(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0134434
(43) 공개일자 2020년12월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/66 (2006.01) *H01L 31/04* (2014.01)
(52) CPC특허분류
H01L 22/14 (2013.01)
H01L 22/24 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0059883
(22) 출원일자 2019년05월22일
심사청구일자 2019년05월22일

(71) 출원인
한발대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
정중희
서울특별시 강동구 상암로27길 28-16 (천호동) 2층
이상엽
대전광역시 유성구 온천로 60 사이언스타운주상복합 902호
(74) 대리인
특허법인 플러스

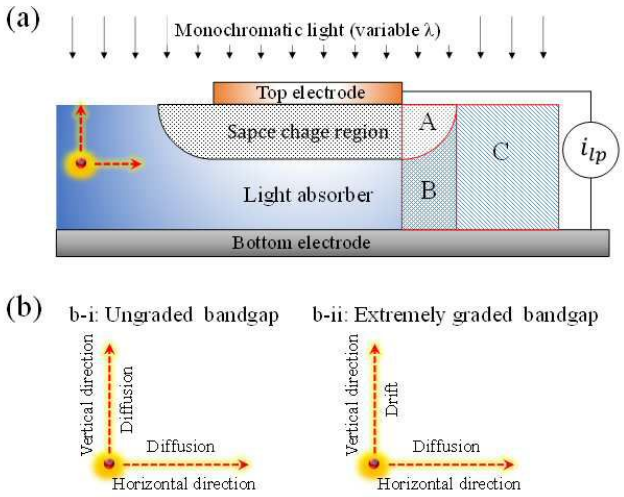
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 **경사진 밴드갭 태양전지의 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일 산출방법**

(57) 요 약

본 발명은 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일 산출방법에 관한 것으로, 본 발명에 따른 산출방법은 하부 전극; 하부 전극 상에 위치하며 위치에 따라 변화되는 밴드갭을 갖는 광흡수체 층; 및 상기 광흡수체 층 상에 위치하는 불투명 상부 전극;을 포함하는 시험 전지를 이용하며, a) 상기 시험 전지에 서로 상이한 파장의 광을 조사하며 조사광의 파장별 광전류를 측정하는 단계; 및 b) 소수 캐리어의 수평 이동 및 수직 이동이 모두 확산에 의한 이동인 제1한계 조건과 수평 이동이 확산에 의한 이동이며 수직 이동이 전계 드리프트(drift)에 의한 이동인 제2한계조건 각각에서 도출된 광전류와 소수 캐리어 유효 확산 길이간의 관계식과 a) 단계에서 측정된 파장별 광전류를 이용하여, 광의 흡수 깊이에 따른 소수 캐리어 유효 확산 길이를 산출하는 단계;를 포함한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H01L 31/04 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 NRF-2016R1D1A1B03934840
부처명 교육부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 일반연구자지원사업(기본)
연구과제명 플렉시블 CIGS 태양전지용 투명전극: 수분에 대한 장기 안정성 & 비진공 공정
기 여 율 1/1
과제수행기관명 한밭대학교 산학협력단
연구기간 2016.11.01 ~ 2019.10.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

하부 전극; 하부 전극 상에 위치하며 위치에 따라 변화되는 밴드갭을 갖는 광흡수체 층; 및 상기 광흡수체 층 상에 위치하는 불투명 상부 전극;을 포함하는 시험 전지를 이용하며,

a) 상기 시험 전지에 서로 상이한 파장의 광을 조사하며 조사광의 파장별 광전류를 측정하는 단계; 및

b) 소수 캐리어의 수평 이동 및 수직 이동이 모두 확산에 의한 이동인 제1한계 조건과 수평 이동이 확산에 의한 이동이며 수직 이동이 전계 드리프트(drift)에 의한 이동인 제2한계조건 각각에서 도출된 광전류와 소수 캐리어 유효 확산 길이간의 관계식과 a) 단계에서 측정된 파장별 광전류를 이용하여, 광의 흡수 깊이에 따른 소수 캐리어 유효 확산 길이를 산출하는 단계;를 포함하는 경사진 밴드갭 태양전지의 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일 산출방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

광흡수체 층의 광 입사면을 기준(z=0)하여 광흡수체층의 두께 방향으로의 축을 z축으로, 상부 전극의 중심을 기준(r=0)한 광흡수체층의 면 방향으로의 축을 r축으로 하고, 상부 전극의 반경을 r_0로, 광흡수체 층의 공간전하 영역의 폭을 W로 하여, 상기 제1한계조건에서 광흡수체 층 내 소수 캐리어의 위치(r, z)를 따른 영역별 수집 효율(collection efficiency)은

영역 A : $(r-r_o) < W$ 및 $z < \sqrt{W^2-(r-r_o)^2}$

영역 A에서의 수집 효율 = 1

영역 B: $(r-r_o) < W$ 및 $z > \sqrt{W^2-(r-r_o)^2}$

영역 B에서의 수집 효율 = $\exp\left(-\frac{\sqrt{(r-r_o)^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right)$

영역 C : $(r-r_o) > W$

영역 C에서의 수집 효율= $\exp\left(-\frac{\sqrt{(r-r_o)^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right)$

인 산출방법.

청구항 3

제 1항에 있어서,

광흡수체 층의 광 입사면을 기준(z=0)하여 광흡수체층의 두께 방향으로의 축을 z축으로, 상부 전극의 중심을 기준(r=0)한 광흡수체층의 면 방향으로의 축을 r축으로 하고, 상부 전극의 반경을 r_0로, 광흡수체 층의 공간전하 영역의 폭을 W로 하여, 상기 제2한계조건에서 광흡수체 층 내 소수 캐리어의 위치(r, z)를 따른 영역별 수집 효율(collection efficiency)은

영역 D : $r < r_o + W$

영역 D에서의 수집효율 = 1

영역 C : $(r-r_o) > W$

영역 C에서의 수집효율 = $\exp\left(-\frac{r-r_o-W}{L_{\text{eff}}}\right)$

인 산출방법.

청구항 4

제 1항에 있어서,

상기 b) 단계에서, 상기 관계식은 광전류 및 조사광의 파장 의존성을 갖는 물성 성분을 일 변으로, 소수 캐리어 유효 확산 길이인 L_{eff}를 포함하는 성분 및 광흡수체 층의 두께 방향이나 면 방향으로의 적분 성분을 다른 일 변으로 가지며, 상기 제1한계조건에서 도출된 관계식에서 상기 일 변을 I_{UG}로 규정한 I_{UG}와 L_{eff}간의 제1등식, 상기 제2한계조건에서 도출된 관계식에서 상기 일 변을 I_{EG}로 규정한 I_{EG}와 L_{eff}간의 제2등식을 포함하는 산출방법.

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 제1등식은 하기 식1이며, 상기 제2등식은 하기 식2인 산출방법.

(식1)

$$\frac{i_{lp}}{2\pi r_o I_L}\frac{hc}{e(1-R_{ab})\alpha\lambda} =$$

$$\int_{z=0}^{z=\sqrt{W^2-r'^2}}\int_{r'=0}^{r'=W}\exp(-\alpha z)\,dr'dz +$$

$$\int_{z=\sqrt{W^2-r'^2}}^{z=t}\int_{r'=0}^{r'=W}\exp(-\alpha z)\exp\left(-\frac{\sqrt{r'^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right)dr'dz +$$

$$\int_{z=0}^{z=t}\int_{r'=W}^{r'=\infty}\exp(-\alpha z)\exp\left(-\frac{\sqrt{r'^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right)dr'dz$$

(식2)

$$\frac{i_{lp}}{2\pi r_o I_L}\frac{hc}{e(1-R_{ab})\alpha\lambda} = \int_{z=0}^{z=t}\int_{r'=0}^{r'=W}\exp(-\alpha z)\,dr'dz + \int_{z=0}^{z=t}\int_{r'=W}^{r'=\infty}\exp(-\alpha z)\exp\left(-\frac{r'-W}{L_{\text{eff}}}\right)dr'dz$$

(식 1 또는 식 2에서, i_{lp}는 조사광에서의 광전류, r_0는 불투명 상부 전극의 반경, I_L은 조사광의 강도, h는 프랑크 상수, c는 광속, e는 전자 전하량, R_{ab}는 광흡수체 층의 조사광 입사면에서의 반사율(reflectance), α는 광흡수체의 흡수계수, λ는 조사광의 파장, z는 광흡수체 층의 조사광 입사면을 기준(z=0)한 광흡수체층의 두께 방향으로의 변수, r'는 r-r_0로, r은 불투명 상부 전극의 중심을 기준(r=0)한 광흡수체층의 면 방향으로의 변수, t는 광흡수체 층의 두께, W는 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭, L_{eff}는 소수 캐리어 유효 확산 길이)

