(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2021-0064781
(43) 공개일자 2021년06월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 51/42 (2006.01) *H01L 31/032* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 51/4213 (2013.01)
H01L 31/032 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0153375
(22) 출원일자 2019년11월26일
심사청구일자 2019년11월26일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
임상혁
경기도 화성시 동탄순환대로21길 53, 1314동 301호(청계동, 롯데캐슬 알바트로스)
허진혁
서울특별시 성북구 안암로 145, 신공학관 732호(안암동5가, 고려대학교안암캠퍼스)
(74) 대리인
김연권

전체 청구항 수 : 총 18 항

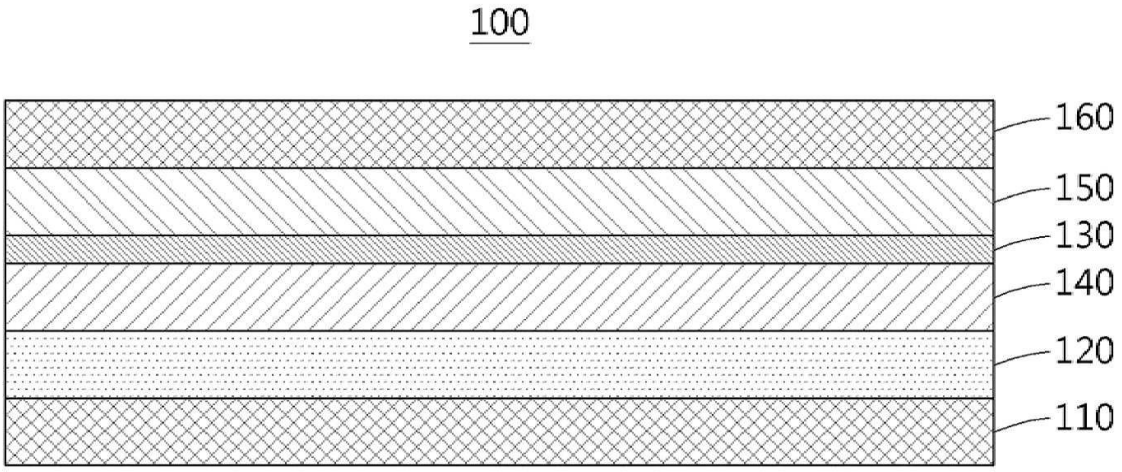
(54) 발명의 명칭 **페로브스카이트 광전소자 및 이의 제조방법**

(57) 요 약

본 발명은 페로브스카이트 광전소자 및 이의 제조방법을 개시한다. 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자는 제1 전극; 상기 제1 전극 상에 형성된 정공 전달층; 상기 정공 전달층 상에 형성되고, 제1 페로브스카이트 화합물로 형성된 페로브스카이트층; 상기 페로브스카이트층 상에 형성된 전자 전달층; 상기 전자 전달층 상

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도1a



에 형성된 제2 전극; 및 상기 페로브스카이트층의 적어도 일면에 형성되고, 제2 페로브스카이트 화합물로 형성된 경사 벽(graded-wall)을 포함하고, 상기 제1 페로브스카이트 화합물 및 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 하기 화학식 1로 표시되며, 상기 경사 벽의 밴드 갭 에너지는 상기 페로브스카이트층의 밴드 갭 에너지보다 커서 상기 페로브스카이트층의 엑시톤을 구속하는 것을 특징으로 한다.

[화학식 1]

$A_aM_bX_c$

(상기 화학식 1에서, A는 1가의 양이온이고, M은 2가 또는 3가의 금속 양이온이며, X는 1가의 음이온이고, M이 2가의 금속 양이온일 때 a+2b=c, M이 3가의 금속 양이온일 때 a+3b=c이며, a, b, c는 자연수임.)

(52) CPC특허분류
Y10S 977/812 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 20183010013820
부처명 산업통상자원부
과제관리(전문)기관명 한국에너지기술평가원
연구사업명 에너지기술개발사업
연구과제명 비납계 페로브스카이트 소재 및 친환경 인쇄공정을 통한모듈 개발
기 여 율 1/5
과제수행기관명 고려대학교
연구기간 2018.06.01 ~ 2022.05.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2014R1A5A1009799
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 선도연구센터
연구과제명 결정기능화공정기술개발
기 여 율 1/5
과제수행기관명 경희대학교 산학협력단
연구기간 2018.03.01 ~ 2021.02.28
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2015M1A2A2055631
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 기후변화대응기술개발
연구과제명 고효율 무연페로브스카이트 태양전지 기술 개발
기 여 율 1/5
과제수행기관명 고려대학교
연구기간 2018.08.19 ~ 2019.08.18
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 20163010012470
부처명 산업통상자원부
과제관리(전문)기관명 한국에너지기술평가원
연구사업명 에너지기술개발사업
연구과제명 고효율(16% 이상) 대면적 (15 cm x 15 cm) 인쇄공정 기반페로브스카이트 태양전지 모듈
기 여 율 1/5
과제수행기관명 한국화학연구원
연구기간 2018.08.19 ~ 2019.08.18
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 2017M3A7B4041696
부처명 미래창조과학부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 원천기술개발사업
연구과제명 용액 공정용 고효율, 고내구성 페로브스카이트 발광 소재개발
기 여 율 1/5
과제수행기관명 고려대학교 산학협력단
연구기간 2017.06.01 ~ 2022.05.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

제1 전극;

상기 제1 전극 상에 형성된 정공 전달층;

상기 정공 전달층 상에 제1 페로브스카이트 화합물로 형성된 페로브스카이트층;

상기 페로브스카이트층 상에 형성된 전자 전달층;

상기 전자 전달층 상에 형성된 제2 전극; 및

상기 페로브스카이트층의 적어도 일면에 제2 페로브스카이트 화합물로 형성된 경사 벽(graded-wall)을 포함하고,

상기 제1 페로브스카이트 화합물 및 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 하기 화학식 1로 표시되며,

상기 경사 벽의 밴드 갭 에너지는 상기 페로브스카이트층의 밴드 갭 에너지보다 커서 상기 페로브스카이트층의 엑시톤을 구속하는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

[화학식 1]

$A_aM_bX_c$

(상기 화학식 1에서, A는 1가의 양이온이고, M은 2가 또는 3가의 금속 양이온이며, X는 1가의 음이온이고, M이 2가의 금속 양이온일 때 a+2b=c, M이 3가의 금속 양이온일 때 a+3b=c이며, a, b, c는 자연수임.)

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 경사 벽은 상기 정공 전달층 및 상기 페로브스카이트층 사이에 형성되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 경사 벽은 상기 전자 전달층 및 상기 페로브스카이트층 사이에 형성되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 경사 벽은 상기 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 형성되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 페로브스카이트층의 밴드 갭 에너지는 1eV 내지 5eV인 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 6

제4항에 있어서,

상기 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 형성된 경사 벽의 적어도 어느 하나는 상기 페로브스카이트층보다 밴드 갭 에너지가 큰 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 7

제4항에 있어서,

상기 경사 벽의 밴드 갭 에너지는 상기 경사 벽이 형성된 페로브스카이트층의 밴드 갭 에너지보다 0.01eV 내지 4eV 큰 값을 가지는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 경사 벽 및 상기 페로브스카이트층에 포함된 물질 조성 프로파일(graded compositional profile)이 연속적으로 변하는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 경사 벽의 두께는 0.5nm 내지 100,000nm인 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 페로브스카이트 광전소자의 전류효율은 10cd/A 내지 150cd/A인 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 페로브스카이트 광전소자의 외부양자효율은 2% 내지 30%인 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자.

청구항 12

기판 상에 제1 전극을 형성하는 단계;

상기 제1 전극 상에 정공 전달층을 형성하는 단계;

상기 정공 전달층 상에 하기 화학식 1로 표시되는 제1 페로브스카이트 화합물로 페로브스카이트층을 형성하는 단계;

상기 페로브스카이트층 상에 전자 전달층을 형성하는 단계;

상기 전자 전달층 상에 제2 전극을 형성하는 단계; 및

상기 페로브스카이트층의 적어도 일면에 제2 페로브스카이트 화합물로 경사 벽(graded-wall)을 형성하는 단계를 포함하고,

상기 제1 페로브스카이트 화합물 및 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 하기 화학식 1로 표시되며,

상기 경사 벽의 밴드 갭 에너지는 상기 페로브스카이트층의 밴드 갭 에너지보다 커서 상기 페로브스카이트층의 엑시톤을 구속하는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자의 제조방법.

[화학식 1]

$A_aM_bX_c$

(상기 화학식 1에서, A는 1가의 양이온이고, M은 2가 또는 3가의 금속 양이온이며, X는 1가의 음이온이고, M이 2가의 금속 양이온일 때 a+2b=c, M이 3가의 금속 양이온일 때 a+3b=c이며, a, b, c는 자연수임.)

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 경사 벽은 상기 정공 전달층 및 상기 페로브스카이트층 사이에 형성되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자의 제조방법.

청구항 14

제12항에 있어서,

상기 경사 벽은 상기 전자 전달층 및 상기 페로브스카이트층 사이에 형성되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자의 제조방법.

청구항 15

제12항에 있어서,

상기 경사 벽은 상기 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 형성되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자의 제조방법.

청구항 16

제12항에 있어서,

상기 경사 벽은 상기 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면 중 적어도 어느 하나에 상기 제2 페로브스카이트 화합물이 스프레이 코팅(spray coating)되어 형성되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자의 제조방법.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 스프레이 코팅은 0.1초 내지 100,000초 동안 수행되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자의 제조방법.

청구항 18

제16항에 있어서,

상기 스프레이 코팅이 수행되는 시간에 따라 상기 경사 벽의 두께가 조절되는 것을 특징으로 하는 페로브스카이트 광전소자의 제조방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 페로브스카이트 광전소자 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 최근 페로브스카이트 발광소자(PLED)는 높은 광 발광 양자 수율, 20 nm 이하의 선폭(fwhm)으로 인한 높은 색 순도, 편리한 밴드 갭 조정 가능성 및 우수한 특성으로 인해 집중적으로 연구되었다.

[0004] 따라서 최대 외부 양자 효율(EQE_{max})이 20%를 초과하고, 최대 전류 효율(CE_{max})이 80cd/A가 넘는 PELD가 개발되었다.

[0005] 그러나, 종래의 PLED의 안정성은 매우 낮으므로, 상업적으로 적용되기 어렵다는 문제점이 있다.

[0006] 이러한 내구성 문제를 해결하기 위해 고내구성 및 고안정성의 PLED에 대한 연구가 진행되고 있으나, 이러한 PLED를 개발하는 것은 매우 어려운 실정이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 한국 공개특허공보 제10-2018-0106851호, "페로브스카이트 화합물을 포함하는 광전 변환 소자 및 이를 포함하는 촬상 장치"

(특허문헌 0002) 한국 등록특허공보 제10-1755333호, "무/유기 하이브리드 페로브스카이트 화합물 막을 포함하는 소자의 제조방법 및 무/유기 하이브리드 페로브스카이트 화합물 막을 포함하는 소자"

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명의 실시예는 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면의 적어도 어느 하나에 페로브스카이트층을 이루는 페로브스카이트 화합물보다 밴드 갭 에너지가 큰 경사 벽을 형성하여, 엑시톤 결합 에너지를 증가시킴으로써 페로브스카이트 광전소자의 전기적 성능을 향상시키는 페로브스카이트 광전소자 및 이의 제조방법을 제공하고자 한다.

과제의 해결 수단

[0011] 본 발명에 따른 페로브스카이트 광전소자는 제1 전극; 상기 제1 전극 상에 형성된 정공 전달층; 상기 정공 전달층 상에 제1 페로브스카이트 화합물로 형성된 페로브스카이트층; 상기 페로브스카이트층 상에 형성된 전자 전달층; 상기 전자 전달층 상에 형성된 제2 전극; 및 상기 페로브스카이트층의 적어도 일면에 제2 페로브스카이트 화합물로 형성된 경사 벽(graded-wall)을 포함하고, 상기 제1 페로브스카이트 화합물 및 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 하기 화학식 1로 표시되며, 상기 경사 벽의 밴드 갭 에너지는 상기 페로브스카이트층의 밴드 갭 에

너지보다 커서 상기 페로브스카이트층의 엑시톤을 구속하는 것을 특징으로 한다.

[0012] [화학식 1]

[0013] $A_aM_bX_c$

[0014] (상기 화학식 1에서, A는 1가의 양이온이고, M은 2가 또는 3가의 금속 양이온이며, X는 1가의 음이온이고, M이 2가의 금속 양이온일 때 a+2b=c, M이 3가의 금속 양이온일 때 a+3b=c이며, a, b, c는 자연수임.)

[0015] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 경사 벽은 상기 정공 전달층 및 상기 페로브스카이트층 사이에 형성될 수 있다.

[0016] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 경사 벽은 상기 전자 전달층 및 상기 페로브스카이트층 사이에 형성될 수 있다.

[0017] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 경사 벽은 상기 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 형성될 수 있다.

[0018] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 페로브스카이트층의 밴드 갭 에너지는 1eV 내지 5eV일 수 있다.

[0019] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 형성된 경사 벽의 적어도 어느 하나는 상기 페로브스카이트층보다 밴드 갭 에너지가 클 수 있다.

[0020] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 경사 벽의 밴드 갭 에너지는 상기 경사 벽이 형성된 페로브스카이트층의 밴드 갭 에너지보다 0.01eV 내지 4eV 큰 값을 가질 수 있다.

[0021] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 경사 벽에 포함된 음이온의 조성 프로파일(graded compositional profile)은 연속적으로 변할 수 있다.

[0022] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 경사 벽의 두께는 0.5nm 내지 100,000nm일 수 있다.

[0023] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 페로브스카이트 광전소자의 전류효율은 10cd/A 내지 150cd/A일 수 있다.

[0024] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자에 따르면, 상기 페로브스카이트 광전소자의 외부양자효율은 2% 내지 30%일 수 있다.

[0025] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법은, 기판 상에 제1 전극을 형성하는 단계; 상기 제1 전극 상에 정공 전달층을 형성하는 단계; 상기 정공 전달층 상에 하기 화학식 1로 표시되는 제1 페로브스카이트 화합물로 페로브스카이트층을 형성하는 단계; 상기 페로브스카이트층 상에 전자 전달층을 형성하는 단계; 상기 전자 전달층 상에 제2 전극을 형성하는 단계; 및 상기 페로브스카이트층의 적어도 일면에 제2 페로브스카이트 화합물로 경사 벽(graded-wall)을 형성하는 단계를 포함하고, 상기 제1 페로브스카이트 화합물 및 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 하기 화학식 1로 표시되며, 상기 경사 벽의 밴드 갭 에너지는 상기 페로브스카이트층의 밴드 갭 에너지보다 커서 상기 페로브스카이트층의 엑시톤을 구속하는 것을 특징으로 한다.

[0026] [화학식 1]

[0027] $A_aM_bX_c$

[0028] (상기 화학식 1에서, A는 1가의 양이온이고, M은 2가 또는 3가의 금속 양이온이며, X는 1가의 음이온이고, M이 2가의 금속 양이온일 때 a+2b=c, M이 3가의 금속 양이온일 때 a+3b=c이며, a, b, c는 자연수임.)

[0029] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법에 따르면, 상기 경사 벽은 상기 정공 전달층 및 상기 페로브스카이트층 사이에 형성될 수 있다.

[0030] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법에 따르면, 상기 경사 벽은 상기 전자 전달층 및 상기 페로브스카이트층 사이에 형성될 수 있다.

[0031] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법에 따르면, 상기 경사 벽은 상기 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 형성될 수 있다.

[0032] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법에 따르면, 상기 경사 벽은 상기 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면 중 적어도 어느 하나에 상기 제2 페로브스카이트 화합물이 스프레이 코팅(spray coating)되어 형성될 수 있다.

[0033] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법에 따르면, 상기 스프레이 코팅은 0.1초 내지 100,000초 동안 수행될 수 있다.

[0034] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법에 따르면, 상기 스프레이 코팅이 수행되는 시간에 따라 상기 경사 벽의 두께가 조절될 수 있다.

