



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년11월12일  
(11) 등록번호 10-2728362  
(24) 등록일자 2024년11월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H01L 31/18 (2006.01) H01L 31/109 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
H01L 31/18 (2021.01)  
H01L 31/109 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2022-0120023  
(22) 출원일자 2022년09월22일  
심사청구일자 2022년09월22일  
(65) 공개번호 10-2023-0127127  
(43) 공개일자 2023년08월31일  
(30) 우선권주장  
1020220023598 2022년02월23일 대한민국(KR)  
(56) 선행기술조사문헌  
US20180374980 A1\*  
\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자  
파워큐브세미 (주)  
경기도 성남시 수정구 청계산로 686 , 414호((고  
등동, 반도아이비밸리))  
(72) 발명자  
홍정수  
경기도 성남시 분당구 금곡로 263, 507-903  
강태영  
경기도 광주시 태전동로 12, 102동 1303호 (태전  
동, 이편한세상태전2차)  
(뒷면에 계속)  
(74) 대리인  
홍승훈

전체 청구항 수 : 총 7 항

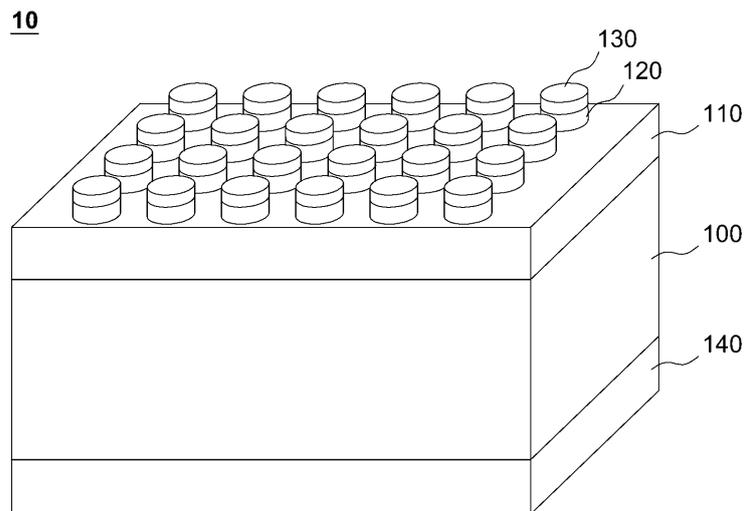
심사관 : 배준석

(54) 발명의 명칭 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 및 그 제조 방법

(57) 요약

본 발명은 이중 접합 기반 태양광 블라인드 광검출기에 관한 것이다. 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법은 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼상에 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층을 성장시키는 단계, 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼를 챔버에 위치시키는 단계, 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 분위기에서 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층상에 제2 도전형의 산화은 박막을 증착하는 단계, 상기 스퍼터링 챔버로의 산소 공급을 차단하는 단계 및 불활성 가스 분위기에서 상기 제2 도전형의 산화은 박막상에 은 박막을 증착하여 전면 전극을 형성하는 단계를 포함할 수 있다.

대표도 - 도1



(72) 발명자

**강현기**

서울시 송파구 바람드리길 27-1 303호

**경신수**

경기도 하남시 미사강변대로 270 (선동, 미사강변  
센트리버) 706동 1601호

**임유승**

서울특별시 송파구 양재대로 1218 올림픽선수기자  
촌 246-904

**명세서**

**청구범위**

**청구항 1**

제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼상에 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층을 성장시키는 단계;

상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼를 스퍼터링 챔버에 위치시키는 단계;

불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 분위기에서 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층상에 제2 도전형의 산화은 박막을 증착하는 단계;

상기 스퍼터링 챔버로의 산소 공급을 차단하는 단계; 및

불활성 가스 분위기에서 상기 제2 도전형의 산화은 박막에 은 박막을 연속적으로 증착하여 전면 전극을 형성하는 단계를 포함하는 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법.

**청구항 2**

청구항 1에 있어서, 상기 제2 도전형의 산화은 박막 및 상기 은 박막은 대향 타겟 스퍼터링을 이용하여 연속적으로 증착되는 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법.

**청구항 3**

청구항 1에 있어서, 상기 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 분위기에서 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층상에 제2 도전형의 산화은 박막을 증착하는 단계에서, 상기 산소 가스의 유량은 3sccm인 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법.

**청구항 4**

청구항 1에 있어서, 상기 은 박막은 표면을 균일하고 연속적으로 형성하기 위하여 임계 두께보다 두껍게 증착되는 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법.

**청구항 5**

청구항 4에 있어서, 상기 은 박막은 투과율을 높이며 반사율을 낮추기 위해 20nm 두께로 증착되는 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법.

**청구항 6**

청구항 1에 있어서, 상기 전면 전극이 형성된 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼를 후 열처리하는 단계를 더 포함하는 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법.

**청구항 7**

청구항 6에 있어서, 상기 후 열처리는 100° C 내지 350° C로 진행되는 급속 열처리인 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법.

**청구항 8**

삭제

**청구항 9**

삭제

**청구항 10**

삭제

**청구항 11**

삭제

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 이중 접합 기반 태양광 블라인드 광검출기에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0002] 자외선(Ultraviolet, 이하 UV)은 인간 활동의 다양한 영역, 예를 들어, 박테리아 살균, 비타민 D 형성 촉진, 환경 모니터링 등에서 광범위하게 사용된다. UV는 280-10nm 파장 범위의 UVC, 320-280nm 파장 범위의 UVB, 및 400-320nm 파장 범위의 UVA로 분류될 수 있다. 특히, UVC는 다른 파장의 신호에 비해 주변 영역의 다른 신호로부터의 간섭과 잡음이 적어, 예를 들어, 부분 방전 경보기 및 미사일 탐지용 군용 레이더와 같이, 산업 및 안전 분야에서 널리 사용된다.

[0003] 또한 280~200nm 파장 범위의 심자외선(Deep-Ultraviolet, 이하 DUV)은 눈과 피부에 치명적인 손상을 주고 노화를 촉진시키는 것으로 잘 알려져 있다. DUV 광검출기를 실제 현장에 적용하기 위해서, 빠른 응답속도 및 높은 광응답성(photoresponsivity)과 같은 높은 수준의 센싱 성능, 선택성(selectivity) 및 안정성(stability)이 요구된다. 다양한 DUV 광검출기 중에서 자체 전원식 광검출기는 우수한 신뢰성(reliability), 외부 전원이 필요하지 않음 및 효율성으로 인해 수많은 민간, 생물학, 군사, 천문학 및 환경 모니터링 분야에서 광범위하게 사용되어 왔다. 반도체 재료는 광 신호를 전기 신호로 변환하는 광전 효과(photoelectric effect)를 기반으로 다양한 파장의 빛을 감지하고 측정할 수 있다.

[0004] UV를 측정하고 검출하기 위해 GaN, ZnO, SiC와 같은 광대역 반도체 물질과  $Mg_xZn_{1-x}O$ ,  $Al_xGa_{1-x}N$ ,  $Ga_2O_3$ (4.4-5.3 eV)와 같은 일부 화합물이 사용되었습니다. 이 재료들은 높은 방사선 경도(radiation hardness)와 높은 화학적 및 열적 안정성을 가지고 있다. 그러나 GaN, ZnO, SiC 기반의 UV 광검출기는 DUV에 선택적으로 반응할 수 없다. 파장이 280nm 미만인 DUV를 감지하려면 최대 4.42eV의 초광대역 밴드갭을 갖는 반도체 물질이 요구된다. 예를 들어,  $Mg_xZn_{1-x}O$  및  $Al_xGa_{1-x}N$ 은 DUV 광검출기 물질을 구성하는데 사용되었으며 이 물질들도 개선된 응답 속도와 광응답성을 제공했다. 하지만, 이 물질들은 박막을 에피택셜 성장시키기 어려운 문제를 가진다. 37% 이상의 Mg 조성을 갖는  $Mg_xZn_{1-x}O$ 는 우르츠광(wurtzite)에서 압입 구조로의 상전이(phase transition)를 유도하여 다른 에피층과의 단층(dislocation) 및 결함을 생성하며, 이로 인해 광검출기의 성능이 저하된다. Al 조성이 높은  $Al_xGa_{1-x}N$ 도 단결정 박막을 형성하기 어렵다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

[0005] (특허문헌 0001) 한국 공개특허공보 제10-2018-0129698호(2018년 12월 5일 공개)

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0006] 본 발명은 외부 전원의 공급 없이도 DUV를 검출할 수 있는 자체 전원 태양광 블라인드 광검출기를 제공하고자 한다.

**과제의 해결 수단**

[0007] 본 발명의 일 측면에 따르면, 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법이 제공된다. 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법은 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼 상에 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층을 성장시키는 단계, 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼를 챔버에 위치시

키는 단계, 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 분위기에서 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층상에 제2 도전형의 산화는 박막을 증착하는 단계, 상기 스퍼터링 챔버로의 산소 공급을 차단하는 단계 및 불활성 가스 분위기에 서 상기 제2 도전형의 산화는 박막상에 은 박막을 증착하여 전면 전극을 형성하는 단계를 포함할 수 있다.

- [0008] 일 실시예로, 상기 제2 도전형의 산화는 박막 및 상기 은 박막은 대향 타겟 스퍼터링을 이용하여 연속적으로 증착될 수 있다.
- [0009] 일 실시예로, 상기 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 분위기에서 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층상에 제2 도전형의 산화는 박막을 증착하는 단계에서, 상기 산소 가스의 유량은 3sccm일 수 있다.
- [0010] 일 실시예로, 상기 은 박막은 표면을 균일하고 연속적으로 형성하기 위하여 임계 두께보다 두껍게 증착될 수 있다.
- [0011] 일 실시예로, 상기 은 박막은 투과율을 높이며 반사율을 낮추기 위해 20nm 두께로 증착될 수 있다.
- [0012] 일 실시예로, 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기 제조 방법은 상기 전면 전극이 형성된 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼를 후 열처리하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0013] 일 실시예로, 상기 후 열처리는 100° C 내지 350° C로 진행되는 급속 열처리일 수 있다.
- [0014] 본 발명의 다른 측면에 따르면, 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기가 제공된다. 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기는, 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼, 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼의 주면에 에피택셜 성장된 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층, 불활성 가스 및 산소 가스의 혼합 분위기에서 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 에피층상에 증착된 제2 도전형의 산화은 박막, 상기 불활성 가스 분위기에 서 상기 제2 도전형의 산화은 박막상에 증착된 은 박막 및 상기 제1 도전형  $\beta$ -산화갈륨 웨이퍼의 이면에 오믹 접촉하는 하부 전극층을 포함할 수 있다.
- [0015] 일 실시예로, 상기 은 박막은 상기 제2 도전형의 산화은 박막의 증착 후 스퍼터링 챔버로의 산소 공급을 차단하여 상기 제2 도전형의 산화은 박막상에 연속적으로 증착되어 형성될 수 있다.
- [0016] 일 실시예로, 상기 산화은 박막의 두께는 50nm일 수 있다.
- [0017] 일 실시예로, 상기 은 박막은 투과율을 높이며 반사율을 낮추기 위해 20nm 두께로 증착될 수 있다.

**발명의 효과**

- [0018] 본 발명의 실시예에 따르면, 산화은(Ag<sub>2</sub>O) 박막과 은(Ag) 박막을 단일 공정으로 형성함으로써, 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기의 성능이 크게 개선될 수 있다.

**도면의 간단한 설명**

- [0019] 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 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기를 예시적으로 도시한 도면이다.

도 2는 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합을 형성하는 공정을 예시적으로 도시한 흐름도이다.

도 3a 내지 도 3d는 유리 기판에 증착된 은 박막의 SEM 이미지이다.

도 4는 유리 기판에 증착된 은 박막의 X선 회절 패턴을 예시적으로 나타낸 그래프이다.

도 5는 유리 기판에 증착된 은 박막의 광학 특성을 예시적으로 나타낸 그래프이다.