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 b) 단계는,

i) a) 단계에서 수득되는 조사광의 파장- 해당 조사광에서의 광전류의 측정값을 이용하여 제1등식에서의 I_{UG} 값

을 산출하고 제2등식에서의 I_{EG} 값을 산출하는 단계;

ii) 산출된 I_{UG} 값을 이용하여 제1등식에서 L_{eff} 값인 $L_{eff}(UG)$를 산출하고 산출된 IEG 값을 이용하여 제2등식에서 L_{eff} 값인 $L_{eff}(EG)$를 산출하는 단계;

iii) 조사광의 파장별로 i) 및 ii) 단계를 반복함으로써, 조사광의 파장별 $L_{eff}(UG)$와 $L_{eff}(EG)$ 세트를 산출 단계; 및

iv) 조사광의 파장별 $L_{eff}(UG)$와 $L_{eff}(EG)$ 세트를 이용하여 조사광의 파장 의존성을 갖는 물성 성분인 광의 흡수 깊이를 x-축으로, L_{eff} 값을 y축으로 하여, $L_{eff}(UG)$에 의한 제1그래프와 $L_{eff}(EG)$에 의한 제2그래프를 생성하고, 일 광의 흡수 깊이 기준 제1그래프와 제2그래프의 사이에 위치하는 영역을 유효 영역으로 산출하는 단계;

를 포함하는 산출방법.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 제1그래프와 상기 제2그래프는 각각, 광의 흡수 깊이가 감소할수록 증가하다가 포화(saturation)되는 형태의 그래프이며, 상기 포화된 구간에서의 상기 유효 영역에 해당하는 L_{eff} 값을 소수 캐리어 벌크 확산 길이(L_d)로 규정하는 산출방법.

청구항 8

제 1항 내지 제 7항 중 어느 한 항의 산출방법에 따라 광의 흡수 깊이에 따른 소수 캐리어 유효 확산 길이인 L_{eff} 깊이 프로파일을 산출하는 단계; 및

L_{eff} 깊이 프로파일에서 광의 흡수 깊이가 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭보다 작은 영역에 속하는 L_{eff} 값과 식 3을 이용하여 후면 재결합 속도를 산출하는 단계;를 포함하는 산출방법.

(식 3)

$$L_{\mathrm{eff}}(s) = (L_d^{-2} + \frac{1}{4}\frac{S_b}{dD})^{-1/2}$$

(식 3에서, $L_{eff}(s)$는 L_{eff} 깊이 프로파일에서 광의 흡수 깊이가 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭보다 작은 영역에 속하는 L_{eff} 값이며, L_d는 소수 캐리어 벌크 확산 길이이고, D는 소수 캐리어 확산계수(diffusivity)이고, d는 t - α_0^{-1}로, t는 광흡수체 층의 두께이고, α_0^{-1}은 L_{eff} 깊이 프로파일에서 $L_{eff}(s)$의 광 흡수 깊이이다)

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 경사진 밴드갭 태양전지의 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일 산출방법에 관한 것으로, 상세하게, 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일을 산출하고, 이를 이용하여 경사진 밴드갭 태양전지에서의 소수 캐리어 벌크 확산 길이와 후면 재결합 속도를 산출하는 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 결함에서의 재결합에 의한 광 전하의 손실은 태양전지의 성능에 가장 큰 악영향을 미친다. 광 전하 손실은 후면 재결합에 의한 손실이 주를 이루며, 후면 재결합을 야기하는 결함 취약 영역(결함 형성 영역)을 파악하고 이러한 영역에서의 결함 생성을 방지하거나 생성된 결함을 치유하는 것은 태양전지의 성능 향상에 필수적이다.

[0003] 알려진 바와 같이 소수 캐리어 벌크 확산 길이는 결함과 무관한 물질 고유 값이나, 소수 캐리어 유효 확산 길이는 결함에 의한 전하 손실에 영향을 받는 값이다. 이에, 소수 캐리어 유효 확산 길이는 결함에 의한 전하 손실

을 지시하는 지표로 사용된다.

[0004] 한편, 태양전지의 효율을 보다 증가시키기 위해 광흡수층 내에서 밴드갭의 에너지가 변화되는 경사진 밴드갭 태양전지가 개발되고 있다. 경사진 밴드갭 태양전지는 밴드갭의 변화를 야기하는 원소나 물질의 구배(서로 상이한 물질의 경계를 포함함)를 갖게 되어, 결함에서의 재결합에 의한 광전하 손실 위험이 종래 단일 밴드갭 태양전지보다 현저하게 증가한다.

[0005] 그러나, 종래 태양전지에서 소수 캐리어 특성을 측정 또는 산출하기 위해 개발된 방법들은 광흡수층이 단일한 밴드갭 에너지를 갖는 단일 밴드갭 태양전지에 적용될 수 있을 뿐, 경사진 밴드갭 태양전지에는 적용될 수 없는 한계가 있다.

[0006]

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 2018-0059222

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명의 목적은 위치에 따라 밴드갭이 변화되는(경사 밴드갭) 광흡수체 층을 포함하는 태양전지에서, 비 파괴적이며 간단하고 신속한 방법으로 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일을 산출할 수 있는 방법을 제공하는 것이다.

[0009] 본 발명의 다른 목적은 위치에 따라 밴드갭이 변화되는(경사 밴드갭) 광흡수체 층을 포함하는 태양전지에서, 비 파괴적이며 간단하고 신속한 방법으로, 소수 캐리어 벌크 확산 길이 및 후면 재결합 속도를 산출할 수 있는 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0010] 본 발명에 따른 산출방법은 경사진 밴드갭 태양전지의 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일의 산출방법이며, 상세하게, 전극; 하부 전극 상에 위치하며 위치에 따라 변화되는 밴드갭을 갖는 광흡수체 층; 및 상기 광흡수체 층 상에 위치하는 불투명 상부 전극;을 포함하는 시험 전지를 이용하며, a) 상기 시험 전지에 서로 상이한 파장의 광을 조사하며 조사광의 파장별 광전류를 측정하는 단계; 및 b) 소수 캐리어의 수평 이동 및 수직 이동이 모두 확산에 의한 이동인 제1한계 조건과 수평 이동이 확산에 의한 이동이며 수직 이동이 전계 드리프트(drift)에 의한 이동인 제2한계조건 각각에서 도출된 광전류와 소수 캐리어 유효 확산 길이간의 관계식과 a) 단계에서 측정된 파장별 광전류를 이용하여, 광의 흡수 깊이에 따른 소수 캐리어 유효 확산 길이를 산출하는 단계;를 포함한다.

[0011] 본 발명의 일 실시예에 따른 산출방법에 있어, 광흡수체 층의 광 입사면을 기준(z=0)하여 광흡수체층의 두께 방향으로의 축을 z축으로, 상부 전극의 중심을 기준(r=0)한 광흡수체층의 면 방향으로의 축을 r축으로 하고, 상부 전극의 반경을 r_0로, 광흡수체 층의 공간전하 영역의 폭을 W로 하여, 상기 제1한계조건에서 광흡수체 층 내 소수 캐리어의 위치(r, z)를 따른 영역별 수집 효율(collection efficiency)은

[0012] 영역 A : $(r - r_o) < W$ 및 $z < \sqrt{W^2 - (r - r_o)^2}$

[0013] 영역 A에서의 수집 효율 = 1

[0014] 영역 B: $(r - r_o) < W$ 및 $z > \sqrt{W^2 - (r - r_o)^2}$

[0015] 영역 B에서의 수집 효율 = $\exp\left(-\frac{\sqrt{(r-r_o)^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right)$

[0016] 영역 C : $(r - r_o) > W$

[0017] 영역 C에서의 수집 효율= $\exp\left(-\frac{\sqrt{(r-r_o)^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right)$

[0018] 일 수 있다.

