



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년02월27일
(11) 등록번호 10-2504149
(24) 등록일자 2023년02월22일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 21/552 (2014.01) G01J 3/44 (2006.01)
G01N 21/65 (2006.01) H10K 30/00 (2023.01)
(52) CPC특허분류
G01N 21/554 (2013.01)
G01J 3/4412 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0046049
(22) 출원일자 2021년04월08일
심사청구일자 2021년04월08일
(65) 공개번호 10-2022-0139720
(43) 공개일자 2022년10월17일
(56) 선행기술조사문헌
KR1020100007723 A*
KR1020160040478 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
광운대학교 산학협력단
서울특별시 노원구 광운로 20, 광운대학교 내 (월계동)
(72) 발명자
이지훈
서울시 노원구 광운로 20, 광운대학교 화도관 635호
순다르쿰와르
(01897) 서울시 노원구 광운로 20, 광운대학교 화도관 635호
(74) 대리인
특허법인이지

전체 청구항 수 : 총 18 항

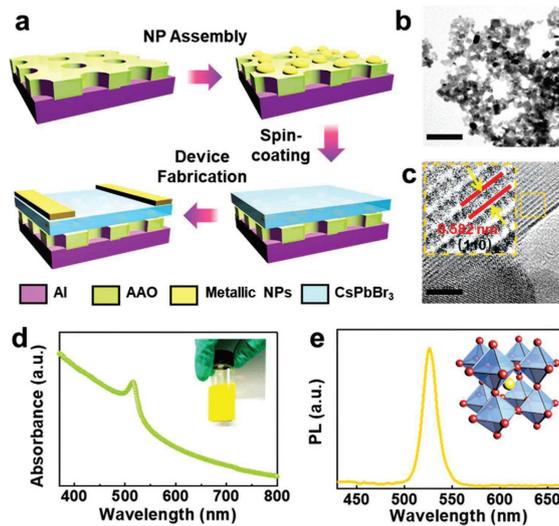
심사관 : 장일석

(54) 발명의 명칭 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기 및 이의 제조방법

(57) 요약

본 발명은 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기 및 이의 제조방법에 관한 것이다. 더욱 상세하게, 본 발명은 기공 크기를 제어함으로써, 향상된 공간 광 구속(spacial light confinement)에 의해 광 반응을 개선할 수 있는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01N 21/658 (2013.01)

H10K 30/10 (2023.02)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711095420
과제번호	2019R1A2C4069438
부처명	미래창조과학부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공분야기초연구사업
연구과제명	차세대 하이브리드 플라즈모닉 나노구조물 (HP-NA) 기반 포토디텍터 구현/최적화
기여율	1/2
과제수행기관명	광운대학교 산학협력단
연구기간	2019.06.01 ~ 2022.05.30

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345280740
과제번호	2018R1A6A1A03025242
부처명	미래창조과학부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	이공분야기초연구사업
연구과제명	메타표면 나노디바이스 중점연구소
기여율	1/2
과제수행기관명	광운대학교 산학협력단
연구기간	2018.06.01 ~ 2023.02.28

공지예외적용 : 있음

명세서

청구범위

청구항 1

베이스 기판;

상기 베이스 기판 상에 형성된 양극 알루미늄 산화물(AAO);

상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 상에 형성된 플라즈모닉 나노구조체; 및

상기 플라즈모닉 나노구조체 상에 형성된 페로브스카이트 양자점(QD) 박막;을 포함하고,

상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 및 상기 플라즈모닉 나노구조체는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 베이스 기판은 알루미늄 또는 유리로 구성되는 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 3

삭제

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)은 다공성인 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)의 기공의 크기는 120nm 내지 250nm인 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 플라즈모닉 나노구조체는 Ag, Cu, 및 Al 중 1종 이상으로 이루어진 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 플라즈모닉 나노구조체는 나노입자, 나노로드, 나노와이어, 및 나노튜브 중 1종 이상인 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 8

제1항에 있어서,
 상기 플라즈모닉 나노구조체는 자가 조립된 것을 특징으로 하는,
 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 9

제1항에 있어서,
 상기 페로브스카이트 양자점(QD) 박막은 CsPbBr₃로 구성되는 것을 특징으로 하는,
 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 10

제1항에 있어서,
 상기 페로브스카이트 양자점(QD) 박막은 5nm 내지 15nm의 크기로 균일하게 분포되어 있는 것을 특징으로 하는,
 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 11

제1항에 있어서,
 상기 페로브스카이트 양자점(QD)의 입방정상의 간격은 0.3nm 내지 0.7nm인 것을 특징으로 하는,
 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 12

제1항에 있어서,
 상기 페로브스카이트 양자점(QD)은 500nm 내지 530nm에서 광학적 흡수 에지를 갖는 것을 특징으로 하는,
 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 13

제1항에 있어서,
 상기 광검출기의 반사율이 2 내지 8%인 것을 특징으로 하는,
 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 14

제1항에 있어서,
 상기 광검출기는 작동전압 1V 및 파장 범위 470nm 내지 510nm에서 응답성 3.50mA/w 내지 5.00mA/w인 것을 특징으로 하는,
 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 15

제1항에 있어서,
 투명전극인 제1전극; 및
 상대전극인 제2전극을 더 포함하는,
 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기.

청구항 16

베이스 기판을 준비하는 단계;

상기 베이스 기판 상에 다공성 양극 알루미늄 산화물(AAO)을 형성하는 단계;

상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 상에 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 단계; 및

상기 플라즈모닉 나노구조체 상에 페로브스카이트 양자점(QD) 박막을 형성하는 단계;를 포함하고,

상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 및 상기 플라즈모닉 나노구조체는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)을 형성하는 단계는 120nm 내지 250nm 크기의 기공을 형성하는 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법.

청구항 18

삭제

청구항 19

제16항에 있어서,

상기 플라즈모닉 나노구조체는 Ag, Cu, 및 Al 중 1종 이상으로 이루어진 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법.

청구항 20

제16항에 있어서,

상기 페로브스카이트 양자점(QD) 박막을 형성하는 단계는 스핀코팅 단계를 포함하고,

상기 스핀코팅은 30초 내지 80초 동안 700 내지 850r·min⁻¹의 회전 속도로 스핀코팅하는 것을 특징으로 하는,

하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기 및 이의 제조방법에 관한 것이다. 더욱 상세하게, 본 발명은 기공 크기를 제어함으로써, 향상된 공간 광 구속(spacial light confinement)에 의해 광 반응을 개선할 수 있는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 광검출기는 광 통신, 현대 이미징, 및 보안 모니터링을 포함한 다양한 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. 기존 반도체(즉, Si, InGaAs, 및 GaN)와는 달리, 할로겐화물 페로브스카이트(예: MAPbX₃)는 긴 캐리어 확산 길이 ($\approx 170 \mu\text{m}$), 높은 광 흡수 계수 ($\approx 2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$) 및 큰 전하 캐리어 이동도 ($\approx 1000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)와 같은 독특한 광전자 특성을 나타내는데, 빠르고 민감한 광검출기를 구성하는 데 매우 바람직하다. 그럼에도 불구하고 MAPbX₃는 일반적으로 열 및 습기 안정성이 좋지 않아, 이들의 안정성을 보장하기 위해, 화학적 기상 증착법을 통해 진

공 상태에서 MAPbX_3 박막을 제작한다.

- [0004] MA그룹을 Cs 원자로 대체함으로써 골드슈미트(Goldschmidt)의 낮은 내성 계수로 인해, 대기에서 제조된 CsPbBr_3 양자점(QD)은 안정성이 향상되었는데, 예를 들어, 습한 공기(90%~95% RH)에 노출되어도 몇 주 동안 눈에 띄는 저하는 볼 수 없었다. 모든 무기 CsPbBr_3 콜로이드 양자점(QD)은 대규모 제조에도 사용할 수 있어 안정적이고 고성능의 광검출기의 잠재적 산업화를 촉진한다. 그러나, CsPbBr_3 양자점(QD) 박막은 트랩 상태의 고밀도 및 비효율적인 캐리어 전송과 같은 아직 실제 응용까지 해결해야 할 많은 과제들을 안고 있다.
- [0005] 현재, 결합 패시베이션 및 고 이동성 재료 내장을 포함하여 CsPbBr_3 양자점(QD) 광검출기의 성능을 개선하기 위해 몇 가지 접근 방식이 도입되었다. 그럼에도 불구하고 심각한 응집, 추가 광 소비 및 소음 증가와 같은 추가 문제가 발생했다.
- [0007] 본 발명의 배경기술로는 대한민국 공개특허 제10-2015-0011002호(2015.01.29.)에 혼합 음이온을 갖는 유기금속 페로브스카이트를 갖는 광전자 장치에 대한 기재가 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0009] 본 발명의 목적은 기공 크기를 제어함으로써, 공간 광 구속(Confinement)을 통해 향상된 광 반응을 나타내는 고성능 무기 하이브리드 페로브스카이트-기반 광검출기를 제공하는 것이다.
- [0010] 본 발명의 다른 목적은 기공 크기를 제어함으로써, 공간 광 구속(Confinement)을 통해 향상된 광 반응을 나타내는 고성능 무기 하이브리드 페로브스카이트-기반 광검출기를 효율적으로 제조할 수 있는 제조방법을 제공하는 것이다.
- [0011] 본 발명의 다른 목적 및 이점은 하기의 발명의 상세한 설명, 청구범위 및 도면에 의해 더욱 명확하게 된다.

과제의 해결 수단

- [0013] 일 측면에 따르면, 베이스 기판; 상기 베이스 기판 상에 형성된 양극 알루미늄 산화물(AAO); 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 상에 형성된 플라즈모닉 나노구조체; 및 상기 플라즈모닉 나노구조체 상에 형성된 페로브스카이트 양자점(QD) 박막;을 포함하는, 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기가 제공된다.
- [0014] 일 실시예에 따르면, 상기 베이스 기판은 알루미늄 또는 유리로 구성되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0015] 일 실시예에 따르면, 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 및 상기 플라즈모닉 나노구조체는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0016] 일 실시예에 따르면, 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)은 다공성인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0017] 일 실시예에 따르면, 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)의 기공의 크기는 120nm 내지 250nm인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0018] 일 실시예에 따르면, 상기 플라즈모닉 나노구조체는 Ag, Cu, 및 Al 중 1종 이상으로 이루어진 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0019] 일 실시예에 따르면, 상기 플라즈모닉 나노구조체는 나노입자, 나노로드, 나노와이어, 및 나노튜브 중 1종 이상인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0020] 일 실시예에 따르면, 상기 플라즈모닉 나노구조체는 자가 조립된 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0021] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 양자점(QD) 박막은 CsPbBr_3 로 구성되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0022] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 양자점(QD) 박막은 5nm 내지 15nm의 크기로 균일하게 분포되어 있는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0023] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 양자점(QD)의 입방정상의 간격은 0.3nm 내지 0.7nm인 것을 특징으로

할 수 있다.

- [0024] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 양자점(QD)은 500nm 내지 530nm에서 광학적 흡수 에지를 갖는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0025] 일 실시예에 따르면, 상기 광검출기의 반사율이 2 내지 8%인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0026] 일 실시예에 따르면, 상기 광검출기는 작동전압 1V 및 과장 범위 470nm 내지 510nm에서 응답성 3.50mA/w 내지 5.00mA/w인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0027] 일 실시예에 따르면, 상기 광검출기는 투명전극인 제1전극; 및 상대전극인 제2전극을 더 포함할 수 있다.
- [0029] 다른 측면에 따르면, 베이스 기판을 준비하는 단계; 상기 베이스 기판 상에 다공성 양극 알루미늄 산화물(AAO)을 형성하는 단계; 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 상에 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 단계; 및 상기 플라즈모닉 나노구조체 상에 페로브스카이트 양자점(QD) 박막을 형성하는 단계;를 포함하는, 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법이 제공된다.
- [0030] 일 실시예에 따르면, 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)을 형성하는 단계는 120nm 내지 250nm 크기의 기공을 형성하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0031] 일 실시예에 따르면, 본원의 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법은 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 및 상기 플라즈모닉 나노구조체는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0032] 일 실시예에 따르면, 본원의 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법에서 상기 플라즈모닉 나노구조체는 Ag, Cu, 및 Al 중 1종 이상으로 이루어진 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0033] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 박막을 형성하는 단계는 스핀코팅 단계를 포함하고, 상기 스핀코팅은 30초 내지 80초 동안 700 내지 850r · min⁻¹의 회전 속도로 스핀코팅하는 것을 특징으로 할 수 있다.

