(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0024623
(43) 공개일자 2024년02월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H10K 30/00 (2023.01) *H10K 30/80* (2023.01)
H10K 99/00 (2023.01)
(52) CPC특허분류
H10K 30/10 (2023.02)
H10K 30/82 (2023.02)
(21) 출원번호 10-2022-0102830
(22) 출원일자 2022년08월17일
심사청구일자 2022년08월17일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
박혜성
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
구동환
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(74) 대리인
특허법인 무한

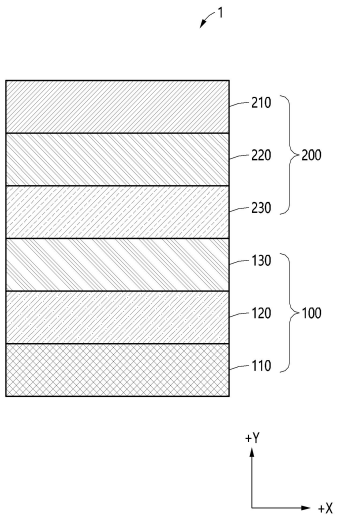
전체 청구항 수 : 총 19 항

(54) 발명의 명칭 **양면 양이온 교환반응을 통한 고효율 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지 및 이의 제조방법**

(57) 요 약

본 발명은, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지 및 이의 제조방법에 관한 것으로, 일 실시 예에 따라, 제1 전극층 및 제1 페로브스카이트층을 포함하는 제1 반전지층; 및 제2 전극층 및 제2 페로브스카이트층을 포함하는 제2 반전지층; 를 포함하는 적층 구조이며, 상기 적층 구조에서 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층이 접합된 것인, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지 및 이의 제조방법에 관련될 수 있다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H10K 71/40 (2023.02)
H10K 71/50 (2023.02)
H10K 85/60 (2023.02)
Y02E 10/549 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711149231
과제번호 2019K1A3A1A61091347
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 전략형국제공동연구사업(R&D)
연구과제명 진공 증착 기반 대면적 유연 고효율 Si/Perovskite 텐덤화 기술 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 울산과학기술원
연구기간 2021.12.31 ~ 2022.12.30
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711156711
과제번호 2019M1A2A2072416
부처명 기획재정부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 기후변화대응기술개발
연구과제명 투광형 탠덤 지향 고효율 페로브스카이트 태양전지 기술과 상용화를 위한 대면적화 및 안정성 향상 기술 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 울산과학기술원
연구기간 2022.01.01 ~ 2022.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

제1 전극층 및 제1 페로브스카이트층을 포함하는 제1 반전지층; 및

제2 전극층 및 제2 페로브스카이트층을 포함하는 제2 반전지층;

을 포함하는 적층 구조를 포함하고,

상기 적층 구조에서 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층이 접합된 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제1 전극층 및 상기 제2 전극층은 그래핀 기반의 투명 전극을 포함하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 제1 전극층 및 상기 제2 전극층은,

그래핀층; 및 상기 그래핀층 상에 형성된 내열성 투명폴리머층;을 포함하는 그래핀 기반의 투명 전극을 포함하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 그래핀층은 단일 또는 복수층을 포함하고,

상기 복수층의 그래핀층 중 적어도 하나는 상기 투명폴리머층 내로 일면이 삽입된 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 제1 전극층 및 상기 제2 전극층의 두께는,

각각 0.1 ㎛ 내지 100 ㎛에서 선택되는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은,

열간압착 방식으로 접합된 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 열간압착 방식은,

10 bar 내지 100 bar 압력 및 상온 내지 150 ℃ 온도에서 압착하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은,

각각 60 ℃ 내지 180 ℃ 온도에서 열처리된 이후에 열간압착 방식으로 접합된 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 제1 페로브스카이트층의 적어도 일부분은,

상기 제2 페로브스카이트층의 양이온이 확산된 제1 양이온 교환 영역을 포함하고,

상기 제2 페로브스카이트층의 적어도 일부분은,

상기 제1 페로브스카이트층의 양이온이 확산된 제2 양이온 교환 영역을 포함하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 제1 양이온 교환 영역 및 상기 제2 양이온 교환 영역은,

각각 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층의 접촉 영역을 기준으로 상대층의 두께 방향, 길이 방향 또는 이 둘에 따라 양이온이 페로브스카이트 격자 사이로 확산된 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 제1 양이온 교환 영역 및 상기 제2 양이온 교환 영역의 두께는,

각각 10 nm 내지 700 nm에서 선택되는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은,

각각 1종 또는 2종 이상의 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물을 포함하고,

상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은,

서로 간에 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물의 종류, 혼합비, 결정성 및 입자 크기 중 적어도 하나 이상이 상이한 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은,

각각 하기의 화학식 1로 표시되는 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물 중 적어도 하나 이상을 포함하는 것인, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지:

[화학식 1]

AMX_3

(여기서, A는 탄소수 1 내지 10의 알킬-암모늄(alky-ammonium)에서 선택되고, M은 Pb, Sn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Pd, Cd, Ge 및 Eu에서 선택되는 금속의 음이온이고, X는 할라이드이다.)

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물은, $MAPbCl_3$(methylammonium lead chloride), $MAPbI_3$(methylammonium lead iodide), $MAPbBr_3$(methylammonium lead bromide), $FAPbCl_3$(formamidinium lead chloride), $FAPbBr_3$(formamidinum lead bromide), $FAPbI_3$(formamidinum lead iodide), $MASnCl_3$(methylammonium tin chloride), $MASnBr_3$(methylammonium tin bromide), $MASnI_3$(methylammonium tin iodide), $FASnCl_3$(formamidinium tin chloride), $FASnBr_3$(formamidinium tin bromide) 및 $FASnI_3$(formamidinium tin iodide)로 이루어진 군에서 선택된 적어도 하나 이상을 포함하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 15

제1항에 있어서,

상기 제1 페로브스카이트층은, $MAPbI_3$를 포함하고,

상기 제2 페로브스카이트층은, $FAPbI_3$를 포함하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지.

청구항 16

제1 전극층 및 제1 페로브스카이트층을 포함하는 제1 반전지층을 제조하는 단계;

제2 전극층 및 제2 페로브스카이트층을 포함하는 제2 반전지층을 제조하는 단계; 및

제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계;

를 포함하고,

상기 적층하는 단계는, 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층을 접합시키는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제조방법.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계는,

제1 반전지층의 제1 페로브스카이트층 상에 제2 반전지층의 제2 페로브스카이트층을 위치시키고 열간 압착하는 단계;

를 포함하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제조방법.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 열간 압착하는 단계는,

10 bar 내지 100 bar 압력 및 상온 내지 150 ℃ 온도에서 열간 압착하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제조방법.

청구항 19

제16항에 있어서,

상기 제1 반전지층을 열처리하는 단계 및 제2 반전지층을 열처리하는 단계;

를 더 포함하고,

상기 제1 반전지층을 열처리하는 단계를 하는 단계 및 제2 반전지층을 열처리하는 단계는, 각각 60 ℃ 내지 180 ℃온도 및 10초 내지 600초 동안 열처리하는 것인,

유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제조방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 개시는 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지 및 이의 제조방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 태양전지는 태양광 발전의 핵심 부품으로, 광원인 빛에너지를 전기로 전환하여 발전한다. 태양전지의 효율은 발전량과 직결되기 대문에 이를 높이기 위한 소재 연구가 계속되었고, 태양전지는 다결정질(polycrystalline) 또는 단결정질(single crystalline) 실리콘을 이용하여 만들어진 1세대 태양전지 및 박막(thin film)의 2세대 태양전지를 거쳐 페로브스카이트 태양전지(PSC, perovskite solar cell)를 포함하는 3세대 태양전지까지 지속적으로 발전하고 있다.

[0003] 상용화된 1세대, 2세대 태양전지는 약 10% 내지 15%의 광전 변환 효율을 가지고 있으며, 낮은 효율을 극복하고 고효율, 친환경 및 고안정성의 태양전지를 제조하기 위해 다양한 페로브스카이트 소재들이 연구되고 있다. 페로브스카이트는 ABX_3의 구조를 가지는 화합물을 총칭하는 것으로서, 구성 원소에 따라 태양전지의 성능과 성질이 달라질 수 있다.

[0004] 태양전지는 P-N 접합면을 가지는 반도체 접합 영역에 특정 주파수 이상의 큰 에너지의 빛이 조사되면 전자와 정공이 발생하여 접합 영역에 형성된 내부 전기장이 전자는 N형 반도체로, 정공은 P형 반도체로 이동시켜 기전력이 발생하게 된다. 페로브스카이트 태양전지는 현재 널리 쓰이고 있는 실리콘 소재 태양전지와 다르게 소재 특성상 동일한 페로브스카이트 결정 구조에서 다양한 조성으로 합성할 수 있다.

[0005] 고성능 반투명(semi-transparent, ST) 페로브스카이트 태양전지는 상용화된 실리콘 태양전지에 비해 우수한 경량성, 유연성 및 높은 근적외선 투과율을 가지고 있고, 제한된 공간에서 고밀도 에너지 시스템을 확보할 수 있는 장점이 있다. 즉, 건물 일체형 태양전지(building-integrated photovoltaics) 및 차량 통합 태양전지(vehicle-integrated photovoltaics) 등에 응용 가능성이 높다.

[0006] 전술한 배경기술은 발명자가 본원의 개시 내용을 도출하는 과정에서 보유하거나 습득한 것으로서, 반드시 본 출원 전에 일반 공중에 공개된 공지기술이라고 할 수는 없다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 고성능 반투명(semi-transparent, ST) 페로브스카이트 태양전지는 건물 일체형 태양전지(building-integrated photovoltaics) 및 차량 통합 태양전지(vehicle-integrated photovoltaics) 등에 적용하기 위해서 작동 환경(예: 고습)에서 구조적 안정성 및 구동 내구성이 확보되어야 한다. 이에 일 실시 예에 따라, 화학적으로 안정적이고, 높은 기계적 내구성을 갖는 그래핀 기판 투명전극(예: PI@GR (폴리이미드 그래핀 일체형 전극))을 하부 전극(예: 제1 전극층) 및 상부 전극(예: 제2 전극층)으로 도입하고, 페로브스카이트 양이온 교환 영역을 갖는 2종 이상의 페로브스카이트층(예: 제1 페로브스카이트층 및 제2 페로브스카이트층)을 활용하여 안정성 및 구동 내구성이 향상된 고성능 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지를 제공할 수 있다.

[0008] 일 실시 예에 따라, 그래핀 기판 투명전극(예: PI@GR (폴리이미드 그래핀 일체형 전극)) 및 페로브스카이트층을 포함하는 2종 이상의 반전지(예: 제1 반전지 및 제2 반전지)를 양면 적층 공정을 이용하여 페로브스카이트층들 간의 양이온 교환 반응을 유도하여 접합시키는, 고성능 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제조방법을 제공할 수 있다.

