

이중 나노 계면층을 적용한 고효율 고분자 태양 전지 소자 연구

이영인¹, 박병주^{1,a}

¹광운대학교 전자물리학과

Nanoscale Double Interfacial Layers for Improved Photovoltaic Effect of Polymer Solar Cells

Young In Lee¹ and Byoungchoo Park^{1,a}

¹ Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

(Received June 1, 2010; Revised 2010; Accepted 2010)

Abstract: We introduced nanoscale interfacial layers between the PV layer and the cathode in poly (3-hexylthiophene):methanofullerene bulk-heterojunction polymer photovoltaic (PV) cells. The nanoscale double interfacial layers were made of ultrathin poly (oxyethylenetriodecylether) surfactant and low-work-function alloy - metal of Al:Li layers. It was found that the nanoscale interfacial layers increase the photovoltaic performance, i.e., increasing short-circuit current density and fill factor with improved device stability. For PV cells with the nanoscale double interfacial layers, an increase in power conversion efficiency of $4.18 \pm 0.24\%$ was achieved, compared to that of the control devices ($3.89 \pm 0.08\%$) without the double interfacial layers.

Keywords: Polymer solar cell, Photovoltaic, Interfacial layers, Nanomaterials

1. 서 론

최근 고효율의 고분자 태양 전지 (polymer solar cell, PSC)를 실현하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다 [1-5]. 이러한 수많은 연구들 중에서 주목 받고 있는 PSC는 벌크 이중 적층 (bulk heterojunction, BHJ) 구조를 갖는 광전 변환 (photovoltaic, PV) 층을 적용한 구조이다 [2,3].

BHJ 구조의 대표적인 PSC는 전자 주개 (electron-donor) 의 역할을 수행하는 poly (3-hexylthiophene) (P3HT) 고분자와 전자 받개 (electron-acceptor) 역할의 phenyl C₆₁-butyric acid methyl ester (PCBM) 분자로 구성된 PV 층으로 구성되며, 열처리 과정을 거쳐 3-4% 정도의 광전 변환 효율 (power conversion efficiency, PCE) 특성들이 보고되었다 [4,5]. 가장 최근에 낮은 밴드 갭 고분자를 사

용하여 그 PCE가 ~6.77%까지 증가할 수 있다는 연구 결과가 보고되기도 하였다 [6]. 이러한 PSC 기술을 적용하여 roll-to-roll 방식과 같은, 고속 습식 코팅 방식으로 손쉽게 태양 전지를 제작할 수 있게 될 것으로 기대되고 있다 [7,8]. 그러나 이러한 제작이 실용화되기 위해서는, PSC의 효율이 환경적인 안정성을 바탕으로 더욱 증진될 필요가 있다. 이를 실현하기 위해서는, 고효율의 PV 박막을 제작할 수 있어야 할 뿐만 아니라 PV층과 전극들 사이의 계면에서 전기적 접촉도 최적화되어야 한다. 이러한 계면의 전기적 접촉을 증진시키기 위해 전극을 조절하는 사례가 보고되었다. 양극 전극으로 사용하는 indium tin oxide (ITO) 상부에, poly (3,4-ethylene dioxylyene thiophene): poly (styrene sulfonic acid) (PEDOT:PSS) 버퍼층 [9]이나, 자기 조립성 단분자막 (self-assembled monolayer) [10]등을 형성하여 ITO의 전기적 접촉을