도 6a 내지 도 6e는 유리 기판에 증착된 은 박막의 표면을 나타내는 AFM 이미지이다.

도 7은 후 열처리 온도에 따른 은 박막의 X선 회절 패턴을 예시적으로 나타낸 그래프이다.

- 도 8은 산소 유량에 따른 산화은 박막의 X선 회절 패턴을 예시적으로 나타낸 그래프이다.
- 도 9는 후 열처리 온도에 따른 산화은 박막의 X선 회절 패턴을 예시적으로 나타낸 그래프이다.
- 도 10은 산화은 박막의 이상적인 밴드갭 에너지를 예시적으로 나타낸 그래프이다.
- 도 11은 산화은 박막의 UV-vis 투과율 스펙트럼을 예시적으로 나타낸 그래프이다.
- 도 12는 은 박막의 두께에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 J-V 특성을 나타낸 그래프이다.
- 도 13은 은 박막의 두께에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 전기 파라미터 변화를 나타낸 그래프이다.
- 도 14는 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합의 밴드 다이어그램을 예시적으로 나타낸 도면이다.
- 도 15는 은 박막의 두께에 따른 Ag/Ag<sub>2</sub>O 접합의 밴드 다이어그램을 예시적으로 나타낸 도면이다.
- 도 16은 은 박막의 두께에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 시간 의존적 광전류 밀도를 나타낸 그래프이다.
- 도 17은 UV 파장에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 시간 의존적 광전류 밀도를 나타낸 그래프이다.
- 도 18은 UV 파장에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 응답성을 나타낸 그래프이다.
- 도 19는 UV 파장에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 검출성을 나타낸 그래프이다.
- 도 20 및 도 21은 광검출기의 시간 의존적 광전류의 상승 시간 및 하강 시간을 각각 나타낸 그래프이다.
- 도 22는 신제품 광검출기 및 3개월 동안 보관된 광검출기에 대해 수행된 광안정성 실험 결과를 나타낸 그래프이다.
- 도 23은 3개월 동안 보관된 광검출기에 대해 수행된 광안정성 실험 결과를 나타낸 그래프이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0020] 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.
- [0021] 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.
- [0022] 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.
- [0023] 층, 영역 또는 기관과 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.
- [0024] "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.

- [0025] 이하, 본 발명의 실시예에 대해 관련 도면들을 참조하여 상세히 설명하기로 한다.
- [0026] 도 1은 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합 기반 태양광 블라인드 광검출기를 예시적으로 도시한 도면이다.
- [0027] 도 1을 참조하면, 태양광 블라인드 광검출기(10)는 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100), 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110), 산화은 박막(120), 은 박막(130) 및 하부 전극층(140)을 포함할 수 있다. 여기서 제1 도전형은 n형일 수 있다.
- [0028] 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)는 제1 도전형 도펀트로 도핑된 단결정  $\beta$ -산화갈륨( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)으로 형성된다.  $\beta$ -산화갈륨은 다른 초광대역 밴드갭 물질에 비해 상대적으로 저렴한 비용으로 쉽게 벌크 단결정으로 형성할 수 있다. 또한,  $\beta$ -산화갈륨은 열적 및 화학적 안정성이 우수하며, 도핑 또는 합금하지 않더라도 약 4.4 내지 약 4.8 eV의 초광대역 밴드갭을 가진다. 제1 도전형 도펀트는, 예를 들어, 주석(Sn), 규소(Si)일 수 있으며, 제1 도전형 도펀트의 농도( $N_d-N_a$ )는 약  $5.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 일 수 있다. 한편, 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)의 두께는 약 640  $\mu\text{m}$ 일 수 있다.
- [0029] 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110)은 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)의 주면에 에피택셜 성장된 제1 도전형 도펀트로 도핑된  $\beta$ -산화갈륨이다. 제1 도전형 도펀트는, 예를 들어, 규소(Si)일 수 있으며, 제1 도전형 도펀트의 농도는 약  $2.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 일 수 있다. 한편, 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110)의 두께는 약 9.2  $\mu\text{m}$ 일 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 10nm이며, Au층의 두께는 약 40nm일 수 있다.
- [0031] 산화은 박막(120)은 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110)상에 증착되며, 제2 도전형 층이다. 여기서 제2 도전형은 p형일 수 있다. 은 박막(130)은 산화은 박막(120) 상에 형성된 상부 전극층이다. 대부분의 포토다이오드는 금속 박막을 상부 전극으로 사용한다. 구리(Cu), 은(Ag), 금(Au)과 같은 금속 박막은 전기 전도성과 광학적 성능이 우수하여 널리 사용되어 왔다. 그러나 금은 고가의 물질이며 구리는 대기 중에서 쉽게 산화된다. 따라서 이들 재료 중 은 박막(130)은 광전자공학의 전극에 적합하며 널리 사용되고 있다. 은 박막(130)의 특성은 일반적으로 두께에 의존한다. 은 박막(130) 두께가 증가할수록 표면 구조가 거칠어지고, 거친 표면은 빛의 산란으로 인한 광학 손실을 일으킬 수 있다.
- [0032] 산화은 박막(120)과 은 박막(130)은 1회의 스퍼터링 공정, 예를 들어, 대향 타겟 스퍼터링(Facing target sputtering, FTS)에 의해 연속적으로 형성될 수 있다. FTS는 플라즈마에 의한 기판 손상을 최소화하면서도 높은 이온화 속도를 통해 고품질의 산화은 박막(120) 및 은 박막(130) 형성을 가능하게 한다. 산화은 박막(120)은 은을 산소와 반응시키는 반응성 스퍼터링에 의해 형성될 수 있다. 은은 산소와 반응하여 Ag<sub>2</sub>O, AgO, Ag<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ag<sub>3</sub>O<sub>4</sub>와 같은 다양한 상을 형성할 수 있다. 이 중에서 Ag<sub>2</sub>O는 Cu<sub>2</sub>O와 같은 입방체 구조를 가지며, 일반적으로 P형 반도체 특성을 나타낸다. 본 명세서에서 산화은은 Ag<sub>2</sub>O를 지칭하기 위해 사용한다.
- [0033] 산화은 박막(120)과 은 박막(130)은 새도우 마스크에 의해 패터닝되며, 예시된 구조에서는 반경이 약 300  $\mu\text{m}$ 인 원형상으로 형성되었다. 산화은 박막(120)의 두께  $T_{\text{ag}2\text{o}}$ 는 약 50nm이며, 은 박막(130)의 두께  $T_{\text{ag}}$ 는  $T_{\text{ag}2\text{o}}$ 의 약 20% 내지 약 80%일 수 있다. 산화은 박막(120)의 두께  $T_{\text{ag}2\text{o}}$ 가 50nm 이상이 되면, 산화물 형태가 아닌 은 박막으로 변환될 수 있다. 따라서 산화물 형태를 유지할 수 있는 최대 두께는 약 50nm이다.
- [0034] 도 2는 산화은/ $\beta$ -산화갈륨 이중접합을 형성하는 공정을 예시적으로 도시한 흐름도이다.
- [0035] 단계 200에서, 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110)이 형성된 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)를 FTS의 챔버에 위치시킨다. 산화은 박막(120)과 은 박막(130)을 패터닝하기 위한 새도우 마스크는 제1 도전형 산화갈륨 에피층

(110) 상부에 배치된다. 새도우 마스크에 의해, 약 300 μm의 반경을 가진 원형상을 가지며, 서로 이격된 복수의 원형상 산화는 박막(120)이 제1 도전형 산화갈륨 에피층(110) 상에 증착될 수 있다. 약 2 mTorr의 작동 압력이 적용된 챔버 내에서, 산소 가스 및 불활성 가스, 예를 들어, 아르곤의 혼합 분위기에서 은 타겟을 이용한 반응성 스퍼터링이 진행된다.

표 1

파라미터	조건	
박막	Ag <sub>2</sub> O	Ag
타겟	Ag(99.99%)	Ag(99.99%)
기본 압력	3 x 10 <sup>-5</sup> Torr	3 x 10 <sup>-5</sup> Torr
작동 압력	2mTorr	2mTorr
가스 유속	Ar: 10sccm, O <sub>2</sub> : 3sccm	Ar: 10sccm
입력 전력	50W(DC)	15W(DC)
두께	50nm	10, 20, 30, 40nm

[0036]

[0037]

단계 210에서, 산화는 박막(120)의 두께 T<sub>ag20</sub>가 약 50nm가 되면, 은 타겟을 이용한 스퍼터링은 계속 진행하되 산소 공급은 중단하여 아르곤 분위기에서 진행한다. 이로 인해 산화는 박막(120) 상에 은 박막(130)이 연속적으로 적층될 수 있다. 작동 압력 및 아르곤의 가스 유량은 산화는 박막(120)의 형성 과정에서의 작동 압력 및 가스 유량과 동일한 반면, 은 박막(130) 형성에 적용되는 입력 전력은 산화는 박막(120)의 형성에 적용된 입력 전력보다 작을 수 있다. 스퍼터링 시간을 조절하여 은 박막(130)의 두께 T<sub>ag</sub>를 T<sub>ag20</sub>의 약 20% 내지 약 80%가 되도록 한다. FTS를 이용한 산화는 박막 및 은 박막의 연속 증착은 증착된 박막에 발생하는 결함 및 공정에 소요되는 시간도 크게 감소시킬 수 있다. 산화는 박막 증착 후 다른 금속 박막을 증착하기 위해 챔버를 개방하면, 박막 증착 조건이 변하게 되며, 불순물이 챔버 내로 유입될 수도 있다. 반면, 산화는 박막 증착 후 연속적으로 은 박막을 증착하면, 챔버를 개방할 필요가 없어지기 때문에, 박막 증착 조건을 안정적으로 유지할 수 있을 뿐 아니라, 불순물 농도도 낮출 수 있다. 또한, FTS를 이용한 연속 증착에 의해 형성된 산화는 박막과 은 박막은 동일 계열의 재료여서 양 박막간 접착력이 매우 우수하다.

[0038]

단계 220에서, 은 박막(130)까지 형성된 제1 도전형 산화갈륨 웨이퍼(100)를 후 열처리(Post annealing)한다. 후 열처리는 아르곤 분위기에서 약 100 mTorr 압력으로 약 100 내지 약 400° C에서 약 1분간 수행되는 급속 열처리(Rapid Thermal Annealing)이다. 바람직하게, 급속 열처리 온도는 약 300° C 내지 약 350° C일 수 있다.

[0039]

도 3a 내지 도 3d는 유리 기판에 증착된 은 박막의 SEM 이미지이다.

[0040]

은 박막의 두께 T<sub>ag</sub>는 약 10nm부터 약 10nm씩 증가되었다. (a)의 SEM 이미지를 보면, 약 10nm 두께의 은 박막은 균일한 표면을 형성하지 않았다. 기판에서 성장한 금속 기반 박막은 일반적으로 공정 중에 핵 생성(nucleation), 유착(coalescence) 및 두께 성장(thickness growth)과 같은 여러 단계를 거친다. 금속의 초기 성장은 금속 박막의 낮은 접착력으로 인해 Volmer-Weber 모드에 따라 고립된 3차원 섬을 형성한다. 이러한 특성으로 인해 기판의 금속 박막은 임계 두께(threshold thickness)를 갖는다. 임계 두께는 연속된 박막으로 제작할 수 있는 최소 두께인 약 10nm 내지 약 15nm이다. (b) 내지 (d)의 SEM 이미지를 보면, 임계 두께 이상의 두께인 약 20nm 내지 약 40nm의 은 박막은 균일한 표면과 연속된 박막 형태를 나타낸다. 약 10nm 두께의 은 박막과 같이 불연속 및 불균일한 박막은 거친 표면 형태에 의한 높은 광 반사 또는 산란으로 인해 광검출기의 광응답성에 영향을 미칠 수 있다.

