

편광 흡수성 광기전성 고분자 박막 연구

김영찬¹, 허운호¹, 박병주^{1,a}

¹ 광운대학교 전자물리학과

Polarizing Photovoltaic Polymer Films for Reflective Solar-LCDs

Young Chan Kim¹, Yoon Ho Huh¹, and Byoungchoo Park^{1,a}

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

(Received May 15, 2012; Revised June 21, 2012; Accepted June 24, 2012)

Abstract: We present the results of a study of the polarizing photovoltaic (PV) effects in an aligned polymer bulk heterojunction PV layer. The fairly uniform in-plane uniaxial alignment of the PV layer with a macroscopic axial orientational order parameter of 0.40 was achieved by means of a simple rubbing technique. Moreover, reflective polarizing PSCs having the aligned PV layers were applied to power-generating reflective type liquid crystal displays (LCDs), which exhibited a maximum contrast ratio of 1.7. These results form a promising foundation for various energy harvesting polarization dependent opto-electrical LCD device applications.

Keywords: Polymer solar cells, Photovoltaic, Liquid crystal display, Polarized absorption

1. 서 론

최근 다양한 연구 개발을 통해 전도성 고분자로부터 생성된 광전자를 플러린으로 전달하여 높은 광전 변환 (photovoltaic, PV) 소자 특성을 발현하는 고분자 태양전지 (polymer solar cell, PSC)가 발전되어왔다 [1-6]. 이러한 다양한 연구들 중에서 가장 주목 받고 있는 고분자 태양전지는 광전 변환 박막을 벌크 이종 적층 (bulk heterojunction, BHJ) 구조로 제작한 연구이다 [1-3]. 이러한 이종 적층 구조 고분자 태양전지는 광흡수 전도성 고분자와 플러린의 상분리가 마치 채널과 같은 형태로 일어나 우수한 소자 특성을 발현하게 된다. 또한 이종 적층 구조 고분자 태양전지의 광전 변환층을 열처리하여 상분리 및 결정성을 증대시켜서 2~7%의 높은 광전 변환 효율 (power

conversion efficiency, PCE)을 갖는 결과들이 보고되었다 [4-8]. 이러한 광전 변환 특성 향상과 더불어 또 다른 중요한 연구 방향으로는, 기존의 광전 변환층에 비등방 흡수 특성을 부여하여 선택적으로 편광 흡수가 가능하도록 고안한 편광 고분자 태양전지의 개발이다 [9-12]. 편광 흡수성 고분자 태양전지는 광전 변환층의 전도성 고분자 사슬을 한 방향으로 배열하여 그 배열 방향 축과 평행 방향으로 편광된 빛은 흡수하는 반면, 수직 방향으로 편광된 빛은 흡수하지 못하고 통과하도록 한다. 따라서, 편광 흡수성 고분자 태양전지는 고분자 배열축에 따라 선택적으로 편광 흡수를 하여 전기 에너지를 생산하면서 동시에 편광자의 기능을 발현하는 광소자로서의 역할도 수행하게 된다 [9-11]. 최근, 배열된 전도성 고분자 박막을 이용하여 편광된 전계 발광할 수 있는 유기 발광 소자의 연구 결과도 보고되었다. 또한, 이종 적층 구조의 광전 변환층을 간단한 방식으로 러빙하여, 입사광의

편광 상태에 따라 광전류 특성이 다른 이방성 광전 변환 박막을 이용하여 입사광의 편광 상태와 평행한 편광 빛은 흡수하고 수직 방향의 편광 빛은 투과하는 특성을 갖는 투명 편광 흡수성 고분자 태양전지도 보고되었다 [12]. 이러한 특성은 기존의 이색 흡수성 편광자의 특성과 유사한 기능으로 [13,14], 편광 흡수성 고분자 태양전지는 광전 변환 전기 에너지 생산과 더불어 편광자로서의 역할도 가능하여 다양한 분야에 응용이 가능할 것으로 예견되고 있다.

