플의 전압-전류 그래프이고, 도 16c는 그래핀 단일층(11)이 삽입되며 400℃로 후열처리된 제3 샘플의 전압-전류 그래프이고, 도 16d는 그래핀 단일층(11)이 삽입되며 600℃로 후열처리된 제3 샘플의 전압-전류 그래프이고, 도 16e는 그래핀 단일층(11)이 삽입되지 않으며 400℃로 후열처리된 제4 샘플의 전압-전류 그래프이며, 도 16f는 그래핀 단일층(11)이 삽입되지 않으며 600℃로 후열처리된 제4 샘플의 전압-전류 그래프이다.

[0089] 25℃ 내지 150℃의 작동 온도에서 구동했을 때, 후열처리되지 않은 제2 샘플은 작동 온도의 변화에도 불구하고 전압-전류가 일정하게 유지되었으며, 그래핀 단일층(11)이 삽입되지 않은 제1 샘플에 비해 동일 전압에서의 전류 편차가 작았다. 한편, 그래핀 단일층(11)이 삽입된 제3 샘플은 400℃로 후열처리시 제2 샘플보다 동일 전압에서의 전류 편차가 커지지만, 600℃로 후열처리시 제2 샘플보다 동일 전압에서의 전류 편차가 작아졌다. 한편, 25℃ 내지 150℃의 작동 온도에서 구동했을 때, 그래핀 단일층(11)이 삽입되지 않은 제4 샘플은 후열처리 온도에 무관하게 동일 전압에서의 전류 편차가 매우 크게 증가했다.

[0090] 첨부된 도면을 참조하여 상술한 본 발명의 실시예는 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 계면에 그래핀 단일층(11)을 삽입하여 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드의 초고감도와 빠른 응답을 구현했다. 손상 없는 스퍼터링 방법을 사용하여 텅스텐으로 형성된 쇼트키 접촉층(130)을 LRGT 방식으로 전사된 그래핀 단일층(11)/n형 산화갈륨 에피층(120)에 증착했다. 그래핀 단일층(11)을 삽입한 후 계면 상태 밀도가 현저히 억제되어 누설 전류와 이상 계수가 감소했다. 또한, 쇼트키 접촉층(130)/그래핀 단일층(11)/n형 산화갈륨 에피층(120) 구조의 제2 샘플의 SBH 값은 0.53eV를 나타내어 후열처리 없이도 이상적인 값인 0.60eV에 매우 근접한 반면, 쇼트키 접촉층(130)/n형 산화갈륨 에피층(120) 구조의 제1 샘플의 SBH는 약 0.30eV에 불과한 것으로 나타났다. 이는 그래핀 단일층(11)을 삽입함으로써 금속 페르미 준위 고정 효과가 크게 억제됨을 나타낸다. 광응답 실험에서는 그래핀 단일층(11)이 삽입된 제2 샘플의 응답성이 141.62mA/W에서 14,485.62mA/W로 크게 증가했으며, 검출성은 1.48×10^{12}Jones 7044%, 선형 동적 범위는 75dB로 증가했다. 계면 상태 밀도의 감소로 인해 광응답의 상승 및 감쇠 시간도 개선되었다. 또한, 제2 샘플은 150℃에서도 높은 안정성을 나타냈다. 또한 그래핀 단일층(11)을 삽입한 후 넓은 스펙트럼 반응에서 전자-정공 쌍 분리 및 정공 추출이 향상되었다. 즉, 그래핀 단일층(11)을 중간층을 사용함으로써, 계면 상태 밀도가 억제되며, n형 산화갈륨 에피층(120)에서 생성된 정공 추출 메커니즘을 개선했습니다. 또한, 그래핀 단일층(11)의 우수한 광학적 특성으로 인해 삽입 후 n형 산화갈륨 에피층(120)의 광생성률이 향상된다. 따라서 그래핀 단일층(11)이 삽입된 β-Ga_2O_3 쇼트키 장벽 심자외선 포토다이오드는 높은 감도와 넓은 스펙트럼 응답을 모두 제공할 수 있다.

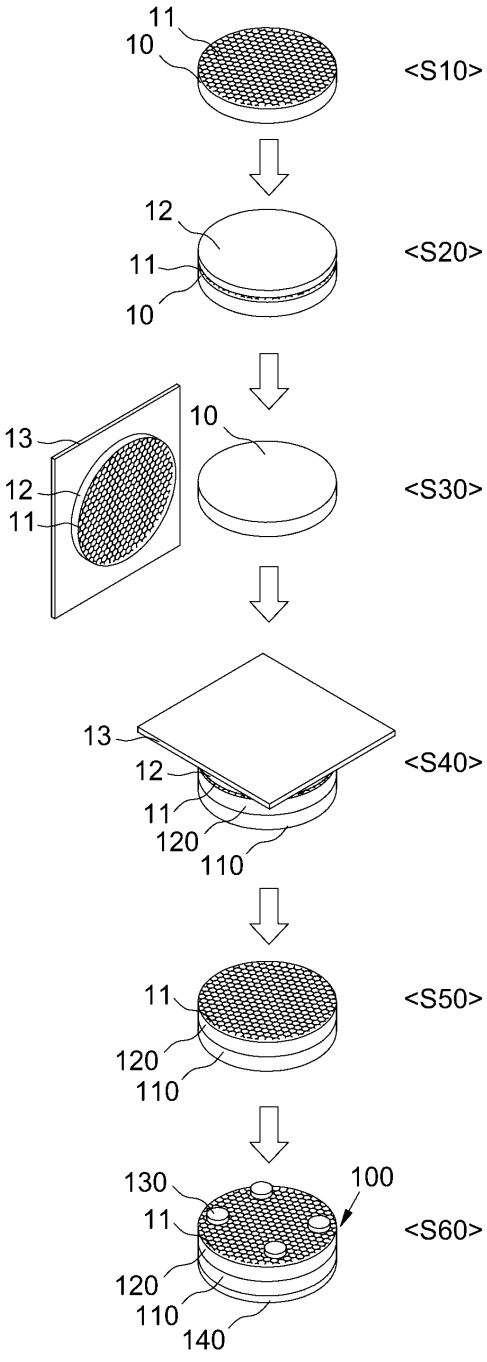
[0091] 전술한 본 발명의 설명은 예시를 위한 것이며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본 발명

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.

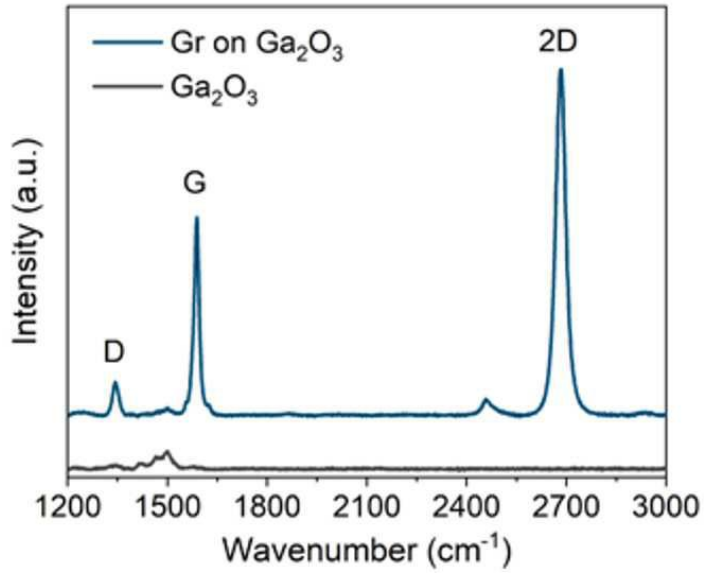
[0092] 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타나며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

도면

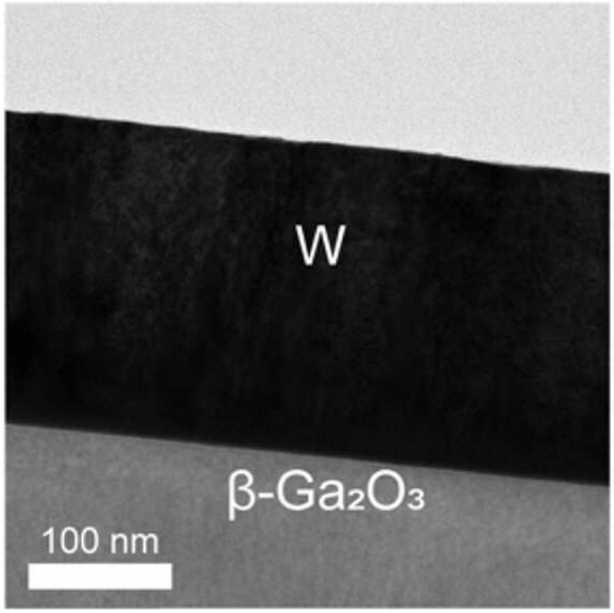
도면1



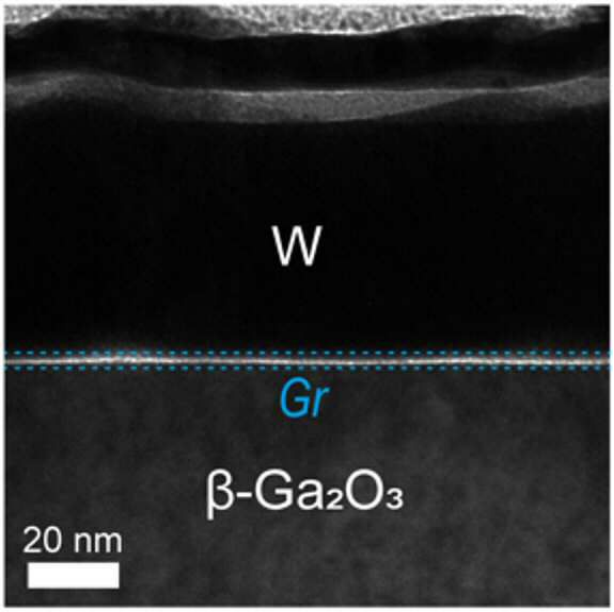
도면2a


Gr on Ga_2O_3
Ga_2O_3
2D
G
D
Intensity (a.u.)
1200
1500
1800
2100
2400
2700
3000
Wavenumber (cm^{-1})

