(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0054665
(43) 공개일자 2020년05월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 31/109 (2006.01) *H01L 31/0224* (2006.01)
H01L 31/0352 (2006.01) *H01L 31/0392* (2006.01)
H01L 31/18 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 31/109 (2013.01)
H01L 31/022475 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0138226
(22) 출원일자 2018년11월12일
심사청구일자 2018년11월12일

(71) 출원인
인천대학교 산학협력단
인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)
(72) 발명자
김준동
인천광역시 연수구 컨벤시아대로274번길 15, 2304동 1001호(송도동, 송도 더샵 마스터뷰 23-1BL)
김홍식
충청남도 천안시 동남구 터미널9길 59, 201동 401호 (신부동, 대림한들아파트)
(74) 대리인
특허법인가산

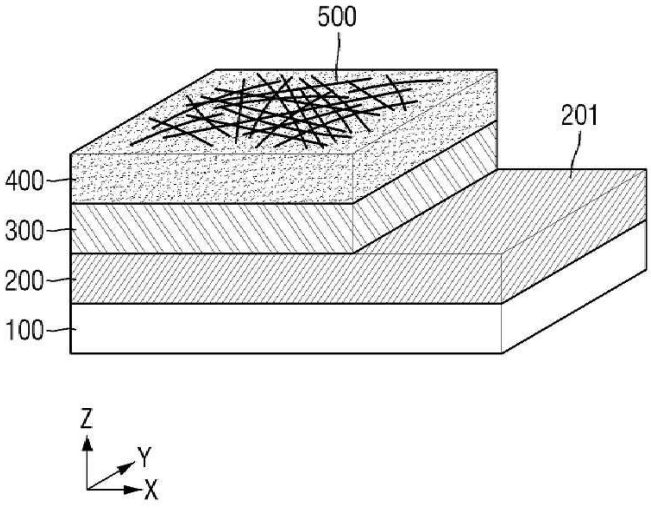
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 **포토 디텍터 및 그 제조 방법**

(57) 요 약

포토 디텍터 및 그 제조 방법을 제공한다. 상기 포토 디텍터는 투명 기판, 상기 투명 기판 상의 투명 전도체막, 상기 투명 전도체막 상의 티타늄 산화막, 상기 티타늄 산화막 상에서 상기 티타늄 산호막과 이종 접합을 이루는 구리 산화막 및 상기 구리 산화막 상에서 임베디드(embedded)되어 쇼트키 컨택을 형성하는 나노 와이어 네트워크를 포함한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H01L 31/035227 (2013.01)
H01L 31/0392 (2013.01)
H01L 31/18 (2013.01)
Y02E 10/50 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 201701750002
부처명 한국에너지기술평가원
연구관리전문기관 한국에너지기술평가원
연구사업명 에너지기술개발사업
연구과제명 고효율 결정질 실리콘 태양전지용 전하선택접촉 기술 개발
기 여 율 1/2
주관기관 성균관대학교 (인천대학교 참여)
연구기간 2018.01.01 ~ 2018.12.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 201700400002
부처명 한국에너지기술평가원
연구관리전문기관 한국에너지기술평가원
연구사업명 에너지국제공동연구사업
연구과제명 셀모듈 일체형 단결정 실리콘 (10 ㎛급) 멤브레인 태양전지 개발
기 여 율 1/2
주관기관 한양대학교 에리카 산학협력단 (인천대학교 참여)
연구기간 2018.01.01 ~ 2018.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

투명 기판;

상기 투명 기판 상의 투명 전도체막;

상기 투명 전도체막 상의 티타늄 산화막;

상기 티타늄 산화막 상에서 상기 티타늄 산호막과 이종 접합을 이루는 구리 산화막; 및

상기 구리 산화막 상에서 임베디드(embedded)되어 쇼트키 컨택을 형성하는 나노 와이어 네트워크를 포함하는 포토 디텍터.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 투명 전도체막은 ITO 및 FTO 중 적어도 하나를 포함하는 포토 디텍터.

청구항 3

제1 항에 있어서,

상기 티타늄 산화막은 TiO_2를 포함하는 포토 디텍터.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 구리 산화막은 Cu_4O_3를 포함하는 포토 디텍터.

청구항 5

제1 항에 있어서,

상기 나노 와이어 네트워크는 은 나노 와이어를 포함하는 포토 디텍터.

청구항 6

제1 항에 있어서,

상기 나노 와이어 네트워크와 상기 구리 산화막 사이의 제1 계면에서의 전기장의 방향은 상기 구리 산화막과 상기 티타늄 산화막 사이의 제2 계면에서의 전기장 방향과 서로 반대인 포토 디텍터.

청구항 7

제6 항에 있어서,

상기 제1 계면에서의 전기장은 상기 구리 산화막 방향이고,

상기 제2 계면에서의 전기장은 상기 구리 산화막 방향인 포토 디텍터.

청구항 8

제6 항에 있어서,

상기 제1 계면에서의 전기장의 크기는 상기 제2 계면에서의 전기장의 크기보다 작은 포토 디텍터.

청구항 9

제6 항에 있어서,

상기 제2 계면에서 형성되는 공핍층(SCR; space charge region)을 더 포함하는 포토 디텍터.

청구항 10

투명 기판 상에 투명 전도체막을 형성하고,

상기 투명 전도체막 상에 티타늄막을 형성하고,

상기 티타늄막을 급속 열처리하여 티타늄 산화막을 형성하고,

상기 티타늄 산화막 상에 구리 산화막을 형성하고,

상기 구리 산화막 상에 나노 와이어 네트워크를 형성하는 것을 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

청구항 11

제10 항에 있어서,

상기 나노 와이어 네트워크를 형성하는 것은,

은 나노 와이어 용액을 상기 구리 산화막 상에 도포하고,

상기 은 나노 와이어 용액을 상기 구리 산화막 상에서 회전시켜 스핀 코팅하는 것을 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

청구항 12

제10 항에 있어서,

상기 구리 산화막을 형성하는 것은,

구리 타겟을 아르곤 및 산소를 공급하여 스퍼터링하는 것을 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

청구항 13

제12 항에 있어서,

상기 구리 산화막은 Cu4O3를 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

청구항 14

제13 항에 있어서,

상기 구리 산화막을 형성하는 것은 순수한 Cu 타겟으로부터 아르곤 및 산소를 동시에 반응시키는 리액티브 스퍼터링 방식을 사용하는 것을 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

청구항 15

제14 항에 있어서,

상기 아르곤 및 산소를 동시에 반응시키는 것은 상기 아르곤 및 산소의 유량을 99:1에서 70:30의 비율 범위로 변화시키는 것을 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

청구항 16

제12 항에 있어서,

상기 구리 산화막을 형성하는 것은 상기 구리 산화막의 두께를 1 내지 500nm로 형성하는 것을 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

청구항 17

제10 항에 있어서,

상기 티타늄 산화막을 형성하는 것은,

티타늄 타겟을 아르곤을 공급하여 스퍼터링하여 티타늄막을 형성하고,

상기 티타늄 막을 급속 열처리하여 상기 티타늄 산화막을 형성하는 것을 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

청구항 18

제17 항에 있어서,

상기 티타늄 산화막은 TiO_2를 포함하는 포토 디텍터 제조 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 포토 디텍터 및 그 제조 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 400nm보다 작은 파장을 가지는 빛은 자외선(UV; ultraviolet)으로 분류된다. 이러한 영역의 빛을 전기 신호로 변환시키는 UV 포토디텍터(PD; photodetector)로 알려진 장치를 광전자 공학(optoelectronics) 장치라고 한다.

[0003] 이러한 광전자 공학장치는 오존 센싱, 공기 정화, 의료 이미징(medical imaging), 화염 검출, 우주 탐사(space exploration) 및 광학 통신에 사용될 수 있다.

[0004] 일반적으로, 포토 디텍터는 복잡한 전자 회로 요구되는 높은 외부 전원이 필요하다. 이러한 복잡한 전자 회로는 높은 비용과 무거운 중량을 야기시킨다. 그러나, 최근에 ZnO과 같은 단일 금속 산화물 또는 나노 이종 접합(nano heterojunction)에서의 기술 발달은 상대적으로 낮은 mW 단위의 전력 소모와 높은 성능을 가질 수 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 등록특허공보 제10-1733007호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 투과도를 유지하면서 광반응을 향상시킨 포토 디텍터를 제공하는 것이다.

[0007] 본 발명이 해결하고자 하는 다른 과제는 투과도를 유지하면서 광반응을 향상시킨 포토 디텍터 제조 방법을 제공하는 것이다.

[0008] 본 발명이 해결하고자 하는 과제들은 이상에서 언급한 과제들로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 상기 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 포토 디텍터는 투명 기판, 상기 투명 기판 상의 투명 전도체막, 상기 투명 전도체막 상의 티타늄 산화막, 상기 티타늄 산화막 상에서 상기 티타늄 산호막과 이종 접합을 이루는 구리 산화막 및 상기 구리 산화막 상에서 임베디드(embedded)되어 쇼트키 컨택을 형성하는 나노 와이어 네트워크를 포함한다.

[0010] 상기 다른 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 따른 포토 디텍터 제조 방법은 투명 기판 상에 투명 전

도체막을 형성하고, 상기 투명 전도체막 상에 티타늄막을 형성하고, 상기 티타늄막을 급속 열처리하여 티타늄 산화막을 형성하고, 상기 티타늄 산화막 상에 구리 산화막을 형성하고, 상기 구리 산화막 상에 나노 와이어 네트워크를 형성하는 것을 포함한다.

[0011] 기타 실시예들의 구체적 사항들은 상세한 설명 및 도면들에 포함되어 있다.

발명의 효과

[0012] 본 발명의 몇몇 실시예에 따른 포토 디텍터는 나노 와이어를 쇼트키 컨택으로 추가함으로써, 광반응을 향상시키면서 투과도도 필요한 범위 내로 유지할 수 있다.

[0013] 본 발명에 따른 효과는 이상에서 예시된 내용에 의해 제한되지 않으며, 더욱 다양한 효과들이 본 명세서 내에 포함되어 있다.

도면의 간단한 설명

[0014] 도 1은 본 발명의 몇몇 실시예들에 따른 포토 디텍터를 설명하기 위한 사시도이다.

도 2 내지 도 4는 본 발명의 몇몇 실시예들에 따른 포토 디텍터 제조 방법을 설명하기 위한 중간 단계 도면들이다.

도 5는 본 발명의 비교예 1의 구조를 설명하기 위한 사시도이다.

도 6은 본 발명의 실시예 1의 구조를 설명하기 위한 사시도이다.

도 7은 본 발명의 실시예 1의 투과도를 설명하기 위한 실제 사진 이미지이다.

도 8은 본 발명의 비교예 2의 구리 산화막의 XRD(X-ray Diffraction)를 나타낸 그래프이다.

도 9는 본 발명의 실시예 1의 에너지 밴드를 설명하기 위한 에너지 밴드 다이어그램이다.

도 10은 본 발명의 비교예 3의 전류 전압 특성을 설명하기 위한 그래프이다.

도 11은 본 발명의 비교예 3의 전류 전압 특성을 설명하기 위한 세미 로그 그래프이다.

도 12는 본 발명의 비교예 1의 표면 형태를 설명하기 위한 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지이다.

도 13은 본 발명의 실시예 1의 표면 형태를 설명하기 위한 SEM 이미지이다.

도 14는 본 발명의 실시예 1 및 비교예 1의 투과도 및 반사도를 설명하기 위한 그래프이다.

도 15는 본 발명의 실시예 1 및 비교예 1의 흡광도를 설명하기 위한 그래프이다.

도 16은 본 발명의 비교예 1의 다양한 입사광 조건에서의 전압에 대한 전류 밀도 그래프이다.

도 17은 본 발명의 비교예 1의 다양한 입사광 조건에서의 전압에 대한 전류 밀도의 세미 로그 그래프이다.

도 18은 본 발명의 실시예 1의 다양한 입사광 조건에서의 전압에 대한 전류 밀도 그래프이다.

도 19는 본 발명의 실시예 1의 다양한 입사광 조건에서의 전압에 대한 전류 밀도의 세미 로그 그래프이다.

도 20은 본 발명의 비교예 1의 입사광의 세기에 따른 광전류 밀도를 나타낸 그래프이다.

도 21은 본 발명의 실시예 1의 입사광의 세기에 따른 광전류 밀도를 나타낸 그래프이다.

도 22는 본 발명의 비교예 1의 과도 광반응의 라이즈 타임과 폴 타임을 설명하기 위한 그래프이다.

도 23은 본 발명의 비교예 1의 입사광 세기에 따른 과도 광반응을 설명하기 위한 그래프이다.

도 24는 본 발명의 실시예 1의 과도 광반응의 라이즈 타임과 폴 타임을 설명하기 위한 그래프이다.

도 25는 본 발명의 실시예 1의 입사광 세기에 따른 과도 광반응을 설명하기 위한 그래프이다.

도 26은 본 발명의 비교예 1의 입사광의 세기에 따른 반응도 및 감지도를 설명하기 위한 그래프이다.

도 27은 본 발명의 실시예 1의 입사광의 세기에 따른 반응도 및 감지도를 설명하기 위한 그래프이다.

도 28은 본 발명의 비교예 1의 입사광의 세기에 따른 NPDR(normalized photocurrent to dark current ratio)

및 NEP(noise equivalent power)를 설명하기 위한 그래프이다.

도 29는 본 발명의 실시예 1의 입사광의 세기에 따른 NPDR 및 NEP를 설명하기 위한 그래프이다.

도 30은 본 발명의 비교예 1의 SNR(signal to noise ratio)을 설명하기 위한 그래프이다.

도 31은 본 발명의 실시예 1의 SNR(signal to noise ratio)을 설명하기 위한 그래프이다.

도 32는 본 발명의 비교예 1의 스펙트럼 응답을 설명하기 위한 그래프이다.

도 33은 본 발명의 실시예 1의 스펙트럼 응답을 설명하기 위한 그래프이다.

