



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0020082
(43) 공개일자 2023년02월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 15/14 (2006.01) G01R 29/24 (2006.01)
H01L 31/0749 (2012.01)
(52) CPC특허분류
G01R 15/146 (2013.01)
G01R 29/24 (2021.05)
(21) 출원번호 10-2021-0101694
(22) 출원일자 2021년08월03일
심사청구일자 2021년08월03일

(71) 출원인
한밭대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
정중희
대전광역시 유성구 동서대로 125 한밭대학교 D6동 106호
(74) 대리인
특허법인 플러스

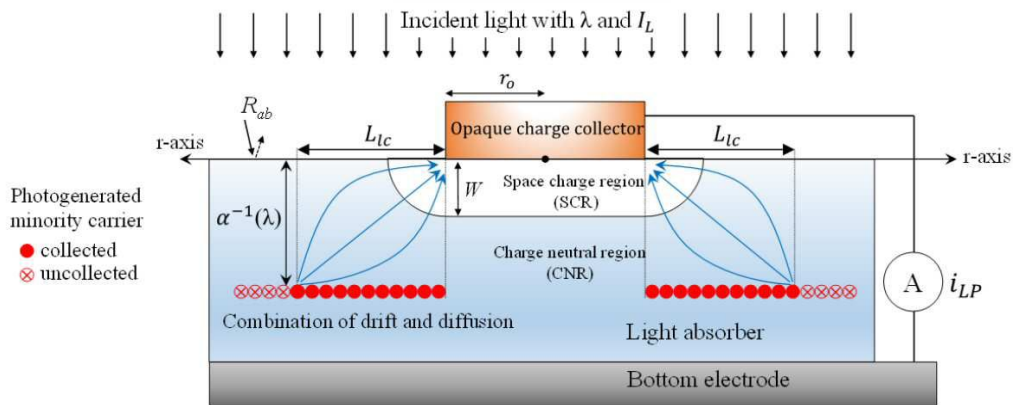
전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 발명의 명칭 태양전지의 소수운반자 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법

(57) 요약

본 발명은 태양전지에서 간단하고 직관적인 방법으로 소수 캐리어 유효 확산 길이 및 후면 재결합 속도를 동시에 산출할 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H01L 31/0749 (2013.01)

Y02E 10/541 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711132058
과제번호	NRF-2021R1A2C1005815
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	(유형1-1)중견연구
연구과제명	광대역 빛 산란 제어를 위한 산화물 투명전극의 나노구조 설계 및 원스텝 수용액 공
정 개발	
기 여 율	1/1
과제수행기관명	한밭대학교 산학협력단
연구기간	2021.03.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

하부 전극;

하부 전극 상에 위치하는 광흡수체층; 및

광흡수체층 상에 위치하는 상부 전극;을 포함하는 태양전지를 이용하되,

- a) 상기 구조에 상이한 파장의 광을 조사하여 생성된 소수 캐리어의 측면 운동을 유도하는 단계;
- b) 상기 유도된 측면 운동을 통하여 발생한 광전류를 측정하는 단계; 및
- c) 상기 측정된 광전류를 이용하여 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도를 산출하는 단계;를 포함하는 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 상부 전극은 광이 투과하지 않는 금속으로 이루어지는, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 상부 전극은 $r_0 \gg W + 5L_d$ (r_0 는 상부 전극의 반경, W 는 공간 전하 영역의 폭, L_d 는 소수 캐리어 벌크 확산거리를 의미한다)를 만족하는, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 상부 전극은 원형판, 타원형판 또는 다각형판의 형태인, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 구조에 조사되는 광은 단색광인, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 광전류는 상기 구조에 백색광을 조사한 후, 단색광을 조사하여 얻어지는 전류인, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 단계 (c)의 소수 캐리어 확산거리는 하기 <식 1>을 이용하여 산출되는, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

<식 1>

$$L_{lc} - W = L_{dc}^{Min} \leq L_{dc} \leq L_{dc}^{max} = \sqrt{L_{lc}^2 + \alpha^{-2}} - W$$

(상기 식 1에서 L_{lc} 는 소수 캐리어 유효 측면 포집 거리, W 는 공간 전하 영역의 폭, L_{dc}^{Min} 는 소수 캐리어 유효 확산거리의 최소값, L_{dc} 는 소수 캐리어 유효 확산거리, L_{dc}^{max} 는 소수 캐리어 유효 확산거리의 최대값, α 는 광 흡수체의 흡수계수를 의미한다.)

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 단계 (c)의 후면 재결합 속도는 하기 <식 2>를 이용하여 산출되는, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

<식 2>

$$S_b = 4dD(L_{dc}^{-2} - L_d^{-2})$$

(상기 식 2에서 S_b 는 후면 재결합 속도, d 는 광흡수체층의 두께에서 광의 흡수 깊이를 뺀 값, D 는 소수 캐리어 확산 계수, L_{dc} 는 소수 캐리어 유효 확산거리, L_d 는 소수 캐리어 벌크 확산거리를 의미한다.)