발명의 효과

[0036] 본 발명의 실시예에 따르면, 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면의 적어도 어느 하나에 페로브스카이트층을 이루는 페로브스카이트 화합물보다 밴드 갭 에너지가 큰 경사 벽을 형성하여, 엑시톤 결합 에너지를 증가시킴으로써 페로브스카이트 광전소자의 전기적 성능을 향상시킬 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0038] 도 1a는 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제1 구조를 도시한 단면도이고, 도 1b는 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제2 구조를 도시한 단면도이며, 도 1c는 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제3 구조를 도시한 단면도이다.

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법을 도시한 순서도이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 경사 벽 형성 시 스프레이 코팅 시간에 따른 페로브스카이트 광전소자의 발광 모습을 도시한 이미지이다.

도 4a는 본 발명의 비교예에 따른 페로브스카이트 광전소자를 평면에서 촬영한 전자주사현미경(scanning electron microscopy, SEM) 이미지이고, 도 4b는 본 발명의 실시예 1에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 평면을 촬영한 SEM 이미지이며, 도 4c는 본 발명의 실시예 2에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 평면을 촬영한 SEM 이미지이고, 도 4d는 본 발명의 실시예 3에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 평면을 촬영한 SEM 이미지이다.

도 5a는 본 발명의 비교예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 조성 깊이 분포(compositional depth profile)를 도시한 TOF-SIMS(time-of-flight secondary ion mass spectroscopy) 그래프이고, 도 5b는 본 발명의 실시예 1에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 조성 깊이 분포를 도시한 TOF-SIMS 그래프이며, 도 5c는 본 발명의 실시예 2에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 조성 깊이 분포를 도시한 TOF-SIMS 그래프이고, 도 5d는 본 발명의 실시예 3에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 조성 깊이 분포를 도시한 TOF-SIMS 그래프이다.

도 6은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 광 루미네선스(phoholuminescence, PL) 강도를 도시한 그래프이다.

도 7은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 일시적 PL 감소를 도시한 그래프이다.

도 8a는 본 발명의 비교예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 엑시톤 결합 에너지를 도시한 그래프이고, 도 8b는 본 발명의 실시예 1에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 엑시톤 결합 에너지를 도시한 그래프이며, 도 8c는 본 발명의 실시예 2에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 엑시톤 결합 에너지를 도시한 그래프이고, 도 8d는 본 발명의 실시예 3에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 엑시톤 결합 에너지를 도시한 그래프이다.

도 9a는 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 광전자방출 개시(photoemission onset)에 대한 자외선광전자분광(ultra-violet photoelectron spectroscopy, UPS) 스펙트럼이며, 도 9b는 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 원자가 밴드 엣지(valance band edge)에 대한 자외선광전자분광(ultra-violet photoelectron spectroscopy, UPS) 스펙트럼이다.

도 10은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 휘도를 도시한 그래프이다.

도 11은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 전류효율을 도시한 그래프이다.

도 12는 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 외부양자효율(external quantum efficiency, EQE)를 도시한 그래프이다.

도 13은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 정규화된 전계발광(electroluminescence, EL) 스펙트럼이다.

도 14는 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 휘도를 도시한 그래프이다.

도 15는 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 전류효율을 도시한 그래프이다.

도 16은 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 EQE를 도시한 그래프이다.

도 17은 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 정규화 EL 스펙트럼이다.

도 18은 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 CIE 좌표를 도시한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0039] 이하 첨부 도면들 및 첨부 도면들에 기재된 내용들을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세하게 설명하지만, 본 발명이 실시예에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다.

[0040] 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, 단계는 하나 이상의 다른 구성요소, 단계의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

[0041] 본 명세서에서 사용되는 "실시예", "예", "측면", "예시" 등은 기술된 임의의 양상(aspect) 또는 설계가 다른 양상 또는 설계들보다 양호하다거나, 이점이 있는 것으로 해석되어야 하는 것은 아니다.

[0042] 또한, '또는'이라는 용어는 배타적 논리합 'exclusive or'이기보다는 포함적인 논리합 'inclusive or'를 의미한다. 즉, 달리 언급되지 않는 한 또는 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 'x가 a 또는 b를 이용한다'라는 표현은 포함적인 자연 순열들(natural inclusive permutations) 중 어느 하나를 의미한다.

[0043] 또한, 본 명세서 및 청구항들에서 사용되는 단수 표현("a" 또는 "an")은, 달리 언급하지 않는 한 또는 단수 형태에 관한 것이라고 문맥으로부터 명확하지 않는 한, 일반적으로 "하나 이상"을 의미하는 것으로 해석되어야 한다.

[0044] 아래 설명에서 사용되는 용어는, 연관되는 기술 분야에서 일반적이고 보편적인 것으로 선택되었으나, 기술의 발달 및/또는 변화, 관례, 기술자의 선호 등에 따라 다른 용어가 있을 수 있다. 따라서, 아래 설명에서 사용되는 용어는 기술적 사상을 한정하는 것으로 이해되어서는 안 되며, 실시예들을 설명하기 위한 예시적 용어로 이해되어야 한다.

[0045] 또한, 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 설명 부분에서 상세한 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 아래 설명에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌 그 용어가 가지는 의미와 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 이해되어야 한다.

[0046] 다른 정의가 없다면, 본 명세서에서 사용되는 모든 용어(기술 및 과학적 용어를 포함)는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 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.

[0047] 한편, 본 발명의 설명함에 있어서, 관련된 공지 기능 또는 구성에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필

요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는, 그 상세한 설명을 생략할 것이다. 그리고, 본 명세서에서 사용되는 용어(terminology)들은 본 발명의 실시예를 적절히 표현하기 위해 사용된 용어들로서, 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 본 발명이 속하는 분야의 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 본 용어들에 대한 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.

[0049] 도 1a는 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제1 구조를 도시한 단면도이고, 도 1b는 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제2 구조를 도시한 단면도이며, 도 1c는 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제3 구조를 도시한 단면도이다.

[0050] 도 1a 내지 도 1c를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)는 기판(미도시), 제1 전극(110), 제1 전극(110) 상에 형성된 정공 전달층(120), 정공 전달층(120) 상에 제1 페로브스카이트 화합물로 형성된 페로브스카이트층(140), 페로브스카이트층(140) 상에 형성된 전자 전달층(150), 전자 전달층(150) 상에 형성된 제2 전극(160), 페로브스카이트층(140)의 적어도 일면에 제2 페로브스카이트 화합물로 형성된 경사 벽(130)(graded-wall)을 포함한다.

[0051] 기판은 무기물 기판 또는 유기물 기판이 사용될 수 있다.

[0052] 무기물 기판은 유리, 석영(Quartz), Al_2O_3, SiC, Si, GaAs 또는 InP로 이루어질 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0053] 유기물 기판은 켑톤 호일, 폴리이미드(polyimide, PI), 폴리에테르술폰(polyethersulfone, PES), 폴리아크릴레이트(polyacrylate, PAR), 폴리에테르 이미드(polyetherimide, PEI), 폴리에틸렌 나프탈레이트(polyethylene naphthalate, PEN), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET), 폴리페닐렌 설파이드(polyphenylene sulfide, PPS), 폴리아릴레이트(polyarylate), 폴리카보네이트(polycarbonate, PC), 셀룰로오스 트리아세테이트(cellulose triacetate, CTA) 및 셀룰로오스 아세테이트 프로피오네이트(cellulose acetate propionate, CAP)로부터 선택되는 것일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0054] 무기물 기판 및 유기물 기판은 광이 투과되는 투명한 소재로 이루어지는 것이 더욱 바람직하고, 통상적으로 기판은 전면 전극 상에 위치할 수 있는 기판이면 사용 가능하다. 유기물 기판을 도입하는 경우, 전극의 유연성을 높일 수 있다.

[0055] 제1 전극(110)은 기판 상에 위치하며 전도성 전극, 특히 광의 투과를 향상시키기 위해 투명 전도성 전극이 바람직하다. 예를 들어, 제1 전극(110)은 광이 수광되는 측에 구비되는 전극인 전면전극에 해당할 수 있다.

[0056] 제1 전극(110)은 예를 들어, 불소 함유 산화주석(Fluorine doped Tin Oxide, FTO), 인듐 함유 산화주석(Indium doped Tin Oxide, ITO), 알루미늄 함유 산화아연(Al-doped Zinc Oxide, AZO), 인듐 함유 산화아연(Indium doped Zinc Oxide, IZO) 또는 이들의 혼합물로 이루어지는 군에서 선택될 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0057] 바람직하게는, 제1 전극(110)은 페로브스카이트층(140)의 최고준위 점유 분자궤도(HOMO; highest occupied molecular orbital) 준위로 정공의 주입이 용이하도록 일함수가 크면서 투명한 전극인 ITO를 포함할 수 있다.

[0058] 제1 전극(110)은 기판 상에 열기상증착(thermal evaporation), 전자빔증착(e-beam evaporation), RF 스퍼터링(Radio Frequency sputtering), 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering), 진공증착(vacuum deposition) 또는 화학적 증착(chemical vapor deposition) 등의 방법으로 형성될 수 있다.

[0059] 또한, 제1 전극(110)은 OMO (O = organic (유기물) 또는 metal oxide (금속산화물), M = metal (금속)) 구조의 투명 전도성 전극을 포함할 수 있다.

[0060] 실시예에 따라서, 제1 전극(110)은 면 저항이 1 Ω/cm^2 내지 1000 Ω/cm^2 이며, 투과율은 80 % 내지 99.9 %일 수 있다.

[0061] 제1 전극(110)의 면 저항이 1 Ω/cm^2 미만일 경우, 투과율이 저하되어 투명전극으로 사용이 어렵고, 1000 Ω/cm^2 초과일 경우, 면 저항이 높아 소자의 성능이 저하되는 단점이 있다.

[0062] 또한 제1 전극(110)의 투과율이 80% 미만일 경우 광 추출이나 빛의 투과가 낮아 소자의 성능이 저하되는 단점이

있고, 99.9% 초과일 경우, 면 저항이 높아 소자의 성능이 저하되는 단점이 있다.

[0063] 정공 전달층(120)은 도 1a에 도시된 바와 같이 제1 전극(110)과 페로브스카이트층(140) 사이에 위치할 수 있다.

[0064] 실시예에 따라서, 정공 전달층(120)은 도 1b에 도시된 바와 같이 제1 전극(110)과 경사 벽(130) 사이에 위치할 수 있다.

[0065] 실시예에 따라서, 정공 전달층(120)은 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)가 발광소자로 사용되는 경우, 제1 전극(110)으로부터 주입된 정공을 페로브스카이트층(140)으로 이동시키는 역할을 하고, 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)가 태양전지로 사용되는 경우, 페로브스카이트층(140)에서 생성된 정공을 제1 전극(110)으로 용이하게 전달되도록 할 수 있다.

[0066] 정공 전달층(120)은 P3HT (poly[3-hexylthiophene]), MDMO-PPV (poly[2-methoxy-5-(3',7'-dimethyloctyloxyl)]-1,4-phenylene vinylene), MEH-PPV (poly[2-methoxy-5-(2''-ethylhexyloxy)-p-phenylene vinylene]), P3OT (poly(3-octyl thiophene)), POT(poly(octyl thiophene)), P3DT (poly(3-decyl thiophene)), P3DDT (poly(3-dodecyl thiophene), PPV (poly(p-phenylene vinylene)), TFB (poly(9,9'-dioctylfluorene-co-N-(4-butylphenyl)diphenyl amine), Polyaniline, Spiro-MeOTAD ([2,22′ '-tetrkis (N,N-dipmethoxyphenylamine)-9,9,9′ '-spirobi fluorine]), CuSCN, CuI, MoOx, VOx, NiOx, CuOx, PCPDTBT (Poly[2,1,3-benzothiadiazole-4,7-diyl[4,4-bis(2-ethylhexyl-4H- cyclopenta [2,1-b:3,4-b']dithiophene-2,6-diyl]], Si-PCPDTBT (poly[(4,4′ '-bis(2-ethylhexyl)dithieno[3,2-b:2′ ',3′ '-d]silole)-2,6-diyl-alt-(2,1,3-benzothiadiazole)-4,7-diyl]), PBDTTPD (poly((4,8-diethylhexyloxyl) benzo([1,2-b:4,5-b']dithiophene)-2,6-diyl)-alt-((5-octylthieno[3,4-c]pyrrole-4,6-dione)-1,3-diyl)), PFDTBT (poly[2,7-(9-(2-ethylhexyl)-9-hexyl-fluorene)-alt-5,5-(4', 7,-di-2-thienyl-2',1', 3'-benzothiadiazole)]), PFO-DBT (poly[2,7-.9,9-(dioctyl-fluorene)-alt-5,5-(4',7'-di-2-.thienyl-2', 1', 3'-benzothiadiazole)]), PSiFDTBT (poly[(2,7-dioctylsilafluorene)-2,7-diyl-alt-(4,7-bis(2-thienyl)-2,1,3-benzothiadiazole)-5,5-diyl]), PSBTBT (poly[(4,4′ '-bis(2-ethylhexyl)dithieno[3,2-b:2′ ',3′ '-d]silole)-2,6-diyl-alt-(2,1,3-benzothiadiazole)-4,7-diyl]), PCDTBT (Poly [[9-(1-octylnonyl)-9H-carbazole-2,7-diyl]-2,5-thiophenediyl-2,1,3-benzothiadiazole-4,7-diyl-2,5-thiophenediyl]), PFB (poly(9,9′ '-dioctylfluorene-co-bis(N,N′ -(4,butylphenyl))bis(N,N-phenyl-1,4-phenylene)diamine), F8BT (poly(9,9′ '-dioctylfluorene-cobenzothiadiazole), PEDOT (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)), PEDOT:PSS, poly(3,4-ethylenedioxythiophene) poly(styrenesulfonate), PTAA (poly(triarylamine)), poly(4-butylphenyldiphenyl-amine), 4,4'-bis[N-(1-naphtyl)-N-phenylamino]-biphenyl (NPD), PFI(perfluorinated ionomer)와 혼합된 PEDOT:PSS비스(N-(1-나프틸-n-페닐))벤지딘(α-NPD), N,N'-디(나프탈렌-1-일)-N,N'-디페닐-벤지딘 (NPB), N,N'-디페닐-N,N'-비스(3-메틸페닐)-1,1'-디페닐-4,4'-디아민 (TPD), 구리 프탈로시아닌(CuPc), 4,4',4"-트리스(3-메틸페닐아미노)트리페닐아민(m-MTDATA), 4,4',4"-트리스(3-메틸페닐아미노)페녹시벤젠(m-MTDAPB), 스타버스트(starburst)형 아민류인 4,4',4"-트리(N-카바졸릴)트리페닐아민(TCTA), 4,4',4"-트리스(N-(2-나프틸)-N-페닐아미노)-트리페닐아민(2-TNATA) 및 이들의 공중합체에서 적어도 하나 이상 선택될 수 있으나, 상기 물질들에 한정되는 것은 아니다.

[0067] 페로브스카이트층(140)은 정공 전달층(120)과 전자 전달층(150) 사이에 형성될 수 있다.

[0068] 페로브스카이트층(140)을 이루는 제1 페로브스카이트 화합물은 하기의 화학식 1로 표시될 수 있다.

[0069] [화학식 1]

[0070] $A_aM_bX_c$

[0071] (상기 화학식 1에서, A는 1가의 양이온이고, M은 2가 또는 3가의 금속 양이온이며, X는 1가의 음이온이고, M이 2가의 금속 양이온일 때 a+2b=c, M이 3가의 금속 양이온일 때 a+3b=c이며, a, b, c는 자연수임.)

[0072] 구체적으로, A는 1가의 유기 양이온, 1가의 무기 양이온 또는 이들의 조합일 수 있다.

[0073] 페로브스카이트 화합물은 화학식 1 중 A의 종류에 따라, 유무기 하이브리드 페로브스카이트 화합물(organic/inorganic hybrid perovskite compound) 또는 무기금속할라이드 페로브스카이트 화합물(inorganic metal halide perovskite compound)일 수 있다.

[0074] 보다 구체적으로, 화학식 1에서 A가 1가의 유기 양이온일 경우, 페로브스카이트 화합물은 유기물인 A와, 무기물

인 M 및 X로 구성되어 유기물과 무기물이 복합 구성된 유무기 하이브리드 페로브스카이트 화합물일 수 있다.