a. Corresponding Author; bcpark@kw.ac.kr

증진시키는데 사용되어져 왔다. 반면에, 음극에서는, 음극과 PV층 사이에 쌍극자층을 형성하기 위하여 초박막 LiF [11] 혹은 poly (ethylene oxide) [12] 계면층을 형성하여, 전자 수집을 향상시켰다. 대표적인 예로, PSC에 LiF 계면층을 사용하여 효율을 ~3.3%로 증진시킨 연구 결과가 있었다 [11]. 최근에는, LiF 계면층 대신에 TiOx [13]와 같은 다기능성 무기 박막이 정공 저지층 (hole-blocking barrier), 광 스페이서 (optical spacer), 그리고 산소 저지층 (oxygen barrier)으로 적용되어 소자의 효율과 안정성이 상당히 향상되었다. 또한 ZnO 박막을 사용한 경우, 4.2%의 변환 효율 특성을 갖는 PSC도 보고되었다 [14]. 그러나 이러한 무기 박막들의 전기적 특성은 박막 처리 과정 조건에 따라서 상당히 민감하게 변화하고, 또한 제작 공정 과정이 복잡하다는 단점이 있다. 이러한 단점들이 고효율의 PSC를 만드는 제한된 요소가 될 수 있다. 따라서 PSC의 특성을 더욱 향상시키기 위해서는, 적절한 계면층을 형성하여야 한다. 이에 대하여 본 연구에서는, 음극 쪽에서 전자의 수집을 향상시키기 위해 나노스케일의 이중 계면층을 사용하였다. 그림 1에 나타난 것처럼, 계면층들은 (i) 계면 활성제 poly (oxyethylene tridecyl ether (PTE) 초박막과 (ii) 낮은 일함수 금속 합금 초박막 (Al:Li)으로 구성되어져 있다. 여기서, PTE가 낮은 highest-occupied-molecular-orbital, -8.1 eV (HOMO)레벨과 높은 lowest-unoccupied-molecular-orbital, -2.1 eV (LUMO)레벨을 갖기 때문에 [15], (PTE / Al:Li) 나노스케일 이중 계면층이 전극 계면에서 전하 캐리어 주입과 수송을 조절할 수 있다고 예상할 수 있다. 특히 이전의 연구에서는, 나노스케일 이중 계면층이 유기 발광 소자의 특성을 향상시키는데 적용된 바도 있다 [15].

2. 실험 방법

2.1 소자 제작

본 연구에서는 PSC 제작을 위해 유리 기판 위에 80 nm 두께로 형성된 ITO (30 ohm/square) 투명 전극 (20 mm × 18 mm)을 폭 3 mm의 스트라이프 형태로 패터닝하여 양극으로 사용하였다. 이 ITO 기판을 아세톤, 알콜, 그리고 증류수로 초음파-세척하였으며, 세척 후 질소 가스로 건조시키고, 자외선-오존 처리 과정을 거쳐 세정하였다.

그림 1에 나타난 것과 같이, 준비된 ITO 기판 위에 스핀 코팅 방식으로 PEDOT:PSS (poly (3,4-ethylene

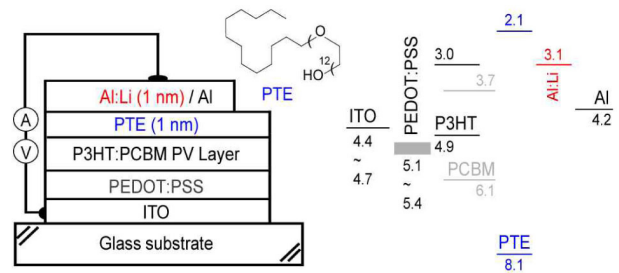


Fig. 1. Device structure and energy band diagram for the studied polymer solar cells with nanoscale interfacial layers.

dioxyethylene thiophene) : poly (styrene sulfonic acid) 버퍼층을 먼저 코팅하고, 그 상부에 혼합된 PV 용액을 사용하여 PV 박막 (두께 85 nm)을 형성하였다. 사용된 혼합 PV 용액은 P3HT (Aldrich, regiospecific ratio $\geq 99.5\%$, 1.20 wt%)와 PCBM (Rieke Metals, Inc., 0.88 wt%) [4,5]을 1,2-dichlorobenzene 용매에 녹여 제작하였다 [16,17].