발명의 효과

- [0035] 일 실시예에 의하면, 기공 크기를 제어함으로써, 공간 광 구속(Confinement)을 통해 향상된 광 반응을 나타내는 고성능 무기 하이브리드 페로브스카이트-기반 광검출기를 제공할 수 있다.
- [0036] 일 실시예에 의하면, 기공 크기를 제어함으로써, 공간 광 구속(Confinement)을 통해 향상된 광 반응을 나타내는 고성능 무기 하이브리드 페로브스카이트-기반 광검출기의 제조방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0038] 도 1의 (a)는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 개략적인 제작 방법을 나타내고, (b)는 CsPbBr₃ 양자점(QDs)의 투과 전자 현미경(TEM) 이미지이고, (c)는 CsPbBr₃ 양자점(QDs)의 고해상도 투과 전자 현미경(HRTEM) 이미지이고, (d)는 CsPbBr₃ 양자점(QD) 용액의 흡광도 스펙트럼, (e)는 CsPbBr₃ QD 용액의 상온 PL 방출 스펙트럼 및 결정 구조를 나타낸다.

도 2의 (a)는 170nm의 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 주사 전자 현미경(SEM) 이미지이고, (b)는 더 작은 스케일에서의 SEM 이미지를 나타내고, c)는 금속 나노입자가 없는, d)는 금속 나노입자가 있는 AAO 매트릭스 내에서 빛-물질(light-matter) 상호작용의 개략도이다.

도 3의 (a)는 120nm의 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 주사 전자 현미경(SEM) 이미지이고, (b)는 220nm의 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 주사 전자 현미경(SEM) 이미지이고, (c)는 220nm의 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 CsPbBr₃ 양자점(QD) 층의 에너지 분산 X-선 분광계(EDS) 맵이고, (d)는 각각 Ag 나노입자가 있고 없을 때의 AAO 매트릭스의 반사 스펙트럼이고, (e)는 각각 Ag 나노입자가 있고 없을 때의 AAO 매트릭스의 평균 반사도이고, (f)는 X-선 분산(XRD)이고, (g)는 CsPbBr₃ 양자점(QD) 샘플의 반사 스펙트럼이다.

도 4는 동일한 두께를 갖는 CsPbBr₃ 양자점(QD) 스핀 코팅 후, 다양한 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 SEM 이미지를 나타낸 것으로, 도 4의 (a)는 기본(bare) AAO 매트릭스, (b)는 120nm의 기

공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 나타내고, (c)는 170nm의 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 나타내고, (d)는 220nm의 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 나타내고, (a-1) 내지 (d-1)은 해당되는 국부적인 형태의 SEM 이미지를 나타낸다.

도 5의 (a)는 암 조건에서(I_{off}) 광검출기의 I-V 곡선에 대한 것으로, Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 CsPbBr₃ 양자점(QD)의 광반응을 나타내고, (b)는 490nm 광 조사(I_{on}) 하에서의 광반응을 나타내고, (c)는 단색광(490nm, $13.4mWcm^{-2}$) 하에서 1V의 바이어스(bias)에서 다양한 기공 크기를 갖는 유리 및 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 상에 제작된 광검출기의 시간-분해 광반응을 나타내고, (d)는 각 장치의 이온(원형) 및 LDR(입방체)를 나타내고, (e)는 광검출기의 반응도를 나타내고, (f)는 기공 크기의 함수로서 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 전자기장 분포를 나타낸다.

도 6의 (a)는 유리 상, (b)는 170nm의 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 상에, CsPbBr₃ 양자점(QD)층의 광도에 따른 광반응을 나타내고, 1번의 광 on-off 기간 내에 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반의 광검출기의 시간 분해 광반응을 나타내고, (c) 및 (d)는 각각 기공 크기가 120nm 및 170nm인 광검출기의 광반응을 나타낸다.

도 7의 (a)는 광감도의 함수로서 다양한 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체에 제작된 CsPbBr₃ 양자점(QD) 광검출기의 광반응을 나타내고, (b)는 전력 강도를 변화시키면서 490nm 광 조사 하에서 CsPbBr₃ 양자점(QD) 광검출기의 전류를 나타내고, (c)는 광반응(R_s)을 나타내고, (d)는 상온 PL 방출 스펙트럼을 나타내고, (e)는 유리에서의 광검출기의 반응 시간을 나타내고, (f) 1V의 바이어스에서 365nm 광 조사 하에서 220nm의 기공 크기를 갖는 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 나타낸다.

도 8의 (a)는 기본 AAO 매트릭스의 SEM 이미지를 나타내고, (b)는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 SEM 이미지를 나타내고, (c)는 Cu/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 SEM 이미지를 나타내고, (d)는 다양한 금속 나노구조체를 갖는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 반사 스펙트럼 및 샘플의 광학 이미지를 나타내고, (e)는 각 샘플에 대한 반사도의 평균을 나타낸다.

도 9의 (a)는 기본 AAO 매트릭스 상에 스핀 코팅된 CsPbBr₃ 양자점(QD) 층의 SEM 이미지를 나타내고, (b)는 Al 나노입자로 증착된 AAO 매트릭스의 SEM 이미지를 나타내며, (c)는 Cu 나노입자를 갖는 AAO 매트릭스의 SEM 이미지를 나타내고, (d)는 XRD를 나타내고, (e)는 금속 나노입자가 증착된 AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 상의 CsPbBr₃ 양자점(QD) 광검출기의 반사 스펙트럼을 나타내고, (f)는 상온 PL 스펙트럼을 나타내고, (g)는 광 조사 하에서 전자 전이 및 에너지-밴드 다이어그램을 나타내고, (h)는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 상에 CsPbBr₃ 양자점(QD) 층의 전자기장 분포의 평면도를 나타낸다.

도 10의 (a)는 기본 유리 및 다양한 금속 나노입자를 갖는 유리 상에 CsPbBr₃ 양자점(QD) 박막의 흡광 스펙트럼을 나타내고, (b)는 샘플의 상온 광조사 방사 스펙트럼을 나타내고, (c)는 암조건에서의 광검출기의 I-V 곡선을 나타내며, (d)는 490nm 광조사 하에서 광검출기의 I-V 곡선을 나타낸다.

도 11의 (a)는 490nm 광일루미네센스($13.4mWcm^{-2}$) 하에서 I_{off} 및 I_{on} 을 나타내고, (c)는 단색광(490nm, $13.4mWcm^{-2}$) 하에서 1V의 적용된 바이어스에서 다양한 금속 나노입자를 갖는 광검출기의 시간-분해 광반응을 나타내고, (d)는 AAO 매트릭스 및 유리에서의 금속 나노입자에 대한 $I_{on}(\bigcirc)$ 및 $I_{off}(\times)$ 을 나타내고, (e)는 각각 장치의 광반응성을 나타내고, (f)는 1회 on-off 기간 내에서 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 반응 시간을 나타낸다.

도 12의 (a)는 기본 AAO의 시간 분해 광반응을 나타내고, (b)는 1회 광 on-off 기간 내에 Cu/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 시간 분해 광반응을 나타내고, (c)는 기본 AAO의 광반응을 나타내고, (d)는 490nm 광 조사 하에서 바이어스 전압의 함수로서 Cu/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 광반응을 나타낸다.

도 13의 (a)는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 강도에 따른 광반응을 나타내고, (b)는 광전류를 나타내고, (c)는 광도의 함수로서 1V의 바이어스에서 490nm 광 조사 하에서 금속 나노입자/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 광반응성을 나타내고, (d)는 다양한 광 조사 하에서 120 및

220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 광반응 스펙트럼을 나타낸다.

도 14의 (a)는 365 (17.5mW/cm²)의 광 조사 하에서 1V의 바이어스에서 120nm 및 220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 시간 분해 광반응을 나타내고, (b)는 395 (16.7 mW/cm²)의 광 조사 하에서 1V의 바이어스에서 120nm 및 220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 시간 분해 광반응을 나타내고, (c)는 430 (49.3 mW/cm²)의 광 조사 하에서 1V의 바이어스에서 120nm 및 220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 시간 분해 광반응을 나타내고, (d)는 530 nm (10 mW/cm²)의 광 조사 하에서 1V의 바이어스에서 120nm 및 220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 시간 분해 광반응을 나타낸다.

도 15의 시간 분해 광반응에 기초하여 (a)는 1V의 바이어스에서 바로 제작된 220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 안정성을 나타내며, (b)는 1V의 바이어스에서 10일 동안 RH>88%에서 보관된 220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 안정성을 나타내며, (c)는 1V의 바이어스에서 1시간 동안 50℃에서 어닐링된 220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 안정성을 나타내며, (d)는 상이한 기간 동안 490 nm, 14 mW/cm²의 광 조사에서의 220nm의 기공 크기를 갖는 Al/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 안정성을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0039] 본 출원에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다.
- [0040] 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.
- [0041] 본 출원에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다. 또한, 명세서 전체에서, "상에"라 함은 대상 부분의 위 또는 아래에 위치함을 의미하는 것이며, 반드시 중력 방향을 기준으로 상 측에 위치하는 것을 의미하는 것이 아니다.
- [0042] 본 발명은 다양한 변환을 가할 수 있고 여러 가지 실시 예들을 가질 수 있는 바, 특정 실시 예들을 도면에 예시하고 상세한 설명에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명을 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변환, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다. 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명은 생략한다.
- [0043] 제1, 제2 등의 용어는 본 발명에서 다양한 구성요소들을 구별하기 위하여 사용되는 것으로서, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 숫자상으로 한정되지 않는다.
- [0045] 이하, 본 발명의 실시예를 첨부도면을 참조하여 상세히 설명하기로 하며, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 동일하거나 대응하는 구성 요소는 동일한 도면번호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.
- [0047] 도 1을 참조하면, 일 측면에 따르면, 베이스 기판; 상기 베이스 기판 상에 형성된 양극 알루미늄 산화물(AAO); 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 상에 형성된 플라즈모닉 나노구조체; 및 상기 플라즈모닉 나노구조체 상에 형성된 페로브스카이트 양자점(QD) 박막;을 포함하는, 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기가 제공된다.
- [0049] 일 실시예에 따르면, 상기 베이스 기판은 알루미늄 또는 유리로 구성되는 것이나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0051] 일 실시예에 따르면, 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 및 상기 플라즈모닉 나노구조체는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 것을 특징으로 할 수 있다.

- [0052] 향상된 공간 광 구속(spacial light confinement)에 의해 광 반응을 개선할 수 있는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기 및 이의 제조방법에 대해 알려진 바가 없다.
- [0054] 일 실시예에 따르면, 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)은 다공성인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0056] 일 실시예에 따르면, 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)의 기공의 크기는 120nm 내지 250nm인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0057] 본원은 기공의 크기를 제어하여 향상된 공간 광 구속(spacial light confinement)에 의해 광검출기의 광 반응을 개선할 수 있다.
- [0058] 상기 양극 알루미늄 산화물의 기공의 크기는 120nm 내지 250nm 인 것이 공간 광 구속 향상에 적합할 수 있고, 150nm 내지 250nm가 더 적합할 수 있고, 170nm 내지 250nm가 더 적합할 수 있고, 170nm 내지 220nm가 더욱더 적합할 수 있다. 이에 한정되는 것은 아니나, 상기 기공의 크기가 120nm 미만인 경우 반사율이 커져 공간 광 구속(Confinement)을 통한 광 반응 향상 효과가 저해될 수 있고, 250nm 초과인 경우 양극 알루미늄 산화물(AAO) 및 플라즈몬 나노구조체 사이의 상호작용이 약해질 수 있다.
- [0060] 상기 플라즈모닉 나노구조체는 플라즈모닉 재료이면 특별한 제한이 없고, 공지의 금속 및 이의 산화물로 구성될 수 있다. 이에 한정되는 것은 아니나, Ag, Cu, 및 Al 중 1종 이상으로 구성되는 것이 적합할 수 있고, Al이 더 적합할 수 있다.
- [0062] 상기 플라즈모닉 나노구조체는 나노입자, 나노로드, 나노와이어, 및 나노튜브 중 1종 이상인 것을 특징으로 할 수 있고, 이에 한정되는 것은 아니나, 나노입자가 적합할 수 있다.
- [0064] 일 실시예에 따르면, 상기 플라즈모닉 나노구조체는 자가 조립된 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0066] 상기 페로브스카이트 양자점(QD) 박막은 무기 페로브스카이트 양자점일 수 있고, 이에 한정되는 것은 아니나 CsPbBr₃ 또는 CsPbI₃일 수 있고, CsPbBr₃이 보다 적합할 수 있다.
- [0068] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 양자점(QD) 박막은 5nm 내지 15nm의 크기로 균일하게 분포되어 있는 것을 특징으로 할 수 있다. 이에 한정되는 것은 아니나, 상기 크기가 5nm 미만 또는 15nm 초과인 경우, 페로브스카이트 양자점(QD) 박막의 광반응성이 저하될 수 있다.
- [0070] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 양자점(QD)의 입방정상의 간격은 0.3nm 내지 0.7nm인 것을 특징으로 할 수 있다. 이에 한정되는 것은 아니나, 상기 입방정상의 간격이 0.3nm 미만 또는 0.7nm 초과인 경우, 페로브스카이트 양자점(QD) 박막의 광응답성이 저하될 수 있다.
- [0072] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 양자점(QD)은 500nm 내지 530nm에서 광학적 흡수 에지를 갖는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0074] 일 실시예에 따르면, 상기 광검출기의 반사율이 2 내지 8%일 수 있고, 2.1~6.8%가 적합할 수 있다. 상기 반사율은 표면 증강 라만 산란으로 인한 반사율의 감소 효과로 달성될 수 있다.
- [0076] 일 실시예에 따르면, 상기 광검출기는 작동전압 1V 및 과장 범위 470nm 내지 510nm에서 응답성 3.50mA/w 내지 5.00mA/w인 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0078] 일 실시예에 따르면, 상기 광검출기는 투명전극인 제1전극; 및 상대전극인 제2전극을 더 포함할 수 있다.
- [0079] 상기 투명전극인 제1전극은 이에 한정되는 것은 아니나, ITO 또는 FTO일 수 있다. 상기 상대전극인 제2전극은 Pt, Au, Ni, Cu, Ag, In, Ru, 전도성 고분자 및 이들의 조합으로 구성될 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0081] 다른 측면에 따르면, 베이스 기판을 준비하는 단계; 상기 베이스 기판 상에 다공성 양극 알루미늄 산화물(AAO)을 형성하는 단계; 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 상에 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 단계; 및 상기 플라즈모닉 나노구조체 상에 페로브스카이트 양자점(QD) 박막을 형성하는 단계;를 포함하는, 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법이 제공된다.
- [0082] 일 실시예에 따르면, 상기 양극 알루미늄 산화물(AAO)을 형성하는 단계는 120nm 내지 250nm 크기의 기공을 형성하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0083] 일 실시예에 따르면, 본원의 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법은 상

