

태양전지 장기 안정성 확보를 위한 Thin Film Encapsulation 코팅 연구

전민주 · 서지연[†]

부산대학교 나노융합기술학과

(2022년 10월 27일 접수, 2022년 11월 11일 수정, 2022년 11월 11일 채택)

Study on Thin Film Encapsulation Coating for Long-term Stable Organic Solar Cells

Minju Jun and Ji-Youn Seo[†]

Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received October 27, 2022; Revised November 11, 2022; Accepted November 11, 2022)

초록: 본 연구에서는 PBDB-T:ITIC로 만들어진 유기태양전지 소자에 원자층증착법(ALD)를 통하여 aluminum oxide(Al_2O_3)와 zirconium dioxide(ZrO_2)를 이용하여 thin film encapsulation(TFE)를 하였다. 소자의 장기 안정성 평가 결과 TFE를 처리한 소자는 그렇지 않은 소자 대비 120시간 동안 100% 안정한 성능을 보였다. 비록 80 °C에서의 ALD 공정 후, 태양전지 소자 성능이 다소 감소했지만 장기 안정성 측면에서는 매우 우수한 특성을 보였다. 또한 TFE는 안정성 향상 효과 외에도 저반사코팅(ARC)과 같이 태양전지에 입사되는 빛의 투과도 향상 효과를 보인다. 이는 TFE 코팅 기술이 향후 태양전지의 안정성과 성능 향상 모두에 기여할 수 있는 가능성을 보여준다.

Abstract: In this study, thin film encapsulation (TFE) of aluminum oxide (Al_2O_3) and zirconium dioxide (ZrO_2) deposited by atomic layer deposition (ALD) was applied on an organic solar cell device composed of PBDB-T:ITIC. To evaluate the long-term stability of the device, the maximum power point tracking (MPPT) test was conducted under illumination. As a result, the encapsulated device showed 100% stable performance for 120 hours compared to the device without TFE. Although the solar cell device performance decreased slightly after ALD process treatment due to thermal damage of hole transport layer (HTL), it showed very good characteristics in terms of long-term stability. In addition to the stability improvement effect, the TFE film also shows the effect of improving the transmittance of light incident on the solar cell, such as anti-reflection coating (ARC). This shows the possibility that TFE coating technology can contribute to both stability and performance improvement of solar cells in the future.

Keywords: atomic layer deposition, thin film encapsulation, long-term stability, organic solar cells.

서 론

최근 급증하는 에너지 수요를 충족하기 위해 무분별하게 사용되고 있는 화석연료로 인한 환경오염, 기후변화 그리고 에너지 고갈 등과 같은 문제들이 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 전 세계적으로 재생에너지의 사용이 확대되고 있으며 대표적인 재생에너지원으로는 태양에너지 기술이 있다. 우리나라에서는 주로 태양전지를 이용하여 태양광으로부터 전기를 생산하는 태양광 에너지가 사용되며, 대표적인 태양전지로는 실리콘 태양전지가 있다. 하지만 실리콘 태양전지의 효율 정체와 불투명성, 비유연성 등의 단점으로 제품 활용이 옥외 발전용으로 주로 사용되어 다른 제품으

로 응용이 매우 국한적이다.

반면, 고분자의 전자주개 물질과 단분자의 전자받개 물질로 이루어진 유기태양전지(organic photovoltaic, OPV)는 다양한 색과 투명성, 유연성을 구현할 수 있으므로 창문(building integrated photovoltaic, BIPV), 소형 전자제품(internet of things, IoT), 입을 수 있는 소자(wearable device) 등 다양한 응용분야에 적용 가능하기 때문에 사람들에게 많은 관심을 받고 있다.¹

하지만 이러한 우수한 특성에도 불구하고 유기 태양전지의 상용화는 실리콘 태양전지 대비 더딘 것이 현실이다. 대표적인 이유는 자외선과 수분, 산소에 의해 쉽게 변질되어 장기 안정성이 취약하다는 단점 때문이다. 유기태양전지의 구조는 양 전극 사이에 정공전달층(hole transport layer, HTL), 광활성층(active layer, AL), 전자전달층(electron transport layer, ETL)이 수십 나노미터 두께로 코팅되어 있는 박막 형태로 구