다음으로, PV층 상부에 계면층을 제작하였다. 첫 번째 계면층을 형성하기 위하여 0.1 wt% 농도의 PTE ($C_{13}H_{27}(OCH_2CH_2)_{12}OH$, Aldrich) 용액 (solvent: distilled water)을 PV층 위에 스핀 코팅 (1 ~ 2 nm)하였다. PTE 코팅 후, 120 °C에서 3분 동안 열처리를 하여 잔여 용매를 제거하였다. 이때 PTE층의 두께를 Ellipsometer로 조사하였다. 두 번째 계면층으로 Al:Li 합금 (Li 농도 : 0.1 wt%)을 PTE층 위에 2×10^{-6} Torr의 진공 상태에서 열증착하여 Al:Li 계면층 (~ 1 nm 두께)을 제작하였다. 그 상부에 음극으로 Al 전극을 동일한 진공 상태에서 ~ 50 nm 두께로 열증착 방식으로 형성하였다. 이렇게 제작된 PSC 시료 소자의 구조는 [ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM / PTE (1~2 nm) / Al:Li (1 nm) / Al] (넓이 : $3 \times 3 \text{ mm}^2$)이다. 비교하기 위하여, PTE 계면층이 없는 [ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM / Al:Li (1 nm) / Al] 구조의 기준 소자도 제작하였다. 제작된 소자들은 150 °C에서 10 분간 후-열처리 (post-annealing) [4,5] 하였으며, 시료 소자와 기준 소자는 동일한 방식으로 제작되었다.

2.2 측정

제작된 P3HT:PCBM PV층의 광흡수 특성을 분석하기 위하여 흡광계 (Cary 1E (Varian) UV-vis Spectrometer)를 사용하였고, 효율을 측정하기 위한 광원으로 AM

1.5 에서 100 mW/cm^2 세기의 빛을 발생하는 Solar Simulator (Newport, 96000)를 사용하였다. 광전류 밀도-전압 (J - V) 특성은 Keithley 2400 Source Meter 를 사용하였고 기준 태양 전지 셀 (Bunkoh-keiki, BS-520)을 사용하여 광전류를 보정하였다. 또한 내부 양자 효율 특성 (incident photon-to-current collection efficiency, IPCE)을 살펴보기 위하여 IPCE 측정 시스템 (Titan Electro-optics Co., QE-IPCE 3000)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저, 흡광계를 사용하여 P3HT:PCBM PV층의 광흡수 특성을 살펴보았다. 그림 2는 150°C 에서 10분간 후-열처리한 PV층의 규격화된 흡수를 보여준다. P3HT:PCBM PV 박막은 약 507 nm 에서 흡수 peak를 이루는 강한 흡수 스펙트럼을 나타내고 있다. 기존의 기준 P3HT:PCBM PV층과 P3HT:PCBM / PTE 시료 층의 광흡수 스펙트럼을 비교해 보면, 그림에 나타난 것과 같이, 두 PV 박막의 광흡수 스펙트럼이 매우 유사하다. 즉 P3HT에 의한 가시광 영역에서의 광흡수 ($\sim 500 \text{ nm}$)와 PCBM에 의한 UV 영역 ($\sim 350 \text{ nm}$)에서의 광흡수는 PTE층의 유무와 상관없이 거의 같은 것을 볼 수 있다. 이로부터 PTE 계면층을 사용하여도 PV층의 광학적 흡수 특성이 변함이 없음을 알 수 있다.

다음으로, 제작된 PSC 소자의 계면층 유무에 따른 광전 효과를 조사하였다. 그림 3 (a)에 나타난 암전류 (dark current) 특성을 보면, 시료 소자와 기준 소자 모두 다이오드 특성을 나타내는 경향을 보이며, 저 전압 영역에서 전하 수송 능력의 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 이중 계면층 유무에 따른 PSC 소자의 광전류 (photo current) 흐름 특성을 그림 3 (b)에 나타냈다. 그림에 나타내었듯이, PTE 계면층이 없는 기준 소자의 개방 전압 (open-circuit voltage, V_{oc})은 $0.61 \pm 0.01 \text{ V}$ 이고, 단락 전류 밀도 (short-circuit current density, J_{sc})는 $11.11 \pm 0.17 \text{ mA/cm}^2$ 이며, 곡선 인자 (fill factor, FF)는 $57.34 \pm 1.11\%$ 로 측정되었다. 태양 전지의 PCE는 다음과 같이 정의된다.