본 연구에서는, 기존의 반사형 액정 디스플레이 (liquid crystal display, LCD)에 편광 흡수성 고분자 태양전지를 편광자로 사용하여, 높은 편광비를 갖으면서 동시에 광전변환 에너지 생산 능력을 갖는 반사형 solar cell-LCD (Solar-LCD)를 제작하여 그 특성을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 소자 제작

본 연구에서 연구한 편광 흡수성 고분자 태양전지는 다음과 같은 방법으로 제작되었다. 유리 기판 위에 80 nm의 두께로 형성된 ITO 투명 전극을 아세톤, 알콜, 증류수를 이용하여 초음파 세척하였으며, 세척 후 질소 가스로 건조한 후 자외선-오존 처리를 통해 건식 세정하여 양극으로 사용하였다. 세척된 ITO 기판 위에 정공 수집 버퍼층으로 poly (3,4-ethylenedioxythiophene) : poly (styrene sulfonate) (PEDOT:PSS, Clevis P VP, Al 4083, H. C. Starck Inc.) 용액을 이용하여 스프인 코팅 방식으로 40 nm의 두께로 형성하였다. 형성된 정공 수집 버퍼층을 120°C의 온도에서 30분 간 열처리하여 잔여 용매를 제거하였다. 광전 변환층을 형성하기 위해 poly (3-hexylthiophene) (P3HT, Aldrich)와 [6,6]-phenyl C₆₁-butyric acid methyl ester (PCBM, Nano-C)을 1,2-dichlorobenzene 용매에 녹여 제작한 용액을 스프인 코팅 방식으로 85 nm의 두께로 정공 수집 버퍼층 위에 형성하였다. 형성된 박막을 70°C의 온도에서 2분 간 열처리하여 용매를 제거하였다 [15]. 형성된 광전 변환층을 러빙 천이 감싸인 롤러를 이용하여 120 g/cm²의 압력과 10 mm/s의 이동 속도로 러빙 처리하여 배렬성을 부여하였다 (그림 1 (b)). 2×10^{-5} Torr의 진공에서 러빙된 광전 변환층 위에 전자 수집 버퍼층으로 Al:Li 합금 (Li : 0.1 wt%)을 1 nm의 두께로 열증착하였으며, 그 위에 Al 전극

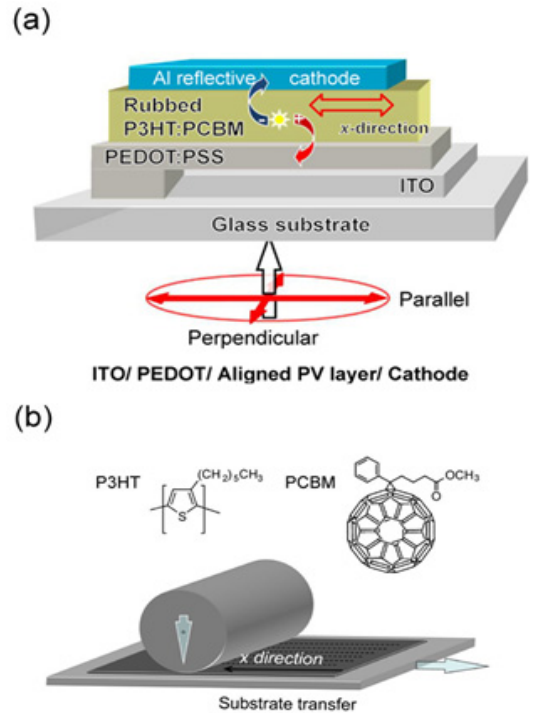


Fig. 1. (a) Schematic structure of reflective polarizing PSC containing an in-plane aligned PV layer, (b) schematics of rubbing process for in-plane aligned PV layer.

을 50 nm의 두께로 동일한 진공 상태에서 열증착하였다. 이렇게 제작된 편광 흡수성 고분자 태양전지는 [ITO / PEDOT:PSS / aligned P3HT:PCBM / Al:Li / Al] 구조 (그림 1 (a))로 제작되었으며, 배렬성 특성을 확인하기 위해 배렬 처리가 되지 않은 기준 고분자 태양전지 소자 [ITO / PEDOT:PSS / isotropic P3HT:PCBM / Al:Li / Al]도 함께 제작하여 그 특성을 비교하였다.

반사형 Solar-LCD 셀 제작을 위해, 네마틱 액정 (ZLI-2293, Merck)을 사용하여 액정셀을 제작하였다. 실험에 사용한 액정셀의 간격은 5 μm 이며, 액정의 광학적 이등방성(Δn)은 0.132이다. 서로 수직 방향으로 러빙 처리된 ITO 글라스 사이에 네마틱 액정을 주입 배향시켜 TN (twist nematic) 액정셀을 제작하였다. 제작한 TN 액정셀을 본 연구의 편광 흡수성 고분자 태양전지와 시트 편광자 (sheet polarizer) 사이에 위치시킨 후, 편광 흡수성 고분자 태양전지의 배렬축 (러빙축, x-direction)을 시트 편광자의 투과축과 수직 방향으로 배치하여 normal black mode (NB)로 설치하였다 [16].

