

전하밀도파 이론으로 결정질 태양전지의 입사각에 따른 단락전류밀도 변화 연구

서일원* · 구제환 · 윤명수 · 조태훈 · 이원영 · 조광섭 · 권기청[†]

광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

(2013년 5월 8일 받음, 2013년 6월 18일 수정, 2013년 6월 26일 확정)

광 입사각에 따른 태양전지의 양자효율을 전류의 출력으로 변환시켜 측정하였다. 기존의 태양전지의 원리는 태양전지가 태양광을 받았을 때 전자와 전공으로 분리되어 전류가 흐르게 된다는 것이었다. 그렇지만 저자들 중에 일부가 얼마 전에 태양전지원리를 새롭게 주장한 바 있다. 그 이론은 전하밀도파(charge density wave)들이 고정(pinning) 되었을 때, 이 고정 전위벽(pinning potential barrier)을 태양 광에 의해 넘을 수 있어서 전자 덩어리에 의한 전류 즉 단락전류(I_{sc})가 가능하다는 것이었다. 본 실험에서는 태양광의 입사각에 따른 태양전지의 단락전류밀도 (J_{sc})를 측정하여 비교해본 결과 측정값들과 전하밀도파 이론과 매우 일치함을 보인다.

주제어 : 태양전지, 전하밀도파, 단락전류밀도, 양자효율, 입사각

I. 서 론

태양전지는 오래 전에 개발되었지만 최근에 무소음 무공해의 녹색에너지원이라는 점과 계속되는 유가상승으로 인해 더욱 각광받고 있다. 더욱이 탄소 배출규제법 시행에 따라 각국 정부의 지원정책과 맞물려 그 시장규모가 폭발적으로 확대될 전망이다. 하지만 태양전지의 발전단계는 화력이나 원자력 등에 비하여 월등히 높기 때문에 현재까지도 고효율 결정질 실리콘 태양전지를 개발하기 위한 다양한 연구개발이 수행되고 있다 [1,2].

태양전지는 태양광을 받아서 전력으로 생산하는 반도체 소자로서, 개방전압(V_{oc}), 단락전류(J_{sc}), 곡선인자(FF), 변환효율(Conversion efficiency) 등의 지표가 태양전지의 성능을 결정하여 주는 주요 인자이다. 그중에서 우리가 측정한 양자효율(QE: Quantum efficiency)은 태양전지에 의해 수집되는 캐리어 수의 비를 의미하며, 입사되는 광자의 파장 또는 태양전지 전류의 함수로 주어진다 [3,4].

태양광 발전 시스템 중에서 건물 일체형 태양전지(BIPV: Building Integrated Photovoltaic System)의 경우 태양전지 설치를 위한 별도의 공간이 필요 없이 건물 외부나 벽면들에 설치하는 장점이 있다. 하지만 태양전지의 설치면이 고정되어 있어 입사각에 따른 태양전지의 손실이 불가피하다. 주된 입사각에 따른 손실은 입사광의 세기와 표면

의 반사율이다. 반면에 실리콘 태양전지에서 표면의 반사율은 표면 텍스처(Surface texture)와 반사방지막(Anti-reflection-coating)을 사용하여 저감시킬 수 있다. 그러한 입사각에 따른 손실은 측정을 통해 확인하고, 띠 이론과 측정결과와 비교 분석 한다. 가전자(Valence) 띠의 전자들이 전도(Conduction) 띠로 태양 광의 에너지를 받아 전이하면서 가전자 띠에는 정공 등이 형성되고 전이한 전도전자들은 전류를 흐르게 된다. 또 다른 설명으로는 전하밀도파(Charge density wave)들이 고정(Pinning) 되었을 때 이 고정전위장벽(Pinning potential barrier)를 태양광에 의해 넘어서 태양전류가 가능하다는 것이다 [5].