[0041]

도 4는 유리 기판에 증착된 은 박막의 X선 회절 패턴을 예시적으로 나타낸 그래프이다.

[0042]

X선 회절계(SmartLab, Rigaku)를 사용하여 결정학적 특성을 측정하면, 은 박막은 다결정 구조를 나타낸다. 2θ= 약 38.5°, 약 44.8°, 약 64.9° 및 약 77.7°에서 나타나는 은 피크는 각각 (111), (200), (220) 및 (311) 평면(ICDD 카드 01-087-0720)에 해당한다. XRD 패턴에서는 은 박막의 두께에 따른 급격한 변화가 관찰되지 않았다.

[0043]

Scherrer 방정식을 사용하여 (111) 평면에서 은 박막의 두께에 따른 결정 크기(crystallite sizes)를 다음과 같이 계산할 수 있다.

수학식 1

$$\tau = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta}$$

[0044]

[0045]

여기서  $\beta$ 는 반치폭(full width at half-maximum, FWHM),  $\tau$ 는 결정 크기,  $\lambda$ 는 X선 파장(=0.15406nm),  $\theta$ 는 브래그 각, K는 Scherrer 상수(0.9)<sup>2</sup>이다. 표 2에 정리된 바와 같이, 결정 크기는 막 두께에 따라 증가함을 확인하였다.

표 2

[0046]

은 박막의 두께	결정 크기
10nm	16.3nm
20nm	16.6nm
30nm	17.9nm
40nm	20.0nm

[0047]

도 5는 유리 기판에 증착된 은 박막의 광학 특성을 예시적으로 나타낸 그래프이다. 도 5를 참조하면, 은 박막의 투과율은 두께  $T_{ag}$ 가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 약 260nm 파장부터 증가하기 시작한 은 박막의 투과율은, 약 320nm 파장 부근에서 감소하기 시작한다. 약 320nm 파장 부근에서 두께  $T_{ag}$ 별 최대 투과율은 두께  $T_{ag}$ 가 증가할수록 작아진다. 즉, 두께  $T_{ag}$ 가 작을수록 반사율이 낮아져서 광학 손실이 적음을 확인할 수 있다.

[0048]

도 6a 내지 도 6e는 유리 기판에 증착된 은 박막의 표면을 나타내는 AFM 이미지이다.

[0049]

도 6a 내지 도 6d는  $1 \times 1 \mu m^2$ 의 스캔 영역으로 AFM을 사용하여 얻은 약 10nm, 약 20nm, 약 30nm 및 약 40nm 두께를 가진 은 박막의 표면을 나타낸다. 모든 샘플은 균일하고 매끄러운 표면 형태를 나타낸다. RMS(root-mean-square) 표면 거칠기 범위는 약 10nm 내지 약 40nm 은 박막의 경우 약 0.8nm 내지 약 1.2nm이다. RMS 표면 거칠기는 은 박막의 두께가 증가함에 따라 단조롭게 증가한다.

[0050]

반면, 도 6e는  $5 \times 5 \mu m^2$ 의 스캔 영역으로 AFM을 사용하여 얻은 약 10nm 두께를 가진 은 박막의 표면을 나타낸다. 스캔 영역을 확대하면, 은 박막은 불균일한 구조와 거친 표면을 나타냄을 알 수 있다. 약 10nm 두께를 가진 은 박막의 RMS 표면 거칠기는 약 5.9nm였다. 이는 연속적인 박막 형성에 필요한 임계 두께보다 낮은 약 10nm의 두께로 은이 증착되었기 때문이다. 상부 전극 박막의 거친 표면 형태는 반사 또는 산란과 같은 광학 손실을 일으키며, 그로 인한 손실은 광응답 특성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

[0051]

도 7은 후 열처리 온도에 따른 은 박막의 X선 회절 패턴을 예시적으로 나타낸 그래프이다.

[0052]

은 박막에 대한 후 열처리 효과는 다양한 온도로 후 열처리된 샘플로부터 획득한 X선 회절 패턴으로 확인할 수 있다. 약 40nm 두께의 은 박막을 약 100° C 내지 약 400° C로 후 열처리하였다. 후 열처리에 의해 은 박막의 결정성이 향상되었음을 알 수 있다. 후 열처리하지 않은 은 박막과 후 열처리된 은 박막을 비교하면, 후 열처리된 은 박막이 상대적으로 높은 피크 강도를 나타냄을 알 수 있다. 반면, 서로 다른 온도로 후 열처리된 은 박막 사이에서, X선 회절 패턴의 큰 변화는 관찰되지 않는다. 다시 말해, 후 열처리 온도는 은 박막의 특성에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 열처리 온도가 높을수록, 표면 오염 및 산소 결손(oxygen vacancy)을 제거하여 계면 결합 또는 트랩이 감소할 수 있다.

[0053]

도 8은 산소 유량에 따른 산화은 박막의 X선 회절 패턴을 예시적으로 나타낸 그래프이다.

[0054]

도 8을 참조하면, 0sccm 내지 약 5 sccm 범위에서 산소 유량을 변경하여 증착된 산화은 박막의 XRD 패턴이 예시되어 있다. 여기서, ●는  $Ag_2O$  피크, ▲는 Ag 피크, 그리고 ■는 AgO 피크를 각각 나타낸다. 산소 유량이 0 sccm에서, 참조 데이터(ICDD 카드 01-087-0720)에 따라, 은 피크는 각각 (111), (200), (220) 및 (311) 평면에 해당하는  $2\theta = 38.2^\circ, 44.4^\circ, 64.6^\circ$  및  $77.6^\circ$  에서 나타난다. 산소 유량이 약 2sccm에서, 은 피크의 강도가 감소하고  $2\theta = 33.6^\circ$  에서  $Ag_2O$ (ICDD 카드 01-072-2108)의 (100) 평면이 추가로 나타나  $Ag_2O$ 와 Ag의 혼합상이

나타난다. 또한, 산소 유량이 약 3sccm에서, Ag<sub>2</sub>O의 (100) 및 (011) 평면을 나타내는 넓은 피크가 다른 불순물 없이 2θ = 33.6° 및 38.4° 에서 나타난다. 산소 유량이 약 4sccm에서 약 5sccm으로 증가함에 따라, Ag<sub>2</sub>O 피크는 사라지며, AgO(JCPDS 카드 75-0969)에 해당하는 새로운 피크가 2θ = 32.3° 및 35.6° 에서 나타난다. 산소 유량이 증가하면 Ag와 O 사이의 화학 결합이 추가로 생성되어 AgO 피크가 발생한다. 따라서, 산소 유량은 약 2sccm 내지 약 4sccm사이에서 조절되며, 바람직하게는 약 3sccm으로 조절될 수 있다.

[0055] 도 9는 후 열처리 온도에 따른 산화은 박막의 X선 회절 패턴을 예시적으로 나타낸 그래프이다.

[0056] 산화은 박막의 전기적 특성은 Hall 측정(캐리어 농도  $6.35 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 이동도  $61.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , 저항  $1.38 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}$ )에 의해 확인할 수 있다. 측정 결과는 산화은 박막이 p형 반도체임을 나타낸다. 후 열처리 공정의 효과와 산화은 박막의 광학적 특성은 또한 유리 기판에 증착된 약 50nm 두께의 박막을 사용하여 측정되었다. 도 9에 도시된 바와 같이, 유리 기판에 증착된 약 50nm 두께의 산화은 박막을 실온(후 열처리 안함) 및 약 300° C 범위에서 열처리 후 X선 회절 패턴을 측정했다. 2θ = 약 33.6 및 약 38.4° 에서 나타나는 산화은 피크는 각각 (100) 및 (011) 평면에 해당한다(ICDD 카드 01-072-2108). 열처리하지 않은 산화은 박막과 비교할 때, 후 열처리 온도가 약 300° C에서 산화은 피크 강도가 최대여서 결정 전이(crystal transition) 없이 결정도(crystallinity)가 개선되었음을 나타낸다.

[0057] 한편, The thermal decomposition of silver (I, III) oxide: A combined XRD, FT-IR and Raman spectroscopic study, Waterhouse et al., Chemistry Physical Chemistry Chemical Physics, 2001, 3, 3838-3845)에 따르면, 열처리 온도가 약 350° C 이상으로 증가하면, 산화은 박막이 은 박막으로 전이될 수 있다. 특히, 열처리 온도가 약 400° C 이상으로 증가하면, Ag<sub>2</sub>O(100) 피크의 세기가 크게 감소하고, (200), (220), (311) 피크의 세기가 증가한다. 이는 약 400° C에서 열처리된 산화은 박막의 일부가 은으로 전이되어 산화은과 은이 혼합된 상태를 나타낸다. 산화은에서 은으로의 전이는 열 효과에 의해 은의 확산 속도가 증가하고, 은보다 산소의 확산 속도가 상대적으로 작아지기 때문이다. 따라서 충분한 열에너지로 인해 은의 확산이 증가하여 산소와의 화학 결합이 끊어진다. 산화은 박막이 은으로 분해되면 소자의 성능이 저하될 수 있으므로, 표면 조건을 개선하기 위해 약 350° C 이하에서, 바람직하게는 약 300° C에서 열처리를 수행할 수 있다.

[0058] 도 10은 산화은 박막의 이상적인 밴드갭 에너지를 예시적으로 나타낸 그래프이며, 도 11은 산화은 박막의 UV-vis 투과율 스펙트럼을 예시적으로 나타낸 그래프이다.

[0059] 아르곤의 유량을 약 10 sccm 및 산소의 유량을 약 3 sccm으로 한 반응성 스퍼터링에 의해 증착된 산화은 박막의 광학 밴드갭 에너지는 도 10에 예시되어 있다. 산화은 박막의 광학 밴드갭 에너지는 흡수 생성물이 다음 수학적 2에 의해 주어진다.는 가정하에 Tauc 곡선 식을 사용하여 계산될 수 있다.

## 수학적 2

$$\alpha h\nu = \alpha_0(h\nu - E_g)^n$$

[0060]

[0061] 여기서  $\alpha_0$ 는 물질 상수,  $h\nu$ 는 광자 에너지(=  $1240/\lambda E_g$ 는 광학 밴드갭 에너지, n은 거듭제곱 계수이며, 전이 유형(각각 직접 허용, 직접 금지, 간접 허용 또는 간접 금지)에 따라 1/2, 3/2, 2 또는 3이 될 수 있다. 산화은 박막은 직접 허용 전이를 가지고 있기 때문에 n = 1/2를 사용하여 광학 밴드 갭 에너지를 계산할 수 있다. 산출된 광학 밴드갭은 약 3.95 eV이다. 유리 기판에 증착된 산화은 박막의 UV-vis 스펙트럼은 도 11에 예시되어 있다.

[0062] 도 12는 은 박막의 두께에 따른 산화은/β 산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 J-V 특성을 나타낸 그래프이다.

[0063] 도 12를 참조하면, 상이한 두께의 은 박막을 가진 산화은/β 산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 J-V 특성 곡선을 어둠속에서 약 -2V 내지 4V 범위에서 측정한 그래프가 예시되어 있다. 은 박막의 두께와 상관없이, p-n 접합의 정류 특성은 모든 소자에서 확인되었다. 약 10nm 두께의 은 박막을 가진 소자의 오프 전류는 약  $9.28 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ (약  $6.55 \times 10^{-11} \text{ A}$ )로 낮고, 온 전류는 약  $31.84 \text{ A/cm}^2$ (약  $2.25 \times 10^{-2} \text{ A}$ )이다. 즉, 10nm 두께의 은 박막을 가진 소자는 약  $3.43 \times 10^8$ 의 높은 온-오프 비율을 가진다. 또한 J-V 특성은 은 박막의 두께가 증가함에 따라 누설 전류가 증가함을 나타낸다. 매끄러운 박막은 캐리어 산란 중심을 효과적으로 감소시키고 계면 전하 트랩을

억제할 수 있기 때문에, 상대적으로 매끄러운 표면 형태를 갖는 은 박막은 은/산화은 계면에서 트랩 또는 전위가 더 적은 것으로 볼 수 있다. 따라서, 역방향 바이어스시 누설 전류가 감소하게 된다.