[†]To whom correspondence should be addressed.
j-y.seo@pusan.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-0473-1279
©2023 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

성되어 있다. 각 층을 이루는 물질들 중 특히 태양전지 성능을 결정하는 광활성 물질들이 수분과 산소에 장기 노출 시 물성이 변하게 되고 이는 태양전지 성능을 저하시키게 된다. 따라서 성능 저하 방지 차원에서 광활성층에 수분과 산소가 침투되는 것을 방지하기 위해 봉지재(encapsulation)가 사용된다. 태양전지에 가장 많이 사용되고 있는 봉지재로는 ethylene vinyl acetate(EVA)와 유리, 접착제를 이용한 방법이 주로 사용되고 있다.^{2,3}

최근에는 유기태양전지와 구조가 유사한 유기발광다이오드(organic light emitting diodes, OLED) 제품에 사용되고 있는 thin film encapsulation(TFE)도 태양전지에 적용되고 있다. TFE는 나노미터 수준의 박막형 봉지재로 박막의 밀도가 매우 높기 때문에 우수한 water vapor transmission rate(WVTR) 수치를 구현한다. 또한 유연성을 유지할 수 있다는 장점이 있다. 나노미터 수준의 박막을 증착해야 하기 때문에 원자층 증착법(atomic layer deposition, ALD)이 주로 사용된다.^{4,9}

ALD를 이용한 대표적인 TFE는 Al_2O_3 와 ZrO_2 을 이중(dyad) 다층구조로 코팅하는 방법이 있다. 층의 개수가 많아질수록 수분과 산소 차단 효과가 좋아지지만 두꺼워진 무기물 층에 의해 유연성이 저하되고 외부의 기계적 충격에 의해 균열이 생길 수 있다는 단점이 있다. 나노미터 두께의 Al_2O_3/ZrO_2 층이 여러 번 반복되어 코팅되어 형성된 TFE는 8.5×10^{-5} g/m²/day 이하의 수분가스 침투 차단 성능을 나타낸다. 이는 주로 수분에 매우 취약한 OLED에 응용되고 있으며, 최근에는 수분에 취약한 페로브스카이트 태양전지에도 적용하는 연구들도 보고되고 있다. 반면 최근 개발되고 있는 새로운 유기태양전지에는 많은 연구가 되지 않고 있다.¹⁰

따라서, 본 연구에서는 최근 보고된 유기태양전지물질들 중 투명성과 효율 측면에서 우수한 성능을 보이는 poly[(2,6-(4,8-bis(5-(2-ethylhexyl)thiophen-2-yl)-benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene))-alt-(5,5-(1',3'-di-2-thienyl-5',7'-bis(2-ethylhexyl)-benzo[1',2'-c:4',5'-c']dithiophene-4,8-dione))](PBDB-T), 3,9-bis(2-methyl-ene-(3-(1,1-dicyanomethylene)-indanone))-5,5,11,11-tetrakis(4-hexylphenyl)-dithieno[2,3-d:2',3'-d']-s-indaceno[1,2-b:5,6-b']dithiophene(ITIC)를 광활성층으로 사용하여 유기태양전지 소자를 만들고, 만들어진 소자를 Al_2O_3/ZrO_2 TFE막을 전면, 후면 전극면에 증착하여 장기안정성에 대한 연구를 수행하였으며, 동시에 TFE 코팅이 빛이 들어오는 투명전극 indium tin oxide(ITO)에 코팅되었을 때 특정 파장대에서 기존의 ITO대비 높은 빛 투과도를 보여 향후 저반사코팅막(anti-reflective coating, ARC)으로서의 가능성을 확인하였다.^{11,12}