[0009] 그러나, 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 이상에서 언급한 과제로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 과제들은 아래의 기재로부터 해당 기술분야의 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 일 실시 예에 따라, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지는 제1 전극층 및 제1 페로브스카이트층을 포함하는 제1 반전지층; 및 제2 전극층 및 제2 페로브스카이트층을 포함하는 제2 반전지층; 을 포함하는 적층 구조를 포함하고, 상기 적층 구조에서 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층이 접합된 것일 수 있다.

[0011] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 전극층 및 상기 제2 전극층은 그래핀 기반의 투명 전극을 포함하는 것일 수 있다.

[0012] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 전극층 및 상기 제2 전극층은, 그래핀층; 및 상기 그래핀층 상에 형성된 내열성

투명폴리머층;을 포함하는 그래핀 기반의 투명 전극을 포함하는 것일 수 있다.

[0013] 일 실시 예에 따라, 상기 그래핀층은 단일 또는 복수층을 포함하고, 상기 복수층의 그래핀층 중 적어도 하나는 상기 투명폴리머층 내로 일면이 삽입된 것일 수 있다.

[0014] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 전극층 및 상기 제2 전극층의 두께는, 각각 0.1 μm 내지 100 μm에서 선택되는 것일 수 있다.

[0015] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은, 열간압착 방식으로 접합된 것일 수 있다.

[0016] 일 실시 예에 따라, 상기 열간압착 방식은, 10 bar 내지 100 bar의 압력 및 상온 내지 150 ℃에서 압착하는 것일 수 있다.

[0017] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은, 각각 60 ℃ 내지 180 ℃에서 열처리된 이후에 열간압착 방식으로 접합된 것일 수 있다.

[0018] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 페로브스카이트층의 적어도 일부분은, 상기 제2 페로브스카이트층의 양이온이 확산된 제1 양이온 교환 영역을 포함하고, 상기 제2 페로브스카이트층의 적어도 일부분은, 상기 제1 페로브스카이트층의 양이온이 확산된 제2 양이온 교환 영역을 포함하는 것일 수 있다.

[0019] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 양이온 교환 영역 및 상기 제2 양이온 교환 영역은, 각각 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층의 접촉 영역을 기준으로 상대층의 두께 방향, 길이 방향 또는 이 둘에 따라 양이온이 페로브스카이트 격자 사이로 확산된 것일 수 있다.

[0020] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 양이온 교환 영역 및 상기 제2 양이온 교환 영역의 두께는, 각각 10 nm 내지 700 nm에서 선택되는 것일 수 있다.

[0021] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은, 각각 1종 또는 2종 이상의 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물을 포함하고, 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은, 서로 간에 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물의 종류, 혼합비, 결정성 및 입자 크기 중 적어도 하나 이상이 상이한 것일 수 있다.

[0022] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층은, 각각 하기의 화학식 1로 표시되는 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물 중 적어도 하나 이상을 포함하는 것일 수 있다.

[0023] [화학식 1]

[0024] AMX_3

[0025] (여기서, A는 탄소수 1 내지 10의 알킬-암모늄(alky-ammonium)에서 선택되고, M은 Pb, Sn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Pd, Cd, Ge 및 Eu에서 선택되는 금속의 음이온이고, X는 할라이드이다.)

[0026] 일 실시 예에 따라, 상기 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물은, $MAPbCl_3$(methylammonium lead chloride), $MAPbl_3$(methylammonium lead iodide), $MAPbBr_3$(methylammonium lead bromide), $FAPbCl_3$(formamidinium lead chloride), $FAPbBr_3$(formamidinum lead bromide), $FAPbI_3$(formamidinum lead iodide), $MASnCl_3$(methylammonium tin chloride), $MASnBr_3$(methylammonium tin bromide), $MASnI_3$(methylammonium tin iodide), $FASnCl_3$(formamidinium tin chloride), $FASnBr_3$(formamidinium tin bromide) 및 $FASnl_3$(formamidinium tin iodide)로 이루어진 군에서 선택된 적어도 하나 이상을 포함하는 것일 수 있다.

[0027] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 페로브스카이트층은, $MAPbI_3$를 포함하고, 상기 제2 페로브스카이트층은, $FAPbI_3$를 포함하는 것일 수 있다.

[0028] 일 실시 예에 따라, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제조방법은, 제1 전극층 및 제1 페로브스카이트층을 포함하는 제1 반전지층을 제조하는 단계; 제2 전극층 및 제2 페로브스카이트층을 포함하는 제2 반전지층을 제조하는 단계; 및 제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계; 를 포함하고, 상기 적층하는 단계는, 상기 제1 페로브스카이트층 및 상기 제2 페로브스카이트층을 접합시키는 것일 수 있다.

[0029] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계는, 제1 반전지층의 제1 페로브스카이트층 상에 제2 반전지층의 제2 페로브스카이트층을 위치시키고 열간 압착하는 단계; 를 포함하는 것일 수 있다.

[0030] 일 실시 예에 따라, 상기 열간 압착하는 단계는, 10 bar 내지 100 bar의 압력 및 상온 내지 150 ℃에서 열간 압착하는 것일 수 있다.

[0031] 일 실시 예에 따라, 상기 제1 반전지층을 열처리하는 단계 및 제2 반전지층을 열처리하는 단계; 를 더 포함하고, 상기 제1 반전지층을 열처리하는 단계 및 제2 반전지층을 열처리하는 단계는, 각각 60 ℃ 내지 180 ℃ 및 10 초 내지 600초 동안 열처리하는 것일 수 있다.

발명의 효과

[0032] 일 실시 예에 따라, 본 개시는 다양한 작동 환경(예: 고습 조건)에서 뛰어난 안정성 및 구동 내구성이 향상되고 고성능의 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지 및 이의 제조방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0033] 도 1은 일 실시 예에 따른, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 구성을 나타낸 단면도이다.

도 2는 일 실시 예에 따른, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제조방법의 흐름도이다.

도 3은 일 실시 예에 따른, PI@GR 전극의 특성 분석 결과를 나타낸 것이다.

도 4a는 일 실시 예에 따른, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 양면 적층 공정의 개략도이다.

도 4b는 일 실시 예에 따른, 도 4a의 양면 적층 공정 관련 페로브스카이트 태양전지의 특성 분석 결과를 나타낸 것이다.

도 5a는 일 실시 예에 따른, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 양면 적층 공정에 의한 양이온 교환 반응의 효과를 평가한 것이다.

도 5b는 일 실시 예에 따른, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 양면 적층 공정에 의한 양이온 교환 반응의 효과를 평가한 것이다.

도 6a는 일 실시 예에 따른, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 성능 평가 결과를 나타낸 것이다.

도 6b는 일 실시 예에 따른, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 성능 평가 결과를 나타낸 것이다.

도 7은 일 실시 예에 따른, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 안정성 평가 결과를 나타낸 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0034] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 실시예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 실시예들에는 다양한 변경이 가해질 수 있어서 특허출원의 권리 범위가 이러한 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 실시예들에 대한 모든 변경, 균등물 내지 대체물이 권리 범위에 포함되는 것으로 이해되어야 한다.

[0035] 실시예에서 사용한 용어는 단지 설명을 목적으로 사용된 것으로, 한정하려는 의도로 해석되어서는 안된다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서 상에 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.

[0036] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 실시예가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상 가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 출원에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0037] 또한, 첨부 도면을 참조하여 설명함에 있어, 도면 부호에 관계없이 동일한 구성요소는 동일한 참조부호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다. 실시예를 설명함에 있어서 관련된 공지 기술에 대한 구체적인 설명이 실시예의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략한다.

[0038] 또한, 실시예의 구성요소를 설명하는 데 있어서, 제1, 제2, A, B, (a), (b) 등의 용어를 사용할 수 있다. 이러한 용어는 그 구성요소를 다른 구성요소와 구별하기 위한 것일 뿐, 그 용어에 의해 해당 구성요소의 본질이나 차례 또는 순서 등이 한정되지 않는다. 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결", "결합" 또는 "접속"된다고 기재된 경우, 그 구성요소는 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되거나 접속될 수 있지만, 각 구성요소 사이에 또 다른 구성요소가 "연결", "결합" 또는 "접속"될 수도 있다고 이해되어야 할 것이다.

[0039] 어느 하나의 실시예에 포함된 구성요소와, 공통적인 기능을 포함하는 구성요소는, 다른 실시 예에서 동일한 명칭을 사용하여 설명하기로 한다. 반대되는 기재가 없는 이상, 어느 하나의 실시 예에 기재한 설명은 다른 실시 예에도 적용될 수 있으며, 중복되는 범위에서 구체적인 설명은 생략하기로 한다.

[0040] 일 실시 예에 따라, 도 1은 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지(1)의 구성을 나타낸 단면도이다.

[0041] 일 실시 예에 따라, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지(1)는, 제1 반전지층(100) 및 제2 반전지층(200)을 포함하는 적층 구조체를 포함할 수 있다. 어떤 예에서, 제1 반전지층(100)은 하단층이고, 제2 반전지층(200)은 상단층일 수 있다. 어떤 예에서, 제1 반전지층(100)은 상단층이고, 제2 반전지층(200)은 하단층일 수 있다.

[0042] 일 실시 예에 따라, 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지(1)는, 제1 반전지층(100) 및 제2 반전지층(200)이 접촉하는 방식으로 적층된 적층 구조체를 포함할 수 있다. 일 예로, 적층 구조체는 제1 반전지층(100)의 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 반전지층(200)의 제2 페로브스카이트층(230)이 접합된 양면 적층 공정(bifacial lamination process)으로 형성될 수 있다.

[0043] 일 예로, 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230)은 제1 페로브스카이트층(130', 접합 이전 상태) 및 제2 페로브스카이트층(230', 접합 이전 상태)이 서로 마주보거나 서로 접촉한 상태에서 열간 압착을 이용하여 접합시키는 양면 적층 공정으로 형성될 수 있다.

[0044] 일 예로, 양면 적층 공정(예: 열간 압착) 중에 제1 페로브스카이트층(130') 및 제2 페로브스카이트층(230')은 각각 상대층으로 페로브스카이트 화합물의 양이온이 확산되는 양면 양이온 교환반응이 진행될 수 있다. 예를 들어, 양이온 교환반응을 통하여 페로브스카이트 입자(예: 그레인(grain)) 크기 및 결정성(crystallinity)이 향상된 고품질 페로브스카이트 필름(예: 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230))을 형성할 수 있다. 이는 고성능(예: 15 % 이상의 광전변환효율(power conversion efficiency, PCE)) 및 화학적 및 환경적(예: 고습) 내구성이 우수한 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지를 제공할 수 있다.

[0045] 일 예로, 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230)은 제1 페로브스카이트층(130', 접합 이전 상태) 및 제2 페로브스카이트층(230', 접합 이전 상태)이 서로 마주보거나 서로 접촉한 상태에서 상온 이상; 상온 내지 150 ℃; 90 ℃ 내지 150 ℃; 또는 110 ℃ 내지 150 ℃에서 10 분 내지 30분 동안 10 bar 내지 100 bar의 압력을 가하여 열간 압착할 수 있다. 어떤 예에서 바람직하게는 110 ℃ 내지 150 ℃ 온도에서 열간 압착될 수 있다. 상기 온도, 시간 및 압력 중 적어도 하나 이상 또는 전체 범위 내에 포함되면 양면 양이온 교환반응이 진행되고 고성능 태양전지를 확보할 수 있다.

