(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0030330
(43) 공개일자 2023년03월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 31/378 (2019.01) *G01R 27/02* (2006.01)
G01R 27/08 (2006.01) *G01R 31/36* (2019.01)
G01R 31/392 (2019.01) *G01R 31/52* (2020.01)
H01L 31/0392 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01R 31/378 (2019.01)
G01R 27/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0112443
(22) 출원일자 2021년08월25일
심사청구일자 2021년08월25일

(71) 출원인
한발대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
정중희
대전광역시 유성구 동서대로 125 D6동 106호 34158
(74) 대리인
이은철

전체 청구항 수 : 총 8 항

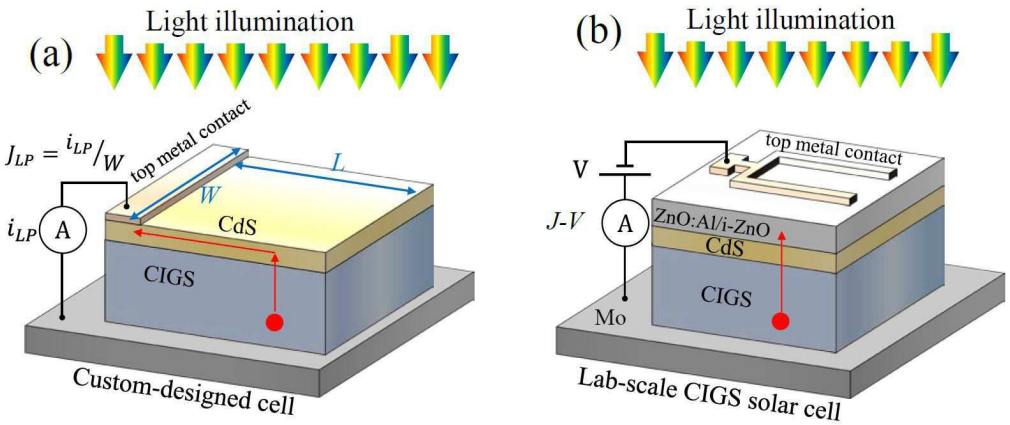
(54) 발명의 명칭 **소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법**

(57) 요 약

본 발명은, 측면 광전류법에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법에 관한 것이다.

본 발명에 따르면, 소자 동작 조건에서 CIGS 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법은 표준 CIGS 태양전지의 *J-V* 데이터와 단락(short circuit) 커스텀-디자인 전지(short-circuited custom-designed cell)의 측면 광전류를 이용하여 CdS의 면저항을 측정할 수 있는 효과가 있고, CIGS 태양전지뿐만 아니라, Cu_2ZnSnS_4, SnS 및 Sb_2Se_3 태양전지로 확장하여 CdS의 면저항을 측정할 수 있는 효과가 있다.

대 표 도 - 도2



(52) CPC특허분류
G01R 27/08 (2013.01)
G01R 31/3648 (2013.01)
G01R 31/392 (2019.01)
G01R 31/52 (2022.01)
H01L 31/03928 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711132058
과제번호 2021R1A2C1005815
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명 광대역 빛 산란 제어를 위한 산화물 투명전극의 나노구조 설계 및 원스텝 수용액 공정 개발
기 여 율 1/2
과제수행기관명 한밭대학교
연구기간 2021.03.01 ~ 2022.02.28
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1345341784
과제번호 2021RIS-004
부처명 교육부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 지자체-대학협력기반지역혁신사업(12139205005222002238313)
연구과제명 (대전세종충남지역혁신플랫폼)충남대학교
기 여 율 1/2
과제수행기관명 (대전세종충남지역혁신플랫폼)충남대학교
연구기간 2021.06.01 ~ 2022.04.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법으로서,

(1) Cu(In,Ga)Se_2(CIGS) 태양전지에서 전류밀도(J)-전압(V)을 측정하는 단계;

(2) 커스텀-디자인 전지(custom-designed cell)에서 측면 광전류를 측정하는 단계; 및

(3) 상기 (2) 단계의 커스텀-디자인 전지에서 등가회로 분석을 통해 측면 광전류의 전류밀도(J_{LP})와 CdS의 면저항($R_{S(CdS)}$) 사이의 수치적 관계를 구하는 단계; 를 포함하는 것을 특징으로 하는, 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법.

청구항 2

제1항에 있어서,

(4) 상기 (3) 단계 이후, 커스텀-디자인 전지에서 측면 광전류의 전류밀도(J_{LP})와 및 CdS의 면저항($R_{S(CdS)}$) 사이의 근사 수학식을 유도하는 단계;를 더 포함하는 것을 특징으로 하는, 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법.

청구항 3

제2항에 있어서,

(5) 상기 (3) 단계에서 구한 수치적 관계 및 상기 (4) 단계에서의 상기 근사 수학식을 병합하여 반경험적 수학식을 구하는 단계;를 더 포함하는 것을 특징으로 하는, 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법.

청구항 4

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 (2) 단계에서, 커스텀-디자인 전지는 Al/Ni/CdS/CIGS/Mo 순으로 적층되어 있는 것을 특징으로 하는, 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법.

청구항 5

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 (2) 단계에서, 측면 광전류 측정은 백색광 조명 90 내지 110 mW/cm^2 및 AM1.0 내지 2.0G의 조건에서 측정하는 것을 특징으로 하는, 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법.

청구항 6

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 (3) 단계의 수치적 관계는, CdS의 면저항($R_{S(CdS)}$)이 측면 광전류의 전류밀도(J_{LP})의 역수 제곱에 비례하고, $\log(R_{S(CdS)})$-$\log(J_{LP})$의 기울기가 -2인 것을 특징으로 하는, 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법.

청구항 7

제2항 또는 제3항에 있어서,

상기 (4) 단계의 근사 수학식은, 하기 수학식

$$R_{S(CdS)} = 2\frac{JscVoc}{JLP^2}$$

[여기서, J_{SC}는 CIGS 태양전의 단락(short-circuit) 전류밀도, V_{OC}는 CIGS 태양전의 개방회로(open circuit)의 전압을 나타내는 값]으로 표현되는 것을 특징으로 하는, 소자 동작 조건에서 $Cu(In,Ga)Se_2$ 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법.

청구항 8

제3항에 있어서,

상기 (5) 단계의 반경험적 수학식은, 하기 수학식

$$R_{S(CdS)} = f(FF) \times 2\frac{JscVoc}{JLP^2}$$

[여기서, $f(FF)$는 필팩터의 함수값, J_{SC}는 CIGS 태양전지의 단락(short-circuit) 전류밀도, V_{OC}는 CIGS 태양전지의 개방회로(open circuit)의 전압을 나타내는 값]으로 표현되는 것을 특징으로 하는, 소자 동작 조건에서 $Cu(In,Ga)Se_2$ 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 측면 광전류법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 소자 동작 조건에서 $Cu(In,Ga)Se_2$ 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 전자 수송 장치를 잘 이해하기 위해, 다층 전자 장치에서 각각의 기능을 갖는 층들의 전기적 특성을 특징짓는 것은 중요하다. 기능 층(functional layer)의 성장(growth)이 아래층에 영향을 미치는 경우, 장치 내에서의 전기적 특성은 직접적으로 특징지어져야 한다.

[0003] CIGS($Cu(In,Ga)Se_2$)의 p-n 접합(junction) 파트너로 잘 알려진 CdS는 주로 화학 조 증착법에 의해 성장되며, 되는데, 이 방법에 의한 CdS의 성장은 아래층에 영향을 크게 받는다. 기질(substrate)의 표면상태와 CdS와 기질(substrate) 사이에서 격자 부정합(lattice mismatch)에 의해 CdS의 성장이 영향을 받는 것으로 보고된 바가 있다. 또한 CIGS 표면의 조성(composition)과 그레인 배향(grain orientation)에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 도 1에 보는 바와 같이 CIGS 표면상에는 CdS가 박막으로 성장하지만, 유리 기판상에는 박막이 아닌 파티클 형태로 형성된다. 기능층 박막의 면저항을 측정하기 위해서는 부도체인 유리기판에 박막을 성장하여 면저항을 측정하는 것이 일반적이지만, 유리 기판상에는 파티클 형상으로 성장하기 때문에 유리기판 상에서 면저항을 측정할 수 없게 된다.

[0004] 따라서, CdS의 전기적 특성은 반드시 장치내에서 직접 측정되어야 한다. 그럼에도 불구하고 지금까지 CIGS 장치내에서 CdS의 전기적 특성을 직접적으로 측정한 연구는 보고된 바가 없다.

[0005] 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해, 본 발명에서는 CIGS 장치 작동 조건하에서 면저항을 측정하기 위한 측면 광전류(lateral photocurrent, i_{LP}) 방법을 제시한다. 본 발명에서 제공하는 방법은 도 2에 보는 바와 같이 커스텀-디자인 전지에서 CdS를 따라 흐르는 측면 광전류와 랩-스케일 표준 CIGS 태양전지의 전류밀도-전압(J-V) 값의 조합에 기초한다.