[0019] 본 발명의 일 실시예에 따른 산출방법에 있어, 광흡수체 층의 광 입사면을 기준(z=0)하여 광흡수체층의 두께 방향으로의 축을 z축으로, 상부 전극의 중심을 기준(r=0)한 광흡수체층의 면 방향으로의 축을 r축으로 하고, 상부 전극의 반경을 r_0로, 광흡수체 층의 공간전하 영역의 폭을 W로 하여, 상기 제2한계조건에서 광흡수체 층 내 소수 캐리어의 위치(r, z)를 따른 영역별 수집 효율(collection efficiency)은

[0020] 영역 D : $r < r_o + W$

[0021] 영역 D에서의 수집효율 = 1

[0022] 영역 C : $(r - r_o) > W$

[0023] 영역 C에서의 수집효율 = $\exp\left(-\frac{r - r_o - W}{L_{\text{eff}}}\right)$

[0024] 일 수 있다.

[0025] 본 발명의 일 실시예에 따른 산출방법에 있어, b) 단계에서, 상기 관계식은 광전류 및 조사광의 파장 의존성을 갖는 물성 성분을 일 변으로, 소수 캐리어 유효 확산 길이인 L_{eff}를 포함하는 성분 및 광흡수체 층의 두께 방향이나 면 방향으로의 적분 성분을 다른 일 변으로 가지며, 상기 제1한계조건에서 도출된 관계식에서 상기 일 변을 I_{UG}로 규정한 I_{UG}와 L_{eff}간의 제1등식, 상기 제2한계조건에서 도출된 관계식에서 상기 일 변을 I_{EG}로 규정한 I_{EG}와 L_{eff}간의 제2등식을 포함할 수 있다.

[0026] 본 발명의 일 실시예에 따른 산출방법에 있어, 상기 제1등식은 하기 식1이며, 상기 제2등식은 하기 식2일 수 있다.

[0027] (식 1)

$$\frac{i_{lp}}{2\pi r_o I_L}\frac{hc}{e(1-R_{ab})\alpha\lambda} =$$

$$\int_{z=0}^{z=\sqrt{W^2-r'^2}}\int_{r'=0}^{r'=W}\exp(-\alpha z)\,dr'dz +$$

$$\int_{z=\sqrt{W^2-r'^2}}^{z=t}\int_{r'=0}^{r'=W}\exp(-\alpha z)\exp\left(-\frac{\sqrt{r'^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right)dr'dz +$$

$$\int_{z=0}^{z=t}\int_{r'=W}^{r'=\infty}\exp(-\alpha z)\exp\left(-\frac{\sqrt{r'^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right)dr'dz$$

[0028]

[0029] (식2)

$$\frac{i_{lp}}{2\pi r_o I_L}\frac{hc}{e(1-R_{ab})\alpha\lambda} = \int_{z=0}^{z=t}\int_{r'=0}^{r'=W}\exp(-\alpha z)\,dr'dz + \int_{z=0}^{z=t}\int_{r'=W}^{r'=\infty}\exp(-\alpha z)\exp\left(-\frac{r'-W}{L_{\text{eff}}}\right)dr'dz$$

[0030]

[0031] 식 1 또는 식 2에서, i_{lp}는 조사광에서의 광전류, r_0는 불투명 상부 전극의 반경, I_L은 조사광의 강도, h는 프랑

크 상수, c는 광속, e는 전자 전하량, R_{ab}는 광흡수체 층의 조사광 입사면에서의 반사율(reflectance), α는 광흡수체의 흡수계수, λ는 조사광의 파장, z는 광흡수체 층의 조사광 입사면을 기준(z=0)한 광흡수체층의 두께 방향으로의 변수, r'는 $r-r_0$로, r은 불투명 상부 전극의 중심을 기준(r=0)한 광흡수체층의 면 방향으로의 변수, t는 광흡수체 층의 두께, W는 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭, L_{eff}는 소수 캐리어 유효 확산 길이이다.

[0032] 본 발명의 일 실시예에 따른 산출방법에 있어, 상기 b) 단계는, i) a) 단계에서 수득되는 조사광의 파장- 해당 조사광에서의 광전류의 측정값을 이용하여 제1등식에서의 IUG 값을 산출하고 제2등식에서의 IEG 값을 산출하는 단계; ii) 산출된 I_{UG} 값을 이용하여 제1등식에서 L_{eff} 값인 $L_{eff}(UG)$를 산출하고 산출된 IEG 값을 이용하여 제2등식에서 L_{eff} 값인 $L_{eff}(EG)$를 산출하는 단계; iii) 조사광의 파장별로 i) 및 ii) 단계를 반복함으로써, 조사광의 파장별 $L_{eff}(UG)$와 $L_{eff}(EG)$ 세트를 산출 단계; 및 iv) 조사광의 파장별 $L_{eff}(UG)$와 $L_{eff}(EG)$ 세트를 이용하여 조사광의 파장 의존성을 갖는 물성 성분인 광의 흡수 깊이를 x-축으로, L_{eff} 값을 y축으로 하여, $L_{eff}(UG)$에 의한 제1그래프와 $L_{eff}(EG)$에 의한 제2그래프를 생성하고, 일 광의 흡수 깊이 기준 제1그래프와 제2그래프의 사이에 위치하는 영역을 유효 영역으로 산출하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0033] 본 발명의 일 실시예에 따른 산출방법에 있어, 상기 제1그래프와 상기 제2그래프는 각각, 광의 흡수 깊이가 감소할수록 증가하다가 포화(saturation)되는 형태의 그래프이며, 상기 포화된 구간에서의 상기 유효 영역에 해당하는 L_{eff} 값을 소수 캐리어 벌크 확산 길이(L_d)로 규정할 수 있다.

[0034] 본 발명은 상술한 경사진 밴드갭 태양전지의 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일의 산출방법을 이용한 후면 재결합 속도 산출방법을 포함한다.

[0035] 본 발명에 따른 경사진 밴드갭 태양전지의 후면 재결합 속도 산출방법은 상술한 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일의 산출방법에 따라 광의 흡수 깊이에 따른 소수 캐리어 유효 확산 길이인 L_{eff} 깊이 프로파일을 산출하는 단계; 및 L_{eff} 깊이 프로파일에서 광의 흡수 깊이가 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭보다 작은 영역에 속하는 L_{eff} 값과 식 3을 이용하여 후면 재결합 속도를 산출하는 단계;를 포함한다.

[0036] (식 3)

[0037] $$L_{\mathrm{eff}}(s) = (L_d^{-2} + \frac{1}{4}\frac{S_b}{dD})^{-1/2}$$

[0038] 식 3에서, $L_{eff}(s)$는 L_{eff} 깊이 프로파일에서 광의 흡수 깊이가 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭보다 작은 영역에 속하는 L_{eff} 값이며, L_d는 소수 캐리어 벌크 확산 길이이고, D는 소수 캐리어 확산계수(diffusivity)이고, d는 $t - \alpha_0^{-1}$로, t는 광흡수체 층의 두께이고, α_0^{-1}은 L_{eff} 깊이 프로파일에서 $L_{eff}(s)$의 광 흡수 깊이이다.

발명의 효과

[0039] 본 발명에 따른 산출방법은 경사진 밴드갭의 구체 물질이나 밴드갭 경사의 형태, 경사의 정도등에 영향을 받지 않으며, 단지 시험 전지를 제조하여 다양한 광 파장에서 전류를 측정하는 단순하고 신속하며 비파괴적인 방법을 통해, 광흡수체 층에서, 깊이에 따른 소수 캐리어 유효 확산 길이를 산출할 수 있는 장점이 있다.

[0040] 또한, 본 발명에 따른 산출방법은 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일을 산출할 수 있음에 따라, 밴드갭이 변화되는 광흡수체 층에서 결함 취약 영역의 위치와 결함 정도를 파악할 수 있는 장점이 있다.

[0041] 또한, 본 발명에 따른 산출방법은 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일과 함께, 이를 이용하여 소수 캐리어 벌크 확산 길이 및 후면 재결합 속도 또한 산출할 수 있는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0042] 도 1(a)는 본 발명의 일 실시예에 따른 시험 전지의 단면을 도시한 일 단면도이며, 1(b)는 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일을 산출하기 위한 관계식을 도출하기 위한 두 한계 조건에서 소수 캐리어의 이동을 도시

한 일 개념도이다.

도 2는 시험 전지에서, r의 반경, dr의 폭 및 dz의 두께를 갖는 링 영역의 상부 조감도(상부 도면) 및 단면(하부 도면)을 도시한 예이다.