도 34는 본 발명의 비교예 1 및 실시예 1의 특성과 다른 자외선 포토 디텍터들의 특성을 비교하기 위한 표이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0015] 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면과 함께 상세하게 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예들에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 것이며, 단지 본 실시예들은 본 발명의 개시가 완전하도록 하며, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다. 명세서 전체에 걸쳐 동일 참조 부호는 동일 구성 요소를 지칭한다.

[0016] 비록 제1, 제2 등이 다양한 소자, 구성요소 및/또는 섹션들을 서술하기 위해서 사용되나, 이들 소자, 구성요소 및/또는 섹션들은 이들 용어에 의해 제한되지 않음은 물론이다. 이들 용어들은 단지 하나의 소자, 구성요소 또는 섹션들을 다른 소자, 구성요소 또는 섹션들과 구별하기 위하여 사용하는 것이다. 따라서, 이하에서 언급되는 제1 소자, 제1 구성요소 또는 제1 섹션은 본 발명의 기술적 사상 내에서 제2 소자, 제2 구성요소 또는 제2 섹션일 수도 있음은 물론이다.

[0017] 소자(elements) 또는 층이 다른 소자 또는 층의 "위(on)" 또는 "상(on)"으로 지칭되는 것은 다른 소자 또는 층의 바로 위뿐만 아니라 중간에 다른 층 또는 다른 소자를 개재한 경우를 모두 포함한다. 반면, 소자가 "직접 위(directly on)" 또는 "바로 위"로 지칭되는 것은 중간에 다른 소자 또는 층을 개재하지 않은 것을 나타낸다.

[0018] 공간적으로 상대적인 용어인 "아래(below)", "아래(beneath)", "하부(lower)", "위(above)", "상부(upper)" 등은 도면에 도시되어 있는 바와 같이 하나의 소자 또는 구성 요소들과 다른 소자 또는 구성 요소들과의 상관관계를 용이하게 기술하기 위해 사용될 수 있다. 공간적으로 상대적인 용어는 도면에 도시되어 있는 방향에 더하여 사용시 또는 동작시 소자의 서로 다른 방향을 포함하는 용어로 이해되어야 한다. 예를 들면, 도면에 도시되어 있는 소자를 뒤집을 경우, 다른 소자의 "아래(below 또는 beneath)"로 기술된 소자는 다른 소자의 "위(above)"에 놓일 수 있다. 따라서, 예시적인 용어인 "아래"는 아래와 위의 방향을 모두 포함할 수 있다. 소자는 다른 방향으로도 배향될 수 있으며, 이 경우 공간적으로 상대적인 용어들은 배향에 따라 해석될 수 있다.

[0019] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 "포함한다(comprises)" 및/또는 "포함하는(comprising)"은 언급된 구성요소, 단계, 동작 및/또는 소자는 하나 이상의 다른 구성요소, 단계, 동작 및/또는 소자의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

[0020] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 공통적으로 이해될 수 있는 의미로 사용될 수 있을 것이다. 또 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 용어들은 명백하게 특별히 정의되어 있지 않는 한 이상적으로 또는 과도하게 해석되지 않는다.

[0021] 이하, 도 1을 참조하여 본 발명의 몇몇 실시예에 따른 포토 디텍터를 설명한다.

[0022] 도 1은 본 발명의 몇몇 실시예들에 따른 포토 디텍터를 설명하기 위한 사시도이다.

[0023] 도 1을 참조하면, 제1 방향(X)은 수평 방향 중 어느 한 방향이고, 제2 방향(Y)은 수평 방향 중 제1 방향(X)과 다른 어느 한 방향일 수 있다. 예를 들어, 제1 방향(X) 및 제2 방향(Y)은 서로 수직한 방향일 수 있다. 제3 방향(Z)은 제1 방향(X) 및 제2 방향(Y)과 모두 다른 방향일 수 있다. 제3 방향(Z)은 예를 들어, 제1 방향(X) 및 제2 방향(Y)과 모두 수직한 방향일 수 있다. 제1 방향(X) 및 제2 방향(Y)이 수평 방향이므로 제3 방향(Z)은 수직 방향일 수 있다. 제1 방향(X), 제2 방향(Y) 및 제3 방향(Z)은 서로 오소고날(orthogonal)한 방향일 수 있다.

[0024] 본 발명의 몇몇 실시예들에 따른 포토 디텍터는 투명 기판(100), 투명 전도체막(200), 티타늄 산화막(300), 구리 산화막(400) 및 나노 와이어 네트워크(500)를 포함한 다.

[0025] 투명 기판(100)은 빛이 투과할 수 있는 투명한 기판일 수 있다. 투명 기판(100)은 예를 들어, 유리 기판일 수 있다. 단, 본 실시예가 이에 제한되는 것은 아니다.

[0026] 투명 전도체막(200)은 투명 기판(100) 상에 형성될 수 있다. 즉, 투명 전도체막(200)은 투명 기판(100)의 제3 방향(Z)으로 접하도록 형성될 수 있다. 투명 전도체막(200)도 역시 빛이 투과할 수 있는 투명한 막일 수 있다. 투명 전도체막(200)은 예를 들어, ITO(Indium Tin Oxide) 및 FTO(Fluorine Tin Oxide) 중 적어도 하나일 수 있다. 또는 투명 전도체막(200)은 다른 TCO(Transparent Conductive Oxide) 물질을 포함할 수도 있다.

[0027] 티타늄 산화막(300)은 투명 전도체막(200) 상에 형성될 수 있다. 티타늄 산화막(300)은 투명 전도체막(200)의 상면의 일부를 노출시킬 수 있다. 즉, 투명 전도체막(200)의 상면은 외부로 노출된 노출 영역(201)을 포함할 수 있다. 이러한 노출 영역(201)은 전압을 인가할 때, 전극이 접하는 부분이 될 수 있다.

[0028] 티타늄 산화막(300)은 예를 들어, TiO_2를 포함할 수 있다. 티타늄 산화막(300) 역시 빛이 투과할 수 있는 투명한 막일 수 있다.

[0029] 구리 산화막(400)은 티타늄 산화막(300) 상에 형성될 수 있다. 구리 산화막(400)은 티타늄 산화막(300)의 상면 전체를 덮을 수 있다. 단, 본 실시예가 이에 제한되는 것은 아니다.

[0030] 구리 산화막(400)은 티타늄 산화막(300)과 이종 접합(heterojunction)을 이룰 수 있다. 이종 접합이란 서로 에너지 갭(energy gap)과 일함수(work function)이 다른 물질의 접합으로서, 페르미 레벨(fermi level)이 같아지는 과정에서 에너지 밴드의 불연속이 형성될 수 있다. 이러한 경우 계면 포텐셜 전위에 의해서 전자나 홀의 이동도(mobility)가 높은 접합소자를 형성할 수 있다.

[0031] 구리 산화막(400)은 예를 들어, Cu_4O_3를 포함할 수 있다. 구리 산화막(400) 역시 빛이 투과할 수 있는 투명한 막일 수 있다.

[0032] 나노 와이어 네트워크(500)는 구리 산화막(400)의 상면에 임베디드(embedded)될 수 있다. 여기서, "임베디드"란 나노 와이어 네트워크(500)의 일부가 구리 산화막(400)의 내부로 삽입되어 결합된 형태를 의미할 수 있다. 즉, 나노 와이어 네트워크(500)의 일부는 구리 산화막(400)의 내부에 삽입되되, 나노 와이어 네트워크(500)의 나머지 일부는 구리 산화막(400) 상에 노출될 수 있다.

[0033] 나노 와이어 네트워크(500)는 여러 가닥의 나노 와이어가 서로 교차하면서 겹쳐지는 네트워크(network) 형태를 가질 수 있다. 나노 와이어 네트워크(500)는 복수의 나노 와이어 가닥을 포함할 수 있다.

[0034] 나노 와이어 네트워크(500)는 금속 나노 와이어를 포함할 수 있다. 예를 들어, 나노 와이어 네트워크(500)는 은 나노 와이어를 포함할 수 있다.

[0035] 나노 와이어 네트워크(500)는 구리 산화막(400)과 쇼트키 컨택(Schottky Contact)을 형성할 수 있다.

[0036] 나노 와이어 네트워크(500)는 구리 산화막(400)의 상면 전체를 커버하지 않으므로 빛이 충분히 투과할 수 있다. 이에 따라서, 본 실시예들에 따른 포토 디텍터는 전체적으로 투명할 수 있다.

[0037] 본 실시예들에 따른 포토 디텍터는 구리 산화막(400)의 상면에 나노 와이어 네트워크(500)를 임베디드함에 따라서 투과도는 유지하면서도 향상된 광반응을 제공할 수 있다. 이러한 효과에 대해서는 하기의 실험예들에 의해서 자세히 설명한다.

[0038] 이하, 도 1 내지 도 4를 참조하여 본 발명의 몇몇 실시예에 따른 포토 디텍터를 설명한다. 상술한 설명과 중복되는 설명은 간략히 하거나 생략한다.

[0039] 도 2 내지 도 4는 본 발명의 몇몇 실시예들에 따른 포토 디텍터 제조 방법을 설명하기 위한 중간 단계 도면들이다.

[0040] 먼저, 도 2를 참조하면, 투명 기판(100) 상에 투명 전도체막(200)이 형성된 구조를 제공한다.

[0041] 투명 기판(100)은 빛이 투과할 수 있는 투명한 기판일 수 있다. 투명 기판(100)은 예를 들어, 유리 기판일 수 있다.

[0042] 투명 전도체막(200)은 투명 기판(100) 상에 형성될 수 있다. 투명 전도체막(200)은 예를 들어, ITO 및 FTO 중

적어도 하나일 수 있다. 투명 전도체막(200)의 상면은 노출 영역(201)과 비노출 영역(202)을 포함할 수 있다. 비노출 영역(202)과 노출 영역(201)은 제1 방향(X)으로 서로 인접할 수 있다.

[0043] 비노출 영역(202)은 추후에 티타늄 산화막 등이 형성되어 노출되지 않는 영역일 수 있다. 반대로, 노출 영역(201)은 추후에 커버되지 않아 외부로 노출되는 영역일 수 있다. 노출 영역(201)은 추후에 전압을 인가하는 단자 역할을 할 수 있다.

[0044] 투명 기판(100) 및 투명 전도체막(200)은 초음파로 세척되고, 질소 가스로 건조될 수 있다.

[0045] 이어서, 도 3을 참조하면, 비노출 영역(202) 상에 티타늄 산화막(300)을 형성한다.

[0046] 티타늄 산화막(300)을 형성하기 위해서 먼저 티타늄 타겟을 먼저 스퍼터링할 수 있다. 이어서, 스퍼터링에 의해서 형성된 티타늄막을 급속 열처리(RTP; rapid thermal process)하여 티타늄 산화막(300)을 형성할 수 있다. 티타늄 산화막(300)은 예를 들어, TiO_2를 포함할 수 있다.

[0047] 이어서, 도 4를 참조하면, 티타늄 산화막(300) 상에 구리 산화막(400)을 형성한다.

[0048] 구리 산화막(400)을 형성하기 위해서 구리 타겟을 산소를 공급하여 상온(room temperature)에서 스퍼터링할 수 있다. 구리 산화막(400)은 예를 들어, Cu_4O_3를 포함할 수 있다.

[0049] 구리 산화막(400)은 순수한 구리 타겟을 아르곤(Ar)과 산소(O_2)를 동시에 반응시키는 리액티브 스퍼터링 방식으로 형성될 수 있다. 이 때, 아르곤과 산소 가스의 유량은 99:1에서 70:30의 비율 범위로 변화할 수 있다.

[0050] 구리 산화막(400)의 두께는 1 내지 500nm일 수 있다. 구리 산화막(400)이 1nm보다 얇을 경우에는 이종 접합이나 쇼트키 컨택의 특성이 발휘되지 못할 수 있고, 500nm보다 두꺼울 경우에는 입사광의 투과도가 낮아질 수 있다.

[0051] 이어서, 도 1을 참조하면, 구리 산화막(400) 상에 나노 와이어 네트워크(500)을 형성한다.

[0052] 나노 와이어 네트워크(500)는 은 나노 와이어를 포함할 수 있다. 나노 와이어 네트워크(500)는 나노 와이어 용액을 구리 산화막(400)의 상면에 떨어뜨리고, 이어서 회전시켜 스핀 코팅하여 형성될 수 있다.

[0053] 나노 와이어 네트워크(500)는 각각의 나노 와이어가 잘 연결되도록 형성될 수 있다.

[0054] 본 실시예에 따른 포토 디텍터 제조 방법은 구리 산화막(400) 상에 나노 와이어 네트워크(500)를 임베디드하여 투과도를 유지하면서 동시에 광반응이 향상된 포토 디텍터를 제공할 수 있다.

[0056] **비교예 1-@No-AgNWs**

[0057] FTO로 코팅된 유리 기판을 아세톤, 메탄올 및 탈이온수와 함께 초음파 세척하여 준비하였다. 99.99% 순수한 Ti 타겟을 이용하여 챔버 내에 아르곤 가스를 50sccm의 유량으로 주입하고, 압력을 5mTorr로 유지하면서 스퍼터링하였다. 이 때, DC 파워는 300W이고, 유리 기판은 Ti막의 균일한 두께를 위해서 5rpm의 속도로 회전하였다. 이어서, 700 ℃의 온도에서 5분간 균일한 산소 공급 하에 급속 열처리를 통해서 스퍼터링한 Ti막을 산화시켜 TiO_2막을 FTO 상에 성장시켰다.

[0058] TiO_2막 상에 Cu_4O_3막을 형성하기 위해서 99.99% 순수한 Cu 타겟을 이용하여 챔버 내에 아르곤 가스와 산소 가스를 각각 15sccm 및 5sccm의 유량으로 혼합하여 주입하면서 상온에서 스퍼터링하였다. 이 때, DC 파워는 100W이고, 유리 기판은 Cu_4O_3막의 균일한 두께를 위해서 5rpm의 속도로 회전하였다. Cu_4O_3막의 두께는 140nm로 하였다.

[0059] 도 5는 본 발명의 비교예 1의 구조를 설명하기 위한 사시도이다. 입사광에 의한 에너지(hν)는 투명 기판(100)의 하면으로 공급될 수 있다.