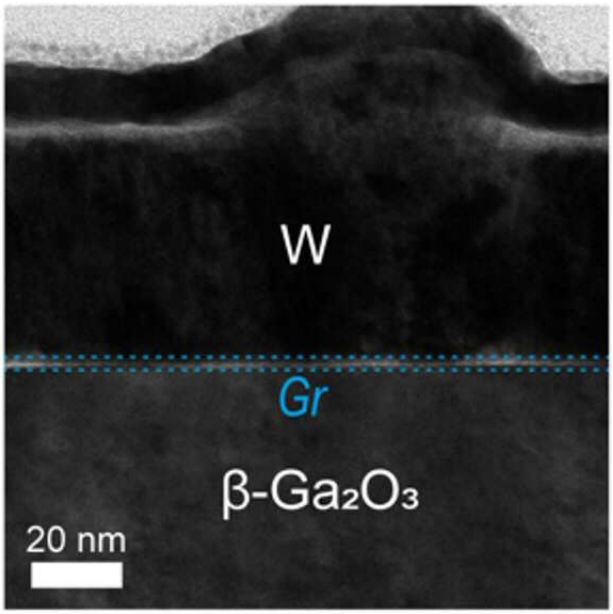
도면2b


W
β-Ga_2O_3
100 nm

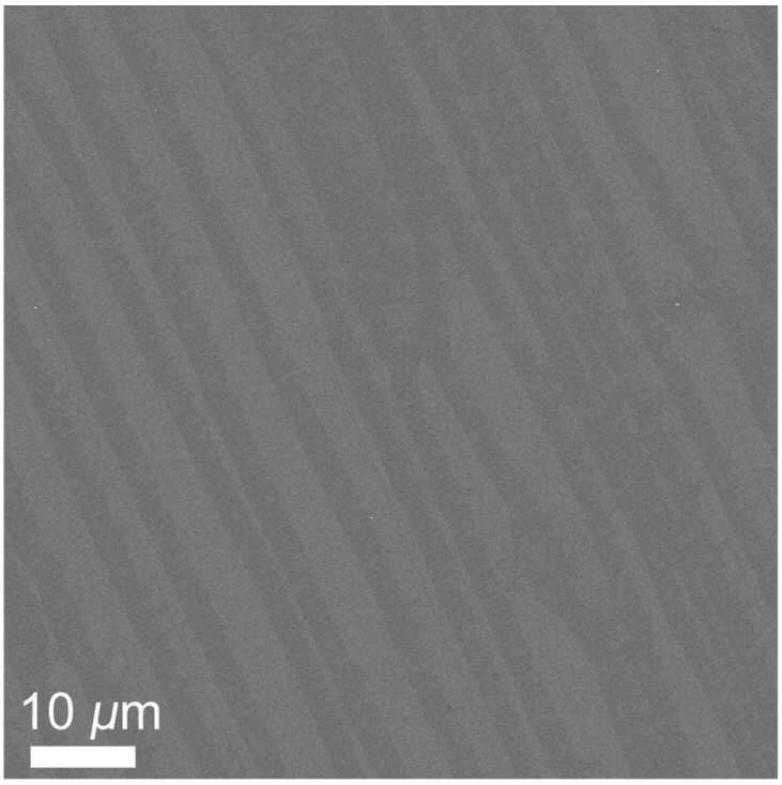
도면2c



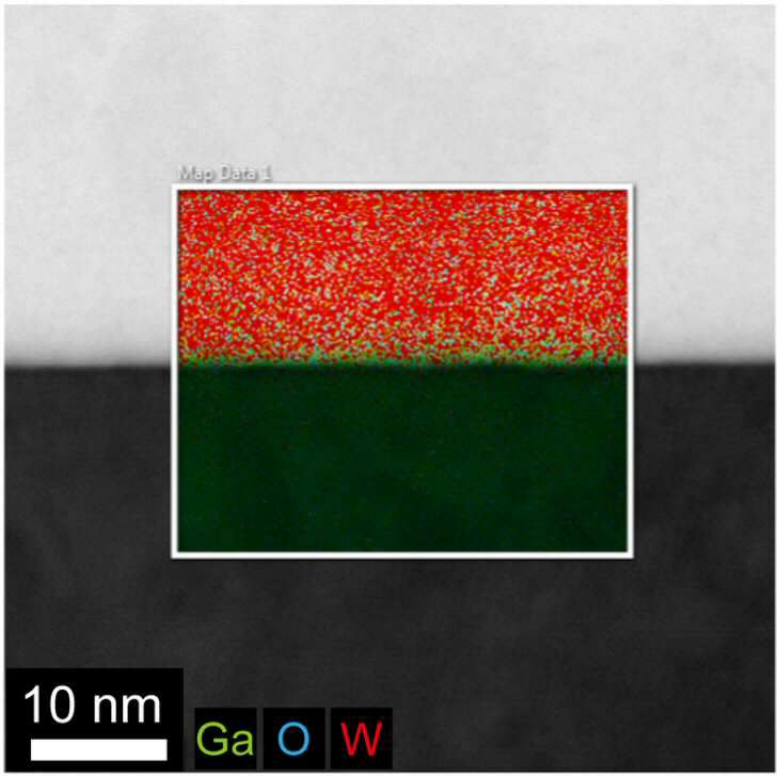
도면2d



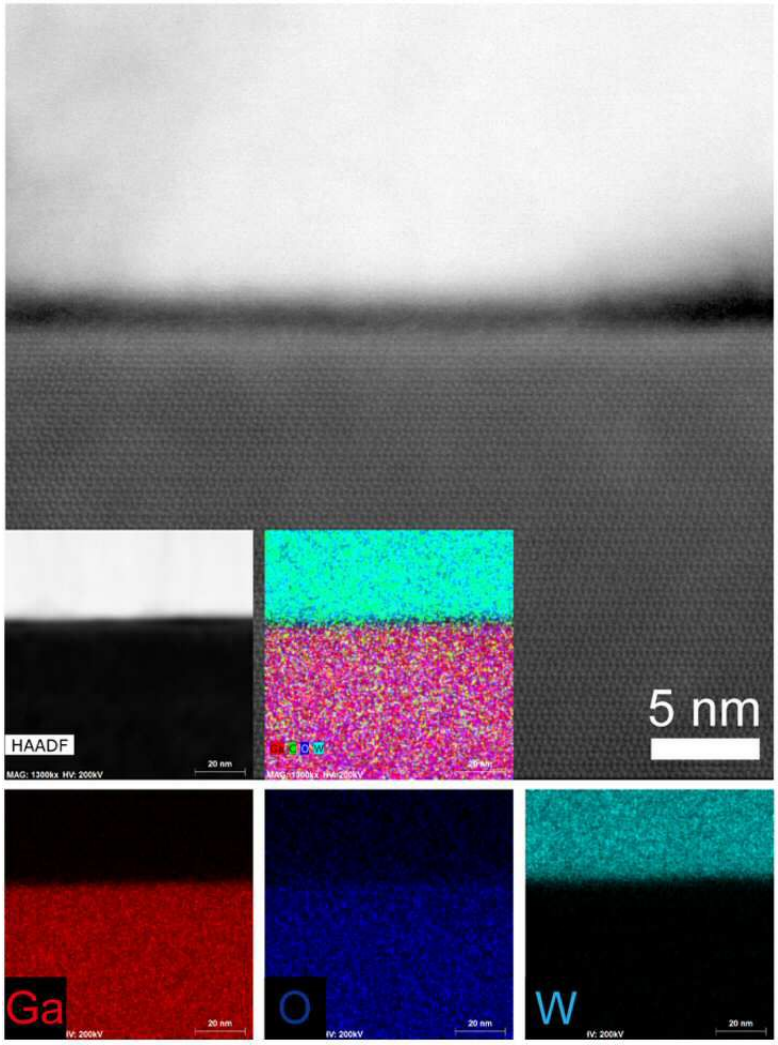
도면3a



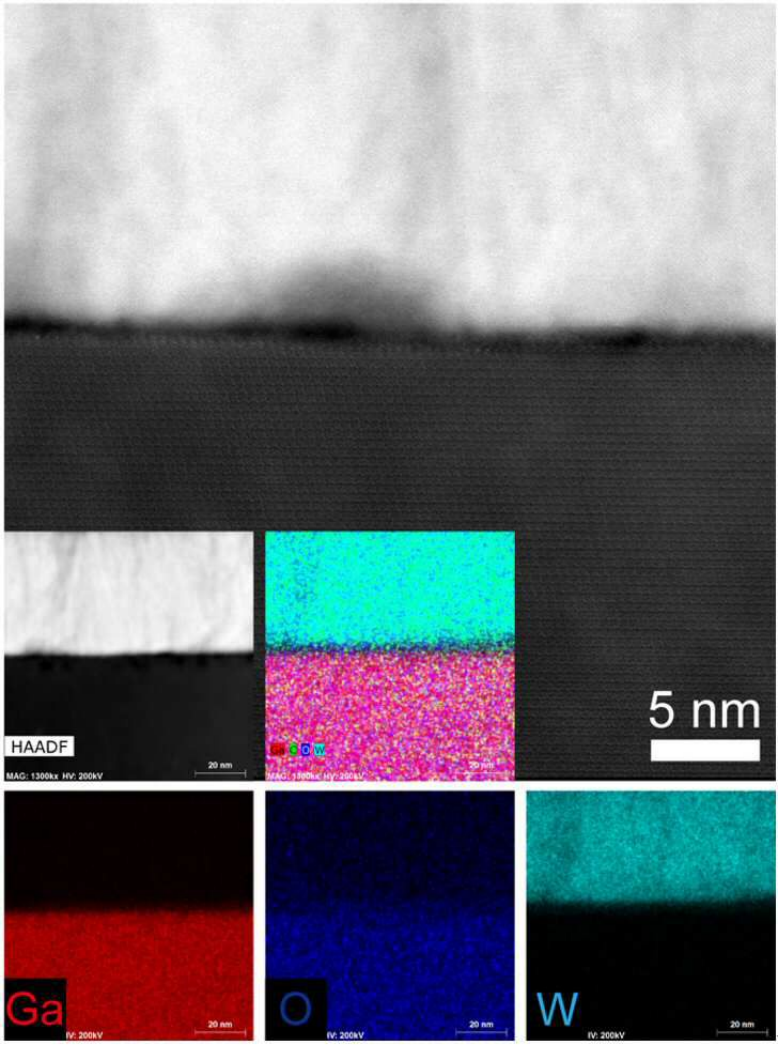
도면3b



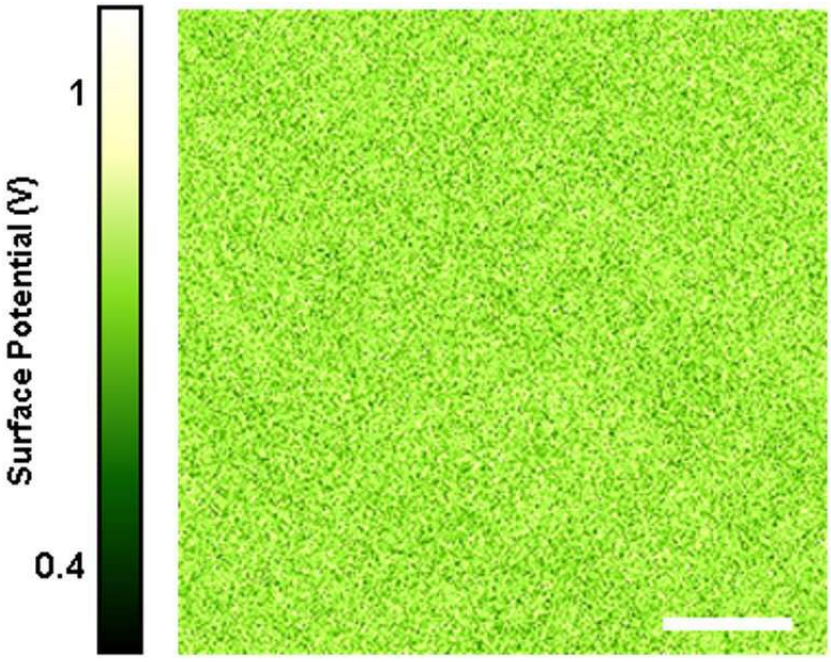
도면3c



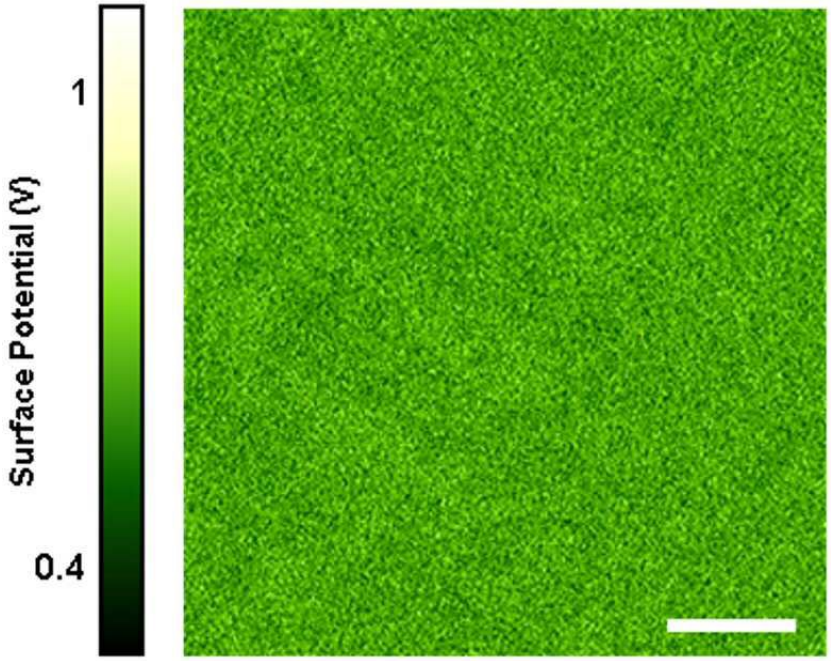
도면3d



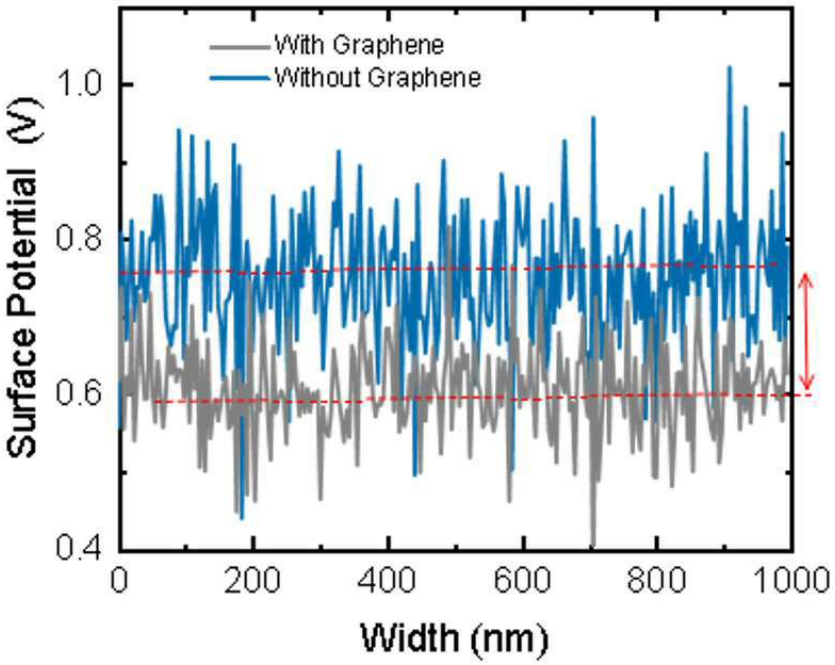
도면4a



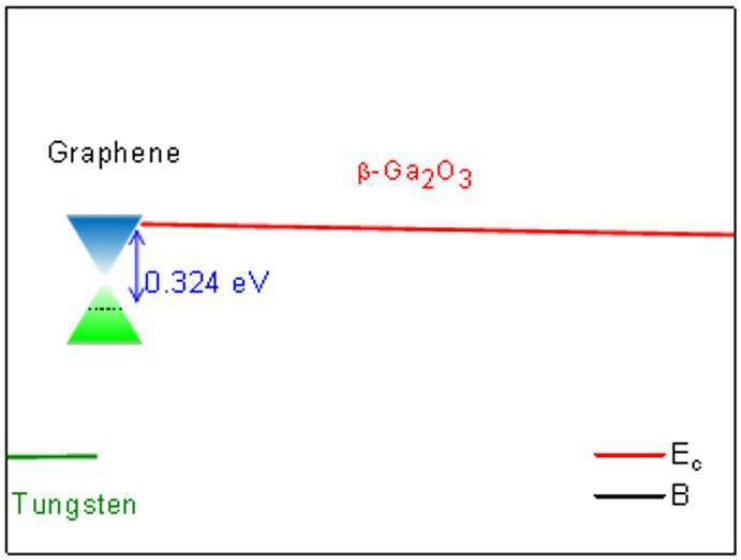
도면4b


1
Surface Potential (V)
0.4

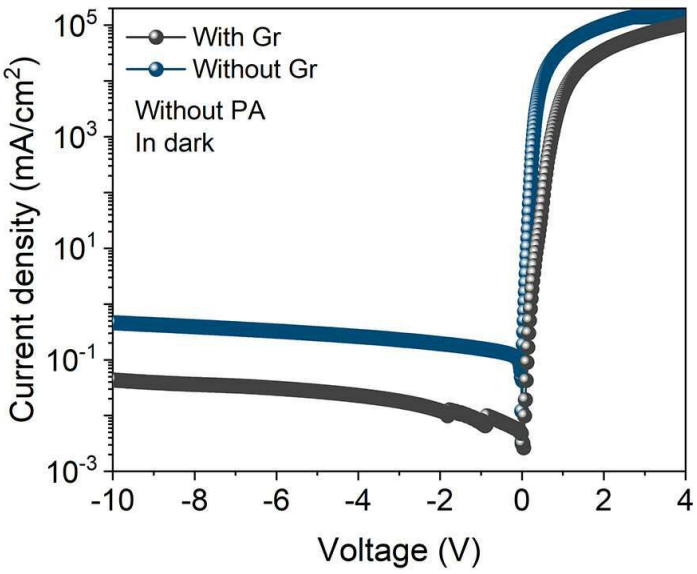
도면4c


With Graphene
Without Graphene
Surface Potential (V)
1.0
0.8
0.6
0.4
0
200
400
600
800
1000
Width (nm)

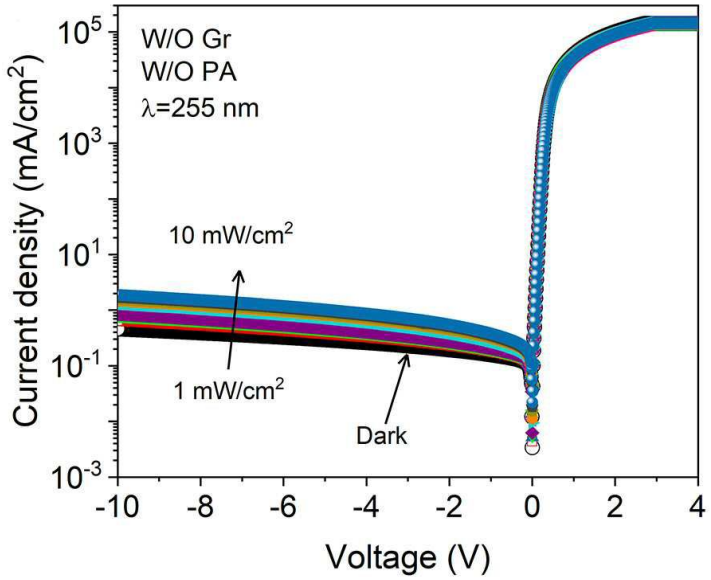
도면4d