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 광의 흡수 깊이는 공간 전하영역의 폭(W)보다 작은, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 광의 흡수 깊이는 0.4 W 내지 0.9 W 인, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 태양전지는 CIGS 태양전지인, 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 태양전지에서 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도를 동시에 측정하기 위한 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 태양전지의 성능은 전기적 특성에 크게 영향을 받기 때문에, 광흡수체와 태양전지 후면의 전기적 특성을 정확하게 특정하는 것이 중요하다.

[0004] 이러한 상황에서 종래 소수 캐리어 확산거리의 측정방법은 외부양자효율을 이용하는 것이 통상적이었다. 그러나, 외부양자효율의 측정은 전문적인 장비를 이용하여야 하므로 측정에 어려움이 있으며, 조사되는 빛의 세기가 0.1 내지 1 mW/cm²으로 실제 태양전지의 동작 조건과 상이하며, 측정되는 소수 캐리어 확산거리의 길이가 박막의 두께보다 클 경우에는 측정값의 오차가 발생하는 문제가 있다.

[0005] 그러나, 본 발명의 방법을 이용하여 소수 캐리어 확산거리를 측정하는 경우, 외부양자효율의 측정을 필요로 하지 않으며, 태양전지에 광을 조사하고 전류를 측정하는 간단한 방법으로 높은 정확도로 소수 캐리어 확산거리를 측정할 수 있는 장점이 있다.

[0006] 다만, 소수 캐리어는 광흡수기의 벌크와 후면에서 동시에 재결합하기 때문에 태양전지에서 광흡수기와 후면 모두의 전기적 특성을 정확하게 특성화하는 것은 매우 어려운 것이 현실이다. 특히, 소수 캐리어가 확산과 드리프트의 조합으로 이동하면 상황은 더욱 복잡해진다.

[0007] 따라서, 벌크 및 후면의 전기적 품질 지표인 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도를 동시에 결정하는 어려움을 해결하기 위하여 간단하고 직관적인 방법의 개발이 필요하다.

[0008] 본 발명은 측정 대상이 되는 태양전지에 광을 조사하여 빛의 파장에 따른 측면 광전류를 측정하는 간단하고 용이한 방법으로 소수 캐리어의 확산거리 및 후면 재결합 속도를 측정할 수 있는 장점이 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명의 목적은 태양전지에서 간단하고 직관적인 방법으로 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도를 동시에 산출할 수 있는 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0012] 본 발명은 하부 전극; 하부 전극 상에 위치하는 광흡수체층; 및 광흡수체층 상에 위치하는 상부 전극을 포함하는 태양전지를 이용하되, a) 상기 구조에 상이한 파장의 광을 조사하여 생성된 전하 운반자의 측면 운동을 유도하는 단계; b) 상기 유도된 측면 운동을 통하여 발생한 광전류를 측정하는 단계; 및 c) 상기 측정된 광전류를 이용하여 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도를 산출하는 단계;를 포함하는 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법을 제공한다

[0013] 본 발명의 일 실시예에 따른 측정방법에 있어서, 상기 상부 전극은 광이 투과하지 않는 금속으로 이루어질 수 있고, $r_0 \gg W + 5L_d$ (r_0 는 상부 전극의 반경, W 는 공간 전하 영역의 폭, L_d 는 소수 캐리어 벌크 확산거리를 의미한다)를 만족할 수 있고, 원형판, 타원형판 또는 다각형판의 형태일 수 있다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에 따른 측정방법에 있어서, 상기 구조에 조사되는 광은 단색광일 수 있고, 상기 광전류는 상기 구조에 백색광을 조사한 후, 단색광을 조사하여 얻어지는 전류일 수 있다.

[0015] 본 발명의 일 실시예에 따른 측정방법에 있어서, 상기 단계 (c)의 소수 캐리어 확산거리는 하기 <식 1>을 이용하여 산출될 수 있다.

[0016] <식 1>

$$L_{ic} - W = L_{dc}^{Min} \leq L_{dc} \leq L_{dc}^{max} = \sqrt{L_{ic}^2 + \alpha^{-2}} - W$$

[0018] (상기 식 1에서 L_{ic} 는 소수 캐리어 유효 측면 포집 거리, W 는 공간 전하 영역의 폭, L_{dc}^{Min} 는 소수 캐리어 유효 확산거리의 최소값, L_{dc} 는 소수 캐리어 유효 확산거리, L_{dc}^{max} 는 소수 캐리어 유효 확산거리의 최대값, α 는 광 흡수체의 흡수계수를 의미한다.)

[0019] 본 발명의 일 실시예에 따른 측정방법에 있어서, 상기 단계 (c)의 후면 재결합 속도는 하기 <식 2>를 이용하여 산출될 수 있다.

[0020] <식 2>

$$S_b = 4dD(L_{dc}^{-2} - L_d^{-2})$$

[0022] (상기 식 2에서 S_b 는 후면 재결합 속도, d 는 광흡수체층의 두께에서 광의 흡수 깊이를 뺀 값, D 는 소수 캐리어 확산 계수, L_{dc} 는 소수 캐리어 유효 확산거리, L_d 는 소수 캐리어 벌크 확산거리를 의미한다.)