[0046] 일 예로, 적층 구조체는 제1 반전지층(100', 접합 이전 상태) 및 제2 반전지층(200', 접합 이전 상태)을 열처리한 이후 제1 반전지층(100')의 제1 페로브스카이트층(130') 및 제2 반전지층(200')의 제2 페로브스카이트층(230')을 접합시키는 양면 적층 공정으로 형성된 것일 수 있다. 예를 들어, 제1 반전지층(100') 및 제2 반전지층(200')은, 각각 60 ℃ 내지 180 ℃; 60 ℃ 내지 100 ℃; 또는 100 ℃ 내지 180 ℃에서 10 초 내지 600 초 동안 열처리된 이후에 제1 반전지층(100')의 제1 페로브스카이트층(130') 및 제2 반전지층(200')의 제2 페로브스카이트층(230') 양면 적층 공정(예: 열간 압착)으로 접합될 수 있다.

[0047] 일 실시 예에 따라, 열간 압착 중에 제1 페로브스카이트층(130') 및 제2 페로브스카이트층(230')은 각각 상대층의 두께 방향, 길이 방향(또는, 수평 방향) 또는 이 둘에 따라 각층의 페로브스카이트 화합물의 양이온이 확산하는 양면 양이온 교환 반응이 진행될 수 있다. 예를 들어, 제1 페로브스카이트층(130')의 페로브스카이트 화합물의 양이온이 제2 페로브스카이트층(230') 내의 페로브스카이트 화합물의 격자 사이로 확산될 수 있다. 예를 들어, 제2 페로브스카이트층(230')의 페로브스카이트 화합물의 양이온이 제1 페로브스카이트층(130') 내의 페로브스카이트 화합물의 격자 사이로 확산될 수 있다.

[0048] 일 실시 예에 따라, 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230)은 각각 양이온이 확산하는 양이온 교환 반응에 의해 형성된 양이온 교환 영역을 포함할 수 있다. 예를 들어, 제1 페로브스카이트층(130)은 제1 양이온 교환 영역을 포함하고, 제2 페로브스카이트층(230)은 제2 양이온 교환 영역을 포함할 수 있다. 일 예

로, 제1 양이온 교환 영역 및 제2 양이온 교환 영역은 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230)의 접촉면 또는 접합면을 기준으로 각층의 두께 방향으로 형성될 수 있다. 예를 들어, 제1 양이온 교환 영역 및 제2 양이온 교환 영역의 두께는, 각각 10 nm 내지 700 nm 일 수 있다. 예를 들어, 제1 양이온 교환 영역 및 제2 양이온 교환 영역의 두께는 각각 해당되는 각각의 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230) 두께의 5 % 이상; 10 % 이상; 30 % 이상; 50 % 이상; 70 % 이상; 80 % 이상; 90 % 이상; 또는 약 100 % 또는 약 100 % 미만일 수 있다.

[0049] 일 실시 예에 따라, 제1 전극층(110) 및 제2 전극층(210)은, 각각 투명 전극을 포함하고, 예를 들어, 그래핀 기반의 투명 전극을 포함할 수 있다. 일 예로, 그래핀 기반의 투명 전극은 그래핀층; 및 상기 그래핀층 상에 형성된 내열성 투명폴리머층; 을 포함하는 그래핀 기반의 투명 전극을 포함할 수 있다. 일 예로, 그래핀층은 단일 또는 복수층을 포함하고, 그래핀층의 적어도 일면 또는 적어도 일부분(예: 그래핀층의 전체 두께 중 적어도 일부분)이 투명폴리머층 내에 삽입된 투명폴리머 일체형 그래핀 기반 전극일 수 있다. 예를 들어, 복수층의 그래핀층 중 적어도 하나 이상의 층의 적어도 일면 또는 적어도 일부분(예: 그래핀층의 전체 두께 중 적어도 일부분)이 투명폴리머층 내에 삽입될 수 있다. 예를 들어, 투명폴리머 일체형 그래핀 기반 전극(예: polyimide-integrated graphene electrodes, PI@GR)은 화학적으로 안정적이고 우수한 불침투성(impermeability), 기계적 내구성 및 UV(ultraviolet) 차단 특성으로 인해 다양한 환경(예: 고습 조건)의 구동 조건에서도 페로브스카이트 태양전지의 안정성 및 구동 내구성을 향상시킬 수 있다.

[0050] 일 예로, 투명폴리머층은 내열성 투명 폴리머를 포함하고, 예를 들어, 내열 투명 폴리머는 PTFE(Polytetrafluoroethylene), PI(Polyimide), PAI(Polyamide Polyamide Imide), PSF(Polysulfone), PPS(Polyphenylene Sulfide), PEEK(Polyether ether ketone) 및 PEK(Poly(ether ketone)로 이루어진 군에서 선택된 적어도 하나 이상을 포함할 수 있다. 어떤 예에서 내열성 투명 폴리머는 PI(Polyimide), PAI(Polyamide Polyamide Imide) 또는 이 둘을 포함할 수 있다. 어떤 예에서 내열성 투명 폴리머는 PI(Polyimide)를 포함할 수 있다.

[0051] 일 예로, 투명 폴리머층을 포함한 제1 전극층(110)의 두께는 제2 전극층(210)와 동일하거나 상이할 수 있으며, 예를 들어, 제1 전극층(110) 및 제2 전극층(210)의 두께는, 각각 0.1 μm 내지 100 μm에서 선택될 수 있다. 상기 두께 범위 내에 포함되면 다양한 환경(예: 고습 조건)의 구동 조건에서도 페로브스카이트 태양전지의 안정성 및 구동 내구성을 향상시킬 수 있다.

[0052] 일 실시 예에 따라, 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230)은, 각각 1종 또는 2종 이상의 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물을 포함할 수 있다. 일 예로, 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물은 하기의 화학식 1로 표시되는 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물 중 적어도 하나 이상을 포함할 수 있다.

[0053] [화학식 1]

[0054] AMX_3

[0055] 일 예로, 화학식 1에서 A는 탄소수 1 내지 10의 알킬-암모늄(alky-ammonium)에서 선택될 수 있다. 예를 들어, 메틸암모늄 ($CH_3NH_3^+$), 포름아미디니움(formamidinium, $HC(NH_2)_2^+$), 메틸포름아미디니움(methylformamidinium, $H_3CC(NH_2)_2^+$), 구아니딘(guanidinium, $C(NH_2)_3^+$), 테트라메틸암모늄(tetramethylammonium, $(CH_3)_4N^+$), 디메틸암모늄(dimethylammonium, $(CH_3)_2NH_2^+$) 및 트리메틸암모늄(trimethylammonium, $(CH_3)_3NH^+$)에서 선택될 수 있다. 일 예로, M은 금속의 음이온이며, 예를 들어, Pb, Sn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Pd, Cd, Ge 및 Eu에서 선택될 수 있다. 일 예로, X는 할라이드이며, 예를 들어, Cl, I, Br 및 F에서 선택될 수 있다.

[0056] 일 예로, 화학식 1로 표시되는 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물은, $MAPbCl_3$(methylammonium lead chloride), $MAPbI_3$(methylammonium lead iodide), $MAPbBr_3$(methylammonium lead bromide), $FAPbCl_3$(formamidinium lead chloride), $FAPbBr_3$(formamidinum lead bromide), $FAPbI_3$(formamidinum lead iodide), $MASnCl_3$(methylammonium tin chloride), $MASnBr_3$(methylammonium tin bromide),

[0057] $MASnI_3$(methylammonium tin iodide), $FASnCl_3$(formamidinium tin chloride), $FASnBr_3$(formamidinium tin

bromide) 및 $FASnI_3$(formamidinium tin iodide)로 이루어진 군에서 선택된 적어도 하나 이상을 포함할 수 있다. 어떤 예에서 제1 페로브스카이트층(130)은 $MAPbI_3$, $FAPbI_3$ 또는 이 둘을 포함할 수 있다. 어떤 예에서 제1 페로브스카이트층(130)은 $MAPbI_3$를 포함하고, 제2 페로브스카이트층(230)은 $FAPbI_3$를 포함할 수 있다.

[0058] 일 예로, 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230)은 각각 단결정 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물을 포함할 수 있다. 일 예로, 제1 페로브스카이트층(130) 및 제2 페로브스카이트층(230)은 각각, 200 nm 내지 2600 nm; 200 nm 내지 2400 nm; 600 nm 내지 2600 nm; 또는 600 nm 내지 2400 nm의 결정립 크기(예: 입자 크기)를 포함할 수 있다.

[0059] 일 예로, 제1 페로브스카이트층(130)은 제2 페로브스카이트층(230)과 상이한 페로브스카이트층이며, 예를 들어, 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물의 종류, 혼합비, 결정성 및 입자 크기 중 적어도 하나 이상 또는 전체가 제2 페로브스카이트층(230)과 상이할 수 있다. 어떤 예에서 제1 페로브스카이트층(130)은 제2 페로브스카이트층(230)와 유기금속 할라이드 페로브스카이트 화합물의 종류에서 상이할 수 있다.

[0060] 일 실시 예에 따라, 제1 반전지층(100) 및 제2 반전지층(200)은 태양전지(1)의 구동을 위한 기능성층을 더 포함할 수 있다. 일 예로, 제1 전극층(110) 및 제1 페로브스카이트층(130) 사이, 제2 전극층(210) 및 제1 페로브스카이트층(230) 사이 또는 이 둘 모두에 기능성을 포함할 수 있다. 예를 들어, 제1 전극층(110) 및 제1 페로브스카이트층(130) 사이에 기능성층(120)을 포함하고, 제2 전극층(210) 및 제1 페로브스카이트층(230) 사이에 기능성층(220)을 포함할 수 있다. 기능성층(120) 및 기능성층(220)은 서로 동일하거나 상이한 기능, 물질 또는 이 둘을 포함할 수 있다.

[0061] 일 실시 예에 따라, 기능성층(120, 220)은 유기물, 무기물 또는 이 둘을 포함할 수 있으며, 예를 들어, 기능성층(120, 220)은, 정공전달층, 전자수송층, 차단층 등을 포함할 수 있고, 이들의 적층 순서는 태양전지(1)의 구동을 위해 적절하게 선택될 수 있다. 어떤 예에서 제1 전극층(110), 정공전달층(120) 및 제1 페로브스카이트층(130)이 순차적으로 형성될 수 있다. 어떤 예에서 제2 전극층(210), 전자수송층(220a), 차단층(220b) 또는 이 둘, 및 제2 페로브스카이트층(230)이 순차적으로 적층될 수 있다.