도 3은 화합물반도체를 광흡수체로, 실 제조된 시험전지의 단면도 및 광 조사를 위한 광학 장치를 도시한 도면이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따라, 식 1과 식 2를 이용하여 IEG 및 IUG vs Leff 간의 그래프를 도시한 것이다.

도 5는 제조된 시험 전지에 구비된 광흡수체 층의 L_{eff} 깊이 프로파일을 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0043] 이하 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 산출방법을 상세히 설명한다. 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 수도 있으며, 이하 제시되는 도면들은 본 발명의 사상을 명확히 하기 위해 과장되어 도시될 수 있다. 이때, 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 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대한 설명은 생략한다. 또한 명세서 및 첨부된 특허청구범위에서 사용되는 단수 형태는 문맥에서 특별한 지시가 없는 한 복수 형태도 포함하는 것으로 의도할 수 있다.

[0044] 본 발명에서 경사진 밴드갭 태양전지 또는 경사형 밴드갭 태양전지는 위치에 따라 밴드갭 에너지가 달라지는 광흡수체 층을 포함하는 태양전지를 의미한다.

[0045] 광흡수체 층의 밴드갭은 광흡수체 층의 물질, 조성, 구조, 전기적 특성에 영향을 미치는 도펀트등이 위치에 따라 달라지며 제어(설계)될 수 있으나, 본 발명이 밴드갭의 변화 요인에 의해 한정되는 것은 아니다.

[0046] 위치에 따라 변화되는 밴드갭(이하, 경사진 밴드갭)은, 광흡수체 층의 두께 방향으로의 위치에 따라 변화되는 밴드갭을 의미할 수 있으나, 반드시 이에 제한되는 것은 아니다. 경사진 밴드갭은 광흡수체 층의 적어도 일부 영역에서 광흡수체 층의 두께 방향으로의 위치에 따라 밴드갭 에너지가 변화되는 것을 의미하는 것일 뿐, 광흡수체 층의 일부 영역이 고정된 밴드갭 에너지를 갖는 경우를 배제하는 것은 아니다. 경사진 밴드갭은 광흡수체 층의 두께 방향으로 연속적 또는 불연속적으로 밴드갭 에너지가 증가하거나, 감소하거나, 또는 증가와 감소가 1회 이상 반복되는 형태를 포함할 수 있으나, 본 발명이 광흡수체 층의 경사진 밴드갭의 구체 경사 형태와 경사 정도에 의해 한정되는 것은 아니다.

[0047] 광흡수체 층은 태양전지에서 광을 흡수하여 광전자와 광정공 쌍이 생성되는 층 형상의 영역을 의미할 수 있다. 광흡수체 층은 서로 상이한 광흡수체가 각각 층을 이루며 적층된 적층층 또한 포함할 수 있으며, 적층층에서 각 광흡수체의 층은 서로 직접적으로 접하며 적층된 구조일 수 있다.

[0048] 경사진 밴드갭 태양전지의 일 예로, CIGS(Cu,In,Ga,(S,Se))등을 포함하는 화합물 반도체 태양전지, 페로브스카이트 구조의 유기-금속 할로겐화물을 포함하는 페로브스카이트 태양전지, a-Si:H나 a-SiGe:H등을 포함하는 박막 태양전지등을 들 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0049] 본 발명에 따른 산출 방법은, 경사진 밴드갭 태양전지의 소수 캐리어 유효 확산 길이(L_{eff}) 깊이 프로파일의 산출 방법으로, 하부 전극; 하부 전극 상에 위치하며 위치에 따라 변화되는 밴드갭을 갖는 광흡수체 층; 및 상기 광흡수체 층 상에 위치하는 불투명 상부 전극;을 포함하는 시험 전지를 이용하며, a) 상기 시험 전지에 서로 상이한 파장의 광을 조사하며 조사광의 파장별 광전류를 측정하는 단계; 및 b) 소수 캐리어의 수평 이동 및 수직 이동이 모두 확산에 의한 이동인 제1한계 조건과 수평 이동이 확산에 의한 이동이며 수직 이동이 전계 드리프트(drift)에 의한 이동인 제2한계조건 각각에서 도출된 광전류와 소수 캐리어 유효 확산 길이간의 관계식과 a) 단계에서 측정된 파장별 광전류를 이용하여, 광의 흡수 깊이에 따른 소수 캐리어 유효 확산 길이를 산출하는 단계;를 포함한다.

[0050] 도 1(a)는 본 발명의 일 실시예에 따른 시험 전지의 단면을 도시한 일 단면도이다. 도 1(a)에 도시한 일 예와 같이, 시험 전지는 상부 전극(top electrode)과 하부 전극(bottom electrode) 사이에 광흡수체 층(light

absorber)이 개재된 구조일 수 있다. 이때, 광흡수체 층은 목적하는 경사진 밴드갭 태양전지에 구비되는 광흡수층과 물질, 구조, 전기적 특성(밴드갭 경사 형태 및 정도), 형상, 크기등이 모두 동일할 수 있다. 시험전지에 광을 조사하여 측정되는 광 전류가 측면 광전류(lateral photocurrent)일 수 있도록, 상부 전극은 광을 투과하지 않는 불투명한 전극일 수 있다. 이때, 광을 투과하지 않는다 함은 적어도 광흡수체 층에서 흡수하는 파장 대역에 속하는 광에 대한 반사율이 95% 이상, 실질적으로 99% 이상, 보다 실질적으로 100%에 이름을 의미할 수 있다. 일 예로, 상부 전극은 가시광을 투과하지 않는 불투명한 전극일 수 있다. 이때, 하부 전극은 투명 전극이어도, 또는 불투명 전극이어도 무방하다.

[0051] 상부 전극과 하부 전극은 광흡수체 층과 오믹 접합을 하는 물질이면 무방하며, 소수 캐리어의 특성을 하고자 하는 광흡수체가 구비되는 태양전지에서 통상적으로 광의 입사면 측에 사용되는 전극 물질과 후면(입사면의 대향면) 측에 사용되는 전극 물질이면 무방하다. 상부 전극 또는 하부 전극은 해당 태양전지에서 오믹 접합이나 원활한 광전류의 흐름을 유도할 수 있는 것으로 알려진 구조(일 예로, 다층구조)를 가질 수 있음은 물론이다.

[0052] 유리하게, 상부 전극의 반경은 식 $r_o \gg W + 5L_d$ 을 만족하는 것이 좋다. 여기서 r_0는 상부 전극의 반경이며, W는 광흡수체 층의 공간 전하 영역(space charge region)의 폭이고, L_d는 소수 캐리어 벌크 확산 길이(bulk diffusion length of the minority carrier)이다. 알려진 바와 같이, 측면 광전류의 99% 이상은 상부 전극의 테두리를 기준(0)하여 $W+5L_{eff}$ (L_{eff}=소수 캐리어 유효 확산 길이)이내의 영역으로부터 수집된다. L_d는 결함과 무관한 물질 고유의 특성이나 소수 캐리어 벌크 확산 길이는 결함에 의해 L_d에서 감소된 값을 갖는다. 이에, L_{eff}의 최대값은 L_d가 되며, $W+5L_{eff}$의 최대값은 $W+L_d$가 되고, 상부 전극의 반경이 r_0가 $W+5L_d$를 무시할 수 있을 정도로 큰 경우, 광전류와 소수 캐리어 유효 확산 길이간의 관계식의 정확성을 향상시킬 수 있어 좋다. 광흡수체로 알려진 물질들의 알려진 L_d 값(10^0 마이크로미터 order)들과 W 값(10^2 나노미터 order)들을 고려할 때, r_0는 10^2 마이크로미터 오더 이상일 수 있으며, 구체예로 10^2 마이크로미터 오더 내지 10^0mm 오더일 수 있다. 실질적인 일 예로, r_0는 500 μm 내지 5mm일 수 있다. 이때, 상부 전극은 상부 전극측에서 광흡수체 층쪽으로 상부 조감한 투사 이미지(projection image) 상 상부 전극이 광흡수체 층을 모두 덮지 않고 일부만을 덮는 판 형상이면 어떠한 형상이든 무방하다. 구체적인 일 예로, 상부 전극은 원판, 타원형판 또는 다각(삼각 내지 십이각)판 형상일 수 있다. 이때, 상부 전극이 원형이 아닌 경우, 상부 전극의 크기나 반지름은 동일 면적의 원으로 환산한 경우의 크기나 반지름을 의미할 수 있음은 물론이다.