[0023] 본 발명의 일 실시예에 따른 측정방법에 있어서, 상기 광의 흡수 깊이는 공간 전하영역의 폭(W)보다 작을 수 있고, $0.4W$ 내지 $0.9W$ 일 수 있다.

[0024] 본 발명의 일 실시예에 따른 측정방법에 있어서, 상기 구조는 태양전지에 사용될 수 있고, 상기 태양전지는 CIGS 태양전지일 수 있다.

발명의 효과

[0026] 본 발명에 따른 방법을 통하여 태양전지에서 간단하고 직관적인 방법으로 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도를 동시에 산출할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0028] 도 1은 본 발명에 따른 구조에서 생성된 소수 캐리어의 이동을 나타내는 모식도이다.

도 2 내지 도 4는 본 발명에 따른 구조에서 특정 지점에서 생성된 소수 캐리어의 이동을 나타내는 모식도이다.

도 5는 CIGS 태양전지의 단면을 나타내는 모식도이다.

도 6은 흡수 깊이와 후면과의 거리에 따른 소수 캐리어의 유효 거리를 나타내는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0029] 이하 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도 측정방법을 상세히 설명한다.

[0030] 다음에 소개되는 도면들은 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 예로서 제공되는 것이다. 따라서, 본 발명은 이하 제시되는 도면들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수 있으며, 이하 제시되는 도면들은 본 발명의 사상을 명확히 하기 위해 과장되어 도시될 수 있다.

[0031] 이 때, 사용되는 기술 용어 및 과학 용어에 있어서 다른 정의가 없다면, 이 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 통상적으로 이해하고 있는 의미를 가지며, 하기의 설명 및 첨부 도면에서 본 발명의 요지

를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대한 설명을 생략한다.

- [0032] 또한 명세서 및 첨부된 특허청구범위에서 사용되는 단수 형태는 문맥에서 특별한 지시가 없는 한 복수 형태도 포함하는 것으로 의도할 수 있다.
- [0033] 본 명세서 및 첨부된 특허청구범위에서 제1, 제2 등의 용어는 한정적인 의미가 아니라 하나의 구성 요소를 다른 구성 요소와 구별하는 목적으로 사용된다.
- [0034] 본 명세서 및 첨부된 특허청구범위에서 포함하다 또는 가지다 등의 용어는 명세서 상에 기재된 특징, 또는 구성 요소가 존재함을 의미하는 것이고, 특별히 한정하지 않는 한, 하나 이상의 다른 특징들 또는 구성요소가 추가될 가능성을 미리 배제하는 것은 아니다.
- [0035] 본 명세서 및 첨부된 특허청구범위에서, 막(층), 영역, 구성 요소 등의 부분이 다른 부분 위에 또는 상에 있다고 할 때, 다른 부분과 접하여 바로 위에 있는 경우뿐만 아니라, 그 중간에 다른 막(층), 다른 영역, 다른 구성 요소 등이 개재되어 있는 경우도 포함한다.
- [0037] 본 발명에 따른 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도의 측정 방법은 하부 전극; 하부 전극 상에 위치하는 광흡수층; 및 광흡수층 상에 위치하는 상부 전극;을 포함하는 태양전지를 이용하여, a) 상기 구조에 상이한 파장의 광을 조사하여 생성된 소수 캐리어의 측면 운동을 유도하는 단계; b) 상기 유도된 측면 운동을 통하여 발생한 광전류를 측정하는 단계; 및 c) 상기 측정된 광전류를 이용하여 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도를 산출하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0039] 일 구체예에 있어, 상기 하부 전극은 전도성을 가지는 금속인 경우 제한없이 사용 가능하다. 하부 전극의 비한정적인 예로, Al, Zn, Ti, Hf, Mg, Cu, Zr, Ca, Li, Sr, Ba, Sc, Y, Nb, Cr, Fe, Ru, Co, Rh, V, Ir, Ni, Pd, Pt, Ag, Cd, B, Ga, Mo, W, Mn, In, Ge, Sn, Sb 및 Bi으로 이루어지는 군으로부터 선택될 수 있고, 바람직하게는 Mo일 수 있으나, 이에 제한받지 않는다.
- [0041] 일 구체예에 있어, 상기 상부 전극은 광흡수층을 모두 덮지 않고, 일부만을 덮는 판 형상이면 어떠한 형상이든 무방하다. 구체적인 일 예로, 상부 전극은 원형판, 타원형판 또는 다각판 형상일 수 있다. 이 때, 상부 전극이 원형이 아닌 경우, 상부 전극의 크기나 반지름은 동일 면적의 원으로 환산한 경우의 크기나 반지름을 의미할 수 있다.
- [0042] 상부 전극은 불투과성이며 전도성을 가지는 금속인 경우 제한없이 사용 가능하다. 상부 전극의 비한정적인 예로, Al, Zn, Ti, Hf, Mg, Cu, Zr, Ca, Li, Sr, Ba, Sc, Y, Nb, Cr, Fe, Ru, Co, Rh, V, Ir, Ni, Pd, Pt, Ag, Cd, B, Ga, Mo, W, Mn, In, Ge, Sn, Sb 및 Bi로 이루어지는 군으로부터 선택되는 하나 또는 둘 이상을 포함할 수 있고, 바람직하게는 Al 및 Ni를 포함할 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.
- [0043] 태양전지에 광을 조사하여 측정되는 광전류가 측면 광전류(lateral photocurrent)일 수 있도록, 상부 전극은 광을 투과하지 않는 불투명한 전극일 수 있다. 이 때, 광을 투과하지 않는다고 하는 의미는 광흡수층에서 흡수하는 파장에 속하는 광에 대한 반사율이 95% 이상인 것을 의미하고, 바람직하게는 반사율이 99% 이상인 것을 의미하고, 가장 바람직하게는 반사율이 100%인 것을 의미한다.
- [0044] 상부 전극의 반경(r_0)은 $r_0 \gg W + 5L_d$ 를 만족하는 것이 바람직하다. 여기서 W 는 광흡수층의 공간 전하 영역(space charge region; SCR)의 폭을 의미하고, L_d 는 소수 캐리어 벌크 확산거리(bulk diffusion length of the minority carrier)를 의미한다.
- [0045] 알려진 바와 같이, 측면 광전류의 99% 이상은 상부 전극의 테두리를 기준으로, $W + 5L_{dc}$ (L_{dc} = 소수 캐리어 유효 확산거리) 이내의 영역으로부터 수집된다. L_d 는 결함과 무관한 물질 고유의 특성이나, L_{dc} 는 결함에 의하여 L_d 에서 감소된 값을 가진다. 이에, L_{dc} 의 최대값은 L_d 가 되며, $W + 5L_{dc}$ 의 최대값은 $W + 5L_d$ 가 되고, r_0 가 $W + 5L_d$ 를 무시할 수 있을 정도로 클 경우에는 광전류와 소수 캐리어 유효 확산거리 사이의 관계식의 정확성을 향상시킬 수 있어서 바람직하다.