[0075] 반면, 화학식 1에서 A가 1가의 무기 양이온일 경우, 페로브스카이트 화합물은 무기물인 A, M 및 X로 구성되어 전부 무기물로 구성된 무기금속할라이드 페로브스카이트 화합물일 수 있다.

[0076] 1가의 양이온 A가 유기 양이온일 경우 $C_{1\sim24}$의 직쇄 또는 측쇄 알킬, 아민기(-NH_3), 수산화기(-OH), 시아노기(-CN), 할로겐기, 니트로기(-NO), 메톡시기(-OCH_3) 또는 이미다졸리움기가 치환된 $C_{1\sim24}$의 직쇄 또는 측쇄 알킬 또는 이들의 조합일 수 있다.

[0077] 1가의 양이온 A가 무기 양이온일 경우 Li^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+, Fr^+, $Cu(I)^+$, $Ag(I)^+$, $Au(I)^+$ 또는 이들의 조합일 수 있다.

[0078] 구체적으로, 상기 화학식 1은 M이 2가 금속 양이온인 경우, a+2b=c일 수 있고, M이 3가 양이온인 경우, a+3b=c일 수 있다.

[0079] 2가 금속 양이온은 Pb^{2+}, Sn^{2+}, Ge^{2+}, Cu^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Ti^{2+}, Zr^{2+}, Hf^{2+}, Rf^{2+}, In^{3+}, Bi^{3+}, Co^{3+}, Sb^{3+} 및 Ni^{3+}중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있다.

[0080] 실시예에 따라서, 상기 화학식 1의 M이 상기 3가의 금속 양이온일 경우 In^{3+}, Bi^{3+}, Co^{3+}, Sb^{3+}, Ni^{3+}, Al^{3+}, Ga^{3+}, Tl^{3+}, Sc^{3+}, Y^{3+}, La^{3+}, Ce^{3+}, Fe^{3+}, Ru^{3+}, Cr^{3+}, V^{3+}, Ti^{3+} 또는 이들의 조합일 수 있다.

[0081] 1가 음이온인 X는 F^-, Cl^-, Br^-, I^-, BF_4^-, PF_6^- 및 SCN^-을 포함할 수 있으며, 이온의 크기가 과도하게 큰 물질만 아니라면 상기 물질에 제한되는 것은 아니다.

[0082] 실시예에 따라서, 제1 페로브스카이트 화합물은 단일(single) 구조, 이중(double) 구조, 삼중(triple) 구조, 또는 루들스덴-포퍼(Ruddlesden-Popper) 구조일 수 있다.

[0083] 단일 구조의 페로브스카이트 화합물은 상기 화학식 1의 페르보스카이트가 3차원의 단일상을 가지는 것을 뜻하며, 이중 구조의 페로브스카이트 화합물은 $(A1)_a(M1)_b(X1)_c$ 와 $(A2)_a(M2)_b(X2)_c$ 가 교대로 쌓여서 페로브스카이트층(140)을 형성한 것을 말한다.

[0084] 이때, 화학식 $(A1)_a(M1)_b(X1)_c$ 와 $(A2)_a(M2)_b(X2)_c$에서 A1 및 A2는 동일하거나 서로 다른 1가 양이온이며, M1 및 M2는 동일하거나 서로 다른 2가의 금속 양이온 또는 3가 금속 양이온이고, X1 및 X2는 동일하거나 서로 다른 1가 음이온을 의미한다. 여기서, A1, M1, X1은 A2, M2, X2 와 적어도 1 가지 이상이 다르다.

[0085] 삼중 구조의 페로브스카이트 화합물은 $(A1)_a(M1)_b(X1)_c$ 와 $(A2)_a(M2)_b(X2)_c$ 와 $(A3)_a(M3)_b(X3)_c$ 가 교대로 쌓여서 페로브스카이트 막을 형성한 것이며, 이때 A1, A2, A3는 동일하거나 서로 다른 1가 양이온이며, M1, M2, M3는 동일하거나 서로 다른 2가의 금속 양이온 또는 3가 금속 양이온이고, X1, X2, X3는 동일하거나 서로 다른 1가 음이온을 의미한다. 여기서 A1, M1, X1 와 A2, M2, X2 및 A3, M3, X3는 적어도 서로 1 가지 이상이 다르다.

[0086] 루들스텐-포퍼 구조는 $(A1)_a(M1)_b(X1)_c\{(A2)_a(M2)_b(X2)_c\}_n(A1)_a(M1)_b(X1)_c$ 인 구조이며, 이때 n은 자연수이다.

[0087] 전자 전달층(150)은 페로브스카이트층(140)과 제2 전극(160) 사이에 위치할 수 있다.

[0088] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)가 발광소자로 사용되는 경우, 전자 전달층(150)은 제2 전극(160)으로부터 주입된 전자를 페로브스카이트층(140)으로 이동시킬 수 있고, 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)가 태양전지로 사용되는 경우, 페로브스카이트층(140)에서 생성된 전자가 제2 전극(160)으로 용이하게 전달되도록 할 수 있다.

[0089] 전자 전달층(150)은 플러렌 (fullerene, C60), 플러렌 유도체, 페릴렌 (perylene), TPBi(2,2',2"-(1,3,5-benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1-H-benzimidazole)), PBI (polybenzimidazole) 및 PTCBI (3,4,9,10-perylene-tetracarboxylic bis-benzimidazole), NDI (Naphthalene diimide) 및 이들의 유도체, TiO2, SnO2, ZnO, ZnSnO3, 2,4,6-Tris(3-(pyrimidin-5-yl)phenyl)-1,3,5-triazine, 8-Hydroxyquinolinolato-lithium, 1,3,5-Tris(1-phenyl-1Hbenzimidazol- 2-yl)benzene, 6,6'-Bis[5-(biphenyl-4-yl)-1,3,4-oxadiazo-2-yl]-2,2'-bipyridyl, 4,4'-Bis(4,6-diphenyl-1,3,5-triazin-2-yl)biphenyl(BTB), Rb_2CO_3 (Rubidium carbonate),

ReO_3(Rhenium(VI) oxide) 중 적어도 어느 하나를 포함할 수 있고, 상기 플러렌 유도체는 PCBM ((6,6)-phenyl-C61-butyric acid-methylester) 또는 PCBCR ((6,6)-phenyl-C61-butyric acid cholesteryl ester)일 수 있으나, 상기 물질들에 한정되는 것은 아니다.

[0090] 다만, 인버티드 구조에서는 전자 전달층(150)으로 TiO_2 계열이나 Al_2O_3 계열의 다공성 물질이 주로 사용될 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다.

[0091] 제2 전극(160)은 통상적으로 사용되는 후면 전극이면 무방하다. 구체적으로, 제2 전극(160)은 리튬플로라이드/알루미늄(LiF/Al), 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt), 팔라듐(Pd), 구리(Cu), 알루미늄(Al), 탄소(C), 황화코발트(CoS), 황화구리(CuS), 산화니켈(NiO) 또는 이들의 혼합물일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 제2 전극(160) 또한 제1 전극(110)에서 설명한 방법으로 형성될 수 있으므로 중복 설명은 생략한다.

[0092] 제2 전극(160)으로는 페로브스카이트층(140)의 최고준위 점유 분자궤도 (HOMO) 준위로 전자의 주입이 용이하도록 낮은 일함수를 가지며, 내부 반사율이 뛰어난 금속류의 전극이 사용될 수 있다.

[0093] 경사 벽(130)은 페로브스카이트층(140)의 상부면 및 하부면 중 적어도 어느 하나에 형성되는 것으로서, 경사 벽(130)의 밴드 갭 에너지는 페로브스카이트층(140)의 밴드 갭 에너지보다 커서 페로브스카이트층(140)의 엑시톤을 구속할 수 있다.

[0094] 구체적으로, 경사 벽(130)은 도 1a에 도시된 것과 같이 페로브스카이트층(140)의 상부면에 형성될 수 있다.

[0095] 실시예에 따라서, 경사 벽(130)은 도 1b에 도시된 것과 같이 페로브스카이트층(140)의 하부면에 형성될 수 있다.

[0096] 실시예에 따라서, 경사 벽(130)은 도 1c에 도시된 것과 같이 페로브스카이트층(140)의 상부면 및 하부면에 모두 형성될 수 있으며, 이를 경사 우물(graded-well)이라 한다.

[0097] 경사 벽(130)을 이루는 제2 페로브스카이트 화합물은 상기 화학식 1로 표시되는 것으로서, 페로브스카이트층(140)에 포함된 엑시톤을 구속하여 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 전기적 성능을 향상시킬 수 있다.

[0098] 경사 벽(130)은 상기 제2 페로브스카이트 화합물의 에너지 밴드가 월(wall) 구조를 가지는 것을 의미하는데, 본 발명의 설명에서는 에너지 밴드가 월(wall) 구조를 가지는 제2 페로브스카이트 화합물로 이루어진 층(layer)을 경사 벽이라고 정의한다.

[0099] 경사 우물은 페로브스카이트층(140)의 상부면 및 하부면에 경사 벽(130)이 형성되어 에너지 밴드가 우물(well) 구조를 가지는 것을 의미한다.

[0100] 또한, 본 발명의 설명에서 밴드 갭 에너지는 페로브스카이트층(140)을 이루는 제1 페로브스카이트 화합물과 경사 벽(130)을 이루는 제2 페로브스카이트 화합물의 밴드 갭 에너지를 의미하나, 설명의 편의 상 페로브스카이트층(140) 또는 경사 벽(130)의 밴드 갭 에너지로 설명하도록 한다.

[0101] 실시예에 따라서, 상기 제1 페로브스카이트 화합물과 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 양이온(A)과 금속 양이온(M) 및 음이온(X)가 적어도 하나 이상이 동일하거나 상이할 수 있다.

[0102] 예를 들어, 상기 제1 페로브스카이트 화합물은 $CsPbBr_3$이고, 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 Cs_4PbBr_6일 수 있으며, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0103] 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 상기 제1 페로브스카이트 화합물보다 밴드 갭 에너지가 크다는 점을 제외하고는, 상기 제1 페로브스카이트 화합물과 동일한 특성을 가지므로 중복 설명은 생략한다.

[0104] 경사 벽(130)은 페로브스카이트층(140)에 포함된 엑시톤의 결합 에너지를 증가시켜 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)의 휘도, 발광 강도, 전류효율, 외부양자효율과 같은 전기적 성능을 향상시킬 수 있다.

[0105] 특히, 도 1a에 도시된 페로브스카이트 광전소자(100)는 전자 전달층(150)과 페로브스카이트층(140) 사이에 경사 벽(130)이 형성되어 있어, 경사 벽(130)의 형성에 따라 엑시톤 결합 에너지가 크게 증가되기 때문에 페로브스카이트 광전소자(100)의 휘도, 전기발광(EL) 강도, 포토루미네선스(PL) 강도와 같은 광전기적 특성을 향상시킬 수 있다.

[0106] 또한, 도 1b 및 도 1c에 도시된 페로브스카이트 광전소자(100)는 정공 전달층(120)과 페로브스카이트층(140) 사이에 경사 벽(130)이 형성되어 있어, 경사 벽(130)의 형성에 따라 엑시톤 결합 에너지가 크게 증가되기 때문에 페로브스카이트 광전소자(100)의 광전기적 특성을 향상시킬 수 있다.

[0107] 이하, 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)의 제조방법을 도 2와 함께 설명하면서 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)를 보다 자세히 설명하도록 한다.

[0109] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 제조방법을 도시한 순서도이다.

[0110] 도 2를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)의 제조방법은 기판 상에 제1 전극(110)을 형성하는 단계(S110), 제1 전극(110) 상에 정공 전달층(120)을 형성하는 단계(S120), 정공 전달층(120) 상에 상기 제1 페로브스카이트 화합물로 페로브스카이트층(140)을 형성하는 단계(S130), 페로브스카이트층(140)의 적어도 일면에 제2 페로브스카이트 화합물로 경사 벽(130)(graded-wall)을 형성하는 단계(S140), 페로브스카이트층(140) 상에 전자 전달층(150)을 형성하는 단계(S150), 전자 전달층(150) 상에 제2 전극(160)을 형성하는 단계(S160)를 포함할 수 있다.

[0111] 실시예에 따라서, 단계 S140은 단계 S120 및 단계 S130 사이에만 수행되어 정공 전달층(120) 및 페로브스카이트층(140) 사이에 경사 벽(130)이 형성될 수 있다.

[0112] 실시예에 따라서, 단계 S140은 단계 S120 및 단계 S130 사이와 단계 S130 및 단계 S150 사이에 수행되어, 정공 전달층(120) 및 페로브스카이트층(140)의 사이와 전자 전달층(150) 및 페로브스카이트층(140) 사이에 경사 벽(130)이 형성될 수 있다.

[0113] 경사 벽(130)은 페로브스카이트층(140)의 상부면 및 하부면 중 적어도 어느 하나에 상기 제2 페로브스카이트 화합물을 포함하는 용액이 도포되어 형성될 수 있다.

[0114] 본 발명의 실시예에 따른 경사 벽(130)이 상부면 및 하부면에 형성된 페로브스카이트층(140)은 물질의 조성 프로파일이 연속적으로 변하여, 연속적으로 변하는 밴드 오프 셋 구조를 가질 수 있다.

[0115] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트층(140)의 밴드 갭 에너지는 1eV 내지 5eV일 수 있다.

[0116] 페로브스카이트층(140)의 밴드 갭 에너지는 페로브스카이트층(140)을 이루는 제1 페로브스카이트 화합물의 1가 양이온(A)과 1가 음이온(X)의 종류에 따라 조절이 가능하다.

[0117] 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트층(140)의 상부면 또는 하부면에 형성된 경사 벽의 밴드 갭 에너지는 페로브스카이트층(140)의 밴드 갭 에너지보다 0.01eV 내지 4eV 더 큰 값을 가질 수 있다.

[0118] 실시예에 따라서, 경사 벽(130)이 페로브스카이트층(140)의 상부면 및 하부면에 형성될 때 경사 벽(130)의 밴드 갭 에너지(즉, 경사 우물의 밴드 갭 에너지)는 페로브스카이트층(140)의 밴드 갭 에너지보다 0.01eV 내지 4eV 더 큰 값을 가질 수 있다.

[0119] 0.01 eV 미만의 차이를 가질 경우 엑시톤을 경사 우물 안에 구속할 수 있는 에너지 장벽이 너무 작아 효과적인 엑시톤의 구속이 일어나지 않는 문제점이 있고, 4 eV 초과의 차이를 가질 경우 전극으로부터 전하의 주입이 원활이 이루어지지 않아 소자의 턴온(turn-on) 전압이 올라가며 페로브스카이트 광전소자의 효율이 저하되는 문제점이 있다.

[0120] 실시예에 따라서, 경사 벽(130)을 이루는 물질의 조성 프로파일(graded compositional profile)은 연속적으로 변할 수 있다.

[0121] 구체적으로, $CsPbBr_3$로 형성된 페로브스카이트층(140)에 경사 벽(130)을 이루는 물질인 Cs_4PbBr_6 용액을 도포하면, 페로브스카이트층(140) 계면에서 경사 벽과 페로브스카이트층(140)을 이루는 각각의 물질이 서로 혼합(inter mixing)되어 페로브스카이트층(140)에 경사 벽(130)을 이루는 물질이 확산되어 들어가고 반대로 경사 벽(130)에 페로브스카이트층(140)을 이루는 물질이 확산되어 들어간다.

[0122] 즉, 경사 벽(130) 및 페로브스카이트층(140)을 이루는 물질이 서로 상호 확산되어 경사 벽(130)을 이루는 물질의 조성 프로파일이 연속적으로 변하게 된다.

[0123] 이에 따라, 경사 벽(130)은 페로브스카이트층(140)보다 밴드 갭 에너지가 클 수 있다.

[0124] 경사 벽(130)의 밴드 갭 에너지가 페로브스카이트층(140)의 밴드 갭 에너지보다 클 수 있는 경우로는 크게 경사 벽을 이루는 제2 페로브스카이트 화합물의 조성 변화 및 제2 페로브스카이트 화합물의 구조 변화로 두 가지 경우가 있다.