[0061] **실시예 1-@AgNWs**

[0062] Cu_4O_3막 상에 은 나노 네트워크를 추가적으로 임베디드 하는 것을 제외하고는 비교예1과 동일하게 하였다.

[0063] 은 나노 와이어 용액을 Cu_4O_3막 상에 마이크로 피펫(micropipette)으로 떨어뜨리고, 스핀 코터 상에서 30초간

3000rpm으로 회전시켜 잘 연결된 은 나노 와이어 네트워크를 형성한다.

[0064] 도 6은 본 발명의 실시예 1의 구조를 설명하기 위한 사시도이다. 비교예 1과 마찬가지로 입사광에 의한 에너지(hν)는 투명 기판(100)의 하면으로 공급될 수 있다.

[0065] 도 7은 본 발명의 실시예 1의 투과도를 설명하기 위한 실제 사진 이미지이다. 도 7을 참조하면, 실시예 1의 포토 디텍터는 완전히 투명하고, 은 나노 와이어 네트워크(AgNWs)가 형성된 부분도 투과도가 크게 감소하지 않고 유지됨을 알 수 있다(푸른 점선 사각형).

[0067] **비교예 2-Cu_4O_3/glass**

[0068] 구리 산화막의 성장을 확인하기 위해서 유리 기판 상에 Cu_4O_3막만을 형성하였다.

[0069] 도 8은 본 발명의 비교예 2의 구리 산화막의 XRD(X-ray Diffraction)를 나타낸 그래프이다.

[0070] 도 8을 참조하면, 충분한 산소 공급 하에서 형성된 구리 산화막의 결정상(crystal phase) 중 하나를 확인할 수 있다. 30.5 및 36° 에서 관찰된 피크는 a = 5.837Å, c = 9.932Å 및 c/a = 1.7016의 격자 파라미터를 갖는 정방 결정(tetragonal)인 Cu_4O_3 구조의 (200) 및 (400) 평면에 기인할 수 있다. 또한, 64.35° 에서 (026) 피크의 존재는 구리 산화물의 다결정 성질을 나타낸다.

[0071] D = 0.94λ/(Bcosθ)의 셰러 공식(Scherrer formula)을 사용하여 (200) 피크에 해당하는 14nm의 결정자(crystallite) 크기를 계산하였다. 여기서 B는 라디안 단위의 fwhm(full width at half-maximum)이다. λ는 nm 단위의 파장이고, θ는 도(degree) 단위의 브래그 각도(Braggs' angle)이다.

[0073] 도 9는 본 발명의 실시예 1의 에너지 밴드를 설명하기 위한 에너지 밴드 다이어그램이다.

[0074] 도 9를 참조하면, 전하 수송 메커니즘이 제안되어 있다. 도 9는 TiO_2, Cu_4O_3 및 Ag의 빌트인 전위(built-in potential), 일함수(work function; 페르미 레벨에서 진공 레벨로 전자를 제거하는 데 필요한 에너지), 에너지 밴드갭(컨덕션 밴드 및 밸런스 밴드 에지 사이의 갭) 및 전자 친화도(컨덕션 밴드에서 진공 레벨로 전자를 제거하기 위해 요구되는 에너지)의 관점에서 도시되었다.

[0075] TiO_2의 에너지 밴드갭(E_g) 및 일함수 ($q\phi_n$)는 각각 3.2 및 4.5eV로 알려져 있다. FTO는 4.7 eV의 일 함수 ($q\phi$)를 갖는다. 유사하게, 유사하게 전극으로 사용된 은 나노 와이어(AgNW)의 일 함수 ($q\phi m$)는 ~4.69 eV로 알려져 있다. 그러나, 실시예 1의 나노 와이어 네트워크(AgNWs)의 측정된 일함수는 4.57eV이다.

[0076] Cu_4O_3에 대한 밴드갭은 2.3 eV이고, 알려진 5.3 eV와는 달리 ~4.7 eV ($q\phi_p$)의 일함수를 갖는다. 이러한 차이는 다중접합 상호작용(multijunction interaction)에 기인할 것일 수 있다.

[0077] pn 접합에서, 0.2 V의 빌트인 전위(V_{bi})를 갖는 일함수 오프셋은 캐리어의 확산을 통해 공간 전하 영역(SCR: space charge region)을 생성하며, 이는 p 측을 향한 전기장(Electric Field)을 유도한다. 유사하게, 은 나노 와이어(AgNW) 및 p형 Cu_4O_3의 일함수의 오프셋은 캐리어의 확산에 의해 밴드 꺾임(band-bending)을 일으켜서, p 측을 향한 전기장(Schottky Electric Field)을 야기한다.

[0078] 쇼트키 컨택의 빌트인 전위는 이 경우 0.13V으로, $\phi_{bi} = \phi_p - \phi m$을 사용하여 계산된 ϕ_{bi}와 동일하다.

[0080] **비교예 3-AgNWs/Cu4O3-Schottky**

[0081] 쇼트키 컨택의 특성을 확인하기 위해서 다른 구성 없이 Cu_4O_3막 상에 은 나노 와이어 네트워크(AgNWs)를 형성하여 쇼트키 컨택을 형성하였다.

[0083] **실험예 1**

[0084] 본 발명의 실시예 3의 쇼트키 컨택에 전압을 인가하여 전압 전류 특성을 확인하였다.

[0085] 도 10은 본 발명의 비교예 3의 전류 전압 특성을 설명하기 위한 그래프이고, 도 11은 본 발명의 비교예 3의 전류 전압 특성을 설명하기 위한 세미 로그 그래프이다.

[0086] 도 10 및 도 11에서 실시예 3에 입사광이 없는 암조건(dark)과 입사광이 있는 광조건(light)를 나누어 측정하였다.

[0088] 도 9 내지 도 11을 참조하여 본 발명의 실시예 1을 비교예 3과 비교하면, 광조건의 AgNW/Cu_4O_3 쇼트 키 접합에서는 캐리어의 약간의 광 여기(photoexcitation)가 가능하지만, 이종 접합(Cu_4O_3/TiO_2)에서 Cu_4O_3의 에너지 밴드갭(2.34eV)보다 높은 에너지를 갖는 광자(hv)는 전하 캐리어의 높은 광 생성(photogeneration)에 기여한다.

[0089] 또한, 이종 접합(Cu_4O_3/TiO_2)에서의 강한 계면 전기장(Electric Field)은 광 생성된 전자 및 홀을 각각 FTO 및 AgNW를 통해 외부 회로로 전달한다.

[0090] 도 12는 본 발명의 비교예 1의 표면 형태를 설명하기 위한 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지이다.

[0091] 도 12를 참조하면, 고온에서 FTO 상에서 성장한 TiO_2는 입상 구조(granular structure)를 가진다. 이렇게 잘 성장된 입상 구조의 성장은 결정 경계가 광 생성된 변경 캐리어를 트랩하여 낮은 응답을 유발할 수 있다는 점에서 주목할 만하다.

[0092] 도 13은 본 발명의 실시예 1의 표면 형태를 설명하기 위한 SEM 이미지이다.

[0093] 도 13을 참조하면, 비교예 1과 달리 잘 연결된 은 나노 와이어 네트워크가 형성된 실시예 1의 표면은 매끄러운 전하 수집을 제공할 수 있어 장치의 성능을 크게 높일 수 있다.

[0094] 더욱이, 구멍이 존재하는 은 나노 와이어 네트워크는 불투명한 금속막에 비해서 높은 투과도를 제공하고, 금속 산화물의 쇼트키 장치로의 입사광의 입구를 보장한다.

[0096] **실험예 2**

[0097] 비교예 1과 실시예 1의 광학 프로필이 280 내지 1400nm의 입사광 파장에 대해서 측정되었다.

[0098] 도 14는 본 발명의 실시예 1 및 비교예 1의 투과도 및 반사도를 설명하기 위한 그래프이고, 도 15는 본 발명의 실시예 1 및 비교예 1의 흡광도를 설명하기 위한 그래프이다.

[0099] 도 14 및 도 15를 참조하면, 280 내지 500nm 범위에서의 낮은 평균 투과도(실시예 1의 5% 및 비교예 1의 8%)는 자외선 광 검출을 위한 활성 광자 흡수(active photon absorption)를 확인시켜 준다. 반면에, 중간 파장($500<\lambda<850$ nm)에서는, 투과도는 각각 39%(실시예 1) 및 52%(비교예 1)로서, 이는 광전자 공학의 투명 쇼트키 장치로서의 자격을 증명할 수 있다.

[0100] 반면에, 장치의 반사도는 플라즈마 주파수 아래에서의 메탈 특성에 의해서 야기된 자외선 영역의 돌출부를 제외하고는 전체 파장 영역에서 매끄럽다.

[0101] 도 15를 참조하면, 전하 캐리어의 생성을 위해서 600nm보다 짧은 파장의 광자가 넓은 밴드갭의 금속 산화물로 유효하게 흡수되므로 600nm 아래에서는 흡광도가 증가됨을 확인할 수 있다.

[0102] 도 14 및 도 15를 참조하면, 더 긴 파장 영역($1000<\lambda<1400$ nm)에서는 투과도의 상당한 감소와 흡광도의 뚜렷한 증가가 자유전자의 흡수를 나타낸다.

[0104] **실험예 3**

[0105] 비교예 1 및 실시예 1의 전기적 특성을 확인하기 위해서 자외선 조명하에 -1.5 V 내지 1.5 V의 범위의 전압을 인가하였다. 이를 통해서 개방 회로 전압(V_{OC}) 및 단락 전류 밀도(J_{SC})를 확인할 수 있다.

[0106] 도 16은 본 발명의 비교예 1의 다양한 입사광 조건에서의 전압에 대한 전류 밀도 그래프이고, 도 17은 본 발명

의 비교예 1의 다양한 입사광 조건에서의 전압에 대한 전류 밀도의 세미 로그 그래프이다.

[0107] 도 16 및 도 17을 참조하면, 세미 로그 그래프에서 특히 명백하게 확인되는 제로 바이어스에서의 광전류의 존재는 비교예 1의 장치가 V_{OC}에서의 동작하에 셀프 바이어스 포토 디텍터가 될 수 있음을 보여준다. 나아가, 0.7 내지 6mWcm^{-2}의 범위에서 서로 다른 세기의 조명 하에, 비교예 1의 장치는 증가된 전류에 의해서 암(dark) 라인에 비해서 체계적인 치우침을 보여준다. 이는 비교예 1의 장치의 자외선 포토 디텍터로서의 유효성을 의미할 수 있다. 6mWcm^{-2}의 조명 세기에서 0.3 V의 V_{OC}와 0.25 μAcm^{-2}의 Jsc가 관찰된다.

[0108] 도 18은 본 발명의 실시예 1의 다양한 입사광 조건에서의 전압에 대한 전류 밀도 그래프이고, 도 19는 본 발명의 실시예 1의 다양한 입사광 조건에서의 전압에 대한 전류 밀도의 세미 로그 그래프이다.

[0109] 도 18 및 도 19를 참조하면, 비교예 1과 달리, 은 나노 와이어 네트워크가 Cu_4O_3막 상에 적용된 이후에는 광전류(1.01mAcm^{-2})의 뚜렷한 향상이 확인된다. Voc 값은 AgNWs/Cu_4O_3 쇼트키 접합에서 생성된 반대 전기장의 존재로 인해 0.1V만큼 약간 감소했다. 다중 접합 이외의 Voc 감소에 대한 또 다른 이유는 Cu_4O_3막으로의 AgNWs 전극 침투가 될 수 있다. 이는 바이어스 광 응답에서 명백하게 확인된다. 즉, 바이어스 광 응답은 셀프 바이어싱된 동작과 비교하여 낮은 온/오프 비율을 가질 수 있다.

[0110] 그러나, 최대 출력 파워는 6 mW cm^{-2}의 입사광의 세기에서 0.075 X 10^{-6}Wcm^{-2} 에서 2.02 X 10^{-3} Wcm^{-2}로 향상될 수 있다. 이는 실시예 1이 비교예 1에 비해서 작은 입사광 조건에서의 민감한 광 검출에 유리하다는 것을 확인시켜 준다.

[0111] 도 20은 본 발명의 비교예 1의 입사광의 세기에 따른 광전류 밀도를 나타낸 그래프이고, 도 21은 본 발명의 실시예 1의 입사광의 세기에 따른 광전류 밀도를 나타낸 그래프이다.

[0112] 도 20 및 도 21을 참조하면, 멱법칙(power law) 피팅을 확인할 수 있다. 빛의 강도가 변화함에 따라 광전류가 체계적으로 증가하는 것은 $J_{ph} = P^{\alpha}$와 같은 멱 법칙에 의해 결정된다. 여기서 J_{ph}, P 및 α는 각각 광전류 밀도, 단위 면적당 강도 및 멱 법칙의 지수를 나타낸다.

[0114] **실험예 4**

[0115] 실시예 1과 비교예 1의 과도 광응답을 측정하였다. 도 22는 본 발명의 비교예 1의 과도 광반응의 라이즈 타임과 폴 타임을 설명하기 위한 그래프이다.

[0116] 도 22를 참조하면, 라이즈 타임(τ_r, 광전류가 10%에서 90%로 도달하는 데 걸리는 시간) 및 폴 타임(τ_f, 광전류가 90%에서 10%로 감쇠하는 데 걸리는 시간)은 포토 디텍터의 중요한 특징이다. 이는 포토 디텍터가 얼마나 빠르게 입력 신호에 대하여 응답을 감지하고 디스플레이하는지를 정의한다.

[0117] 비교예 1는 148ms의 라이즈 타임 및 150ms의 폴 타임을 보여준다.

[0118] 도 23은 본 발명의 비교예 1의 입사광 세기에 따른 과도 광반응을 설명하기 위한 그래프이다.

[0119] 도 23을 참조하면, 입사광의 세기는 1.8 mWcm^{-2} 내지 6 mW cm^{-2}로 증가할 수 있다. 이에 따라서 광전류는 점차 증가할 수 있다.