[0053] 도 1(a) 및 도 1(b)에서 붉은색 구는 소수 캐리어를 도시한 것으로, 광흡수체 층이 경사진 밴드갭을 갖는 경우, 소수 캐리어는 확산 뿐만 아니라 드리프트(drift)에 의해서도 이동하게 된다.

[0054] 도 1(b)는 소수 캐리어 유효 확산 길이 깊이 프로파일을 산출하기 위한 관계식을 도출하기 위한 두 한계(극한) 조건을 도시한 개념도이다. 경사진 밴드갭을 갖는 광흡수체 층에서 밴드갭 에너지의 경사 정도에 대한 두 극한(한계)은, 경사가 전혀 지지 않은 경우와 극단적으로 경사진 경우이다. 도 1(b)의 좌측은 경사가 전혀지지 않은 극한의 경우에서 소수 캐리어의 이동을 나타낸 것이며, 도 1(b)의 우측은 극단적으로 경사진 경우에서 소수 캐리어의 이동을 나타낸 것이다. 도 1(b)에 도시한 예와 같이, 경사가 전혀지지 않은 한계 조건(b-i : Ungraded bandgap)에서 소수 캐리어는 수직 방향(광흡수체 층의 두께 방향)과 수평 방향(광흡수체 층의 면내 방향) 이동이 모두 확산에 의해 주도될 수 있다. 또한 극단적으로 경사진 한계 조건(b-ii : extremely graded bandgap)에서 소수 캐리어의 수직 방향 이동은 드리프트에 의해 주도될 수 있고 수평 방향 이동은 확산에 의해 주도될 수 있다.

[0055] 본 발명에 따른 산출 방법은 소수 캐리어의 수평 이동 및 수직 이동이 모두 확산에 의한 이동인 제1한계 조건과 수평 이동이 확산에 의한 이동이며 수직 이동이 전계 드리프트(drift)에 의한 이동인 제2한계조건 각각에서 광전류와 소수 캐리어 유효 확산 길이간의 관계식을 도출한다. 이하, 제1한계조건에서 도출되는 관계식을 관계식 1로, 제2한계조건에서 도출되는 관계식을 관계식 2로 통칭하며, 단지 관계식으로 기재된 경우 해당 내용은 관계식 1 및 관계식 2에 모두 적용될 수 있다.

[0056] 또한, 이하의 설명에서 광흡수체 층의 광 입사면을 기준(z=0)하여 광흡수체층의 두께 방향으로의 축을 z축(변수 z)으로, 상부 전극의 중심을 기준(r=0)한 광흡수체층의 면 방향으로의 축을 r축(변수 r)으로 하고 z-r의 원통좌표(cylindrical coordinates)를 기준한다. 또한, 이하의 설명에서 r_0는 상부 전극의 반경을, t는 광흡수체 층의 두께를, W는 공간전하 영역의 폭을, I_L은 조사광의 강도를, h는 프랑크 상수를, c는 광속을, e는 전자 전하

량을, R_{ab}는 광흡수체 층의 조사광 입사면에서의 반사율(reflectance)을, α는 광흡수체(광흡수체 층의 광흡수체)의 흡수계수를, α^{-1}은 광(또는 조사광)의 흡수 깊이를, λ는 광(또는 조사광)의 파장을, D는 소수 캐리어 확산계수(diffusivity)를, L_{eff}는 소수 캐리어 유효 확산 길이를, L_d는 소수 캐리어 벌크 확산 길이를, S_b는 후면 재결합 속도를 의미한다.

[0057] 도 2는 시험 전지에서, r의 반경, dr의 폭 및 dz의 두께를 갖는 링 영역의 상부 조감도(상부 도면) 및 단면(하부 도면)을 도시한 예이다.

[0058] 도 2의 링 영역에서 단위 시간당 광 생성 전하 운반자의 수(dN(z))는 $\mathrm{dN(z)} = \frac{I_{ab}(\mathrm{z})}{(\frac{hc}{\lambda})} 2\pi r dr dz$ 이며, 이때, I_{ab}(z)는 z의 깊이에서 흡수된 광의 강도로, Beer-Lambert 법칙에 따라 $I_{ab}(\mathrm{z}) = I_L\,(1-R_{ab})\alpha \exp(-\alpha z)\,dz$ 로 표시된다.

[0059] 광에 의해 생성되는 전하 운반자(소수 캐리어)는 상부 전극으로 수집되는데, 단위 시간당 링 영역에서 생성되어 수집되는 전하 운반자에 의한 전류(di(r,z))는 전자 전하량(e)x단위 시간당 광 생성 전하 운반자의 수(dN(z))x 전하 수집효율(η(r,z))이 된다.

[0060] 이때, 전하 수집효율은 제1한계조건과 제2한계조건에 따라 달라지며, 각 한계 조건에서 영역에 따라 달라질 수 있다.

[0061] 상세하게, 제1한계조건에서 광흡수체 층 내 소수 캐리어의 위치(r, z)를 따른 영역별 수집 효율(collection efficiency, η(r,z))은 공간전하영역(도 1(a)의 A)공간전하영역 밖이되 공간전하영역의 하부에 위치하는 영역(도 1(a)의 B), 및 그 외의 영역(도 1(a)의 C)으로 나뉠 수 있다. 즉, 광흡수체 층에서 광을 흡수하여 전하 운반자가 생성되는 영역은 영역 A : $(r-r_o) < W$ 및 $z < \sqrt{W^2-(r-r_o)^2}$, 영역 B: $(r-r_o) < W$ 및 $z > \sqrt{W^2-(r-r_o)^2}$, 및 영역 C : $(r-r_o) > W$ 로 나뉠 수 있다. 전하 운반자(소수 캐리어)의 z축 및 r축의 이동이 모두 확산에 의한 것임에 따라, 이때, 각 영역 별 η(r,z)는 영역 A에서의 수집 효율 = 1, 영역 B에서의 수집 효율 = $\exp\left(-\frac{\sqrt{(r-r_o)^2+z^2}-W}{L_{\mathrm{eff}}}\right)$ 및 영역 C에서의 수집 효율= $\exp\left(-\frac{\sqrt{(r-r_o)^2+z^2}-W}{L_{\mathrm{eff}}}\right)$ 로 규정될 수 있다.

[0062] 반면, 제2한계조건에서 전하 운반자(소수 캐리어)의 z축 이동은 드리프트에 의해 이루어짐에 따라, 도 1(a)에 도시한 영역 A 뿐만 아니라 영역 B에서 생성된 전하 운반자의 수집 효율=1일 수 있다. 또한, z축 이동이 드리프트에 의해 이루어짐에 따라, 영역 C에서 생성된 전하 운반자의 수집 효율 또한, 전하 운반자와 공간 전하 영역까지의 거리가 아닌, r축으로의 이동 거리만이 수집효율에 영향을 미치게 된다.

[0063] 이에, 제2한계조건에서 광흡수체 층 내 소수 캐리어의 위치(r, z)를 따른 영역별 수집 효율(collection efficiency, η(r,z))은

[0064] 영역 D(=영역 A 및 영역 B) : $r < r_o + \mathrm{W}$

[0065] 영역 D에서의 수집효율 = 1

[0066] 영역 C : $(r-r_o) > W$,

[0067] 영역 C에서의 수집효율 = $\exp\left(-\frac{r-r_o-W}{L_{\mathrm{eff}}}\right)$

[0068] 일 수 있다.

[0069] 상술한 영역 A, B, C 및 D에서 상부 전극은 광을 투과하지 않음에 따라, 광흡수체 층에서 상부 전극 하부에 위치하는 영역은 광에 의해 전하 운반자가 생성되지 않는 비활성 영역(dead zone)이며, 영역 A, B, C 및 D는 상부 전극이 위치하지 않아 광이 수광되는 영역을 대상으로 한 영역임은 물론이다.

[0070] 상술한 바와 같이, 단위 시간당 링 영역에서 생성되어 수집되는 전하 운반자에 의한 전류인 $di(r,z) = ed\mathrm{N(z)}\,\eta(r,z)$로 규정될 수 있으며, 단위 시간당 상부 전극으로 수집되는 전하량인 i_{1p}는

$i_{lp} = i_{lp}^{A} + i_{lp}^{B} + i_{lp}^{C} = \int_{z=0}^{z=t} \int_{r=r_o}^{r=\infty} di(r,z)$ 로 규정될 수 있다. 이때, i_{lp}^{A}는 A영역의 전류를 의미하며, i_{lp}^{B}는 B영역의 전류를, i_{lp}^{C}는 C영역의 전류를 의미하며, 앞서 상술한 바와 같이, 제2극한 조건에서 영역D는 영역A+영역B이다.