[0125] 먼저, 제2 페로브스카이트 화합물의 음이온과 제1 페로브스카이트 화합물의 음이온이 동일할 경우, 즉 제1 페로브스카이트 화합물의 음이온의 개수보다 제2 페로브스카이트 화합물의 음이온의 개수가 더 많은 경우, 페로브스카이트 화합물의 구조 변화로 인해 밴드 갭이 커지게 된다.

[0126] 예를 들면, 제1 페로브스카이트 화합물이 $CsPbBr_3$(AX와 MX_2가 혼합된 AMX_3 구조)일 경우, 제2 페로브스카이트 화합물은 AX 또는 MX_2가 더 첨가되어 음이온(X)의 함량이 증가될 수 있다.

[0127] 구체적으로, $CsPbBr_3+nCsBr=Cs_{(1+n)}PbBr_{(3+n)}$에서 n=1이면 Cs_2PbBr_4, n=3이면 Cs_4PbBr_6 등이 제2 페로브스카이트 화합물이 될 수 있다.

[0128] 또는 $nCsPbBr_3+mPbBr_2=Cs_nPb_{(n+m)}Br_{(3n+2m)}$(이때 n= 0 이상의 정수, m 은 1 이상의 정수)를 이용하여 제2 페로브스카이트 화합물의 화학식을 얻을 수 있다.

[0129] 반면, 제1 페로브스카이트 화합물과 제2 페로브스카이트 화합물의 음이온이 서로 다를 경우, 음이온의 종류에 따라 밴드 갭 값을 조절할 수 있다.

[0130] 예를 들면, I < Br <Cl < F 의 순서로 밴드 갭 값이 점점 커지며, 다시 말해 음이온의 크기가 작을수록 밴드 갭 값이 점점 커진다.

[0131] 예를 들면, 제1 페로브스카이트 화합물이 $CsPbBr_3$인 경우, $CsPbBr_{3-x}Cl_x$(이때 x는 0 초과 3 이하)이 제2 페로브스카이트 화합물이 될 수 있다.

[0132] 실시예에 따라서, 제1 페로브스카이트 화합물과 제2 페로브스카이트 화합물의 음이온의 개수 및 음이온의 종류에 따라 밴드 갭을 조절할 수 있다.

[0133] 이에 따라, 본 발명의 실시예에 따른 경사 벽이 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 형성된 경사 우물의 경우, 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 형성된 경사 벽(130) 중 적어도 어느 하나는 페로브스카이트층(140)보다 밴드 갭 에너지가 크고, 다른 하나는 페로브스카이트층보다 밴드 갭 에너지가 작을 수 있다.

[0134] 실시예에 따라서, 페로브스카이트층의 상부면과 하부면에 형성된 두 개의 경사 벽(130)은 페로브스카이트층(140)보다 밴드 갭 에너지가 모두 클 수 있다.

[0135] 실시예에 따라서, 경사 벽(130)은 페로브스카이트층(140)의 상부면 및 하부면 중 적어도 어느 하나에 상기 제2 페로브스카이트 화합물이 포함된 용액을 스프레이 코팅(spray coating) 또는 초음파 스프레이 코팅(ultrasonic spray coating)하여 형성될 수 있다.

[0136] 실시예에 따라서, 상기 스프레이 코팅은 페로브스카이트층(140) 상의 어느 한 지점에 0.1초 내지 100,000초 동안 수행될 수 있다.

[0137] 상기 스프레이 코팅 시간이 0.1 초 미만일 경우, 페로브스카이트층 상에 코팅되는 제2 페로브스카이트 화합물의 양이 부족하여 균일한 박막의 경사 벽을 형성하기 힘든 문제점이 있다.

[0138] 상기 스프레이 코팅 시간이 100,000초를 초과할 경우, 경사 벽이 매우 두꺼운 후막으로 형성되어 박막을 필요로 하는 LED 또는 태양전지에 사용되기 어려운 문제점이 있다.

[0139] 상기 스프레이 코팅을 이용하여 대면적의 경사 벽 형성을 필요로 할 경우, 0.001m/분 내지 20m/분 의 속도로 스프레이 노즐을 이동시키면서 상기 스프레이 코팅 공정을 수행할 수 있다.

[0140] 상기 스프레이 노즐을 0.001m/분 미만의 속도로 이동시킬 경우 공정 속도가 너무 느린 단점이 있고, 20m/분을 초과할 경우 이동 속도가 과도하게 빨라 핀 홀이 없는 균일한 경사 벽을 얻기 힘든 단점이 있다.

[0141] 상기 제2 페로브스카이트 화합물을 포함하는 용액이 스프레이 노즐에 토출되는 토출량은 0.001ml/분 내지 1000ml/분 일 수 있다.

[0142] 상기 토출량이 0.001ml/분 미만일 경우 스프레이 노즐에서 분무되는 상기 제2 페로브스카이트 화합물을 포함하는 용액의 양이 적어 기재에 닿기 전에 용매가 모두 날아가거나 도포되는 양이 적아 공정 시간이 길어지는 단점

이 있고, 1000 ml/분을 초과하는 경우 과량의 용액이 도포되어 건조가 어려워 균일한 막을 얻기 힘든 단점이 있다.

[0143] 경사 벽(130)은 스프레이 코팅 시간에 따라 그 두께가 달라질 수 있다.

[0144] 구체적으로, 경사 벽(130)은 스프레이 코팅 시간이 짧으면 두께가 얇고, 스프레이 코팅 시간이 길면 두께가 두꺼울 수 있다.

[0145] 실시예에 따라서, 경사 벽(130)의 두께는 0.5nm 내지 100,000nm일 수 있다.

[0146] 상기 두께가 0.5 nm 미만일 경우 전면에 균일한 두께로 경사 벽을 형성하기 어려운 단점이 있고, 100, 000nm를 초과할 경우 박막 형태인 LED 및 태양전지에 사용되기 어려운 문제점이 있다.

[0147] 경사 벽(130)을 이루는 상기 제2 페로브스카이트 화합물은 페로브스카이트층(130)을 이루는 상기 제1 페로브스카이트 화합물보다 밴드 갭 에너지가 클 수 있다.

[0148] 그리하여, 페로브스카이트층(140)에 포함된 엑시톤이 페로브스카이트층(140) 내에 구속되어 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)의 광전 효율성이 향상될 수 있다.

[0149] 페로브스카이트층(140)의 적어도 어느 일 면에 경사 벽(130)이 형성됨에 따라 엑시톤 구속 효과가 발생하여, 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)의 전류효율은 10cd/A 내지 150cd/A일 수 있다.

[0150] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자(100)의 외부양자효율은 2% 내지 30%일 수 있다.

[0151] 이하, 본 발명에 따른 페로브스카이트 광전소자를 제조예에 따라 제조한 후, 비교예 및 실시예를 통하여 페로브스카이트 광전소자의 특성 및 효과를 평가하였다.

[0153] **제조예**

[0154] **1. 재료**

[0155] 패턴화된 ITO 유리(인듐이 도핑된 산화 주석, 12Ω)는 하나린텍(HANALINTECH)에서 구입하였고, 세정액(Micro-90)은 CnP 사이언스(CnP Science)로부터 구입하였다.

[0156] 브롬화세슘(CsBr, 99.999%), 브롬화납($PbBr_2$, 99.999%), 브롬화수소산(HBr, 48중량 %), DMSO(dimethylsulfoxide, 99.7%), DMF(N, N- dimethylformamide, 99.8%), PFI (tetrafluoroethylene-perfluoro-3,6dioxa-4-methyl-7-octenesulfonic acid copolymer, 5중량%) 및 플루오르화리튬(LiF, 99.995%)를 시그마-알드리치 사(Sigma-Aldrich)로부터 구입하였다.

[0157] TPBi(2,2',2"-(1,3,5-benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1-H-benzimidazole),> 98.0 %)는 TCI 케미칼 사(TCI Chemicals)로부터 구입하였다.

[0158] 또한, PEDOT:PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate), PH500)는 클레비오스(CLEVIOS™)에서 구입하였다.

[0159] 메탄올, 에탄올 및 아세톤은 삼천 케미칼(SAMCHUN CHEMICALS)에서 구입하였으며 모든 시약은 정제하지 않고 사용하였다.

[0161] **2. 자기조립 전도성 폴리머층(self-organized conducting polymer, SOCP)의 제조**

[0162] SOCP 용액은 PEDOT : PSS와 PFI를 1 : 11.2의 비율로 혼합한 다음, 소량의 DMSO를 첨가하여 제조하였다.

[0163] SOCP 용액을 세정된 ITO 유리 기판 위에 2000rpm으로 60초 동안 스핀 코팅한 다음, 150℃에서 30분 동안 핫 플레이트(hot plate) 상에서 열처리하였다.

[0165] **3. 페로브스카이트 전구체 용액의 제조**

[0166] 먼저, $PbBr_2$/HBr 용액(3.67g/8mL)과 CsBr/H_2O 용액(2.12g/3mL)을 반응시켜 $CsPbBr_3$ 페로브스카이트 분말을 제조

하였다.

[0167] 용액 내 오렌지색의 $CsPbBr_3$ 페로브스카이트 분말을 여과에 의해 회수한 다음, DMSO에 용해시키고 에탄올에 의해 재결정화시킨 후 진공 오븐 내에서 60℃에서 12시간 동안 건조시켰다.

[0168] $CsPbBr_3$ 페로브스카이트 전구체 용액은 $CsPbBr_3$ 페로브스카이트 분말(2mmol, 1.160g)을 60℃에서 DMSO(8mL)와 DMF(2mL)의 혼합 용액에 완전히 용해시켜 제조하였다.

[0169] Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액은 $CsPbBr_3$ 페로브스카이트 분말(0.25mmol, 0.145g)과 $CsPbBr_3$ 페로브스카이트 분말 (0.5mmol, 0.107g)을 60 ℃에서 DMSO(10mL)에 완전히 녹인 후 메탄올(1mL)을 더 첨가하여 제조하였다.

[0171] **4. 경사 벽이 형성된 페로브스카이트층의 제조**

[0172] 페로브스카이트 전구체 용액은 대기 중에서 초음파 분무 코팅 시스템에 의해 증착되었다.

[0173] 초음파 분사 노즐은 세라토크(CERATORQ) 사에 의해 제조되었으며, 동작 주파수는 80kHz이다.

[0174] 보텍스 에어 디플렉터(vortex air deflector)는 초음파 스프레이 노즐에 장착되어 페로브스카이트층의 균일성과 도포성을 향상시켰다.

[0175] 페로브스카이트 전구체 용액은 시린지 펌프(KDS 100, KD Scientific) ($CsPbBr_3$ 페로브스카이트 전구체 용액: 0.7mL/분, Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액: 1.0mL/분)에 의해 초음파 분무 노즐에 직접 공급되었다.

[0176] 기판 상에 페로브스카이트 전구체 용액의 액적을 운반하기 위한 캐리어 가스로서 N_2 가스를 사용하였다.

[0177] N_2 가스의 압력 및 노즐과 기판의 거리는 각각 7psi 및 50mm로 설정되었고 모든 증착 과정에 대해 일정하게 유지되었으며, 증착 온도는 150℃였다.

[0179] **5. 페로브스카이트 광전소자의 제조**

[0180] 패턴화된 ITO 유리 기판(ITO 기판 = 25mm X 25mm, 에칭 면적 = 10mm X 25mm)을 세정 용액, 탈이온수, 아세톤 및 에탄올로 순차적으로 세척한 다음 압축 N_2 가스로 건조시켰다.

[0181] 세정된 ITO 유리 기판을 1분 동안 아르곤(Ar) 플라즈마 처리하여 유기 잔류 물을 제거하고 표면을 친수성으로 만들었다.

[0182] 표면이 친수성화된 ITO 유리 기판 상에 SOCP 용액을 스핀 코팅한 후 어닐링 하여 정공 전달층을 형성하였다.

[0183] $CsPbBr_3$ 페로브스카이트층 및 Cs_4PbBr_6 경사 벽은 초음파 분무 코팅 시스템에 의해 형성되었다.

[0184] 페로브스카이트층 및 경사 벽의 두께는 스프레이 코팅 시간($CsPbBr_3$=300초, Cs_4PbBr_6=0, 10, 20 및 30초)에 의해 제어되었다.

[0185] 페로브스카이트층 및 경사 벽을 증착한 후, $<10^{-6}$토르에서 고 진공 열 증발기에 의해 TPBi를 70nm, LiF를 1nm, Al을 60nm를 순차적으로 증착하여 전자 전달층 및 제2 전극을 형성하였으며, 증착 속도는 각각 0.5, 0.1 및 2 Å/s이다.

[0186] 활성 영역은 $0.16cm^2$로 고정되었고, 모든 장치는 N_2 분위기에서의 측정 전에 캡슐화되었다.

[0188] **실시예**

[0189] **[실시예 1]**

[0190] 정공 전달층 상에 형성된 페로브스카이트층 상에 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 10초 동안 스프레이 코팅하여 경사 벽을 형성한 페로브스카이트 광전소자.

[0192] **[실시예 2]**

[0193] Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 20초 동안 스프레이 코팅한 것을 제외하고는, [실시예 1]과 동일하게 제조된 페로브스카이트 광전소자.

[0195] **[실시예 3]**

[0196] Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 30초 동안 스프레이 코팅한 것을 제외하고는, [실시예 1]과 동일하게 제조된 페로브스카이트 광전소자.

[0198] **[실시예 4]**

[0199] 정공 전달층 상에 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 20초 동안 스프레이 코팅하여 경사 벽을 형성한 후 경사 벽 상에 페로브스카이트층을 형성한 것을 제외하고는, [비교예]과 동일하게 제조된 페로브스카이트 광전소자.

[0201] **[실시예 5]**

[0202] 정공 전달층 상에 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 20초 동안 스프레이 코팅하여 경사 벽을 형성한 후, 경사 벽 상에 페로브스카이트 층을 형성한 다음, 페로브스카이트층 상에 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 10초 동안 스프레이 코팅하여 제조된 페로브스카이트 광전소자.

[0204] **[실시예 6]**

[0205] 페로브스카이트층 상에 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 20초 동안 스프레이 코팅한 것을 제외하고는, [실시예 5]와 동일하게 제조된 페로브스카이트 광전소자.

[0207] **[실시예 7]**

[0208] 페로브스카이트층 상에 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 30초 동안 스프레이 코팅한 것을 제외하고는, [실시예 5]와 동일하게 제조된 페로브스카이트 광전소자.

[0210] **[비교예]**

[0211] 정공 전달층 상에 $CsPbBr_3$ 페로브스카이트 전구체 용액을 스프레이 코팅하여 페로브스카이트층이 형성된 페로브스카이트 광전소자.

[0213] 상기 실시예 및 비교예를 경사 벽의 유무 및 스프레이 코팅 시간에 따라 정리하면 아래의 표 1 및 표 2와 같다.

[0214] [표 1]

구분	경사 벽 유무	경사 벽 갯수	스프레이 코팅 시간
비교예 1($CsPbBr_3$)	X	0	-
실시예 1(G-wall 10s)	O	1	10초
실시예 2(G-wall 20s)	O	1	20초
실시예 3(G-wall 30s)	O	1	30초

[0215]

[0216] [표 2]

구분	경사 벽 유무	경사 벽 갯수	스프레이 코팅 시간
실시예 4(G-wall 20s/$CsPbBr_3$)	O	1	20초
실시예 5(20s/G-well/10s)	O	2(경사 우물, G-well)	20초/10초
실시예 6(20s/G-well/20s)	O	2(경사 우물, G-well)	20초/20초
실시예 7(20s/G-well/30s)	O	2(경사 우물, G-well)	20초/30초

[0217]

[0218] 이때, 실시예 1 내지 실시예 3은 페로브스카이트층의 상부면에 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자이다.

[0219] 상기 실시예 4는 페로브스카이트층의 하부면에 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자이다.

[0220] 상기 실시예 5 내지 실시예 7은 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액으로 인한 경사 벽이 형성되어, 경사 우물(graded-well, G-well) 형태의 페로브스카이트 광전소자로 제조되었다.

[0222] **전기적 성능 평가**

[0223] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 경사 벽 형성 시 스프레이 코팅 시간에 따른 페로브스카이트 광전소자의 발광 모습을 도시한 이미지이다.