[0006] 먼저, 커스텀-디자인 전지에서 등가회로의 분석으로 J_{LP}와 $R_{S(CdS)}$의 수치적 관계를 확인할 수 있다. 두 번째로, 수학적 유도를 통해 J_{LP}와 $R_{S(CdS)}$의 관계를 근사치 이론 공식(approximate theoretical formula)을 통해 근사 수학식을 제공한다(표준 CIGS 태양전지의 필팩터(FF)가 100%라는 가정하에). 마지막으로, 등가회로 분석과 근사 수학식의 병합을 통해 필팩터(FF)가 100 %라는 가정 없이, J_{LP}와 $R_{S(CdS)}$의 관계를 반경험적 공식으로 제공한다.

[0007] 본 발명에서 제안된 측면 광전류 측정 방법은 다른 완충 재료로서, Zn(O,S), In_2S_3와 Cu_2ZnSnS_4, SnS 및 Sb_2Se_3을 포함하는 칼코게나이드 태양전지(chalcogenide solar cell)에서도 응용이 가능하다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 제10-1883951호

(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허공보 제10-2057653호

(특허문헌 0003) 대한민국 등록특허공보 제10-0429568호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명은, 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법의 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0010] 소자 동작 조건에서 Cu(In,Ga)Se_2 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법으로서, (1) Cu(In,Ga)Se_2(CIGS) 태양전지에서 전류밀도(J)-전압(V)을 측정하는 단계; (2) 커스텀-디자인 전지(custom-designed cell)에서 측면 광전류를 측정하는 단계; 및 (3) 상기 (2) 단계의 커스텀-디자인 전지에서 등가회로 분석을 통해 측면 광전류의 전류밀도(J_{LP})와 CdS의 면저항($R_{S(CdS)}$) 사이의 수치적 관계를 구하는 단계;를 포함할 수 있다.

[0011] 바람직하게, 상기 (3) 단계 이후, 커스텀-디자인 전지에서 측면 광전류의 전류밀도(J_{LP}) 및 CdS의 면저항($R_{S(CdS)}$) 사이의 근사 수학식을 유도하는 단계;를 더 포함할 수 있다.

[0012] 바람직하게, 상기 (3) 단계에서 구한 수치적 관계 및 제2항의 상기 근사 수학식을 병합하여 반경험적 수학식을 구하는 단계;를 더 포함할 수 있다.

[0013] 바람직하게, 상기 (2) 단계에서, 커스텀-디자인 전지는 Al/Ni/CdS/CIGS/Mo 순으로 적층될 수 있다.

[0014] 바람직하게, 상기 (2) 단계에서, 측면 광전류 측정은 백색광 조명 90 내지 110 mW/cm^2 및 AM1.0 내지 2.0G의 조건에서 측정할 수 있다.

[0015] 바람직하게, 상기 (3) 단계의 수치적 관계는, CdS의 면저항($R_{S(CdS)}$)이 측면 광전류의 전류밀도(J_{LP})의 역수 제곱에 비례하고, $\log(R_{S(CdS)})$-$\log(J_{LP})$의 기울기가 -2인 것을 특징으로 한다.

[0016] 바람직하게, 상기 근사 수학식은 하기 수학식

$$R_{S(CdS)} = 2\frac{J_{SC}V_{OC}}{J_{LP}^2}$$

[0017]

[0018] [여기서, J_{SC}는 CIGS 태양전의 단락(short-circuit) 전류밀도, V_{OC}는 CIGS 태양전의 개방회로(open circuit)의

전압을 나타내는 값]으로 표현될 수 있다.

[0019] 바람직하게, 상기 반경험적 수학식은, 하기 수학식

[0020] $$R_{S(CdS)} = f(FF) \times 2\frac{J_{SC}V_{OC}}{J_{LP}{}^2}$$

[0021] [여기서, *f(FF)*는 필팩터의 함수값, J_{SC}는 CIGS 태양전지의 단락(short-circuit) 전류밀도, V_{OC}는 CIGS 태양전지의 개방회로(open circuit)의 전압을 나타내는 값]으로 표현될 수 있다.

발명의 효과

[0022] 본 발명에 따른 소자 동작 조건에서 CIGS 소자에서 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법은 표준 CIGS 태양전지의 *J-V* 데이터와 단락(short circuit) 커스텀-디자인 전지(short-circuited custom-designed cell)의 광전류를 이용하여 CdS의 면저항을 측정할 수 있다.

[0023] 광전류는 CdS를 따라 흐르며, 커스텀-디자인 전지에서 CdS를 따라 *IR*의 강하가 일어나는데, 이는 CdS의 면저항 측정을 가능하게 한다.

[0024] 단락 커스텀-디자인 전지의 등가 회로(equivalent circuit) 분석을 통해 면저항($R_{S(CdS)}$)과 측면 광전류의 전류밀도(J_{LP})와의 수치적인 관계를 알 수 있다.

[0025] 커스텀-디자인 전지로부터 유도된 수학적 공식은 필팩터가 100%라는 가정하에 면저항($R_{S(CdS)}$)과 표준 CIGS 태양전지의 단락 전류밀도(J_{SC}), 표준 CIGS 태양전지의 개방회로 전압(V_{OC}) 및 커스텀-디자인 전지의 측면 광전류의 전류밀도(J_{LP})와 관계가 있음을 알 수 있다.

[0026] 필팩터(FF)의 실제 측정 값을 고려하였을 때, 면저항의 반경험적 공식(semiempirical formula)은 아래와 같다. 반경험적은 공식은 상기 등가 회로 분석과 유도된 수학 공식을 병합하여 구한 식이다.

[0027] $$R_{S(CdS)} = f(FF) \times 2\frac{J_{SC}V_{OC}}{J_{LP}{}^2}$$

[0028] 본 발명에서 필팩터의 함수값(*f(FF)*)은 0.63FF + 0.43으로 계산되었고, CdS(60 nm)의 면저항은 약 30 Mohm/sq으로 측정되었으며, 이는 1.8 x 10^2 ohm-cm의 전기 저항률에 해당한다.

[0029] 반경험적 공식은 개조된 커스텀-디자인 전지에서 ZnO:Al의 얇은 박막(thin film)의 면저항을 정확히 측정함으로써 입증된다.

[0030] 본 발명의 CdS의 면저항을 직접 측정하기 위한 측면 광전류법은 CIGS 태양전지뿐만 아니라, Cu_2ZnSnS_4, SnS 및 Sb_2Se_3 태양전지로 확장하여 CdS의 면저항을 측정할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0031] 도 1은 얇은 박막에 화학적 증착된 CdS를 나타낸 이미지이다.

도 1(a)는 CIGS 표면에서 성장한 CdS의 입자를 단면 투과전자현미경 이미지와 상응 에너지(corresponding energy) 분산 분광학 매핑 이미지를 나타낸 것이다.

도 1(b)는 유리 표면에서 성장한 CdS를 평면 주사전자현미경(plane scanning electron microscope)으로 나타낸 이미지이다.

도 2는 CdS의 면저항을 측정하기 위한 CIGS 장치를 나타낸 이미지이다.

도 2(a)는 측면 광전류를 측정하기 위해 빛 조명 하에서 CdS/CIGS/Mo 순으로 설계되어 있는 커스텀-디자인 전지를 나타낸 것이다.

도 2(b)는 전류밀도-전압(J-V) 곡선을 측정하기 위해 같은 조건의 빛 조명 하에서 ZnO:Al/i-ZnO/CdS/CIGS/Mo

순으로 설계되어 있는 표준 랩-스케일(standard lab-scale) CIGS 태양전지를 나타낸 것이다.

도 3은 단락 커스텀-디자인 전지에서 빛 조명 하에 전류의 흐름과 전압의 변화를 도식화한 것이다.

도 3(a)는 CIGS 태양전지 내에서 전자-정공 쌍의 발생을 나타낸 이미지이다. 전자들은 CIGS를 가로질러 CdS를 따라 흐르고, 외부 회로에서 포획된다.

도 3(b)는 커스텀-디자인 전지에서 CIGS를 가로질러 CdS를 따라 흐르는 전류의 흐름을 나타낸 것이다.

도 3(c)는 CdS를 따라 *IR* 강하로 인한 전압 감소를 나타낸 그래프로, 0 V에서 $-V_{OC}$까지의 감소를 확인할 수 있다.

도 3(d)는 *IR* 강하로 인해 다이오드 전류가 발생한 그래프를 나타낸 것이다. 전압이 $-V_{OC}$ 지점에 이르면, 광 유도(photogenerated) 전류는 다이오드 전류에 의해 상쇄되어, 순 전류(net current)가 0이 된다.