[0071] 각 극한 조건에서 앞서 도출된 식들을 이용하여 광전류(i_{lp}) 및 조사광의 파장 의존성을 갖는 물성 성분을 일 변으로, 소수 캐리어 유효 확산 길이인 L_{eff}를 포함하는 성분 및 광흡수체 층의 두께 방향이나 면 방향으로의 적분 성분을 다른 일 변으로 정리하면, 제1극한 조건에서의 i_{lp}와 L_{eff}간 식 1이 도출되며, 제2극한 조건에서의 i_{lp}와 L_{eff}간 식 2가 도출될 수 있다. 식 1 및 식 2에서 r'는 $r-r_0$이다.

[0072] (식1)

$$\frac{i_{lp}}{2\pi r_o I_L}\frac{hc}{e(1-R_{ab})\alpha\lambda} =$$

$$\int_{z=0}^{z=\sqrt{W^2-r'^2}} \int_{r'=0}^{r'=W} \exp(-\alpha z)\, dr'dz +$$

$$\int_{z=\sqrt{W^2-r'^2}}^{z=t} \int_{r'=0}^{r'=W} \exp(-\alpha z) \exp\left(-\frac{\sqrt{r'^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right) dr'dz +$$

$$\int_{z=0}^{z=t} \int_{r'=W}^{r'=\infty} \exp(-\alpha z) \exp\left(-\frac{\sqrt{r'^2+z^2}-W}{L_{\text{eff}}}\right) dr'dz$$

[0073]

[0074] (식2)

$$\frac{i_{lp}}{2\pi r_o I_L}\frac{hc}{e(1-R_{ab})\alpha\lambda} = \int_{z=0}^{z=t} \int_{r'=0}^{r'=W} \exp(-\alpha z)\, dr'dz + \int_{z=0}^{z=t} \int_{r'=W}^{r'=\infty} \exp(-\alpha z) \exp\left(-\frac{r'-W}{L_{\text{eff}}}\right) dr'dz$$

[0075]

[0076] 식 1 및 식 2에서 등식의 좌측 변은 조사되는 일 파장과 강도의 광이 조사될 때, 오직 광전류만의 변수를 갖는 항이며, 등식의 우측 변은 L_{eff}의 함수이다.

[0077] 이에, 특정 파장의 광을 일정한 강도로 조사하여 측정된 광 전류 값을 통해, 식 1 및 식 2의 좌측 변의 값이 구해질 수 있다. 이에, 식 1에서 좌측 변을 I_{UG}로 규정하고 식 2에서 좌측변을 I_{EG}로 규정하는 경우, 식1은 측정에 의해 그 값이 도출되는 I_{UG}와 L_{eff}간의 제1등식으로, 식2는 I_{EG}와 L_{eff}간의 제2등식으로 표현할 수 있다.

[0078] 이때, 제1극한조건과 제2극한조건은 광흡수체 층에서 밴드갭에서 구현될 수 있는 경사 형태의 양 극한임에 따라, 광흡수체 층의 실제 L_{eff}는 제1극한조건에서 산출되는 $L_{eff}(UG)$와 제2극한조건에서 산출되는 $L_{eff}(EG)$ 사이의 값이 되며, $L_{eff}(UG)$과 $L_{eff}(EG)$ 사이의 영역은 실제 L_{eff}값이 위치하는 유효 영역으로 구획될 수 있다.

[0079] 이에, a) 단계에서 서로 상이한 다양한 파장의 광을 조사하여, 식 1 및 식 2를 통해 양 극한 조건에서의 L_{eff}($L_{eff}(UG)$ 및 $L_{eff}(EG)$)를 산출하는 경우, 광의 흡수 깊이에 따른 L_{eff}의 유효 영역, 즉, L_{eff} 두께 프로파일을 구할 수 있다.

[0080] a) 단계에서 조사되는 광은 단색광(monochromatic light)일 수 있으며, 실험적으로 a) 단계에서 조사되는 광의 파장 폭(조사되는 광의 최대 파장-최소파장)은 100nm이내, 실질적으로 50nm, 보다 실질적으로 20nm, 보다 더 실질적으로 10nm 이내일 수 있다. a) 단계에서 서로 상이한 파장의 광이 조사되며 조사광의 파장에 따른 광전류값을 측정할 수 있는데, 서로 상이한 파장을 갖는 광이 3종류 이상, 구체적으로 5종류 이상, 보다 구체적으로 6 내지 20종류의 광이 순차적으로 조사될 수 있다. 이때, 조사되는 광의 강도는 0.1 내지 1SUN일 수 있으나, 반드

시 이에 한정되는 것은 아니다.

[0081] 조사되는 광은 가시광 내지 근적외선 영역에 속하는 광일 수 있으며, 구체적으로 380nm 내지 2000nm, 380nm 내지 1500nm, 또는 500nm 내지 1200nm에 속하는 광일 수 있다. 이때, 서로 상이한 파장의 광간의 파장 차는 20 내지 200nm일 수 있으나, 이에 한정되는 것은 아니다.

[0082] 상술한 바와 같이, a) 단계의 구체예로, a) 단계는 380nm 내지 2000nm 파장 대역에 속하는 단색광을 시험 전지에 조사하며 광전류를 측정하되, 광의 파장기준 서로 인접하는 광(단색광)간의 파장 차가 20 내지 200nm인 3종류(3개) 이상의 단색광을 조사하여 광의 파장별 광전류를 측정하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0083] a) 단계를 통해 조사광(조사되는 단색광)의 파장, 조사광의 강도 및 해당 광 파장에서의 광전류의 값을 다양한 파장에 대해 얻은 후, b) 단계를 통해 L_{eff} 깊이 프로파일이 산출될 수 있다.

[0084] 구체적으로 b) 단계는, i) a) 단계에서 수득되는 조사광의 파장- 해당 조사광에서의 광전류의 측정값을 이용하여 제1등식에서의 I_{UG} 값을 산출하고 제2등식에서의 I_{EG} 값을 산출하는 단계; ii) 산출된 I_{UG} 값을 이용하여 제1등식에서 L_{eff} 값인 $L_{eff}(UG)$를 산출하고 산출된 IEG 값을 이용하여 제2등식에서 L_{eff} 값인 $L_{eff}(EG)$를 산출하는 단계; iii) 조사광의 파장별로 i) 및 ii) 단계를 반복함으로써, 조사광의 파장별 $L_{eff}(UG)$와 $L_{eff}(EG)$ 세트를 산출 단계; 및 iv) 조사광의 파장별 $L_{eff}(UG)$와 $L_{eff}(EG)$ 세트를 이용하여 조사광의 파장 의존성을 갖는 물성 성분인 광의 흡수 깊이를 x-축으로, L_{eff} 값을 y축으로 하여, $L_{eff}(UG)$에 의한 제1그래프와 $L_{eff}(EG)$에 의한 제2그래프를 생성하고, 일 광의 흡수 깊이 기준 제1그래프와 제2그래프의 사이에 위치하는 영역을 유효 영역으로 산출하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0085] 상술한 바와 같이, L_d는 결함(결함에서의 재결합에 의한 광전류 손실)과 무관하며 L_{eff}는 결함에 영향을 받는다. 이에, L_{eff}의 최대값은 L_d이며, 결함이 많은 영역(결함에서의 재결합에 의한 광전류 손실이 큰 영역)일수록 L_{eff}는 보다 작은 값을 갖게 된다. 재결합에 의한 광전류 손실의 대부분은 후면 재결함에 의해 발생함에 따라, 수광면을 기준(0)한 L_{eff} 깊이 프로파일은 광의 흡수 깊이가 감소할수록 L_{eff} 값이 증가하다가 포화되는 형태를 갖게 된다. 이때, L_{eff}가 포화되는 깊이는 후면 재결함의 영향으로부터 자유로운 수광면 인근 영역일 수 있다.