본 실험에서는 태양광의 입사각을 조절해서 태양전지의 단락전류(J_{sc}) 값을 측정하고, 이를 전자 덩어리 모델과 비교한다. 또한 본 실험은 입사각에 따라서 단순히 방사조도(Irradiance) 변화로만 볼 수 있지만 다른 시각으로 입사각의 따른 입사단면적이 동일하다고 근사 하면 광자에너지 변화를 방사조도(Irradiance) 변화로 동시에 볼 수도 있다.

II. 실험방법

본 연구에서는 Fig. 1의 구조를 가지는 광 입사각에 따른 양자효율 측정장치(Angular quantum efficiency meas-

* [전자우편] iw411@naver.com

[†] [전자우편] gckwon@kw.ac.kr

urement system)를 사용하였다. 이 장치에서 광원은 2개 (Dual)로 단파장영역에서는 Xe lamp를 사용하였으며, 장파장영역에서는 Halogen lamp를 사용하였다. 또한 광원을 Optical chopper로 DC광원을 AC광원으로 변환하고, 분광기(Monochromator)를 이용하여 광원을 10 nm 이하의 파장간격으로 단색화하여 태양전지의 조사하였다. 광원이 조사된 태양전지는 전류를 생성하고, 생성된 전류는 변압기(Transformer)를 지나서 DC noise (잡음)을 제거한다. 그리고 변압기를 지난 전류는 로크인 증폭기(Lock-in Amplifier)를 통해 잡음을 제거한 SR (Spectral response)를 측정하여 이를 양자효율로 변환하였다. 이후 파장에 따

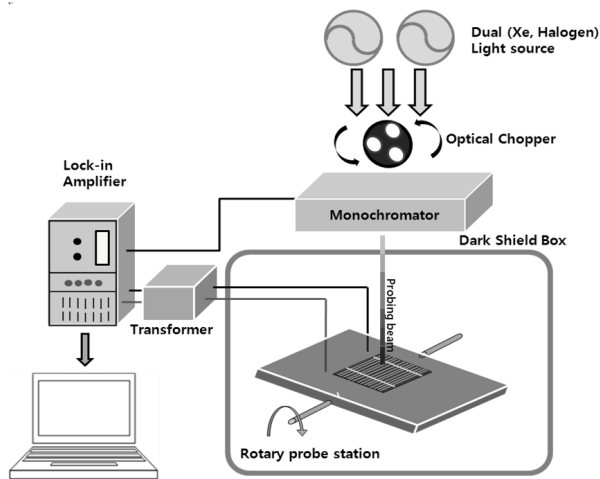


Figure 1. Angular quantum efficiency measurement system.

른 양자효율을 이용하여 전류밀도(mA/cm^2)로 환산하였다. 측정온도는 표준시험조건(STC: Standard Test Condition)인 25°C 에서 측정하였으며, 입사각의 따른 양자효율을 측정하기 위해 6 inch ($156 \times 156 \text{ mm}$) 크기 이하의 태양전지를 장착할 수 있고, 또한 태양전지 수직축(Z축)과 입사광의 각도로 10도 간격 회전하는 프로브 시료대(Rotary probe station)을 제작하였다.

Fig. 2는 고효율 HIT (Heterojunction Intrinsic Thin layer) 태양전지, RIE 텍스처 표면처리(RIE surface texturing)가 된 다결정(Multi-crystalline) 실리콘 태양전지, 습식 텍스처 표면처리(Wet surface texturing)가 된 다결정 실리콘 태양전지 등 3가지 종류의 태양전지의 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope) 이미지로써 측정한 태양전지의 표면 구조를 보여준다. 제작한 프로브 시료대를 이용하여 위 3가지 종류의 결정질 태양전지를 ($0 \sim 70^\circ$) 간격으로 변화시키면서 입사각에 따른 양자효율을 측정하였다. 그 이후 태양광의 입사각에 따른 양자효율 측정결과를

$$J_{sc} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} EQE(\lambda) \cdot \frac{q\lambda}{hc} \cdot E_{AM1.5G}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

식 (1)을 이용하여 단락전류밀도로 환산 하였다. 환산한 결과는 이론으로 계산된 Data와 비교 분석 하였다. 여기서 λ_1 은 처음 시작하는 파장, λ_2 는 마지막 파장, q 는 전하량, h 는 플랑크상수, c 는 진공상태에서의 빛의 속도, $E_{AM1.5G}$ 는 광의 방사조도이다.