기 양극 알루미늄 산화물(AAO) 및 상기 플라즈모닉 나노구조체는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 형성하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0084] 일 실시예에 따르면, 본원의 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 광검출기의 제조방법에서 상기 플라즈모닉 나노구조체는 Ag, Cu, 및 Al 중 1종 이상으로 이루어진 것을 특징으로 할 수 있다.

[0085] 일 실시예에 따르면, 상기 페로브스카이트 박막을 형성하는 단계는 스핀코팅 단계를 포함하고, 상기 스핀코팅은 30초 내지 80초 동안 700 내지 850r·min⁻¹의 회전 속도로 스핀코팅하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0087] 상기와 같이, 본원은 라디칼 전자기장에 의한 3D 입사광 구속(confinement)은 무기 페로브스카이트 CsPbBr₃ 양자점(QD)의 성능 한계를 돌파 할 수 있는 새로운 방법을 제공한다. 여기에서, 기하학적 제어를 갖는 금속 나노입자가 증착된 AAO(양극 알루미늄 산화물) 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체는 공간적으로 확장된 광 구속(confinement)에 의해 활성화된 페로브스카이트 광검출기의 주기적 빛 활용을 위해 처음 제안되었다. AAO 매트릭스 내에서 플라즈모닉 결합에 의해 유도된 극단적인 다중 간섭은 기공 크기의 함수로 생성되어 전달된 광자를 표면으로 효과적으로 수집할 수 있다. 또한 자가 조립된 금속 나노입자는 동시에 입사광 및 반사광을 CsPbBr₃ QD 층으로 집중시킨다. 광 구속은 본질적으로 표면 근처 전자기장의 변화로 인해 금속 나노입자로부터 유래한다. 결과적으로 220nm의 기공 크기를 가진(Al 나노입자/ AAO) 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 기반으로 하는 페로브스카이트 광검출기는 광전류가 ≈ 43 배 증가하는 향상된 광 반응 거동을 나타내고 1V에서 490nm 조명 아래에서 낮은 암전류를 유지할 수 있다.

[0089] 본 발명에 의하면, 기공 크기를 제어함으로써, 공간 광 구속(Confinement)을 통해 향상된 광 반응을 나타내는 고성능 페로브스카이트 광검출기 및 이의 제조방법을 제공할 수 있다.

[0091] **실시예**

[0092] **CsPbBr₃ QD의 합성**

[0093] 무기 페로브스카이트 CsPbBr₃ QD 합성은 이전 연구에서 보고된 바와 같이 실온에서 수행되었다. 1.1736g의 Cs₂CO₃ 분말(99%)을 Cs + 전구체로서 2mL 프로피온산(PrAc, 99.5 %)에 용해시켰다. 한편, PbBr₂ 전구체는 0.9175g의 PbBr₂(99.9 %)를 부틸 아민(BuAm, 99.5 %), 이소프로판올(IPrOH, 99.5 %), PrAc의 5mL 혼합 용액에 1:1:1의 비율로 용해하여 제조했다. 그 후, 270 μ L의 PbBr₂ 전구체를 25 μ L의 Cs + 전구체, 5 mL의 IPrOH 및 10 mL의 헥산(99.5 %)의 혼합 용액에 격렬하게 교반하면서 주입했다. CsPbBr₃ QD는 각각 1500 및 2000 r·min⁻¹(각각 2 분)의 속도로 두 번 원심 분리한 다음 톨루엔 (99.8 %)에 재분산하여 수득하였다.

[0095] **광검출기 제작**

[0096] 도 1의 (a)에 도시된 바와 같이, Al 기판(AAO 매트릭스) 상의 고도로 정렬된 다공성 AAO는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 제작을 위한 2 단계 양극 산화 기술을 통해 준비되었다(ESI의 제작 세부 사항).

[0097] 보다 구체적으로, 각각의 2×2cm²의 고순도 알루미늄 포일이 순수 에탄올 및 과염소산(V_{Alcohol}:V_{Acid} = 4:1) 혼합물에서 20V의 일정한 전압으로 상온에서 연마되었다. 이후, 60V에서 15분 동안 옥살산에서 양극화가 진행되었다. 기공을 정의하기 위해, 불규칙한 모양의 산화 알루미늄 필름을 크롬산 및 인산의 혼합 용액에서 30분 동안 80℃에서 식각되었다. 동일한 조건에서 0.3mol/L의 옥살산에서 2차 양극화 후, 450nm의 기공 길이를 갖는 균일한 다공성 AAO막이 형성되었다. 기공 크기는 최종 에칭 공정 중 실온에서 5% H₃PO₄의 반응 지속시간을 변화시켜 조절했다.

[0098] 기공 간 거리 ≈ 450 nm 인 AAO 매트릭스의 기공 크기는 5% H₃PO₄(99.8 %)에서 최종 에칭 기간에 대한 체계적인 제어를 통해, 120-220nm 사이로 변형되었다. 그 후, $\approx 7 \times 10^4$ Pa에서 0.1 nm·s⁻¹의 속도로 열 증발에 의해 다양한 기공 크기를 가진 AAO 매트릭스에서 3 nm의 Ag 박막이 증착되었다.

[0099] 금속 나노입자 효과를 보다 이해하기 위해, 3 nm의 동일한 두께의 Cu 및 Al 박막은 열 증발에 의해 220 nm의 기공 크기를 가진 AAO 매트릭스에 증착되었다.

- [0100] 증착 후, 자체 조립된 금속 나노입자는 고속 열 어닐링 로(OTF-1200-4-RTP, Hefeikejing Materials Technology Co., Ltd., China)에서 1×10^{-5} Pa에서 600 초 동안 400 °C에서 어닐링하여 AAO 매트릭스에 응집되었다.
- [0101] 나노입자 제조에 이어, 상기 제조된 $50\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ CsPbBr₃ QD 용액은 금속 나노입자 / AAO 하이브리드 나노구조체와 금속 나노입자 / 유리 기판에 50초 동안 $800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 의 회전 속도로 균일하게 스핀 코팅되어 450 nm의 동일한 두께를 가진 박막을 형성하였다.
- [0102] 최종적으로, 각 샘플을 120 °C에서 5 분 동안 주변 조건에서 어닐링하고, 20 μm 간격의 4mm의 Au 전극 한 쌍을 열 증발에 의해 CsPbBr₃ QD 박막 상에 증착했다.
- [0104] **광검출기의 특성 분석 방법**
- [0105] 페로브스카이트 CsPbBr₃ QD의 형태학적 특성은 고해상도투과전자현미경(HRTEM, TF20, FEI Tecnai Corporation, America)을 통해 확인하였다. 주사 전자 현미경(GeminiSEM 300, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Corput, Germany)은 하이브리드 플라즈모닉 나노구조 및 CsPbBr₃ QD 박막의 표면 형태 특성을 나타내기 위해 사용되었다. 다양한 기판에서 CsPbBr₃ QD 박막의 결정 구조는 X-선 회절(XRD) 분석(D8 Discover, Bruker, Germany)에 의해 확인되었다. 원소 분석은 에너지 분산 X-선 분광계(EDS) 시스템(GeminiSEM 300, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Corporation, Germany)에 의해 수행되었다. 반사율 및 흡광도 스펙트럼은 200~650nm의 파장 범위에서 UV-VIS-NIR 분광계(UV-3600 PLUS, Japan)로 기록되었다. 광루미네선스 스펙트럼은 325nm의 제논 램프(Zolix OmniFluo, China)에 의해 기록되었다. 각 광검출기의 성능은 반도체 소자 분석기(Agilent technologies B1500A, America)에 의해 측정되었으며, 광(illumination)을 위한 발광 다이오드는 함수 발생기(Agilent 33210A)에 의해 제어되었다.
- [0107] 다양한 기판에서 CsPbBr₃ QD 박막의 전자기장(DM) 분포는 상용 FDTD 솔루션(Lumerical) 소프트웨어에 의해 시뮬레이션되었다. 시뮬레이션을 위한 AAO 매트릭스의 금속 나노입자의 크기 및 거리는 SEM 이미지에서 얻는 통계 결과로부터 평균을 구하였다. z-축에 평행인 E-필드 지향성 편광을 가진 490nm 평면파 광을 사용했다. x 축 및 y 축의 경계 조건은 주기적 조건이었으며, z 축을 따라 완벽하게 일치하는 레이어 조건이었다. 메쉬 그리드(mesh grid)는 각 방향을 따라 1nm였으며, 시뮬레이션 시간은 1000 fs였다.
- [0109] **하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 특성 평가 결과**
- [0110] 광 반응 향상 효과를 조사하기 위해, 도 1의 (a)에 도시된 바와 같이, 동일한 두께의 450nm의 전(all)-무기 CsPbBr₃ QD 박막을, Ag 나노입자가 증착된 기공 크기 의존형 AAO(Ag / AAO) 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 상에 증착했다.
- [0111] 합성된 CsPbBr₃ QD는 약 12 nm의 평균 크기로 균일하게 분포되었다(도 1의 (b)).
- [0112] 또한, CsPbBr₃ QD의 입방 위상은 도 1의 (c)에서 강조된 바와 같이 0.582 nm의 간격으로 식별되었다.
- [0113] CsPbBr₃ 콜로이드 QD가 도 1의 (d) 및 (e)에 기재된 바와 같이 약 510 nm에서 샤프한 광 흡수 에지와 약 525 nm에 위치한 좁은 광 발광(PL, photoluminescence) 방출 피크를 나타낸다. 흡수 에지와 PL(photoluminescence) 피크 위치는 대략 비슷한 위치에 있는데, 이는 전도대 에지에서의 방사 재결합을 암시한다.
- [0114] 도 3는 Ag/ AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 형태학적 진화 및 광학적 특성을 보여주는데, CsPbBr₃ 스핀 코팅 전후 다양한 기공 크기를 볼 수 있다. 도 3의 (a) 및 (b)에서 볼 수 있듯이 Ag 나노입자는 각 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체에 대해 AAO 매트릭스에 균일하게 분포되어 있다. 도 2의 (a) 및 (b)에서 볼 수 있듯이, Ag 나노입자는 기공 크기에 따라 평균 직경이 29.6에서 23.3 nm로 점차 축소되는 것을 분명히 볼 수 있다. 열 에너지를 인가함으로써 Ag 원자는 자발적으로 AAO 매트릭스에서 응집되기 시작했다. Ag 원자의 확산 길이 (l_{Ag})는 확산 제한 응집 모델(diffusion limited agglomeration model)을 기반으로 결정될 수 있다.

$$l_{Ag} = \sqrt{D_0 \times \exp(-\gamma_{Ag}/kT) \times \tau}$$

[0115]

[0116] 여기서 D_0 는 이상적인 확산도, γ_{Ag} 는 Ag의 활성화 에너지, k 는 Boltzmann 상수, T 는 어닐링 온도, τ 는 체류 시간이다. Ag 나노입자 제조를 위해 400℃의 고정 어닐링 온도가 설정되었으며 T 및 τ 는 각 샘플에 대해 일정하게 유지되었다. 따라서 확산 길이는 γ_{Ag} 에 의해서만 결정될 수 있다. 또한 AAO 및 Ag 원자 사이의 상호 작용은 기공 크기가 증가함에 따라 추가 빈자리 발생과 함께 점차 약해졌다. 따라서, Ag 원자의 응집은 AAO 매트릭스의 측벽을 따라 발생하는 경향이 있는데, 이는 기공 크기의 함수로서 확장된 l_{Ag} 에 영향을 주었다. 스핀 코팅 후, 기본 AAO 기판과 Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체(도 4) 모두에서 CsPbBr₃ QD 박막에 대해 연속적인 형태가 관찰되었는데, 이는 무시할 수 있는 기판 형상이 표면 형태에 영향을 미쳤음을 암시한다.