[0046] 이에, 상부 전극의 반경(r_0)은 0.1 mm 내지 3 mm 일 수 있고, 바람직하게는 0.3 내지 2.5 mm 일 수 있고 가장 바람직하게는 0.5 mm 내지 2 mm 일 수 있다. 다만, 상부 전극의 크기에 따라 광전류를 측정함으로써 확산 거리를 측정할 수 있음에 따라, 상부 전극의 크기가 이에 한정되는 것은 아니다.

[0048] 일 구체예에 있어, 상기 단계 (a)에서 태양전지에 조사되는 광은 단색광일 수 있다. 보다 구체적으로, 백색광을 조사한 후에 단색광을 조사하여 생성된 소수 캐리어의 측면 운동을 유도하고, 이를 통하여 발생한 광전류를 상기 단계 (b)를 통하여 측정할 수 있다.

[0050] 일 구체예에 있어, 상기 단계 (b)에서 측정된 광전류를 이용한 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도의 측정방법에 대하여 상세히 설명한다.

[0051] 본 발명에 따른 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도의 측정방법은 복잡한 수식을 통하지 않고, 측정된 광전류를 측정하여 간단한 벡터 분석을 통해 높은 정확도로 소수 캐리어 확산거리 및 후면 재결합 속도를 동시에 결정할 수 있다는 장점이 있다.

[0053] 광흡수체층의 입사면을 기준($z=0$)으로 하여 광흡수체층의 두께 방향으로의 축을 z 축으로, 상부 전극의 중심을 기준($r=0$)으로 하여 광흡수체층의 면 방향으로의 축을 r 축으로 하고, z - r 의 원통 좌표를 기준으로 한다. 또한, r_0 는 상부 전극의 반경을, t 는 광흡수체층의 두께를, W 는 공간전하 영역의 폭을, I_L 은 조사광의 강도를, h 는 플랑크 상수를, c 는 광속을, e 는 전자의 전하량을, R_{ab} 는 광흡수체층의 조사광 입사면에서의 반사율을, α 는 광흡수체의 흡수계수를, α^{-1} 는 광의 흡수 길이를, λ 는 광의 파장을, D 는 소수 캐리어의 확산계수를, L_{dc} 는 소수 캐리어 유효 확산 길이를, L_d 는 소수 캐리어 벌크 확산 길이를, S_b 는 후면 재결합 속도를 의미한다.

[0055] 상기 태양전지에 광(I_L 강도, λ 의 파장)을 비추면, 소수 캐리어가 광의 흡수 깊이(α^{-1})에서 생성되고, 여기서 생성된 소수 캐리어는 확산과 드리프트의 혼합 운동을 통해 측면으로 이동하여 전하 수집기로 사용되는 상부 전극에 도달하게 된다.

[0057] 이를 기반으로 소수 캐리어 벌크 확산거리(L_d)와 후면 재결합 속도(S_b)를 구하는 방법은 다음과 같은 3단계로 구성된다.

[0059] 첫 번째 단계는 측면 광전류(lateral photocurrent; i_{LP})와 직접적으로 관련된 소수 캐리어의 유효 측면 포집 거리(lateral collection length; L_{lc})를 측정하는 것이다. L_{lc} 는 소수 캐리어의 운동 측면에서는 확산과 드리프트 모두의 영향을 받고, 재조합 측면에서는 벌크 재조합 및 후면 재조합 모두의 영향을 받는다.