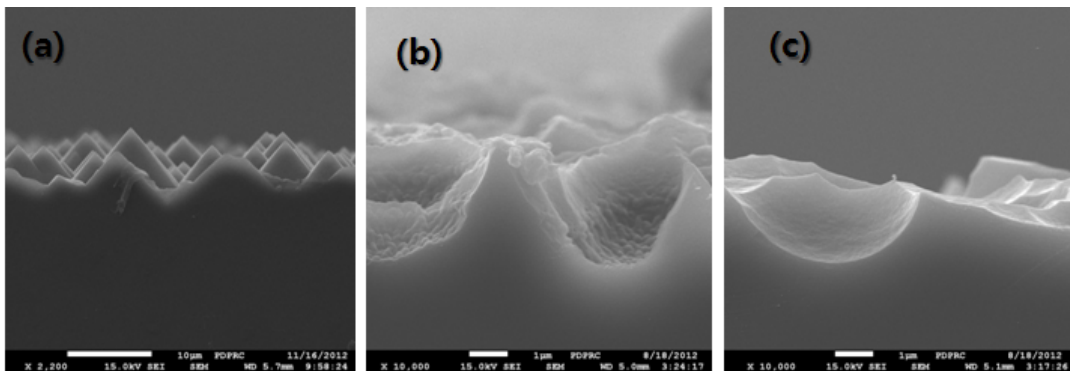


Figure 2. SEM image: (a) Side view of wafer surface by HIT (Heterojunction Intrinsic Thin layer) solar cell, (b) Side view of wafer surface by RIE textured mc-Si solar cell, (c) Side view of wafer surface by wet textured mc-Si solar cell.

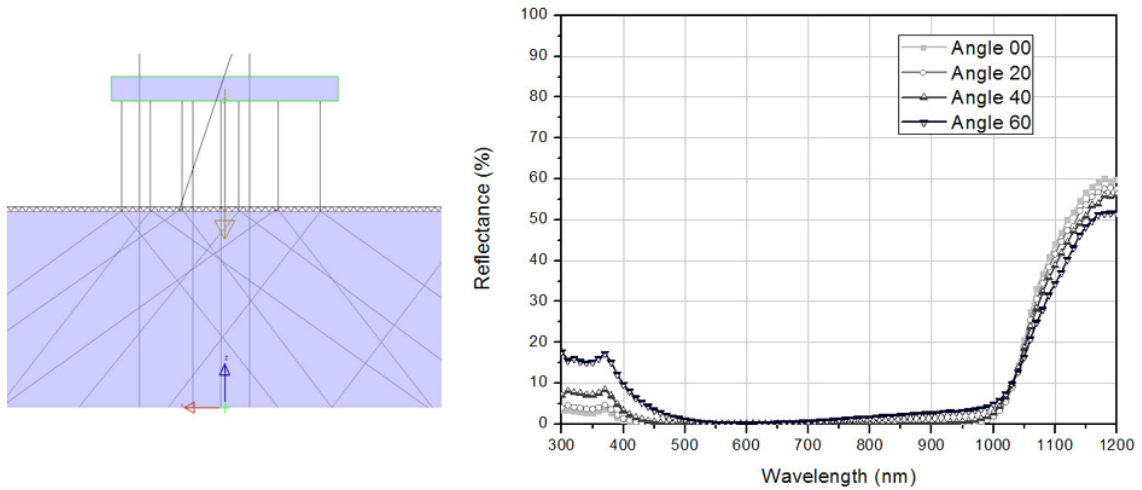


Figure 3. Reflectance simulation for HIT solar cell by light tool.