[0086] 이에, 제1그래프와 제2그래프는 각각, 광의 흡수 깊이가 감소하며 증가하다가 포화(saturation)되는 형태일 수 있으며, 포화된 구간에서의 유효 영역에 해당하는 L_{eff} 값이 소수 캐리어 벌크 확산 길이(L_d)로 규정될 수 있다. 실질적인 일 예로, 광의 흡수 깊이를 기준으로 50 내지 200nm 이내에서의 유효 영역에 해당하는 L_{eff} 값, 보다 실질적으로 광의 흡수 깊이 100 내지 150nm에서 유효 영역에 해당하는 L_{eff} 값이 L_d로 규정될 수 있다.

[0087] 이에 따라, 본 발명은 L_{eff} 깊이 프로파일을 이용한 소수 캐리어 벌크 확산 길이(L_d) 산출 방법을 포함할 수 있다. 구체적으로, 본 발명에 따른 L_d 산출 방법은 상술한 방법으로 L_{eff} 깊이 프로파일을 산출하는 단계; 광의 흡수 깊이에 따른 L_{eff}인 L_{eff} 깊이 프로파일에서 광의 수광면측으로 포화된 L_{eff}의 값을 L_d로 산출하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0088] 이와 독립적으로, 본 발명은 L_{eff} 깊이 프로파일을 이용한 후면 재결합 속도(S_b) 산출 방법을 포함할 수 있다. 구체적으로, 본 발명에 따른 S_b 산출 방법은 상술한 방법으로 광의 흡수 깊이에 따른 L_{eff}인 L_{eff} 깊이 프로파일을 산출하는 단계; L_{eff} 깊이 프로파일에서 광의 흡수 깊이가 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭(W)보다 작은 영역에 속하는 L_{eff} 값과 식 3을 이용하여 후면 재결합 속도를 산출하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0089] (식 3)

[0090] $$L_{\mathbf{eff}}(s) = (L_d^{-2} + \frac{1}{4}\frac{S_b}{dD})^{-1/2}$$

[0091] 식 3에서, $L_{eff}(s)$는 L_{eff} 깊이 프로파일에서 광의 흡수 깊이가 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭보다 작은 영역에 속하는 L_{eff} 값이며, L_d는 소수 캐리어 벌크 확산 길이이고, D는 소수 캐리어

확산계수(diffusivity)이고, d는 t - α_0^{-1}로, t는 광흡수체 층의 두께이고, α_0^{-1}은 L_{eff} 깊이 프로파일에서 $L_{eff}(s)$의 광 흡수 깊이이다.

[0092] S_b 산출을 위해 사용되는 $L_{eff}(s)$는 전하의 수집시 소수 캐리어의 이동이 광흡수층의 면방향만의 이동으로 간주될 수 있도록, L_{eff} 깊이 프로파일에서 광의 흡수 깊이가 광흡수체 층에서 공간 전하 영역의 폭(W)보다 작은 영역(구간)에서의 L_{eff} 값인 것이 좋고, 나아가, 후면 재결합에 의한 영향이 뚜렷이 관찰되는 영역(구간)인 광의 흡수 깊이가 깊어짐에 따라 L_{eff}값의 감소하는 영역(즉, 비 포화 영역)에 속하는 L_{eff} 값인 것이 좋다. 실질적인 일예로, W를 기준으로 광의 흡수 깊이(α^{-1})가 0.4W 이상 및 W 미만, 구체적으로 0.7W 내지 0.95W의 영역에 속하는 L_{eff} 값을 $L_{eff}(s)$로 사용하는 것이 좋다.

[0093] 상술한 바와 같이, 본 발명에 따른 방법은 단지 시험 전지를 제조하여 다양한 광 파장에서 전류를 측정하는 단순하고 신속하며 비파괴적인 방법을 통해, 광흡수체의 물질이나 밴드갭의 구체 경사 구조등과 무관하게, L_{eff} 깊이 프로파일, L_d, S_b등과 같은 소수 캐리어 특성을 산출할 수 있는 장점이 있다.

[0094] 본 발명의 산출 방법의 신뢰도를 확인하기 위해, 도 3과 같이 Al/Ni/CdS 구조의 상부 전극(r_0=1mm), 두께에 따라 조성이 달라지도록 증착하여 경사진 밴드갭을 갖는 CIGS 광흡수체 층(t=2㎛), 소다-라임 유리에 코팅된 MO의 하부 전극으로 이루어진 시험 전지를 제조하였다. 고주파수(100kHz) 캐패시턴스 측정 및 Mott-Schottky 플롯을 이용하여 제조된 시험 전지에서 0 바이어스 하 공간전하영역의 폭(W)=420nm을 구했다. 이때 사용된 CIGS 광흡수체 층의 상대 유전율 ε_r은 12였다. CIGS 광흡수체 층 수광면에서의 Rab는 UV-vis 분광계를 이용하여 측정하였다. 또한, 시험 전지와 동일한 CIGS 광흡수체 층이 구비되도록 하여 ZnO:Al/인트린직 ZnO/CdS/CIGS 광흡수체 층/Mo의 통상의 구조를 갖는 경사형 밴드갭 CIGS 태양전지를 제조하였으며, 이때, 제조된 CIGS 태양전지의 광전 변환 효율은 17.2%, 개방회로전압은 0.673 V, 단락전류밀도는 34.2mA/cm^2, 필팩터는 74.9%였다.

[0095] 백색광을 밴드패스 필터에 통과시켜 단색광을 생성하여 생성된 단색광을 시험 전지에 조사하였다. 생성된 단색광의 밴드폭(파장 폭)은 10nm였으며, 조사되는 단색광의 강도인 광 강도(I_L)는 광 파워 미터(optical power meter)를 이용하여 측정하였으며, 파장에 따른 광 흡수계수(α)는 문헌(J. Appl. Phys. 94, 879-888 (2003))을 통해 알려진 값을 사용하였다.

[0096] 아래 표 1은 조사된 단색광의 파장(λ), 파장에 따른 광 흡수계수(α), 측정된 광 전류를 광의 강도로 나눈 비(i_{lp}/I_L), 광 반사율(R_{ab}) 및 등식 1 및 2에서 좌측변에 해당하는 $\frac{i_{lp}}{2\pi r_o I_L}\frac{hc}{e(1-R_{ab})\alpha\lambda}$을 M으로 규정하여 그 값들을 정리한 표이다.

[0097] (표 1)

λ (nm)	α (m^{-1})	$\frac{i_{lp}}{I_L}$ ($AW^{-1}m^2$))	R_{ab}	$\mathbf{M} \equiv \frac{i_{lp}}{2\pi r_o I_L}\frac{hc}{e(1-R_{ab})\alpha\lambda}$ (m^2)
700	7.36×10^{6}	6.39×10^{-9}	0.19	3.02×10^{-13}
800	5.65×10^{6}	7.31×10^{-9}	0.19	3.93×10^{-13}
900	3.77×10^{6}	7.85×10^{-9}	0.19	5.64×10^{-13}
970	2.97×10^{6}	6.54×10^{-9}	0.20	5.60×10^{-13}
1000	2.51×10^{6}	5.86×10^{-9}	0.18	5.62×10^{-13}
1025	2.02×10^{6}	4.56×10^{-9}	0.18	5.29×10^{-13}
1050	1.46×10^{6}	1.84×10^{-9}	0.25	3.16×10^{-13}

[0098]

[0099] 도 4는 I_{UG}를 식 1의 우측변으로 규정(IUG=식 1의 우측변)하고, I_{EG}를 식 2의 우측변으로 규정(I_{EG}=식 2의 우측변)하여, 단색광 파장별 규정된 식에 따라 I_{EG} 및 I_{UG} vs L_{eff} 간의 그래프를 도시한 것이다. 파장별 I_{EG} 및 I_{UG} vs L_{eff} 그래프에서 동일 단색광 파장에서의 표 1의 M의 값을 갖는 I_{EG}에 해당하는 $L_{eff(}EG)$와 동일한 M의 값을 갖는 I_{UG}에 해당하는 $L_{eff}(UG)$를 얻음으로써, 파장별 $L_{eff(}EG)$와 $L_{eff}(UG)$의 세트값을 얻었다.