[0224] 이때, $CsPbBr_3$는 상기 비교예에 따른 페로브스카이트 광전소자를 의미하고, 10s, 20s, 30s는 순서대로 실시예 1, 실시예 2, 실시예 3에 따른 페로브스카이트 광전소자를 의미한다.

[0225] 도 3을 참조하면, 휴대용 UV(여기 = 365 nm) 조명 하에서 상기 비교예 및 상기 실시예 1 내지 실시예 3의 발광 모습을 촬영하였다.

[0226] 도 3에 의하면, 상기 비교예에서는 특별히 광 발광(PL) 방출을 보이지 않는데 반해, 실시예 1 내지 실시예 3에서는 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액의 스프레이 코팅 시간이 10초, 20초 및 30초로 증가함에 따라 훨씬 강한 PL 방출을 나타낸 것을 확인할 수 있다.

[0228] 도 4a는 본 발명의 비교예에 따른 페로브스카이트 광전소자를 평면에서 촬영한 전자주사현미경(scanning electron microscopy, SEM) 이미지이고, 도 4b는 본 발명의 실시예 1에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 평면을 촬영한 SEM 이미지이며, 도 4c는 본 발명의 실시예 2에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 평면을 촬영한 SEM 이미지이고, 도 4d는 본 발명의 실시예 3에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 평면을 촬영한 SEM 이미지이다.

[0229] 도 4a 내지 도 4d를 참조하면, Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액의 스프레이 코팅 시간이 증가함에 따라 상부 표면의 결정 입자의 직경이 점차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

[0230] Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액의 스프레이 코팅 시간에 따라 점진적으로 증가된 결정 입자 크기는 스프레이 코팅 공정 동안 희석된 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액에서 용매의 내부 플럭스 및 외부 플럭스의 균형에 의한 반복된 결정 입자 용해 및 재성장에 의한 것이다.

[0232] 도 5a는 본 발명의 비교예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 조성 깊이 분포(compositional depth profile)를 도시한 TOF-SIMS(time-of-flight secondary ion mass spectroscopy) 그래프이고, 도 5b는 본 발명의 실시예 1에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 조성 깊이 분포를 도시한 TOF-SIMS 그래프이며, 도 5c는 본 발명의 실시예 2에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 조성 깊이 분포를 도시한 TOF-SIMS 그래프이고, 도 5d는 본 발명의 실시예 3에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 조성 깊이 분포를 도시한 TOF-SIMS 그래프이다.

[0233] 이때, TOF-SIMS는 산소 이온 스퍼터 빔(1keV)과 Bi + 펄스 1 차 이온 빔(25keV)으로 TOF-SIMS로 분석하였다.

[0234] 또한, 도 5a 내지 도 5d에 도시된 Cs, Pb, Br, In은 각각 세슘, 납, 브롬, 주석을 의미한다.

[0235] 도 5a 내지 도 5d를 참조하면, Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액의 스프레이 코팅 시간에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트층의 조성 깊이 분포를 측정하기 위해 에칭을 위한 산소-이온 스퍼터링 빔과 Bi+ 펄스 1차 이온 빔을 이용하여 TOF-SIMS를 측정하였다.

[0236] 도 5a에 도시된 바와 같이, 경사 벽이 형성된 페로브스카이트층 상면에서 ITO 유리 기판 바닥면까지의 조성 깊이 분포를 검출할 때, 세슘(Cs), 납(Pb) 및 브롬(Br)의 일정한 조성 깊이 분포를 나타냈다.

[0237] 반대로, 도 5b 내지 도 5d에 도시된 바와 같이 상기 실시예 1 내지 실시예 3에서는 경사 벽이 형성된 페로브스카이트층 상면 주위에서 세슘 및 브롬의 조성 프로파일을 확인할 수 있고, 납은 일정한 조성 프로파일을 나타낸 것을 확인할 수 있다.

[0238] 이때, 상기 실시예 1 내지 실시예 3의 경사 벽의 두께는 각각 ~17nm, ~23nm, ~37nm이었다.

[0239] 페로브스카이트층 상에 경사 벽이 형성되면서 $CsPbBr_3$ 및 Cs_4PbBr_6의 혼합 영역이 형성되는데, 페로브스카이트 결정 입자의 반복된 용해 및 재성장 공정에 의한 Cs_4PbBr_6의 확산으로 인해 상기 혼합 영역의 두께는 스프레이 코팅 시간이 증가함에 따라 증가된다.

[0240] 즉, 스프레이 코팅 시간이 10초, 20초 및 30초로 증가함에 따라 경사 벽이 형성된 페로브스카이트층이 두껍게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

[0242] 도 6은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 광 루미네선스(phoholuminescence, PL) 강도를 도시한 그래프이다.

[0243] 도 6을 참조하면, 상기 비교예 및 상기 실시예 1 내지 실시예 3의 정지 상태(static)의 PL 스펙트럼은 ~19nm의 선폭(fwhm)에서 527nm 파장일 때 최대 PL 방출을 보였음을 확인할 수 있다.

[0244] 또한, Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액의 스프레이 코팅 시간이 길어질수록 PL 강도가 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다.

[0245] 따라서, 본 발명에 따른 페로브스카이트 광전소자의 발광 효율을 향상시키기 위해서는 경사 벽을 형성하는 스프레이 코팅 시간을 길게 가지는 것이 바람직함을 알 수 있다.

[0247] 도 7은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 과도 발광(transient PL) 또는 동역학적 발광(dynamic PL) 감소를 도시한 그래프이다.

[0248] 도 7을 참조하면, 아래의 수학식 1 및 수학식 2에 따라 상기 비교예 및 상기 실시예 1 내지 실시예 3의 평균 과도 발광 수명을 산출하여 플롯으로 피팅(fitting)하였다.

[0249] [수학식 1]

[0250] $I(t)=A_1\exp(-t/\hat{O}_1)+A_2\exp(-t/\tau_2)$

[0251] [수학식 2]

[0252] $\tau_{avg}=(A_1\tau_1+A_2\tau_2)/(A_1+A_2)$

[0253] 이때, τ_1은 비교예 또는 실시예의 빠른 PL 감소에 해당하는 시간, τ_2는 비교예 또는 실시예의 느린 PL 감소에 해당하는 시간 및 A_1, A_2는 분율을 의미한다. ($A_1+A_2=1$)

[0254] 상기 비교예와 상기 실시예 1 내지 실시예 3의 평균 PL 수명은 각각 43.29ns, 53.99ns, 59.25ns 및 63.20 ns을 가지는 것을 확인할 수 있다.

[0255] 도 7에 해당하는 파라미터를 정리하면 아래의 표 3과 같다.

[0256] [표 3]

[0257]

구분	A_1(%)	τ_1(ns)	A_2(%)	τ_2(ns)	τ_{avg}(ns)
비교예	30.16	9.45	69.84	57.91	43.29
실시예 1	23.11	9.44	76.89	67.38	53.99
실시예 2	18.18	9.76	81.82	70.25	59.25
실시예 3	15.49	9.82	84.21	73.25	63.20

[0258] 상기 표 3에 따르면, 스프레이 코팅 시간이 증가될수록 평균 PL 수명은 길어지는 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 페로브스카이트 광전소자의 발광 효율 역시 증가할 수 있음을 알 수 있다.

[0259] 스프레이 코팅 시간이 증가될수록, 즉 경사 벽의 두께가 증가할수록 평균 PL 수명이 증가하는 이유를 알기 위해 온도에 따른 PL 강도 스펙트럼을 측정하였다.

[0261] 도 8a는 본 발명의 비교예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 엑시톤 결합 에너지를 도시한 그래프이고, 도 8b는 본 발명의 실시예 1에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 엑시톤 결합 에너지를 도시한 그래프이며, 도 8c는 본 발명의 실시예 2에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 엑시톤 결합 에너지를 도시한 그래프이고, 도 8d는 본 발명의 실시예 3에 따른 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 엑시톤 결합 에너지를 도시한 그래프이다.

[0262] 도 8a 내지 도 8d를 참조하면, 상기 비교예 및 상기 실시예 1 내지 실시예 3의 엑시톤 결합 에너지(E_b)는 각각 75±4meV, 132±11meV, 189±12meV 및 207±17meV인 것을 확인할 수 있다.

[0263] 상기 산출된 엑시톤 결합 에너지는 온도와 PL 스펙트럼 면적(A_{PL})의 관계식인 아래의 수학식 3에 따라 산출하였다.

[0264] [수학식 3]

[0265] $A_{PL}=A_{PL,0}[1+B\exp(-E_b/k_BT)]^{-1}$

[0266] 이때, A_{PL}은 PL 스펙트럼의 면적, $A_{PL,0}$은 온도 0K일 때 PL 스펙트럼의 면적, B는 지수함수 팩터, E_b는 엑시톤 결합 에너지, k_B는 볼츠만 상수, T는 절대 온도를 의미한다.

[0267] 상기 수학식 3에 따른 파라미터를 비교예 및 실시예에 따라 정리하면 아래의 표 4와 같다.

[0268] [표 4]

[0269]

구분	A_{PL_0}(a.u.)	B(a.u.)	E_{α_PL}(meV)	Adjusted r^2
비교예	0.99±0.02	613.37±185.04	75.09±4.02	0.9962
실시예 1	0.96±0.02	1201.49±11.01	132.34±11.01	0.9903
실시예 2	0.97±0.01	23968.96±13122.13	189.31±12.00	0.9962
실시예 3	0.97±0.01	61224.03109±47043.16	207.09±16.80	0.9944

[0270] 이때, 상기 표 4의 'Adjusted r^2'은 신뢰도를 의미한다.

[0271] 상기 표 4를 통해 경사 벽이 형성된 페로브스카이트층의 PL 강도 증가는 경사 벽 형성에 따른 엑시톤 결합 에너지가 크게 증가되었기 때문인 것으로 확인할 수 있다.

[0273] 도 9a는 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 광전자방출 개시(photoemission onset)에 대한 자외선광전자분광(ultra-violet photoelectron spectroscopy, UPS) 스펙트럼이며, 도 9b는 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 원자가 밴드 엣지(valance band edge)에 대한 자외선광전자분광(ultra-violet photoelectron spectroscopy, UPS) 스펙트럼이다.

[0274] 도 9a 및 도 9b를 참조하면, 가전도대(valence band maximum)의 위치가 점점 아래로 내려가는 것을 확인할 수 있다.

[0275] 따라서, 스프레이 코팅 시간이 증가할수록 밴드 갭 에너지가 점점 커지는 것을 확인할 수 있다.

[0277] 도 10은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 휘도를 도시한 그래프이다.

[0278] 도 10을 참조하면, 상기 비교예 및 상기 실시예 1 내지 실시예 3에 따른 페로브스카이트 광전소자는 각각 20073cd/m^2, 22042cd/m^2, 23415cd/m^2 및 20154cd/m^2의 최대 휘도(L_{max})를 가진 것을 확인할 수 있다.

[0280] 도 11은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 전류효율을 도시한 그래프이다.

[0281] 도 11을 참조하면, 상기 비교예 및 상기 실시예 1 내지 실시예 3에 따른 페로브스카이트 광전소자의 소자의 최대 전류효율(CE_{max})은 각각 50.3cd/A, 53.5cd/A, 58.5cd/A 및 52.6cd/A인 것을 확인할 수 있다.

[0282] 상기 최대 휘도와 마찬가지로, 상기 실시예 2에 따른 페로브스카이트 광전 소자의 최대 전류효율이 상기 실시예 1 및 상기 실시예 3에 따른 페로브스카이트 광전소자의 최대 전류효율보다 큰 것을 확인할 수 있다.

[0284] 도 12는 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 외부양자효율(external quantum efficiency, EQE)를 도시한 그래프이다.

[0285] 도 12를 참조하면, 최대 외부양자효율(EQE_{max})는 상기 비교예의 경우 11.03%, 상기 실시예 1의 경우 11.74%, 상기 실시예 2의 경우 13.08%, 상기 실시예 3의 경우 11.77%인 것을 확인할 수 있다.

[0286] 상기 최대 휘도 및 최대 전류효율과 마찬가지로, 상기 실시예 2에 따른 페로브스카이트 광전 소자의 최대 외부양자효율이 상기 실시예 1 및 상기 실시예 3에 따른 페로브스카이트 광전소자의 최대 외부양자효율보다 큰 것을 확인할 수 있다.

[0287] Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 20초 동안 스프레이 코팅하여 제조된 페로브스카이트 광전소자는 상기 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 10초 또는 30초 동안 스프레이 코팅한 것보다 발광 효율이 높은 것을 확

인할 수 있다.

[0289] 도 13은 본 발명의 비교예 및 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자의 정규화된 전계발광(electroluminescence, EL) 스펙트럼이다.

[0290] 도 13을 참조하면, 상기 비교예는 534nm의 파장, 상기 실시예 1은 532nm의 파장, 상기 실시예 2는 532nm의 파장, 상기 실시예 3은 532nm의 파장에서 최대 EL 피크 위치를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

[0291] 또한, 상기 비교예 및 상기 실시예 1 내지 실시예 3의 선폭(fwhm)은 ~19nm로 유사한 것을 확인할 수 있다.

[0292] 즉, 본 발명의 실시예에 따른 페로브스카이트 광전소자는 상기 Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액의 스프레이 코팅 유무 또는 스프레이 코팅 시간이 상이해도, 균일한 선폭을 가질 수 있음을 확인할 수 있다.

[0294] 도 14는 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 휘도를 도시한 그래프이다.

[0295] 도 14를 참조하면, 상기 실시예 6의 페로브스카이트 광전소자의 경우 최대 휘도(L_{max})는 25261cd/m^2인 것을 확인할 수 있다.

[0296] 상기 페로브스카이트층 상부면에 경사 벽이 형성된 실시예 2와 페로브스카이트층 하부면에 경사 벽이 형성된 실시예 4의 전기적 특성이 동일하므로, 상기 실시예 4의 최대 휘도는 23415cd/m^2이다.

[0297] 즉, 상기 실시예 6의 최대 휘도 값은 상기 실시예 4의 최대 휘도 값보다 큰 것을 확인할 수 있다.

[0298] 따라서, Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 동일한 스프레이 코팅 시간으로 코팅할 때, 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면 모두에 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 경우가 상부면 및 하부면 중 하나에 경사 벽이 형성된 것보다 최대 휘도 값이 큰 것을 확인할 수 있다.

[0300] 도 15는 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 전류효율을 도시한 그래프이다.

[0301] 도 15를 참조하면, 상기 실시예 6의 페로브스카이트 광전소자의 경우 최대 전류효율(CE_{max})은 65.85cd/A인 것을 확인할 수 있다.

[0302] 이는 상기 실시예 4의 최대 전류효율(즉, 상기 실시예 2의 최대 전류효율)인 58.5cd/A보다 큰 값이다.

[0303] 따라서, Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 동일한 스프레이 코팅 시간으로 코팅할 때, 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면 모두에 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 경우가 상부면 및 하부면 중 하나에 경사 벽이 형성된 것보다 최대 전류효율 값이 큰 것을 확인할 수 있다.

[0305] 도 16은 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 EQE를 도시한 그래프이다.

[0306] 도 16을 참조하면, 상기 실시예 6의 페로브스카이트 광전소자의 경우 최대 외부양자효율(EQE_{max})은 14.72%인 것을 확인할 수 있다.

[0307] 이는 상기 실시예 4의 최대 외부양자효율(즉, 상기 실시예 2의 최대 외부양자효율)인 13.08%보다 큰 값이다.

[0308] 따라서, Cs_4PbBr_6 페로브스카이트 전구체 용액을 동일한 스프레이 코팅 시간으로 코팅할 때, 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면 모두에 경사 벽이 형성된 페로브스카이트 광전소자의 경우가 상부면 및 하부면 중 하나에 경사 벽이 형성된 것보다 최대 외부양자효율 값이 큰 것을 확인할 수 있다.

[0309] 따라서, 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면에 경사 벽이 형성된 경사 우물의 페로브스카이트 광전소자의 EL

성능이 더 우수함을 알 수 있다.

[0311] 도 17은 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 정규화 EL 스펙트럼이다.

[0312] 도 17을 참조하면, 상기 실시예 4는 532nm의 파장, 상기 실시예 5는 532nm의 파장, 상기 실시예 6는 532nm의 파장, 상기 실시예 7은 531nm의 파장에서 최대 EL 피크 위치를 나타내는 것을 확인할 수 있다.