실 험

시약 및 재료. 본 연구에서 사용된 투명전극기판 ITO는

AMG사(한국)의 면저항 10Ω 제품을 사용했으며, 정공전달물질로 Clevios사(독일)의 Al4083 제품 poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate)(PEDOT: PSS)을 사용했으며, 광활성 물질은 1-Material사(캐나다)의 PBDB-T, ITIC 그리고 poly[[2,7-bis(2-ethylhexyl)-1,2,3,6,7,8-hexahydro-1,3,6,8-tetraoxobenzo[1mn][3,8]phenanthroline-4,9-diy]-2,5-thiophenediy][9,9-bis[3'((N,N-dimethyl)-N-ethylammonium)]-propyl]-9H-fluorene-2,7-diy]-2,5-thiophenediy](PNDIT-F3N-Br)을 전자전달물질로 추가 정제없이 사용하였다.

유기 태양전지 소자 제작. 태양전지 소자의 구조는 Figure 1과 같이 정구조(p-i-n) 형태로 $2.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 투명전극 ITO 기판 위에 PEDOT:PSS 원액을 희석 없이 3000 rpm으로 60초간 스핀코팅을 하고 상온 대기 조건에서 150°C 로 1시간 열처리를 한다. 광활성층은 PBDB-T와 ITIC을 클로로벤젠(chlorobenzene)에 1:1로 녹여 교반한 용액을 3000 rpm 60초로 스핀코팅 후 30분간 진공 건조하였다. 이후 전자전달층 용액을 4000 rpm 30초로 스핀코팅하고 열증착기를 이용하여 100 nm 두께의 Ag(은) 전극을 코팅하였다.

박막 증착. 본 연구에서는 소자의 안정성을 확보하기 위해 Figure 1(a)과 같이 Ag와 ITO 전극 위와 아래에 Al_2O_3 , ZrO_2 각각 한 층씩 코팅하였다. TFE 두께를 확인하기 위해 단면 scanning electron microscope(SEM)을 관찰한 결과 Figure 1(b)와 같이 HTL, AL, ETL, Ag 모두 균일하게 코팅되었다. Ag 전극 위에 약 20 nm 두께의 박막이 형성된 것을 확인할 수 있었으며, 같은 두께의 막이 ITO유리 후면에도 형성되었을 것으로 예상된다. Cambridge Nanotech사(미국)의 Savannah 100 atomic layer deposition (ALD) 장비를 이용하였다. 고순도 질소를 캐리어 가스로 20 sccm 속도로 흘려 사용하였으며, Al_2O_3 코팅을 위해서는 TMA 프리커서를 0.3초-20초 대기-수분 0.03초 펄스, ZrO_2 코팅을 위해서는 TDMAZr 프리커서를 0.015초-60초 대기-수분 0.015초 펄스로 각각 반응시켰으며 각각 10 nm 두께 코팅을 위해 20번씩 반복하여 박막을 제작하였다. 반응 온도는 유기 태양전지의 손상을 최소화하기 위해 80°C 로 설정하였다.

소자 성능 측정 및 분석. 제작된 소자는 솔라 시뮬레이터 Sol3A class AAA(Newport, 미국)를 이용하여 AM 1.5G, 100 mW/cm^2 조건에서 $J-V$ 특성을 측정하였다. 장기안정성

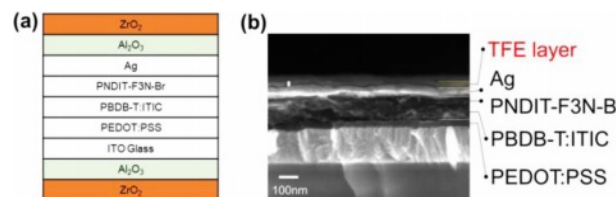


Figure 1. (a) OPV device architecture with TFE encapsulation layer; (b) Cross-sectional SEM image of OPV device with TFE layer.

분석은 Cicciresearch사(이탈리아)의 AREKO maximum power point tracking(MPPT) 장비를 이용하여 LED 100 mW/cm², maximum power point tracking 방법으로 측정하였다. 투과도 (transmittance) 측정을 위해서는 UV-VIS EVOLUTION 300 spectrometer(Thermo scientific, 미국)를 이용하여 측정하였다. 소자 단면 관찰을 위해서는 Zeiss사(독일)의 Merlin SEM을 이용하였다.