$$PCE = \frac{FF \times V_{oc} \times J_{sc}}{P} \quad (1)$$

여기서, P 는 태양 전지에 입사되는 에너지이다. 이에 따른,

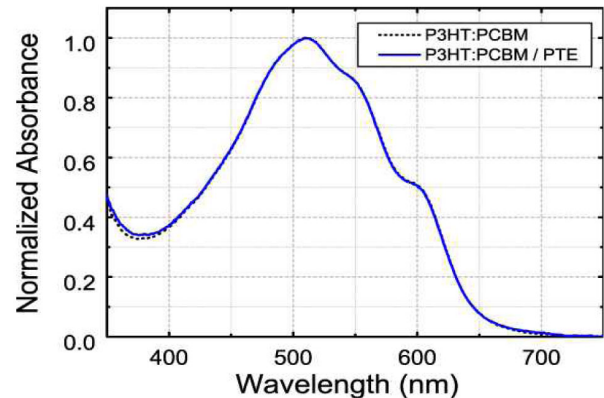


Fig. 2. Normalized UV - vis absorption spectra of PV layers of P3HT:PCBM without (black dotted curve) and with (blue solid curve) a PTE interfacial layer after heating treatment at 150°C for 10 min.

기준 소자의 PCE는 $3.89 \pm 0.08\%$ 이다. 이에 대하여, 이중 나노 계면층을 적용한 시료 소자 (PTE / Al:Li)의 V_{oc} 는 $0.63 \pm 0.01 \text{ V}$ 이고, J_{sc} 는 $11.22 \pm 0.29 \text{ mA/cm}^2$ 로 증가하였으며, FF 도 $59.77 \pm 1.09\%$ 로 증가하였다. 이에 따른 시료 소자의 PCE도 $4.18 \pm 0.24\%$ 로 증가하여, PCE가 $\sim 107\%$ 정도까지 향상되었음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터, 이중 나노 계면층의 구조의 적용으로 접촉 저항이 감소하여 J_{sc} 가 증가되었음을 알 수 있다. 이때, 사용된 나노 계면층의 두께가 $1 \sim 2 \text{ nm}$ 에서 벗어나면, 효율이 오히려 감소하기 시작하여 최적 조건이 $1 \sim 2 \text{ nm}$ 정도임을 알 수 있었다. 표 1에 두 소자의 특성을 비교해서 요약했다. 또한, 광 여기 발생 전하들의 재결합에 의한 손실에 대해 조사하였다. 그림 3(c)에 나타난 것처럼 단분자 재결합에 의한 J_{sc} 의 손실이 음전압에서의 전류 의존으로부터 계산되었다 [18]. 기준 소자와 (PTE / Al:Li) 계면층을 포함한 시료 소자에 대하여, J_{sc} 의 손실이 각각 $3.48 \pm 1.47\%$ 와 $2.60 \pm 2.50\%$ 로 추정되어 두 경우 모두 J_{sc} 의 손실이 비교적 적음을 알 수 있다. 이는 두 소자에서 일어나는 단분자 재결합의 정도가 적음을 나타내며, 제작된 PSC들의 재결합 원리에서의 차이가 없음을 의미한다.

다음으로, 제작된 PSC들로부터의 전류 밀도와 관련된 정보를 얻기 위해, 파장에 따른 IPCE를 PTE / Al:Li 이중 계면층 유무에 따라 측정하여 비교하였다. PSC의 측정된 IPCE 스펙트럼을 그림 4에 나타냈다. 그림에 나타나 있듯이, 두 PSC는 잘 알려진 BHJ 구조의 스펙트럼 반응을 보이고 있으며, 이는 그림 2의 PV 박막의 흡수 스펙트럼과