Graphene
β-Ga2O3
0.324 eV
Tungsten
Ec
B

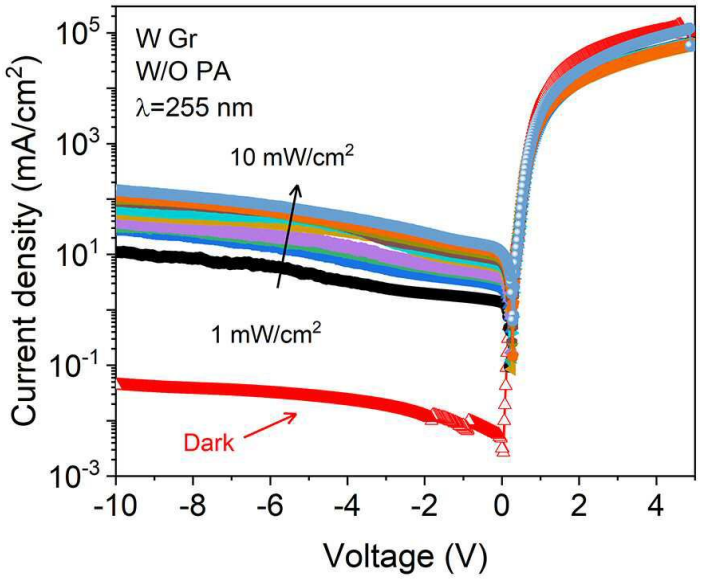
도면5a


With Gr
Without Gr
Without PA
In dark
Current density (mA/cm2)
Voltage (V)
10^5
10^3
10^1
10^-1
10^-3
-10
-8
-6
-4
-2
0
2
4

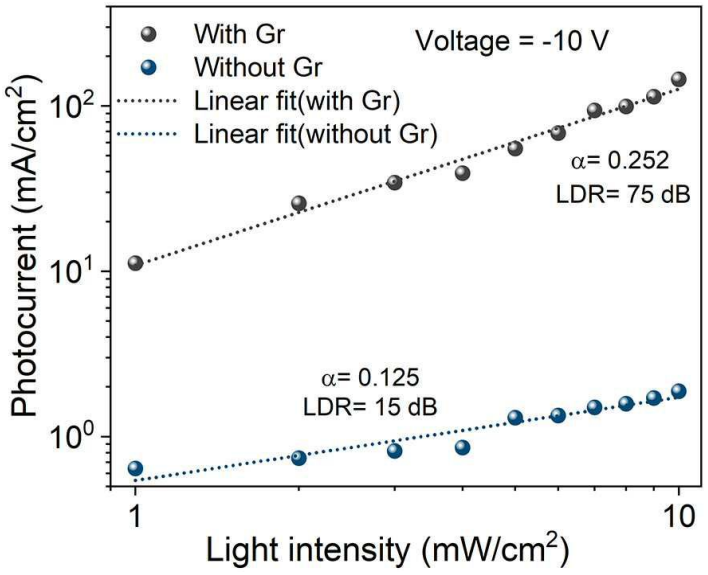
도면5b


W/O Gr
W/O PA
λ=255 nm
10 mW/cm2
1 mW/cm2
Dark
Current density (mA/cm2)
Voltage (V)

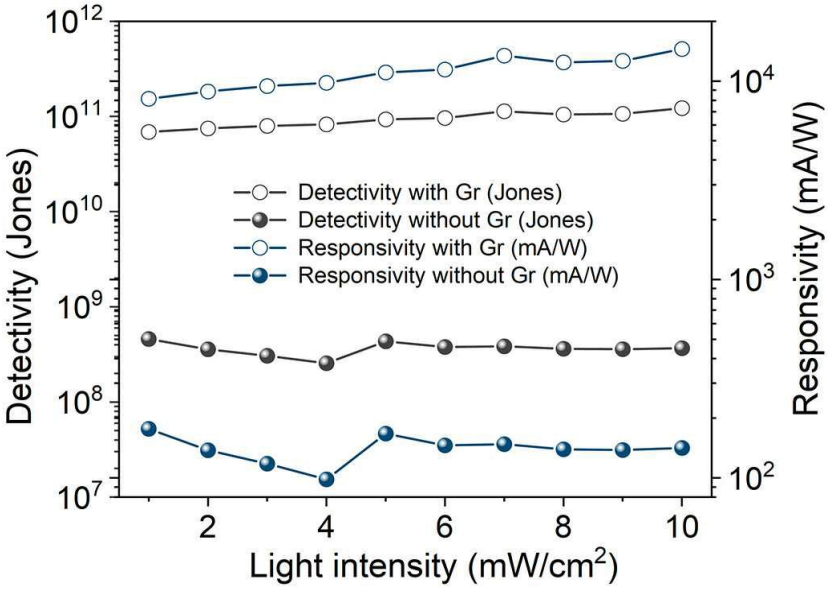
도면5c


W Gr
W/O PA
λ=255 nm
10 mW/cm2
1 mW/cm2
Dark
Current density (mA/cm2)
Voltage (V)

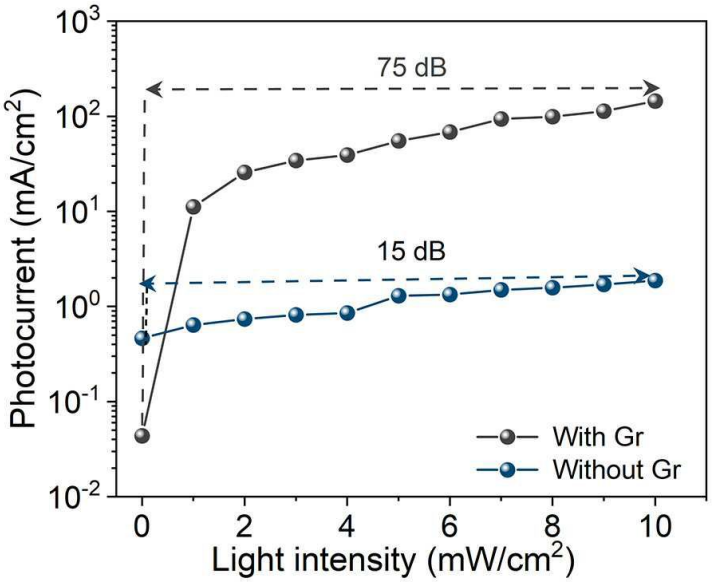
도면5d


With Gr
Without Gr
Linear fit(with Gr)
Linear fit(without Gr)
Voltage = -10 V
α= 0.252
LDR= 75 dB
α= 0.125
LDR= 15 dB
Photocurrent (mA/cm²)
Light intensity (mW/cm²)