2.2 측정 방법

광전 변환층의 편광 투과, 흡수 스펙트럼을 확인하기 위해 UV-vis spectrometer (Varian, Cary 1E)를 사용하였으며, 원자 현미경 (atomic force microscopy, AFM, Nanosurf AG Switzerland Inc., Nanosurf easyscan2)으로 박막의 표면 형상을 분석하였다. 제작된 소자의 광전 변환 효과를 측정하기 위해 광원으로 AM 1.5 G에서 100 mW/cm^2 의 세기의 인공 태양 빛을 발생하는 solar simulator (Newport, 96000)을 사용하였다. 광전류 밀도-전압 특성은 전압-전류 계측기 (Keithley 2400 source meter)를 사용하였고 기준 태양전지 셀 (Bunkoh-keiki, BS-520)을 사용하여 광전류를 보정하였다. 또한 내부 양자 효율 특성 (incident photon-to-current collection efficiency, IPCE)을 확인하기 위해 IPCE 측정 시스템 (Titan Electro-optics Co., QE-IPCE 3000)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저, 러빙 처리된 배렬성 광전 변환층의 표면 특성을 AFM으로 측정하였다. 러빙 처리된 광전 변환층의 표면 거칠기는 $3\sim 4 \text{ nm}$ 로, 기존의 러빙 처리되지 않은 광전 변환층 ($2\sim 3 \text{ nm}$)의 표면 거칠기에 비해 증가하였으며, 러빙축 방향을 따라 일정한 골이 형성된 것을 확인할 수 있었다.

입사 빛의 편광 상태에 따른 광전 변환층의 편광 투과 스펙트럼을 측정하여 그림 2(a)에 나타내었다. 기준 태양전지 소자와 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자의 광전 변환층 모두 일반적인 P3HT:PCBM 기반 광전 변환층의 흡수 스펙트럼과 동일한 경향을 보인다. $400\sim 600 \text{ nm}$ 의 영역에서 높은 흡수율을 가지면서 vibronic 진동에 의한 3개의 모드를 갖는 것을 확인할 수 있다. 기준 광전 변환층의 흡수, 투과 스펙트럼의 결과로부터, 입사광의 편광 상태와 무관한 등방성 광학 특성을 갖는 것을 확인하였다. 반면 편광 흡수성 광전 변환층의 투과 스펙트럼은 입사광의 편광 상태에 크게 의존하는 것을 볼 수 있다. 편광 흡수성 광전 변환층의 투과 스펙트럼을 보면, 광전 변환층의 흡수축과 입사광의 편광축이 평행한 경우, 낮은 투과율을 (또는 높은 흡수율) 갖는 반면, 입사광의 편광축과 광전 변환층의 흡수축이 서로 수직 방향인 경우 이와 반대 경향을 갖는 것을 확인할 수 있다. 이

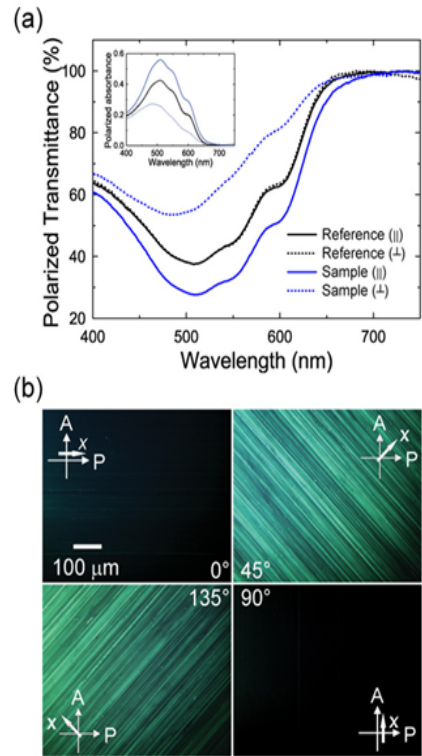


Fig. 2. (a) Polarized transmission and absorption (inset) spectra of the reference and sample PV layers for incident light polarized parallel (\parallel) and perpendicular (\perp) to the rubbing direction of the PV layers, (b) polarizing microscopic textures of the sample PV layer at four angles of rotation of the layers. The white arrows indicate the rubbing (x -) direction and the orientation of the crossed polarizers is shown by the crossed arrows (A, P).