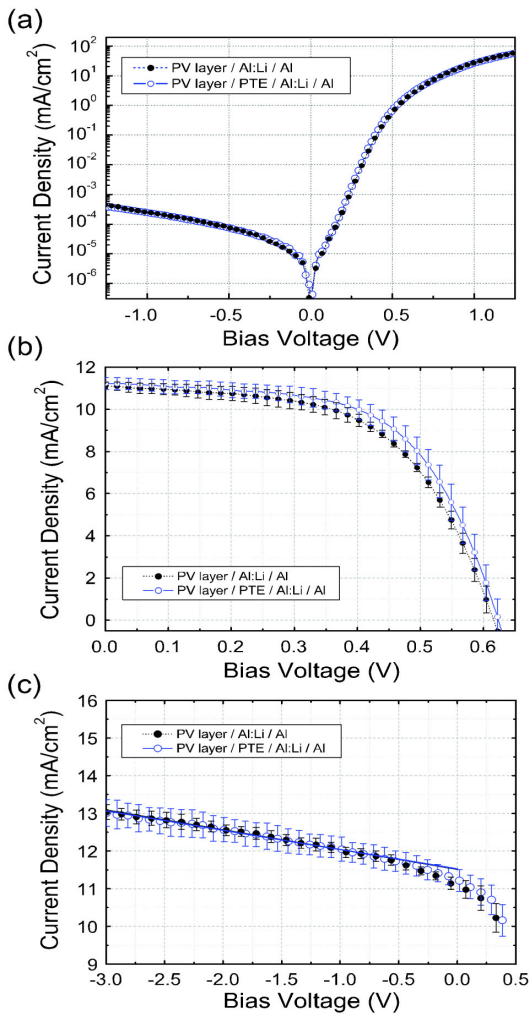


Fig. 3. The J - V characteristics of the PSCs with different interface layer structures (a) in the dark and (b) under light illumination. (c) The J - V curves of the illuminated photocurrent for extended reverse bias. The linear lines represent linear fits.

매우 유사한 특성을 보인다. 그림에 나타난 것처럼 [ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM / PTE / Al:Li / Al] 구조를 갖는 시료 소자의 최대 IPCE가 480 nm에서 대략 64.1%로 기준 소자의 62.8% 보다 더 높게 나타났다. 이 결과는 PV 층 위의 PTE 계면층이 IPCE 증가에 기여했다는 것이다. UV-가시광 영역에서의 광흡수 결과는 시료 소자와 기준 소자 구조 사이에 큰 차이가 없는데 반하여, 이와 같이 증가된 IPCE는 전극 계면에서 전자 주입과 수송이 증가된 결과라고 볼 수 있다. PV층 위에 코팅된 PTE 계면층에서는 PV층 표면에 수직으로 배향되어 있는 PTE 분자들의

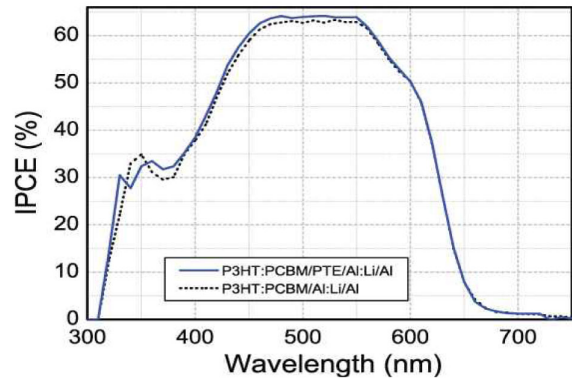


Fig. 4. IPCE spectra of P3HT:PCBM solar cells without (dotted curve) and with (solid curve) the PTE interfacial layer.

-OH 쌍극자에 의한 효과로 PV층과 Al 음극 사이의 potential barrier를 낮춰 계면에서 효율적인 전자 주입과 수송에 기여한 것으로 분석된다.