또한 Fig. 3은 단결정 실리콘 태양전지의 입사각별 반사율을 Light tool을 이용하여 simulation하였다. 이는 태양전지의 표면 텍스처에 따른 반사율로 다결정 실리콘 태양전지에서는 추후에 진행할 예정이다.

III. 이론연구

전자 덩어리 모델 [5]에 의한 전류밀도는 다음과 같다.

$$J = J_0 \left[\tan \left(t\beta \frac{eV - eV_T}{\hbar} + \tan \left(t\beta \frac{eV_T}{\hbar} \right) \right) \right] \quad (2)$$

여기서 β 는 Matsubara constant [6]이고 t 는 시간 변수이고, e 는 전자의 전하량, V 는 인가전압이고, eV_T 는 고정전위장벽이고, \hbar 는 플랑크 상수 h 를 2π 로 나눈 값이고, J_0 는 암흑전류밀도(Dark current density) 이다. 외부 영향을 받더라도 태양전지 내부의 전자 수는 일정하므로 따라서 페르미-디랙 분포 함수로 전자의 밀도를 계산하면 다음과 같다.

$$n(\varepsilon) = \int_0^\infty f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

전자기장 등 외부 변수가 없을 때 전자밀도 분포는

$$\begin{aligned} \int_0^\infty f(\varepsilon) d\varepsilon &= \int_0^\infty \frac{d\varepsilon}{1 + \exp \frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{k_B T}} \\ &= k_B T \ln \left[1 + \exp \frac{\varepsilon_F}{k_B T} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

전자기장 등 외부 변수가 있을 때 전자밀도 분포는

$$\begin{aligned} \int_0^\infty f(\varepsilon) d\varepsilon &= \int_0^\infty \frac{d\varepsilon}{1 + \exp \frac{\varepsilon \pm \mu_B H \pm eV \pm h\nu - \varepsilon_F}{k_B T_{eff}}} \\ &= k_B T_{eff} \ln \left[1 + \exp \frac{\pm \mu_B H \pm eV \pm h\nu - \varepsilon_F}{k_B T_{eff}} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

전자기장 등 외부변수가 있을 경우와 없는 경우 등 어떤 환경에도 동일한 전자수를 가져야 하므로 수식 (4)과 수식(5)는 같아야 한다. 따라서,

$$k_B T_{eff} = k_B T \pm \beta_H \mu_B H \pm \beta_E eV \pm \beta_\nu h\nu \quad (6)$$

가 된다.

여기서 $\beta_H, \beta_E, \beta_\nu$ 는 각각 자기장, 전기장, 광자에너지의 Matsubara constant이고, k_B 는 볼츠만 상수이고, T 는 온도이고, μ_B 는 Bohr magneton이고 H 는 자기장이고 ν 는 외부에서 인가되는 광자에너지에 해당하는 주파수이고 ε_F 는 페르미 레벨이고 $f(\varepsilon)$ 는 페르미-디랙 분포 함수이다.

또한 T_{eff} 는 환경의 변화에 따른 유효 온도이다. 그리고 주파수를 고려해서 식 (2)을 적분하면 유효 전류밀도는 아래와 같다.

$$J_{eff}(V) = \frac{J_0 \hbar}{(\nu_{max} - \nu_{min}) h \beta t \frac{\beta_\nu}{\beta_E}} \times \left[\ln \left\{ \cos \left(\beta \frac{e(V + \frac{\beta_\nu h \nu_{max}}{\beta_E e}) - e V_{Tt}}{\hbar} \right) \right\} - \ln \left\{ \cos \left(\beta \frac{e(V + \frac{\beta_\nu h \nu_{min}}{\beta_E e}) - e V_{Tt}}{\hbar} \right) \right\} \right] + J_0 \tan \left(\beta \frac{e V_{Tt}}{\hbar} \right) \quad (7)$$

여기서 ν_{max} (ν_{min})는 외부에서 인가되는 광자에너지에 최고(최저) 입사 태양광의 주파수이다. 입사각에 따른 광자에너지의 변화는 입사각이 0도 일 때 $h\nu$ 이고, 입사각 θ 가 변하면 광자에너지는 $h\nu \cos \theta$ 로 변한다.