도 4는 빛 조명 하에 단락 커스텀-디자인 전지에서 등가회로를 나타낸 것이다.

도 4(a)에서 각각의 마이크로-전지(micro-cell)는 CIGS 마이크로-태양전지 및 CdS 마이크로-저항기로 구성되어 있다.

도 4(b)는 제작된 랩-스케일 표준 태양전지의 전압 간격(ΔV)이 10 mV인 측정된 *J-V* 곡선을 나타낸 것이다(V_{OC} 711 mV, J_{SC} 30.8 mA/cm^2 및 *FF* 73.7%).

도 4(c) J_{CIGSK}-V_K 데이터 포인트를 나타낸 그래프이며, 등가회로에서 *J-V* 곡선 그래프와 수직 대칭이다.

도 5는 빛 조명 하에서 단락 커스텀-디자인 전지의 등가회로 분석을 나타낸 그래프이다.

도 5(a)는 면저항($R_{S(CdS)}$), J_{LP} 및 $L_{LC(EG)}$의 수적 관계에 대한 정보를 얻기 위한 흐름도를 나타낸 것이다.

도 5(b)는 등가회로 분석에 의해 $\log(R_{S(CdS)})$-$\log(J_{LP})$의 수적인 관계를 얻은 그래프이다.

도 6은 면저항($R_{S(CdS)}$)을 구하기 위한 수학 공식을 유도하기 위하여, 빛 조명 하에 단락 커스텀-디자인 전지에서 전류와 전압의 변화를 나타낸 도이다.

도 6(a)는 x와 $x + dx$ 사이에서 i_{CdS}와 V_{CdS}의 변화를 나타낸 이미지이다.

도 6(b)는 가장 윗층으로서, 메탈콘택(top metal contact)의 거리(x)에 따른 J_{CIGS}의 값을 나타낸 그래프이다. J_{CIGS}의 값이 J_{SC}에서 0 mA/cm^{2}로 점차적으로 감소되지만, 수학적 복잡성을 회피하기 위하여 하기 조건을 가정한다.

$$J_{CIGS}(x) = J_{SC} \text{ for } 0 \le x < L_{LC(math)} \text{ and } J_{CIGS}(x) = 0 \text{ for } x \ge L_{LC(math)}$$

도 7은 면저항($R_{S(CdS)}$)을 구하기 위한 반경험적 공식을 유도한 그래프이다.

도 7(a)는 필팩터(*FF*) 45~78% 범위에서 표준 CIGS 태양전지의 16개 *J-V* 곡선을 나타낸 그래프이다.

도 7(b)는 도 7(a)의 16개 *J-V* 곡선에서 등가회로 분석으로부터 얻은 면저항의 그래프를 도시한 것이다.

도 7(c)는 도 7(b)에서 FF에 따른 기울기를 나타낸 것이다($f(FF) \fallingdotseq 0.63FF + 0.43$).

도 8은 등가회로 분석과 반경험적 공식에 의한 면저항을 나타낸 그래프이다.

도 9(a)는 ZnO:Al의 면저항을 측정하기 위한 개조된 커스텀-디자인 전지를 나타낸 이미지이다.

도 9(b)는 등가회로 분석과 반경험적 공식에 의한 면저항($R_{s(ZnO:Al)}$)을 나타낸 그래프이며, 4-포인트 프로브(4-point probe)에 의해 측정된 면저항($R_{s(ZnO:Al)}$)과 매우 유사한 것을 알 수 있다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0032] 이하, 본 발명을 상세히 설명한다.

[0033] 도 1은 얇은 박막에 화학적 증착된 CdS를 나타낸 이미지이다. 도 1(a)는 CIGS 표면에서 성장한 CdS의 입자를 단면 투과전자현미경 이미지와 상응 에너지 분산 분광학 매핑 이미지를 나타낸 것이고, 도 1(b)는 유리 표면에서 성장한 CdS를 평면 주사전자현미경으로 나타낸 이미지이다. 도 1(a)를 보면, CdS가 CIGS 표면상에는 박막으로 성장하지만, 도 1(b)의 유리기판 상에는 파티클 형상으로 성장하기 때문에, 유리기판 상에서 CdS 면저항을 측정할 수 없게 된다.

[0034] 도 2는 CdS의 면저항을 측정하기 위한 CIGS 장치를 나타낸 이미지이다. 도 2(a)는 측면 광전류를 측정하기 위해 빛 조명 하에서 CdS/CIGS/Mo 순으로 설계된 커스텀-디자인 전지를 나타낸 것이다. 도 2(b)는 전류밀도-전압(*J-V*) 곡선을 측정하기 위해, 도 2(a)와 같은 조건의 빛 조명 하에서 ZnO:Al/i-ZnO/CdS/CIGS/Mo 순으로 설계된 표준 랩-스케일(standard lab-scale) CIGS 태양전지를 나타낸 것이다.

[0036] **표준 CIGS 태양전지 제조**

[0037] 도 2(b)는 랩-스케일(lab-scale)의 표준 CIGS 태양전지이다. 표준 CIGS 태양전지는 Al/Ni/ZnO:Al/i-ZnO/CdS/CIGS/Mo 순으로 설계되어 있다.

[0038] 표준 CIGS 태양전지를 제조하기 위해 먼저, 빛 흡수층으로서, CIGS 층은 3 단계 동시증발법(coevaporation)에 의해 Mo으로 코팅된 소다-석회 유리 기판 위에 증착시키고, 60 nm두께의 CdS 버퍼층은 화학적 용액 증착법에 의해 증착시켰다.

[0039] 이후, ZnO:Al/i-ZnO 윈도우 층(window layer)은 CdS 층 위에 RF(radio frequency) 마그네트론 스퍼터링(magnetron sputtering) 공정에 의해 증착시켰다.

[0040] 마지막으로, 가장 윗층으로서, 메탈콘택(metal contact) Al/Ni 층을 섀도 마스크(shadow mask)를 통해 증발을 이용하여 증착시켜, 표준 CIGS 태양전지를 제조하였다.

[0041] 표준 CIGS 태양전지의 활성 면적(~0.42 cm^2)은 기계적 스크라이빙(mechanical scribing)에 의해 정해졌다.

[0043] **표준 CIGS 태양전지의 *J-V* 측정**

[0044] 도 4(b)는 CIGS 태양전지의 *J-V* 값을 측정한 그래프이다. CIGS 태양전지의 *J-V* 값은 솔라시뮬레이터(solar simulator, Model 11002 SunLite, Abet Technologies)에 의해 발생시킨 백색광 조명(100 mW/cm^2, AM1.5G)하에 계측기를 통해 측정하였다(계측기 모델명: Keithley 2401 source meter).

[0046] **커스텀-디자인 전지 제조**

[0047] 도 2(a)는 커스텀-디자인 전지이다. 커스텀-디자인 전지는 Al/Ni/CdS/CIGS/Mo 순으로 설계되어 있다.

[0048] 커스텀-디자인 전지를 제조과정은, 표준 CIGS 태양전지를 제조하는 과정과 동일하되, ZnO;Al/i-ZnO 층을 제외하고 제조하였다.

[0050] **커스텀-디자인 전지의 측면 광전류 측정**

[0051] 커스텀-디자인 전지의 측면 광전류를 백색광 조명(100 mW/cm^2, AM1.5G)하에 단락회로 조건에서 측정하였다(계측기 모델명: Keithley 2401 source meter). 도 2(a)는 커스텀-디자인 전지를 나타낸 이미지이다. 먼저, 빛 조명하에 커스텀-디자인 전지에서 전류 및 전압의 변화를 나타내었다.

[0052] 두 번째로, 등가회로 및 등가회로 분석을 통해 i_{LP} 및 $R_{S(CDS)}$의 수학적 관계를 구하였다. 세 번째로, $R_{S(CDS)}$의 근사 수학식을 구하였다(필팩터(*FF*) = 100% 가정). 마지막으로, 등가회로 분석과 근사치 이론 공식을 결합하여 필팩터(*FF*)를 고려한 반경험적 공식을 유도하였다.

[0053] 도 2(a)를 보면, 커스텀-디자인 전지의 가장 위층은 패턴된 불투명한 메탈콘택으로 설계되어 있다. 원칙적으로 바-형태(bar-shaped)의 메탈콘택이 필수적인 것은 아니지만, 수학적 편리성을 위해 바-형태를 선택하였다. 따라서, 다른 형태의 커스텀-디자인 전지들에서, 폭(width, W)은 메탈콘택에서 포집된 전류의 길이(length, L)에 의해 간단하게 대체될 수 있다. 커스텀-디자인 전지에서 길이(L)는 CdS를 따라 흐르는 측면 전하 운반체 수집 거리보다 더 길어야 한다(본 발명에서는 약 25 ㎛).