[0117] 도 3의 (c)에서 볼 수 있듯이 고품질 CsPbBr₃ QD 박막은 Br, Pb, 및 Cs 요소의 균일한 분포에 의해 입증될 수 있다. 기공 크기에 관계없이 간섭 무늬는 도 2의 (d)에 나타난 것처럼 200nm에서 650nm 사이의 전체 파장 범위에 걸쳐 Ag 나노입자가 있거나 없는 AAO 매트릭스의 스펙트럼에 대해 유사하게 나타났다. 도 2의 (c)에 나타난 바와 같이, AAO 매트릭스에 대한 반사 스펙트럼의 진동 패턴은 A1 후면 반사층으로부터 여러 반사된 광파를 중첩하여 유도할 수 있는데, 이는 투과로부터 최소화된 광 손실로 인한 AAO 매트릭스상의 광활성층의 광 이용에 대해 유리하다. 반사된 광선 R_n ($n > 2$)의 무시할만한 기여를 고려하면, 파장에 따른 총 반사율 $R(\lambda)$ 은 다음과 같이 간단히 제공될 수 있다.

$$R(\lambda) = \left(R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \frac{4\pi d n_{AAO} \cos \theta_1}{\lambda} \right) \times \exp(-\alpha)$$

[0118]

[0119] 여기서 R_1 과 R_2 는 반사광 빔이고, d 는 AAO 층의 두께를, θ_1 과 n_{AAO} 는 각각 입사광의 각도와 굴절률을 나타낸다. $\exp(-a)$ 는 산란 유도 광 손실 계수이며 $a = \rho \times \delta / \lambda$ 로 표현된다. 여기서 ρ 는 피팅 상수이고 σ 는 표면 거칠기이며 확장된 기공 크기와 함께 점차 증가한다. 강화된 광산란으로 인해 기본 AAO 매트릭스의 평균 반사율은 도 3의 (e)에서 보는 바와 같이, 기공 크기가 증가함에 따라 6.8 %에서 2.1 %로 감소했다. 한편, Ag 나노입자의 존재는 향상된 국소 표면 산란의 결과로 각 샘플의 반사율을 더욱 감소시켰다(도 3의 (e) 및 도 2의 (d)). 도 3의 (f)에서 볼 수 있듯이 15.1°, 21.5°, 30.8°의 특성 피크는 각각 입방결정 구조의 (110), (112), 및 (220)면에 할당될 수 있다. 특히, 페로브스카이트상의 결정도는 유리 상의 CsPbBr₃ QD 박막 및 Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체에서 모두 동일하게 유지되었다. 따라서, 고품질 CsPbBr₃ QD 박막의 흡수로 인해 기공 크기에 관계없이 Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 반사 스펙트럼에서 약 520nm 이전에 흡수 예지가 유사하게 발달하였다.

[0120] 120 ~ 220nm 사이의 다양한 기공 크기를 가진 Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 광 반응 거동은 도 5에 나타나 있다. 유리 기판에 제작된 광검출기는 기준 장치로 작용했다. 일반적으로 Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기에서 CsPbBr₃ QD 박막의 광 반응은 유사한 암전류(I_{off}) 수준을 유지하면서 대폭 개선된다. 이러한 향상은 공간 결합에 의해 유도된 보다 효율적인 빛 활용에 기인할 수 있다. 특히, Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기는 도 5의 (a)에 도시된 바와 같이 전체 전압 범위에서 상대적으로 낮은 I_{off} (3nA 미만)를 나타냈다. 게다가, 각각의 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 I_{off} 는 Ag의 높은 전기 전도성으로 인해 유리 기반 광검출기보다 약간 높았다. 도 5의 (b)에서 볼 수 있듯이 광유도 전류(I_{on})는 490nm 빛 아래에서 바이어스 전압의 함수로 선형적으로 증가했다. 특히 Ag/AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체에서 I_{on} 이 지배적이었다(도 5의 (b)). 또한, 기공 크기가 220nm에 도달하고 향상 효과가 170 nm에서 220 nm로 됨에 따라, 490nm 광 아래에서 1V의 바이어스에서 23배 증가된 전류($\approx 12nA$ 에서 $\approx 278nA$)가 도 5의 (c), (d)에서 관찰되었는데, 이는 동일한 두께의 페로브스카이트 박막에서 광이 여기되는 캐리어의 한계를 시사한다. 광검출기의 중요한 장점 중 하나인 선형 동적 범위(LDR)는 빛의 강도에 대한 반응의 선형 범위를 나타내며 하기와 같이 표현할 수 있다.

$$LDR = 20 \log(I_{on}/I_{off})$$

[0121]

[0122] 도 5의 (d)에서 볼 수 있듯이 LDR은 ≈ 22.5 에서 ≈ 40.6 dB로 증가했으며 LDR의 증가 포화는 기공 크기가 170nm

이상일 때 발생했다. 이것은 항상 효과의 한계가 220nm임을 시사했다. 빛 여기 하에서 광전류 생성 능력, 응답성(R_S)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_S = \frac{I_t - I_{off}}{P \times S}$$

[0123]

[0124] 여기서 P는 광도($mW \cdot cm^{-2}$)이고 S는 $0.2 \times 4 \text{ mm}^2$ 의 활성 영역을 나타낸다. 도 5의 (e)에서 볼 수 있듯이, 두 단계(단계 I 및 단계 II)가 기공 크기의 함수로서 광 반응성 경향에 관여했다. 단계 I에서 R_S 는 $\approx 0.1mA \cdot W^{-1}$ (유리)에서 $\approx 2.5mA \cdot W^{-1}$ (170nm)로 30배 급격히 증가하여, 나노구조화된 기공 크기에 의해 도입된 공간 광 결합의 중요성을 나타낸다. 단계 II에서 R_S 는 $\approx 2.5mA \cdot W^{-1}$ (170nm)에서 $\approx 2.6mA \cdot W^{-1}$ (220nm)까지 유사한 반응을 유지하여 Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 페로브스카이트 CsPbBr₃ 광검출기의 최대 검출 능력을 나타낸다. 한편 정규화 된 탐지율 (D^*)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D^* = R_S \times \sqrt{\frac{S}{2eI_{off}}}$$

[0125]

[0126] 여기서 e는 기본 전하를 나타낸다. D^* 는 기본 유리 (5.46×10^8 Jones)에서 제작된 장치와 비교하여 각 기공 크기에 대해 유의적으로 한자릿수 정도 향상되었다. 기공 크기가 증가함에 따라 D^* 는 $\approx 6.16 \times 10^9$ (120nm) Jones에서 $\approx 8.20 \times 10^9$ (170nm) Jones로 증가했으며, 항상 효과의 포화로 인해 220nm($\approx 7.97 \times 10^9$ Jones)에서 약간의 열화가 발생했다. 이론상 플라즈모닉 결합의 기본 사항을 이해하기 위해 도 5의 (f)에 제시된 바와 같이, FDTD(finite difference-time-domain) 방법을 수행하여 다양한 기공 크기를 가진 장치의 단면 전자기장(EM) 분포를 시뮬레이션했다. 크기 기공 확장으로 추가적인 광은 AAO 매트릭스 표면으로 다시 반사되고 Ag 나노입자에 의해 더 구속되었다. 결과적으로 광 활용은 도 5의 (f)의 단면 EM 필드 시뮬레이션과 같이 AAO 매트릭스의 표면에 점차적으로 강화된 EM으로 입증될 수 있다.

[0127] 항상 효과에 대한 더 많은 통찰력을 얻기 위해, Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 및 유리에 대한 CsPbBr₃ QD 박막 기반 광검출기의 광 반응을 도 7의 (a) 및 도 6과 같이, 광도를 2.9에서 $12.1mW \cdot cm^{-2}$ 증가시키면서 조사하였다. 광도가 증가함에 따라, 기공 크기가 220nm 인 Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 I_{on} 은 117nA에서 278nA로 뚜렷이 증가했다. 120 nm의 기공 크기에서도 유사한 향상이 관찰되었다(도 7의 (a)). 또한 광도(P)에 대한 I_{on} 의 의존성은 다음과 같은 전력 법칙으로 표현할 수 있다.

$$I_{on} = AP^\beta$$

[0128]

[0129] 여기서 A는 특정 파장에서의 피팅 상수를 나타내고 β 는 전력 지수이다. 도 7의 (b)에서 볼 수 있듯이 각 β 는 0.5보다 높았으며, 이는 고르게 분포된 제조합 결합이 있는 고품질 CsPbBr₃ QD 박막을 시사한다. 한편, Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 β 값은 기공 크기와 함께 점차적으로 감소했으며, 이는 아마도 공간 플라즈모닉 결합에 의해 유도된 부스트된 전자-정공 생성 및 제조합에 기인할 수 있다. 결과적으로, 기공 크기가 220 nm인 Ag / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기는 향상된 광 반응을 전달했다. 특히, R_S 는 도 7의 (c)에 표시된 것처럼 조명 전력이 2.9에서 $13.4 W \cdot cm^{-2}$ 로 변환에 따라 $\approx 1.07 mA \cdot W^{-1}$ 에서 $\approx 2.57 mA \cdot W^{-1}$ 로 증가했다. 특히 R_S 는 유리상에서 제작된 장치에서 약 36배 향상되어 광 이용률이 개선된 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 이점을 입증했다. 도 7의 (d)에서 PL(photoluminescence) 피크 강도는 기공 크기에 따라 점진적으로 증가하여 개선된 광-물질 반응으로 강화된 재결합 과정을 입증한다. 또한 광검출기의 τ_{rise} (전류가 Ion의 10 %에서 90 %로 상승하는데 걸린 시간) 및 τ_{decay} 시간(전류의 Ion의 90 %에서 10 %로 붕괴하는데 걸린 시간)는 도 7의 (e), (f), 도 6의 (c), (d)에서 볼 수 있듯이 상대적으로 2 초

미만으로 유지되는데 이는 장치의 상대적으로 빠른 응답을 나타낸다.