[0064] 도 13은 은 박막의 두께에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 전기 파라미터 변화를 나타낸 그래프이다.

[0065] 도 13을 참조하면, 은 박막의 두께에 따른 은 저항  $R_{on}$ , 이상 계수  $n$  및 장벽 높이  $\Phi_{\tilde{O}B}$ 가 예시되어 있다. 이 파라미터들은 수학적 식 3과 같은 열이온 방출 모델을 기반으로 하는 p-n 접합 광검출기의 J-V 곡선에서 계산될 수 있다.

**수학적 식 3**

$$J = J_s \exp\left\{\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right\}$$

[0066]

[0067] 여기서  $J_s$ 는 포화 전류 밀도이고,  $q$ 는 전자 전하이고,  $V$ 는 다이오드 양간(Ag 전극-Au 전극)간 전압이고,  $R_s$ 는 직렬 저항이고,  $n$ 은 장벽 이질성(barrier inhomogeneity)과 터널링 성분(tunneling component)이 존재할 때 이상적인 다이오드와 실제 다이오드 사이의 편차를 나타내는 이상 계수이고,  $k$ 는 볼츠만 상수이며,  $T$ 는 켈빈 온도이다.

[0068]  $J_s$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

**수학적 식 4**

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

[0069]

[0070] 여기서  $A^*$ 는 Richardson 상수( $\beta_2O_3$ 의 경우  $41A/(cm^2K^2)$ )이고,  $A$ 는 접촉 면적이고,  $q$ 는 전자 전하이고,  $\Phi_{\tilde{O}B}$ 는 유효 장벽 높이이고,  $k$ 는 볼츠만 상수이며,  $T$ 는 켈빈 온도이다.

[0071]  $R_{on}$  및 이상 계수  $n$ 은 은 박막 두께가 약 40 nm부터 약 10 nm까지 감소함에 따라 감소한다.  $R_{on}$ 의 경우, 약 7.83에서 약  $5.40 m\Omega \cdot cm^2$ , 이상 계수  $n$ 의 경우, 약 2.97에서 약 2.23으로 감소한다.  $R_{on}$  및 이상 계수  $n$ 의 감소는 은/산화은 계면 조건과 관련이 있다.  $R_{on}$ 과 전이 사이에는 양의 상관 관계가 존재한다. 이 결과들은 은 박막의 두께가 증가할수록 은/산화은 계면에서의 전이 및 결합 상태가 증가함을 나타낸다. 결과적으로 이러한 결합은 캐리어를 포착하거나 이동을 방해하여 저항을 증가시킨다. 따라서 표면 거칠기가 낮은 은 박막은 위에서 언급한 것처럼 은/산화은 계면에서 결합 밀도가 더 낮다. 그러나 장벽 높이는 은 박막의 두께가 감소함에 따라 약 0.92에서 약 1.10eV로 증가한다. 이는 은 박막의 두께와 거칠기가 감소함에 따라 계면 결합이 감소했기 때문이다. 계면에 결합이 존재하면 전하 캐리어를 포착하여 이동을 억제할 수 있다. 이 경우 계면에서 각 층의 페르미 준위 불일치에 의해 생성되는 전기장이 감소된다. 가우스의 법칙에 따르면  $Ag_2O/\beta_2O_3$ 와  $Ag/Ag_2O$  접합에 의해 형성된 공핍층은 계면결합이 없는 이상적인 공핍층보다 좁아진다. 즉, J-V 곡선으로부터, (특히, 약 30nm 및 약 40nm 두께의 은 박막으로) 제조된 광검출기의 이상 계수 및 험프 현상(Hump phenomenon)의 높은 값은 계면 전하 트랩, 열이온 방출 및 캐리어 재결합에 의해 영향을 받는다.

[0072] 도 14는 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합의 밴드 다이어그램을 예시적으로 나타낸 도면이다.

[0073] p-n 접합 기반 광검출기에서 광전류 발생은 공핍 영역의 특성과 관련이 있다. p-n 접합을 형성하기 전에, n형 반도체의 페르미 준위는 전도대 근처에 존재하는 반면, p형 반도체의 페르미 준위는 가전자대 주변에 위치한다.

[0074] 도 14를 참조하면, p형 반도체와 n형 반도체가 접합을 형성하면, 각 층의 페르미 준위가 정렬되어 대역 휨(band

bending)이 발생한다. 또한, 주요 n형 캐리어인 자유 전자는 p형 반도체로 확산되어 양전하를 띤 정공과 결합한다. 반대로 p형에 위치한 정공은 n형 반도체로 확산되어 순전하가 중화된다. 확산된 전자와 정공이 평형에 도달하면 공핍층으로 알려진 전하 중화 영역이 형성된다. 대역 휨과 공핍층으로 구성된 에너지 장벽은 자체 전위 장치에 중요하다. 광전류(photocurrent)는 광 조사에 의해 생성된 전하 캐리어에 의해 증가된다. 빛이 p-n 접합 기반 광검출기에 조사되면, 빛의 에너지는  $Ag_2O/\beta_2O_3$  p-n 접합의 계면에서 EHP(electron-hole pair)를 생성한다. 빛에 의해 생성된 이러한 전하 캐리어는 광전류를 증가시킨다. 따라서 공핍층에서 미리 결합된 캐리어의 수는 광전류와 직접 관련이 있다. 또한 바이어스가 0이면 공핍층의 광생성(photogenerated) EHP가 내장 전기장에 의해 빠르게 분리된다. 전자는 n형 반도체로 그리고 정공은 p형 반도체로 각각 이동하며, 광생성 EHP는 더 높은 에너지 장벽으로 더 효과적이고 빠르게 분리된다.

[0075] 도 15는 은 박막의 두께에 따른  $Ag/Ag_2O$  접합의 밴드 다이어그램을 예시적으로 나타낸 도면이다.

[0076] 도 15를 참조하면, 많은 수의 계면 트랩이 있는 은/산화은 접합은 은/산화은 계면에서 페르미 레벨 피닝(pinning)을 나타낸다. 이것은 은/산화은 접합의 전기적 응답을 차단할 수 있다. 그러나 계면 트랩의 수가 적은 은 박막을 갖는 은/산화은 접합은 고정되지 않은 페르미 준위를 나타내어 상대적으로 두꺼운 막보다 더 안정적이고 신뢰할 수 있는 전기적 접촉을 달성할 수 있다.

[0077] 도 16은 은 박막의 두께에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 시간 의존적 광전류 밀도를 나타낸 그래프로서, 제로 바이어스에서 약 254nm 파장의 UV 아래에서 약 10nm, 약 20nm, 약 30nm, 및 약 40 nm 두께의 은 박막을 사용하여 제작된 광검출기의 시간 의존적 광전류 밀도를 나타낸다.

[0078] 도 16을 참조하면, 은 박막의 두께가 약 20nm까지 감소함에 따라 광전류 밀도가 증가하여 약 20nm 은 박막이 증착된 p-n 접합 광검출기에서 약  $20.0 \mu A/cm^2$ 의 가장 높은 광전류 밀도가 달성되었다. 상대적으로 얇은 은 박막은 표면 거칠기가 낮기 때문에 은 박막 표면의 광학 손실은 상대적으로 낮다. 따라서 은 박막의 두께가 얇아질수록 광전류는 증가할 것으로 예상된다. 그러나 도 6e의 AFM 이미지에서 볼 수 있듯이, 약 10nm 두께의 은 박막은 균일하고 연속적인 박막을 형성하지 못한다. 결과적으로, 광생성 전류는 은 박막 표면에서 많은 양의 광산란 및 반사로 인해 작아진다. 모든 광검출기는 UV를 켜 때 광전류를 빠르게 흐르게 하여 광전류를 일정하게 유지함으로써 높은 재현성(reproducibility)을 나타낸다. 한편, UV를 끄는 순간 광전류는 암전류로 떨어진다.

[0079] 도 17은 UV 파장에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 시간 의존적 광전류 밀도를 나타낸 그래프이고, 도 18은 UV 파장에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 응답성을 나타낸 그래프이며, 도 19는 UV 파장에 따른 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기의 검출성을 나타낸 그래프이다. 도 17 내지 도 19에 나타낸 그래프는 제로 바이어스에서 약 100 내지 약  $1000 \mu W/cm^2$  범위의 다양한 광 강도를 갖는 약 254nm 파장의 UV 아래에서 약 20nm 두께의 은 박막을 가진 산화은/ $\beta$  산화갈륨 이중접합 기반 광검출기를 이용하여 측정한 결과이다.

[0080] 도 17 내지 도 19를 함께 참조하면, UV 세기가 증가함에 따라 더 높은 UV 세기 때문에 광전류가 점차 증가하여 더 많은 EHP가 생성된다. 광검출기의 감도를 나타내는 응답성(responsivity) 및 검출 가능한 가장 작은 신호에 대한 성능 지수인 검출성(detectivity)은 UV 세기에 따른 광전류로부터 평가할 수 있다.

[0081] 응답성 R은 다음과 같이 산출할 수 있다.

**수학식 5**

$$R = \frac{J_{photo} - J_{dark}}{P}$$

[0082]

[0083] 여기서,  $J_{photo}$ 는 광전류 밀도,  $J_{dark}$ 는 암전류 밀도, P는 인가된 UV 세기이다.

[0084] 검출성 D는 다음과 같이 산출할 수 있다.

수학식 6

$$D = \frac{R}{(2eJ)^{1/2}}$$

[0085]

[0086]

[0087]

[0088]

[0089]

[0090]

[0091]

[0092]

[0093]

[0094]

여기서, e는 기본 전하(elemental charge)이고 J는 암전류 밀도이다.

정리하면, UV 세기가 증가함에 따라 응답성과 검출성은 모두 감소하는데, 이는 UV 세기가 증가하여 더 많은 EHP가 생성되면 광검출기에서 자체 발열이 유도되어 전하 캐리어의 수를 증가시킬 뿐만 아니라 캐리어의 재결합 가능성도 증가하기 때문이다. 약 20nm 두께의 은 박막을 가진 광검출기에서, 응답성 R과 검출성 D의 최대값은 각각 약 25.65mA/W 및 약  $6.10 \times 10^{11}$  Jones이다. 특히, 응답성 R만을 놓고 봤을 때, 본 실시예에 따른 광검출기는 현재까지 알려진 어떤 자체 전원 DUV 광검출기보다 높은 응답성을 가진다. 약  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 UV 세기에서 제로 바이어스에서 약 254nm UV-C 대 약 365nm UV-A의 제거율(rejection ratio)이  $2.47 \times 10^3$ 임을 확인할 수 있다.

도 20 및 도 21은 광검출기의 시간 의존적 광전류의 상승 시간 및 하강 시간을 각각 나타낸 그래프이다.

도 20 및 도 21을 참조하면, 응답 속도는 광검출기를 평가하는 중요한 요소이다. 응답 속도는 산화은과 β산화갈륨 사이의 밴드갭 차이로 인한 내장 전기장의 크기에 의해 결정된다. 도 20의 상승 시간 및 도 21의 하강 시간은 시간 의존적 광전류 특성을 이용하여, 제로 바이어스에서 약  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 강도를 갖는 약 254nm 파장의 UV 아래에서 약 20nm 두께의 은 박막을 가진 산화은/β산화갈륨 이중접합 기반 광검출기로 측정된 결과로서, 각각 약 108ms 및 약 80ms이다.

도 22는 신제품 광검출기 및 3개월 동안 보관된 광검출기에 대해 수행된 광안정성 실험 결과를 나타낸 그래프이며, 도 23은 3개월 동안 보관된 광검출기에 대해 수행된 광안정성 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 도 22 및 도 23에 나타낸 그래프는 제로 바이어스에서 약  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 254nm 파장의 UV 아래에서 약 20nm 두께의 은 박막을 가진 산화은/β산화갈륨 이중접합 기반 광검출기로 측정된 결과이다.