[0313] 또한, 상기 실시예 4 및 상기 실시예 5 내지 실시예 7의 선폭은 ~18nm로 유사한 것을 확인할 수 있다.

[0314] 즉, 본 발명의 페로브스카이트 광전소자는 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면 중 적어도 어느 하나에 경사 벽이 형성되어도 균일한 선폭을 가질 수 있다.

[0316] 도 18은 본 발명의 실시예 4 및 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 CIE 좌표를 도시한 그래프이다.

[0317] 도 18을 참조하면, 상기 실시예 4의 CIE 좌표는 (0.193, 0.769), 상기 실시예 5의 CIE 좌표는 (0.191, 0.771), 상기 실시예 6의 CIE 좌표는 (0.185, 0.774), 상기 실시예 7의 CIE 좌표는 (0.194, 0.769)인 것을 확인할 수 있다.

[0318] 즉, 상기 실시예 4 및 상기 실시예 5 내지 실시예 7에 따른 페로브스카이트 광전소자의 CIE 좌표의 x값은 0.1 내지 0.2의 값을 가지고, y값은 0.7 내지 0.8의 값을 가지므로 매우 높은 색 재현율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

[0319] 따라서, 페로브스카이트 광전소자는 페로브스카이트층의 상부면 및 하부면 중 적어도 어느 하나에 경사 벽이 형성되어도 높은 색 재현율을 비교적 잘 유지할 수 있음을 알 수 있다.

[0321] 이상과 같이 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 그러므로, 본 발명의 범위는 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

부호의 설명

[0323] 100: 페로브스카이트 광전소자

110: 제1 전극

120: 정공 전달층

130: 경사 벽

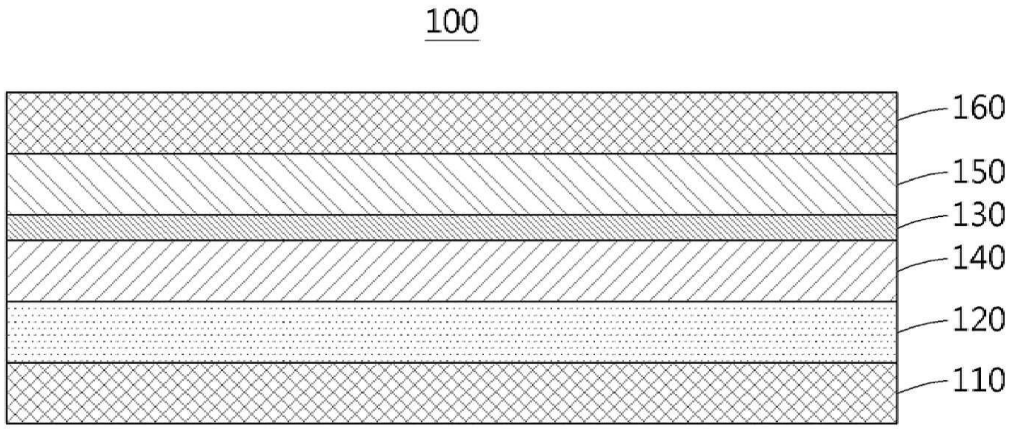
140: 페로브스카이트층

150: 전자 전달층

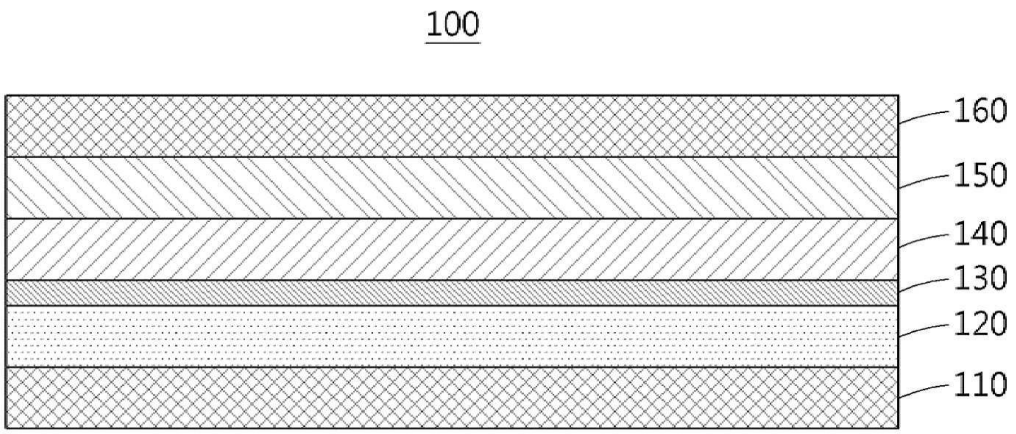
160: 제2 전극

도면

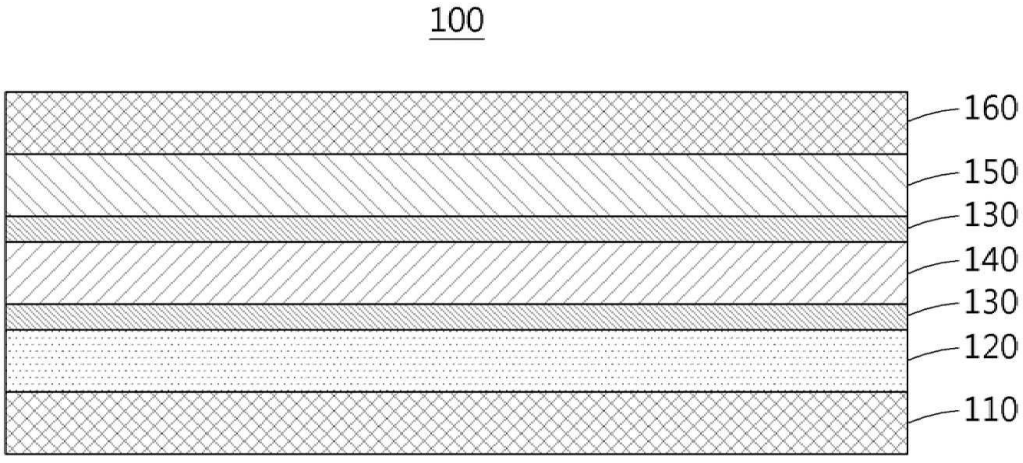
도면1a



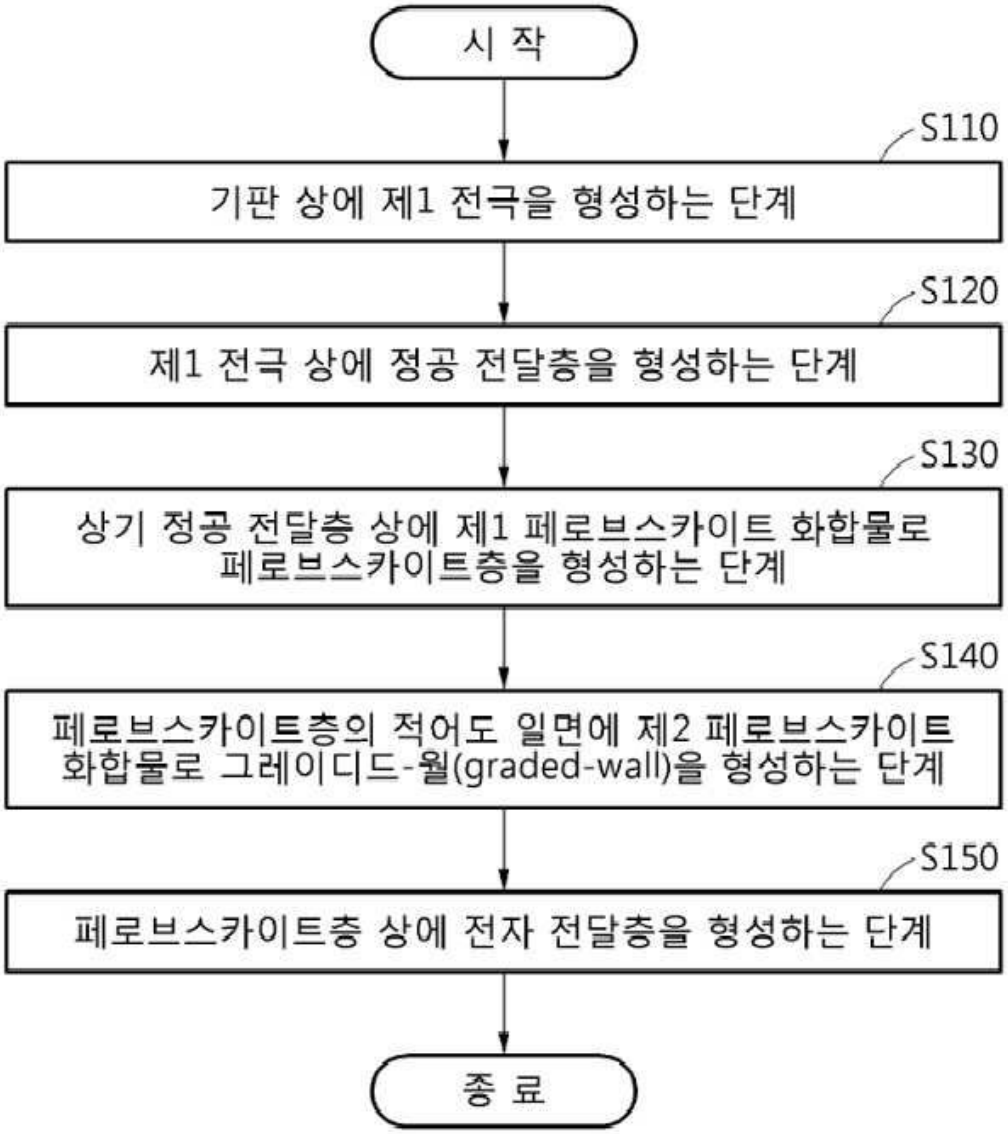
도면1b



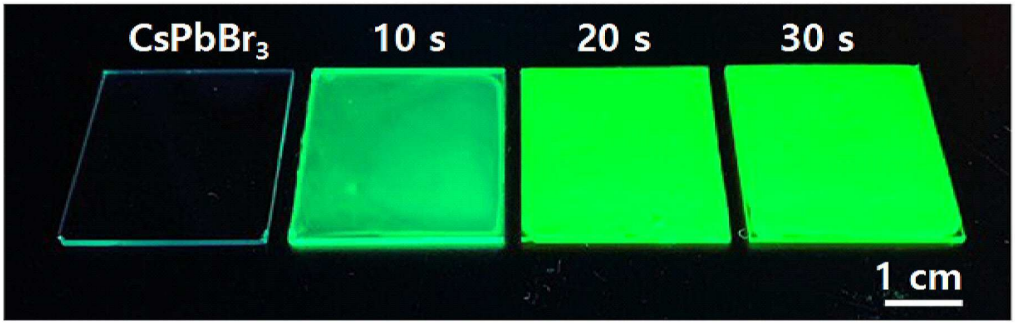
도면1c



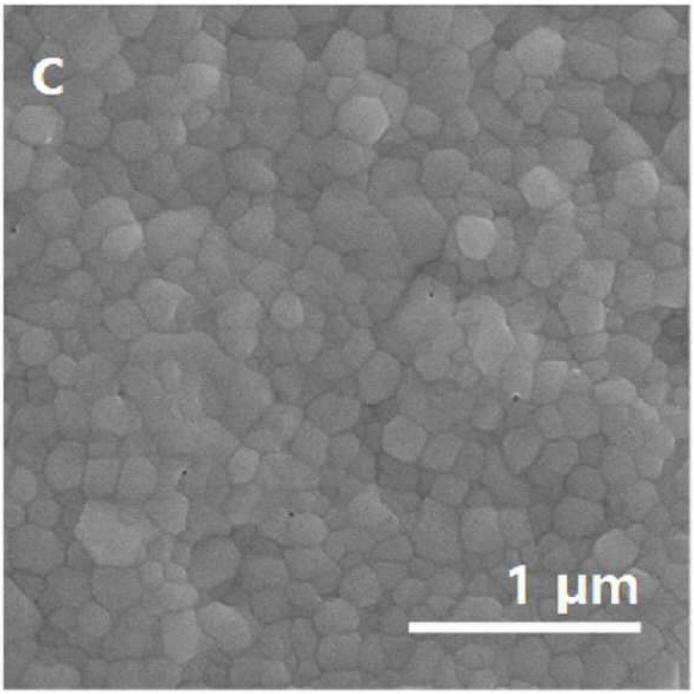
도면2


시 작
S110
기판 상에 제1 전극을 형성하는 단계
S120
제1 전극 상에 정공 전달층을 형성하는 단계
S130
상기 정공 전달층 상에 제1 페로브스카이트 화합물로 페로브스카이트층을 형성하는 단계
S140
페로브스카이트층의 적어도 일면에 제2 페로브스카이트 화합물로 그레이디드-웰(graded-wall)을 형성하는 단계
S150
페로브스카이트층 상에 전자 전달층을 형성하는 단계
종 료