[0130] 공간 플라즈모닉 결합에 대한 금속 나노입자의 영향을 추가로 조사하기 위해, 도 9에 제시된 바와 같이 서로 다른 금속 나노입자가 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체에 적용되었다. 상기 식 (1)에 따라 금속 원자(Metal)의 확산은 본질적으로 그들의 활성화 에너지에 의해 결정될 수 있다. 제한된 표면 확산으로 인해 금속 원자의 응집이 그에 따라 제한되어 Al 나노입자의 크기($\approx 11.5\text{nm}$)가 도 8의 (a) 및 (c)에 표시된 AAO 매트릭스에 형성된 Cu 나노입자 ($\approx 21.4\text{nm}$)보다 훨씬 더 작아졌다. 주목할 만한 것은 금속 나노입자 AAO 나노구조체의 반사율이 금속 나노입자가 없는 기본 AAO 매트릭스(도 8의 (d), (e))와 비교할 때 감소하였다는 점이다. 또한, Cu의 특성 피크($\approx 520\text{ nm}$) 주변에서 강한 소멸로 인해 Cu 증착된 AAO 매트릭스에 대한 반사율의 감쇠가 관찰되었다. 도 9의 (a) 내지 (c)에서 CsPbBr₃ QD 증착 후 모든 AAO 매트릭스에 대해 균일한 형태를 얻었다. 한편, Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체에 증착된 페로브스카이트 필름에는 상대적으로 더 큰 핀홀이 있었는데, 이는 Al 나노입자에 의해 도입된 외부 변형 때문일 수 있다. 도 9의 (d)에서는 모든 매트릭스의 박막에서 (110), (112) 및 (220)의 특징적인 피크가 관찰되어 페로브스카이트 박막의 높은 결정성을 나타낸다. 마찬가지로, 도 9의 (e)에 표시된 것처럼 금속 나노입자에 관계없이 모든 샘플에서 흡수 예지도 관찰되었다. 도 9의 (f)에서 PL(photoluminescence) 방출은 다른 나노입자와 비교하여 Ag 나노입자로 증폭되었음을 알 수 있다. 이 강화된 PL(photoluminescence)은 금속 나노입자가 증착된 유리상의 박막 흡수가 개선된 것으로 확인된 향상된 광 흡수 때문이었다(도 10의 (a)). CsPbBr₃ QD의 일 함수($\approx 5.1\text{eV}$)가 Ag(4.26eV), Al($\approx 4.28\text{eV}$) 및 Cu($\approx 4.65\text{eV}$)의 일 함수보다 높다는 점을 감안할 때, 전도대($E_c = \approx 3.3\text{ eV}$)의 전자는 자발적으로 밴드 밴딩으로 인해 여기 후 금속 나노입자 내로 주입될 수 있다. 분명히 전자는 훨씬 더 큰 장벽으로 인해 Cu 나노입자에 주입되었을 가능성이 더 높았으며, 그렇지 않으면 더 많은 캐리어가 재결합되었다. 또한, 대역 간 전이와 큰 스펙트럼 중첩에 의해 유도된 Cu 유전 함수의 큰 허수 부분은 Cu 나노입자의 플라즈모닉 감쇠로 이어질 수 있다. 따라서 도 9의 (f) 및 도 12의 (b), 지원 정보에 표시된 것처럼 Cu 코팅된 AAO 매트릭스와 유리 모두에서 CsPbBr₃ QD 박막에 대해 명백한 PL(photoluminescence) 퀀칭이 동일하게 관찰되었다. 표면에 가까운 전자기장의 변화에 대한 또 다른 증거로서, 다양한 금속 나노입자가 증착된 AAO 매트릭스의 전자기장 분포가 도 9의 (h)와 같이 시뮬레이션되었다. 도 9의 (h)에서 명확하게 알 수 있듯이, 작은 Al 나노입자 사이에 채워진 붉은 색을 볼 수 있는데, 이는 다른 금속 나노입자의 것보다 훨씬 더 강한 전자기장 분포를 나타낸다. 높은 밀도 분포로 인해 Al 나노입자 사이의 강력한 플라즈모닉 결합이 될 수 있으며 개선된 광 흡수로 인해 Al / AAO 광검출기의 최적 성능을 얻을 수 있다.

[0132] 다양한 금속 나노입자가 증착된 AAO 매트릭스와 유리상에 제작된 CsPbBr₃ QD 광검출기의 광 검출 성능은 도 11 및 도 13에 표시된 것처럼 체계적으로 비교되었다. 일반적으로 Cu 및 Al 나노입자가 증착된 광검출기의 I_{off} 는 도 11의 (a) 및 도 10의 (c)에 나타난 대로 금속 나노입자 증착이 없는 기본 기판상의 장치와 비교하였다. 그러나, 도 11의 (b) 및 도 10의 (d)에 표시된 바와 같이, 가장 큰 I_{on} 은 항상 Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기에서 얻었으며, 또한 유리-기판 장치상에서도 목격되곤 하였다. 또한 각 장치는 도 11의 (c)에 표시된 것처럼 재현 가능한 광 반응주기와 우수한 스위칭 동작을 나타냈다. 결과적으로 I_{on} 과 LDR은 도 11의 (d)에 표시된 것처럼 AAO 매트릭스 및 유리에 관계 없이 금속 나노입자의 변화에 대해 비슷한 방식으로 개발되었다. 특히, Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기에서 I_{on} 은 $\approx 513\text{nA}$ 에 도달했으며, LDR은 ≈ 56.1 이다. 마찬가지로, Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 48배 증가된 RS($4.8\text{mA} \cdot \text{W}^{-1}$)는 도 11의 (e)에 표시된 것처럼 기본 유리에서 제조된 장치의 바이어스와 비교하여 1V의 바이어스에서 달성되었다. 그 결과, Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 D^* 는 기본 AAO 기판에서 제작된 장치의 D^* 보다 26배($\approx 2.67 \times 10^{10}$ Jones) 증가했다. 또한 여기 하에서 전자를 생성하는 능력은 외부 양자 효율 (EQE)로 표시되며 다음과 같이 제공될 수 있다.

$$EQE = \frac{h \times c \times R}{\lambda \times e} \times 100\%$$

[0133]

[0134] 여기서 λ 는 여기 파장 (490nm), h 는 플랑크 상수, c 는 이상적인 광속을 나타낸다. Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 향상으로 EQE는 기본 유리에 비해 0.03 %에서 1.21 %로 40 배 향상되었다. 한편, 각 AAO 기반 광검출기의 τ_{rise} 와 τ_{decay} 는 도 11의 (f), 도 12의 (a), (b)에 표시된 것처럼 유사한 값을 유지하였으며, 이는 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 도입이 장치의 응답 속도를 저하시키지 않아야 함을 나타낸다. 하기 표 1은 최근 연구에서 보고된 다양한 구조 및 물질을 갖는 무기 페로브스카이트 광검출기의 성능 비교를 나타낸다.

표 1

	I_{on} [nA]	I_{off} [nA]	R_S [mA W ⁻¹]	τ_{rise} [ms]	τ_{decay} [ms]	Light	Intensity [mW cm ⁻²]	Bias [V]
CsPbBr ₃ /ZnO ^[53]	40	5	0.4	0.21	0.24	405 nm laser	22.8	1
CsPbBr ₃ Nanonet Films ^[54]	<500	≈10	<50	11	16	473 nm laser	14.5	5
SnO ₂ /CsPbBr ₃ ^[55]	10	0.1	0.25	>2000	>2000	500 nm laser	-	3
CsPbBr ₃ films ^[56]	90	0.01	2.5×10^3	0.4	9	530 nm laser	0.216	2
CsPbBr ₃ /ZnO ^[57]	418	0.45	4.25×10^3	0.21	0.24	450 nm laser	16.42	2
CsPbBr ₃ single crystal ^[58]	200	80	5	90.7	57	450 nm laser	20	5
CsPbBr ₃ microrods ^[59]	11	0.1	-	8	8	420 nm LED	5.9×10^{-3}	3
CsPbBr ₃ -CsPb ₂ Br ₅ ^[60]	0.2	2.75	375	0.28	0.64	365 nm laser	1.7	5
CsPbI ₃ NCs ^[61]	180	<1	-	24	29	405 nm laser	1.98	1
CsPbI ₃ ^[62]	1	0.001	-	17.8	14.7	450 nm laser	13	1
This work	513	0.8	4.78	320	150	490 nm LED	13.4	1

[0135]

[0137]

표 1에 요약된 바와 같이 Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기는 다양한 합성물 및 구성으로 제작된 CsPbX₃ 광검출기와 비교하여 초고 I_{on} 및 저 I_{off} 에서 뛰어난 성능을 나타냈다. 비록, 측정 시스템의 한계로 인해 응답 시간이 약간 길었지만 여전히 1 초 미만이었다. 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 I_{on} 에 대한 전력 의존성은 도 13의 (a), 도 12의 (c), (d)에서 밝혀진 금속 나노입자의 효과에 대한 추가 평가를 위해 조사되었다. 도 13의 (b)에서 각 장치에 대한 β 는 도 13의 (a), 도 12의 (c), (d)에 표시된 것처럼 금속 나노입자의 효과를 참조하여 계산되었다. 도 13의 (b)에서 각 장치에 대한 β 는 방정식 (6)을 참조하여 계산되었으며, 모두 분명히 > 0.5로서 효율적인 캐리어 생성, 운송 및 재결합을 나타낸다. 기본 AAO 매트릭스와 비교하여 RS는 각 광도에서 금속 나노입자의 증착으로 개선되었으며, 이는 광활성층의 여기가 다중 간섭 후 금속 나노입자에 의해 강화될 수 있음을 시사했다. Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 일시적인 광 반응은 도 14에서 보는 바와 같이 다른 파장에서 추가로 기록되었으며, 해당 반응 스펙트럼은 도 13의 (d)에 표시되었다. 스펙트럼에 따르면, 가장 높은 RS는 490nm 레이저 조명에서 얻어졌고, CsPbBr₃ QD 박막의 광학 밴드 갭과 관련될 수 있는 장파장 영역에서 점차 감소했다. 기공 크기에 따라, 증가된 RS는 파장 범위 전체에서 유사하게 나타났으며, 이는 도 14에서 입증된 바와 같이 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 광범위한 효과를 나타낸다. 소자의 안정성을 평가하기 위해 Al / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기의 성능을 도 15과 같이 다양한 조건에서 특성화했다. RH > 88 % 환경에서 10일 동안 빛 조명없이 보관 한 후 기존 장치와 비교할 때 I_{on} 은 약간 감소(4 % 이내)로 유지되었으며, I_{on} 은 50 °C에서 1시간 동안 어닐링 한 후 더 안정되었다. 한편, I_{on} 은 15 분 동안 지속적인 광 조명 (490 nm, 14mW · cm⁻²)하에서 유사한 값을 나타내었는데, 조명 지속 시간이 더 늘어남에 따라 점진적으로 감소하여 240 분 후에 20 % 감소했다. 그러나, 이 장치는 다양한 열악한 조건에서 여전히 우수한 안정성을 보여줌으로써, 실제적인 광 검출에 유망한 적용이 될 것임을 시사한다.

[0139]

결론적으로, 고성능 CsPbBr₃ QD 광검출기를 위한 새롭고 효과적인 금속 나노입자 / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체가 구성 및 금속 재료에 대한 포괄적인 제어와 함께 보고되었다. 다양한 기공 크기를 개발하면서 AAO 매트릭스 내에서 급격한 다중 간섭을 통해 광 손실이 성공적으로 감소하여 200 ~ 650nm 파장 범위에서 평균 반사율이 ≈ 2 %로 급격히 감소했다. 결과적으로 Ag 나노입자 / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체의 성능에 대한 강력한 기하학적 의존성은 전자기장 분포 시뮬레이션으로 탐구한 바와 같이 플라즈모닉 결합의 변화로 인

해 관찰되었다. 또한, 확산 제한 응집 모델을 기반으로 제작된 AAO 매트릭스에 자가 조립된 금속 나노입자는 입사 및 역반사된 광을 CsPbBr₃ QD 박막에 효율적으로 집중시켜 향상 효과를 가져왔다. 이후, Al 나노입자 / AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체 기반 광검출기에서 최적의 성능이 달성되었는데, 43배로 급격히 강화된 I_{on} 및 작은 I_{off} 를 유지한다. 이 중요한 개선 사항은 저렴한 비용으로 CsPbBr₃ QD 광검출기의 성능 한계를 극복할 수 있는 제어 가능한 방법을 제공했다.