[0120] 도 24는 본 발명의 실시예 1의 과도 광반응의 라이즈 타임과 폴 타임을 설명하기 위한 그래프이고, 도 25는 본 발명의 실시예 1의 입사광 세기에 따른 과도 광반응을 설명하기 위한 그래프이다.

[0121] 도 24 및 도 25를 참조하면, 실시예 1은 라이즈 타임(0.439ms) 및 폴 타임(0.423ms)의 상당히 향상된 성능을 제공한다. 이는 홀을 수집하는데 있어서 은 나노 와이어 네트워크의 유효성을 뒷받침해준다.

[0123] **실험예 5**

[0124] 반응도, 감지도, NPDR, NEP 및 SNR과 같이 효과적인 포토 디텍션을 위한 또 다른 중요한 수치를 측정하였다. 반

응도 ($R = J_p/P_{in}$, 여기서 J_p는 광전류 밀도이고, P_{in}은 단위 면적당 입력 파워이다.)와, 감지도($D = R/\sqrt{(2qJ_d)}$, 여기서 q는 전자 전하이고, J_d는 암전류이다.)는 포토 디텍터의 주요 특징이다.

[0125] 도 26은 본 발명의 비교예 1의 입사광의 세기에 따른 반응도 및 감지도를 설명하기 위한 그래프이고, 도 27은 본 발명의 실시예 1의 입사광의 세기에 따른 반응도 및 감지도를 설명하기 위한 그래프이다.

[0126] 도 26 및 도 27을 참조하면, 반응도 및 감지도는 비교예 1 및 실시예 1에서 입사광의 세기가 1 에서 $6mWcm^{-2}$로 증가하면서 감소하는 경향을 보여준다.

[0127] $6\ mW\ cm^{-2}$의 입사광 세기에서 비교예 1의 $0.37\ nAW^{-1}$의 반응도는 실시예 1의 $187.5\ mAW^{-1}$로 향상될 수 있다. 이러한 광전류에서의 엄청난 향상은 은 나노 와이어 네트워크의 우월한 전도도에 기인한다.

[0128] 유사하게 임베디드된 은 나노 와이어 네트워크에 의해서 감지도도 비교예 1의 6.48×10^{4} Jones에서 실시예 1의 5.13×10^{9} Jones로 증가되었다.

[0129] 비교예 1 및 실시예 1의 NPDR($NPDR = R/I_d$, 여기서 I_d는 암전류이다.) 및 NEP($NEP = 1/(NPDR \sqrt{(2q/I_d)})$)는 다양한 입사광의 세기에서 측정되었다.

[0130] 도 28은 본 발명의 비교예 1의 입사광의 세기에 따른 NPDR 및 NEP를 설명하기 위한 그래프이고, 도 29는 본 발명의 실시예 1의 입사광의 세기에 따른 NPDR 및 NEP를 설명하기 위한 그래프이다.

[0131] 도 28 및 도 29를 참조하면, 의도된 전류와 의도되지 않은 전류를 모두 고려한다고 하더라도, 비교예 1에서 실시예 1의 NPDR은 입사광의 세기 $6mWcm^{-2}$ 에서 $36W^{-1}$ 에서 $1.88 \times 10^{5}\ W^{-1}$로 급격하게 증가하였다.

[0132] NEP에서도 비교예 1의 포토 디텍터가 마이크로와트(microwatt) 단위의 감지에 비해서 실시예 1의 포토 디텍터가 피코와트(picowatt) 단위의 낮은 전력을 감지할 수 있는 능력이 있다는 것이 증명되었다.

[0133] 도 30은 본 발명의 비교예 1의 SNR(signal to noise ratio)을 설명하기 위한 그래프이고, 도 31은 본 발명의 실시예 1의 SNR(signal to noise ratio)을 설명하기 위한 그래프이다.

[0134] 도 30 및 도 31을 참조하면, SNR($SNR = I_p/I_d$)가 은 나노 와이어 네트워크의 유효성을 증명하기 위해서 측정되었다. 더 높은 SNR의 값은 포토 디텍터에서의 더 나은 성능을 위해서 요구된다. 모든 입사광의 세기에서 실시예 1은 향상된 값을 나타낸다.

[0135] 도 32는 본 발명의 비교예 1의 스펙트럼 응답을 설명하기 위한 그래프이고, 도 33은 본 발명의 실시예 1의 스펙트럼 응답을 설명하기 위한 그래프이다.

[0136] 도 32 및 도 33을 참조하면, 실시예 1과 비교예 1의 전체 영역 중 자외선 영역에 대한 민감도를 확인할 수 있다.

[0137] 도 34는 본 발명의 비교예 1 및 실시예 1의 특성과 다른 자외선 포토 디텍터들의 특성을 비교하기 위한 표이다.

[0138] 도 34를 참조하면, 실시예 1의 자외선 포토 디텍터의 향상된 성능을 확인할 수 있다.

[0139] 이상 실험예 및 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들을 설명하였지만, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 그 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다.