러한 결과로부터, 편광 흡수성 광전 변환층이 광학적이방 흡수성을 갖는 것을 입증할 수 있었다. 또한, 편광 흡수 스펙트럼으로부터 얻어진 편광 흡수성 광전 변환층의 소광비 (extinction ratio)와 편광비 (dichroic ratio, DR)는 각각 1.60, 3.04로 우수한 이방 특성을 갖는 것을 확인하였으며, 이를 통해 얻어진 배렬 질서도 (order parameter)는 0.4 정도이다. 이는 기준 광전 변환층의 배렬 질서도가 0인데 비해 매우 높은 배렬 특성으로, 본 연구 방법으로 제작된 선택적 광흡수가 가능한 편광 흡수성 고분자 태양전지는 편광자로서의 역할을 수행할 수 있음을 보여준다.

또한, 편광 흡수성 광전 변환층의 편광 현미경 이미징에서도 이방 배렬을 관찰할 수 있었다. 편광자와

검광자의 광축을 수직 방향으로 선택한 후, 편광 흡수성 광전 변환층과 기준 광전 변환층을 그 사이에 위치시켜 박막의 각도를 45° 간격으로 회전시키며 편광 투과 현미경 이미지 특성을 관찰하였다. 기준 광전 변환층의 경우 회전 각도에 상관없이 항상 어두운 이미지의 특성을 보이는 것으로부터 기준 고분자 태양전지 소자의 광전 변환층이 등방성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 반면, 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자의 광전 변환층은 회전 각도에 따라 그림 2(b)에 나타낸 것과 같이 그 이미지가 크게 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 입사광의 편광 상태와 편광 흡수성 광전 변환층의 흡수 광축 및 복굴절 특성의 관계에 기인한 것이다.

그림 3(a)에 나타낸 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자와 기준 고분자 태양전지 소자의 암전류-전압 특성을 측정된 결과에서 볼 수 있듯이 두 소자 모두 우수한 정류 비율을 갖는 다이오드 특성을 갖는 것을 확인하였다. 그러나 두 소자의 전류 흐름 정도가 다른 것은 러빙 처리 과정을 통해 생기는 광전 변환층의 내부 저항 증가와 더불어 광전 변환층과 전극 사이의 계면 전위 장벽 차이에서 기인한 것으로 보인다. 다음으로 기준 고분자 태양전지 소자와 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자로부터 AM 1.5 G (100 mW/cm²) 광원에서 인가전압에 따른 전류 밀도를 측정하였다. 먼저 기준 고분자 태양전지 소자의 경우, 측정된 단락 전류 밀도 (short current density, J_{sc}), 개방 전압 (open circuit voltage, V_{oc})과 충실도 (fill factor, FF)는 각각 7.85 mA/cm², 0.67 V, 및 62%이었다. 이를 통해 기준 고분자 태양전지 소자의 광전 변환 효율은 3.26%이었다. 이는 일반적인 P3HT:PCBM 기반 고분자 태양전지의 특성과 유사한 결과이다. 반면, 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자의 J_{sc} , V_{oc} , FF는 5.69 mA/cm², 0.65 V 및 47%로 측정되었으며, 이로부터 도출된 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자의 광전 변환 효율은 1.73%이었다. 이러한 소자 특성은 광전 변환층의 러빙 과정 중 발생하는 광전 변환층의 손상과 내부 저항 증가에 기인한 것으로 사료된다. 이러한 특성은 내부 양자 효율 스펙트럼에서도 확인할 수 있다. (그림 3(b)) 기준 고분자 태양전지 소자와 편광 흡수성 고분자 태양전지는 일반적인 P3HT:PCBM 기반의 고분자 태양전지의 내부 양자 효율 스펙트럼과 거의 동일한 경향을 나타내지만 기준 고분자 태양전지 소자에 비해 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자의 경우 낮은 내부 양자 효율을 갖는다.