그러면 전압을 인가하지 않은 상태($V=0$)에서 태양광의 입사각에 따른 총 전류 밀도는

$$J_{total}(\theta) = \frac{\hat{J}}{\cos \theta} \times \left[\ln \left\{ \cos \left(\hat{\nu}_{max} \cos \theta - e \hat{V}_T \right) \right\} - \ln \left\{ \cos \left(\hat{\nu}_{min} \cos \theta - e \hat{V}_T \right) \right\} \right] + J_0 \tan(e \hat{V}_T) \quad (8)$$

여기서 $\hat{J} = \frac{J_0 \hbar}{(\nu_{max} - \nu_{min}) h \beta t \frac{\beta_\nu}{\beta_E}}$ 이고,

$$\hat{\nu}_{max} = \frac{\beta t}{\hbar} \left(\frac{\beta_\nu}{\beta_E} h \nu_{max} \right)$$

$$\hat{\nu}_{min} = \frac{\beta t}{\hbar} \left(\frac{\beta_\nu}{\beta_E} h \nu_{min} \right)$$

$$e \hat{V}_T = \frac{\beta t}{\hbar} e V_T$$

이다.

또한, 태양전지판 표면을 x-y 평면 축으로 보고 태양광과 z축의 사이 각을 θ 로 두었다. 그리고 결정질 태양전지 3개의 샘플에 대해 측정을 통해 얻어진 양자효율의 대한

단락 전류밀도와 전하밀도파 이론인 식 (8)을 수학적 계산 프로그램인 Mathematica를 이용하여 피팅하였다.

IV. 실험결과 및 고찰

본 실험에서 입사각에 따른 입사단면적이 동일하다고 가정하였을 때 광자에너지 변화를 방사조도(irradiance)의 변화로 볼 수 있다. 실험결과로 Table 1에서 보여준 바와 같이 태양전지의 단락전류(J_{sc})는 입사 광량이 0도인 임계각도(Critical angle)에서 방향이 바뀐다. 이는 암흑전류(Dark current)가 우리의 실험에 사용된 태양전지에서 최대 0.1~0.5 mA/cm²임을 감안할 때 암흑전류에 의해 전류의 방향이 바뀐다고 볼 수 있다. 실제 Fig. 4~6에서는 이론치가 임계각도에서 $\sim(0.1\sim0.01)$ mA/cm² 정도로 계산되므로 이는 충분히 암흑전류에 의해 상쇄될 수 있는 양이다. Fig. 4~6에서 작은 각도들에서 실험치하고 이론치간에 약간의 차이가 있는 가장 큰 이유로는 입사하는 태양광의 퍼짐 현상이고 또한 태양전지표면이 불균일하여 일어날 수 있다. 본 실험에서는 로크인 증폭기(lock in amplifier)를 사용해서 측정하였는데 실험적으로는 특정각도를 확인하는 것은 표면 구조 특성상 많이 어렵다. 특히 Table 1에서 같이 특정각도가 80~84도였는데 이는 통계적으로 82 ± 2 도로 분석이 가능하다. 따라서 후속실험에서 82도 부근에서 모든 결정질 태양전지가 전류의 방향이 바뀌는 보편적인 경향이 있는 지는 확인해 볼 필요가 있다. 또 다른 설명으로는 전자 덩어리 모델에서 찾을 수 있다.

전자 덩어리의 고정전위장벽을 Soliton같이 경계벽(Di-scommensuration) [7]으로 보는 경우에 82도 부근에서 경계벽의 방향이 바뀔 수 있다면 특정각의 원인으로 들 수 있

Table 1. Critical angles are calculated when solar currents become zero.