[0100] 이후, x축을 광의 흡수 깊이(α^{-1})로, y축을 L_{eff}으로 측정에 사용된 파장 별 광의 흡수 깊이- $L_{eff(EG)}$ 및 $L_{eff}(UG)$을 도시하고 이러한 포인트들을 연결함으로써 $L_{eff}(UG)$에 의한 제1그래프(도 5의 흑색 Ungraded)와 $L_{eff}(EG)$에 의한 제2그래프((도 5의 적색 Extremely graded)를 생성하여 도 5에 도시하였다. 도 5에서 일 광의 흡수 깊이를 기준하여 제1그래프와 제2그래프의 사이에 시험 전지에 구비된 광흡수체 층의 실제 Leff 값이 위치함에 따라, 일 광의 흡수 깊이를 기준하여 1그래프와 제2그래프의 사이 영역(도 5의 쉐이딩 영역)을 유효 영역으로 산출하였다.

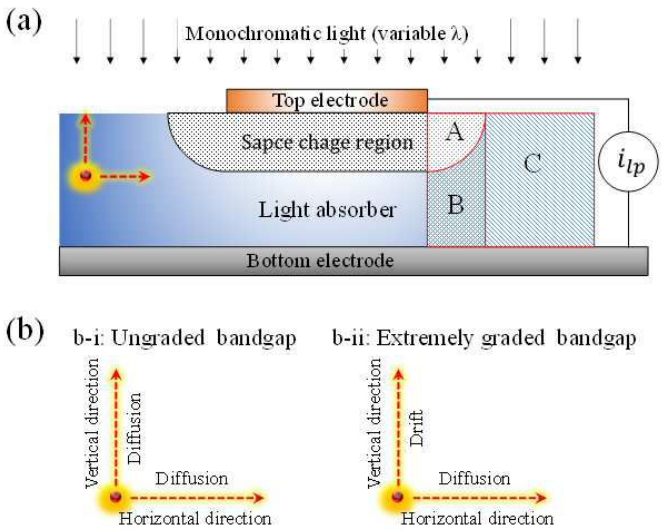
[0101] 도 5는 L_{eff} 깊이 프로파일을 도시한 도면으로, 광 흡수 깊이에 따른 유효 영역이 L_{eff} 깊이 프로파일에 해당한다. 도 5에서 알 수 있듯이 177nm의 흡수 깊이에서 L_{eff}는 1803~1830nm 사이로 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 또한, 265nm를 초과하는 흡수 깊이에서 L_{eff}가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있으며, 685nm의 흡수 깊이에서 L_{eff}가 66~350nm 사이의 값을 가짐을 알 수 있다. 이를 통해 265nm를 초과하는 깊이에서 후면 재결합에 의한 광전류 손실이 발생하며, 약 600nm를 넘어서는 깊이에서 심각한 후면 재결합이 발생함을 알 수 있다. 또한, 도 5에서 표면 영역에서 L_{eff}가 포화됨을 알 수 있으며, 포화된 $L_{eff}(UG)$와 $L_{eff}(EG)$ 값인 1803~1830nm를 소수 캐리어 벌크 확산 길이(Ld)로 규정하였다. 또한, W=420nm임에 따라, 공간 전하 영역 내의 광 흡수 깊이이되, L_{eff}가 급격히 감소하는 구간에 속하는 광 흡수 깊이=337nm에서의 $L_{eff}(UG)$와 $L_{eff}(EG)$ 값과 d= t - 337nm=1663nm를 식 3에 대입하여 1.7×10^{4} ~ 2.2×10^{4} cm^{-1} 의 S_b/D값을 구하였다. 문헌을 통해 알려진 소수 캐리어 모빌리티(minority carrier mobility)와 모빌리티-확산계수간의 관계식을 제공하는 아인슈타인 식을 이용하여 전류 측정이 수행된 온도인 25℃에서의 확산 계수를 산출하고, 이를 이용하여 S_b를 구한 결과, 4.4×10^{4} ~ 5.7×10^{4} cm/s의 S_b값을 얻었다. 이러한 S_b값, L_d값은 종래 문헌들을 통해 보고된 값과 유사하였다.

[0102] 이상과 같이 본 발명에서는 특정된 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다.

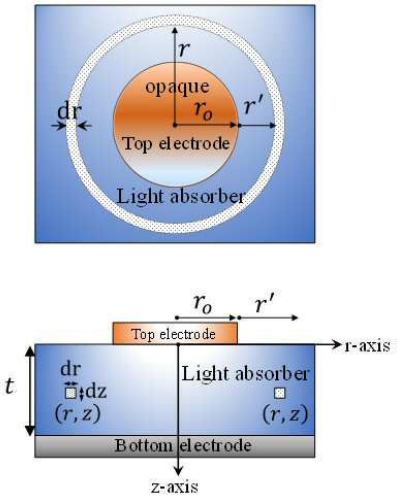
[0103] 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

도면

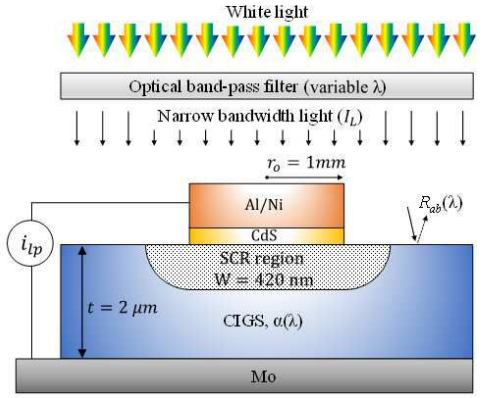
도면1



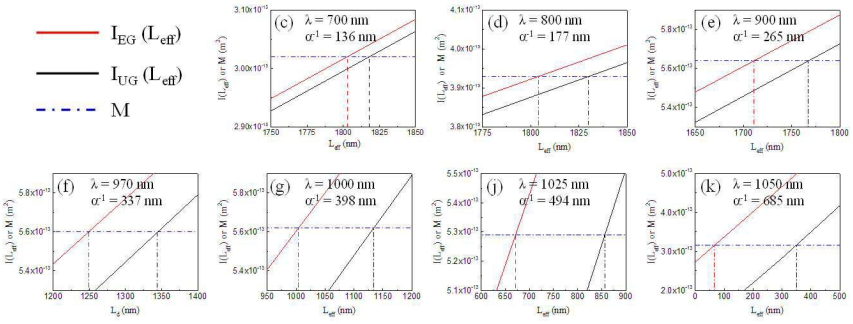
도면2


r
opaque
r_o
r′
dr
Top electrode
Light absorber
r_o
r′
Top electrode
r-axis
t
dr
dz
(r, z)
Light absorber
(r, z)
Bottom electrode
z-axis

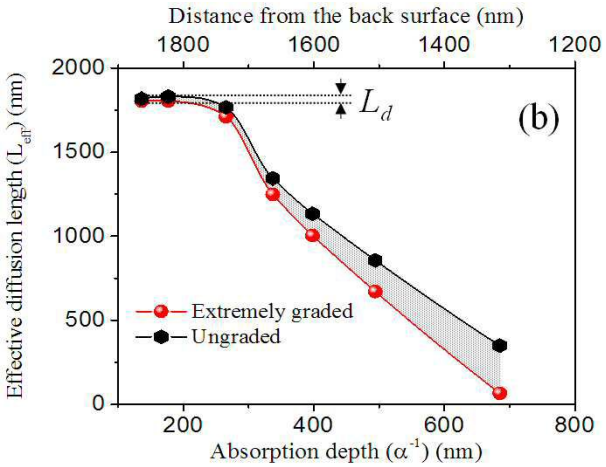
도면3


White light
Optical band-pass filter (variable λ)
Narrow bandwidth light (I_L)
r_o = 1mm
Al/Ni
CdS
$R_{ab}(\lambda)$
i_{lp}
SCR region
W = 420 nm
t = 2 μm
CIGS, α(λ)
Mo

도면4


I_{EG} (L_{eff})
I_{UG} (L_{eff})
M
(c) λ = 700 nm
α⁻¹ = 136 nm
(d) λ = 800 nm
α⁻¹ = 177 nm
(e) λ = 900 nm
α⁻¹ = 265 nm
(f) λ = 970 nm
α⁻¹ = 337 nm
(g) λ = 1000 nm
α⁻¹ = 398 nm
(j) λ = 1025 nm
α⁻¹ = 494 nm
(k) λ = 1050 nm
α⁻¹ = 685 nm

도면5


Distance from the back surface (nm)
1800
1600
1400
1200
2000
1500
1000
500
0
L_d
(b)
Extremely graded
Ungraded
Effective diffusion length (L_{eff}) (nm)
200
400
600
800
Absorption depth (α^{-1}) (nm)