[0054] 도 2(a)의 커스텀-디자인 전지는, 도 2(b)의 표준 랩-스케일 CIGS 태양전지와 다르게 CdS 층 위에 ZnO:Al/i-ZnO 층이 없다.

[0055] i_{LP} 및 $R_{S(CDS)}$의 관계를 확인하기 위해, 커스텀-디자인 전지에서 전류의 흐름과 전압의 변화를 묘사하였다. 단락된(short-circuited) 커스텀-디자인 전지에 빛을 비추었을 때, 전자-정공 쌍이 CIGS에서 다량 발생하고, 전자들은 CdS에 도달하기 위해 수직으로 이동한다. 도 3(a)는 전자들이 CdS에 도달하게 되면, CdS 층에서 수평으로 이동하고, 외부 광전류로서 위층의 메탈콘택에서 수집되는 것을 나타낸 것이다. CdS 층에서 전류의 수평 이동은 IR 강하(drop)를 야기시키고, 이것은 $R_{S(CDS)}$를 결정할 수 있는 단서를 제공한다. 여기서, Mo 층에서 전류의 수평 이동에 의한 IR 강하는 Mo의 면저항이 CdS에 의한 면저항보다 훨씬 작기 때문에 무시될 수 있다(Mo 층의 면저항 : ~0.75 ohm/sq, CdS의 면저항 : ~30 Mohm/sq).

[0056] 도 3(b)는 전류의 흐름을 화살표로 나타내었으며, 전자의 흐름과 반대 방향이다. 전류 흐름의 양의 방향은 CdS 층에서 왼쪽에서 오른쪽 방향이고, CIGS 장치에서 위층에서 아래층 방향이다.

[0057] 도 3(c)는 CdS를 따라 IR 강하로 인한 전압 감소를 나타낸 그래프로, 0 V에서 $-V_{OC}$까지의 감소를 확인할 수 있다. 탑(top) 메탈콘택으로부터 CdS 층을 따라 흐르는 전류의 수평흐름은, 메탈콘택트로부터 거리가 증가함에 따라 IR 강하로 인해 CdS 표면의 전압 (V_{CdS})이 감소한다. 도 3(d)는 이 IR 강하는 정방향 다이오드 전류를 야기시키고, 광생성 전류의 방향과 반대방향이다. V_{CdS} 값이 감소하여 $-V_{OC}$까지에 이르면, 광생성 전류는 다이오드 전류에 의해 상쇄되어 V_{CdS} 값이 $-V_{OC}$ 인 영역에서는 전류가 0이 된다. 이후, 메탈콘택으로부터 거리가 증가하더라도, CdS를 따르는 IR 강하는 더 이상 발생하지 않는다. 따라서, 커스텀-디자인 전지를 두 영역으로 나눌 수 있는데, $0 \geq V_{CdS} \geq -V_{OC}$ 구역과 $V_{CdS} = -V_{OC}$ 구역이다.

[0058] 도 4는 빛 조명 하에 단락 커스텀-디자인 전지에서 등가회로를 나타낸 것이다. 도 4(a)는 빛 조명 하에 단락 커스텀-디자인 전지의 등가회로를 보여준다. 등가회로는 n 개의 마이크로-전지들로 구성되어 있다.

[0059] k 번째 마이크로 전지는 CIGS 마이크로-태양전지로 다음과 같은 조건을 갖는다.

[0060] 면적: $W\Delta x_k$ (W : 너비, Δx_k : 길이)

[0061] CdS 면저항: $R_k (= R_{(CdS)}\Delta x_k/W)$

[0062] k 번째 노드에서 Mo 층까지 CIGS 마이크로-태양전지에서 수직 전류는 다음과 같다.

[0063] $i_{CIGSK} = J_{CIGSK}W\Delta x_k$

[0064] J_{CIGSK}는 k 번째 마이크로-전지에서 CIGS 마이크로-태양전지를 따라 흐르는 수직 전류밀도이다.

[0065] 도 4(b) 및 도 4(c)에서 커스텀-디자인 전지의 J_{CIGSK}-V_k 곡선과 랩-스케일 CIGS 태양전지의 J-V 곡선은 수직 대칭인데, 이는 커스텀-디자인 전지의 CdS 전압이 랩-스케일 CIGS 태양전지의 전압과 반대 극성을 갖기 때문이다.

[0066] 도 4(b)에서 제조된 표준 CIGS 태양전지는 개방회로의 전압은 711 mV, 단락 전류밀도는 30.8 mA/cm^2, 필팩터 73.7%이다.

[0067] 도 4(a)에서 노드는 1 부터 n+1까지 CdS 층을 따라 위치되어 있다. 노드 1은 $x = L_{LC(EC)}$, 노드 n+1은 $x = 0$ 이라 하자. $L_{LC(EC)}$은 빛 조명 하에서 커스텀-디자인 전지의 CdS를 따라 흐르는 측면 전하 운반 수집 거리에 해당한다.

[0068] 노드 1의 전압(V_1)은 $V_1 = -V_{Max}$로 할당된다.

[0069] 도 4(b)의 J-V 곡선으로부터 Vmax는 710 mV이고, 랩-스케일 CIGS 태양전지의 전압 값은 0 부터 V_{OC}(= 711 mV)이

다.

[0070] n+1 노드의 전압(V_{n+1})은 메탈콘택의 전압과 일치하므로, V_{n+1} = 0 V가 된다. 인접한 노드끼리의 전압 차이(V_{k+1} - V_k)는 ΔV로 나타내며, 본 발명에서는 ΔV = 10 mV이다. 이는 랩-스케일 CIGS 태양전지의 *J-V* 값을 측정할 경우, 전압 간극의 차이가 10 mV을 의미한다. 따라서, k 번째 전압 값은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

[0071] $$V_k = -V_{Max} + (k-1)\Delta V \text{ for } 1 \le k \le n+1,\ n = \frac{V_{Max}}{\Delta V} \ (n = 71 \text{ for the } J\text{-}V \text{ data of Fig. 4b})$$

[0072] 이를 통해, J_{CIGSK}-V_K에서 J_{CIGSK}를 구할 수 있다(도 4(c)). 주의할 점은, 각각의 마이크로-전지들은 동일한 사이즈가 아니다. $-V_{OC} < V_{CdS} < -V_{max}$ 영역에서의 영향은 무시할 수 있는데, 이는 이 범위에서 전압 변화량(10 mV 미만)이 Vmax(= 710 mV)와 비교하여 무시할 수 있을 정도로 값이 작기 때문이다(도 4(b)).

[0074] **등가회로 분석**

[0075] 등가회로를 이용하여 CdS 층의 면저항 값에 따른, i_{LP} 값의 변화를 구하기 위하여 다음 과정을 수행하였다.

[0076] 랩-스케일 CIGS 태양전지의 *J-V* 곡선에서 점(point)이 주어지면, V_{Max}, ΔV, n(=$V_{Max}/\Delta V$) 및 J_{CIGSK}-V_K를 구할 수 있다($1 \le k \le n+1$).

[0077] 먼저, Δx_1 및 i_1을 구한다.

[0078] $$i_1 = i_{CIGS1}, i_{CIGS1} = J_{CIGS1} W \Delta x_1,\ i_1 R_1 = V_2 - V_1 = \Delta V,\ and\ R_1 = R_{S(CdS)} \frac{\Delta x_1}{W} \quad (1)$$

[0079] 방정식 (1)을 풀면, Δx_1 및 i_1은 아래와 같다.

[0080] $$\Delta x_1 = \sqrt{\frac{\Delta V}{J_{CIGS1} R_{S(CdS)}}} \qquad (2a)$$

[0081] $$i_1 = J_{CIGS1} W \Delta x_1 = W \sqrt{\frac{J_{CIGS1} \Delta V}{R_{S(CdS)}}} \quad (2b)$$

[0082] 도 4(c)를 보면, J_{CIGS1}은 J_{CIGSK}-V_k로부터 구할 수 있다.

[0083] 이후, Δx_2 및 i_2을 구한다.

[0084] $$i_2 = i_1 + i_{CIGS2},\ i_{CIGS2} = J_{CIGS2} W \Delta x_2, i_2 R_2 = \Delta V,\ and\ R_2 = R_{S(CdS)} \frac{\Delta x_2}{W} \qquad (3)$$

[0085] 방정식 (3)을 풀면, Δx_2 및 i_2은 아래와 같다.

[0086] $$\Delta x_2 = \frac{-i_1 R_{S(CdS)} + \sqrt{(i_1 R_{S(CdS)})^2 + 4 J_{CIGS2} R_{S(CdS)} \Delta V W^2}}{2 J_{CIGS2} R_{S(CdS)} W} \qquad (4a)$$

[0087] $$i_2 = i_1 + J_{CIGS2} W \Delta x_2 = i_1 + \frac{-i_1 R_{S(CdS)} + \sqrt{(i_1 R_{S(CdS)})^2 + 4 J_{CIGS2} R_{S(CdS)} \Delta V W^2}}{2 R_{S(CdS)}} \qquad (4b)$$

[0088] J_{CIGS2}은 J_{CIGSK}-V_k로부터 구할 수 있다.