부호의 설명

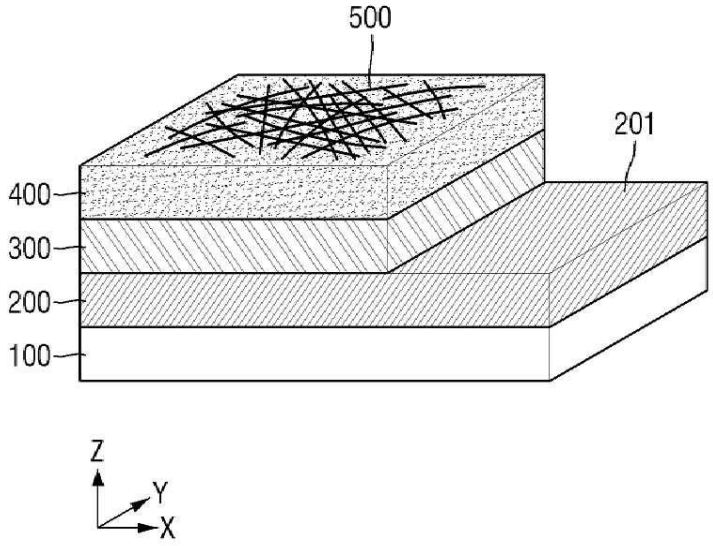
[0140] 100: 투명 기판 200: 투명 전도체막

300: 티타늄 산화막 400: 구리 산화막

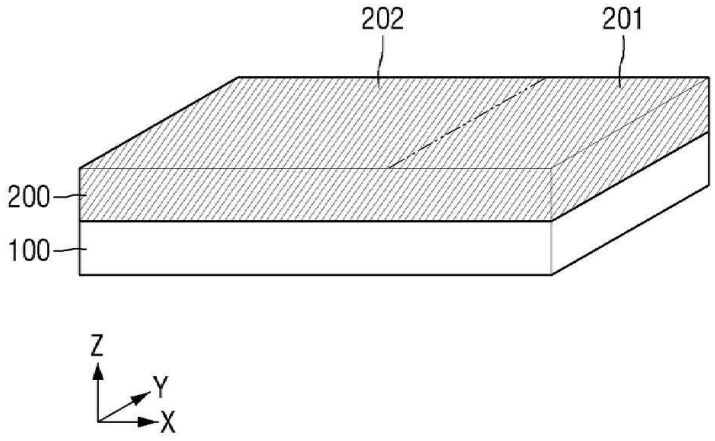
500: 나노 와이어 네트워크

도면

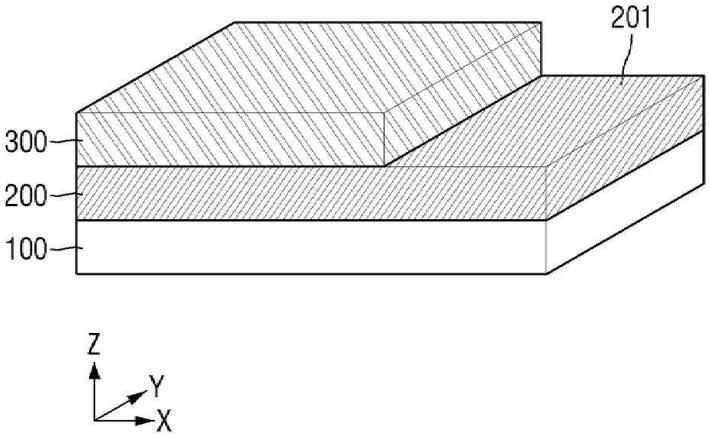
도면1



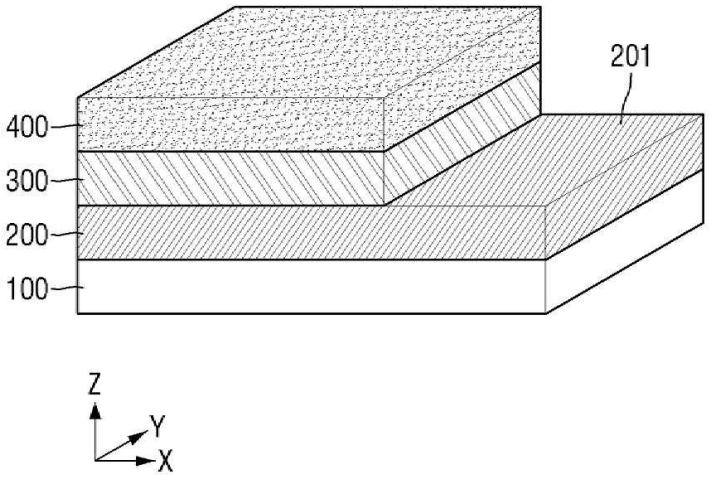
도면2



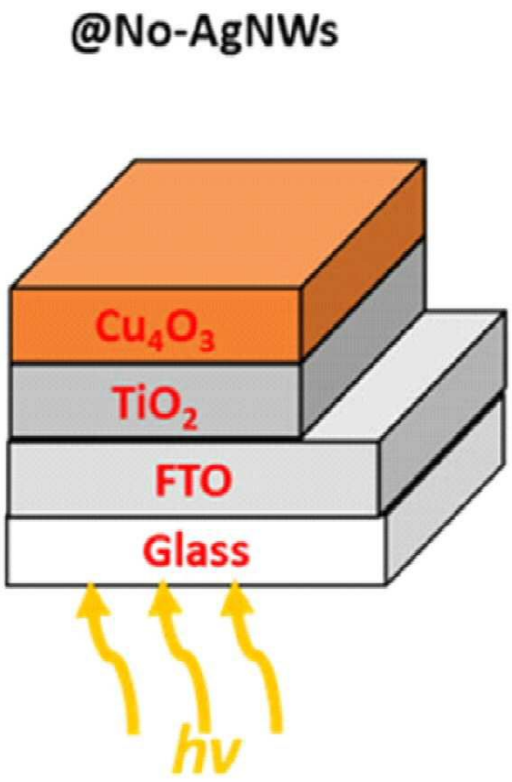
도면3



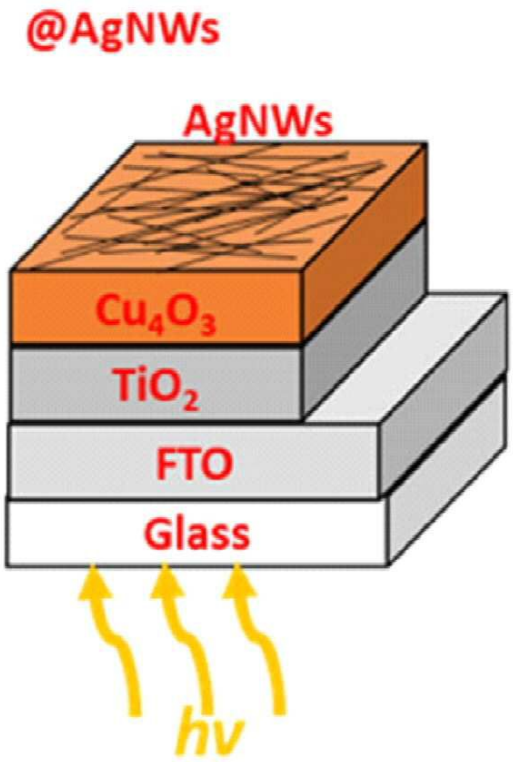
도면4



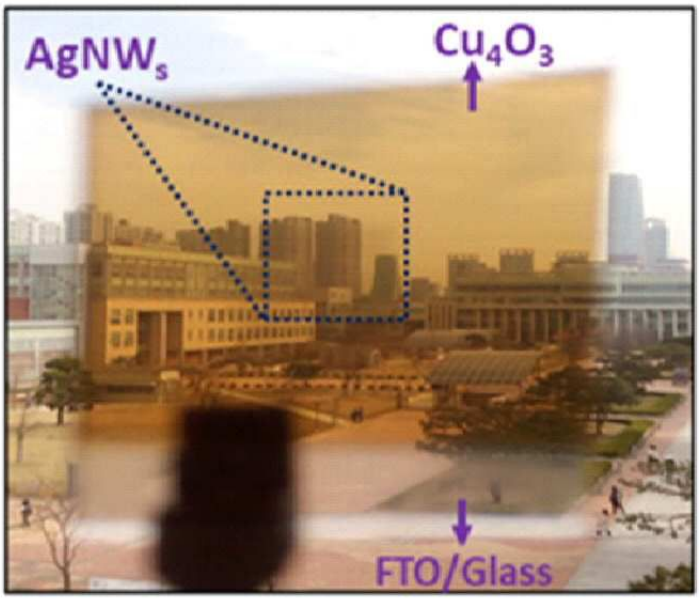
도면5



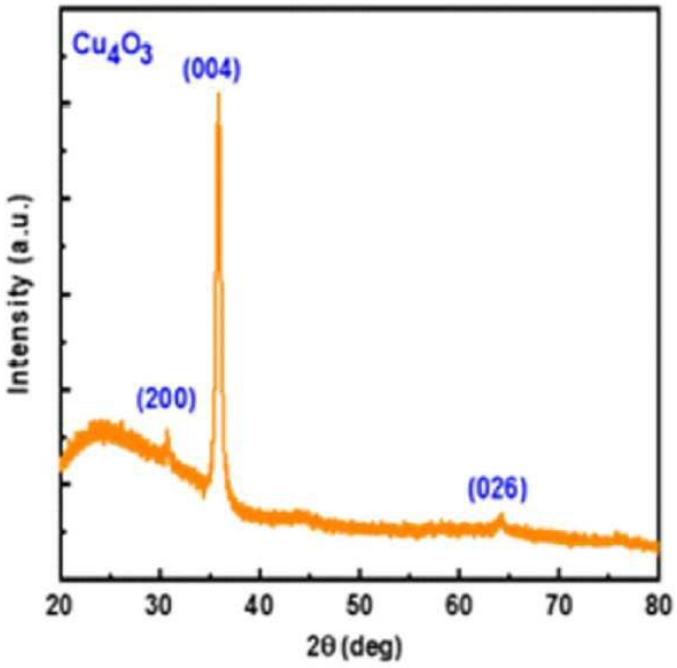
도면6



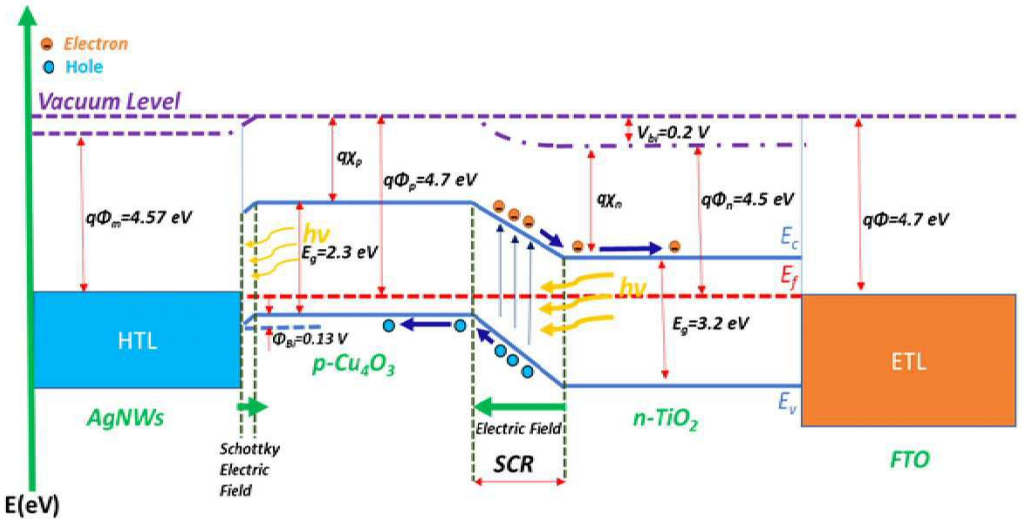
도면7



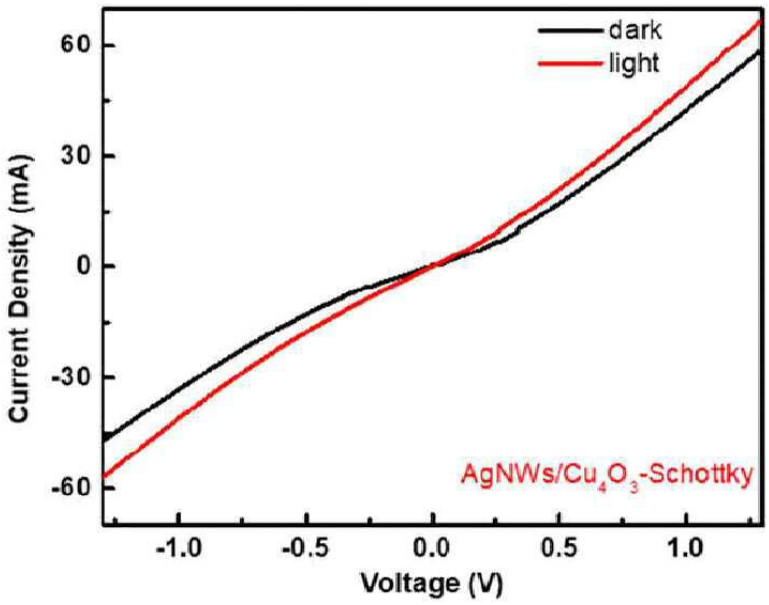
도면8


Cu4O3
(004)
(200)
(026)
Intensity (a.u.)
20
30
40
50
60
70
80
2θ (deg)

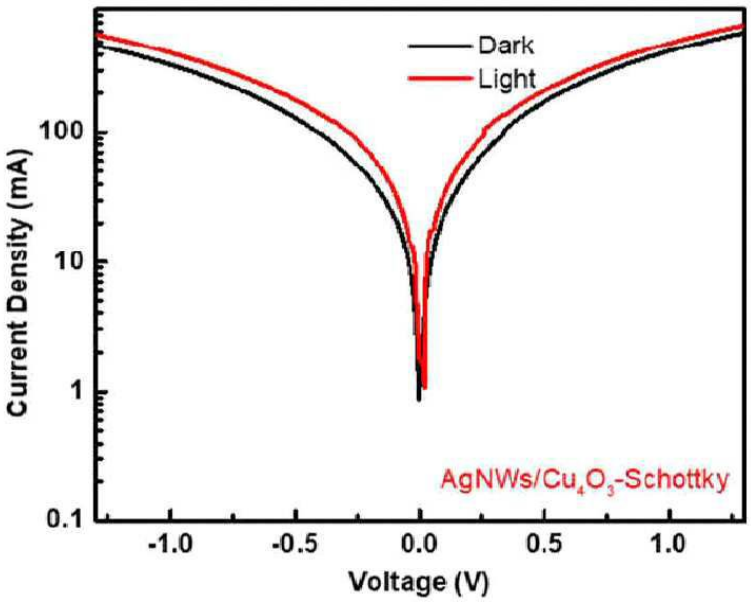
도면9


Electron
Hole
Vacuum Level
qΦm=4.57 eV
qχp
qΦp=4.7 eV
hv
Eg=2.3 eV
ΦBi=0.13 V
p-Cu4O3
HTL
AgNWs
Schottky
Electric
Field
Vbi=0.2 V
qχn
qΦn=4.5 eV
qΦ=4.7 eV
Ec
Ef
Ev
Eg=3.2 eV
Electric Field
SCR
n-TiO2
ETL
FTO
E(eV)

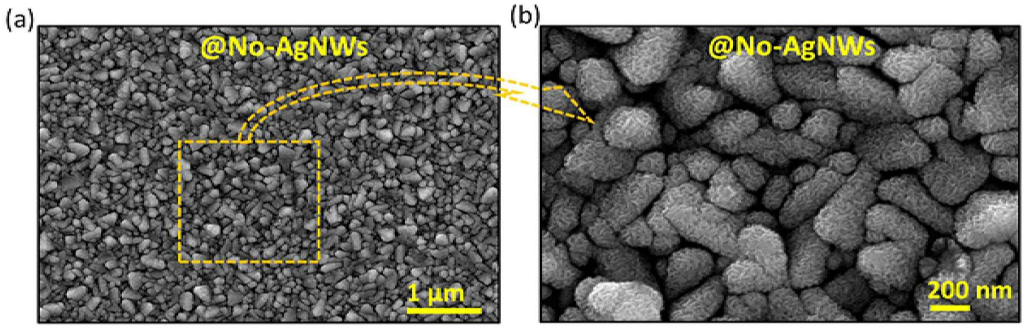
도면10



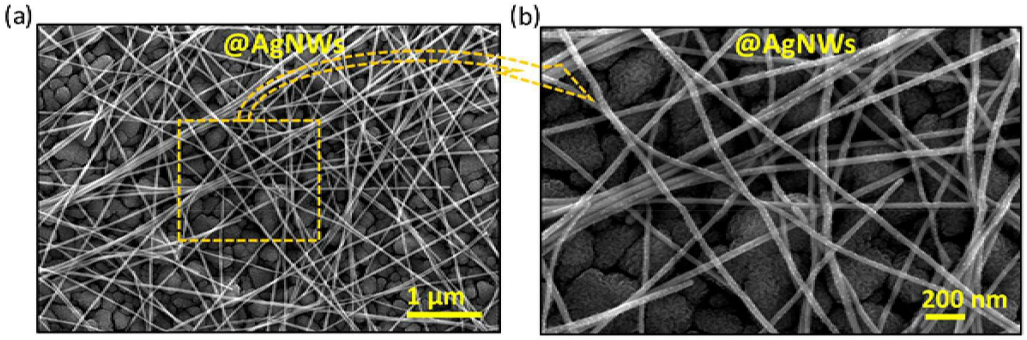
도면11



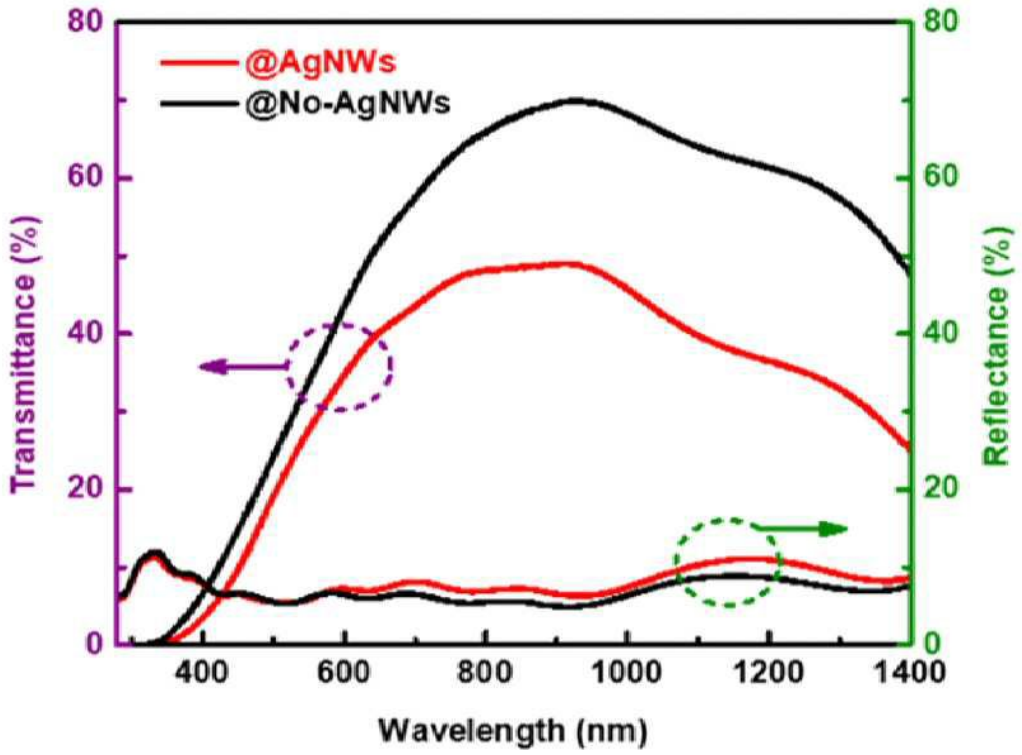
도면12



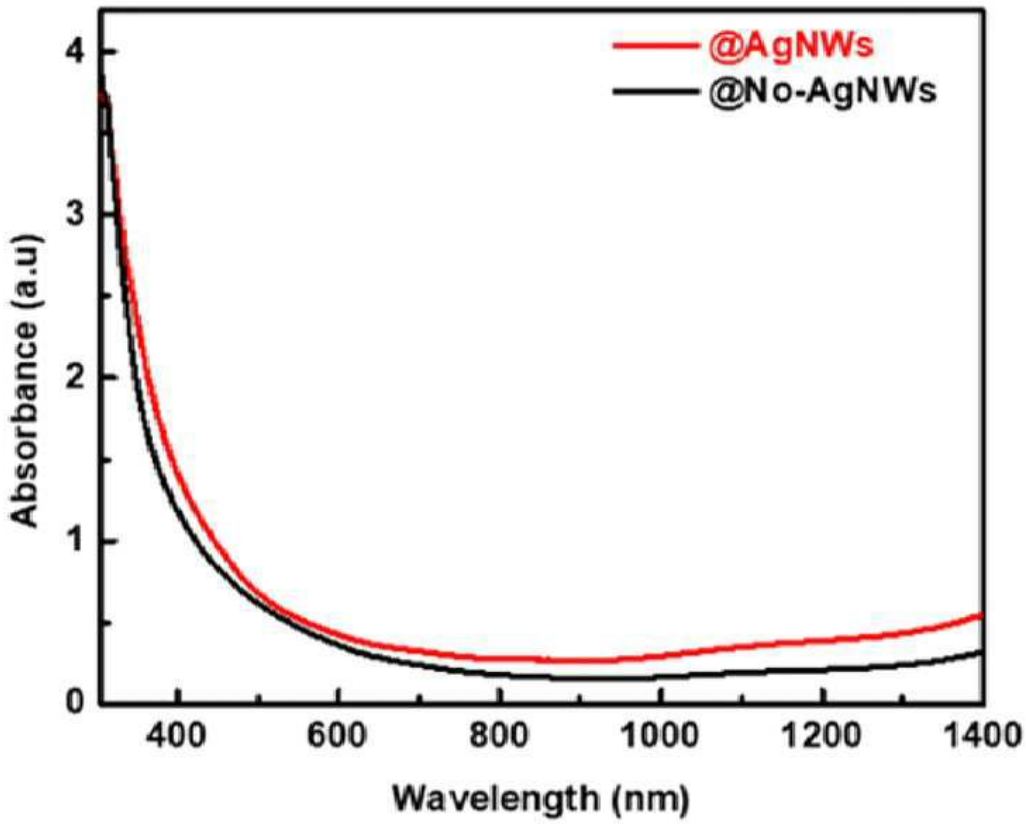
도면13


(a)
@AgNWs
1 μm
(b)
@AgNWs
200 nm

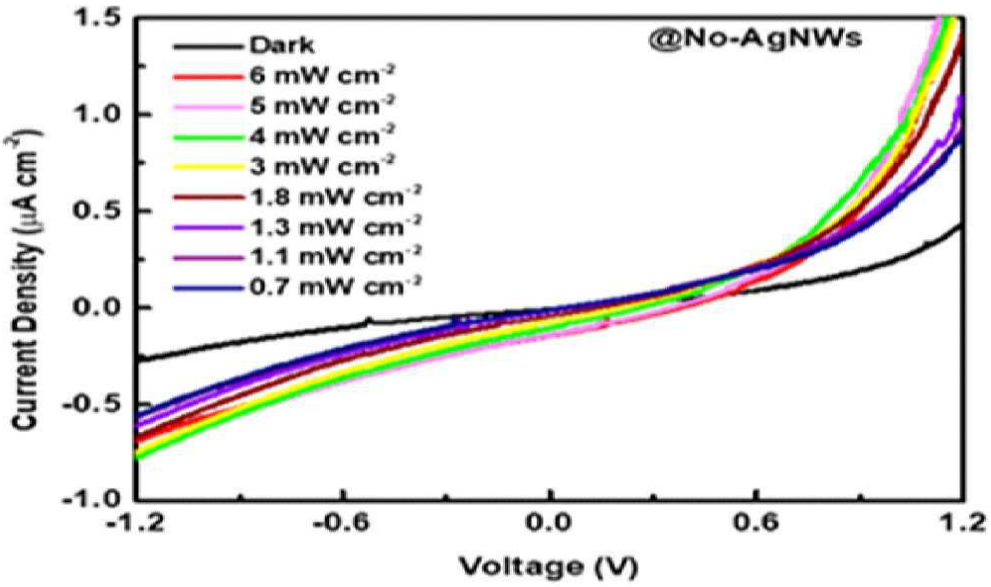
도면14


@AgNWs
@No-AgNWs
Transmittance (%)
Reflectance (%)
Wavelength (nm)
0
20
40
60
80
400
600
800
1000
1200
1400