[0060] 반지름이 r_0 인 상부 전극에 의하여 수집된 측면 광전류(i_{LP})는 $r_0 \gg L_{lc}$ 일 때, $i_{LP} \cong 2\pi r_0 L_{lc} J_{gen}$ 으로 표현될 수 있다.

[0061] 여기서 J_{gen} 은 광생성전류밀도(photogenerated current density)를 의미하며, 하기 식으로 표현할 수 있다.

$$J_{gen} = \frac{e I_L (1 - R_{ab})}{\left(\frac{hc}{\lambda}\right)}$$

[0063] 여기서 e 는 전자의 전하량을, I_L 은 조사광의 강도를, R_{ab} 는 광흡수체층의 조사광 입사면에서의 반사율을, h 는 플

랑크 상수를, c 는 광속을, λ 는 광의 파장을 의미한다.

[0064] 상기 식을 연립하여, L_{lc} 는 하기 식으로 표현할 수 있다.

$$L_{lc} = \frac{\left(\frac{hc}{\lambda}\right)\left(\frac{i_{LP}}{I_L 2\pi r_0}\right)}{e(1-R_{ab})}$$

[0065]

[0067] 두 번째 단계는 상기 첫 번째 단계를 통하여 계산된 L_{lc} 값에서 벡터 분석을 이용하여 확산 기여도를 추출하여 소수 캐리어 유효 확산거리(diffusional collection length; L_{dc})를 결정하는 것이다. L_{dc} 는 운동 측면에서는 확산에 의해서만 영향을 받지만, 재조합 측면에서는 벌크 재조합과 후면 재조합 모두에 의해 영향을 받는다.

[0068] 소수 캐리어는 전하 중성 영역(charge neutral region; CNR)에서 수직 방향으로 확산 및/또는 드리프트의 혼합 운동으로 이동하지만, 수평 방향으로 확산만으로 이동하며, 공간 전하 영역(space charge region; SCR)에서는 주로 드리프트를 통하여 이동한다.

[0069] 소수 캐리어의 이동 변위의 크기($\overrightarrow{\Delta^{total}}$)는 소수 캐리어의 생성 지점에서 전하 수집기까지의 최단 거리를 의미하고, $\overrightarrow{\Delta^{total}} = \overrightarrow{\Delta^{CNR}} + \overrightarrow{\Delta^{SCR}}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 $\overrightarrow{\Delta^{CNR}}$ 은 CNR에서 소수 캐리어의 변위를 의미하고, $\overrightarrow{\Delta^{SCR}}$ 은 SCR에서 소수 캐리어의 변위를 의미한다.

[0070] CNR에서 확산 변위($\overrightarrow{\Delta^{CNR}_{diff}}$)와 드리프트 변위의 합($\overrightarrow{\Delta^{CNR}_{drift}}$)은 $\overrightarrow{\Delta^{CNR}}$ 과 동일하다. 즉, $\overrightarrow{\Delta^{CNR}} = \overrightarrow{\Delta^{CNR}_{diff}} + \overrightarrow{\Delta^{CNR}_{drift}}$ 로 나타낼 수 있다.

[0071] SCR에서 전하 캐리어는 드리프트에 의하여 주로 이동하기 때문에 $\overrightarrow{\Delta^{SCR}} = \overrightarrow{\Delta^{SCR}_{drift}}$ 로 나타낼 수 있으며, $\overrightarrow{\Delta^{SCR}_{drift}}$ 는 SCR에서 드리프트 변위를 의미한다.

[0072] 전하 캐리어의 생성 지점($r_0 + L_{lc}$, a^{-1})에서 전하 수집기까지 전하 캐리어의 CNR에서 확산 변위의 크기는 $\left|\overrightarrow{\Delta^{CNR}_{diff}}\right|$ 로 나타낼 수 있고, SCR에서 확산 변위의 크기는 0에 수렴하므로, $\left|\overrightarrow{\Delta^{CNR}_{diff}}\right|$ 값은 L_{dc} 와 동일한 것으로 볼 수 있다.

[0073] 주어진 L_{lc} 에서 $\left|\overrightarrow{\Delta^{CNR}_{diff}}\right|$ 의 정확한 값을 추출할 수 없음에도 불구하고, $\left|\overrightarrow{\Delta^{CNR}_{diff}}\right|$ 의 범위를 구할 수는 있다.

[0074] $\overrightarrow{\Delta^{CNR}} = \overrightarrow{\Delta^{CNR}_{diff}} + \overrightarrow{\Delta^{CNR}_{drift}}$ 이기 때문에, CNR에서 확산 변위의 최소값($\left|\overrightarrow{\Delta^{Min,CNR}_{diff}}\right|$)은 CNR에서

드리프트 변위가 최대값일 때 얻을 수 있고, 그 값은 $\left| \overrightarrow{\Delta_{diff}^{Max,CNR}} \right| = \alpha^{-1}$ 이다.