[0089] 연속적으로 방정식을 구해 나가면, *k* 노드에서 R_k를 구할 수 있다.

[0090] $$i_k = i_{k-1} + i_{CIGSk}, i_{CIGSk} = J_{CIGSk} W \Delta x_k, i_k R_k = \Delta V,\ and\ R_k = R_{S(CdS)} \frac{\Delta x_k}{W} \quad (5)$$

[0091] 방정식 (5)를 풀면 Δx_k 및 i_k은 다음과 같다.

[0092]
$$\Delta x_k = \frac{-i_{k-1}R_{S(CdS)} + \sqrt{(i_{k-1}R_{S(CdS)})^2 + 4J_{CIGSk}R_{S(CdS)}\Delta VW^2}}{2J_{CIGSk}R_{S(CdS)}W} \qquad (6a)$$

[0093]
$$i_k = i_{k-1} + J_{CIGSk}W\Delta x_k = i_{k-1} + \frac{-i_{k-1}R_{S(CdS)} + \sqrt{(i_{k-1}R_{S(CdS)})^2 + 4J_{CIGSk}R_{S(CdS)}\Delta VW^2}}{2R_{S(CdS)}} \qquad (6b)$$

[0094] J_{CIGSk}은 J_{CIGSK}-V_k로부터 구할 수 있다.

[0095] CdS 층의 가변 면저항 기능으로서, i_{LP}(i_{LP} = i_n) 및 $L_{LC(EC)}$(= $\sum_{k=1}^{k=n}\Delta x_k$) 값을 노드 n 및 R_n을 구할 때까지 위의 식을 반복하여 구할 수 있다.

[0096] i_{LP}와 W가 선형적으로 비례한다는 것을 직관적으로 알 수 있다(도 2(a)). 따라서, J_{LP}(= i_{LP}/W) 및 $R_{S(CdS)}$사이의 관계를 보여줄 수 있다. 도 5(a)는 $R_{S(CdS)}$, J_{LP} 및 $L_{LE(EC)}$를 구하는 과정을 나타낸 흐름도이다. 도 5(b)는 $R_{S(CdS)}$ 및 J_{LP}의 수학적 관계를 나타낸 그래프이며, 이는 도 4(b)의 CIGS 태양전지에서 J-V 데이터에 기초한 등가회로 분석으로부터 얻어진 것이다.

[0097] 도 5(b)에 log($R_{S(CdS)}$)-log(J_{LP})의 수학적 관계를 그래프로 나타내었고, 기울기는 -2로 측정되었다. 즉 $R_{S(CdS)}$는 J_{LP}의 역수 제곱에 비례함을 알 수 있다.

[0099] **근사 수학식 유도**

[0100] 등가회로 분석을 통해, CdS의 면저항($R_{S(CdS)}$)을 구할 수 있지만, 특성 파라미터(parameter)를 측정하기 위해, CdS의 면저항과 관계된 수학 공식을 구하는 것이 훨씬 더 편리하다.

[0101] 따라서, CdS의 면저항을 구하기 위해, 하기 가정을 통해 수학 공식을 유도하였다.

[0102] 도 6은 면저항($R_{S(CdS)}$)을 구하기 위한 수학 공식을 유도하기 위하여, 빛 조명 하에 단락 커스텀-디자인 전지에서 전류와 전압의 변화를 나타낸 도이다. 도 6을 보면, 커스텀-디자인 전지에서 메탈콘택으로부터 물리적 거리가 증가함에 따라 전류밀도가 J_{SC}에서 0 mA/cm^{2}로, J_{CIGS}가 점진적으로 감소한다(J_{CIGS}는 CIGS의 전류밀도, J_{SC}는 단락 전류밀도).

[0103] 그러나, 수학적 복잡성을 피하기 위해, 다음과 같은 가정을 하였다.

[0104]
$$J_{CIGS}(x) = J_{SC} \text{ for } 0 \le x < L_{LC(math)} \text{ and } J_{CIGS}(x) = 0 \text{ for } x \ge L_{LC(math)}$$

[0105] 이 가정은 필팩터(FF)가 100 %인 경우와 일치한다.

[0106] 근사 수학식은 아래의 경계조건(boundary condition)에 기초하여 유도되었다.

[0107] 경계조건:

[0108] 도 2(a) 및 도 6의 단락 커스텀-디자인 전지에서 빛 조명 하에,

[0109] (1) x = 0, x = $L_{LC(math)}$

[0110] (2) x 및 x + dx사이에서 i_{CdS} 및 V_{CdS}의 변화

[0111] 메탈콘택의 가장 앞쪽을 x = 0 이라 하고, A 영역(0 ≥ V_{CdS} ≥ -V_{OC})과 B 영역(V_{CdS} = -V_{OC}) 사이의 경계를 x = $L_{LC(math)}$라 하자. 아래의 경계조건을 구할 수 있다.

$$i_{CdS}(x=0) = i_{LP}, \text{and } V_{CdS}(x=0) = 0 \qquad (7a)$$

$$i_{CdS}\left(x = L_{LC(math)}\right) = 0, \text{and } V_{CdS}\left(x = L_{LC(math)}\right) = -V_{OC} \qquad (7b)$$

[0112]

[0113] x 와 x+dx 사이에서 i_{CdS}의 변화는 i_{CIGS}의 변화와 동일하다. 따라서 A 영역에서 $J_{CIGS}(x)$ = J_{SC} 가정하에, 아래 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$di_{CdS}(x) = -i_{CIGS}(x) = -J_{CIGS}(x)Wdx = -J_{SC}Wdx \qquad (8)$$

[0114]

[0115] x=0에서 x=x까지 방정식 (8)을 적분하면, 아래 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$i_{CdS}(x) = i_{LP} - J_{SC}Wx \quad (9)$$

[0116]

[0117] $L_{LC(math)}$를 x로 대체하면, 다음과 아래 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$L_{LC(math)} = \frac{(i_{LP}/W)}{J_{SC}} = \frac{J_{LP}}{J_{SC}} \qquad (10)$$

[0118]

[0119] CdS에서 IR 강하로 인한 x 및 x+dx 사이에서 CdS 층의 전압(V) 변화($dV_{CdS}(x)$)는 아래 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$dV_{CdS}(x) = -i_{CdS}(x)\frac{R_{S(CdS)}}{W}dx \quad (11)$$

[0120]

$\frac{R_{S(CdS)}}{W}dx$ 는 x 및 x+dx 사이에서 CdS를 따라 흐르는 저항값이다.

[0121]

[0122] 방정식 (11)에서 i_{CdS}를 i_{LP} - J_{SC}*W*x 로 대체(방정식 (9))하고, 방적식 (11)을 x=0에서 x까지 적분한 하면 아래 식 (12)를 얻을 수 있다.

$$V_{CdS}(x) = -J_{LP}R_{S(CdS)}x + \frac{1}{2}J_{SC}R_{S(CdS)}x^2 \quad (12)$$

[0123]

[0124] 방정식 (12)에서 x값에 $L_{LC(math)}$를 대입하면 아래 식 (13)을 얻을 수 있다. (∵ 방정식 (7)에서 V_{CdS}(x=0), V_{CdS}(x=$L_{LC(math)}$) = -V_{OC}).

$$V_{OC} = J_{LP}R_{S(CdS)}L_{LC(math)} - \frac{1}{2}J_{SC}R_{S(CdS)}L_{LC(math)}^{\ 2} \qquad (13)$$

[0125]

[0126] 방정식 (10)과 (13)을 결합하면, CdS의 면저항($R_{S(CdS)}$)을 구할 수 있는 방정식 (14)를 구할 수 있다.

$$R_{S(CdS)} = 2\frac{J_{SC}V_{OC}}{J_{LP}^{\ 2}} \qquad (14)$$

[0127]

[0128] J_{SC} 및 V_{OC}는 CIGS 태양전지로부터 측정될 수 있고, J_{LP}는 커스텀-디자인 전지로부터 측정될 수 있다.

[0130] **반경험적 공식(semiempirical formula) 유도**

[0131] 방정식 (14)는 $R_{S(CdS)}$, J_{SC}, V_{OC} 및 J_{LP}의 관계를 설명해주고, 도 (5)의 등가회로 분석에 의한 log($R_{S(CdS)}$) vs log(J_{LP})의 기울기가 -2임을 잘 설명한다.

[0132] 그러나, 방정식 (14)는 필팩터가 100%로 가정해야 한다는 점에서 문제가 있다. 따라서, 표준 CIGS 태양전지에서 필팩터를 고려하여, 아래와 같이 변형될 수 있다.