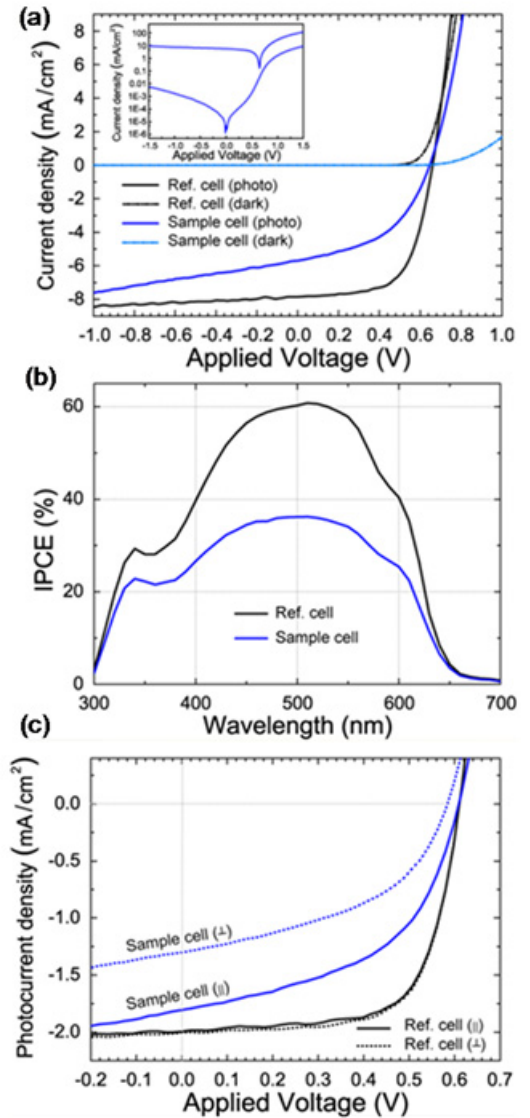


Fig. 3. (a) J - V characteristics of the reference and sample cells in the dark and under illumination. The inset shows a semilogarithmic plot of the performance of the sample cell in the dark and under illumination, (b) IPCE spectra of the reference and sample cells, (c) polarization-dependent J - V characteristics of the PSCs under polarized illumination.

다음으로, 기준 고분자 태양전지 소자와 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자의 입사광의 편광 상태에 따른 전류 밀도-전압 특성을 관찰하였다. 기준 고분자 태양전지에 임의의 방향으로 편광된 빛이 입사한 경우 J_{sc} , V_{oc} , FF는 각각 2.00 mA/cm², 0.62 V, 및 0.67%

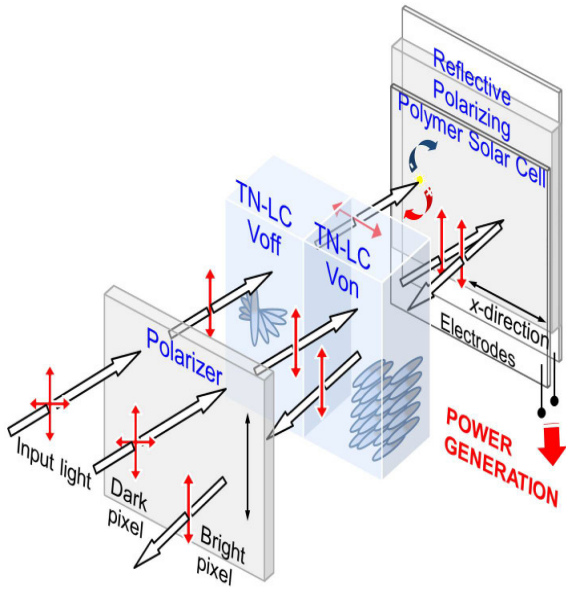


Fig. 4. Structure of the reflective solar-LCD pixels (dark and bright), consisting of a linear sheet polarizer, TN-LC pixels, and a reflective polarizing PSC with the normal black mode configuration.