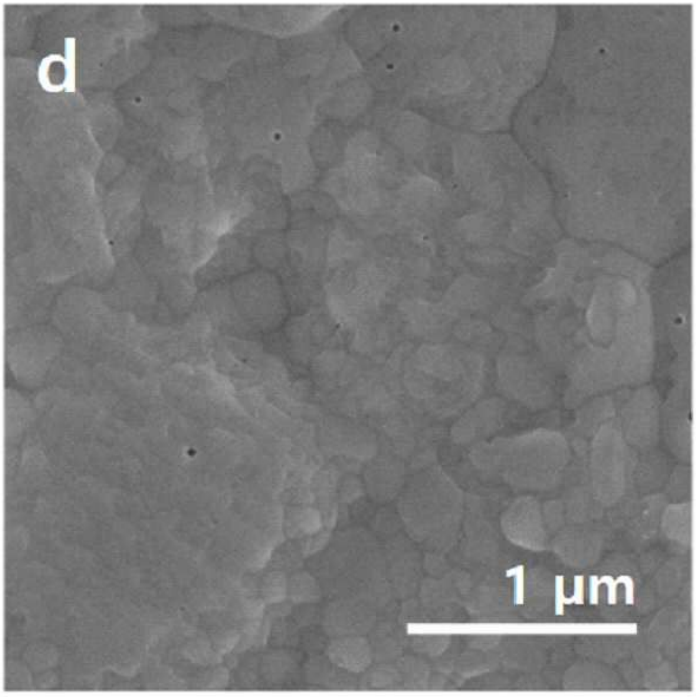
도면3


CsPbBr3
10 s
20 s
30 s
1 cm

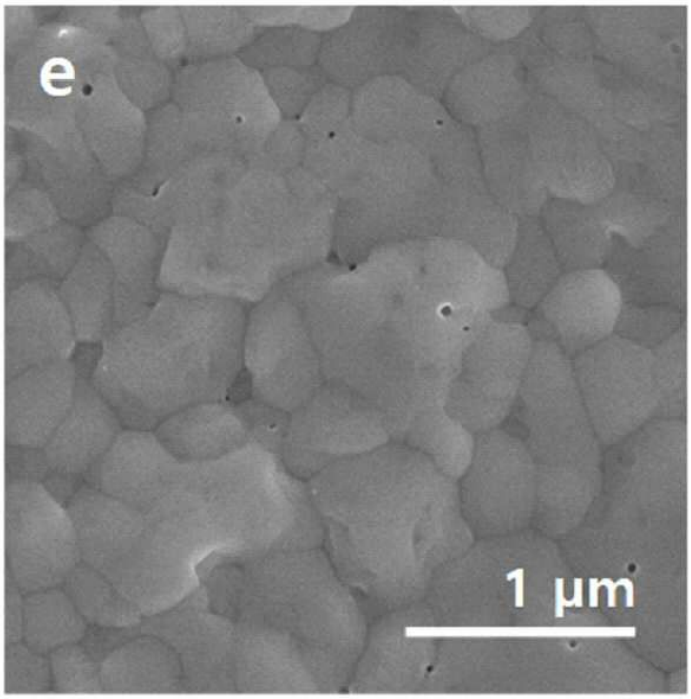
도면4a



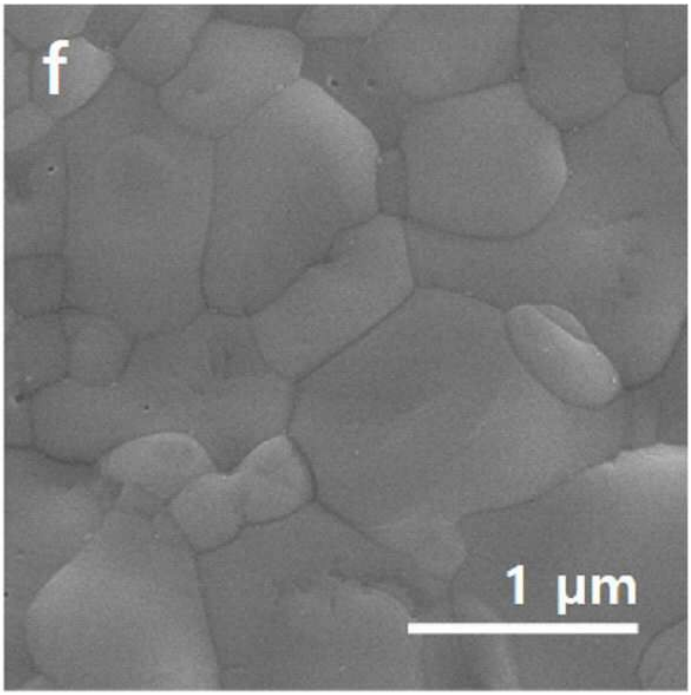
도면4b



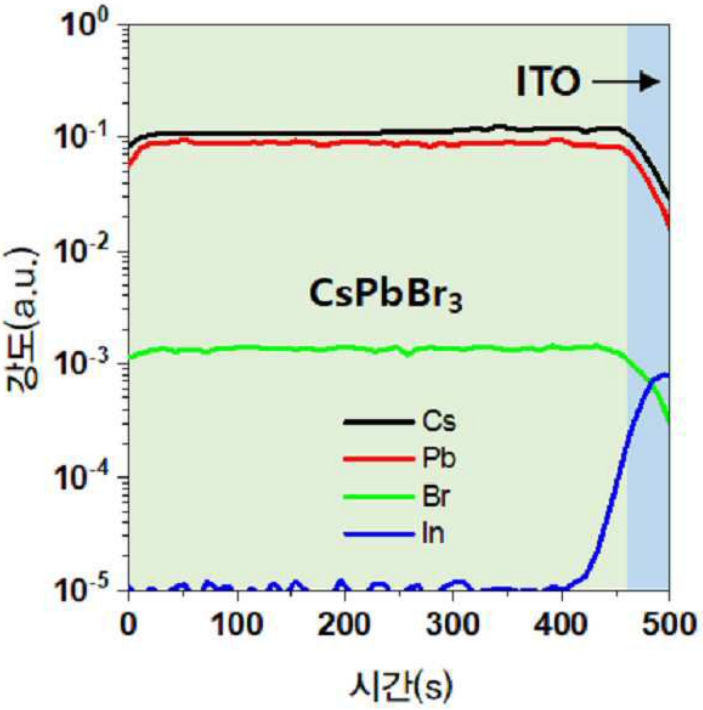
도면4c



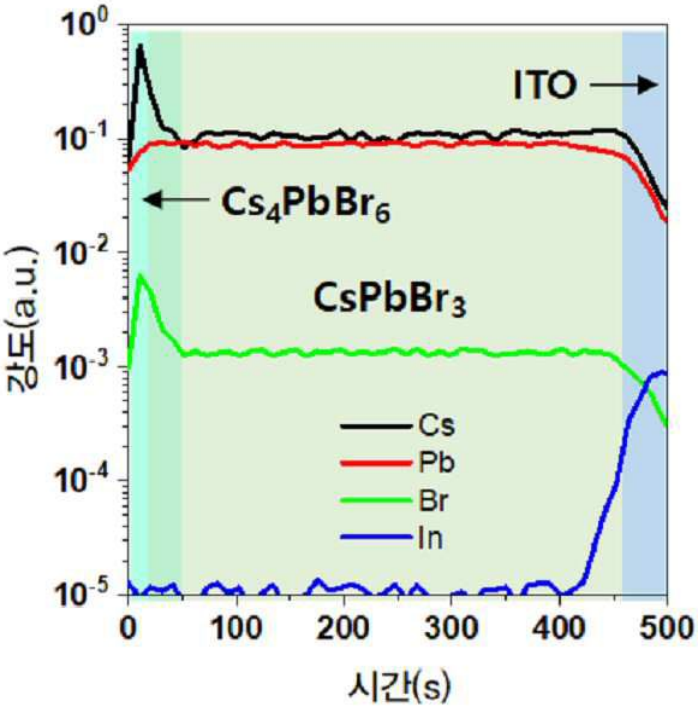
도면4d



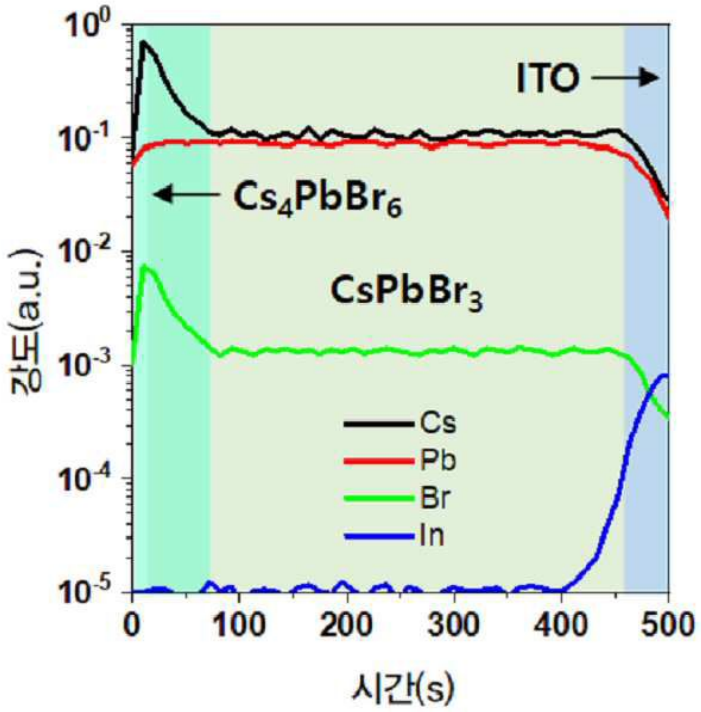
도면5a


ITO
CsPbBr3
Cs
Pb
Br
In
강도(a.u.)
시간(s)

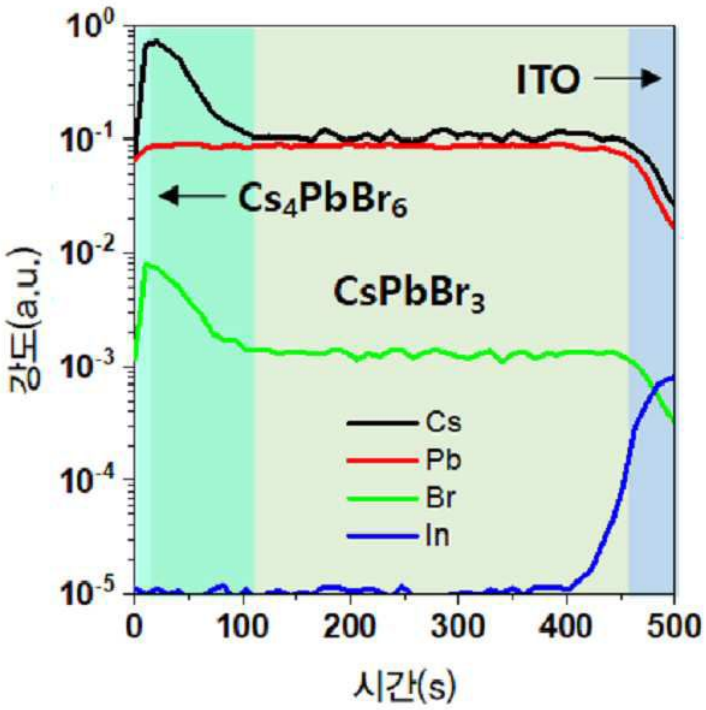
도면5b


ITO
Cs4PbBr6
CsPbBr3
Cs
Pb
Br
In
강도(a.u.)
시간(s)

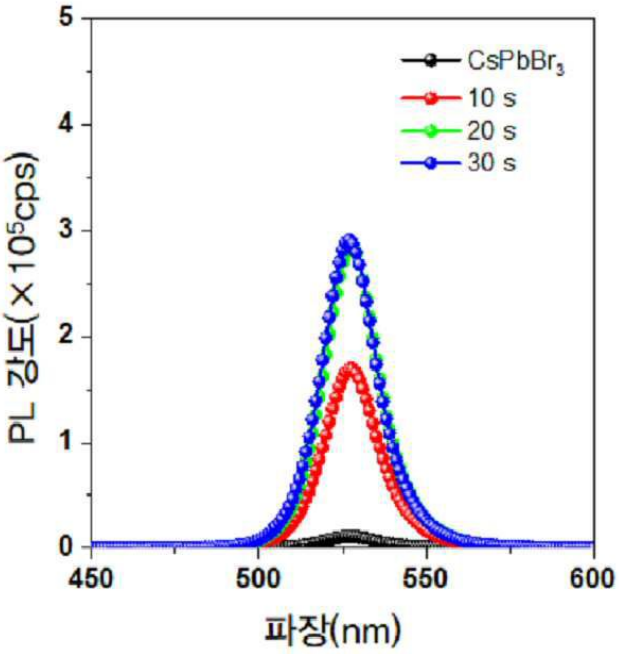
도면5c


ITO
Cs4PbBr6
CsPbBr3
Cs
Pb
Br
In
강도(a.u.)
시간(s)

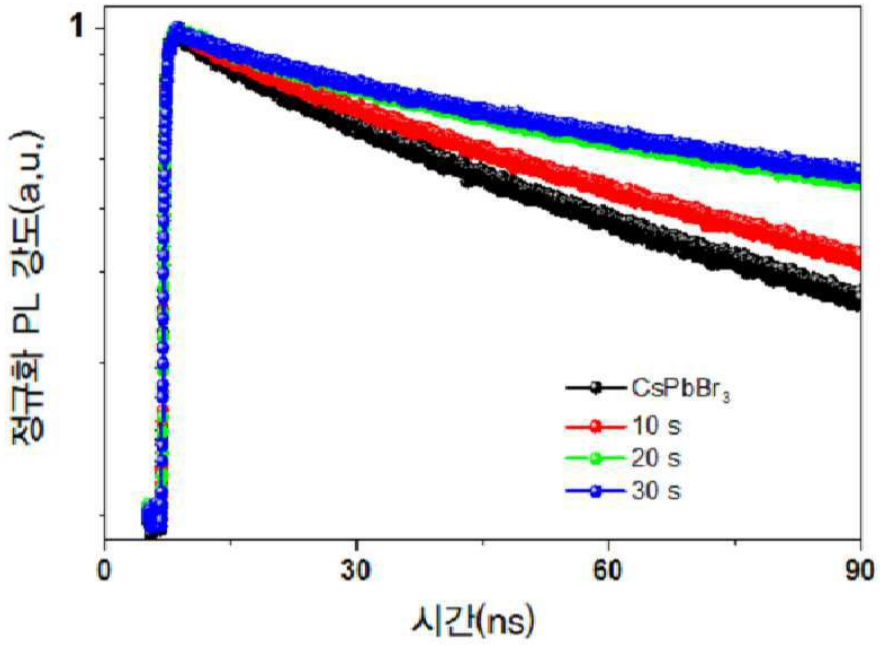
도면5d


ITO
Cs4PbBr6
CsPbBr3
Cs
Pb
Br
In
강도(a.u.)
시간(s)

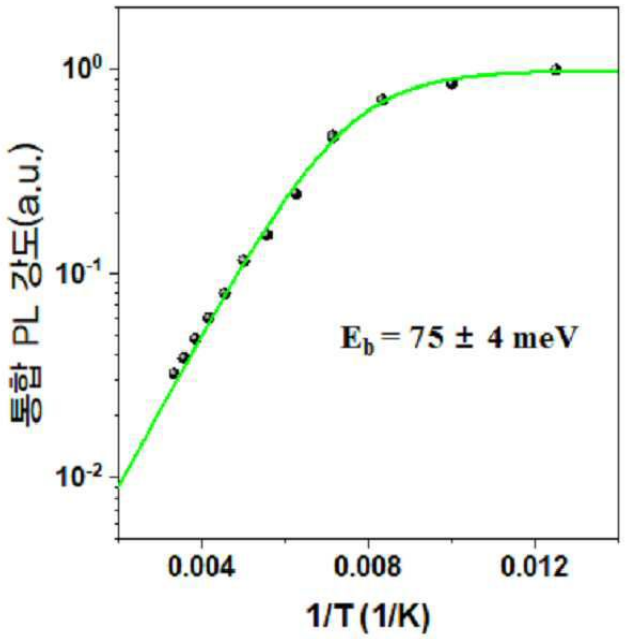
도면6


CsPbBr3
10 s
20 s
30 s
PL 강도(X 10^5cps)
파장(nm)
0
1
2
3
4
5
450
500
550
600

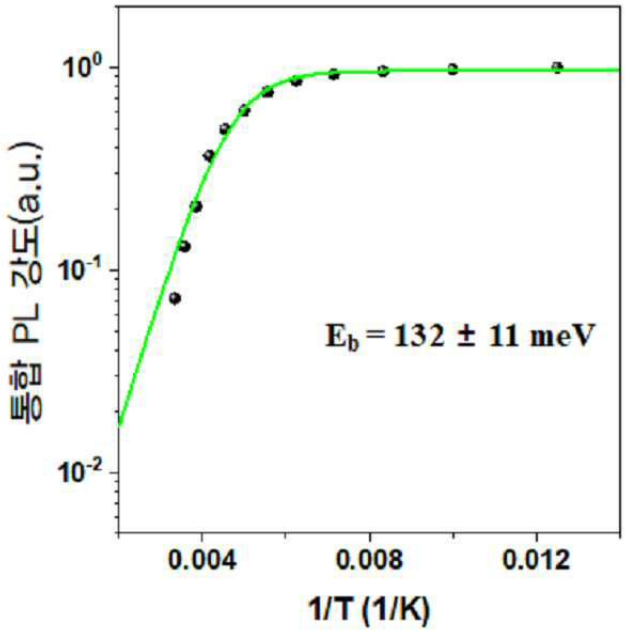
도면7


CsPbBr3
10 s
20 s
30 s
정규화 PL 강도(a.u.)
시간(ns)
0
30
60
90
1

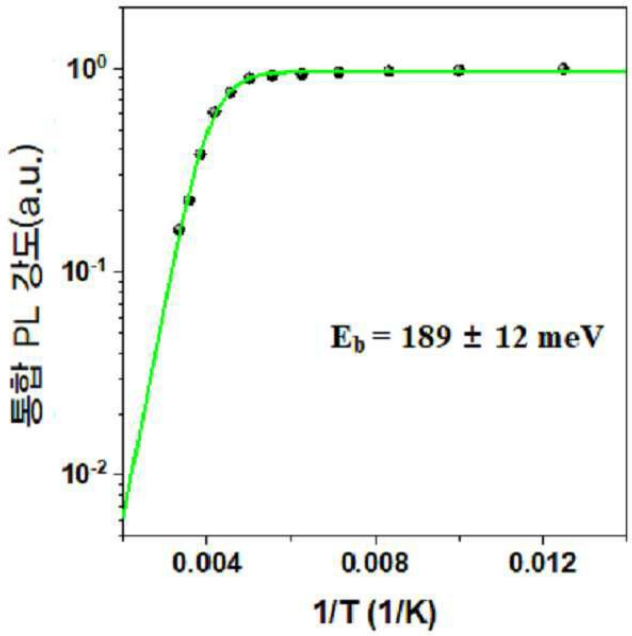
도면8a


통합 PL 강도(a.u.)
10^0
10^-1
10^-2
E_b = 75 ± 4 meV
0.004
0.008
0.012
1/T (1/K)