다음으로, PTE 계면층의 전기적 특성을 살펴보기 위하여, $T = 300$ K에서 hole-only 소자와 electron-only 소자의 전기장 세기에 따른 전하 이동 특성 (J - E)을 조사하였다 (그림 5). hole-only 소자에 대해서는, [ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM / Au] 구조와 [ITO / PEDOT:PSS / P3HT:PCBM / PTE / Au] 구조를 적용하여 사용했다. 그림 5 (a)에 나타난 것처럼, PTE 계면층이 있는 hole-only 소자는 PTE 계면층이 없는 소자에 비하여 정공 전류 흐름이 크게 감소함을 알 수 있는데, 이는 PV 층 위에 형성된 PTE 계면층이 효과적으로 정공 흐름을 저지할 수 있음을 보여준다. 또한 전자 이동을 이해하기 위하여, [Al / P3HT:PCBM / Al:Li / Al]과 [Al / P3HT:PCBM / PTE / Al:Li / Al] 구조들의 electron-only 소자들을 제작하였다. 그림 5 (b)에 나타난 것처럼, PTE 계면층이 있는 electron-only 소자는 PTE 계면층이 없는 소자에 비해 증가하는 전자 전류 흐름을 보여준다. 그러므로 PTE 계면층은 선택적으로 정공을 저지하고 전자를 수송하는 특성을 가짐을 알 수 있다. 이러한 PV층과 음극 사이의 계면에서 PTE층의 전기적인 효과가 PSC 특성 향상에 기여한 것으로 이해된다.

다음으로, 기관 위에 형성된 PV층에 대한 표면의 형상을 AFM (atomic force microscopy)으로 관찰하였다. 그림 6에 스핀 코팅된 P3HT:PCBM 박막 (위 그림)과 P3HT:PCBM층 위에 PTE 계면층을 코팅한 박막 (아래 그림)의 AFM 표면 이미지를 나타내었다. 기준 P3HT:PCBM

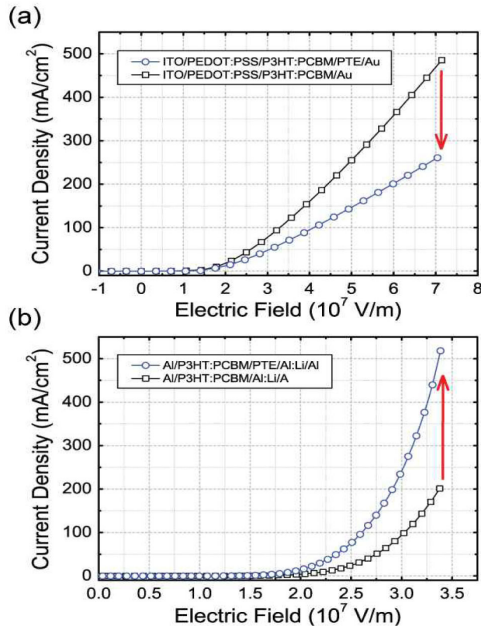


Fig. 5. The J - E characteristics of hole-only devices (a) and electron-only devices (b) with different interfacial layers.

박막의 나노스케일의 평평한 표면과 비교하여, P3HT:PCBM 박막 위에 PTE 계면 활성제가 코팅된 박막 표면 역시 유사한 나노스케일의 거칠기를 갖는 표면으로 확인되었다. 이러한 결과는 이전의 유기 발광 박막 위에서의 PTE 계면층의 유무에 대한 AFM 이미지와는 다른 형상으로서 [19] 본 연구의 PV 박막 위 PTE 분자는 뾰족한 배향성 (spike orientation)을 형성하지 않는다. 그러므로 PTE 계면 활성층은 P3HT:PCBM PV 박막의 표면을 질을 변화시키지 않음을 알 수 있다.

마지막으로, 기준 PSC 소자와 시료 PSC 소자의 동작 수명을 조사하였다. 그림 7은 본 연구에서의 PSC의 동작 수명을 나타내는 그래프이다. 제작된 PSC는 에폭시 레진을 사용하여 질소 글러브박스 (≤ 2 ppm of H₂O and O₂)에서 건조제와 함께 봉지화 하였다. 소자들은 측정되는 시간 사이사이에 개회로 (open-circuit) 상태에서 어두운 곳에 보관되었다. 봉지화 된 소자들의 동작 수명은 기온이 $26.1 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 이고 상대 습도가 $74.7 \pm 9.7\%$ 인 환경에서 측정되었다 (solar simulator, 100 mW/cm^2 , AM 1.5G). 그림에 나타난 것처럼, PSC의 효율 감소 현상은 신장 지수 함수 (stretched-exponential)의 거동을 보이고 있다 [20]. 더욱이 계면층이 있는 PSC 시료 소자의 효율 감소가 기준 소자 보다 매우 느림을 볼 수 있다. 이는 PTE 계면 활성