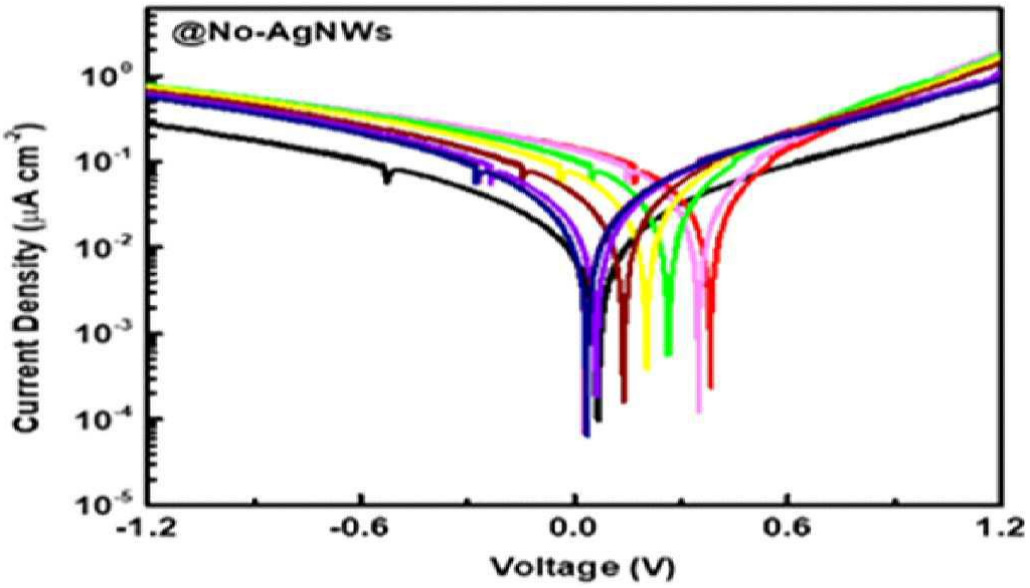
도면15


@AgNWs
@No-AgNWs
Absorbance (a.u)
Wavelength (nm)
0
1
2
3
4
400
600
800
1000
1200
1400

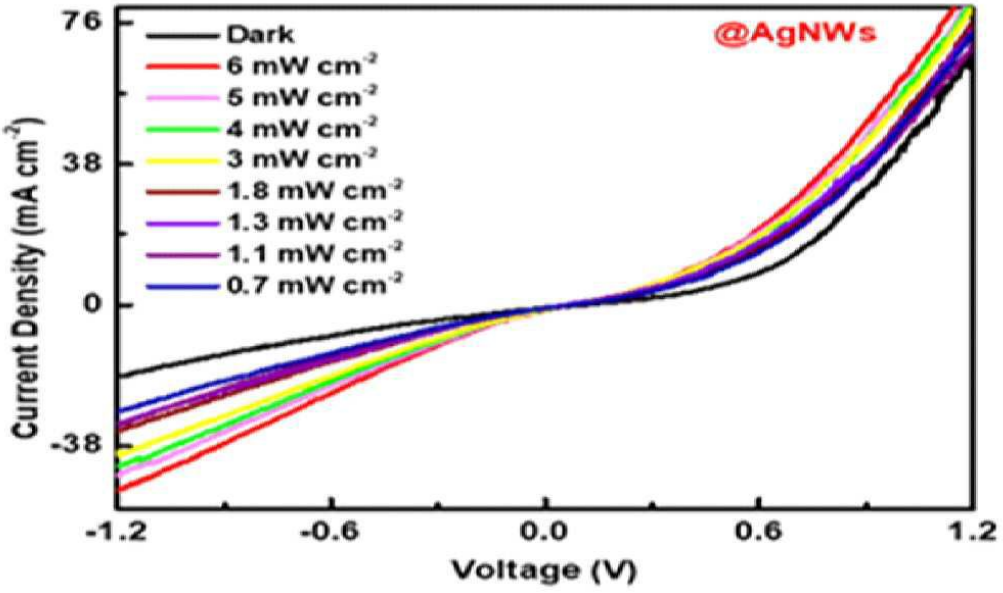
도면16


@No-AgNWs
Dark
6 mW cm-2
5 mW cm-2
4 mW cm-2
3 mW cm-2
1.8 mW cm-2
1.3 mW cm-2
1.1 mW cm-2
0.7 mW cm-2
Current Density (μA cm-2)
Voltage (V)
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.2
-0.6
0.0
0.6
1.2

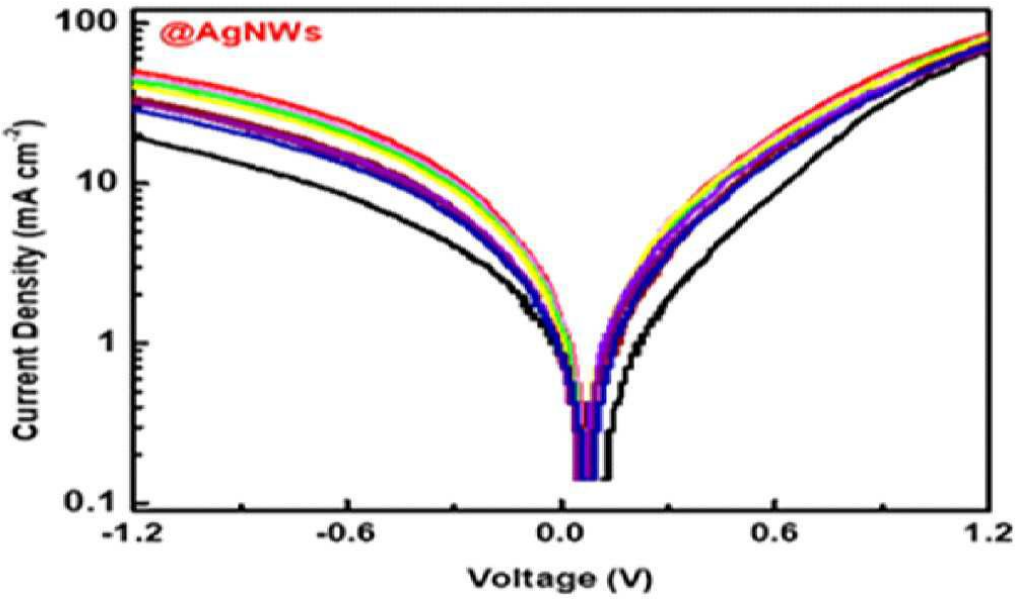
도면17


@No-AgNWs
Current Density (μA cm-2)
10^0
10^-1
10^-2
10^-3
10^-4
10^-5
-1.2
-0.6
0.0
0.6
1.2
Voltage (V)

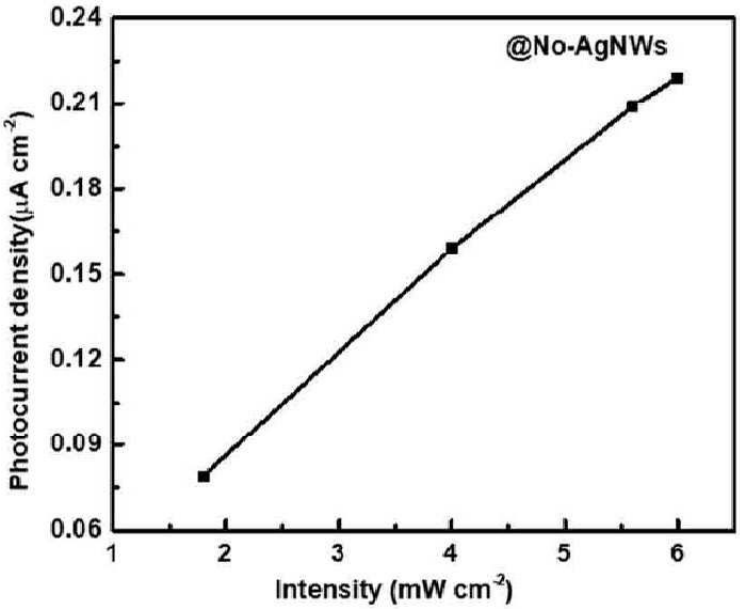
도면18


@AgNWs
Dark
6 mW cm-2
5 mW cm-2
4 mW cm-2
3 mW cm-2
1.8 mW cm-2
1.3 mW cm-2
1.1 mW cm-2
0.7 mW cm-2
Current Density (mA cm-2)
76
38
0
-38
-1.2
-0.6
0.0
0.6
1.2
Voltage (V)

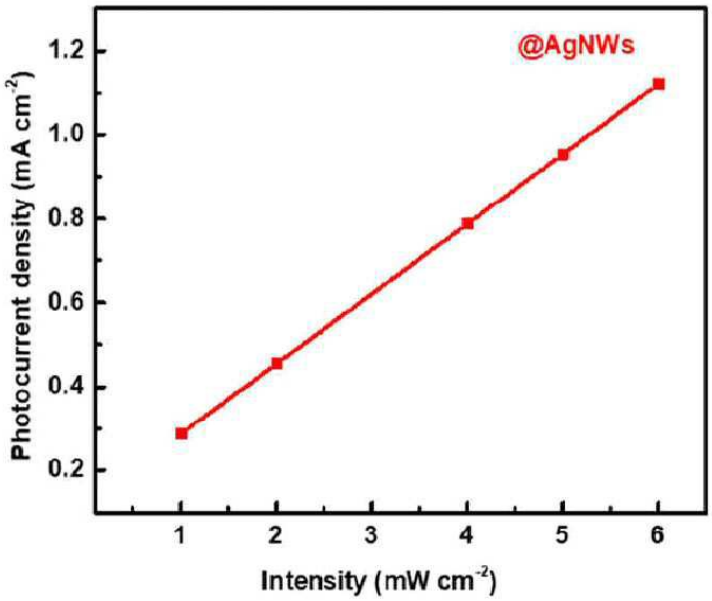
도면19


@AgNWs
100
10
1
0.1
Current Density (mA cm-2)
-1.2
-0.6
0.0
0.6
1.2
Voltage (V)

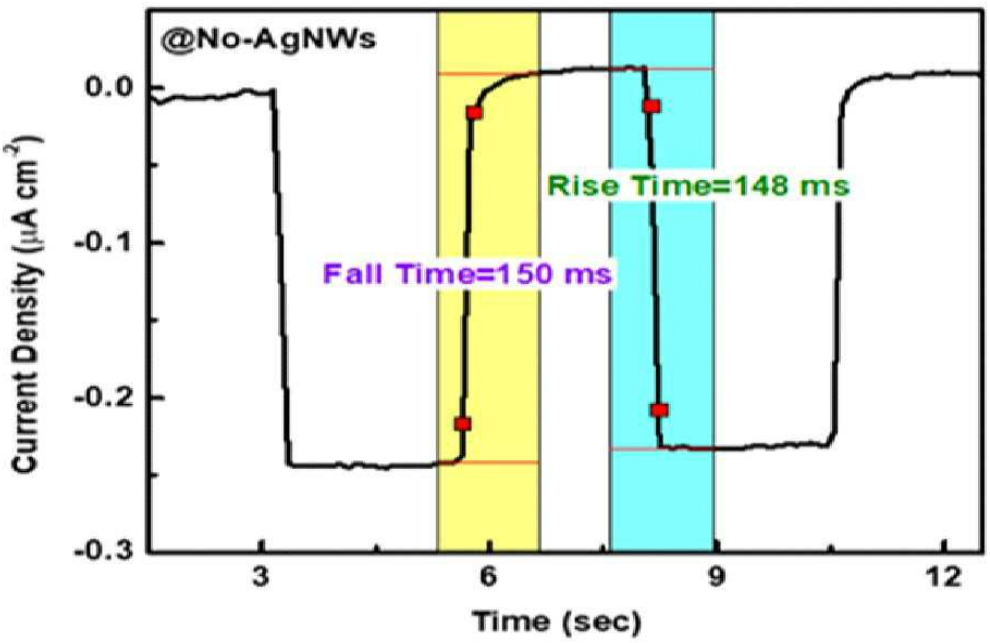
도면20


@No-AgNWs
0.24
0.21
0.18
0.15
0.12
0.09
0.06
Photocurrent density(μA cm-2)
1
2
3
4
5
6
Intensity (mW cm-2)