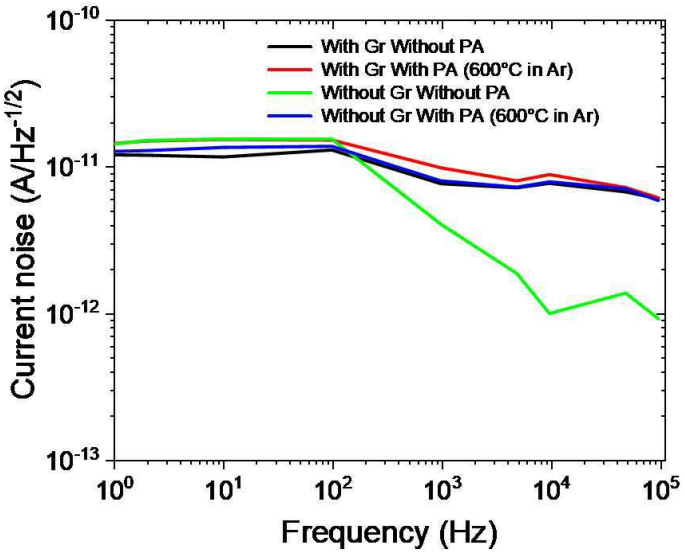
도면5e


Detectivity with Gr (Jones)
Detectivity without Gr (Jones)
Responsivity with Gr (mA/W)
Responsivity without Gr (mA/W)
Detectivity (Jones)
Responsivity (mA/W)
Light intensity (mW/cm²)

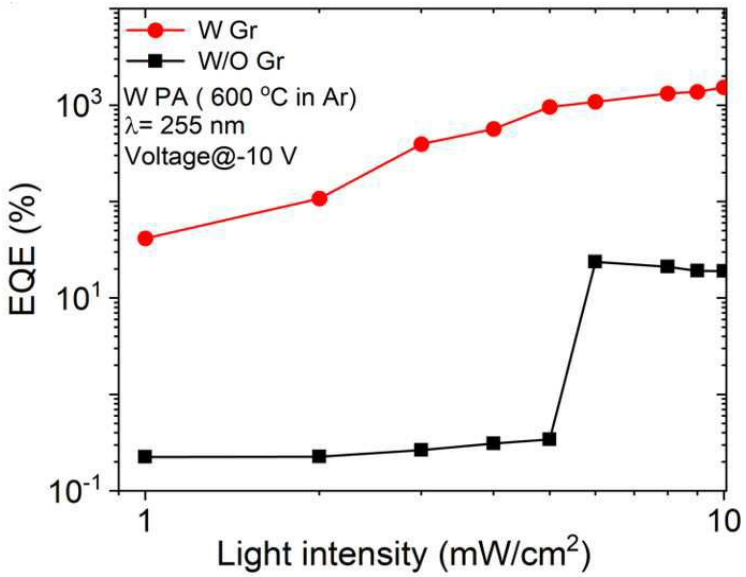
도면5f


75 dB
15 dB
With Gr
Without Gr
Photocurrent (mA/cm2)
Light intensity (mW/cm2)

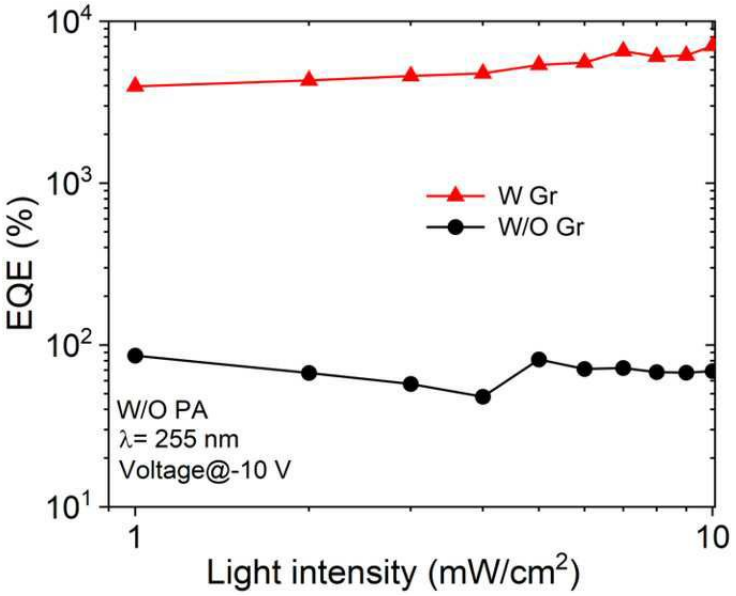
도면6


With Gr Without PA
With Gr With PA (600°C in Ar)
Without Gr Without PA
Without Gr With PA (600°C in Ar)
Current noise (A/Hz1/2)
Frequency (Hz)

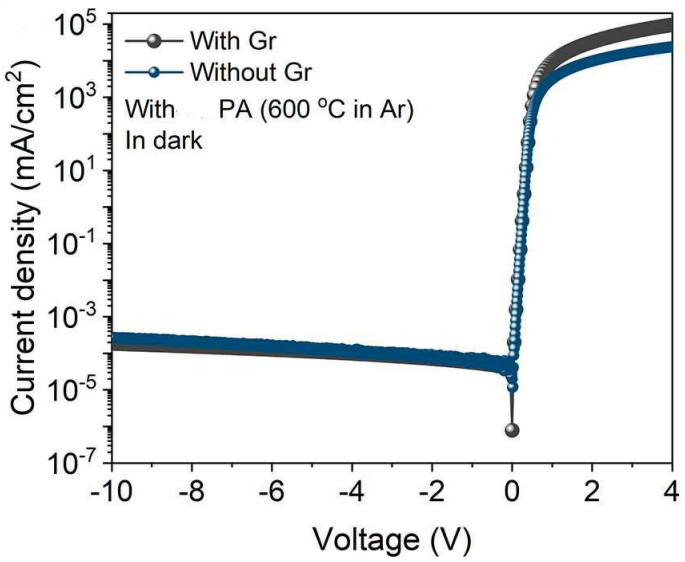
도면7a


W Gr
W/O Gr
W PA (600 °C in Ar)
λ= 255 nm
Voltage@-10 V
EQE (%)
10^3
10^1
10^-1
1
10
Light intensity (mW/cm^2)

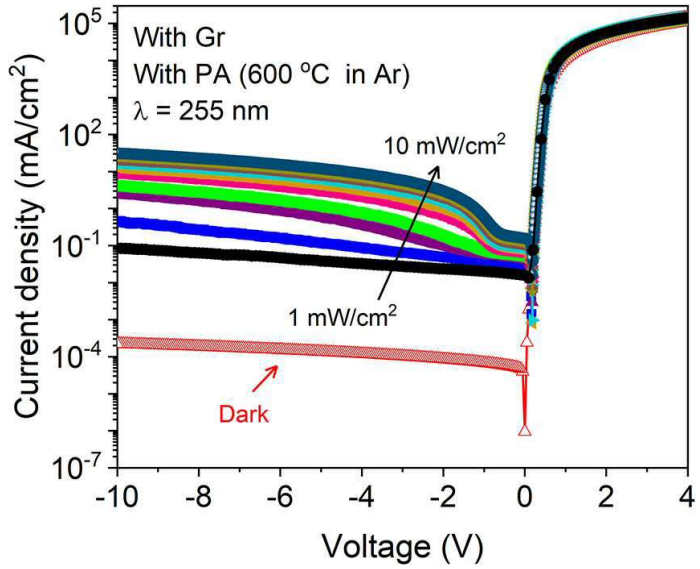
도면7b


W Gr
W/O Gr
W/O PA
λ= 255 nm
Voltage@-10 V
EQE (%)
10^4
10^3
10^2
10^1
1
10
Light intensity (mW/cm^2)

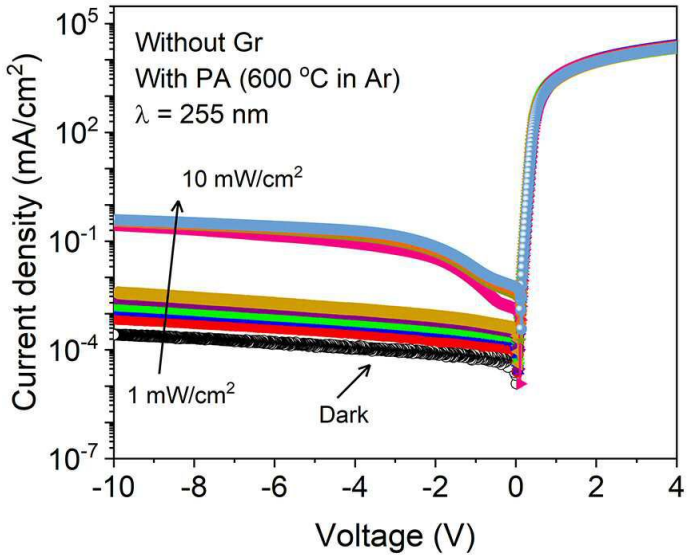
도면8a


With Gr
Without Gr
With PA (600 °C in Ar)
In dark
Current density (mA/cm²)
Voltage (V)

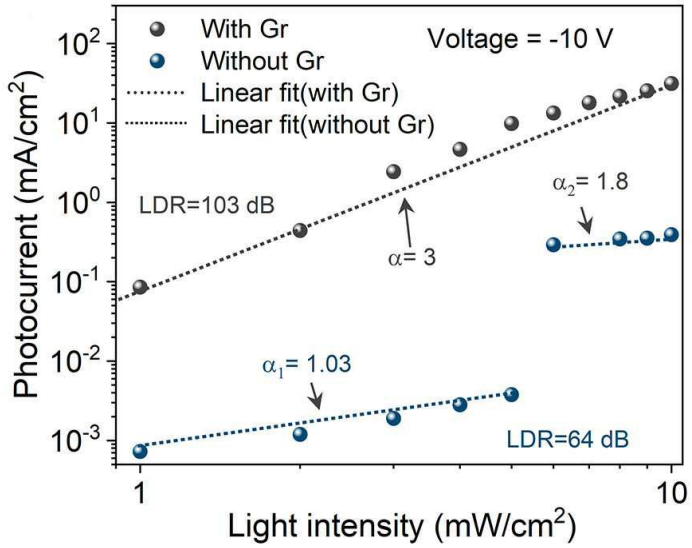
도면8b


With Gr
With PA (600 °C in Ar)
λ = 255 nm
10 mW/cm²
1 mW/cm²
Dark
Current density (mA/cm²)
Voltage (V)

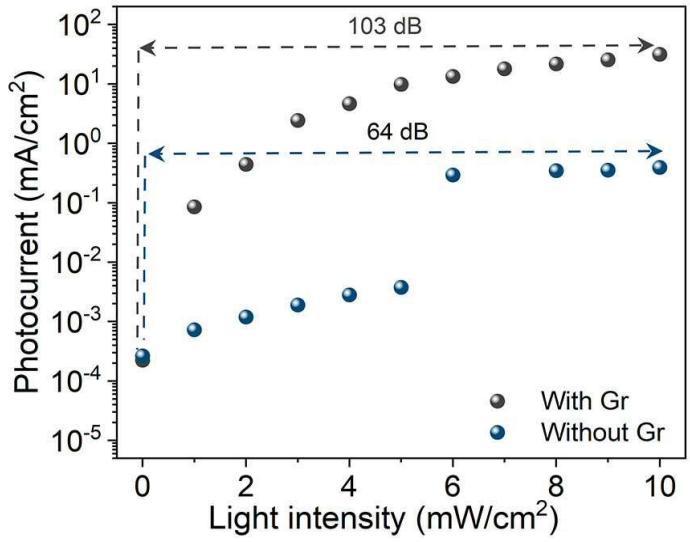
도면8c


Without Gr
With PA (600 °C in Ar)
λ = 255 nm
10 mW/cm2
1 mW/cm2
Dark
Current density (mA/cm2)
Voltage (V)