Sample	Critical angle (°)
HIT (Heterojunction Intrinsic Thin layer) solar cell	83
Crystalline silicon solar cell with RIE surface texturing	80
Crystalline silicon solar cell with wet surface texturing	83

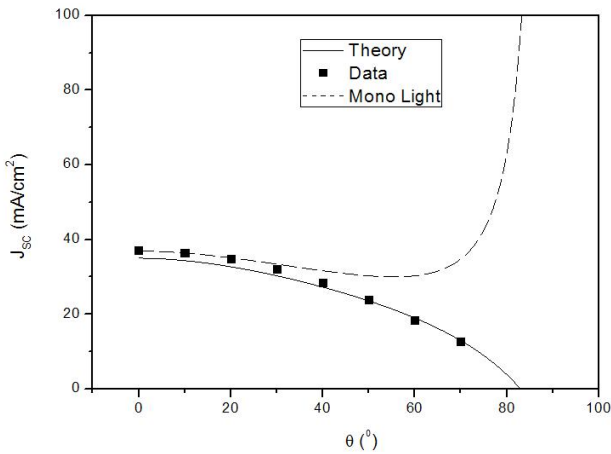


Figure 4. Measured short circuit current and theory are compared according to the incident angle of solar lights for HIT solar cell of crystalline silicon solar cells and same parameters given in Ref. [5].

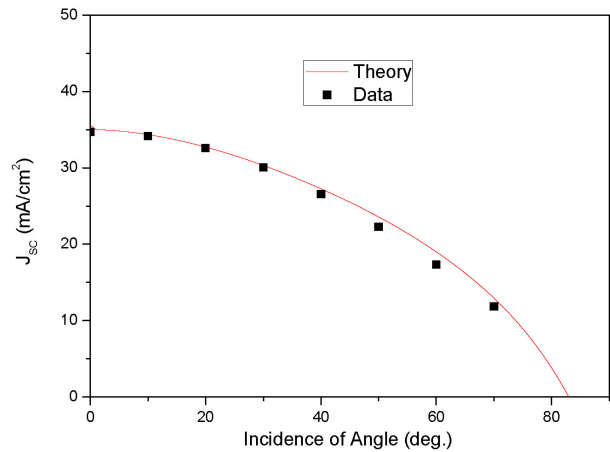


Figure 6. Measured short circuit current and theory are compared according to the incident angle of solar lights for crystalline silicon solar cell with Wet surface texturing.

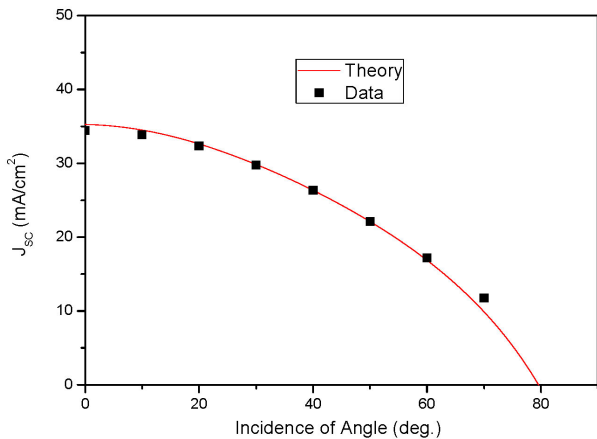


Figure 5. Measured short circuit current and theory are compared according to the incident angle of solar lights for crystalline silicon solar cell with RIE surface texturing.