[0062] 예를 들어, 정공전달층은 정공전도성 고분자 유기 정공 전달물질을 포함할 수 있으며, PEDOT:PSS(poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)), P3HT(poly[3-hexylthiophene]), P3OT(poly(3-octyl thiophene)), POT(poly(octyl thiophene)), P3DT(poly(3-decyl thiophene)), P3DDT(poly(3-dodecyl thiophene)), PTAA (poly[bis(4-phenyl)(2,4,6-trimethylphenyl)amine]), Spiro-MeOTAD ([2,2',7,77'-tetrkis(N,N-di-p-methoxyphenyl amino)-9,9'-spirobifluorene]) 등일 수 있으나, 이에 제한되지 않는다.

[0063] 예를 들어, 전자수송층은 탄소계 물질을 포함하고, 단일벽 탄소나노튜브, 이중벽 탄소나노튜브, 다중벽 탄소나노튜브, 탄소나노혼, 탄소나노섬유, 그래핀, 풀러렌계 물질 및 이들의 유도체로부터 선택되는 1종 이상을 포함할 수 있다. 어떤 예에서 플러렌계 물질은 PCBM(phenyl-C_{61}-butyric acid methyl ester) 및 풀러렌(C_{60}) 등을 포함할 수 있으나, 이에 제한되지 않는다.

[0064] 예를 들어, 차단층은 전자 차단을 위한 유기 반전도성 물질을 포함하고, 2,9-디메틸-4,7-디페닐-1,10-펜난트롤린(2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline(BCP, bathocuproine).), 트리스-(8-히드록시퀴놀린에이토)알루미늄(III)(Alq_3), N,N'-비스(3-메틸페닐)-(1,1'-바이페닐)-4'-디아민(TPD), 4,4'-비스[N-(나프틸)-N-페닐아미노]바이페닐(NPD), 서브프탈로시아닌(SubPc), 펜타센(pentacene), 스쿠아레인, 구리 프탈로시아닌(copper phthalocyanine, CuPc), 아연 프탈로시아닌(ZnPc), 클로로알루미늄 프탈로시아닌(ClAlPc), 트리스(2-페닐피리딘)($Ir(ppy)_3$), 피로닌 B(pyronin B) 등을 포함할 수 있으나, 이에 제한되지 않는다.

[0065] 일 예로, 기능성층(120, 220)은 각각 개별적 또는 전체로 5 nm 내지 60 nm 두께에서 선택될 수 있다.

[0066] 일 실시 예에 따라, 도 2는 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제조방법의 흐름도이다.

[0067] 일 실시 예에 따라, 도 2를 참조하면, 제1 반전지층을 제조하는 단계(310), 제2 반전지층을 제조하는 단계(320) 및 제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계(330)을 포함할 수 있다.

[0068] 일 실시 예에 따라, 제1 반전지층을 제조하는 단계(310)은 제1 전극층(예: 도 1의 110의 접합 이전 상태) 및 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 130의 접합 이전 상태)을 포함하는 제1 반전지층(예: 도 1의 100의 접합 이전 상태)을 형성할 수 있다. 일 예로, 제1 전극층(예: 도 1의 110의 접합 이전 상태) 상에 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 130의 접합 이전 상태)을 증착, 코팅 또는 전사 등을 이용하여 형성할 수 있다. 예를 들어, 제1

전극층(예: 도 1의 110의 접합 이전 상태) 상에 기능성층(예: 도 1의 120의 접합 이전 상태)을 형성한 이후 기능성층(120) 상에 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 130의 접합 이전 상태)을 증착, 코팅 또는 전사 등을 이용하여 형성할 수 있다.

[0069] 일 실시 예에 따라, 제2 반전지층을 제조하는 단계(320)은 제2 전극층(예: 도 1의 210의 접합 이전 상태) 및 제2 페로브스카이트층(예: 도 1의 230의 접합 이전 상태)을 포함하는 제2 반전지층(예: 도 1의 200의 접합 이전 상태)을 형성할 수 있다. 일 예로, 제1 전극층(예: 도 1의 210의 접합 이전 상태) 상에 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 230의 접합 이전 상태)을 증착, 코팅 또는 전사 등을 이용하여 형성할 수 있다. 일 예로, 제2전극층(예: 도 1의 210의 접합 이전 상태) 상에 기능성층(예: 도 1의 220의 접합 이전 상태)을 형성한 이후 기능성층(예: 도 1의 220의 접합 이전 상태) 상에 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 230 의 접합 이전 상태)을 증착, 코팅 또는 전사 등을 이용하여 형성할 수 있다.

[0070] 일 실시 예에 따라, 제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계(330)는, 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 130의 접합 이전 상태) 및 상기 제2 페로브스카이트층(예: 도 1의 230의 접합 이전 상태)을 접합시켜 적층 구조체(도 1의 1)를 형성할 수 있다.

[0071] 일 예로, 제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계(330)는, 제1 반전지층의 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 130의 접합 이전 상태) 상에 제2 반전지층의 제2 페로브스카이트층(예: 도 1의 230의 접합 이전 상태)을 위치(예: 접촉)시키고 열간 압착하는 단계를 포함할 수 있다. 일 예로, 열간 압착하는 단계는, 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 130의 접합 이전 상태) 및 제2 페로브스카이트층(예: 도 1의 230의 접합 이전 상태)은 서로 마주보거나 서로 접촉한 상태에서 상온 이상; 상온 내지 150 ℃; 90 ℃ 내지 150 ℃; 110 ℃ 내지 150 ℃에서 10 분 내지 30 분 동안 10 bar 내지 100 bar의 압력을 가하여 열간 압착할 수 있다. 어떤 예에서 바람직하게는 110 ℃ 내지 150 ℃ 온도에서 열간 압착할 수 있다. 상기 온도, 시간 및 압력 중 적어도 하나 이상 또는 전체 범위 내에 포함되면 양면 양이온 교환반응이 효과적으로 진행되고 고성능 태양전지를 확보할 수 있다.

[0072] 일 예로, 제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계(330)는, 제1 반전지층을 열처리하는 단계, 제2 반전지층을 열처리하는 단계; 및 열처리된 제1 반전지층의 제1 페로브스카이트층(예: 도 1의 130의 접합 이전 상태) 상에 열처리된 제2 반전지층의 제2 페로브스카이트층(예: 도 1의 230의 접합 이전 상태)을 위치(예: 접촉)시키고 열간 압착하는 단계를 포함할 수 있다. 일 예로, 제1 반전지층을 열처리하는 단계 및 제2 반전지층을 열처리하는 단계는, 각각 60 ℃ 내지 180 ℃; 60 ℃ 내지 100 ℃; 또는 100 ℃ 내지 180 ℃ 및 10 초 내지 600 초 동안 열처리할 수 있다. 어떤 예에서 바람직하게는 100 ℃ 내지 180 ℃에서 열처리할 수 있다. 어떤 예에서 공기, 비활성 가스 및 에어 중 적어도 하나 이상의 분위기에서 열처리할 수 있다. 어떤 예에서 대기압 또는 진공 상태에서 열처리할 수 있다.

[0073] 이하, 실시예 및 비교예에 의하여 본 발명을 더욱 상세히 설명하고자 한다.

[0074] 단, 하기 실시예는 본 발명을 예시하기 위한 것일 뿐, 본 발명의 내용이 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다.

[0075] **실시예**

[0076] 양면 적층을 통한 PI@GR 기반 반투명 페로브스카이트 태양전지의 제작

[0077] PI@GR 전극(ACS Appl. Mater. Interfaces 2022, 14, 29, 33297-33305를 참조하여 제작)를 적용하여 $MAPbI_3$를 포함하는 하부 half-cell (PI@GR/poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)/$MAPbI_3$)을 준비하였다.

[0078] $FAPbI_3$를 포함하는 상부 half-cell (PI@GR/bathocuproine (BCP)/fullerene (C_{60})/$FAPbI_3$)을 준비하고, 하부 half-cell과 상부 half-cell을 적층하여 반투명 페로브스카이트 태양전지를 제작하였다.

[0079] **i)PI@GR 및 도핑된 PI@GR 전극 특성**

[0080] 도 3은 일 실시 예에 따라, PI@GR 전극 특성을 나타낸 것으로, (a) glass/ITO, PET/ITO 및 PI@GR의 광투과율(점선 수직선은 550 nm 파장을 나타냄), (b) 곡률 반경(100회 굽힘 반복 후) 및 (c) 굽힘 반복(곡률 반경 5 mm)에 따른 PET/ITO 및 PI@GR의 정규화(normalized)된 면저항, (c)의 삽입 이미지는 곡률 반경에서 각각 200 회 및 10,000회 굽힘 반복 후 광학 현미경으로 측정한 PET/ITO 및 PI@GR의 광학 이미지이며, (d) Pristine, TETA(triethylenetetramine) 및 APSIM(ammonium persulfate/imidazole)으로 도핑된 PI@GR의 XPS 스펙트럼(녹색, 빨간색 및 노란색 상자는 각각 O 1s, N 1s 및 C 1s 검출을 나타냄). Pristine, TETA및 APSIM으

로 도핑된 PI@GR의 (e) UPS 스펙트럼 및 (f) 면저항/일함수를 비교한 것이다.

[0081] 도 3의 (a)에서 PI@GR 전극은 PET(polyethylene terephthalate)/ITO(indium tin oxide)(72.4%) 및 glass/ITO(91.2%)에 비해 높은 광투과율(92.3%)을 보여준다. 또한, PI 필름은 330 nm 미만의 파장을 차단할 수 있어 페로브스카이트의 자외선에 의한 광분해를 저감시키는 데 도움을 줄 수 있다. 도 1의 (b)에서 PET/ITO 및 PI@GR 전극을 다양한 곡률 반경에서 100회 굽힘 반복 후 정규화(normalized)된 면저항 변화 그래프이며, PI@GR 전극의 우수한 유연성을 보여준다. 또한, 도 3의 (c)에서 5 mm 곡률 반경에서 최대 10,000회 굽힘 반복 후에도 면저항 변화가 거의 없음을 통해 PI@GR 전극의 높은 안정성을 확인할 수 있다. 이를 통해 PI@GR 전극의 우수한 기계적 내구성 및 유연성을 검증하였다. 또한, 도 3의 (d)에서 PI@GR 전극을 APSIM(ammonium persulfate/imidazole) 및 TETA(triethylenetetramine) 물질로 도핑, 각각 p-type과 n-type으로 개질하여 원활한 전하 수집을 수행할 수 있도록 하였으며 해당 도핑 결과는 XPS(X-ray photoelectron spectroscopy) 분석을 통해서 확인할 수 있다. 도 3의 (e)에서 APSIM 및 TETA 물질로 도핑된 PI@GR의 일함수 변화는 UPS(ultraviolet photoelectron spectroscopy) 측정을 통해 분석할 수 있다. 더불어, 도핑된 PI@GR의 면저항/일함수 변화를 도 3의 (f)에 나타낸 바와 같이 비교 정리하였다.