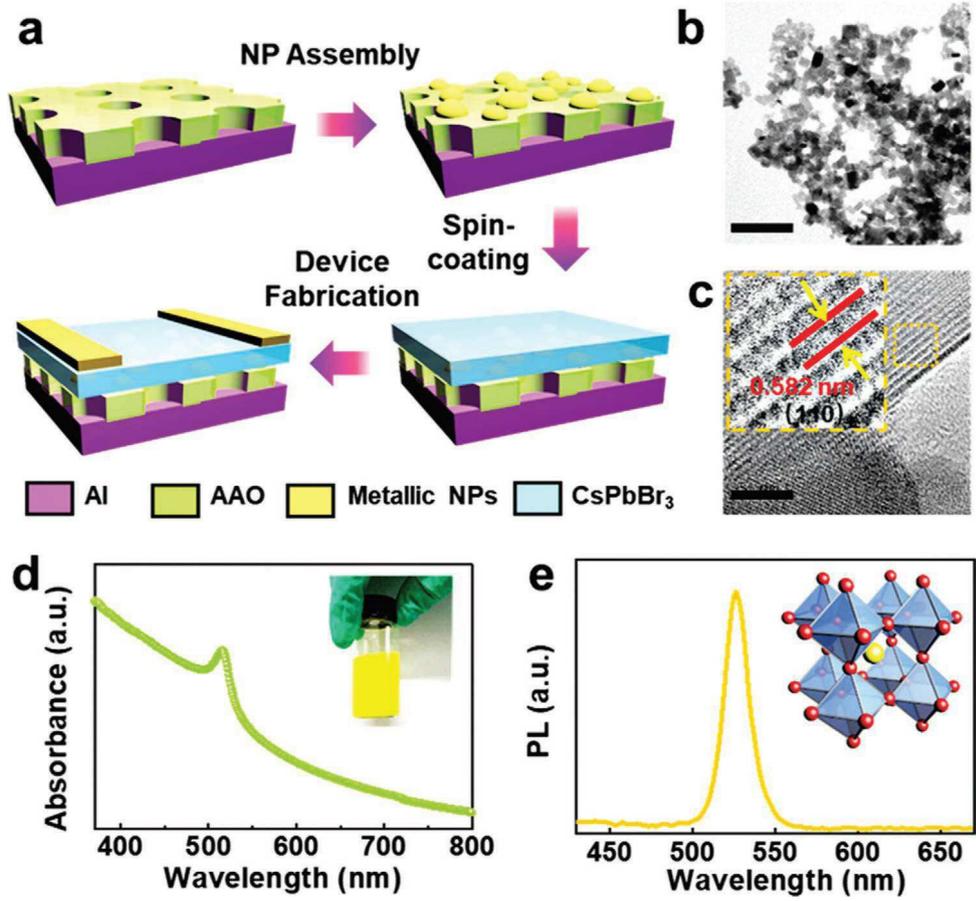
[0141] 주목할 만한 점은 광파가 금속 나노입자의 집합적인 전자 진동에서 유래된 부스트된 근접 표면 전자기장(EM)을 통해 광활성층에 자발적으로 집중될 수 있다. Au 나노결정이 혼합된 CsPbBr₃ QD 광검출기, Au 나노입자/MAPbI₃/그래핀 하이브리드 광검출기, 및 Au 나노로드/MAPbI₃/그래핀 하이브리드 광검출기와 같은 강화된 여기로 페로브스카이트 광검출기의 성능을 개선하는 대체 방법을 제공한다. 또한, Mie 이론에 따르면 고품질 인자 플라즈모닉 특성의 이점을 갖는, Ag 나노입자와 훨씬 더 급진적인 광-물질 상호 작용이 예상될 수 있다. 이들 통상적인 귀금속(Au 및 Ag)과는 별도로, 비-귀금속(예를 들어, Al 및 Cu)은 훨씬 낮은 비용으로 우수한 공명 전자기 특성을 귀금속의 대체품으로써 보여줄 수 있다. 반면, 광의 구속은 금속 나노입자의 근거리 장에만 국한되며, 거대한 광파는 여전히 작은 금속 나노입자에서 빠져 나가는 경향이 있다. 결과적으로, 3D 태양 에너지 활용 내에서 공간적 광 구속은 페로브스카이트 광검출기의 성능을 더욱 향상시키는 손쉬운 방법이 될 수 있다.

[0142] 여기서, 새로운 금속 나노입자/양극 알루미늄 산화물(AAO) 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체는 입사광의 주기적 활용을 달성하기 위해 생성된다. 이들은 CsPbBr₃ QD 광검출기의 성능 한계를 극복하기 위한 효과적인 접근 방식을 혁신적으로 제공할 수 있다. 기공 크기를 제어함으로써 플라즈모닉 간섭은 투과 유도 광 소비를 점차적으로 낮춘다. 향상된 공간 광 활용은 자체 조립된 금속 나노입자를 통해 광선을 원형으로 수집하여 실현된다. 또한, Al 나노입자/ AAO 하이브리드 플라즈모닉 나노구조체를 채택한 광검출기는 1V에서 490nm 광 아래에서 약 43배의 현저하게 개선된 광전류와 낮은 암전류 수준을 나타낸다.

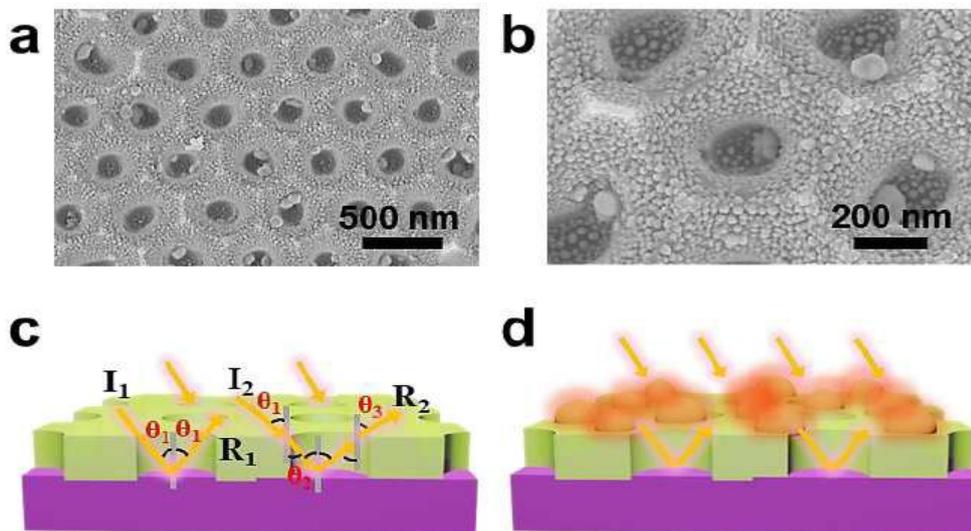
[0143] 이상 본 개시를 구체적인 실시예를 통하여 상세히 설명하였으나, 이는 본 개시를 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 개시는 이에 한정되지 않으며, 본 개시의 기술적 사상 내에서 당 분야의 통상의 지식을 가진 자에 의해 그 변형이나 개량이 가능함이 명백하다. 본 개시의 단순한 변형 내지 변경은 모두 본 개시의 영역에 속하는 것으로 본 개시의 구체적인 보호 범위는 첨부된 특허청구범위에 의하여 명확해질 것이다.