[0075] 이를 통하여, $\left| \overrightarrow{\Delta_{diff}^{Min,CNR}} \right| = L_{lc} - W$ 를 얻을 수 있고, 도 3에서 볼 수 있듯이 유효 확산거리의 최소값 (L_{dc}^{Min})과 동일하다.

[0076] 반면에, CNR에서 확산 변위의 최대값($\left| \overrightarrow{\Delta_{diff}^{Max,CNR}} \right|$)은 CNR에서 드리프트 변위가 최소값일 때 구할 수 있으며, 그 값은 $\left| \overrightarrow{\Delta_{diff}^{Min,CNR}} \right| = 0$ 이다.

[0077] 여기서, $\left(\left| \overrightarrow{\Delta_{diff}^{Max,CNR}} \right| + \left| \overrightarrow{\Delta_{diff}^{SCR}} \right| \right)^2 = (\alpha^{-1})^2 + L_{lc}^2$ 임을 알 수 있고, $\left| \overrightarrow{\Delta_{diff}^{SCR}} \right|$ 는 SCR에서 드리프트 변위의 크기를 나타내며, 이는 도 4에서 볼 수 있듯이 SCR 너비(W)이다.

[0078] 그러므로, $\left| \overrightarrow{\Delta_{diff}^{Max,CNR}} \right| = \sqrt{L_{lc}^2 + \alpha^{-2}} - W$ 임을 알 수 있고, 이는 유효 확산거리의 최대값(L_{dc}^{max})과 동일하다.

[0079] 그러므로, 우리는 L_{dc} 를 하기 <식 1>의 범위로 구할 수 있다.

[0081] <식 1>

$$L_{lc} - W = L_{dc}^{Min} \leq L_{dc} \leq L_{dc}^{max} = \sqrt{L_{lc}^2 + \alpha^{-2}} - W$$

[0084] 즉, 입사광의 파장을 변화시켜 상기 식을 통하여 L_{lc} 를 구하면, L_{dc}^{Min} 및 L_{dc}^{max} 를 구할 수 있고, 이를 통하여 L_{dc} 의 범위를 구할 수 있다.

[0086] 마지막 단계는 벌크 재조합 및 후면 재조합을 분리하여 L_{dc} 로부터 L_d 와 S_b 를 결정하는 것이다. 입사 단색광의 파장을 변경하여 L_d , S_b 및 α^{-1} 의 함수인 L_{dc} 를 구할 수 있다.

[0087] 흡수 깊이와 후면 사이의 거리가 멀어짐에 따라, L_{dc} 에서 후면 재결합의 효과는 감소하고 결국 무시할 수 있게 된다. 후면 재결합이 무시될 정도가 되어 L_{dc} 에 영향을 미치지 않게 되는 경우, L_{dc} 는 L_d 와 같게 된다.

[0089] 이 때, L_{dc} 및 L_d 를 이용하여 후면 재결합 속도(S_b)를 산출할 수 있다. 구체적으로, 본 발명에 따른 S_b 산출 방법은 상술한 방법으로 L_{dc} 및 L_d 를 산출하는 단계; 광의 흡수 깊이가 광흡수체층에서 공간 전하 영역의 폭(W)보다 작은 영역에 속하는 L_{dc} 및 L_d 값과 하기 <식 2>를 이용하여 후면 재결합 속도를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

- [0091] <식 2>
- [0092]
$$S_b = 4dD(L_{dc}^{-2} - L_d^{-2})$$
- [0093] L_{dc} 는 소수 캐리어 유효 확산거리이고, L_d 는 소수 캐리어 벌크 확산거리이고, 소수 캐리어 확산계수(D)는 아인슈타인 방정식($D = \frac{kT}{e\mu}$)을 통하여 구할 수 있고, k는 볼츠만 상수이며, T는 절대온도, e는 전자의 전하, μ 는 소수 캐리어의 드리프트 mobility이다.
- [0095] 상기 식 2를 사용하여 S_b 를 올바르게 결정하려면, 캐리어의 움직임이 CIGS에서 거의 수평이어야 한다. 즉, S_b 산출을 위해 사용되는 L_{dc} 는 전하의 수집시 소수 캐리어의 이동이 광흡수체층의 면방향만의 이동으로 간주될 수 있도록 광의 흡수 깊이가 광흡수체층에서 공간 전하 영역의 폭(W)보다 작은 영역에서의 값인 것이 좋다. 즉, $0 < a^{-1} < W$ 의 범위에서 L_{dc} 값은 S_b 를 결정하기 위하여 사용될 수 있다.
- [0096] 일 예로, W를 기준으로 광의 흡수 깊이가 0.4W 내지 0.9W인 것이 바람직하고, 더욱 바람직하게는 0.7W 내지 0.9W에 속하는 L_{dc} 값을 사용하는 것이 좋다.
- [0098] 상술한 바와 같이, 본 발명에 따른 방법은 다양한 파장에서 전류를 측정하는 방법을 통해, 광흡수체층의 물질이나 구조와 무관하게 소수 캐리어의 특성을 산출할 수 있는 장점이 있다.
- [0100] 이하 본 발명을 실시예를 통해 상세히 설명한다. 다만, 이들은 본 발명을 보다 상세하게 설명하기 위한 것으로, 본 발명의 권리범위가 하기 실시예에 의해 한정되는 것은 아니다.
- [0102] <실시예>
- [0103] 본 발명의 산출 방법의 신뢰도를 확인하기 위해, 반경(r_0) = 1 mm인 디스크 모양의 Al/Ni/CdS 상부 전극, Mo 하부 전극 및 두께(t) = 2 μ m인 CIGS 광흡수체층으로 이루어진 태양전지를 제조하였다. 고주파수(100 kHz) 캐패시턴스 측정 및 Mott-Schottky 플롯을 이용하여 제조된 시험전지에서 CIGS층에 상대 유전 상수(ϵ_r) = 12를 사용하여 공간 전하 영역(SCR)의 폭(W) = 420 nm를 측정하였다. CIGS 광흡수체층 전면의 반사율(R_{ab})은 UV-vis 분광기를 사용하여 측정하였고, 입사광의 강도(I_L)는 광 파워미터를 사용하여 측정하였으며, 측면 광전류(i_{LP})는 short-circuited source meter를 사용하여 측정하였다.
- [0104] 다양한 파장에서 a^{-1} , I_L , R_{ab} , i_{LP} , L_{lc} , L_{dc}^{Min} 및 L_{dc}^{Max} 값을 하기 표 1에 정리하였다.