[0133] $$R_{S(CdS)} = f(FF) \times 2\frac{J_{SC}V_{OC}}{J_{LP}{}^2} \qquad (15)$$

[0134] $f(FF)$는 필팩터 값에 의존한다.

[0135] $R_{S(CdS)}$ vs $2\frac{J_{SC}V_{OC}}{J_{LP}{}^2}$ 의 기울기는 등가회로 분석에 의해 구해지므로, $f(FF)$의 값이 된다.

[0136] 도 7(a)는 필팩터 45~78% 범위에서 표준 CIGS 태양전지의 16개의 J-V 곡선을 보여준다. 16개의 J-V 곡선의 등가회로 분석으로부터 얻은 $R_{S(CdS)}$ vs $2\frac{J_{SC}V_{OC}}{J_{LP}{}^2}$ 의 기울기는 완전한 선형이다. $f(FF)$ 함수 그래프는 도 7(c)에 나타나 있고, 함수식은 아래와 같다.

[0137] $f(FF) \fallingdotseq 0.63FF + 0.43$

[0138] 위 필팩터의 함수값은 일 예이며, J-V 측정 및 이에 따른 등가회로 분석에 따라 필팩터의 함수값은 달라질 수 있다.

[0139] 앞서 구한 필팩터의 함수값을 방정식 (15)에 대입하면, 아래 식과 같다.

[0140] $$R_{S(CdS)} = (0.63FF + 0.43) \times 2\frac{J_{SC}V_{OC}}{J_{LP}{}^2} \text{ for } 0.45 < FF < 0.78 \quad (16)$$

[0141] 방정식 (16)은 등가회로 분석의 수학적 표현이므로, J-V 곡선의 필팩터의 범위가 $0.45 < FF < 0.78$이 아닐 경우, CdS의 면저항을 구하기 위해서는, 등가회로 분석을 사용할 수 있다.

[0143] **CIGS 장치의 면저항($R_{S(CdS)}$) 측정**

[0144] 4(b)에 의하면, 제조된 표준 CIGS 태양전지는 ZnO:Al/i-ZnO/CdS/CIGS/Mo 순으로 설계되어 있으며, 개방회로(open circuit)의 전압(V_{oc}) 711 mV, 단락(short circuit) 전류밀도(J_{SC}) 30.8 mA/cm^2, 충전율(fill factor, FF) 73.7%, 최대 전압 710 mV 및 전압 변화량(ΔV)은 10 mV이다.

[0145] 8개의 커스텀-디자인 전지에서 측정된 J_{LP} 값과 $R_{S(CdS)}$ 및 $L_{LC(EC)}$ 값을 아래 [표 1]에 나타냈다.

[0146] 측정된 J_{LP} 값은 3.59×10^{-3} ± 2.14×10^{-4} A/m (ave ± std), $R_{S(CdS)}$ 값은 등가회로 분석에 의해 측정된 값은 30.5 ± 0.37 Mohm/sq, 반경험적 공식에 의해 측정된 값은 30.7 ± 0.35 Mohm/sq으로 거의 동일하게 측정되었다.

[0147] $L_{LC(EC)}$ 값은 약 25 ㎛이고, 전하 운반체 포집 거리(charge carrier collection length)는 약 2 ㎛로 측정되었고, 광전류는 CdS/CIGS/Mo로 설계된 커스텀-디자인 전지에서 CdS 층을 따라 포집되는 것을 알 수 있다.

표 1

Custom-designed cell number	Measured J_{LP} (A/m)	Equivalent circuit analysis		Semiempirical formula (16)
		$L_{LC\ (EC)}$ (μm)	$R_{S(CdS)}$ (ohm/sq)	$R_{S(CdS)}$ (ohm/sq)
1	3.65×10^{-3}	25.2	2.92×10^{7}	2.94×10^{7}
2	3.88×10^{-3}	26.7	2.59×10^{7}	2.61×10^{7}
3	3.79×10^{-3}	26.1	2.71×10^{7}	2.73×10^{7}
4	3.29×10^{-3}	22.7	3.59×10^{7}	3.62×10^{7}
5	3.47×10^{-3}	23.9	3.23×10^{7}	3.25×10^{7}
6	3.62×10^{-3}	24.9	2.97×10^{7}	2.99×10^{7}
7	3.31×10^{-3}	22.8	3.55×10^{7}	3.57×10^{7}
8	3.71×10^{-3}	25.6	2.83×10^{7}	2.84×10^{7}
Ave	3.59×10^{-3}	24.7	3.05×10^{7}	3.07×10^{7}
Std	2.14×10^{-4}	1.5	3.73×10^{6}	3.75×10^{6}

[0148]

[0150] **CdS의 면저항을 측정하는 방법의 타당성**

[0151] CIGS 장치에서 CdS의 면저항을 측정하기 위한 도구로서, 측면 광전류법은 개조된 커스텀-디자인 전지에 적용되었다. 개조된 커스텀-디자인 전지는 ZnO:Al/i-ZnO/CdS/CIGS/Mo 순으로 적층되어 있으며(도 9(a)), 증착된 ZnO:Al 얇은 박막의 면저항을 측정하였다. 광전류는 CdS를 따라 흐르는 대신에, ZnO:Al 박막을 따라 흐르게 되어 있는데, 이는 4-포인트 프로브(4-point probe)에 의해 측정된 ZnO:Al 박막에서의 면저항(약 26 ohm/sq)이 CdS의 면저항(약 30 Mohm/sq) 보다 훨씬 작기 때문이다. 따라서, 측면 광전류법은 개조된 커스텀-디자인 전지에서 ZnO:Al 박막의 면저항을 제공한다. 이 경우, 개조된 커스텀-디자인 전지의 길이(L)는 25 mm보다 길게 유지시켰다. 이는 $L_{LC(EC)}$가 약 25 mm로 추정되었기 때문이다. 측정된 측면 광전류의 전류밀도는 아래 [표 2]에 요약되어 있으며, 3.82±0.10 A/m(ave ± std)이다. 이후, ZnO:Al 박막에서의 면저항이 26.7±1.4 ohm/sq 및 26.8±1.4 ohm/sq이 각각 등가회로 분석 및 반경험적 공식에 의해 측정되었다(도 9(b)). 이 값들은 4-포인트 프로브에 의해 측정된 ZnO:Al 박막에서의 면저항 값 25.5±0.5 ohm/sq과 매우 유사하다.

표 2

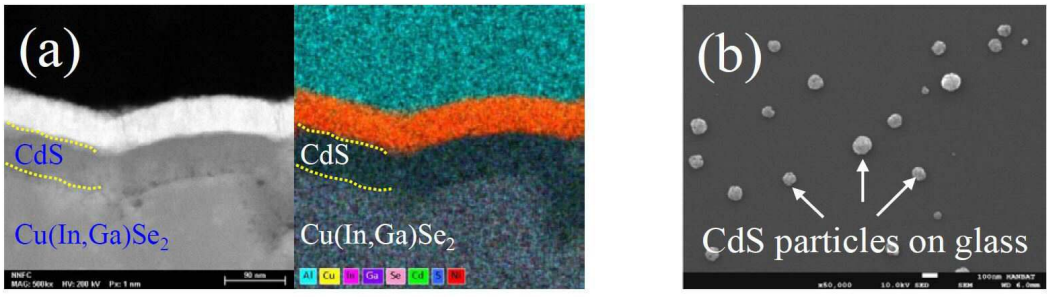
Modified Custom-designed cell number	Measured J_{LP}(A/m)	$R_{S(ZnO:Al)}$ (ohm/sq)	
		Equivalent circuit	Semiempirical formula (16)
1	3.90	25.6	25.8
2	3.68	28.8	28.9
3	3.78	27.2	27.4
4	3.96	24.8	25.0
5	3.91	25.5	25.6
6	3.73	28.0	28.2
7	3.84	26.4	26.6
8	3.79	27.1	27.3
Ave	3.82	26.7	26.8
Std	0.10	1.4	1.4

[0153]

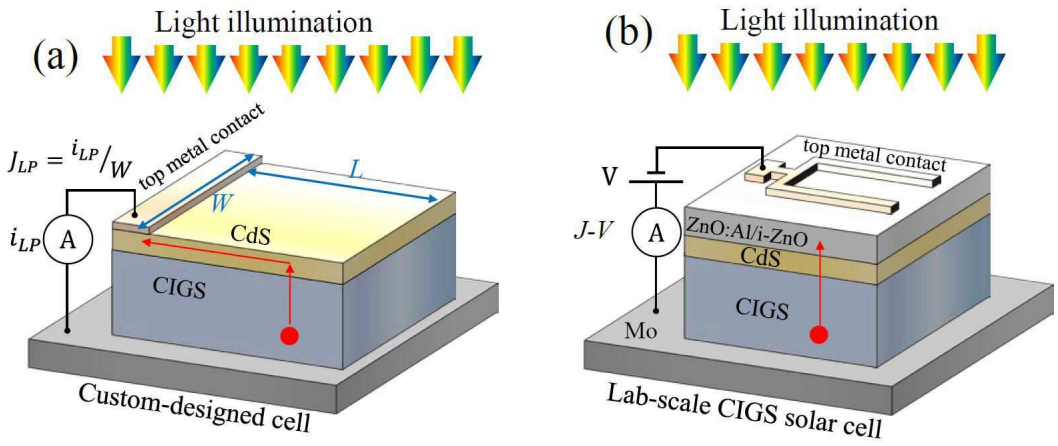
[0155] 이상, 본 발명내용의 특정한 부분을 상세히 기술하였는바, 당업계의 통상의 지식을 가진 자에게 있어서, 이러한 구체적인 기술은 단지 바람직한 실시양태일 뿐이며, 이에 의해 본 발명의 범위가 제한되는 것이 아닌 점은 명백할 것이다. 따라서 본 발명의 실질적인 범위는 첨부된 청구항들과 그것들의 등가물에 의해 정의된다고 할 것이다.