결과 및 토론

소자 성능. PBDB-T:ITIC를 이용하여 제작된 소자는 평균 14% 이상의 효율을 보였다. Figure 1(b)에서도 볼 수 있듯이 ALD를 이용하여 80 °C에서 TFE 처리를 한 이후에도 후면 ITO에서 관찰했을 때, 기존의 태양전지 박막에 손상 없이 코팅이 잘 된 것을 확인할 수 있었다. 180 °C 전후에서 유리전이 온도를 갖는 PBDB-T:ITIC 광활성층은 TFE반응 온도 80 °C에서 안정하기 때문에 색 변화 또한 발견되지 않았다.¹³

TFE 처리를 하기 전 소자 제작 직후 솔라 시뮬레이터를 이용하여 측정한 결과는 Table 1과 Figure 2와 같다. 본 연구에서 제작된 소자 또한 특히 개방전압(open-circuit voltage, V_{oc})과 충전율(fill factor, FF)에서 TFE 처리 전에 비해 다소 손실을 보인다. 이는 80 °C 이하 온도에서 유리전이 온도를 갖는 PEDOT:PSS가 장시간 열에 노출되어 물성이 변하면서 소자 성능 저하에 영향을 준 것으로 판단된다.¹⁴

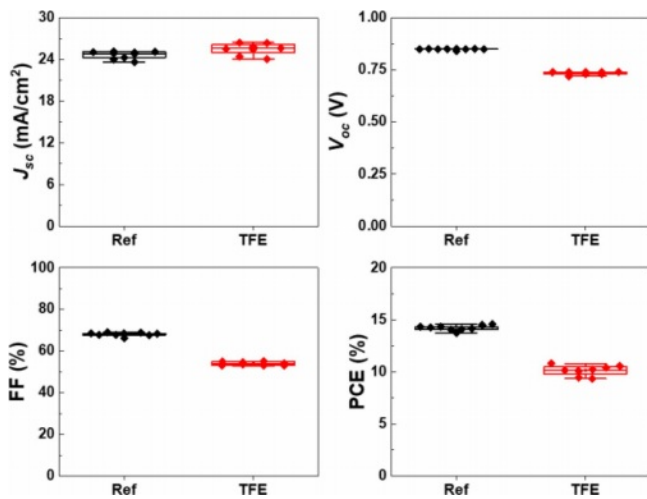


Figure 2. Statistical photovoltaic parameters of OPV devices with and without TFE.

Table 1. Summary of Photovoltaic Parameters

Condition	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)	PCE (%)
Reference	24.65	0.85	68.08	14.23
TFE	25.48	0.74	54.00	10.13

장기 안정성. TFE이 제작된 유기 태양전지 장기 안정성에 기여하는지를 판단하기 위해 LED 1 sun 조건에서 MPPT 테스트를 진행하였다. 소자는 TFE 외에 추가적인 봉지 처리는 하지 않았다. TFE의 효과를 비교하기 위해 TFE 처리를 하지 않은 소자도 함께 측정하였다. 소자는 추가적인 환경 조건 조절 없이 상온 조건에서 LED 광원에 노출되었으며 LED 광원에 의해 소자의 측정 주위 포화 온도는 50-60 °C 사이로 측정되었다. MPPT 측정 결과 Figure 3과 같은 결과를 얻었다. 수분과 산소에 취약한 유기태양전지는 광에 노출 시 저하가 더 빠르게 진행되어 120시간이 되었을 때 완전 구동이 멈췄다. 반면, TFE를 처리한 소자의 경우 ALD TFE 코팅 공정에 의해 초기 열에 의한 손실은 있었으나 수분과 산소 차단에 의해 120시간이 지나도 초기 성능을 100% 유지하며 성능이 저하되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해서, 유기태양전지의 성능 저하는 열보다는 수분과 산소에 의해 영향을 더 받는다는 것을 알 수 있었다. 흥미로운 사실은 TFE