표 1

λ (nm)	α^{-1} (nm)	I_L (Wm ⁻²)	R_{ab}	i_{LP} (A)	L_{lc} (nm)	L_{dc}^{Min} (nm)	L_{dc}^{Max} (nm)
700	136	1.26×10^2	0.19	8.07×10^{-7}	2231	1811	1815
800	177	9.92×10^1	0.19	7.25×10^{-7}	2237	1807	1814
900	265	1.63×10^2	0.19	1.28×10^{-6}	2127	1707	1724
970	337	6.69×10^0	0.20	4.38×10^{-8}	1666	1246	1280
1000	398	1.51×10^1	0.18	8.85×10^{-8}	1412	992	1047
1025	494	4.48×10^1	0.18	2.04×10^{-7}	1070	650	758
1050	685	6.88×10^0	0.25	1.27×10^{-8}	463	43	407

[0106]

[0108] 흡수 깊이와 후면 사이의 거리(d)가 증가함에 따라, L_{dc} 는 처음에는 지속적으로 증가하다가, 1807 내지 1815 nm의 값으로 수렴한다. 이는 후면 사이의 거리가 생성된 소수 캐리어의 재조합에 무시할 수 있는 정도의 영향을 미친다는 것을 의미한다.

[0109] 결과적으로 L_d 는 1807 내지 1815 nm로 수렴되고, 이는 CIGS 태양 전지에 대한 합리적인 결과로 볼 수 있다.

[0111] 다음 단계는 미리 결정된 L_d 및 L_{dc} 를 기반으로 S_b 를 결정하는 것이다. 식 2에 d 대신 $t - \alpha^{-1}$ 로 대체하여 상기 구조에 적용하였다. 여기서 t는 CIGS 층의 두께(2 μ m)이고 α^{-1} 은 흡수 깊이이다. D는 아인슈타인 방정식 $D = \frac{kT}{e\mu}$ 을 통하여 실온에서 2.57 cm²/s로 측정되었고, k는 볼츠만 상수이며, T는 절대온도, e는 전자의 전하, μ 는 소수 캐리어의 드리프트 mobility이며, 이는 CIGS 태양전지에서 대략 100 cm²/Vs의 값을 가진다.

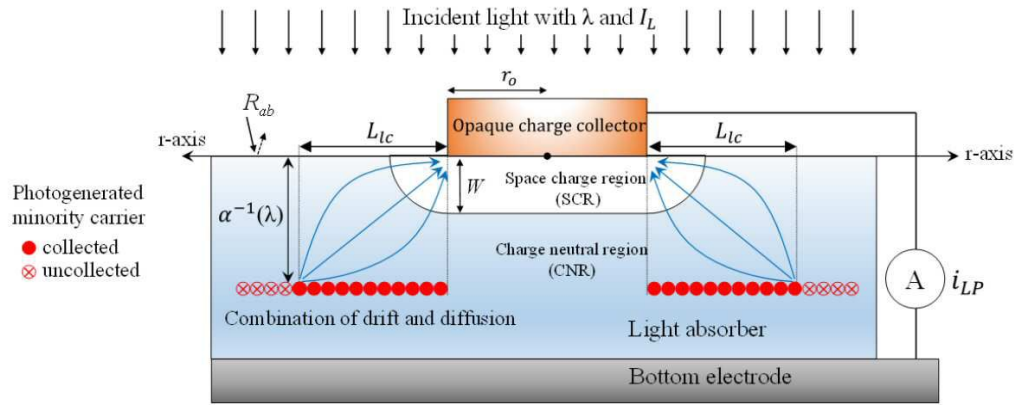
[0113] 도 6을 통하여 알 수 있듯이, 약 180 nm의 흡수 깊이에서 L_{dc} 는 1807 내지 1815 nm로 수렴하는 것을 알 수 있다. 또한, 약 250 nm를 초과하는 흡수 깊이에서 L_{dc} 가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 약 250 nm를 초과하는 깊이에서는 후면 재결합에 의한 광전류 손실이 발생하는 것을 알 수 있다.