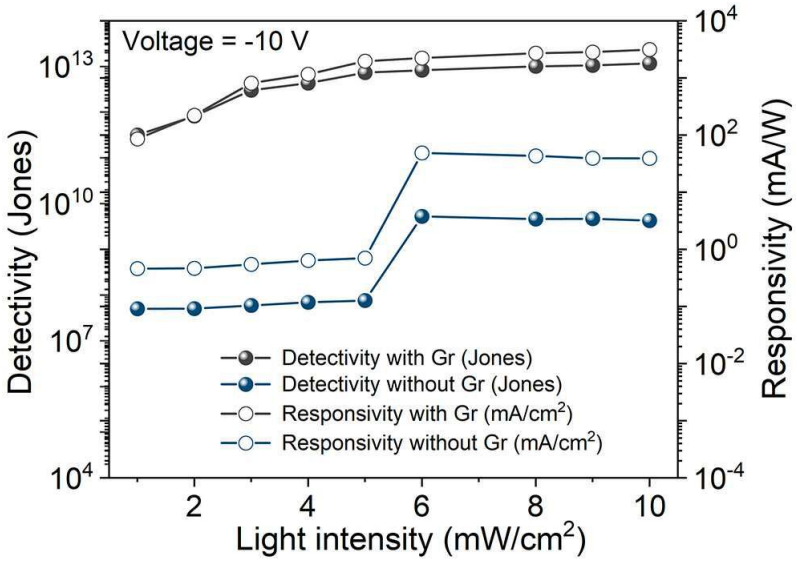
도면8d


With Gr
Without Gr
Linear fit(with Gr)
Linear fit(without Gr)
Voltage = -10 V
LDR=103 dB
α= 3
α2= 1.8
α1= 1.03
LDR=64 dB
Photocurrent (mA/cm2)
Light intensity (mW/cm2)

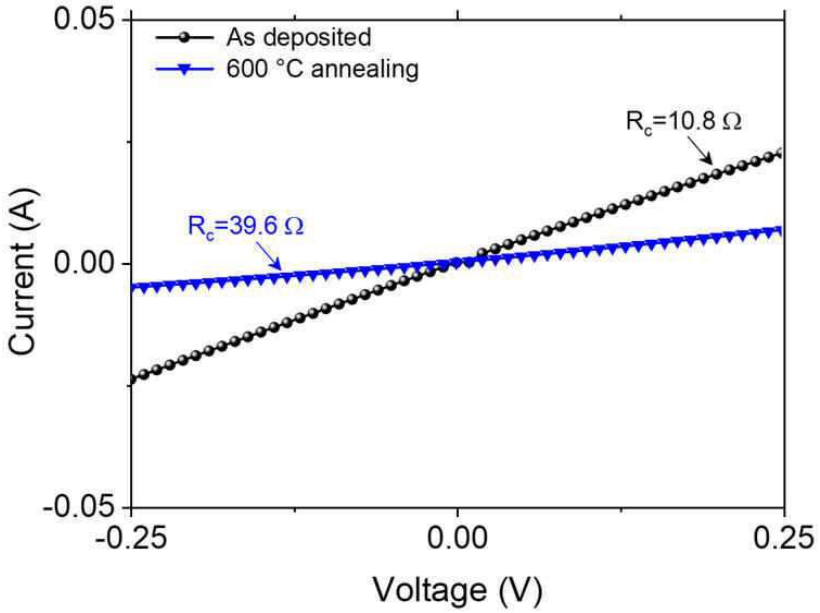
도면8e


103 dB
64 dB
With Gr
Without Gr
Photocurrent (mA/cm²)
Light intensity (mW/cm²)

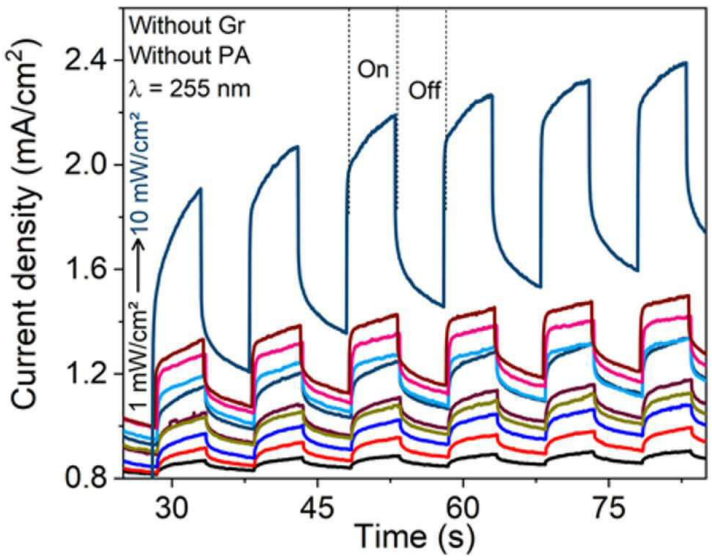
도면8f


Voltage = -10 V
Detectivity with Gr (Jones)
Detectivity without Gr (Jones)
Responsivity with Gr (mA/cm²)
Responsivity without Gr (mA/cm²)
Detectivity (Jones)
Responsivity (mA/W)
Light intensity (mW/cm²)

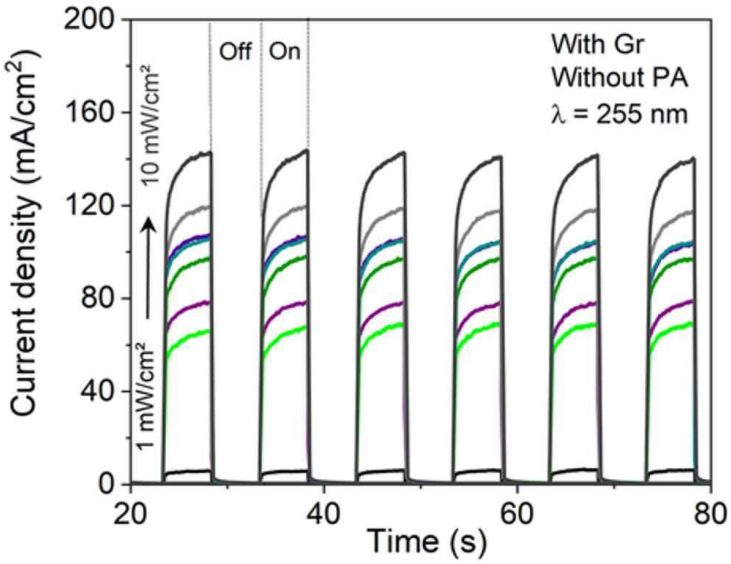
도면9


As deposited
600 °C annealing
R_c=10.8 Ω
R_c=39.6 Ω
Current (A)
Voltage (V)
0.05
0.00
-0.05
-0.25
0.00
0.25

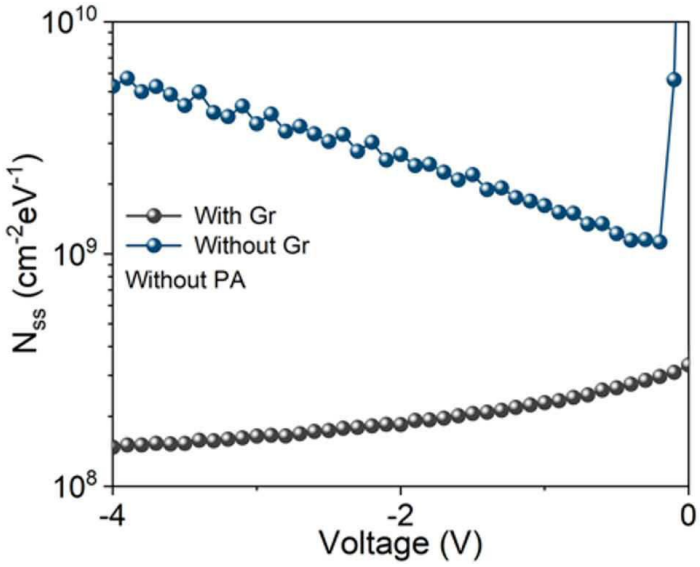
도면10a


Without Gr
Without PA
λ = 255 nm
On
Off
1 mW/cm²
10 mW/cm²
Current density (mA/cm²)
Time (s)
2.4
2.0
1.6
1.2
0.8
30
45
60
75

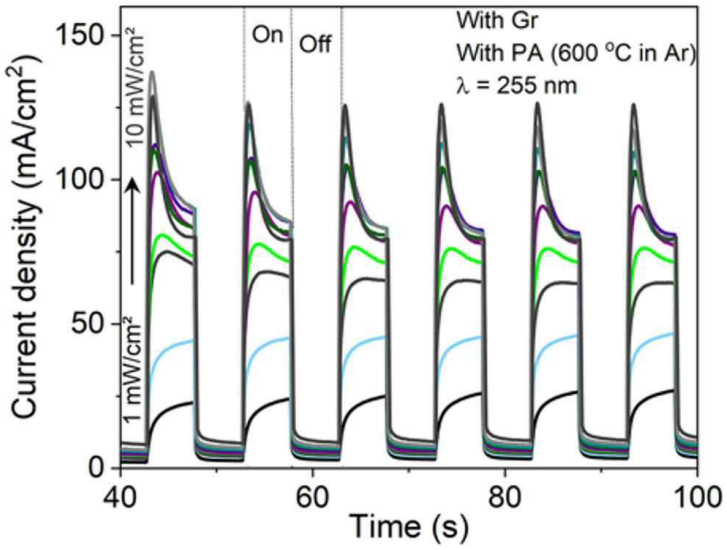
도면10b


Current density (mA/cm²)
Time (s)
Off
On
With Gr
Without PA
λ = 255 nm
10 mW/cm²
1 mW/cm²
200
160
120
80
40
0
20
40
60
80

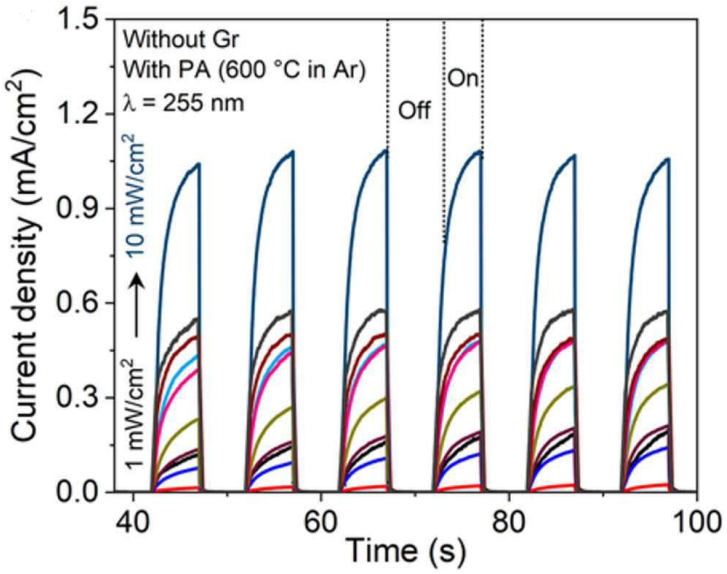
도면10c


N_ss (cm⁻²eV⁻¹)
Voltage (V)
With Gr
Without Gr
Without PA
10¹⁰
10⁹
10⁸
-4
-2
0

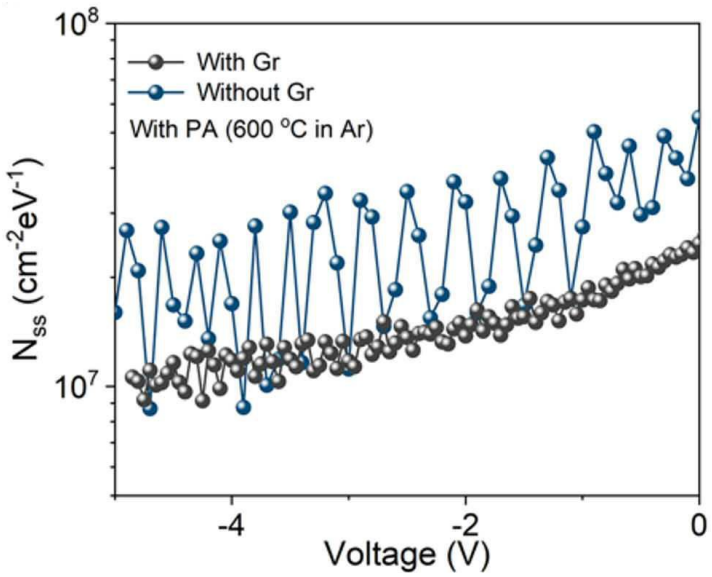
도면10d


With Gr
With PA (600 °C in Ar)
λ = 255 nm
On
Off
10 mW/cm²
1 mW/cm²
Current density (mA/cm²)
Time (s)
150
100
50
0
40
60
80
100