[0082] **ii) 고성능 양면 적층 반투명 태양전지 제작을 위한 적층 공정 조건 탐색**

[0083] 도 4a는 일 실시예에 따라, 고성능 양면 적층 반투명 태양전지 제작을 위한 적층 공정 최적화를 탐색한 것으로, (a) 페로브스카이트 양면 적층 공정 개략도이며, 이는 $MAPbI_3$를 60 ℃에서 10초, 30초, 60초, 180초 및 600초 동안 열처리하고, 100 ° C에서 60초 동안 준비한 $FAPbI_3$로 적층 공정을 진행한 것이다. (b) 페로브스카이트 양면 적층 공정 개략도이며, $FAPbI_3$를 100 ° C에서 10초, 30초, 60초, 180초, 600초 동안 열처리하고, 60 ℃에서 180초 동안 준비된 $MAPbI_3$로 적층 공정을 진행한 것이다.

[0084] 도 4b는 도 4a의 (a) 및 (b)의 과정에 따라 반투명 페로브스카이트 태양전지의 특성을 나타낸 것으로, (a, d)반투명 페로브스카이트 태양전지의 *J-V* 특성이고, (b, e) 도 4a의 (a, b)의 과정에 따라 제작된L-$MAPbI_3$+FA 및 (c, f) L-$FAPbI_3$+MA층의 PL 스펙트럼이다.

[0085] 도 4a의 (a) 및 (b)는 양면 적층 공정의 개략도를 나타낸 것으로, 효율적인 양이온 교환 반응을 통한 고품질 페로브스카이트 층 제작을 위해 페로브스카이트 양면 적층 공정 최적화를 진행하였다. $MAPbI_3$ 및 $FAPbI_3$의 페로브스카이트 전구체 용액을 각각의 PI@GR/charge transport layer (CTL) 기판 상부에 스핀 코팅하고 60 ℃ 및 100 ℃에서 열처리하여 페로브스카이트 필름을 형성한 것이다. 이어서, 준비된 2개의 페로브스카이트 필름을 적층 공정을 통해 양이온 교환이 진행된 페로브스카이트 필름(L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$+MA)을 형성하였다.

[0086] $MAPbI_3$ 공정 최적화를 위해서 $MAPbI_3$(하부 half-cell) 필름은 60 ℃에서 10초, 30초, 60초, 180초 및 600초 동안 열처리하고, $FAPbI_3$(상부 half-cell) 필름은 100 ℃에서 60초 동안 열처리하였다. 이후, 적층 공정은 하부 및 상부 half-cell을 120 ℃에서 30분 동안 진행하였다. 도 4b의 (a)에서 전류 밀도-전압(current density-voltage, *J-V*) 특성에서 볼 수 있듯이 $MAPbI_3$ 필름을 180초 동안 열처리하여 제작된 페로브스카이트 태양전지에서 최고 성능이 관찰된 것을 확인할 수 있다.

[0087] 도 4b의 (b) 및 (c)에서 *J-V* 분석과 마찬가지로, 가장 높은 PL(photoluminescence) 세기는 L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$+MA 필름 모두에서 60 ℃에서 180초 동안 열처리된 $MAPbI_3$에 조건에서 관찰된 것을 확인할 수 있다. $FAPbI_3$ 공정 최적화를 위해서 $FAPbI_3$ 필름은 100 ℃에서 10초, 30초, 60초, 180초 및 600초 동안 열처리하여 제작하였으며, $MAPbI_3$ 필름은 60 ℃에서 180초 동안 열처리를 진행하였음. 이후 앞선 실험과 동일한 적층 공정 조건으로 적층 공정을 진행하였다.

[0088] 도 4b의 (d)에서 *J-V* 특성 분석결과로 100 ℃에서 60초 동안 열처리한 $FAPbI_3$ 필름 조건에서 가장 높은 태양전지 성능이 확보되고, 도 4b의 (e) 및 (f)에서 L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$+MA 필름 모두에서도 동일한 조건에서 가장 높은 PL 세기가 관찰된 것을 확인할 수 있다.

[0089] **ii)양면 적층 공정을 통해서 양이온 교환반응이 진행된 페로브스카이트 필름 분석**

[0090] 도 5a 및 도 5b는, 일 실시예에 따라, 양면 적층 페로브스카이트 필름에 대한 양이온 교환 반응의 효과를 평가

한 것이다.

[0091] 도 5a에서 (a) P-$MAPbI_3$, (b)P-$FAPbI_3$, (c)L-$MAPbI_3$+FA 및 (d)L-$FAPbI_3$+MA 필름의 평면 (top-view) SEM 이미지이다. 도 5b에서 P-$MAPbI_3$, P-$FAPbI_3$, L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$+MA 필름의 (a) UV-vis 흡수 스펙트럼, (b) ^1H NMR 스펙트럼, (c) steady-state PL 스펙트럼, 및 (d) XRD 패턴이다.

[0092] 도 5b의 (a)의 파란색 및 빨간색 상자는 각각 MA의 NH_3^+ 및 FA의 CH 피크를 나타낸다. 도 5b의 (c) 및 (d)의 검은색, 파란색, 녹색 및 빨간색 점선 수직선은 각 스펙트럼의 특성 피크 위치를 나타낸다.

[0093] 도 5a에서 평면 SEM (Top-view scanning electron microscope)을 통해서 적층 공정을 진행하지 않은 페로브스카이트 필름(P-$MAPbI_3$ 및 P-$FAPbI_3$) 대비 적층 공정을 통해서 합성된 페로브스카이트 필름(L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$+MA)의 입자 크기가 증가하였으며 필름의 결정성 역시 향상된 모습을 관찰할 수 있다.

[0094] 도 5b의 (a)에서 UV-vis 흡수 스펙트럼을 통한 페로브스카이트 필름 분석에서 P-$FAPbI_3$는 낮은 파장대(~400 nm)의 흡광도를 보이는데, 이는 페로브스카이트의 δ상이 주를 이룸을 나타낸다. 이는 안정적인 α상을 형성하기 위해 일반적으로 140 ℃ 이상의 열처리 온도가 필요하기 때문이다. 그러나 L-$FAPbI_3$+MA는 양이온 교환반응을 통해 페로브스카이트가 α상으로 변화함에 따라 감소된 밴드갭 및 고품질 페로브스카이트 입자가 형성됨으로써 780 nm 파장대에서의 흡광도를 보여준다.

[0095] 도 5b의 (b)는 적층 과정에서 상대 페로브스카이트 층으로의 MA 및 FA 양이온 이동을 확인하기 위해 도 5b의 (b)와 같이 ^1H-NMR(^1H nuclear magnetic resonance)를 사용하여 페로브스카이트 필름의 조성 변화를 분석한 것이다. 즉, P-$MAPbI_3$ 및 P-$FAPbI_3$ 필름은 7 ppm 내지 8 ppm 범위에서 식별 가능한 피크가 확인된다. MA의 NH_3^+는 P-$MAPbI_3$의 경우 7.5 ppm에서 관찰되었고, P-$FAPbI_3$ 필름은 7.8 ppm에서 특징적인 피크를 나타냈으며, 이는 $FAPbI_3$에서 FA의 CH와 관련 있는 피크이다. L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$의 경우 FA 및 MA의 특징적인 피크가 각각 7.8 및 7.5 ppm에서 새롭게 나타난다. 이 결과는 각층의 양이온이 적층 공정 중 $MAPbI_3$ 및 $FAPbI_3$의 기존 화학 조성을 방해하지 않고 상대층의 페로브스카이트 격자로 확산되었음을 나타낸다.

[0096] 도 5b의 (c)에서 P-$MAPbI_3$ 및 P-$FAPbI_3$에 비해 L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$+MA는 787 nm 및 799 nm에서 현저하게 향상된 피크 강도와 적색 및 청색 이동 PL 스펙트럼을 보였으며, 이는 적층 공정 중 양이온 교환 반응에 기인한 결과이다. 해당 결과는 페로브스카이트 필름의 품질이 향상되었음을 의미할 수 있다.

[0097] 도 5b의 (d)에서 X-ray diffraction (XRD) 패턴 분석에서는 P-$MAPbI_3$, L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$+MA에서는 α상(2Θ = 14.14°, 14.04° 및 13.98°) 관련 피크가, P-$FAPbI_3$ 필름에서는 δ상(2Θ = 11.92°) 피크와 더불어 다량의 PbI_2 피크가 관찰됨을 확인할 수 있다(2Θ= 12.60°). 이러한 결과들은 양면 적층 공정을 통한 양이온 교환반응에 의해 고품질 페로브스카이트 필름이 제작될 수 있다는 이론적 근거를 제시할 수 있다.

[0098] **iv) 유연 양면 양이온 교환된 반투명 페로브스카이트 태양전지 성능 분석**

[0099] 도 6a 및 도 6b는, 일 실시 예에 따라, 양면 적층 반투명 페로브스카이트 태양전지 성능을 평가한 것으로, 도 5a에서 PI@GR 기반 양면 적층 반투명 페로브스카이트 태양전지의 (a) 모식도, (b) cross-section SEM 이미지 및 (c) 디지털 이미지이다.

[0100] 도 6b에서 (a) flat-band 에너지 레벨 다이어그램이고, (b) 양극(PEDOT:PSS) 및 음극(BCP/C_{60}) 방향에서 AM 1.5G 조명 하에서 측정된 페로브스카이트 태양전지의 *J-V* 특성, (c) 페로브스카이트 태양전지의 최대 전력 추적(maximum power point tracking), (d) P-$MAPbI_3$, L-$MAPbI_3$+FA 및 L-$FAPbI_3$+MA의 TRPL 스펙트럼, (e) 양면 페로브스카이트 필름, 양면 페로브스카이트 필름/CTL (PEDOT:PSS 및 C_{60}/BCP 포함) 및 (f) PI@GR 기반 양면 적층 반투명 페로브스카이트 태양전지의 광 투과율. 유연 및 유연하지 않은 반투명 페로브스카이트 태양전지에 대한 소자 성능 비교한 것이다.

[0101] 도 6b에 관련 분석 결과는 표 1에서 역방향(R) 및 순방향(F) 스캔 방향에서 측정된 페로브스카이트 태양전지의 최고 성능 지표로 나타내었다.

표 1

Illumination side	J_{SC} [mA cm^{-2}]	V_{OC} [V]	FF [%]	PCE [%]
PI@GR-Anode (R)	20.6	1.03	71.1	15.1
PI@GR-Anode (F)	20.1	1.03	71.2	14.7
PI@GR-Cathode (R)	19.2	1.03	70.3	13.8
PI@GR-Cathode (F)	18.7	1.03	70.4	13.5

[0102]

[0103] 도 6a의 (a)는 본 발명에서 제작한 PI@GR 기반의 양면 적층 공정을 통한 반투명 페로브스카이트 태양전지는 PI@GR/PEDOT:PSS/$MAPbI_3$/$FAPbI_3$/C_{60}/BCP/PI@GR의 구조로 구성되는 것을 나타내었다.

[0104] 도 6a의 (b) 및 (c)에서 실제 완성된 페로브스카이트 태양전지는 cross-section SEM 및 디지털 이미지를 통해 확인 가능할 수 있다.