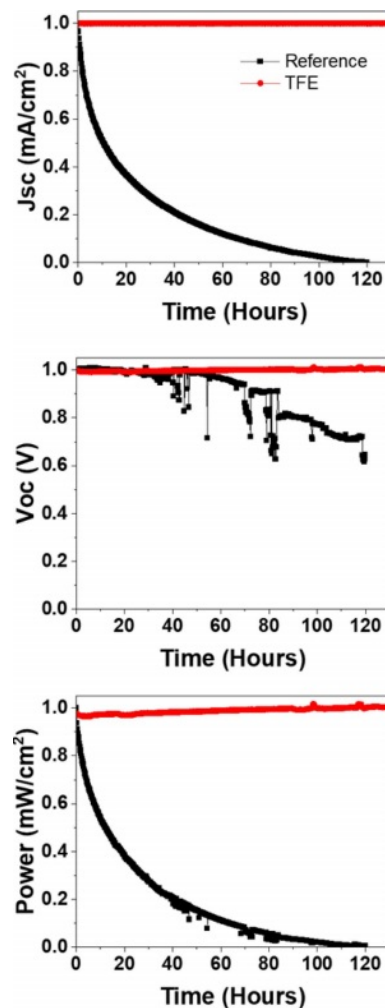


Figure 3. Long-term stability of OPV devices with and without TFE.

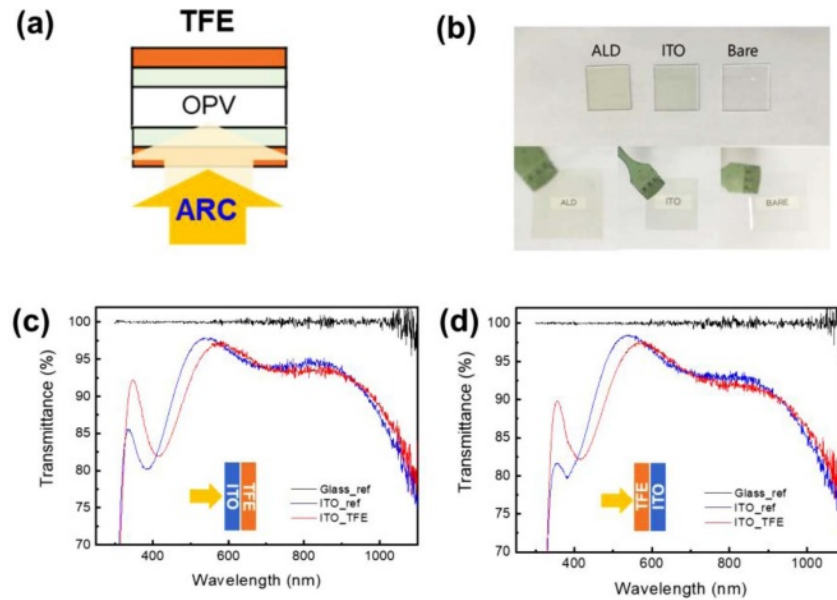


Figure 4. (a) Structure of OPV device with dual side TFE; (b) Pictures of ALD TFE treated ITO (left), reference ITO (middle) and bare soda-lime glass (right); (c) Transmittance of ITO with TFE measured from ITO side; (d) Transmittance of ITO with TFE measured from TFE layer side.

를 처리한 소자에서 오히려 약간의 성능 향상을 보인다는 것이다. 특히 ALD TFE 처리 중에 떨어진 V_{oc} 가 구동 중에 회복하는 것으로 보인다.