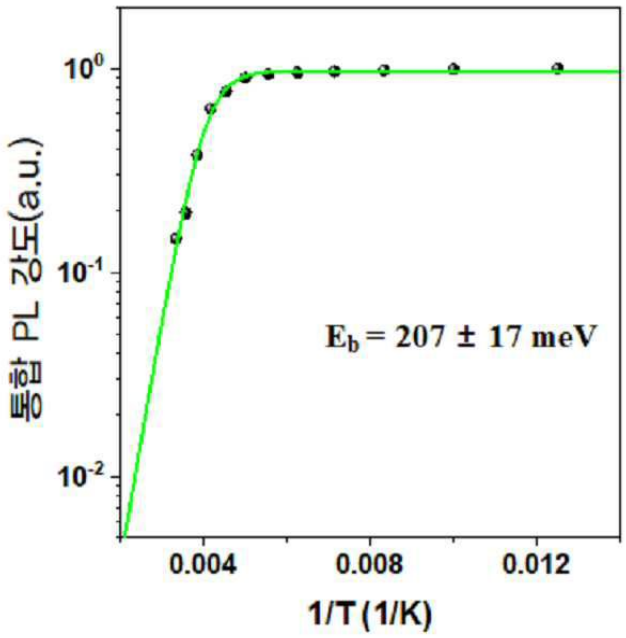
도면8b


통합 PL 강도(a.u.)
10^0
10^-1
10^-2
E_b = 132 ± 11 meV
0.004
0.008
0.012
1/T (1/K)

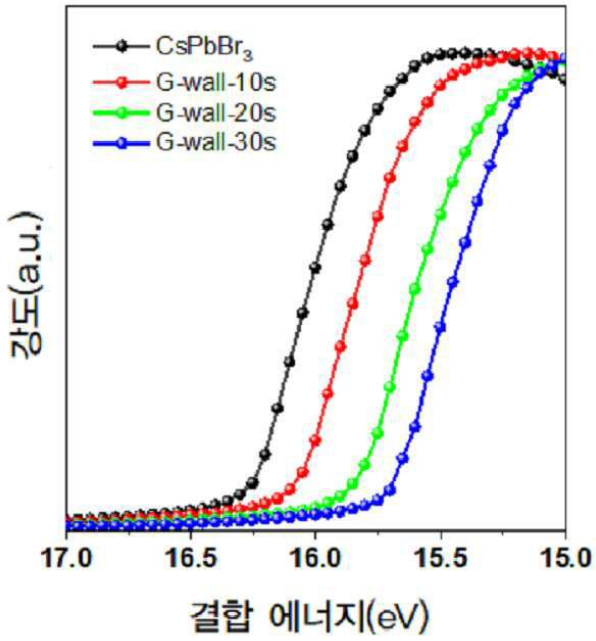
도면8c


통합 PL 강도(a.u.)
10^0
10^-1
10^-2
E_b = 189 ± 12 meV
0.004
0.008
0.012
1/T (1/K)

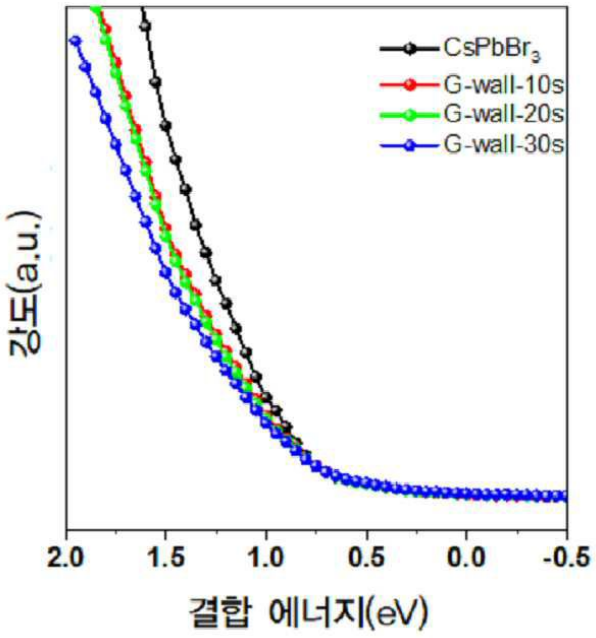
도면8d


통합 PL 강도(a.u.)
10^0
10^-1
10^-2
E_b = 207 ± 17 meV
0.004
0.008
0.012
1/T (1/K)

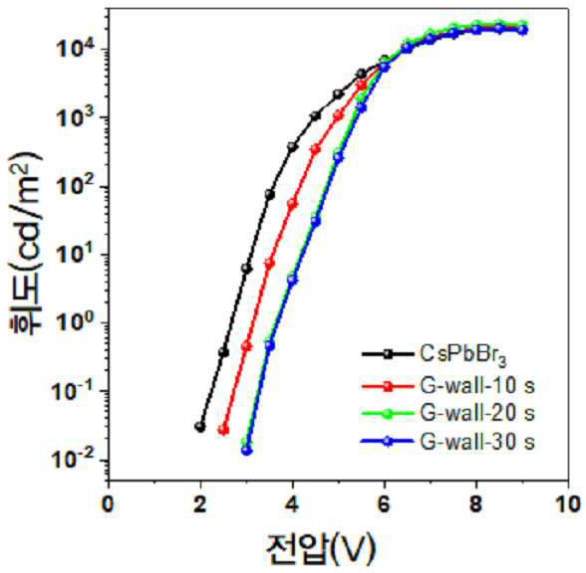
도면9a


CsPbBr3
G-wall-10s
G-wall-20s
G-wall-30s
강도(a.u.)
17.0
16.5
16.0
15.5
15.0
결합 에너지(eV)

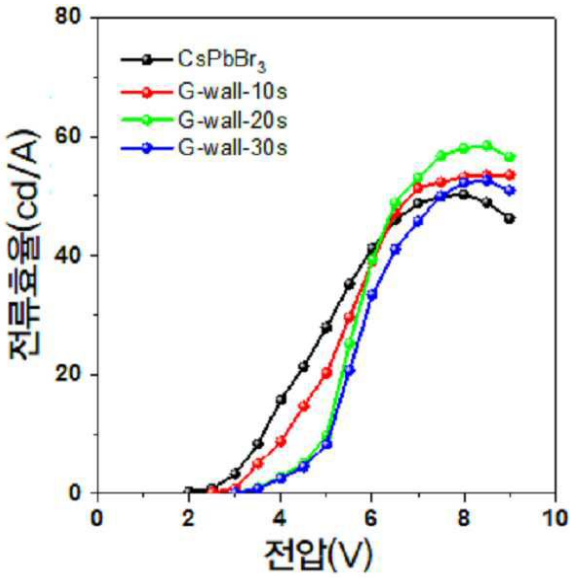
도면9b


CsPbBr3
G-wall-10s
G-wall-20s
G-wall-30s
강도(a.u.)
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
결합 에너지(eV)

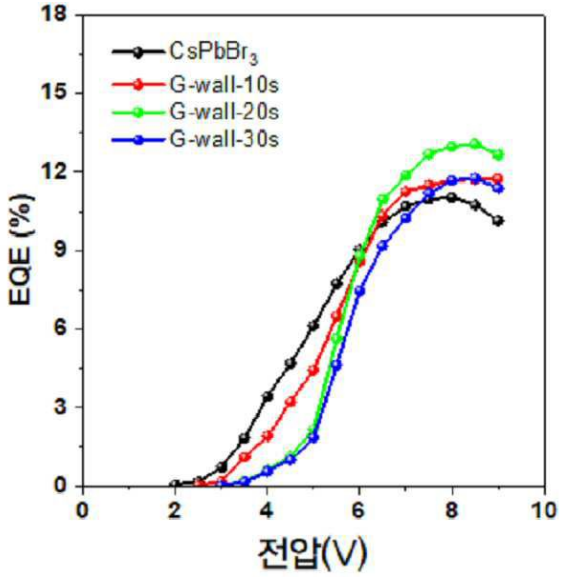
도면10


휘도(cd/m²)
전압(V)
CsPbBr3
G-wall-10 s
G-wall-20 s
G-wall-30 s

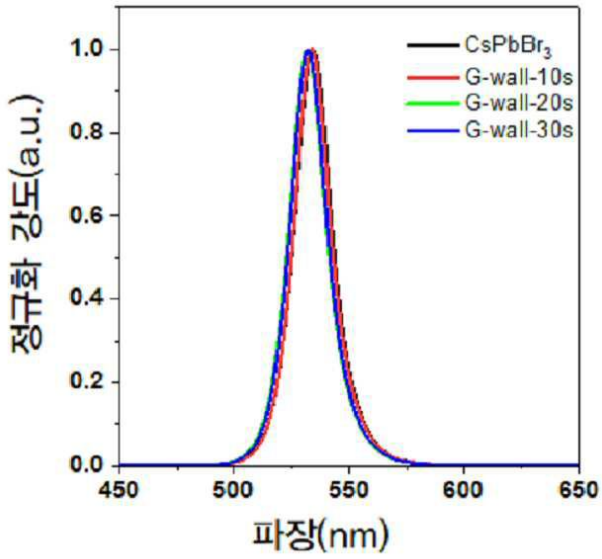
도면11


전류효율(cd/A)
전압(V)
CsPbBr3
G-wall-10s
G-wall-20s
G-wall-30s

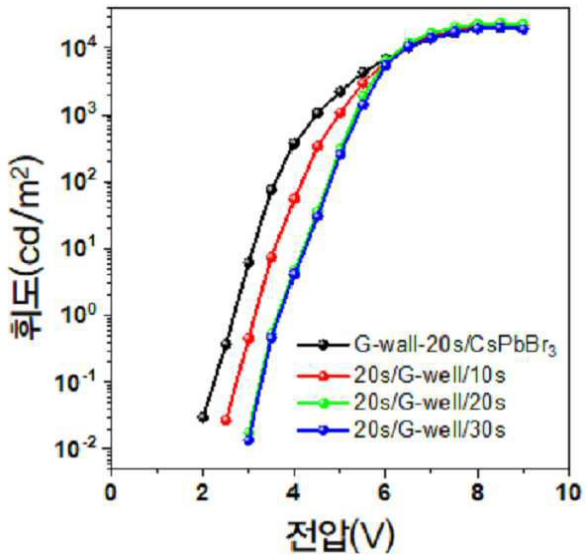
도면12


CsPbBr3
G-wall-10s
G-wall-20s
G-wall-30s
EQE (%)
전압(V)
0
3
6
9
12
15
18
0
2
4
6
8
10

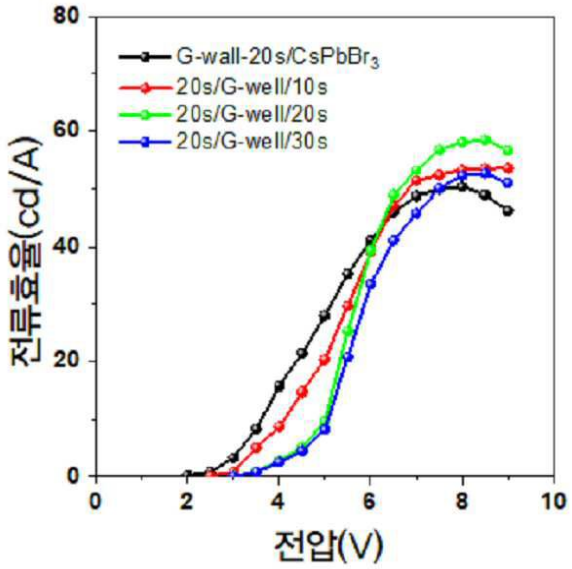
도면13


CsPbBr3
G-wall-10s
G-wall-20s
G-wall-30s
정규화 강도(a.u.)
파장(nm)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
450
500
550
600
650

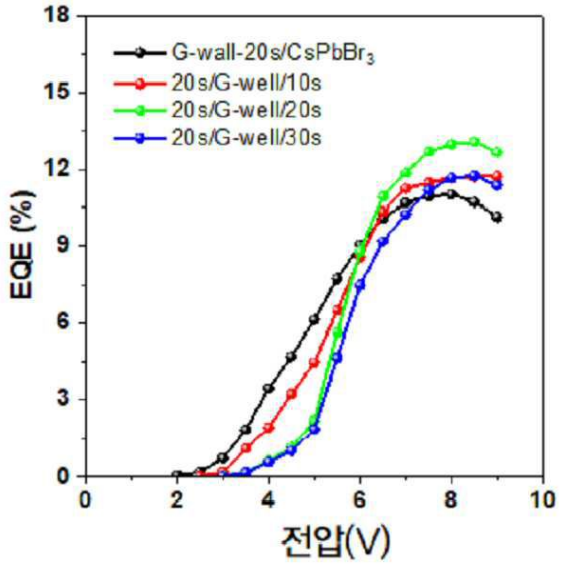
도면14


휘도(cd/m²)
전압(V)
G-wall-20s/CsPbBr3
20s/G-well/10s
20s/G-well/20s
20s/G-well/30s

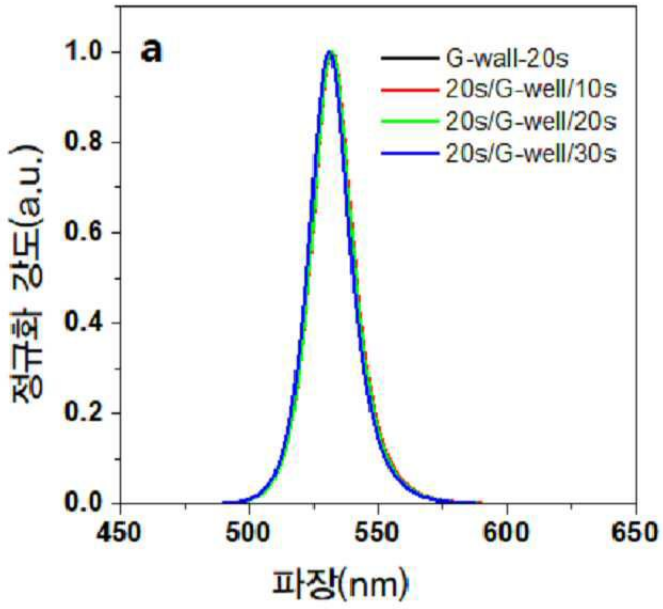
도면15


전류효율(cd/A)
전압(V)
G-wall-20s/CsPbBr3
20s/G-well/10s
20s/G-well/20s
20s/G-well/30s

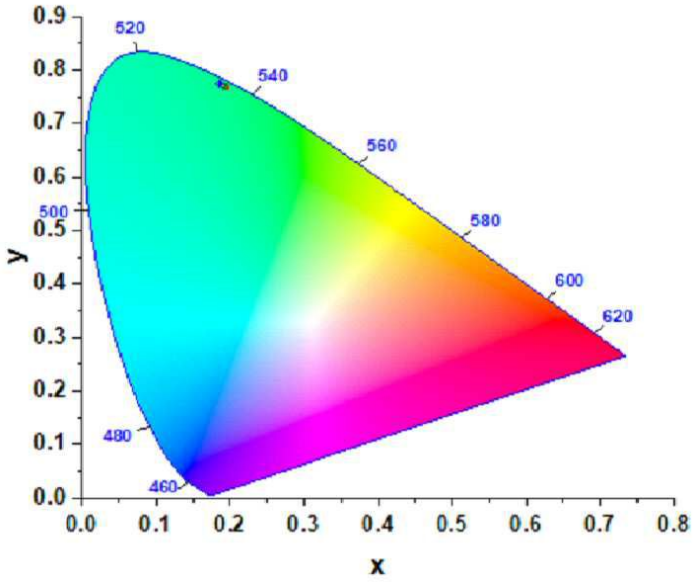
도면16


G-wall-20s/CsPbBr3
20s/G-well/10s
20s/G-well/20s
20s/G-well/30s
EQE (%)
전압(V)
0
3
6
9
12
15
18
0
2
4
6
8
10

도면17


a
G-wall-20s
20s/G-well/10s
20s/G-well/20s
20s/G-well/30s
정규화 강도(a.u.)
파장(nm)
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
450
500
550
600
650

도면18


520
540
560
580
600
620
500
480
460
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
y
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
x