도면

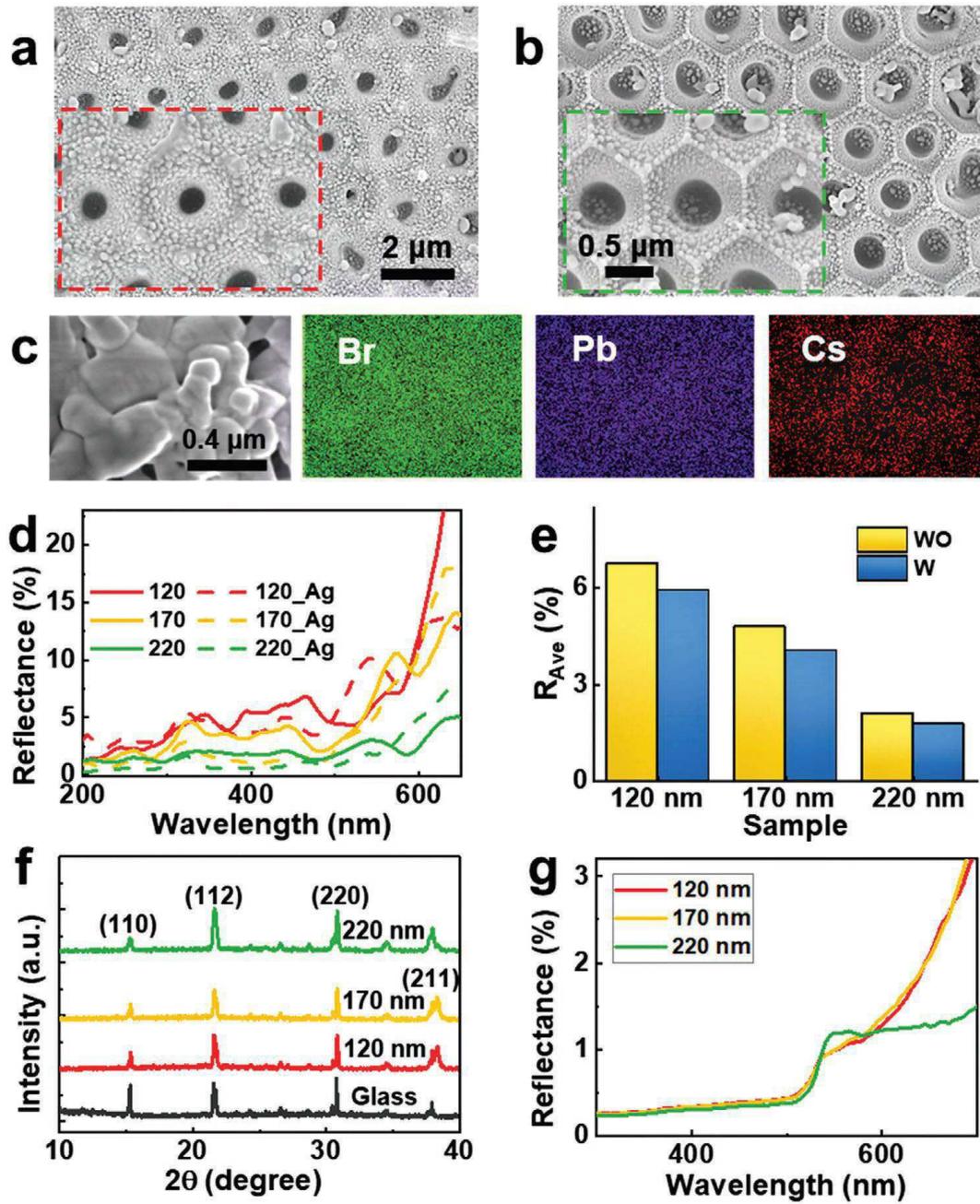
도면1



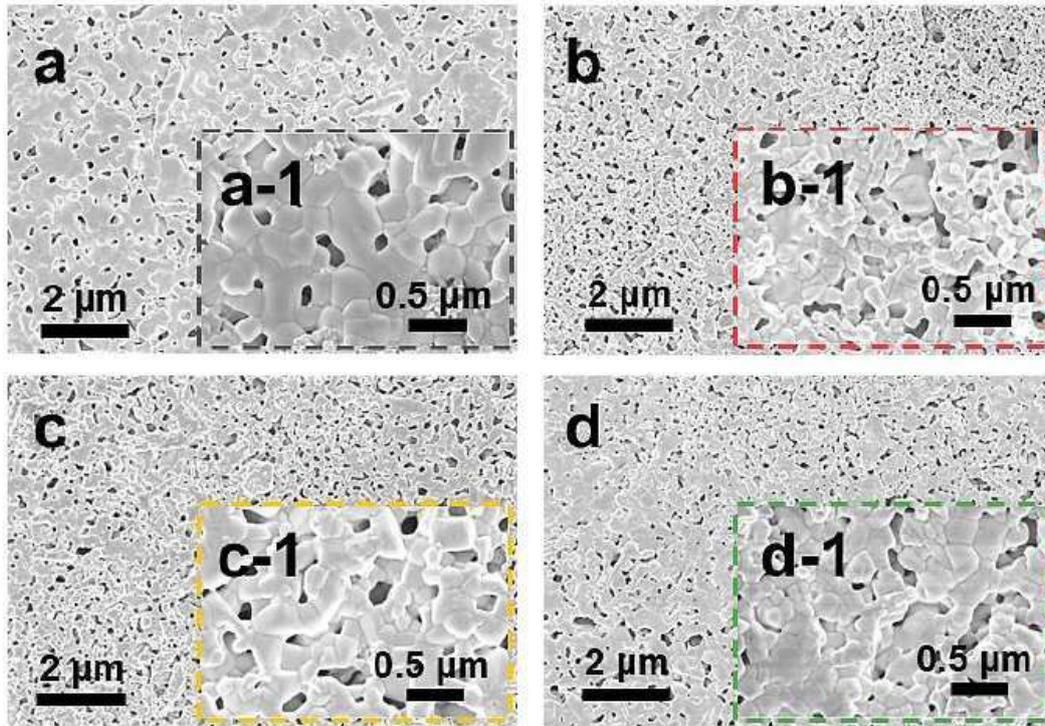
도면2



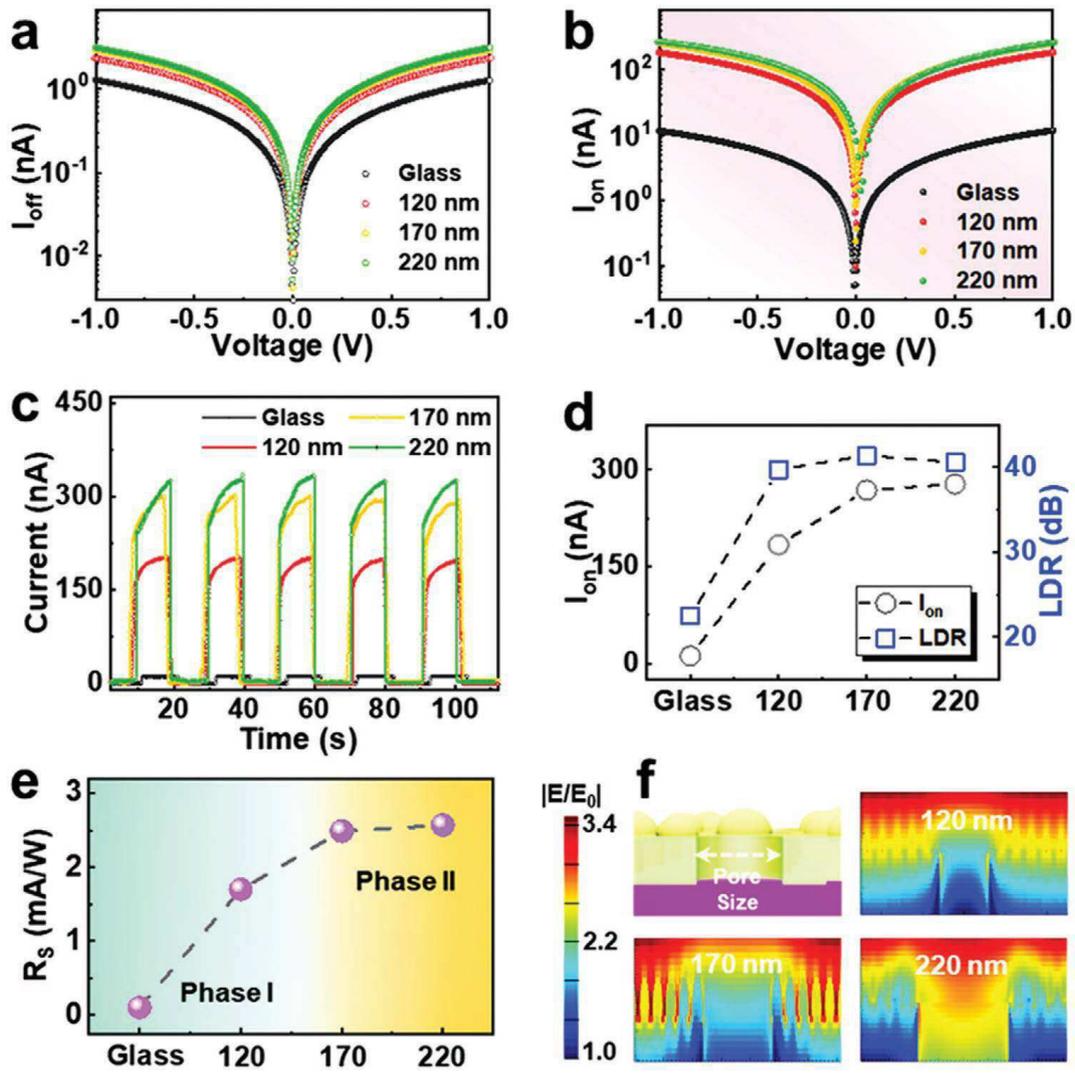
도면3



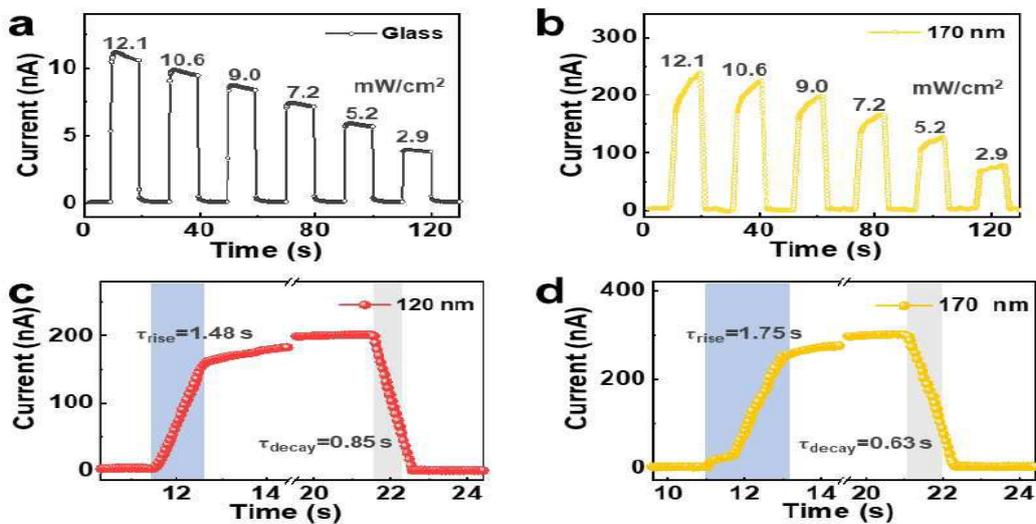
도면4



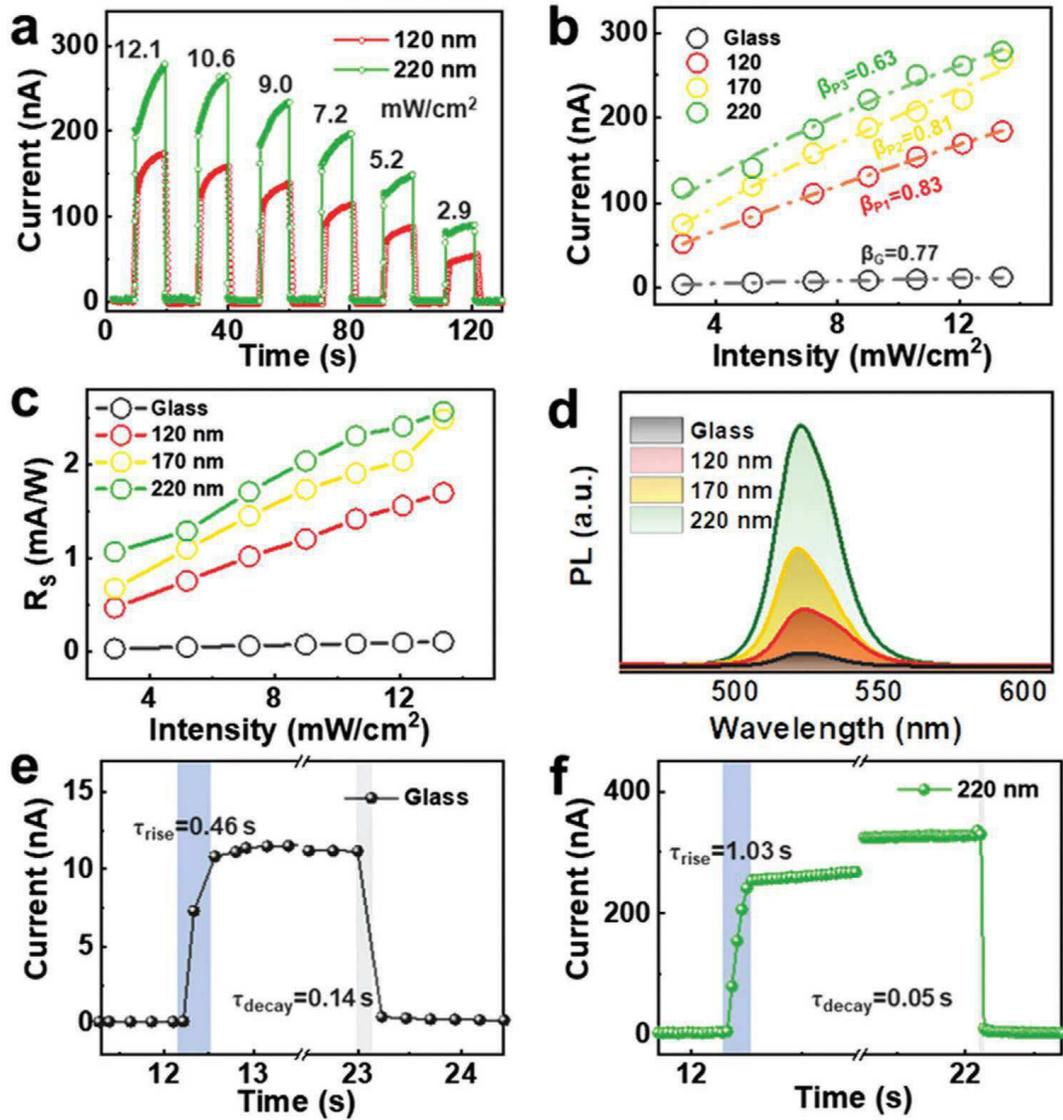
도면5



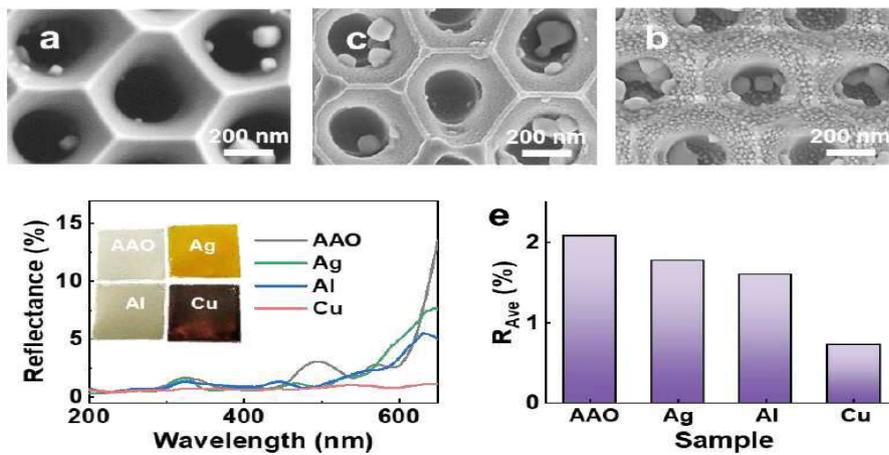
도면6