[0105] 도 6b의 (a)는 도핑된 PI@GR 전극과 각 페로브스카이트 태양전지 구성 물질들의 flat-band 에너지 레벨 다이어그램을 보여준다. 양면 적층 반투명 페로브스카이트 태양전지는 표준 테스트 조건(AM 1.5G, 100 mW cm^{-2})에서 측정되었으며, 최적화된 소자의 *J-V* 특성은 도 6b의 (b)에서 확인할 수 있다. 양극 방향에서 빛을 조사했을 때 단락전류밀도(J_{SC})는 20.6 mA cm^{-2}, 개방전압(V_{oc})은 1.03 V, 충전율(FF)은 71.1%로 광전변환효율(PCE)은 15.1%를 기록하였다. 반대쪽(음극) 방향의 경우 PEDOT:PSS에 비해 BCP/C_{60}의 투과율 감소로 인해서 J_{SC}가 소폭 감소한다. 이러한 결과는 표 1에서 확인할 수 있다.

[0106] 또한, 해당 소자는 도 6b의 (c)에서 광전변환효율 및 J_{SC} 값이 200초 동안 안정적으로 유지됨을 확인할 수 있다.

[0107] 도 6b의 (d)에서 Time-resolved PL (TRPL) 분석에서 추출된 평균 캐리어 수명은 L-$FAPbI_3$+MA, L-$MAPbI_3$+FA 및 P-$MAPbI_3$에서 각각 12.5, 12.7 및 20.8 ns가 관찰된 반면, P-$FAPbI_3$에서는 검출 가능한 캐리어가 측정되지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 적층 공정을 통해 증가된 페로브스카이트 입자 크기 및 향상된 결정성으로 인해 캐리어 수송 능력이 향상될 수 있음을 의미한다. 도 6b의 (e)에서 Glass/$MAPbI_3$/$FAPbI_3$/glass, glass/PEDOT:PSS/$MAPbI_3$/$FAPbI_3$/C_{60}/BCP/glass 및 양면 적층 반투명 태양전지의 광투과율을 측정하였으며, PI@GR의 우수한 광투과율로 인해 glass/PEDOT:PSS/$MAPbI_3$/$FAPbI_3$/C_{60}/BCP/glass와 양면 적층 반투명 태양전지의 광투과율은 거의 유사한 경향성을 보여준다.

[0108] 도 6b의 (f)는 유연 및 비유연 반투명 페로브스카이트 태양전지에 대한 소자 성능 비교 및 분석한 것으로서, 본 발명에서 제작된 반투명 태양전지의 우수성을 확인할 수 있다.

[0109] **v) PI@GR 기반 양면 적층 반투명 페로브스카이트 태양전지 안정성 분석**

[0110] 도 7은, 일 실시 예에 따라, PI@GR 기반 양면 적층 반투명 페로브스카이트 태양전지 안정성을 평가한것이다. 25 ℃에서 (a) 45-55% RH, (b) 85% RH 및 (c) 1 sun 조건에서의 연속적인 광조사하에서 페로브스카이트 태양전지의 정규화(normalized)된 광전변환효율 저하를 분석하고, (d) 평평한 상태 및 굽힘 반경 5 mm에서의 페로브스카이트 태양전지를 보여주는 디지털 사진, (e) 다양한 곡률 반경에서 100회 굽힘 테스트 후 및 (f) 반경 5 mm에서 다양한 굽힘 반복 조건하에서 페로브스카이트 태양전지의 normalized 광전변환효율 저하 분석 결과이다.

[0111] 도 7의 (a)에서 PI@GR 전극 기반 양면 적층 페로브스카이트 태양전지는 25 ℃ 및 45-55% relative humidity (RH)에서 성능 저하가 거의 없는 매우 안정적인 태양전지 구동 안정성을 보여준다.

[0112] 도 7의 (b)에서 가혹한 조건(25 ℃ 및 85% RH)에 노출된 후에도 해당 태양전지는 초기 성능의 90% 수준을 유지한다. 도 7의 (c)에서 연속적 1 sun 조사 4,000분 후에도 소자 성능은 초기값의 95% 수준으로 유지되었으며,

이는 PI@GR의 UV 차단 특성이 페로브스카이트 태양전지의 광 안정성 향상에 기여할 수 있음을 보여준다.

[0113] 또한, 본 발명에서 제작된 유연 양면 적층 반투명 페로브스카이트 태양전지의 기계적 내구성을 다양한 굽힘 반경과 굽힘 반복 조건에서 평가하였다. 즉, 도 7의 (d)는 평평한 상태와 5 ㎜의 굽힘 반경에서 해당 소자의 디지털 사진을 보여준다.

[0114] 도 7의 (e)에서 유연 양면 적층 반투명 페로브스카이트 태양전지는 굽힘 반경에 관계없이 성능 저하가 거의 발생하지 않았으나, PET/ITO기반 소자의 경우 ITO 및 금속 상대 전극의 낮은 기계적 내구성으로 인해 굽힘 반경이 증가함에 따라 태양전지 효율이 급격히 감소하다. 도 7의 (f)에서 반경 5 ㎜에서 최대 10,000회 굽힘 반복의 장기간 기계적 응력 하에서도 PI@GR 기반 소자는 우수한 기계적 내구성을 보여준다.

[0115] 일 실시 예에 따라, 두 개의 개별 페로브스카이트(예: P-$MAPbI_3$, P-$FAPbI_3$) 필름을 적층하는 공정을 통하여 고성능의 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지를 구현할 수 있다. 예를 들어, $MAPbI_3$와 $FAPbI_3$ 페로브스카이트 층을 준비한 이후 최적화된 양면 적층 공정(bifacial lamination process)을 통해서 $MAPbI_3$와 $FAPbI_3$ 페로브스카이트 간의 효율적인 양면 양이온 교환 반응을 진행하였으며, 이로 인해 입자 크기와 결정성이 향상된 고품질 페로브스카이트 필름을 제작하였다. 이와 함께 폴리이미드 그래핀 일체형 전극(polyimide-integrated graphene electrodes, PI@GR)을 기반으로 하는 고성능 유연 양면 양이온 교환된 반투명 페로브스카이트 태양전지(ST-bifacial cation-exchanged PSCs, ST-BCE-PSCs)를 제공할 수 있다. 즉, 15.1%의 광전변환효율을 가지는 유연 반투명 페로브스카이트 태양전지를 구현하고, 또한, PI@GR 전극의 우수한 불투과성, 기계적 내구성 및 UV 차단 특성은 다양한 환경 조건에서 해당 소자의 구동 안정성을 향상시킬 수 있다.

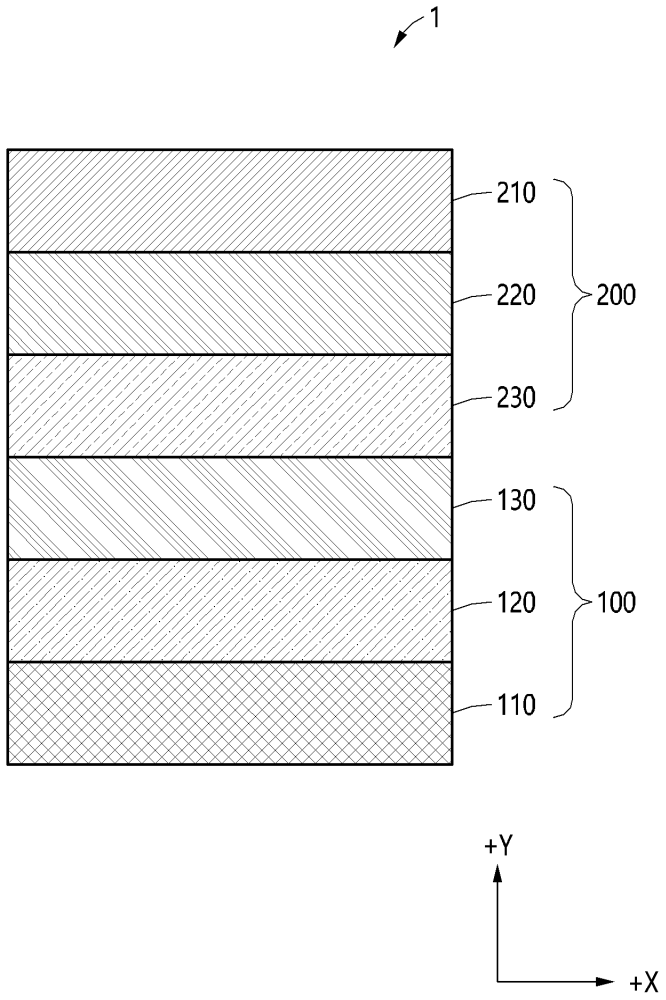
[0116] 본 발명은 고품질 페로브스카이트가 요구되는 페로브스카이트 기반 광전소자 제작에 광범위하게 활용 가능하며, 이를 통해 고성능, 고안정성 및 고내구성을 확보한 차세대 광전소자를 제공할 수 있다.

[0117] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기를 기초로 다양한 기술적 수정 및 변형을 적용할 수 있다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

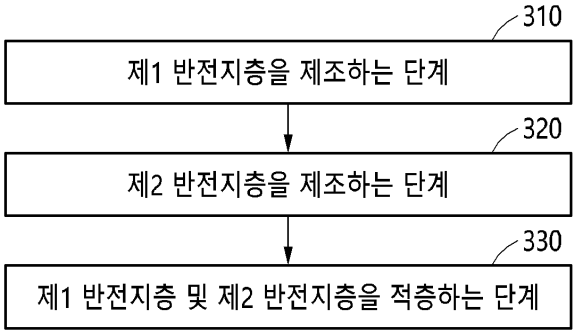
[0118] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 청구범위의 범위에 속한다.