도 22 및 도 23을 함께 참조하면, 신제품 광검출기와 비교할 때, 광전류는 3개월 동안 보관된 후에도 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이로부터 산화은/β산화갈륨 이중접합 기반 광검출기는 장기간 안정성이 좋고 광응답 특성의 일관성이 있음을 알 수 있다.

한편, 3개월 동안 보관된 장치는 200 주기 동안 반복된 온-오프 동작에서도 상당한 안정성을 나타냈다. 첫 번째 주기에서 생성된 약 14.2 nA의 광전류와 비교하면, 100 주기 후 약 13.8nA의 광전류가 생성되어 약 2.8% 감소를 나타내며, 200 주기 후 약 13.4 nA의 광전류가 생성되어 약 5.7% 감소를 나타낸다. 긴 보관 시간을 감안할 때, 약 5.7%는 상당히 작은 감소이다.

**비교예**

**표 3**

광검출기	파장(nm)	응답성(mA/W)	상승/하강시간	검출성
그래핀/β <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	10.3	<30ns/<2.24 μs	
p-SiC/β <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	10.4	11ms/19ms	$8.8 \times 10^9$
CuI/β <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	8.46	97.8ms/28.9ms	$7.75 \times 10^{11}$
CuCrO <sub>2</sub> /β <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	0.12	0.35s/0.06s	$4.6 \times 10^{11}$
CuGaO <sub>2</sub> /β <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	0.03	0.26s/0.14s	$0.9 \times 10^{11}$
MoS <sub>2</sub> /β <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	245	2.05		$1.21 \times 10^{11}$
NbSTO/β <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	2.60	0.21s/0.07s	
ZnO/β <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	251	9.7	100 μs/900 μs	$6.29 \times 10^{12}$

Ag <sub>2</sub> O/β-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	254	25.7	108ms/80ms	6.10 × 10 <sup>11</sup>
----------------------------------------------------	-----	------	------------	-------------------------

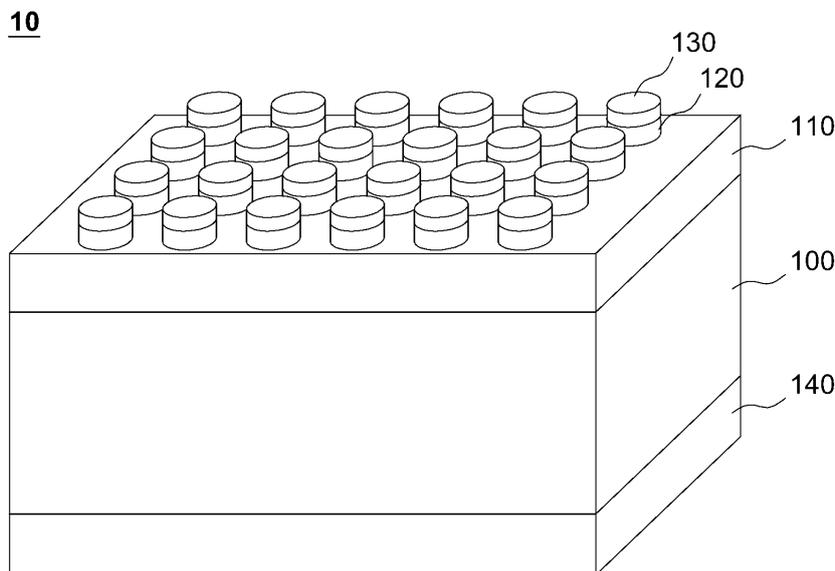
[0095] 표 3은 약 20nm 두께의 은 박막을 가진 Ag<sub>2</sub>O/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> p-n 이종접합 기반 광검출기의 광응답 파라미터를 β 기반 단순 이종접합 DUV 자체 전원 광검출기의 광응답 파라미터와 비교한 결과이다. 약 20nm 두께의 은 박막을 사용한 산화은/β 산화갈륨 기반 DUV 자체 전원 광검출기는 β 산화갈륨과의 단순 이종 접합에 기반한 다른 DUV 자체 전원 광검출기보다 더 높은 응답성과 더 높은 검출성을 나타낸다. 응답 속도는 단순 이종 접합에 기반한 다른 DUV 자체 전원 광검출기의 응답 속도와 비슷한 수준이다. 20nm 두께의 은 박막을 가진 광검출기는 표면 거칠기가 낮아 광학 손실이 적고, 최고의 성능을 나타냈으며, 외부 전원 공급 없이 사용할 수 있음을 알 수 있다. β 산화갈륨과의 다양한 이종접합 기반 DUV 광검출기중에서, p-n-접합 기반 광검출기는, 계면 영역이 내장 전기장(built-in electric field)을 유도하여 광여기된 전자-정공 쌍(EHP) 생성 효율을 향상시키기 때문에, 다른 이종 접합 기반 광검출기보다 더 높은 광응답성 및 검출성을 갖는다. 그러나 자체 전원 이종접합 기반 광검출기에서, 내장 전기장의 존재로 인해 응답성이 상대적으로 낮고 광발생 캐리어(photogenerated carrier)가 수송 및 수집되기 때문에, 응답성 및 검출성보다는 응답 속도가 핵심 파라미터가 된다.

[0096] 전술한 본 발명의 설명은 예시를 위한 것이며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 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.

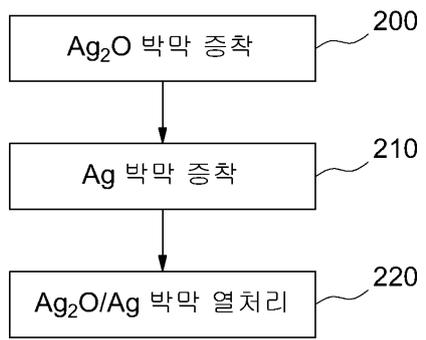
[0097] 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타나며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