다. 이는 마치 전위장벽(Potential barrier)를 벽으로 보고 물질이 벽을 어느 정도 쓰러뜨려 흐르다가 반대로 벽을 기울여 역으로 물질이 흐르는 경우로 비교될 수 있다. 전자 덩어리가 원래 1차원, 2차원 같은 저차원에서 중요시되었기 때문에 3차원으로 확장해서 적용한다 할지라도 방향성에 매우 민감하다고 추정할 수 있다. 임계각의 원인으로 암흑전류인지 경계벽인지여부는 추후 실험을 통해서 규명되어야 할 것이다. 암흑전류가 월등히 크거나 작은 샘플에서 본 실험을 하였을 때도 특정각이 82도 근처로 나오면 이는

암흑전류가 주 원인이 아닐 수 있다. 그리고 전하밀도파는 물질표면에 민감하다고 알려져 있으므로 태양전지표면을 비정상적이거나 특수처리해서 실험치가 본 실험값에 많이 벗어나면 특정각의 원인으로 전하밀도파내에서 찾아야 하고 더욱이 이는 경계벽이 강력한 요인이 되리라 추정된다. Fig. 4~6에서 참고문헌 [5]와 같이 $eV_T=1.11$ eV, $h\nu_{\min}=0.61$ eV, $h\nu_{\max}=2.01$ eV 그리고 $\beta t/\hbar=1/eV$ 로 두었다. 이 근거로는 eV_T 는 결정질 실리콘의 밴드갭의 크기와 동일하게 두었다. 입사빔의 파장은 다음과 같다. $\lambda[\text{nm}]=1,240/E[\text{eV}]$ 이고 E 는 입사빔의 에너지이므로 $h\nu_{\max}=2.01$ eV는 파장이 616 nm 이고 $h\nu_{\min}=0.61$ eV는 2,032 nm에 해당한다. 이것은 태양스펙트럼 [1]에서 핵심분포부분만 추려온 것이다. 물론 태양광스펙트럼에서 최대파장과 최소파장을 이론값에 대입할 때 값에 변화를 주면 Fig. 4~6의 경향이 다소 다르게 나타나리라 생각된다. 그렇지만 다른 변수를 역시 바꿔주면 최종 이론치는 거의 동일한 값을 얻을 수 있다. 경계벽이 특정각도의 주원인이려면 레이저 광원과 같은 특정파장만 갖는 입사 빔(Mono light)일 때는 Fig. 4에서와 같이 공진이 82도 부근에서 발생한다. 이를 간단히 계산해보면 $h\nu_{\min} \times \cos 82 = 0.61 \text{ eV} \times \cos 82 = E_d$ 로 경계벽이 일종의 donor에 의해 생긴다면 다음과 같다. 참고문헌 [5]에 의해 $h\nu_{\min} \times \cos 82 = 0.61 \text{ eV} \times \cos 82 = E_d = 13.6 \text{ eV} \times (m/m^*) \times (1/\epsilon)^2$ 이므로 실리콘의 유전상수(ϵ)가 11.68이어서 따라서 순수 전자질량과 유효전자질량의 비는 여기서는 $m/m^*=0.86$ 이다. 그렇지만 실험치에 피팅하는 이론값에

는 고정전위(Pinning potential)을 밴드갭으로 놓고 여기서는 그것을 donor로 놓으면 자가모순이 되는 것이 아닌가라는 의문은 다음과 같이 해소된다. 전자 덩어리의 고정은 Commensurate Pinning (CP)이 있고 또 다른 불순물 고정 (IP: Impurity Pinning)이 있다. CP는 이온에 의한 것이므로 그것의 고정전위를 밴드갭으로 두어도 큰 문제가 없고 이것에 의한 양자샘 내에 IP에 의한 양자샘이 내부에 존재하고 그 전위장벽(potential barrier)은 불순물 도너(donor)에 의한 것이라면 모든 문제는 해결될 수 있다. 따라서 암흑전류의 연원은 양자샘 내의 전류로 볼 수 있어서 CP barrier가 최대크기가 밴드갭이므로 밴드갭보다 작은 전압을 걸어준다면 암흑전류가 심하리라 추정된다. 그리고 donor가 없다면 암흑전류는 거의 없고 본 실험에서와 같이 한다면 임계각도는 90도가 되리라 예상할 수 있다. 본 논문에서 이용한 전자 덩어리 모델에서는 전자와 정공의 재결합을 포함하고 있다. 전자 덩어리의 태양전류를 유도할 때와 마찬가지로 재결합에서는 각 위상이 반대로 되기에 결국 총 태양전류는 단지 진폭이 약간 변할 뿐이다. 이와 같은 최종진폭을 Fig. 4~6에서 피팅 파라미터로 놓았기에 우리의 실험과 이론은 잘 일치한 것으로 추정된다.