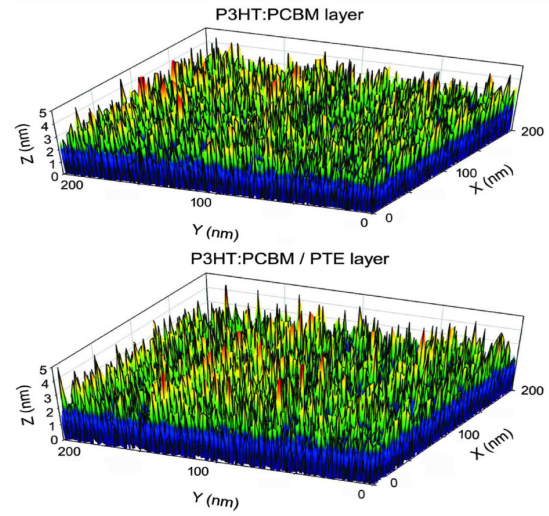


Fig. 6. 3-D topographical AFM images of P3HT:PCBM films without (upper) and with (lower) the PTE interfacial layer after annealing at 150°C .

층이 소자의 안정성을 증가시켰다는 것을 의미한다. 제작된 소자들의 봉지화로 산소나 물로 인한 열화 (degradation)과정이 상당히 억제되었기 때문에 [21,22], 제작된 소자의 열화는 활성층으로의 음극 물질 확산과 같은 다른 요인에 의한 것으로 여겨진다. PV 활성층으로 Al 음극 (또는 Li) 원자들과 불순물들의 확산은 재결합 영역 (recombination site)으로 이동하여 소자 열화를 가속시키는 것으로 여겨진다 [22]. 그러므로 PTE의 -OH 그룹과 금속 원자들 사이의 상호 작용 (-OH:Al이나 -OH:Li)을 통하여 PV층으로 Al (또는 Li)원자들의 확산이나 이동을 효과적으로 방지하여 PV 활성층을 보호할 수 있다고 여겨진다. 위의 결과들로부터 PTE / Al:Li 나노스케일 이중 계면층으로 인하여 PSC 소자 특성이 향상되며, 또한 계면층 제작이 소자의 수명 또한 증가시킬 수 있음을 입증하였다.

4. 결론

결론으로, PV층과 음극사이에 PTE / Al:Li 나노스케일 이중 계면층을 형성하여 효율적인 PSC 소자를 구현하였다. 실험 결과에 따르면, 적용한 이중 계면층의 존재가 PSC의 PCE를 $\sim 107\%$ 까지 증진시킨 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 음극에서의 전자 수집이 향상된 결과로 해석된다. 더욱이, 나노스케일 이중 계면층이 있는 시료 소자가 계면층이 없는 기준 소자보다 더욱 안정하다는 것을 보

Table 1. Summary of device performance of PSCs with different interface layers and Al cathode.

(#) Device Structure ITO / PEODOT:PSS / PV /	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	PCE (%)	The Rate of PCE (%)
(1) Al:Li / Al	0.61 ± 0.01	11.11 ± 0.17	57.34 ± 1.11	3.89 ± 0.08	100
(2) PTE / Al:Li / Al	0.63 ± 0.01	11.22 ± 0.29	59.77 ± 1.09	4.18 ± 0.24	107