도면

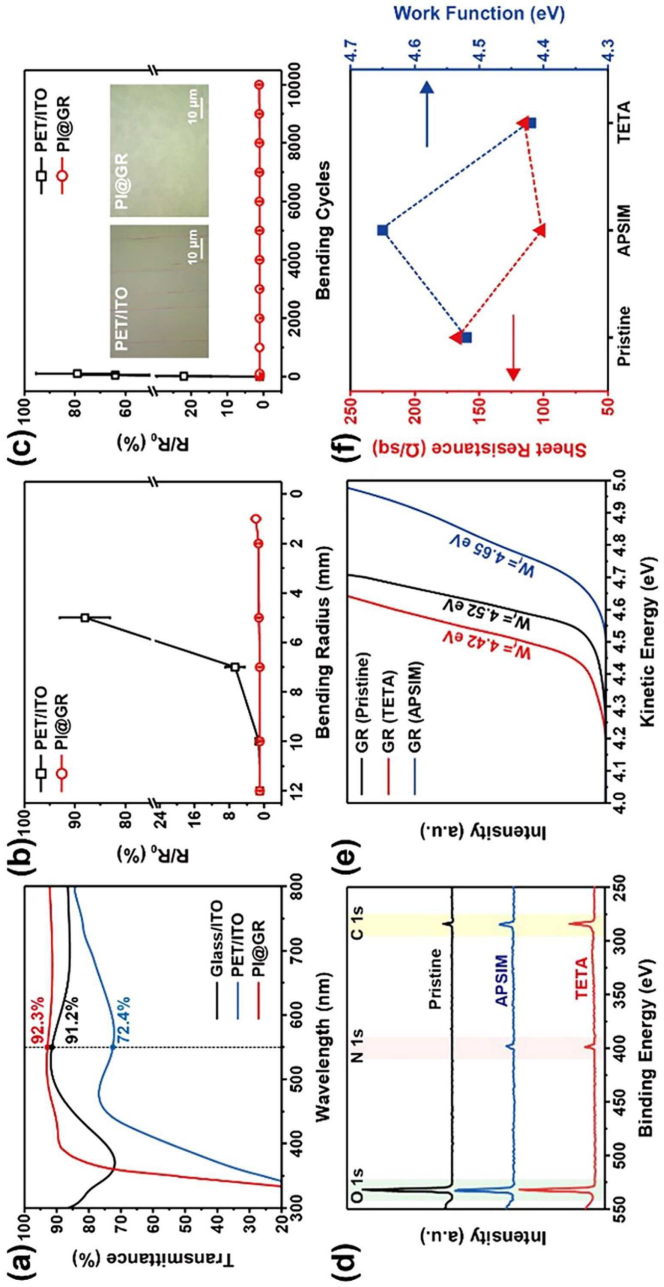
도면1


1
210
220
200
230
130
120
100
110
+Y
+X

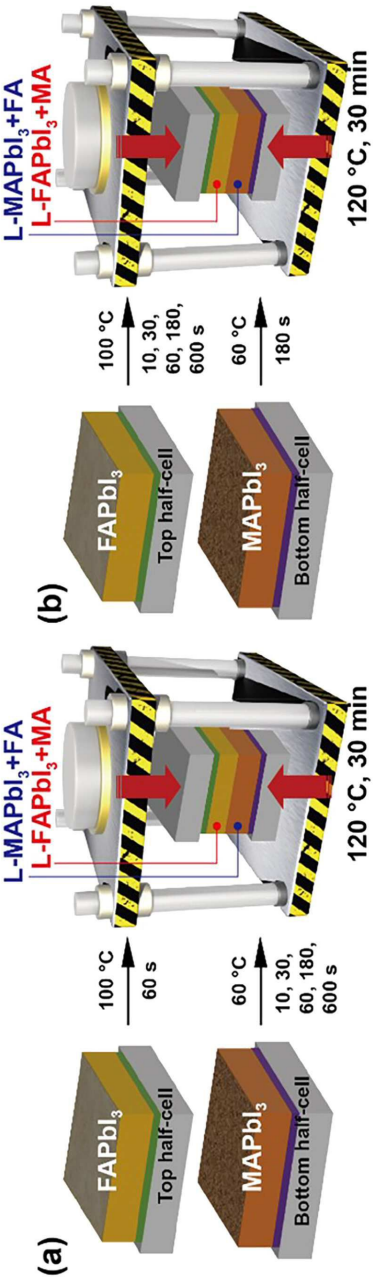
도면2


310
제1 반전지층을 제조하는 단계
320
제2 반전지층을 제조하는 단계
330
제1 반전지층 및 제2 반전지층을 적층하는 단계

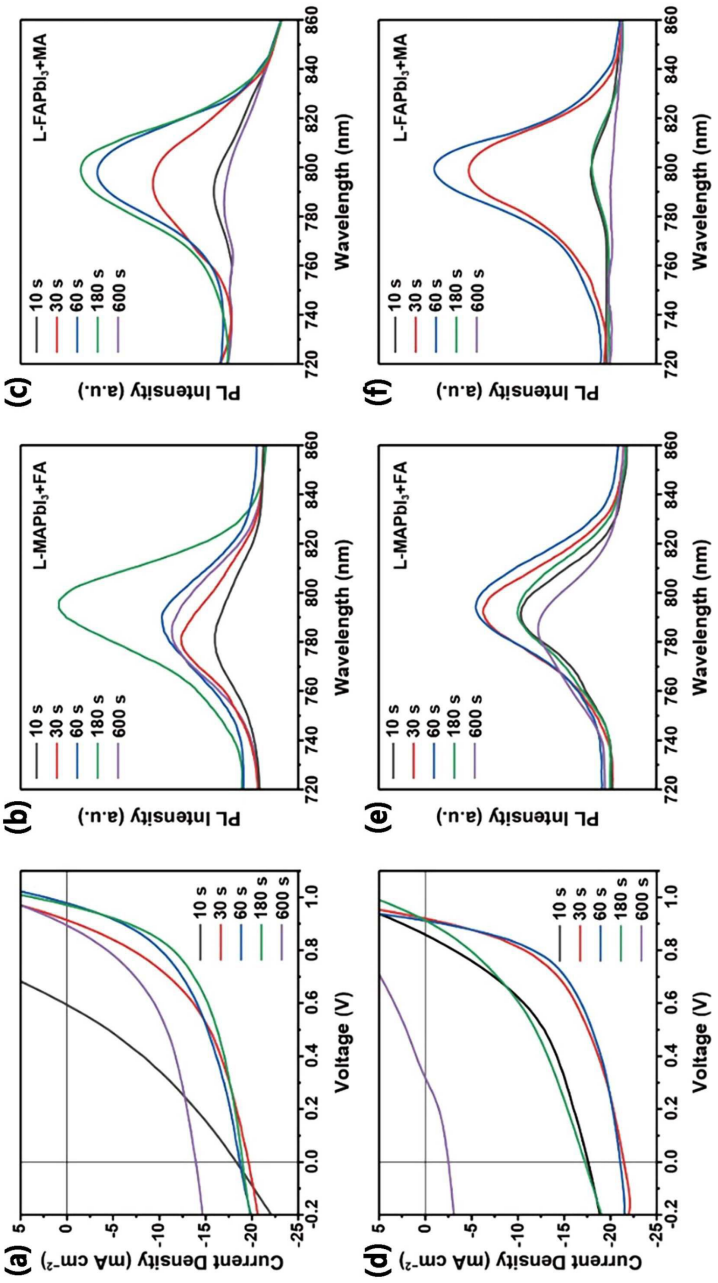
도면3


(a)
Transmittance (%)
Wavelength (nm)
Glass/ITO
PET/ITO
PI@GR
92.3%
91.2%
72.4%
(b)
R/R0 (%)
Bending Radius (mm)
PET/ITO
PI@GR
(c)
R/R0 (%)
Bending Cycles
PET/ITO
PI@GR
10 μm
(d)
Intensity (a.u.)
Binding Energy (eV)
O 1s
N 1s
C 1s
Pristine
APSIM
TETA
(e)
Intensity (a.u.)
Kinetic Energy (eV)
GR (Pristine)
GR (TETA)
GR (APSIM)
W= 4.42 eV
W= 4.52 eV
W= 4.65 eV
(f)
Work Function (eV)
Sheet Resistance (Ω/sq)
Pristine
APSIM
TETA

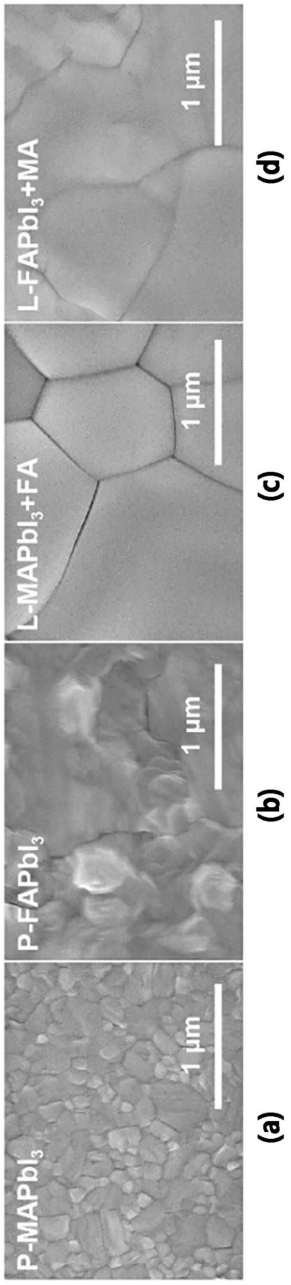
도면4a


(a)
FAPbI3
Top half-cell
MAPbI3
Bottom half-cell
100 °C
60 s
60 °C
10, 30, 60, 180, 600 s
L-MAPbI3+FA
L-FAPbI3+MA
120 °C, 30 min
(b)
FAPbI3
Top half-cell
MAPbI3
Bottom half-cell
100 °C
10, 30, 60, 180, 600 s
60 °C
180 s
L-MAPbI3+FA
L-FAPbI3+MA
120 °C, 30 min

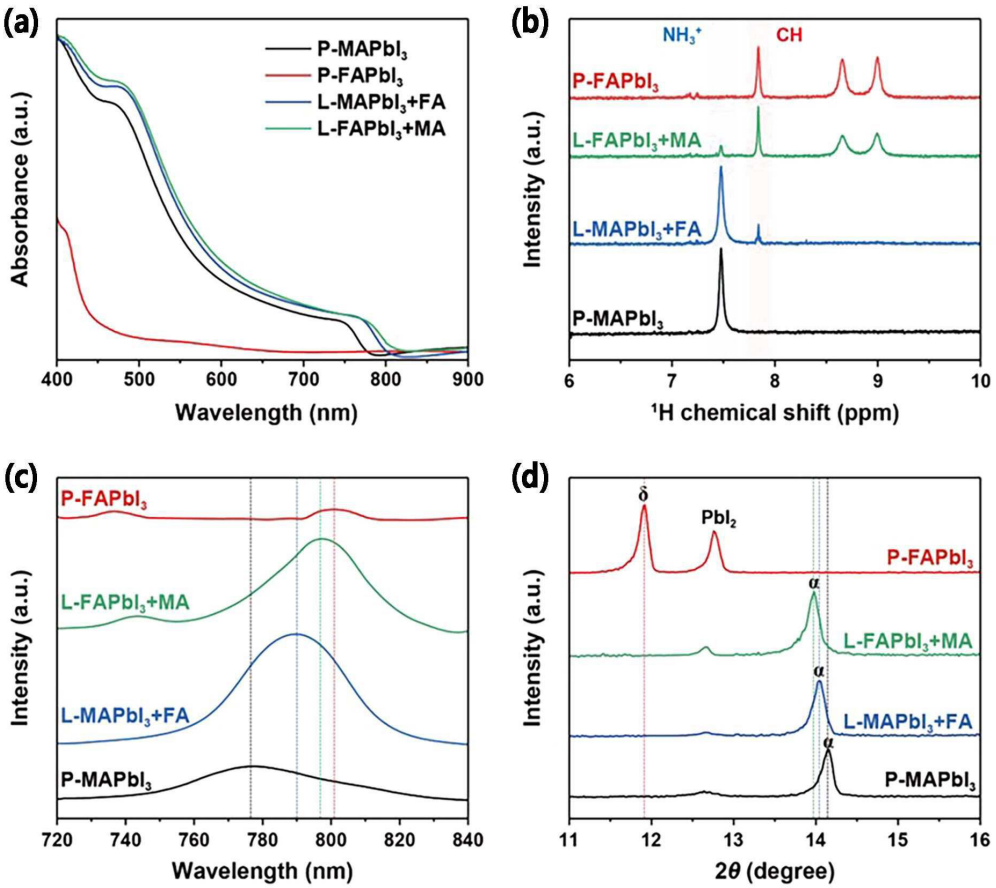
도면4b


(a)
Current Density (mA cm^{-2})
Voltage (V)
10 s
30 s
60 s
180 s
600 s
(b)
L-MAPbI$_3$+FA
PL Intensity (a.u.)
Wavelength (nm)
(c)
L-FAPbI$_3$+MA
(d)
(e)
(f)