[0115] 또한, 표면 영역에서 L_{dc} 가 포화됨을 알 수 있으며, 포화된 L_{dc} 값인 1807 내지 1815 nm를 소수 캐리어 벌크 확산 길이(L_d)로 규정하였다. 또한, W = 420 nm임에 따라, 공간 전하 영역 내의 광 흡수 깊이이되, L_{dc} 가 급격히 감소하는 구간에 속하는 광 흡수 깊이인 337 nm에서의 L_{dc} 값과 d = t-337=1663 nm를 식 2에 대입하여 S_b 는 5.3 x 10⁴ 내지 1.2 x 10⁵ cm/s로 계산됨을 확인하였다. 이러한 S_b 값은 종래 문헌들을 통해 보고된 CIGS 태양 전지에 서의 값과 유사한 값을 나타낸다.

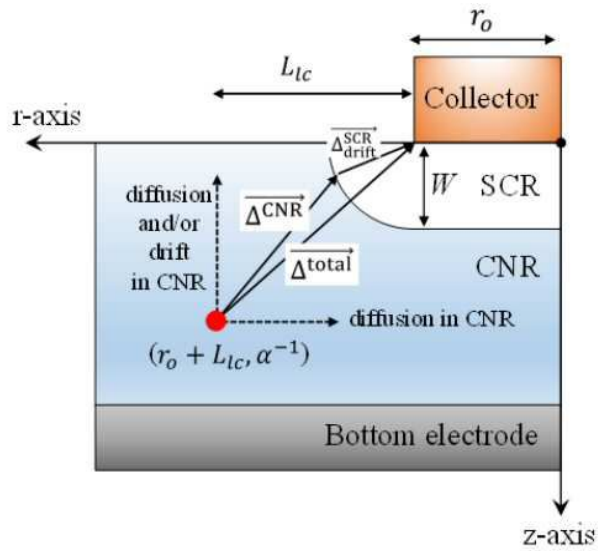
[0117] 이상과 같이 본 발명에서는 한정된 사항들과 실시예에 의하여 설명되었으나, 이는 본 발명의 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명이 상기 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다.

도면

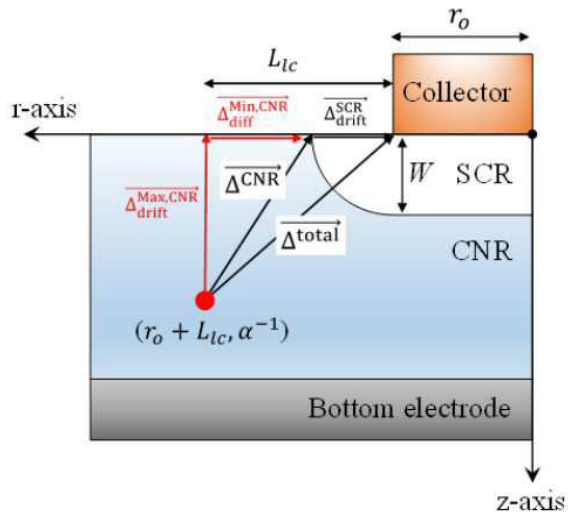
도면1



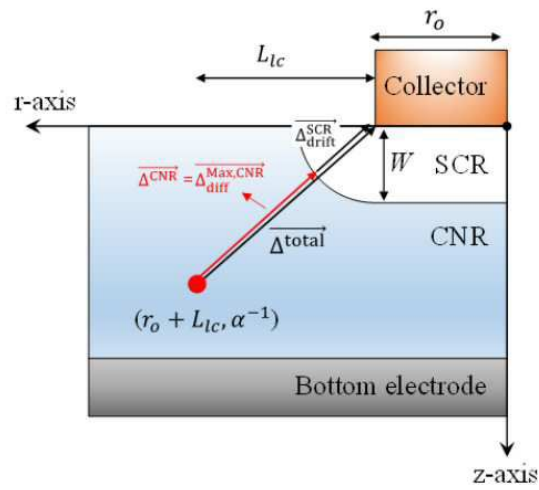
도면2



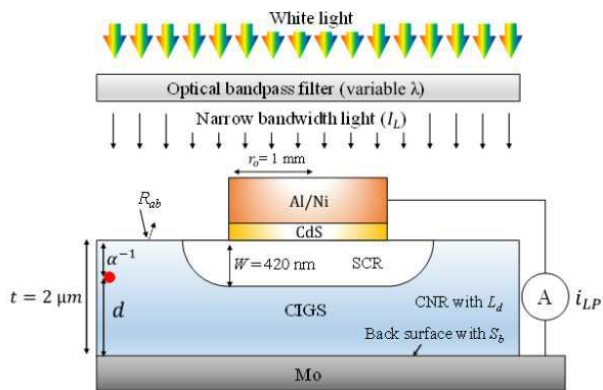
도면3



도면4



도면5



도면6