**도면**

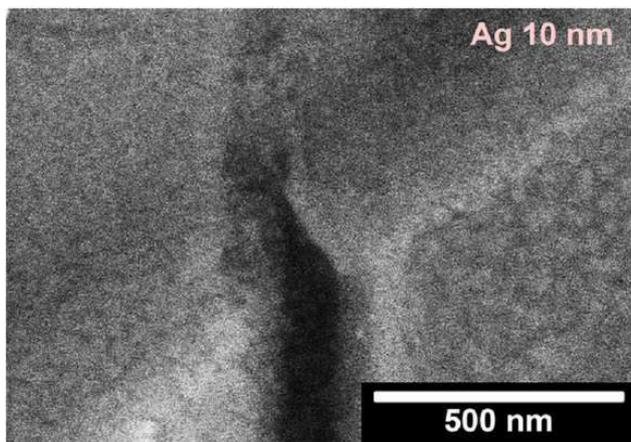
**도면1**



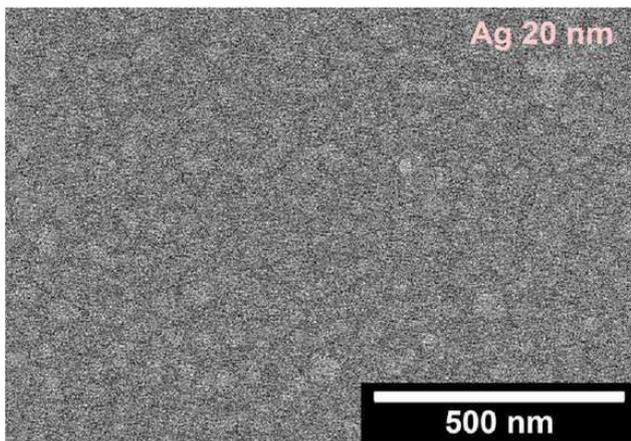
도면2



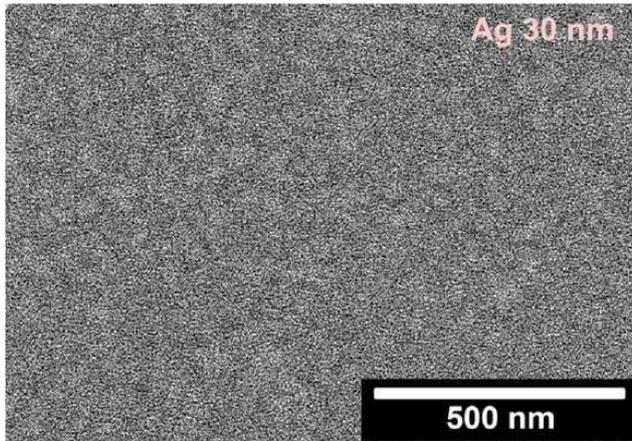
도면3a



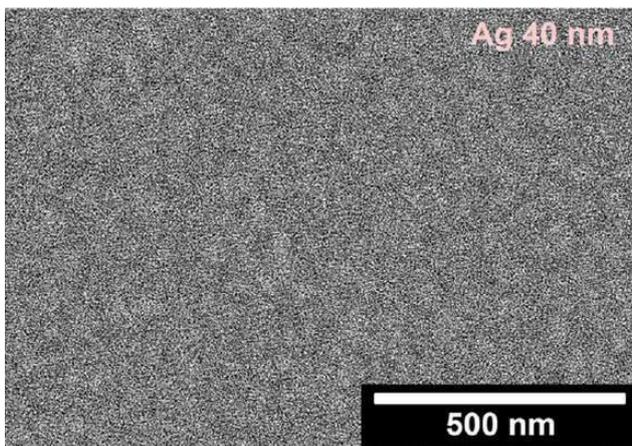
도면3b



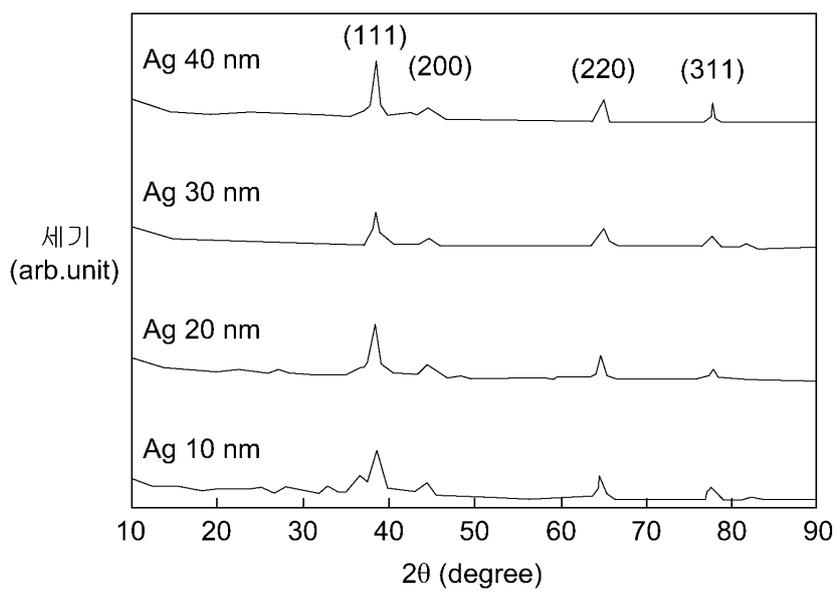
도면3c



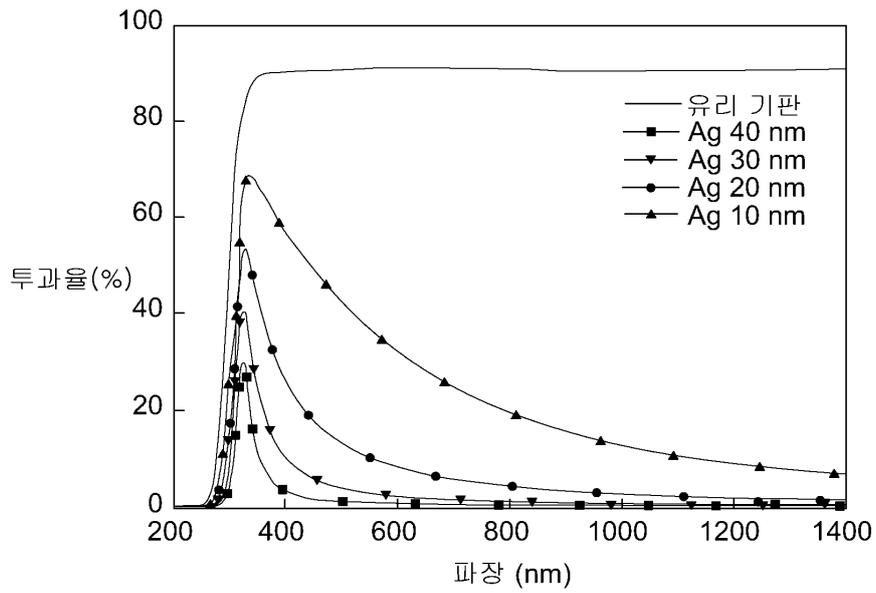
도면3d



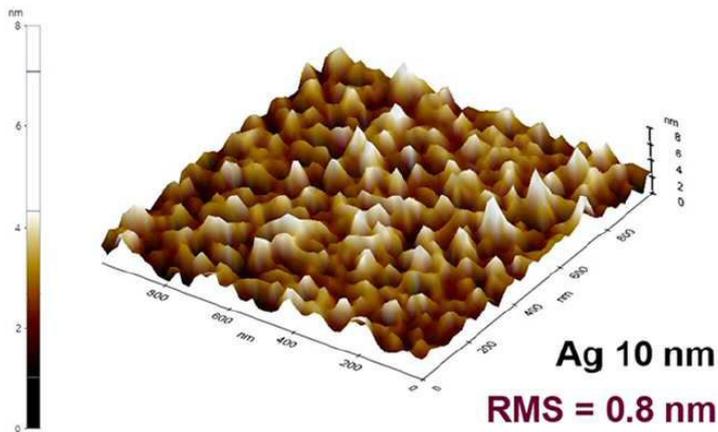
도면4



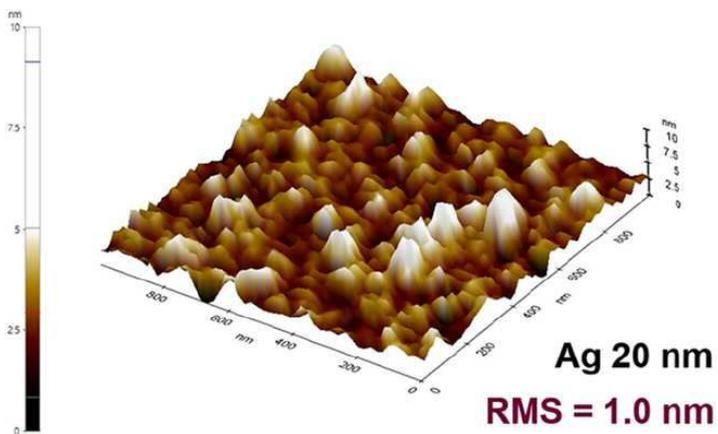
도면5



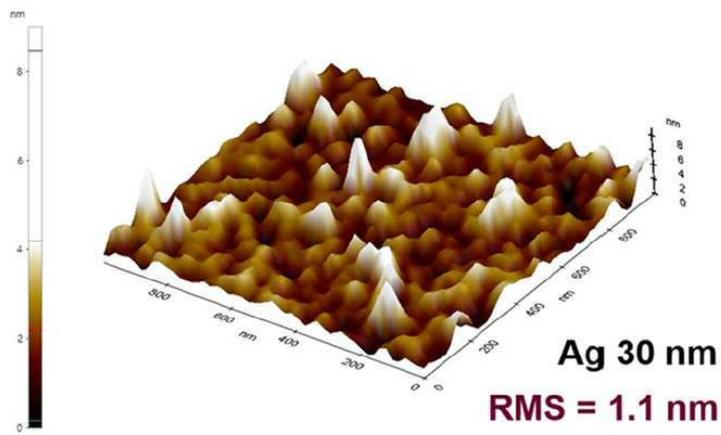
도면6a