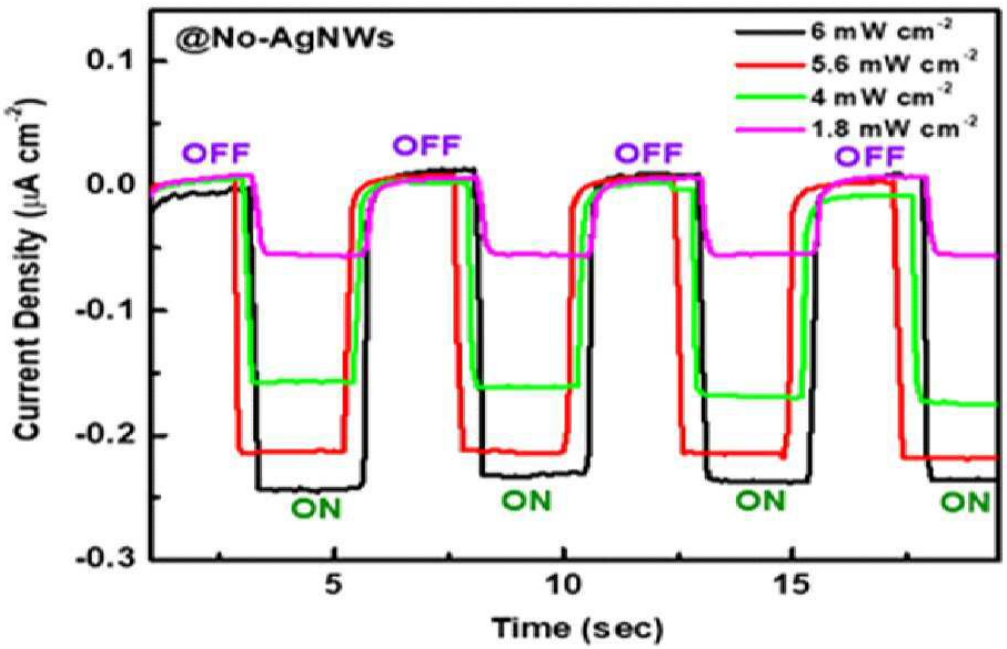
도면21


@AgNWs
Photocurrent density (mA cm-2)
Intensity (mW cm-2)
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
1
2
3
4
5
6

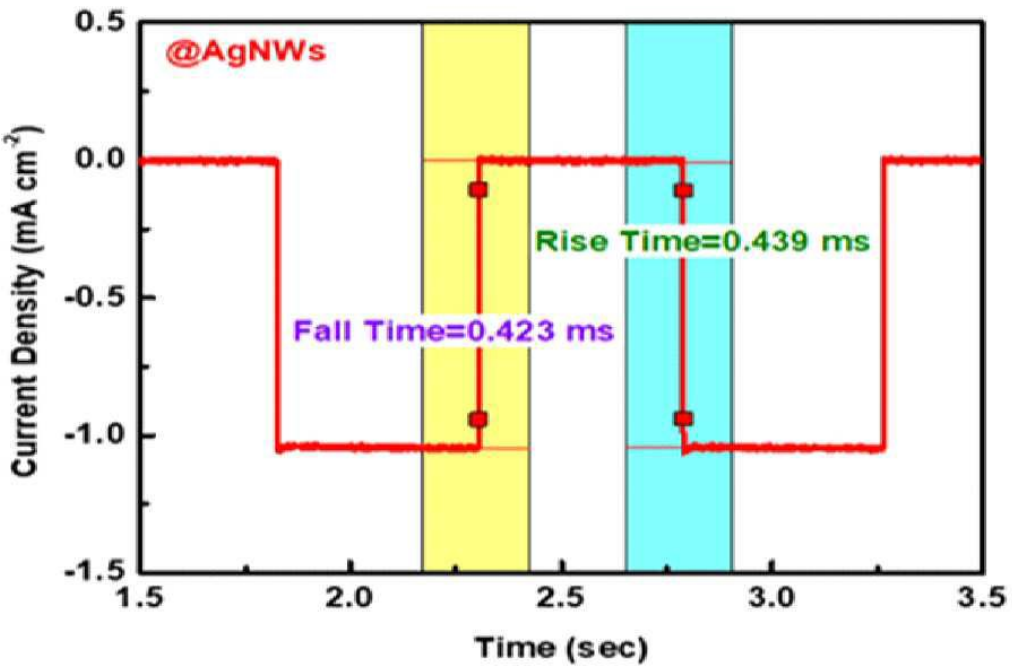
도면22


@No-AgNWs
Rise Time=148 ms
Fall Time=150 ms
Current Density (μA cm-2)
Time (sec)
0.0
-0.1
-0.2
-0.3
3
6
9
12

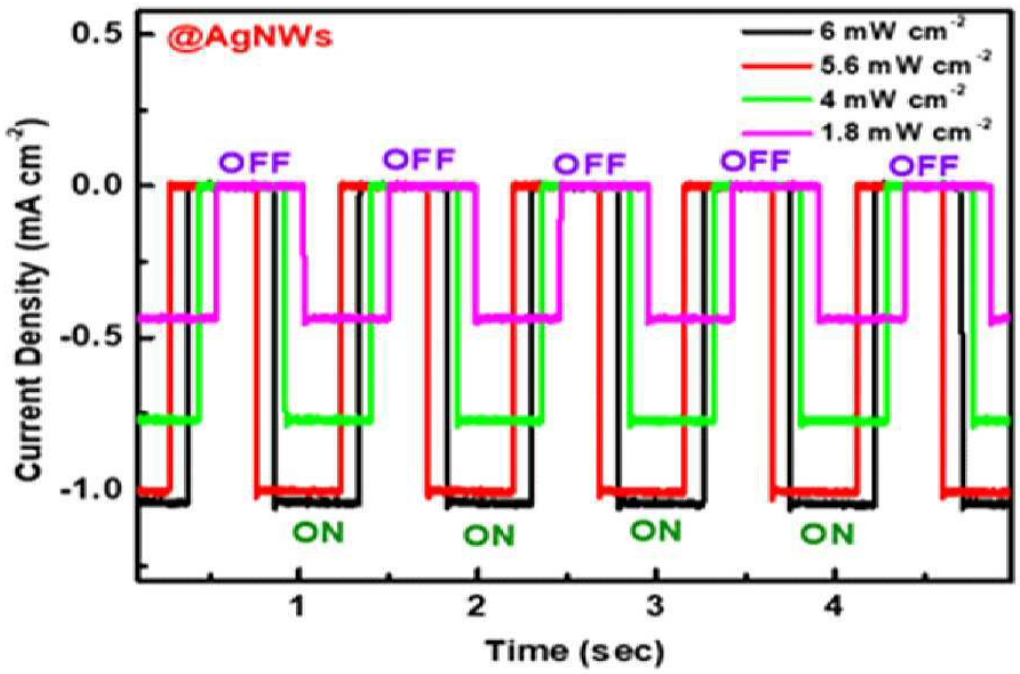
도면23


@No-AgNWs
6 mW cm-2
5.6 mW cm-2
4 mW cm-2
1.8 mW cm-2
OFF
OFF
OFF
OFF
ON
ON
ON
ON
Current Density (μA cm-2)
Time (sec)
0.1
0.0
-0.1
-0.2
-0.3
5
10
15

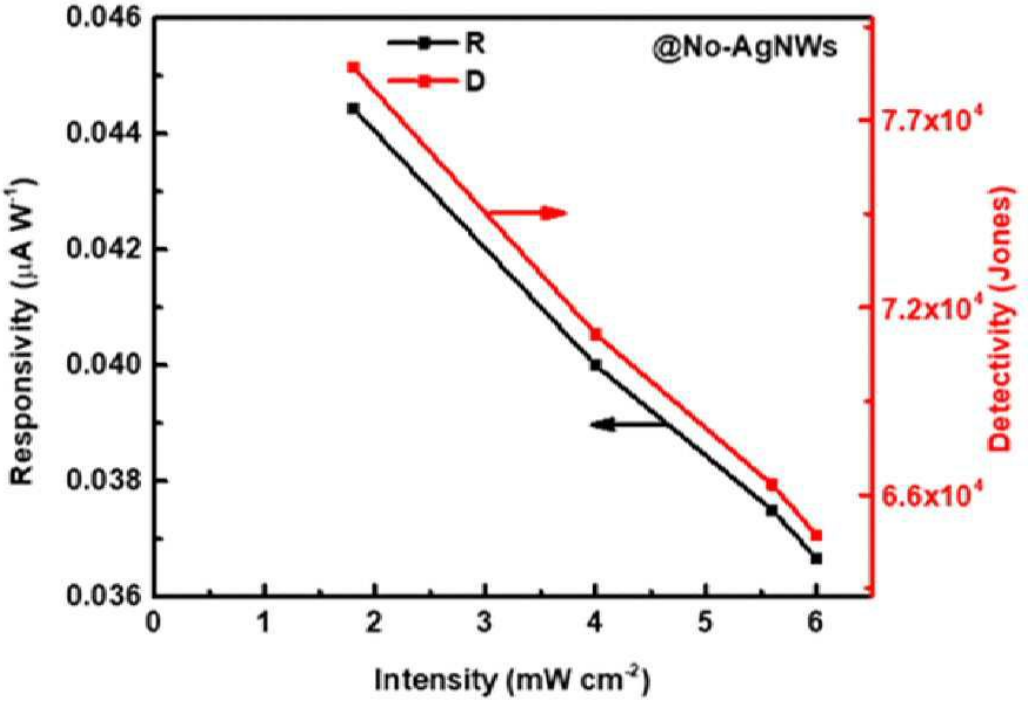
도면24


@AgNWs
Rise Time=0.439 ms
Fall Time=0.423 ms
Current Density (mA cm-2)
Time (sec)
0.5
0.0
-0.5
-1.0
-1.5
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5

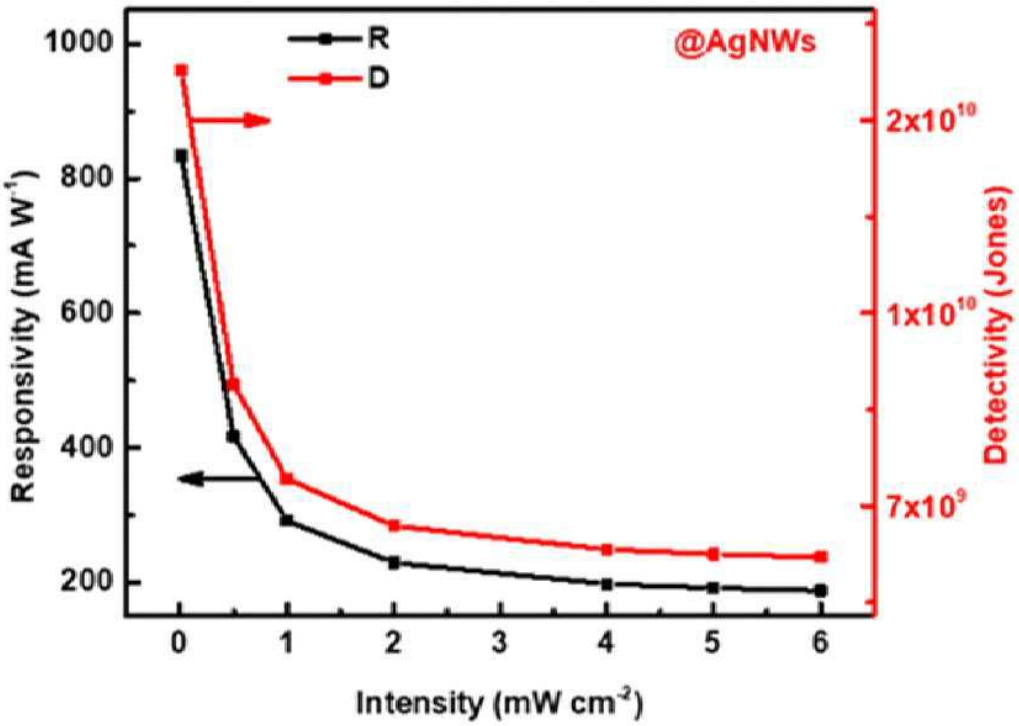
도면25


@AgNWs
6 mW cm-2
5.6 mW cm-2
4 mW cm-2
1.8 mW cm-2
OFF
ON
Current Density (mA cm-2)
Time (sec)

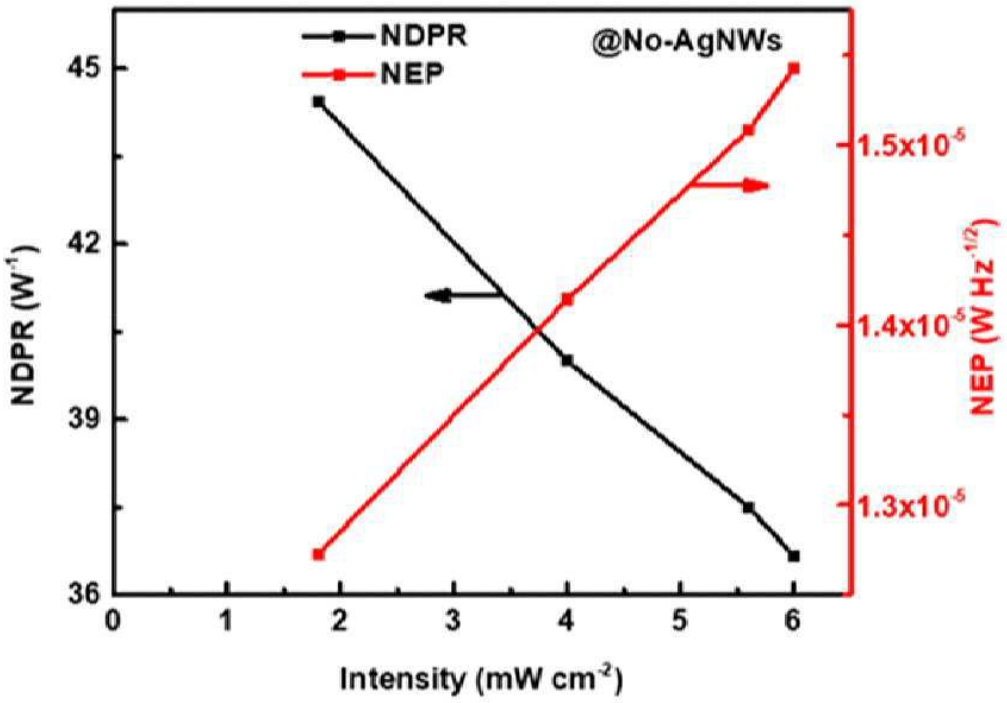
도면26


@No-AgNWs
R
D
Responsivity (μA W-1)
Detectivity (Jones)
7.7x10^4
7.2x10^4
6.6x10^4
Intensity (mW cm-2)