로 얻어진 광전 변환 효율은 3.19%이었다. 또한 기준 고분자 태양전지 소자에 수직 방향으로 편광된 빛이 입사한 경우 J_{sc} , V_{oc} , FF는 각각 1.99 mA/cm^2 , 0.62 V , 및 0.67% 로 광전 변환 효율은 3.16%이었다. 그러므로, 기준 고분자 태양전지 소자의 경우 입사광의 편광 상태와 거의 무관하게 동일한 광전 변환 특성을 발현하는 것을 알 수 있다. 반면, 편광 흡수성 고분자 태양전지 소자에 러빙 방향과 평행한 방향으로 편광된 빛이 입사한 경우, J_{sc} , V_{oc} , FF는 각각 1.81 mA/cm^2 , 0.62 V , 및 0.50% 로 광전 변환 효율은 2.13%이었다. 또한 편광 흡수성 고분자 태양 전지 소자에 러빙 방향과 수직 방향으로 편광된 빛이 입사한 경우, J_{sc} , V_{oc} , FF는 각각 1.30 mA/cm^2 , 0.58 V , 및 0.46% 로 광전 변환 효율은 1.34%이었다. 따라서, 러빙 방향과 평행한 방향으로 편광된 입사광은 수직 방향으로 편광된 빛이 입사한 경우에 비해 약 1.59배 큰 광전 변환 효율을 보인다.

다음으로, 편광 흡수성 고분자 태양전지를 기존의 반사형 액정 디스플레이의 편광자로 사용하여 전기 에너지를 생산하는 solar-LCD를 제작하여 그 특성을 평가하였다. 그림 4는 TN 액정셀과 편광자, 그리고

편광 흡수성 고분자 태양전지를 조합한 반사형 solar-LCD의 구조이다.

반사형 solar-LCD의 편광 흡수성 고분자 태양전지의 배열 (러빙)축 방향에 따라 solar-LCD는 두 개의 작동 모드를 갖는다. 즉, 편광 흡수성 고분자 태양전지의 흡수광축과 시트 편광자의 투과축이 수직인 경우, solar-LCD는 NB 모드로 작동하게 된다. NB 모드에서 TN 액정셀에 전압을 인가하지 않은 경우(그림 4의 좌측 셀) 편광자를 통과하여 TN 액정셀에 도달한 편광 빛이 TN 액정셀을 통과하며 편광축이 90° 회전되어 편광 흡수성 고분자 태양전지의 흡수축과 평행하게 되어 광전 변환층에 흡수된다. 반면, TN 액정셀에 전압을 인가한 경우 (그림 4의 우측 셀) 전기장을 따라 액정이 배열되어 입사광의 편광 상태는 변하지 않는다. 따라서, 입사광은 광전 변환층에 흡수되지 않고 박막을 통과하여 알루미늄 전극에 도달하고 반사하게 된다. 따라서 solar-LCD의 TN 액정셀에 인가전압을 조절함으로써 빛의 편광상태를 조절할 수 있으며, 이를 통해 편광 흡수성 고분자 태양전지는 편광자로서의 기능과 더불어 태양전지로서의 역할도 동시에 수행할 수 있다.

그림 5(a)는 반사형 solar-LCD의 TN 액정셀 인가 전압에 따른 적색, 녹색, 청색 빛의 반사 세기 비율 (I_{ON}/I_{OFF})을 표기하였다. 인가전압이 2 V 이하의 경우 대부분이 어두운 상태를 갖으며, 따라서 명암비 (contrast ratio)는 거의 1에 가깝다. 그러나 전압이 그 이상으로 증가함에 따라 반사 비율이 급격하게 증가하며 이에 따라 명암비도 증가한다. 적색 광원 대역에서 최대 명암비는 1.7 정도로 측정되었으며, 청색, 녹색에서도 높은 명암비를 갖는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 편광 흡수성 고분자 태양전지를 이용한 반사형 solar-LCD를 응용한 시계의 NB 모드 작동 사진이다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이, 제작한 solar-LCD 시계는 우수한 편광성 및 대비비를 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 동시에 편광 흡수를 통하여 전기 에너지도 생산한다. 그림 5(b) 상단에 solar-LCD를 통해 생성된 전압을 나타내었다. 본 실험에서 제작된 편광 흡수성 고분자 태양전지는 일반적인 실내 ($250 \sim 500 \text{ lux}$)에서 약 $3 \sim 11 \text{ mW/cm}^2$ 의 전기 에너지를 생산할 수 있으며, 1 sun 태양빛에서 약 18 mW/cm^2 의 전기 에너지를 생산할 수 있다. 추후 배열성이 더욱 우수한 편광 흡수성 고분자 태양전지를 도입하고 사용한 액정셀의 조건을 최적화하면 더욱 우수한 편광 흡수성 solar-LCD 개발도 가능할 것으로 예상된다.