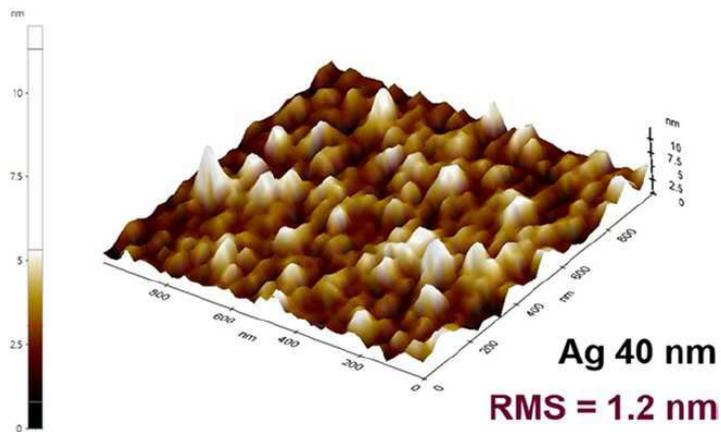
도면6b



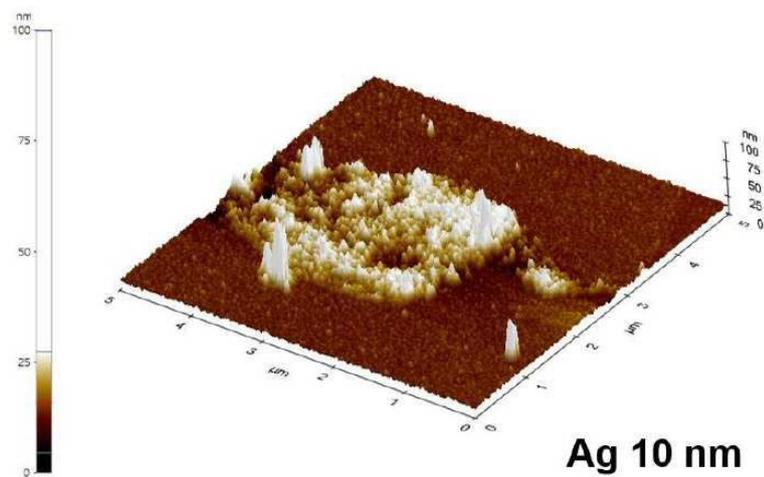
도면6c



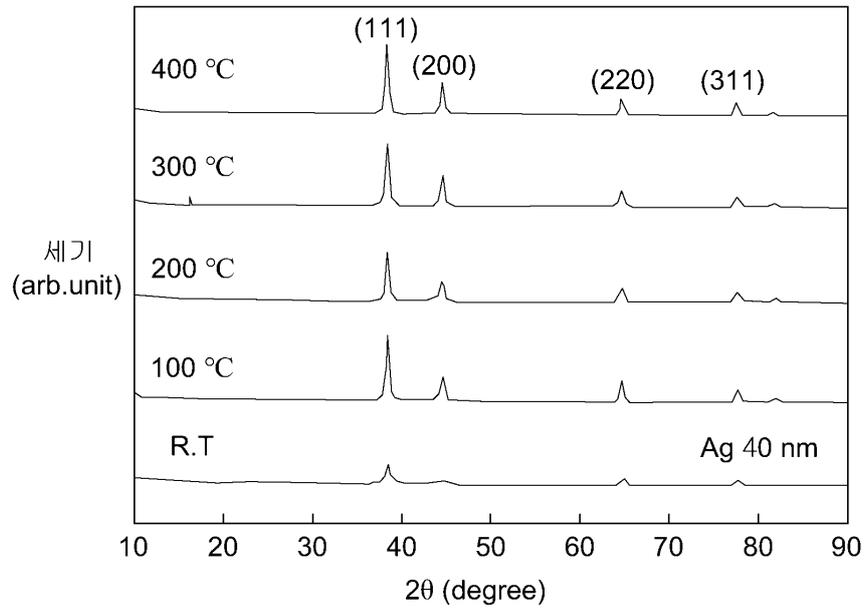
도면6d



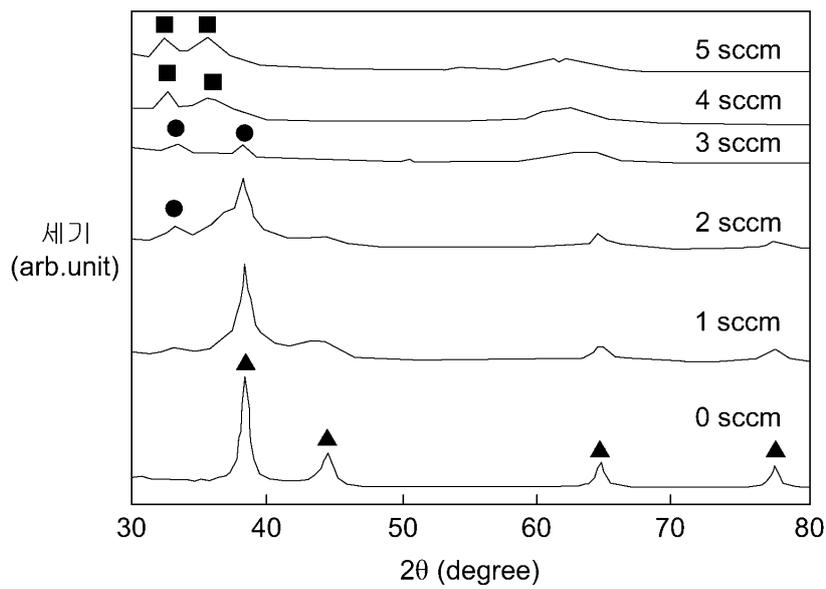
도면6e



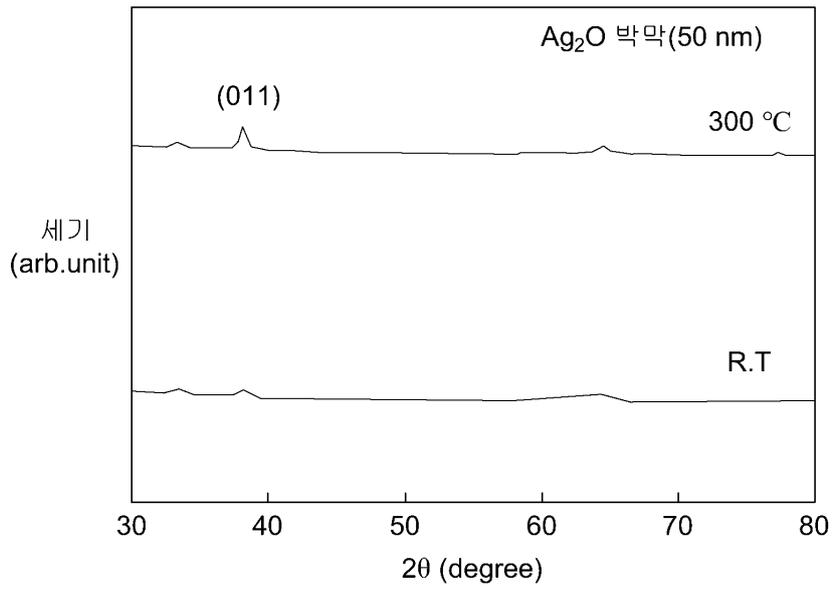
도면7



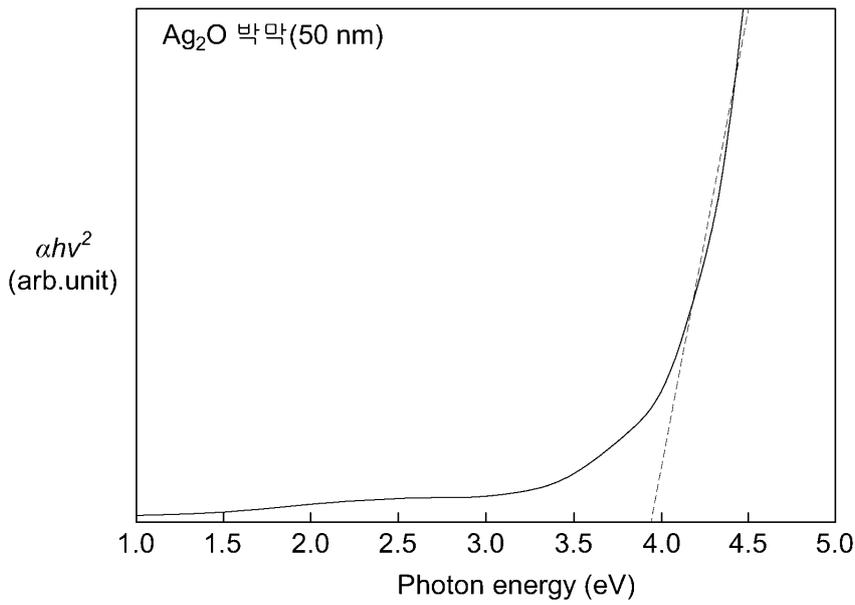
도면8



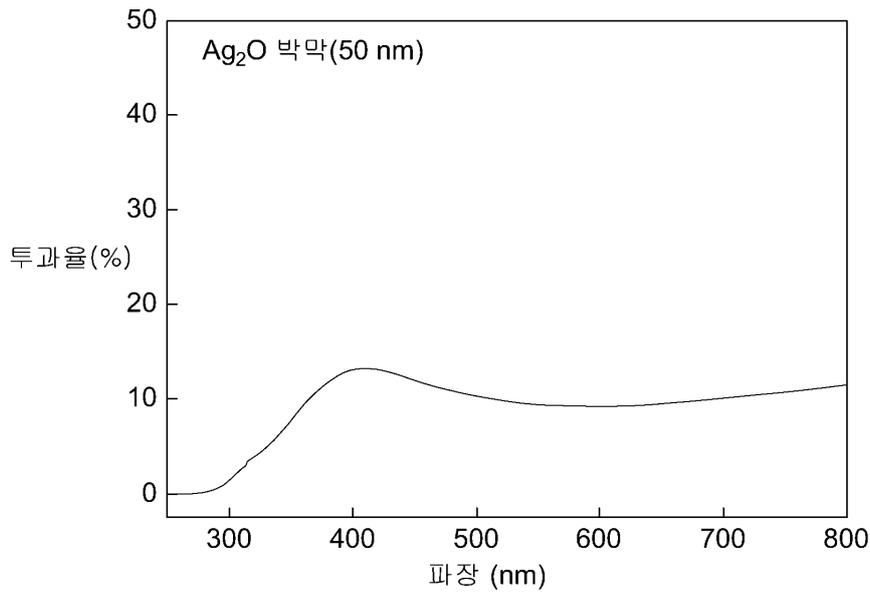
도면9



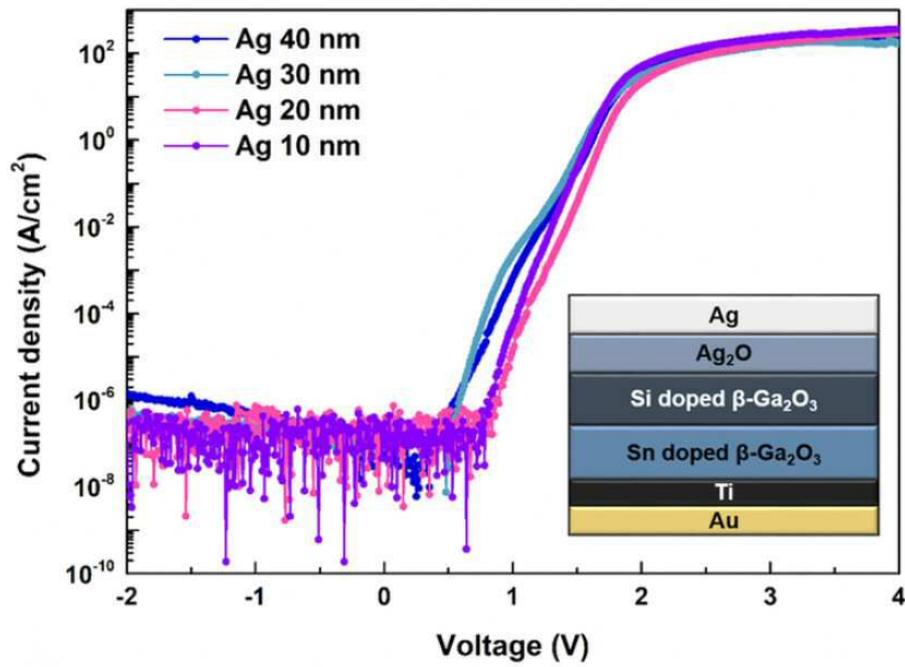
도면10



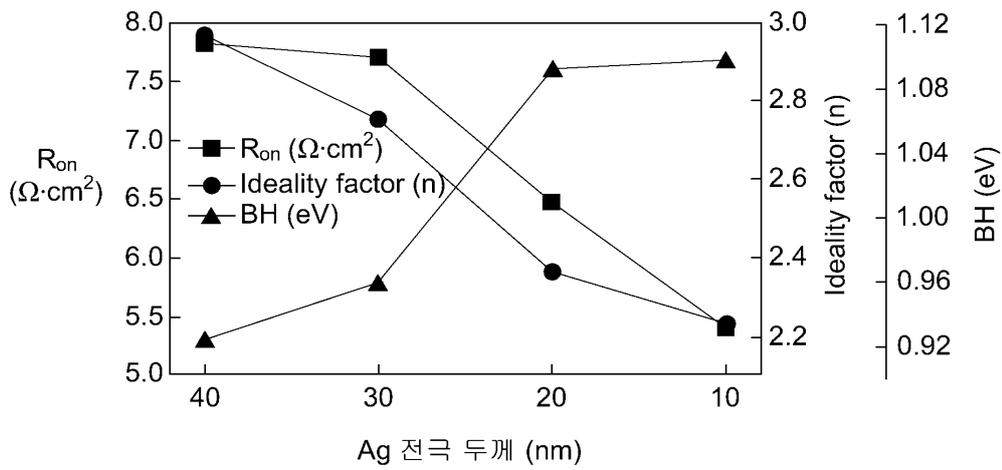
도면11