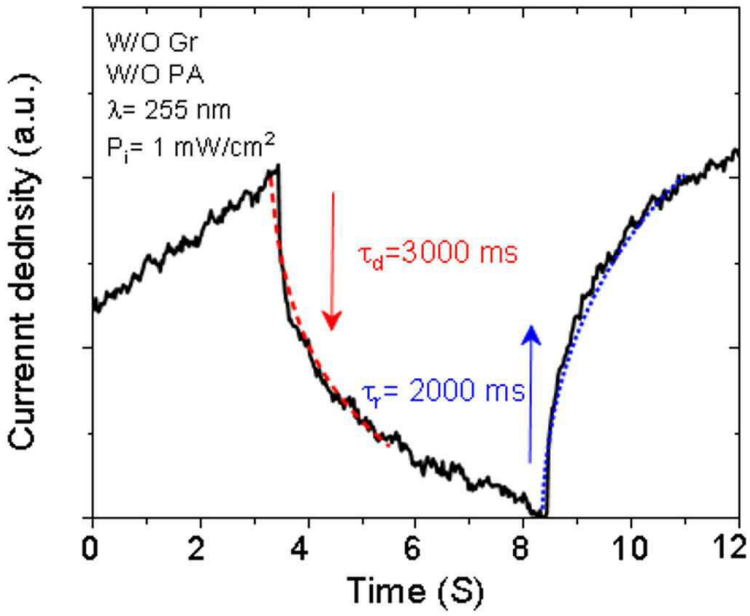
도면10e


Without Gr
With PA (600 °C in Ar)
λ = 255 nm
Off
On
10 mW/cm²
1 mW/cm²
Current density (mA/cm²)
Time (s)
1.5
1.2
0.9
0.6
0.3
0.0
40
60
80
100

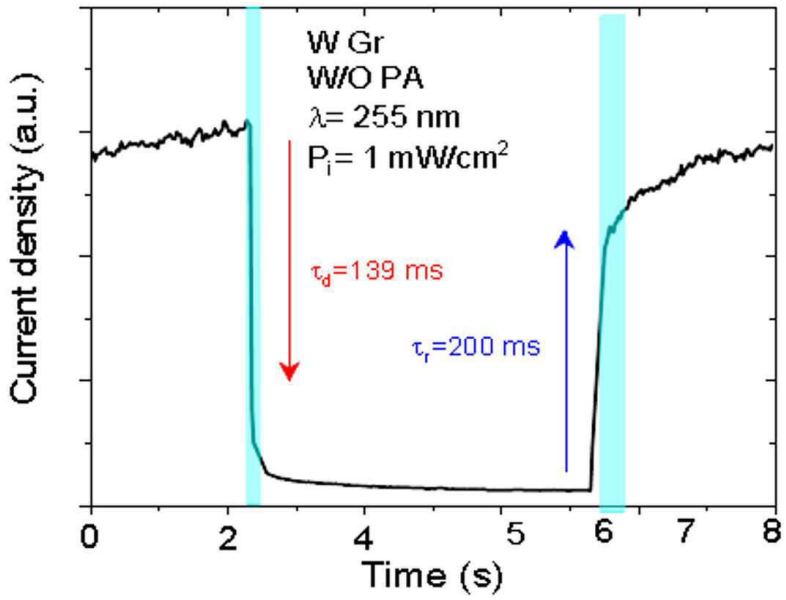
도면10f


10^8
10^7
N_{ss} ($cm^{-2}eV^{-1}$)
With Gr
Without Gr
With PA (600 °C in Ar)
-4
-2
0
Voltage (V)

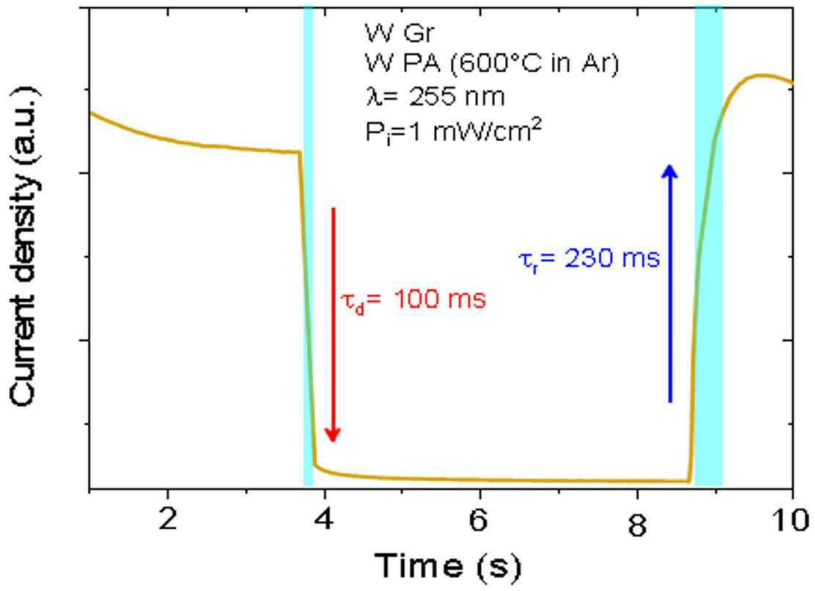
도면11a


W/O Gr
W/O PA
λ= 255 nm
P_i= 1 mW/cm^2
τ_d=3000 ms
τ_r= 2000 ms
Currennt dednsity (a.u.)
0
2
4
6
8
10
12
Time (S)

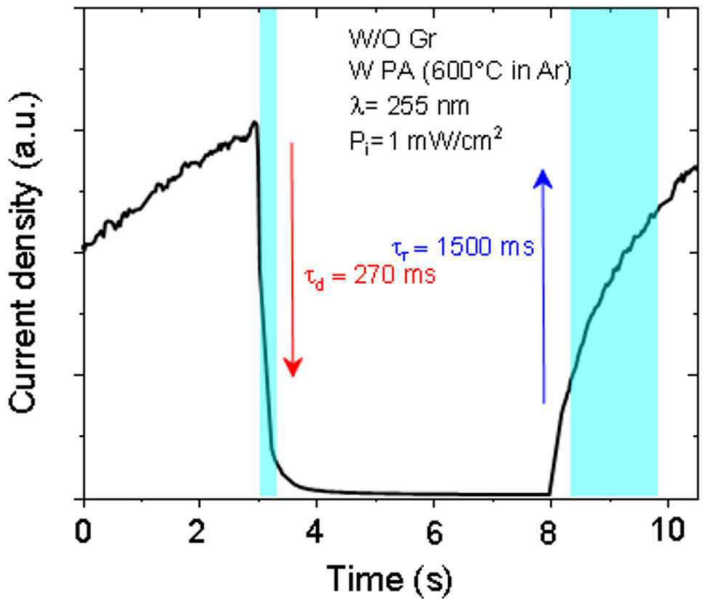
도면11b


W Gr
W/O PA
λ= 255 nm
P$_i$= 1 mW/cm^2
τ$_d$=139 ms
τ$_r$=200 ms
Current density (a.u.)
Time (s)
0
2
4
5
6
7
8

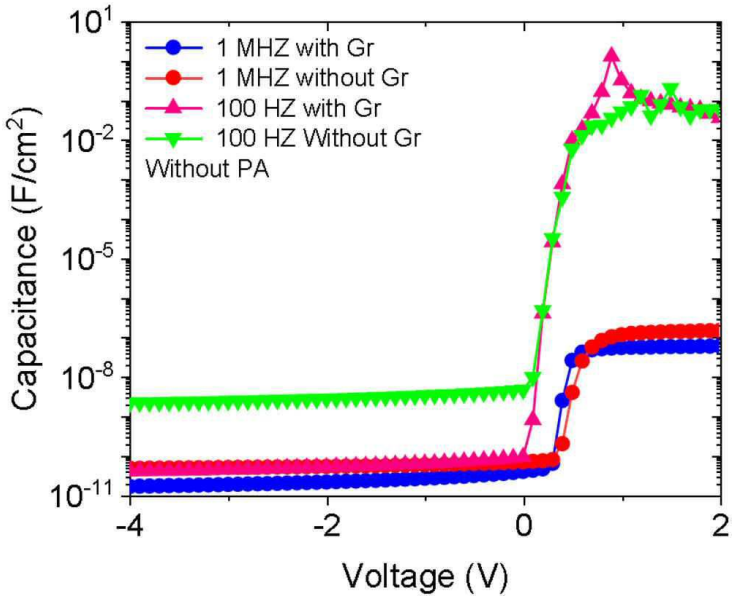
도면11c


W Gr
W PA (600°C in Ar)
λ= 255 nm
P$_i$=1 mW/cm^2
τ$_r$= 230 ms
τ$_d$= 100 ms
Current density (a.u.)
Time (s)
2
4
6
8
10

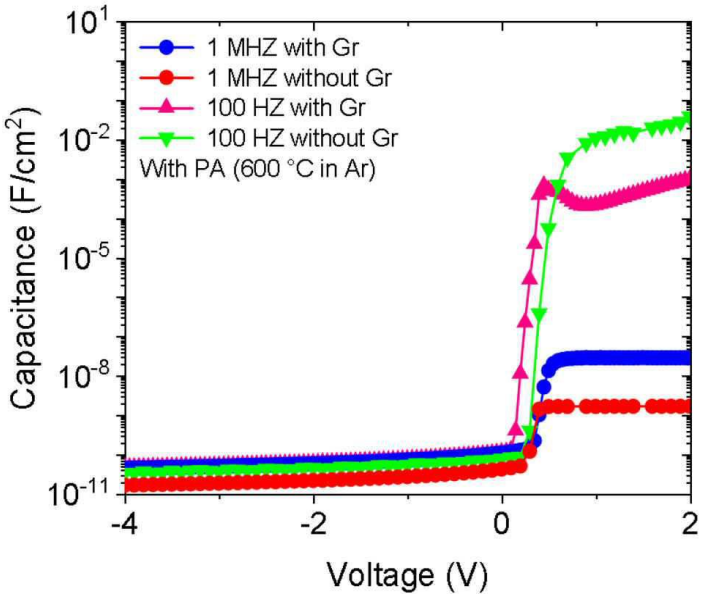
도면11d


W/O Gr
W PA (600°C in Ar)
λ= 255 nm
P_i= 1 mW/cm²
τ_r = 1500 ms
τ_d = 270 ms
Current density (a.u.)
Time (s)
0
2
4
6
8
10

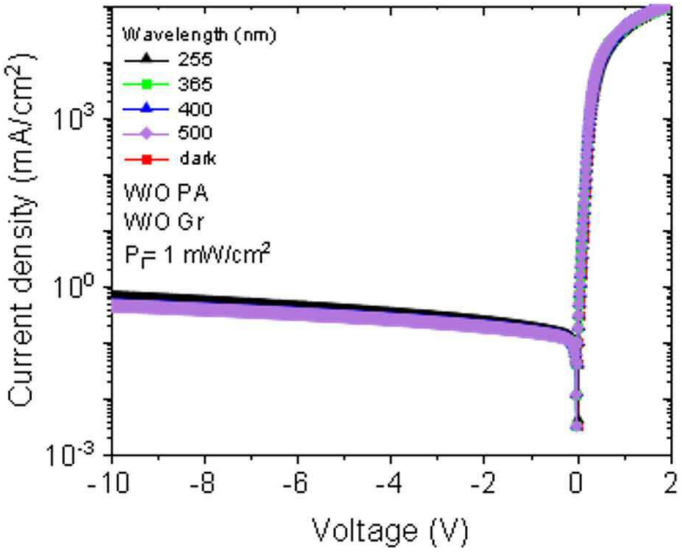
도면12a


1 MHZ with Gr
1 MHZ without Gr
100 HZ with Gr
100 HZ Without Gr
Without PA
Capacitance (F/cm²)
Voltage (V)
10¹
10⁻²
10⁻⁵
10⁻⁸
10⁻¹¹
-4
-2
0
2