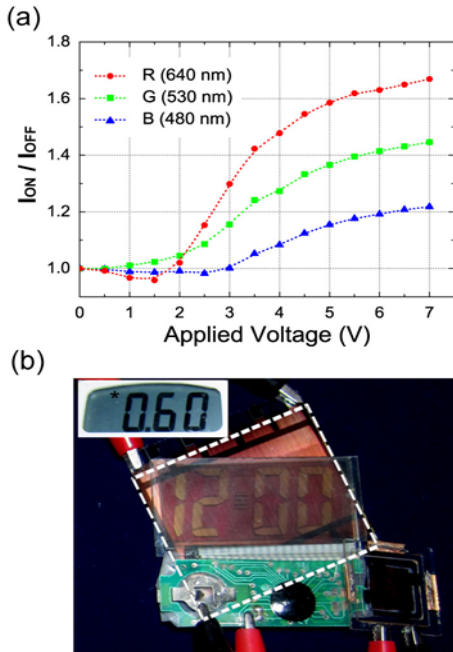


Fig. 5. (a) Voltage-dependent I_{ON}/I_{OFF} ratio of reflective solar-LCD in the normal black mode, (b) photograph of reflective solar-LCD in operation displaying “12:00” in the normal black mode using a reflective polarizing PSC (inside dotted square) under ambient room light illumination. The inset figure shows that the polarizing PSC generated electricity (*) from ambient illumination.

4. 결론

본 연구에서는, 기존 등방성의 P3HT:PCBM 광전 변환층에 단순한 러빙 방식을 적용하여 편광 흡수성을 부여하여 높은 편광 흡수비를 갖는 편광 흡수성 고분자 태양전지를 제작하였다. 이러한 편광 흡수성 고분자 태양전지는 광전 변환층의 P3HT 고분자의 주 사슬 방향이 러빙 축 방향으로 배열한 특성에 기인한 것으로, P3HT의 배열 질서도는 약 0.4 정도로 관측되었다. 또한 두 광축에 따른 광전 변환 효율 비율 측정을 통해 얻어진 고분자 태양전지의 비등방성은 1.59이다. 또한, 편광 흡수성 고분자 태양전지를 기존 액정 디스플레이에 적용하여 새로운 반사형 solar-LCD를 제작하였으며, 제작된 solar-LCD 소자의 대비비는 최대 1.7로 관측되었다. 따라서 고분자 태양전지의 광전 변환층을 배열하여 편광 흡수성을 부여함으로써, 기존의 태양전지의 역할과 동시에 편광자로서의 역할이 가능한 신개념의 태양전지를 제작하고 이를 구현할 수 있었다. 이를 기반으로 하여 추후 기존의 디스플레이와

태양전지의 개념을 융합한 하이브리드 타입의 새로운 광전소자들을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2012R1A2A2A01015654). 저자 중 김영찬은 광운대학교 지원(2011-2012년)을 받아 수행된 연구임. 이에 감사함.

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] Y. Liang, Z. Xu, J. Xia, S. T. Tsai, Y. Wu, G. Li, C. Ray, and L. Yu, *Adv. Mater.*, **22**, E135 (2010).
- [7] H. Y. Chen, J. Hou, S. Zhang, Y. Liang, G. Yang, Y. Yang, L. Yu, Y. Wu, and G. Li, *Nat. Photonics*, **3**, 649 (2009).
- [8] F. C. Krebs, S. A. Gevorgyan, and J. Alstrup, *J. Mater. Chem.*, **19**, 5442 (2009).
- [9] X. L. Chen, A. J. Lovinger, Z. Bao, and J. Sapjeta, *Chem. Mater.*, **13**, 1341 (2001).
- [10] H. Sirringhaus, T. Kawase, R. H. Friend, T. Shimoda, M. Inbasekaran, W. Wu, and E. P. Woo, *Science*, **290**, 2123 (2000).
- [11] P. Dyreklev, G. Gustafsson, O. Inganäs, and H. Stubb, *Synth. Met.*, **57**, 4093 (1993).
- [12] B. Park, Y. H. Huh, and J. C. Shin, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **95**, 3543 (2011).
- [13] E. H. Land, *J. Opt. Soc. Am.*, **41**, 957 (1951).
- [14] A. S. Makas, *J. Opt. Soc. Am.*, **52**, 43 (1962).
- [15] Y. I. Lee, M. Kim, Y. H. Huh, J. S. Lim, S. C. Yoon, and B. Park, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **94**, 1152 (2010).
- [16] J. Chen and H. S. Kwok, *SID 01 Digest*, **32**, 874 (2001).