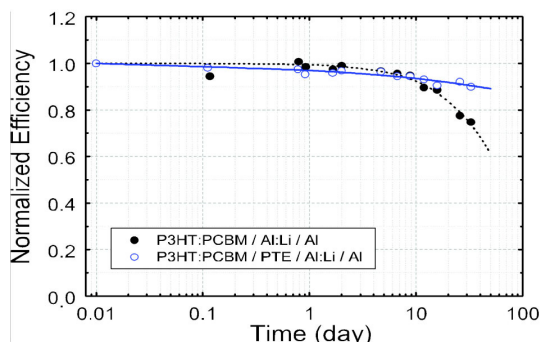


Fig. 7. Comparison of the relative PCE as a function of the storage time for the PSCs with (open circles) and without (closed circles) the PTE interfacial layer. The dotted and solid curves are least-squares fits of the stretched exponential decays.

였다. 따라서 본 논문의 소자 구조에 효율적인 광전 재료들을 적용하여 더욱 효율적인 PSC를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국 지식경제부 신재생 에너지 기술개발 사업 (2010, 20093020010050) 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger, and F. Wudl, *Science*, **258**, 1474 (1992).
- [2] G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, and A. J. Heeger, *Science*, **270**, 1789 (1995).
- [3] C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, and J. C. Hummelen, *Adv. Funct. Mater.*, **11**, 15 (2001).
- [4] G. Li, V. Shrotriya, Y. Yao, and Y. Yang, *J. Appl. Phys.*, **98**, 043704 (2005).
- [5] W. Ma, C. Yang, X. Gong, K. Lee, and A. J. Heeger, *Adv. Funct. Mater.*, **15**, 1617 (2005).
- [6] H.-Y. Chen, J. Hou, S. Zhang, Y. Liang, G. Yang, Y. Yang, L. Yu, Y. Wu, and G. Li, *Nat. Photon.*, **3**, 649 (2009).
- [7] F. C. Krebs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 394 (2009).
- [8] F. C. Krebs, S. A. Gevorgyan, and J. Alstrup, *J. Mater. Chem.*, **19**, 5442 (2009).
- [9] F. L. Zhang, M. Johansson, M. R. Andersson, J. C. Hummelen, and O. Inganäs, *Adv. Mater.*, **14**, 662 (2002).
- [10] S. Khodabakhsh, B. M. Sanderson, J. Nelson, and T. S. Jones, *Adv. Funct. Mater.*, **16**, 95 (2006).
- [11] C. J. Brabec, S. E. Shaheen, C. Winder, N. S. Sariciftci, and P. Denk, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1288 (2002).
- [12] F. Zhang, M. Ceder, and O. Inganäs, *Adv. Mater.*, **19**, 1835 (2007).
- [13] K. Lee, J. Y. Kim, S. H. Park, S. H. Kim, S. Cho, and A. J. Heeger, *Adv. Mater.*, **19**, 2445 (2007).
- [14] H.-L. Yip, S. K. Hau, N. S. Baek, H. Ma, and A. K.-Y. Jen, *Adv. Mater.*, **20**, 2376 (2008).
- [15] J. H. Park, S. S. Oh, S. W. Kim, E. H. Choi, B. H. Hong, Y. H. Seo, G. S. Cho, B. Park, J. Lim, S. C. Yoon, and C. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 153508 (2007).
- [16] Y. Ding, P. Lu, and Q. Chen, *Proc. SPIE* 7099, 709919 (2008).
- [17] Y. I. Lee, M. Kim, Y. H. Huh, J. S. Lim, S. C. Yoon, and B. Park, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **94**, 1152 (2010).
- [18] C. Waldauf, M. C. Scharber, P. Schilinsky, J. A. Hauch, and C. J. Brabec, *J. Appl. Phys.*, **99**, 104503 (2006).
- [19] Y.-H. Niu, H. Ma, Q. Xu, and A. K.-Y. Jen, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 083504 (2005).
- [20] C. Fery, B. Racine, D. Vaufrey, H. Doyeux, and S. Cina, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 213502 (2005).
- [21] K. Norrman, S. A. Gevorgyan, and F. C. Krebs, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **1**, 102 (2009).
- [22] M. Jorgensen, K. Norrman, and F. C. Krebs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **92**, 686 (2008).