도면

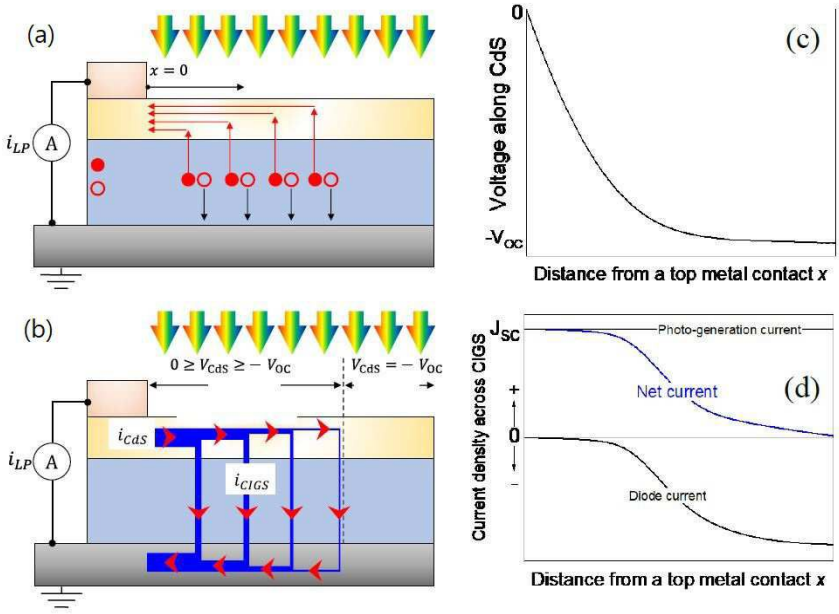
도면1



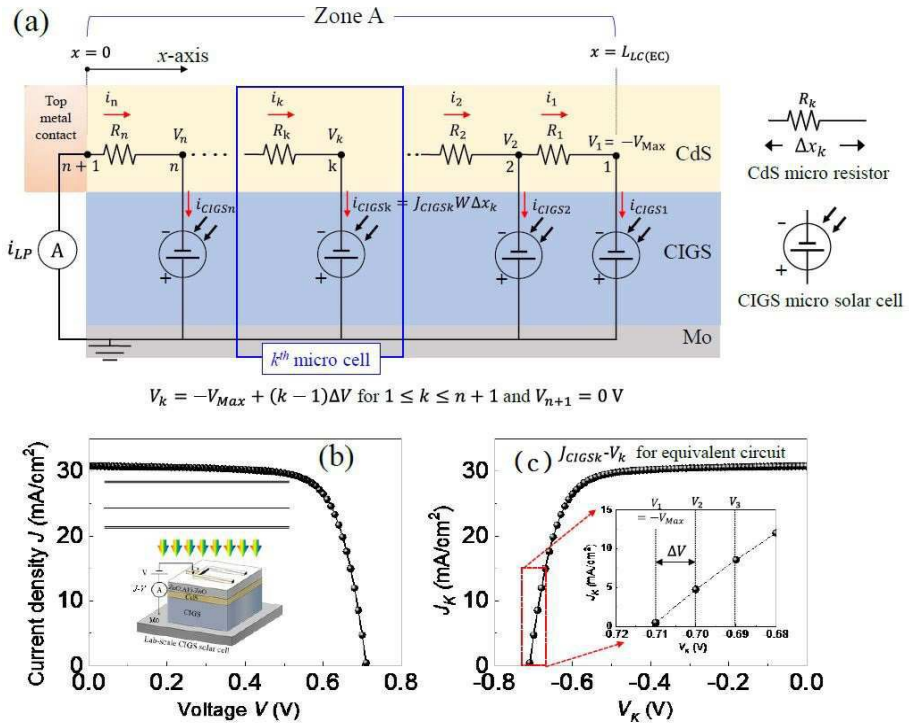
도면2


(a)
Light illumination
$J_{LP} = i_{LP}/W$
top metal contact
L
W
CdS
CIGS
i_{LP}
A
Custom-designed cell
(b)
Light illumination
V
J-V
A
top metal contact
ZnO:Al/i-ZnO
CdS
CIGS
Mo
Lab-scale CIGS solar cell

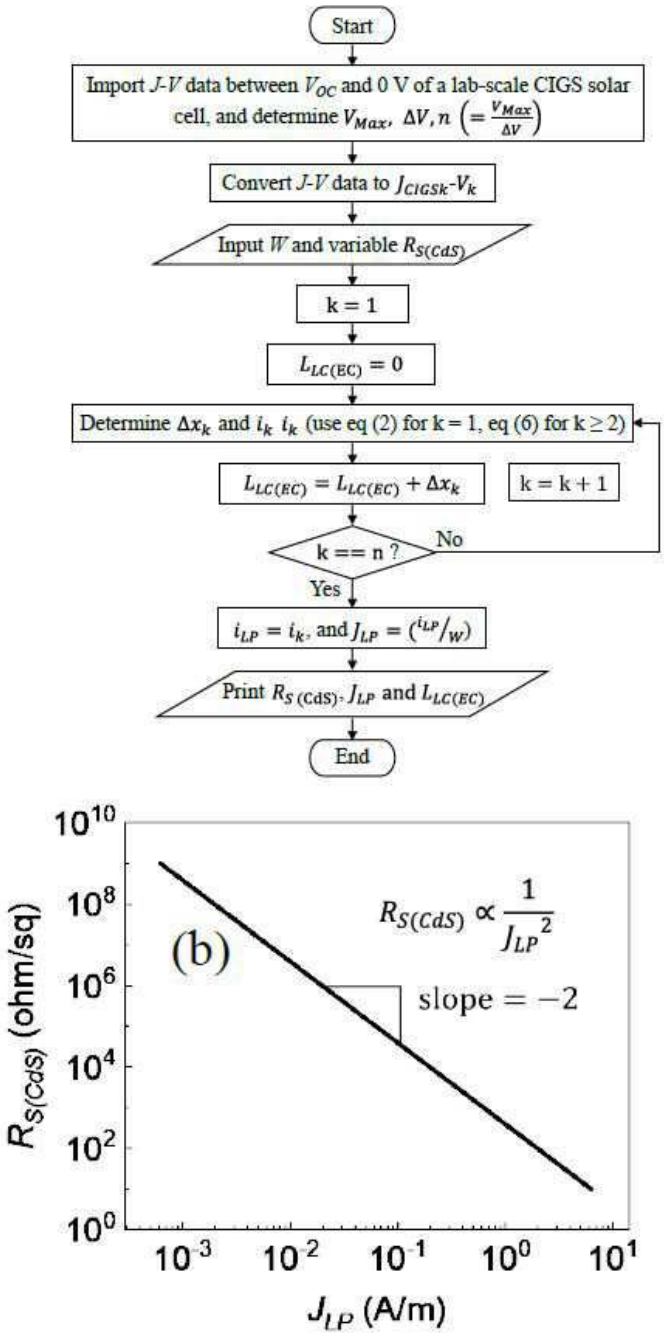
도면3


(a)
$x = 0$
i_{LP}
A
(b)
$0 \geq V_{CdS} \geq -V_{OC}$
$V_{CdS} = -V_{OC}$
i_{CdS}
i_{CIGS}
i_{LP}
A
(c)
0
Voltage along CdS
$-V_{OC}$
Distance from a top metal contact x
(d)
J_{SC}
Photo-generation current
Net current
+
0
−
Diode current
Current density across CIGS
Distance from a top metal contact x