V. 결 론

태양전지의 입사각별 단락전류밀도 (J_{sc})의 영향성은 전하밀도파 이론으로 설명하여도 본 실험에서 실험치하고 이론치가 매우 일치 하였다. 전하밀도파들이 고정되었을 때 이 고정전위장벽을 넘어서 태양전류가 가능하다는 것이다 [5]. 본 실험에서는 태양광의 입사각을 조절해서 단락전류 밀도 (J_{sc})값을 측정하고 이를 전자 덩어리 모델과 비교한 결과 서로 매우 근접함을 보였다. 전자 덩어리 모델이 좀 더 지지를 받으려면 훨씬 더 많은 실험들과 비교하여야 할 것이다. 그리고 종전모델은 너무 많은 이론들과 계산방법이 있기에 본 논문에서는 인용을 하지 않았다. 종전모델의 대표적인 것은 다이오드이론과 유사한 태양전지이론이 있고

전류를 계산할 때는 전자 방출의 고전인 Fowler-Nordheim model 방법이 표준적인 방식으로 알려져 있다. 우리의 결론으로는 결정질 태양전지도 일종의 양자샘 타입의 태양전류를 발생한다. 우리는 실험결과와 비교를 통해 전하밀도파 이론은 재결합도 포함하고 있고 그리고 암흑전류도 포함하는 태양전류를 잘 표현함을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연구 동기술개발사업(No. C0036739)의 연구수행으로 인한 결과물이고, 지식경제부에서 지원하는 신재생에너지융합원천기술사업(No.2010301001003A-13-3-010)의 연구수행으로 인한 결과물이며, 2012년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

- [1] S. Kim, B. H. Lee, and S. H. Lee, EUPVSEC. **22**, 1499 (2007).
- [2] K. M. Park, J. H. Jung, S. I. Bae, S. Y. Choi, and M. B. Lee, J. Korean Vac. Soc. **20**, 3 (2011).
- [3] R. H. Bube, *Photovoltaic Materials*, (Imperial College Press, Singapore, 1998).
- [4] J. W. Kang, C. H. Son, G. S. Cho, J. H. Yoo, J. S. Kim, C. K. Pack, S. D. Cha, and G. C. Kwon, J. Korean Vac. Soc. **21**, 62 (2012).
- [5] J. H. Koo, J. M. Jeong, D. J. Jin, G. S. Cho, and J. J. Kim, Physica B **405**, 941 (2010).
- [6] D. J. Kim, *New Perspectives in Magnetism of Metals*, (Kluwer/Plenum, New York, 1999).
- [7] G. Hutiray and J. Sólyom, Lecture Notes in Physics **217** (1985).

Research on Changes in Short Circuit Current of C-Si Solar Cell by Charge Density Waves

Il Won Seo*, Je Huan Koo, Myoung Soo Yun, Tae Hoon Jo,
Won Young Lee, Guang Sup Cho, and Gi Chung Kwon[†]

Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701

(Received May 8, 2013, Revised June 18, 2013, Accepted June 26, 2013)

We measure solar currents transformed from quantum efficiency as a function of incident angles of solar lights. According to conventional models for solar cells, solar currents can be induced when electrons are separated into electrons and holes in the presence of incident solar lights. On the contrary, solar currents can be possible at the time when pinned charge density waves go beyond the pinning potential barrier under the influence of incident solar beams suggested by some authors. In this experiment, measured solar currents and our theory are in good correspondence to confirm the angle dependence of solar lights.

Keywords : Solar cell, Charge density wave, Short circuit current, Quantum efficiency,
Incident angle

* [E-mail] iw411@naver.com

[†] [E-mail] gckwon@kw.ac.kr