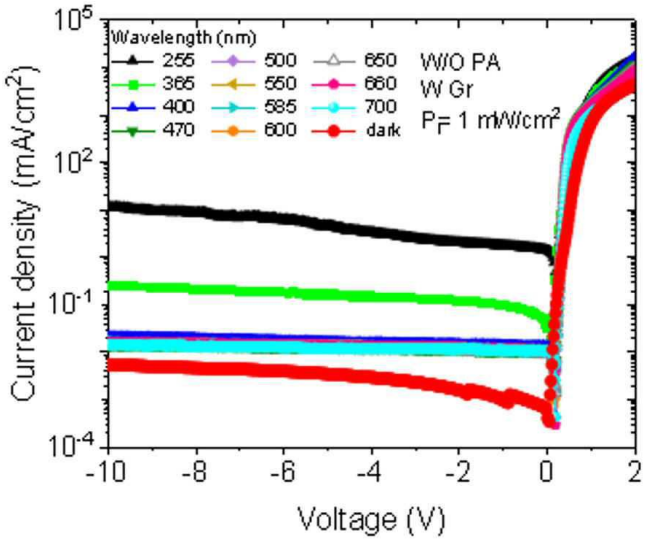
도면12b


1 MHZ with Gr
1 MHZ without Gr
100 HZ with Gr
100 HZ without Gr
With PA (600 °C in Ar)
Capacitance (F/cm²)
Voltage (V)

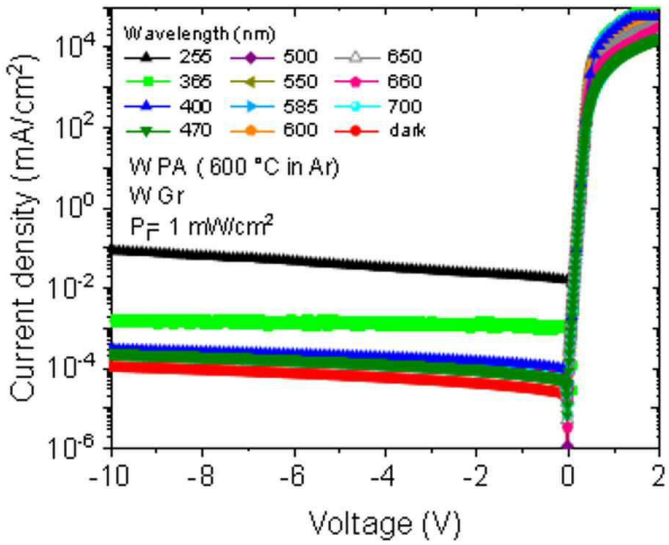
도면13a


Wavelength (nm)
255
365
400
500
dark
W/O PA
W/O Gr
P= 1 mW/cm²
Current density (mA/cm²)
Voltage (V)

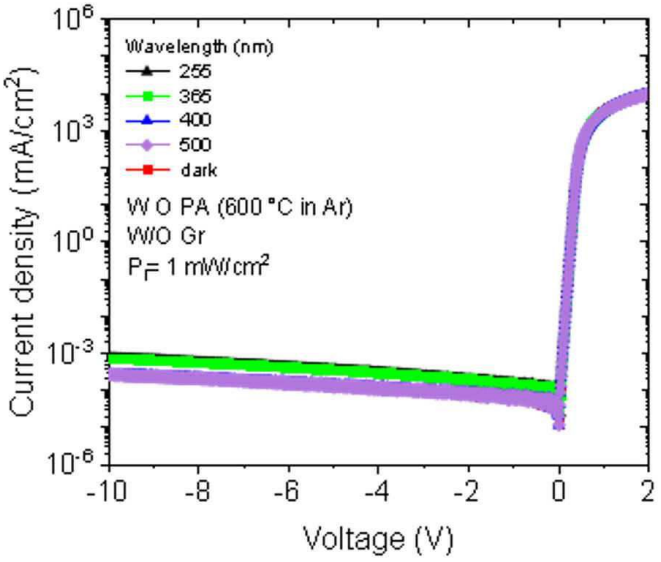
도면13b


Wavelength (nm)
255
365
400
470
500
550
585
600
650
660
700
dark
W/O PA
W Gr
P_F 1 mW/cm²
Current density (mA/cm²)
Voltage (V)

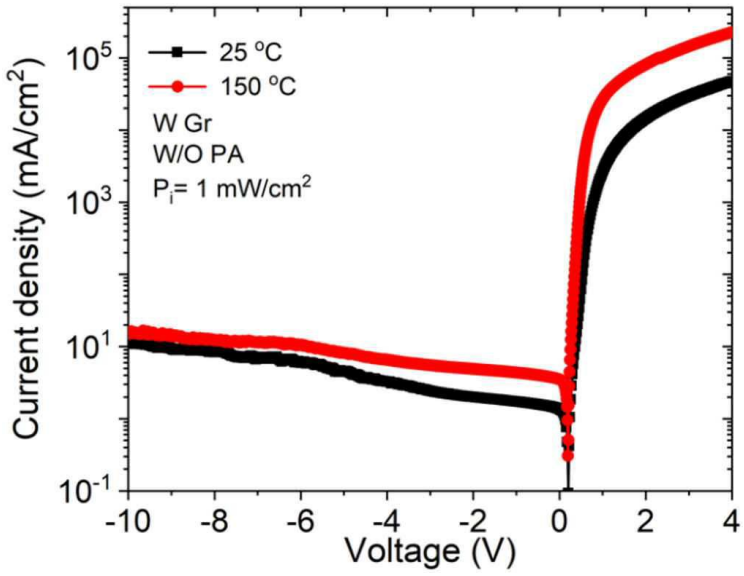
도면13c


Wavelength (nm)
255
365
400
470
500
550
585
600
650
660
700
dark
W PA (600 °C in Ar)
W Gr
P_F 1 mW/cm²
Current density (mA/cm²)
Voltage (V)

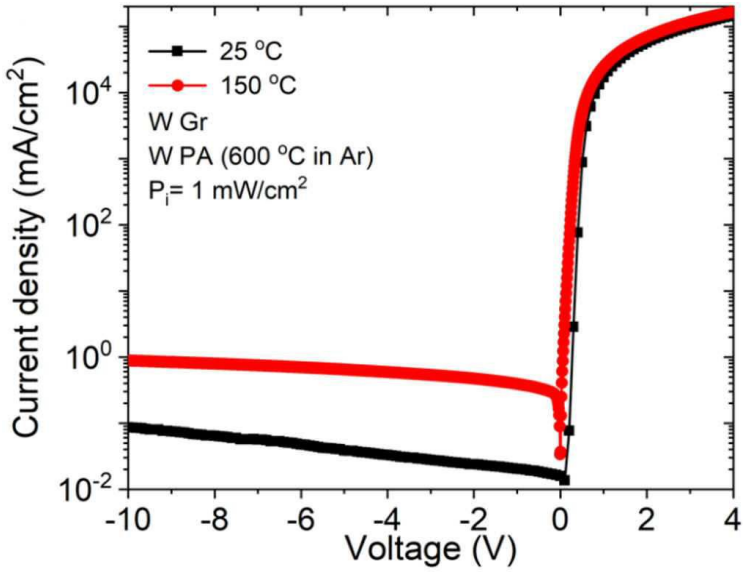
도면13d


Wavelength (nm)
255
365
400
500
dark
W O PA (600 °C in Ar)
W/O Gr
P_F= 1 mW/cm²
Current density (mA/cm²)
Voltage (V)

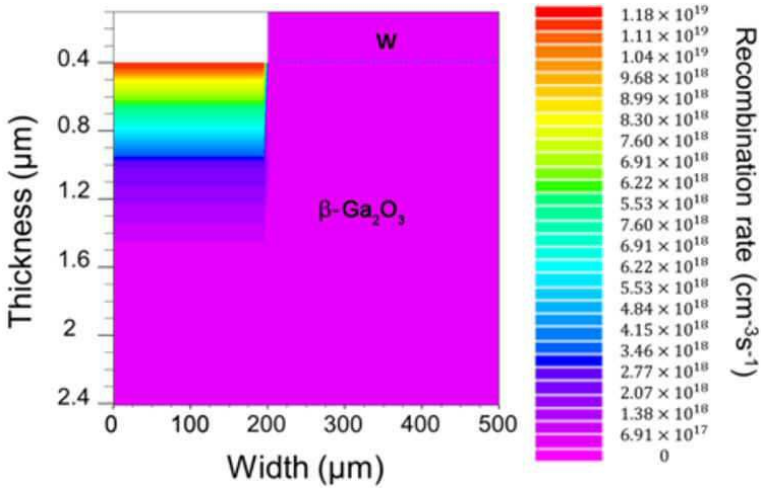
도면14a


25 °C
150 °C
W Gr
W/O PA
P_i= 1 mW/cm²
Current density (mA/cm²)
Voltage (V)