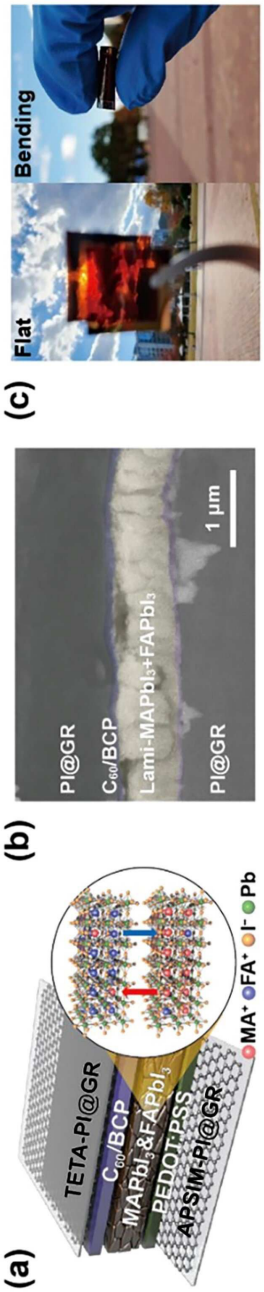
도면5a



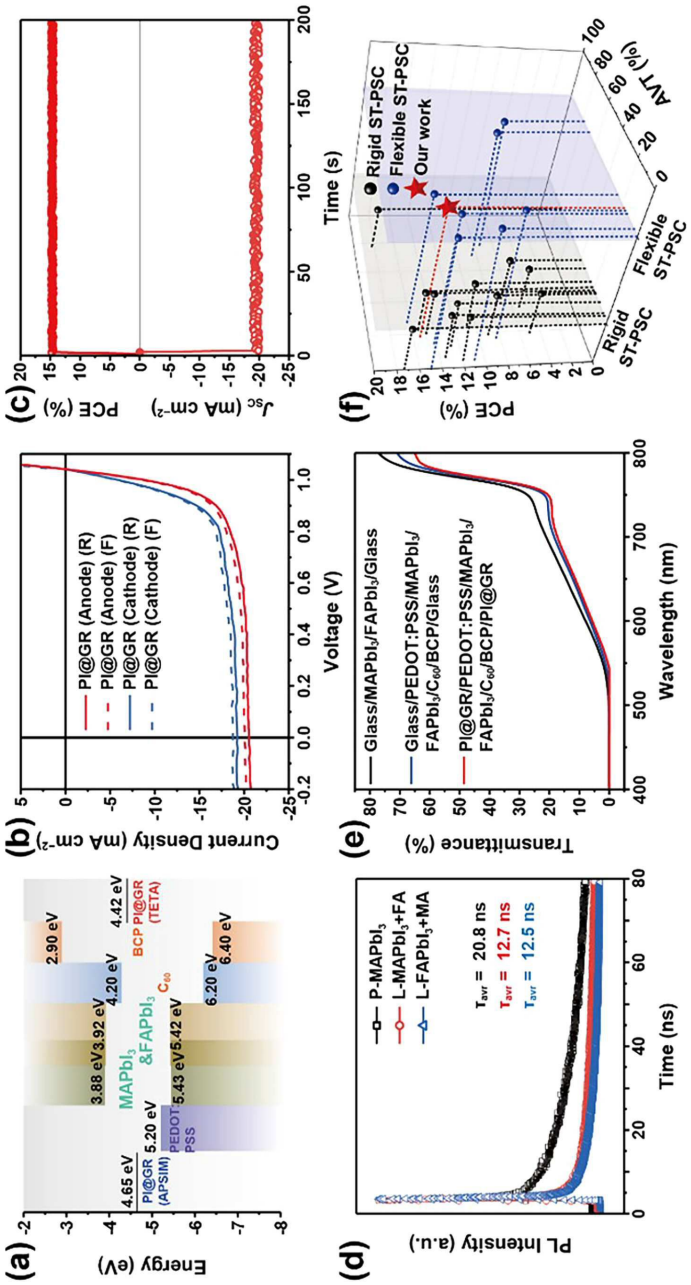
도면5b


(a)
P-MAPbI3
P-FAPbI3
L-MAPbI3+FA
L-FAPbI3+MA
Absorbance (a.u.)
Wavelength (nm)
(b)
NH3+
CH
P-FAPbI3
L-FAPbI3+MA
L-MAPbI3+FA
P-MAPbI3
Intensity (a.u.)
1H chemical shift (ppm)
(c)
P-FAPbI3
L-FAPbI3+MA
L-MAPbI3+FA
P-MAPbI3
Intensity (a.u.)
Wavelength (nm)
(d)
δ
PbI2
α
P-FAPbI3
L-FAPbI3+MA
L-MAPbI3+FA
P-MAPbI3
Intensity (a.u.)
2θ (degree)

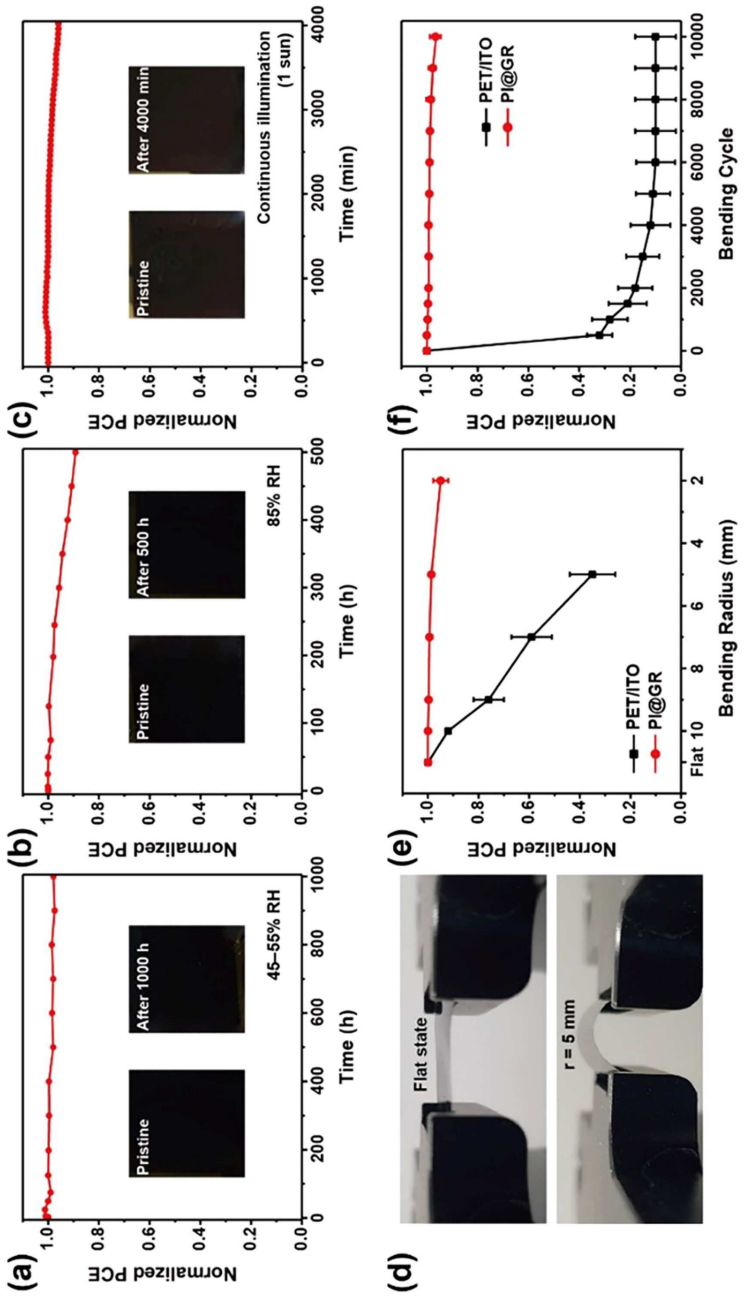
도면6a


(c)
Bending
Flat
(b)
PI@GR
C_{60}/BCP
Lami-$MAPbI_3$+$FAPbI_3$
PI@GR
1 μm
(a)
TETA-PI@GR
C_{60}/BCP
$MAPbI_3$&$FAPbI_3$
PEDOT:PSS
APSIM-PI@GR
MA^+ FA^+ I^- Pb

도면6b


(a)
Energy (eV)
4.65 eV
PI@GR (APSIM)
5.20 eV
PEDOT: PSS
3.88 eV
3.92 eV
MAPbI3
&FAPbI3
5.43 eV
5.42 eV
4.20 eV
4.42 eV
C60
BCP
PI@GR (TETA)
2.90 eV
6.20 eV
6.40 eV
(b)
Current Density (mA cm-2)
Voltage (V)
PI@GR (Anode) (R)
PI@GR (Anode) (F)
PI@GR (Cathode) (R)
PI@GR (Cathode) (F)
(c)
PCE (%)
Jsc (mA cm-2)
Time (s)
(d)
PL Intensity (a.u.)
Time (ns)
P-MAPbI3
L-MAPbI3+FA
L-FAPbI3+MA
τavr = 20.8 ns
τavr = 12.7 ns
τavr = 12.5 ns
(e)
Transmittance (%)
Wavelength (nm)
Glass/MAPbI3/FAPbI3/Glass
Glass/PEDOT:PSS/MAPbI3/FAPbI3/C60/BCP/Glass
PI@GR/PEDOT:PSS/MAPbI3/FAPbI3/C60/BCP/PI@GR
(f)
PCE (%)
AVT (%)
Rigid ST-PSC
Flexible ST-PSC
Our work
Rigid ST-PSC
Flexible ST-PSC

도면7


(a)
Normalized PCE
Time (h)
45–55% RH
Pristine
After 1000 h
(b)
Normalized PCE
Time (h)
85% RH
Pristine
After 500 h
(c)
Normalized PCE
Time (min)
Continuous illumination (1 sun)
Pristine
After 4000 min
(d)
Flat state
r = 5 mm
(e)
Normalized PCE
Bending Radius (mm)
PET/ITO
PI@GR
Flat
(f)
Normalized PCE
Bending Cycle
PET/ITO
PI@GR