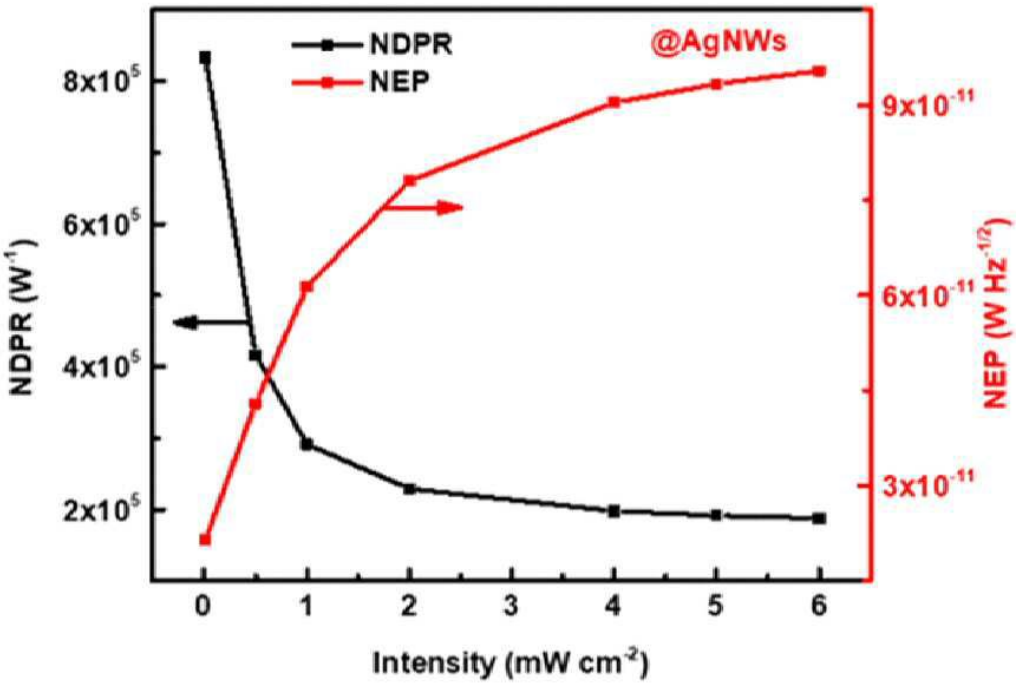
도면27


R
D
@AgNWs
1000
800
600
400
200
Responsivity (mA W-1)
2x10^10
1x10^10
7x10^9
Detectivity (Jones)
0
1
2
3
4
5
6
Intensity (mW cm-2)

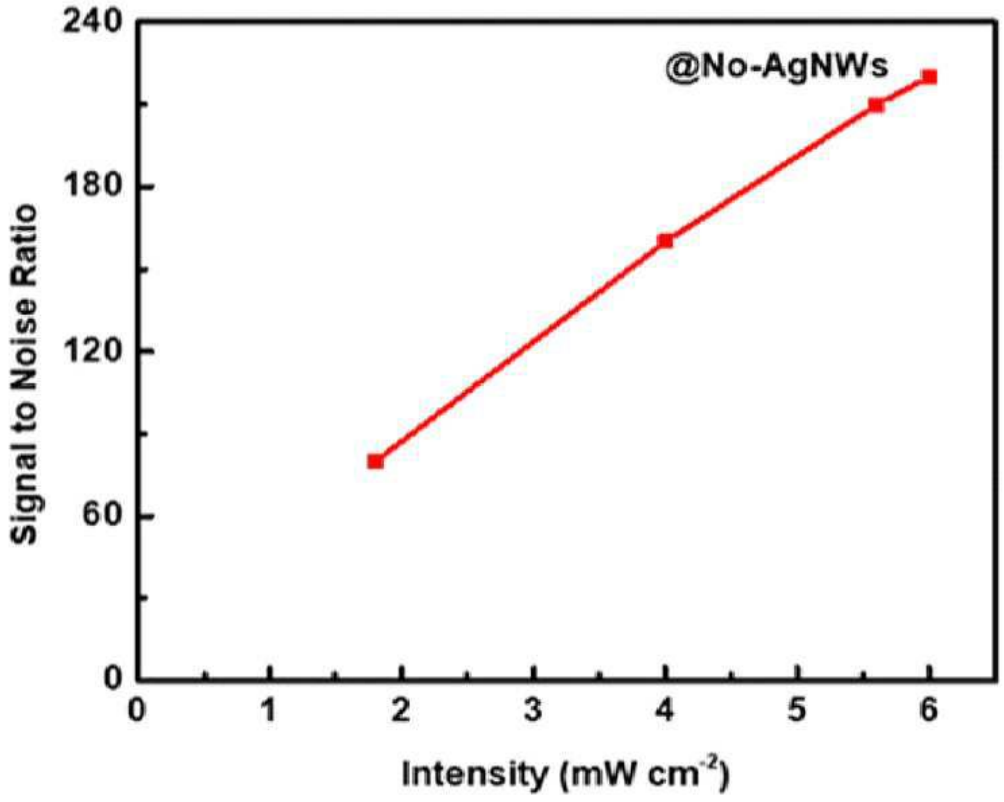
도면28


NDPR
NEP
@No-AgNWs
45
42
39
36
NDPR (W-1)
1.5x10-5
1.4x10-5
1.3x10-5
NEP (W Hz-1/2)
0
1
2
3
4
5
6
Intensity (mW cm-2)

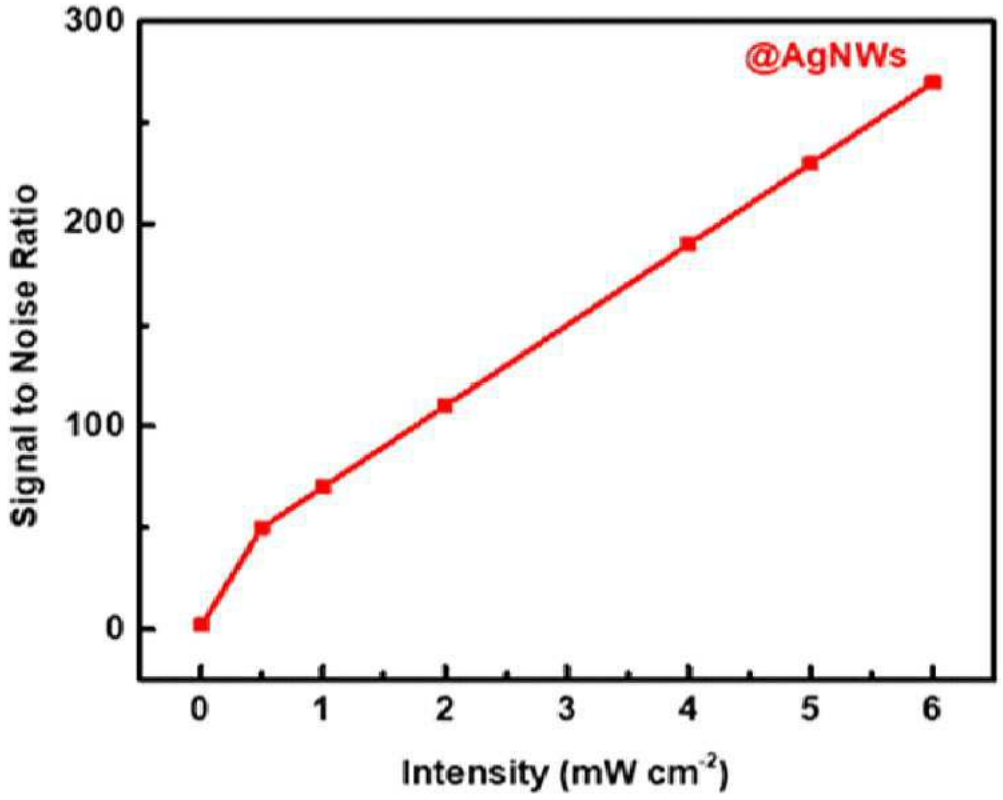
도면29


NDPR
NEP
@AgNWs
8x10^5
6x10^5
4x10^5
2x10^5
NDPR (W^-1)
9x10^-11
6x10^-11
3x10^-11
NEP (W Hz^-1/2)
0
1
2
3
4
5
6
Intensity (mW cm^-2)

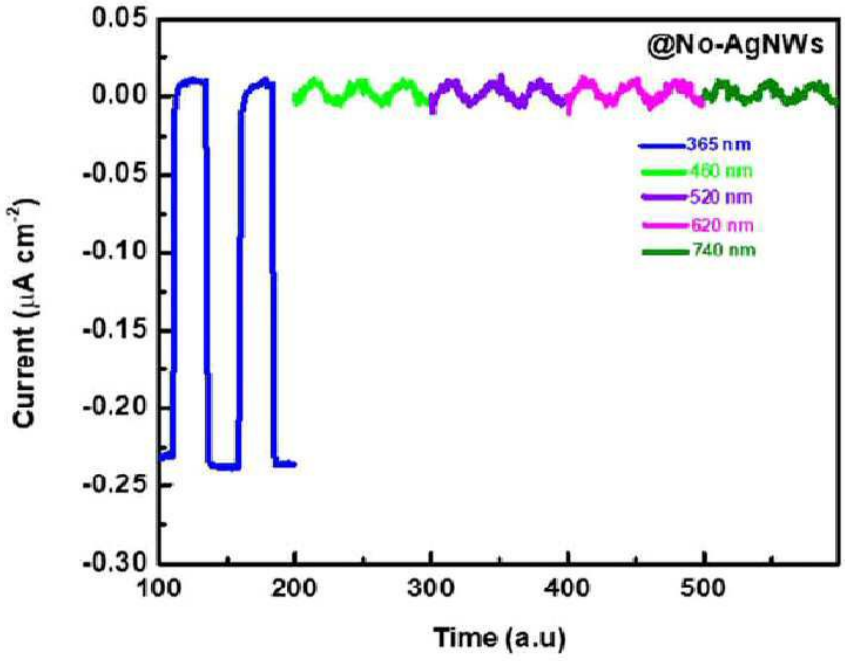
도면30


@No-AgNWs
240
180
120
60
0
Signal to Noise Ratio
0
1
2
3
4
5
6
Intensity (mW cm^-2)

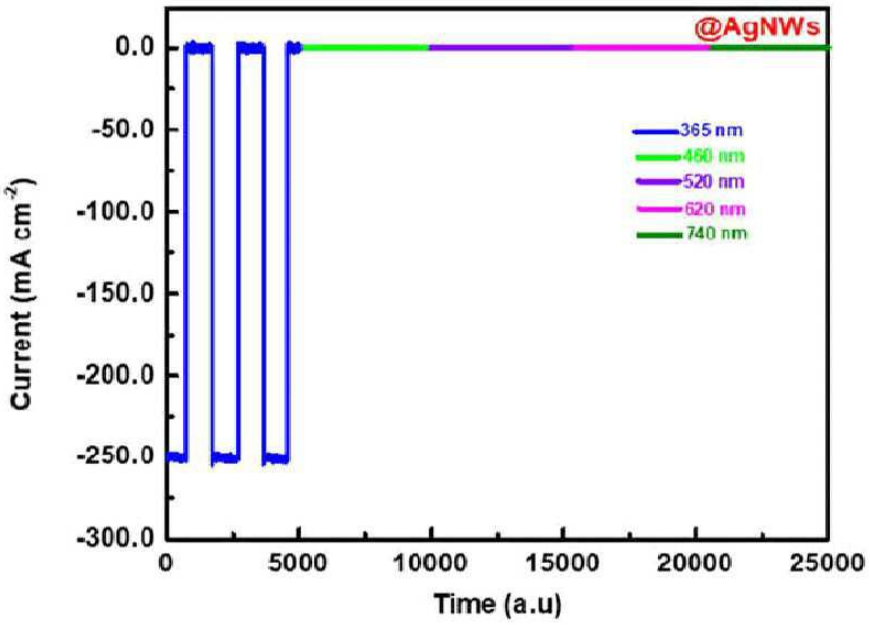
도면31


@AgNWs
Signal to Noise Ratio
300
200
100
0
0
1
2
3
4
5
6
Intensity (mW cm-2)

도면32


@No-AgNWs
365 nm
460 nm
520 nm
620 nm
740 nm
Current (μA cm-2)
0.05
0.00
-0.05
-0.10
-0.15
-0.20
-0.25
-0.30
100
200
300
400
500
Time (a.u)

도면33



도면34

S. N.	materials	power density (W/cm^2)	applied bias (V)	τ_r (ms)	τ_f (ms)	R^a (A/W)	wavelength (nm)
1	ZnO UNN[a]	86 μ	0.2 m	~25 0000	~15 0000	14 m	340 and 370
2	3DNH[a] NiO/ZnO	80 μ	1	5000	9000	13	370
4	NiO/ZnO/ITO	12.1 μ	0	~323	~12	0.19	370
5	NiO/ZnO/ITO	3 m	0	0.041	0.071	20 μ	365
6	Cu_4O_3/ZnO/ITO		0	33	89		365
7	Ni/NiO/ZnO/FTO	80 μ	−5	24.2	212	3.85	400
8	Cu/TiO_2/FTO	100 μ	−1	0.99	1.49	0.897	365
9	Ni/ZnO/AgNWs	1.06 μ	−3	0.987	2.59	14600	365
10	Cu_4O_3/TiO_2/FTO	6 m	0	148	150	0.37 n	365
11	AgNWs/Cu_4O_3/TiO_2/FTO	6 m	0	0.439	0.423	187 m	

[a]UNN = ultraporous nanoparticle network and 3DNH = three-dimensional nanohetrojunction.