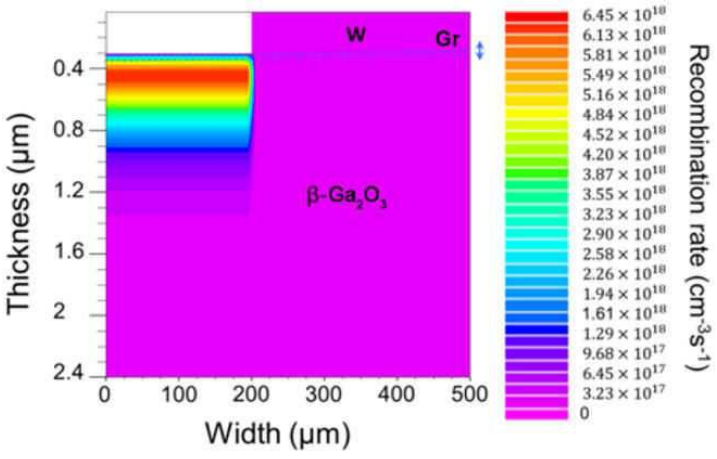
도면14b



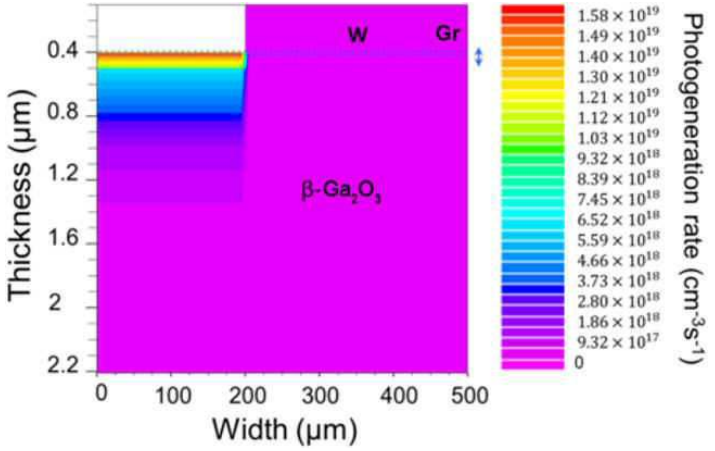
도면15a



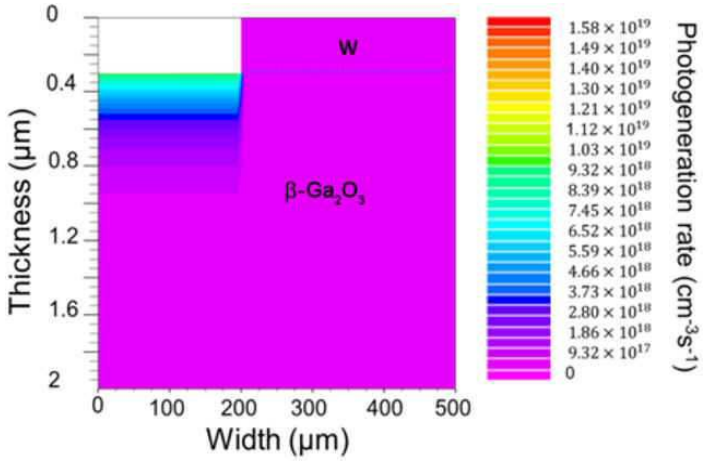
도면15b



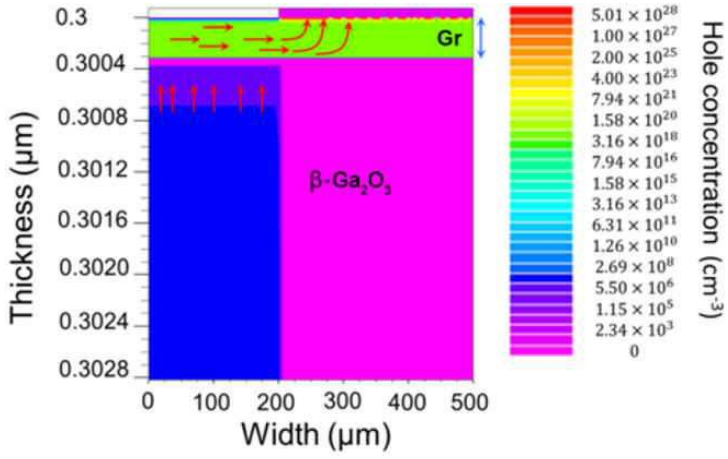
도면15c



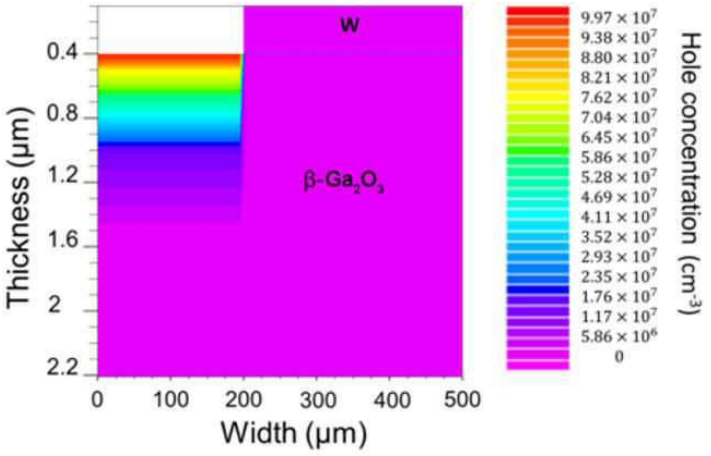
도면15d



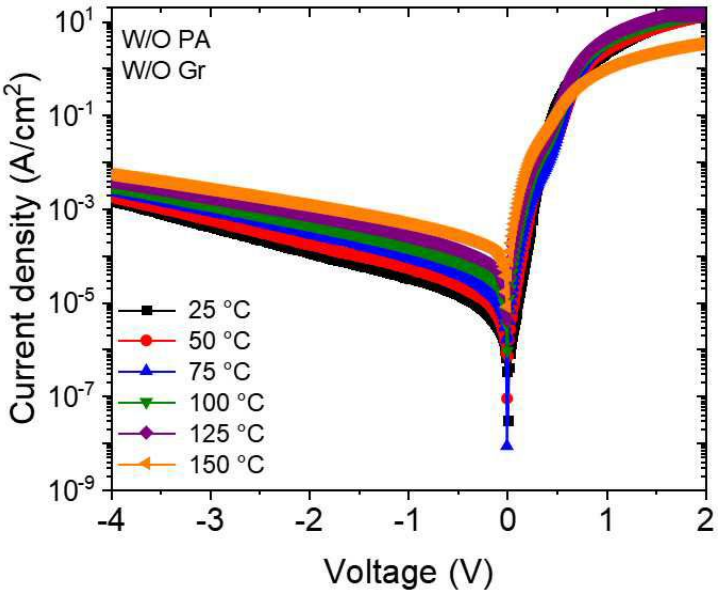
도면15e



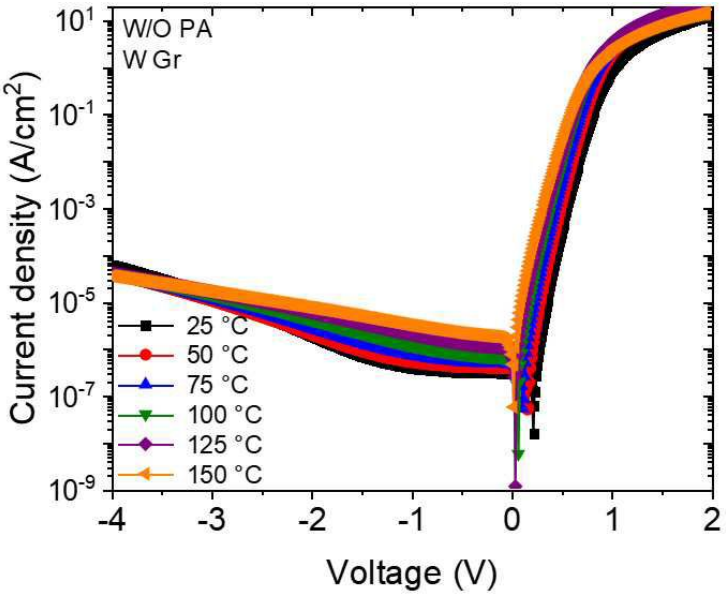
도면15f


W
β-Ga2O3
Thickness (μm)
0.4
0.8
1.2
1.6
2
2.2
0
100
200
300
400
500
Width (μm)
Hole concentration (cm-3)
9.97 × 10^7
9.38 × 10^7
8.80 × 10^7
8.21 × 10^7
7.62 × 10^7
7.04 × 10^7
6.45 × 10^7
5.86 × 10^7
5.28 × 10^7
4.69 × 10^7
4.11 × 10^7
3.52 × 10^7
2.93 × 10^7
2.35 × 10^7
1.76 × 10^7
1.17 × 10^7
5.86 × 10^6
0

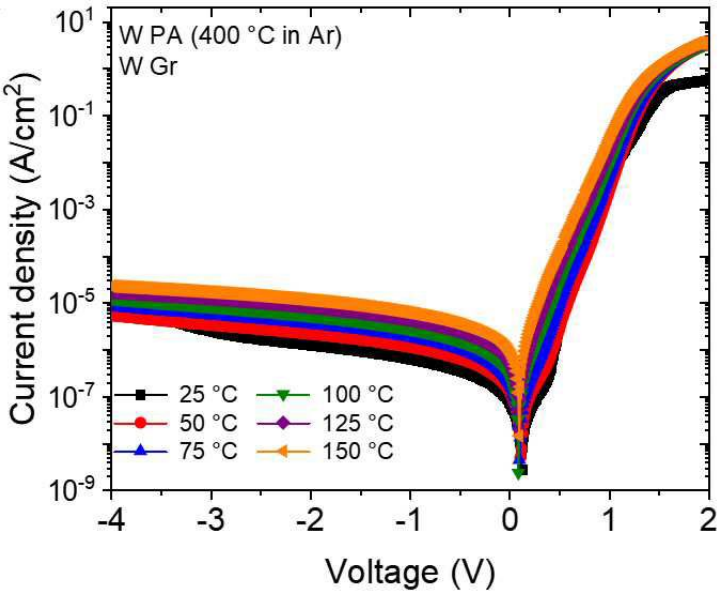
도면16a


W/O PA
W/O Gr
25 °C
50 °C
75 °C
100 °C
125 °C
150 °C
Current density (A/cm2)
10^1
10^-1
10^-3
10^-5
10^-7
10^-9
-4
-3
-2
-1
0
1
2
Voltage (V)

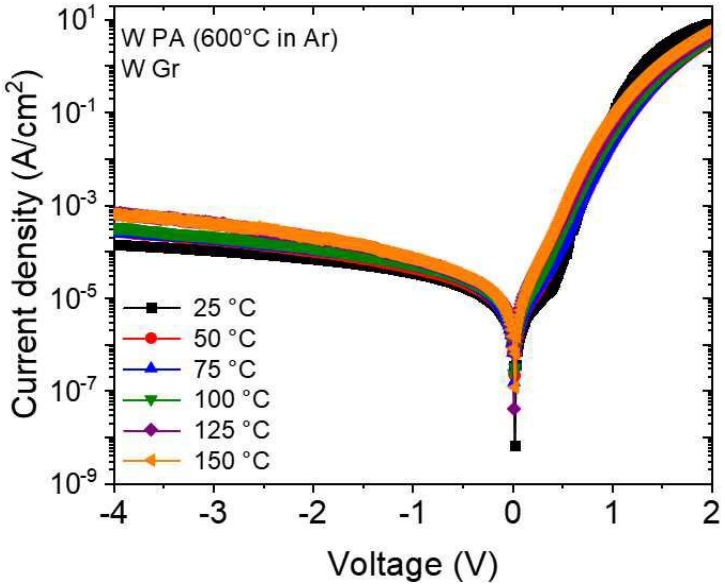
도면16b


W/O PA
W Gr
Current density (A/cm²)
Voltage (V)
25 °C
50 °C
75 °C
100 °C
125 °C
150 °C

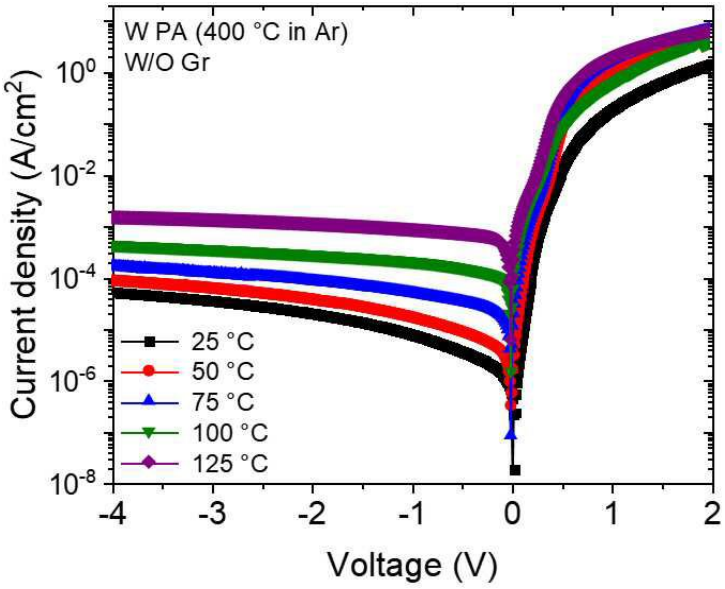
도면16c


W PA (400 °C in Ar)
W Gr
Current density (A/cm²)
Voltage (V)
25 °C
50 °C
75 °C
100 °C
125 °C
150 °C

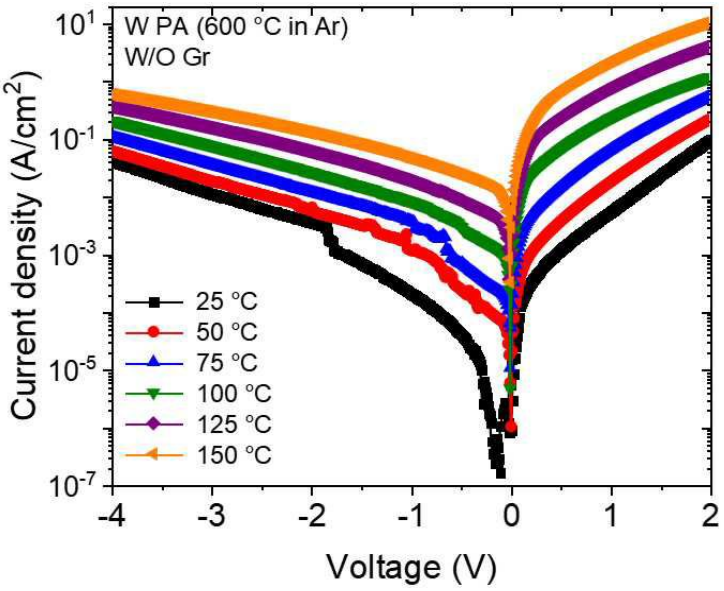
도면16d


W PA (600°C in Ar)
W Gr
Current density (A/cm²)
Voltage (V)
25 °C
50 °C
75 °C
100 °C
125 °C
150 °C

도면16e


W PA (400 °C in Ar)
W/O Gr
Current density (A/cm²)
Voltage (V)
25 °C
50 °C
75 °C
100 °C
125 °C

도면16f


W PA (600 °C in Ar)
W/O Gr
Current density (A/cm²)
Voltage (V)
25 °C
50 °C
75 °C
100 °C
125 °C
150 °C
10¹
10⁻¹
10⁻³
10⁻⁵
10⁻⁷
-4
-3
-2
-1
0
1
2