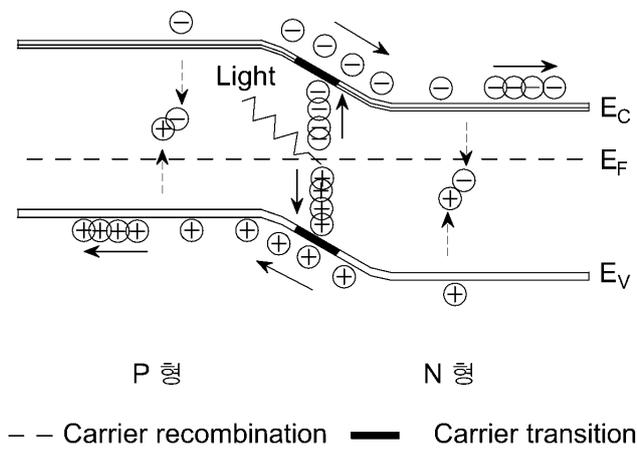
도면12



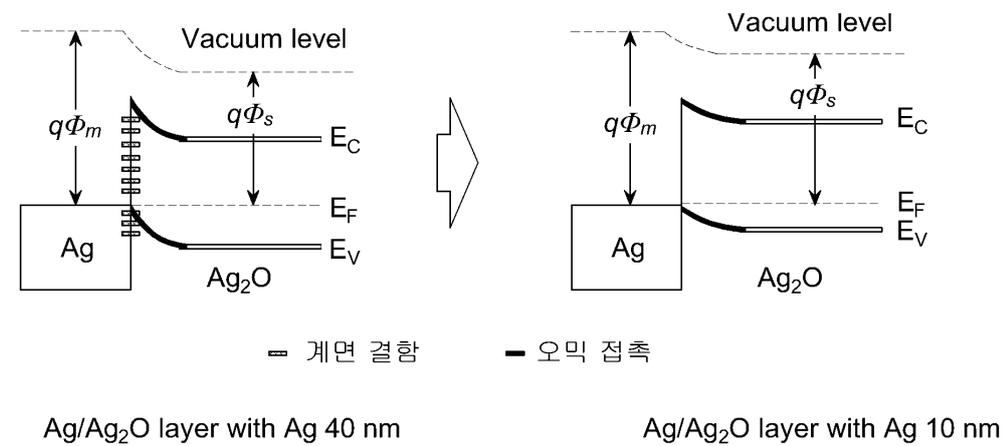
도면13



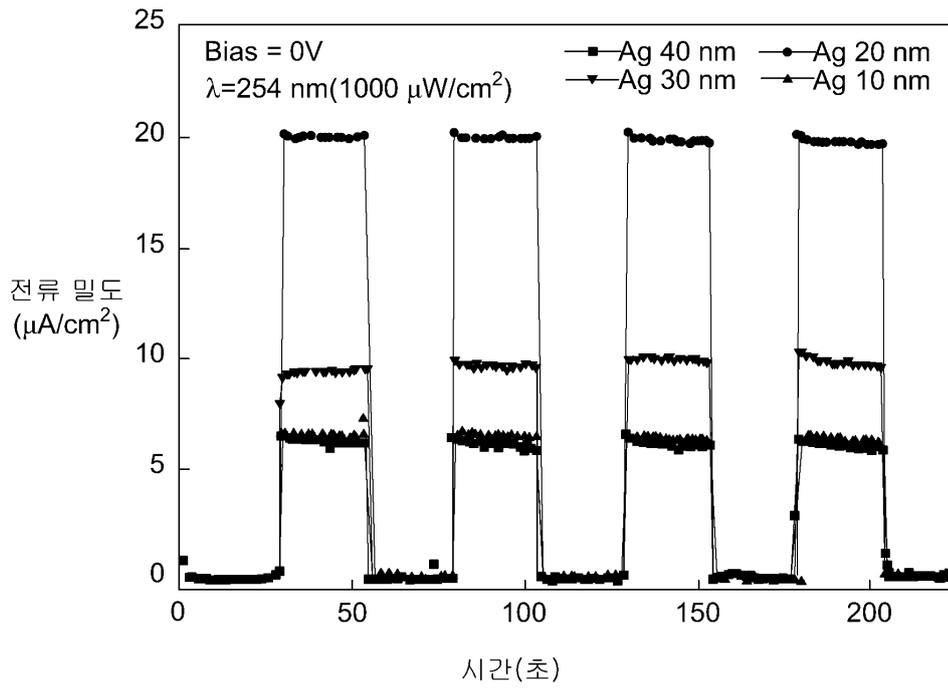
도면14



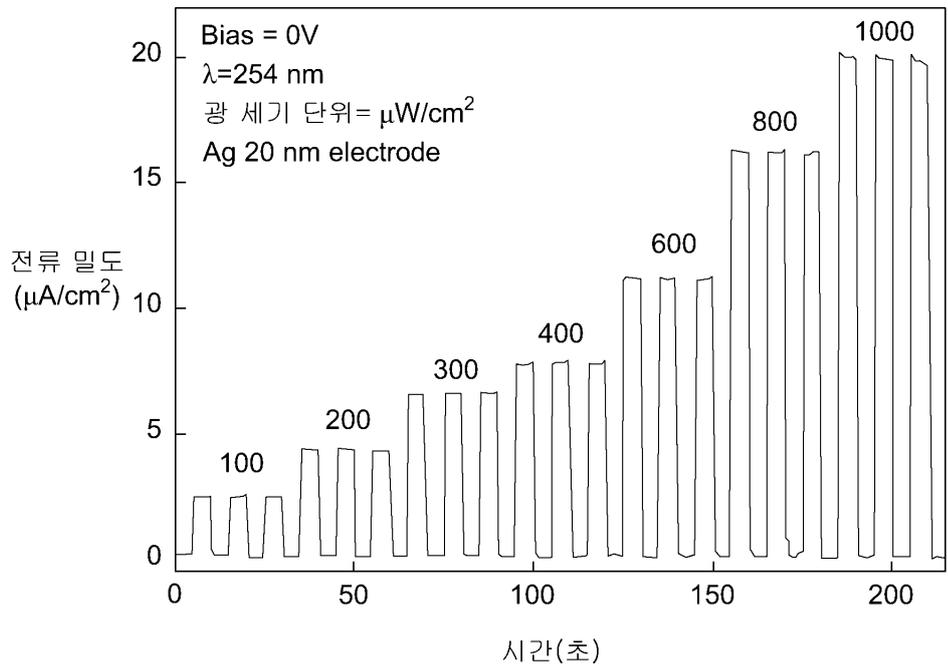
도면15



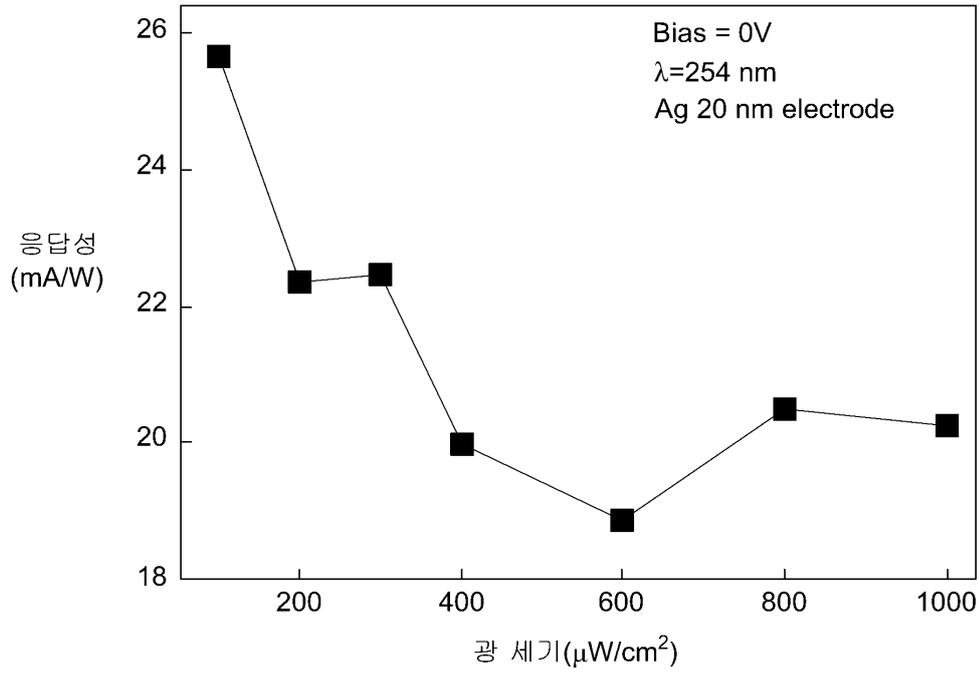
도면16



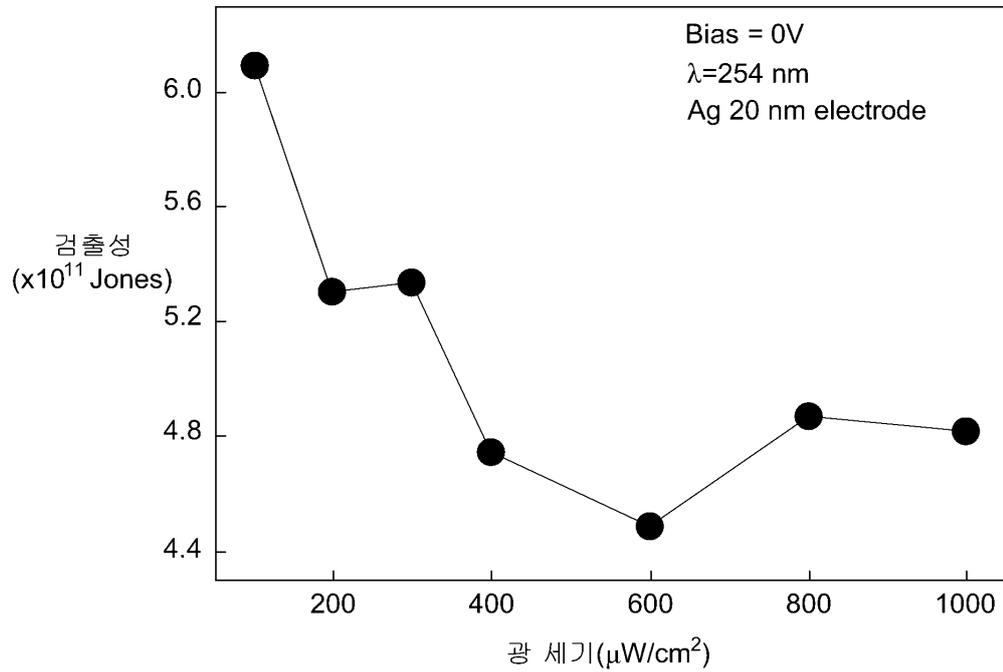
도면17



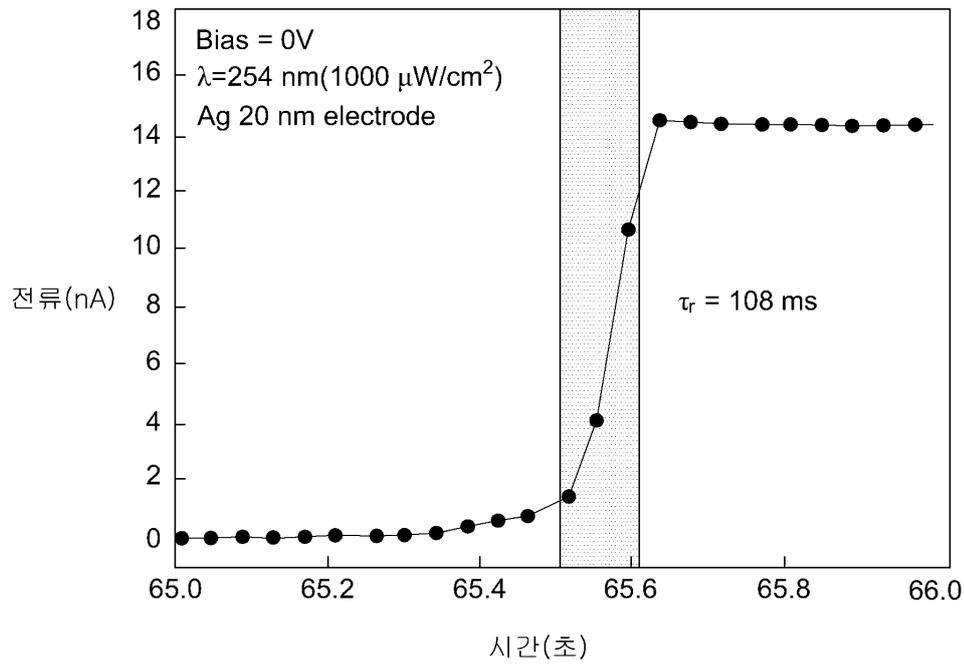
도면18



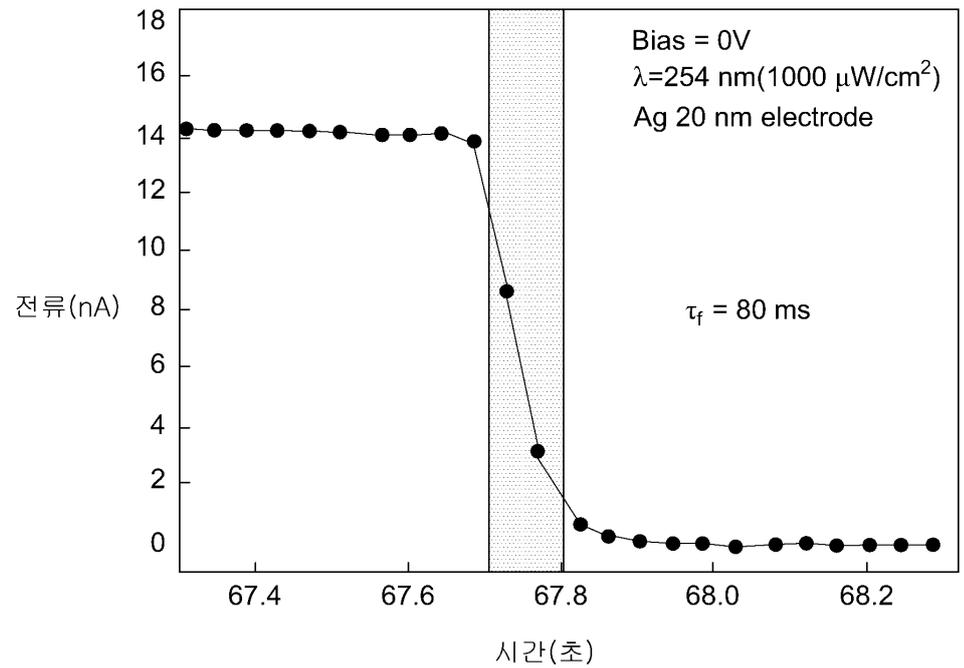
도면19



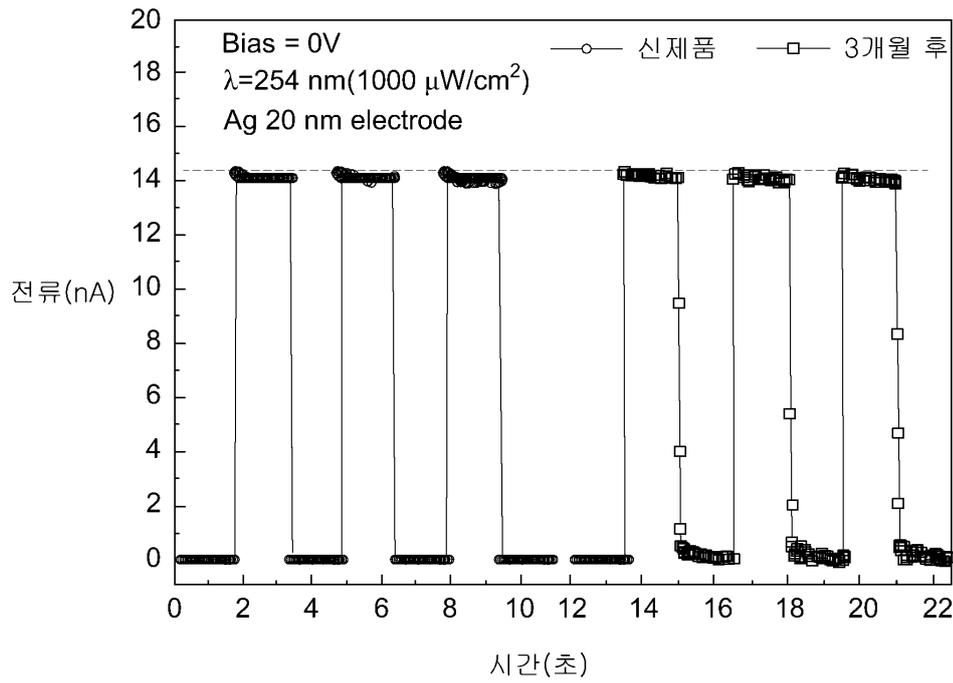
도면20



도면21



도면22



도면23