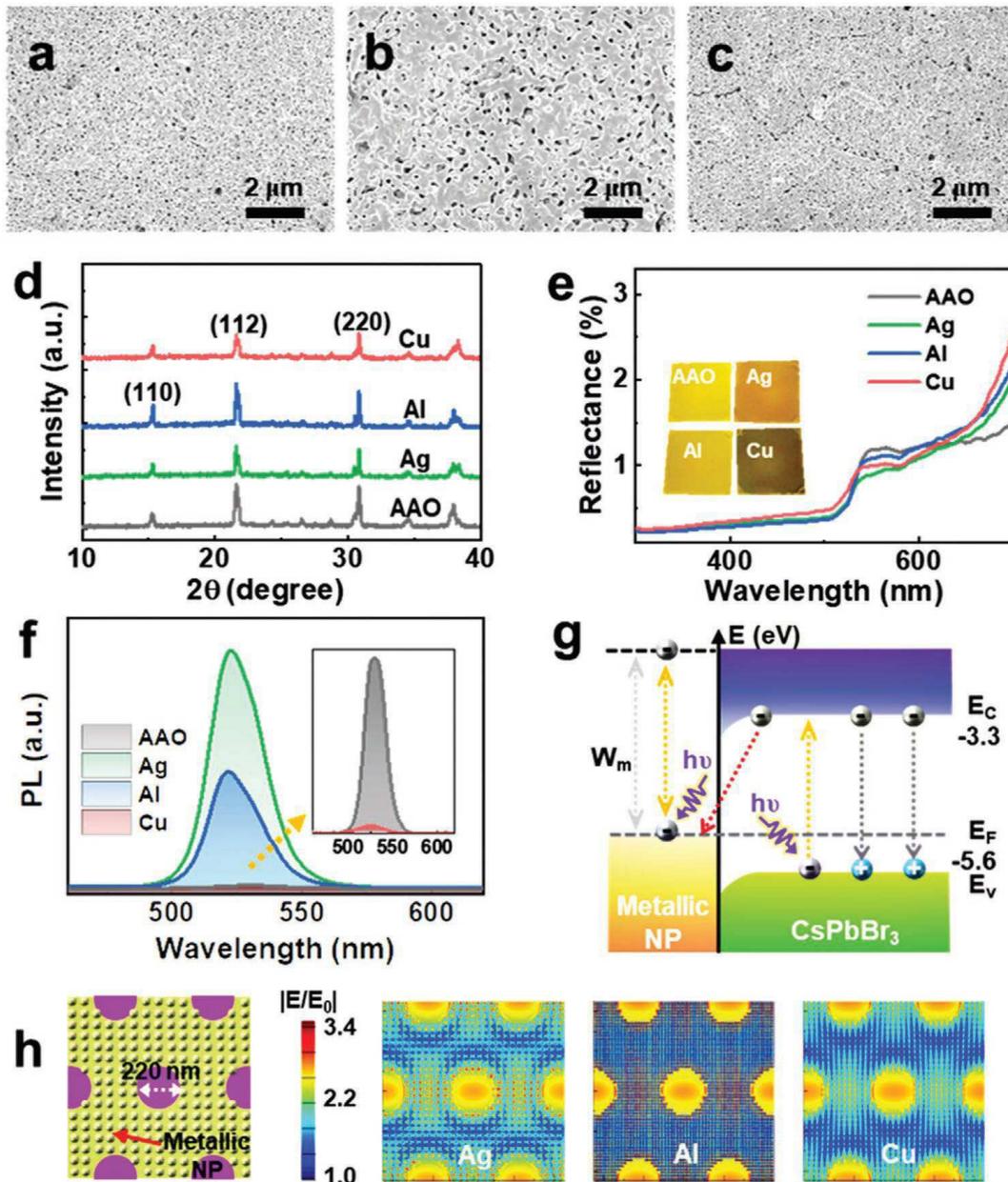
도면7



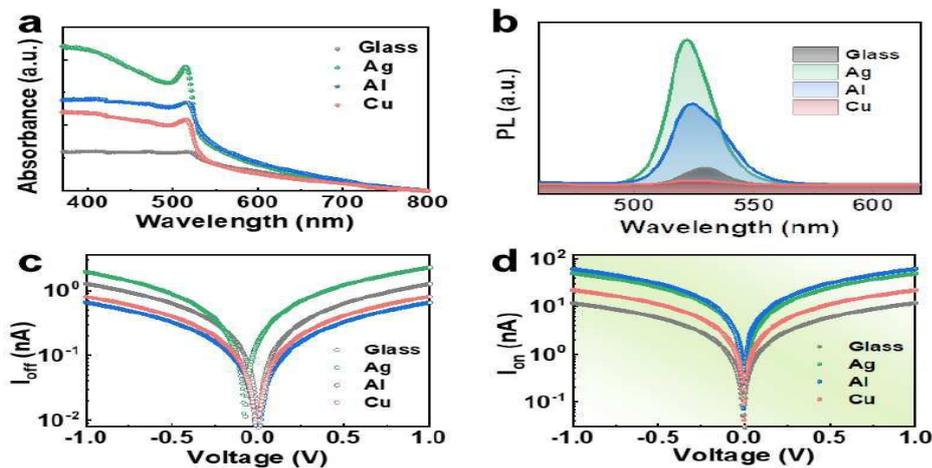
도면8



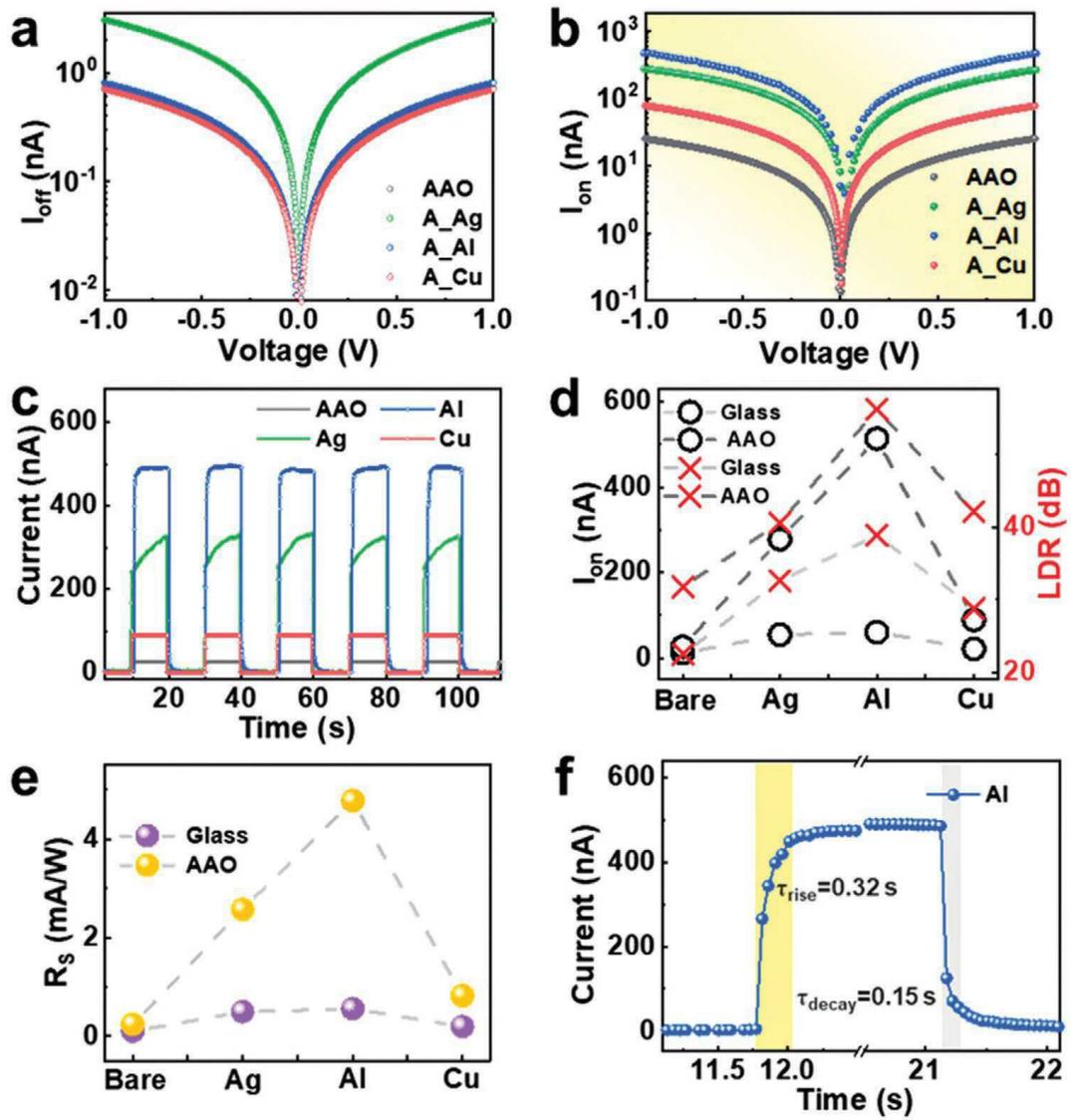
도면9



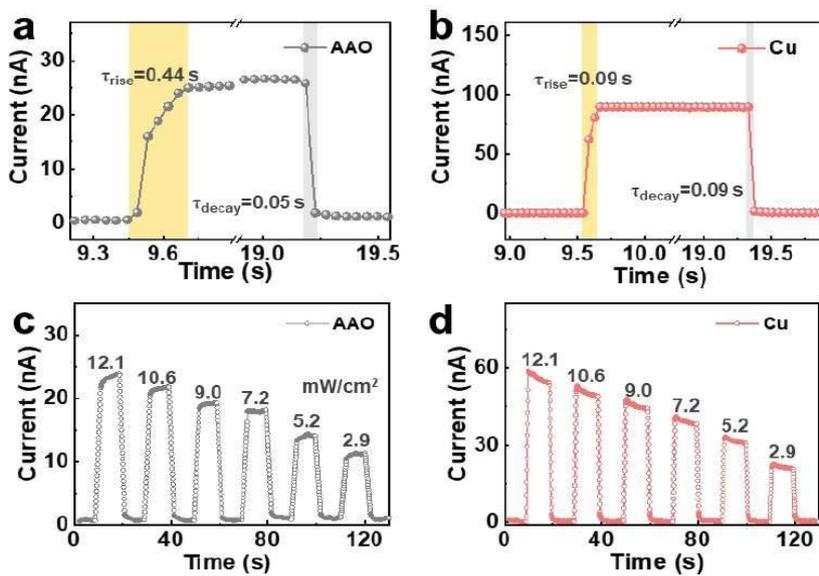
도면10



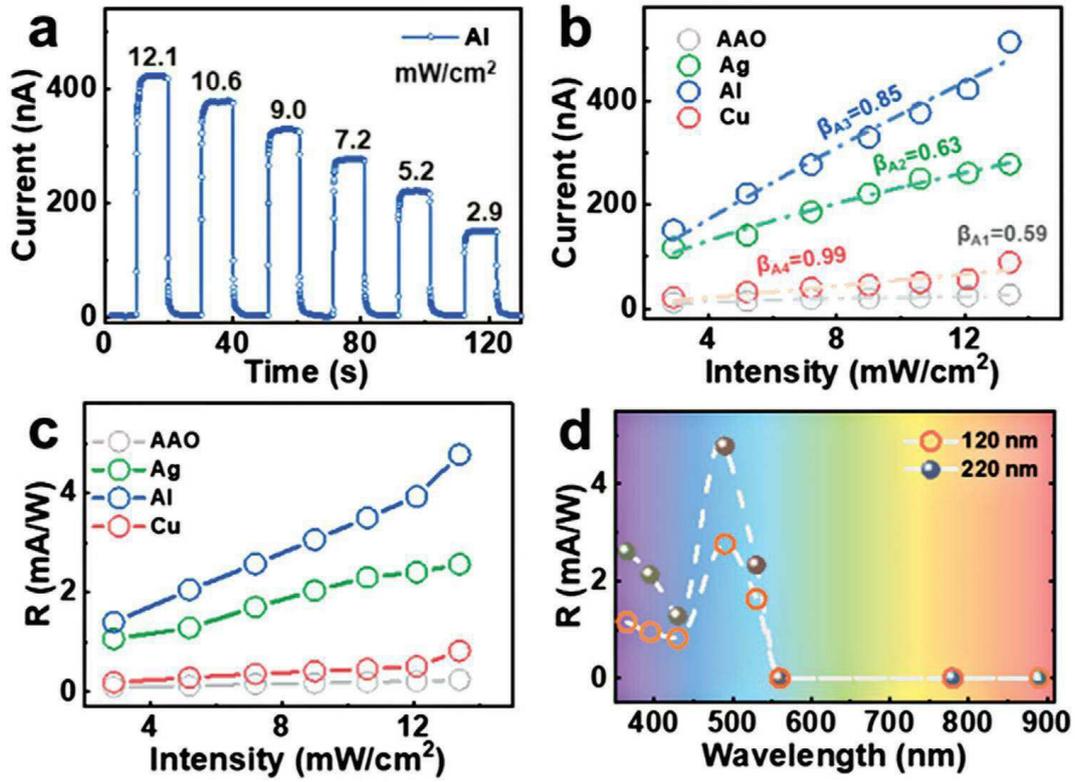
도면11



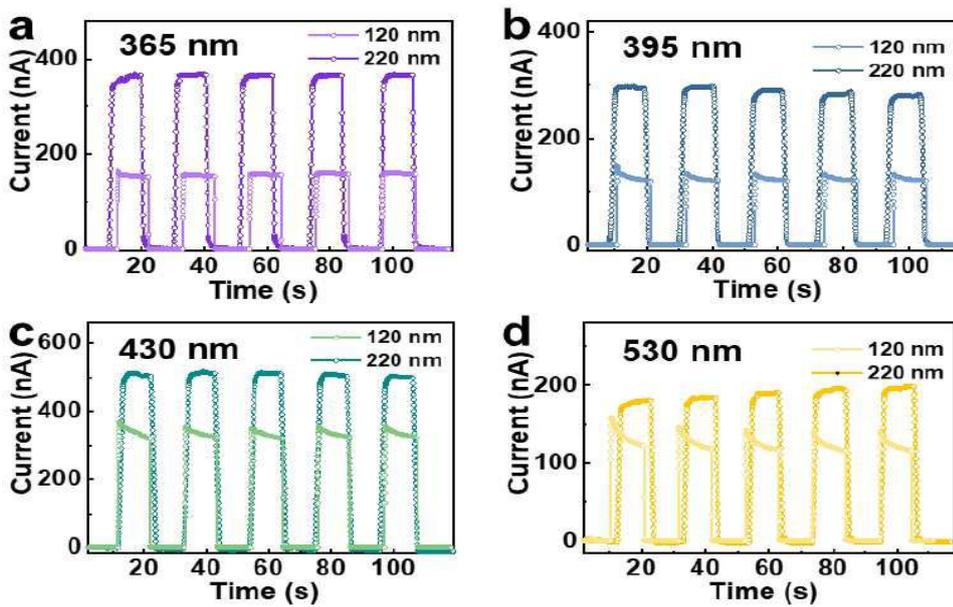
도면12



도면13



도면14



도면15