도면4

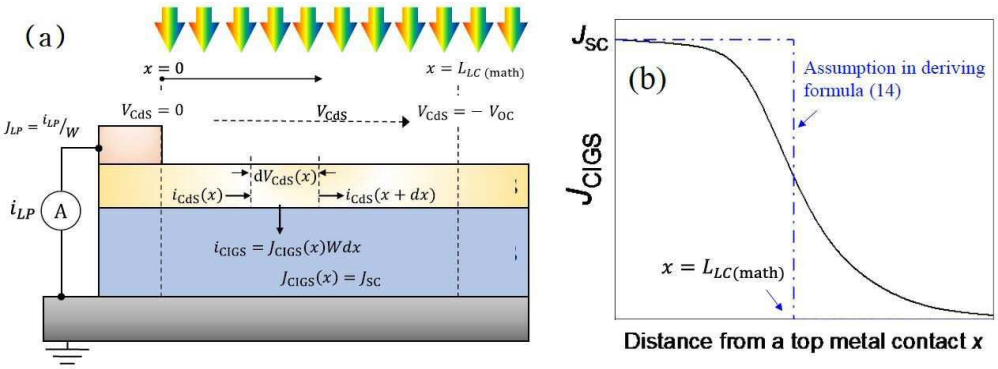

(a)
Zone A
x = 0
x-axis
x = L_LC(EC)
Top metal contact
CdS
CIGS
Mo
k^th micro cell
i_LP
A
CdS micro resistor
CIGS micro solar cell
V_k = −V_Max + (k − 1)ΔV for 1 ≤ k ≤ n + 1 and V_n+1 = 0 V
(b)
Current density J (mA/cm²)
Voltage V (V)
(c) J_CIGSk-V_k for equivalent circuit
J_K (mA/cm²)
V_K (V)
ΔV

도면5

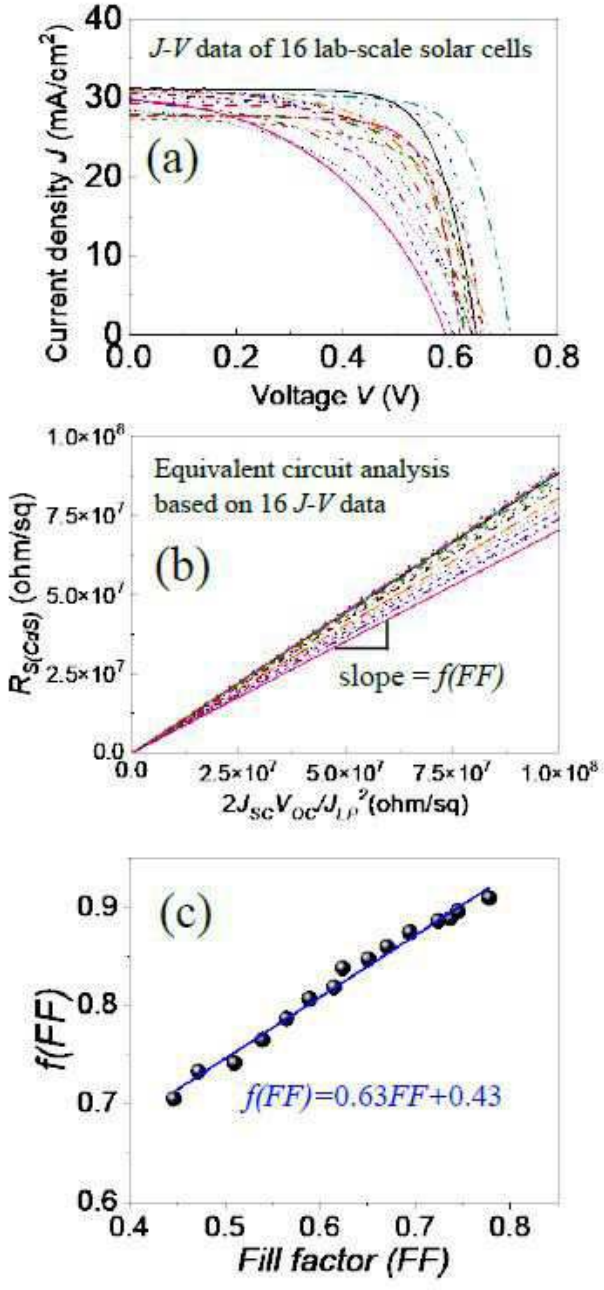

Start
Import J-V data between V_{OC} and 0 V of a lab-scale CIGS solar cell, and determine V_{Max}, ΔV, $n\ \left(=\frac{V_{Max}}{\Delta V}\right)$
Convert J-V data to J_{CIGSk}-V_k
Input W and variable $R_{S(CdS)}$
k = 1
$L_{LC(EC)} = 0$
Determine Δx_k and i_k i_k (use eq (2) for k = 1, eq (6) for k ≥ 2)
$L_{LC(EC)} = L_{LC(EC)} + \Delta x_k$
k = k + 1
k == n ?
No
Yes
$i_{LP} = i_k$, and $J_{LP} = (^{i_{LP}}/_{W})$
Print $R_{S\ (CdS)}$, J_{LP} and $L_{LC(EC)}$
End

(b)
$R_{S(CdS)} \propto \frac{1}{J_{LP}^2}$
slope = −2
$R_{S(CdS)}$ (ohm/sq)
J_{LP} (A/m)
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{4}
10^{2}
10^{0}
10^{-3}
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}

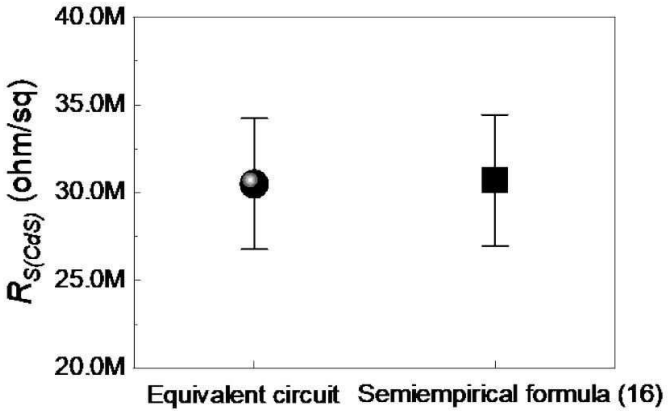
도면6


(a)
x = 0
x = L_LC (math)
V_Cds = 0
V_Cds
V_Cds = − V_OC
J_LP = i_LP / W
i_LP
A
dV_Cds(x)
i_Cds(x)
i_Cds(x + dx)
i_CIGS = J_CIGS(x)Wdx
J_CIGS(x) = J_SC
J_SC
J_CIGS
(b)
Assumption in deriving formula (14)
x = L_LC(math)
Distance from a top metal contact x

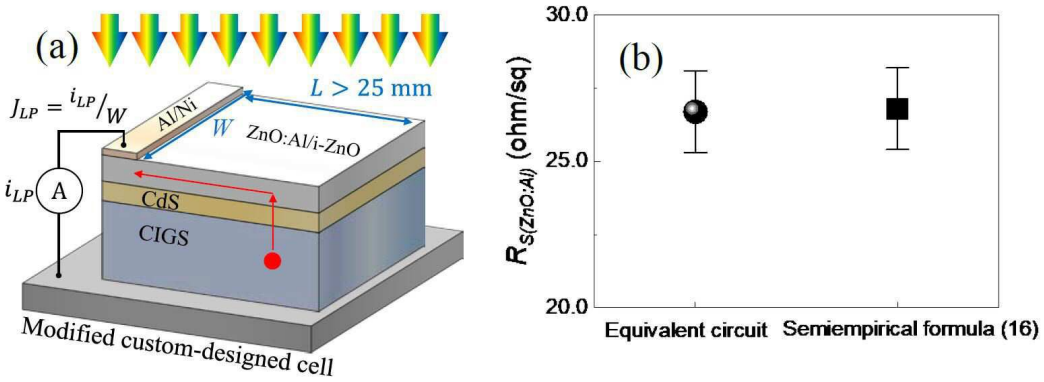
도면7


J-V data of 16 lab-scale solar cells
(a)
Current density J (mA/cm²)
Voltage V (V)
Equivalent circuit analysis based on 16 J-V data
(b)
slope = f(FF)
R_S(cas) (ohm/sq)
2J_SC V_OC / J_LP² (ohm/sq)
(c)
f(FF)=0.63FF+0.43
f(FF)
Fill factor (FF)

도면8


40.0M
35.0M
30.0M
25.0M
20.0M
$R_{S(CdS)}$ (ohm/sq)
Equivalent circuit
Semiempirical formula (16)

도면9


(a)
$J_{LP} = i_{LP}/W$
Al/Ni
$L > 25$ mm
W
ZnO:Al/i-ZnO
i_{LP}
A
CdS
CIGS
Modified custom-designed cell
(b)
30.0
25.0
20.0
$R_{S(ZnO:Al)}$ (ohm/sq)
Equivalent circuit
Semiempirical formula (16)