광학 특성. 소자 성능 측정 결과 ALD TFE 처리 후 태양 전지 성능 중 전류는 상대적으로 증가한 것을 확인할 수 있었다. 성능이 향상된 이유를 찾기 위해 Figure 4(a)와 같이 투명전극 ITO의 유리면과 ITO 전극 면에 양쪽 모두 TFE 코팅을 하였다. 그 결과 Figure 4(b)와 같이 TFE가 처리된 ITO 샘플에서 글씨가 더 또렷하게 보이는 것을 확인할 수 있었다. 조금 더 자세히 투과도 변화를 확인하기 위해 ITO의 유리면과 ITO면, 각 한 면에만 TFE를 처리를 한 후 UV-vis 분광계를 이용하여 투과도를 측정하였다. 그 결과 Figure 4(c)와 (d)와 같이 투과도 그래프에 변화가 생긴 것을 관찰할 수 있었다. 두 결과 모두 코팅에 의해 특정 파장의 투과도가 코팅하지 않은 기존의 ITO 대비 향상된 것을 볼 수 있다. 빛이 ITO 쪽으로 들어올 경우 전체적인 투과도 파장이 장파장 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. TFE 쪽에서 빛이 들어올 경우 300-400 nm 영역에서는 파장의 이동이 크게 관찰되지 않았으며 투과도가 더 크게 향상되었다. 태양전지를 구동 시키기 위해서는 유리면 쪽에서의 빛이 입사되고 들어오는 입사량이 증가할수록 전류 세기와 소자의 전력 생산량이 증가하기 때문에 이러한 투과도 향상 효과는 태양전지 소자 성능에 매우 유리하다. 정확한 투과도 증가량과 향후 투명 태양전지로의 가능성을 검토하기 위해 아래의 식을 이용하여 파장별로 average visible transmittance(AVT) 값을 계산하여 Table 2에 정리하였다.

Table 2. AVT of ITO with and without TFE

Range (nm)	Reference (Bare ITO)	TFE ITO	Δ AVT (TFE-Ref)
300-400	79.81	83.36	+3.55
300-600	90.00	89.26	-0.74
300-1100	90.38	90.50	+0.12

$$AVT = \frac{\text{Integral}(\text{transmittance} \times \text{wavelength})}{\text{Integral}(\text{wavelength})} \quad (1)$$

파장 영역별로 계산된 AVT 값을 보면 대부분의 유기태양 전지 전자주개 고분자 물질과 페로브스카이트의 흡광 파장 영역인 300-400 nm 영역에서 기존 ITO 기판 대비 투과도가 3.55% 향상된 것을 확인할 수 있다. 이와 유사한 원리로 400-700 nm 영역의 흡광 파장을 갖는 전자주개의 고분자 물질인 PBDB-T를 사용했을 때, TFE 직후 열에 의해 소자 성능 중 V_{oc} 와 FF는 저하되었지만 Ag 전면 전극 쪽에서 들어오는 빛의 양의 증가로 J_{sc} 가 비교적 향상된 것으로 보인다. 전체 300-1100 nm 영역을 기준으로 계산했을 때도 430-600 nm 영역의 손실을 고려하더라도 전체적으로 0.12%가 향상된 값을 보인다. 이 결과는 향후 300-400 nm 영역에서 강한 흡광 특성을 보이는 광활성 물질을 이용하여 태양전지 소자를 만들 때 장기 안정성 확보를 위한 TFE를 전면과 후면, 양쪽 모두에 코팅하여 수분과 산소의 침투를 방지할 뿐만 아니라 ARC 효과로 광활성층까지 도달하는 입사량 또한 증가시켜 태양전지의 효율을 향상시키는데 응용할 수 있다. ARC 효

과를 향상시키기 위해서는 TFE의 소재와 층 수, 두께를 달리하여 굴절률과 ARC 효과를 조절하는 추가적인 연구가 필요하다.

결 론

본 연구에서는 최근 개발된 고효율 유기태양전지 PBDB-T:ITIC의 장기 안정성 확보를 위한 TFE를 적용하여 유기태양전지 소자를 제작하고 평가하였다. Al_2O_3 와 ZrO_2 를 thermal ALD를 이용하여 20 nm 수준으로 소자를 봉지하였으며, 그 결과 유기 태양전지 소자를 120시간 동안 1 sun 조건에서 MPPT 분석결과 초기 성능 대비 100% 성능을 유지하였다. 반면 TFE 처리하지 않은 소자의 경우 120시간 뒤 완전히 구동을 멈췄다. 또한 TFE가 안정성을 위한 봉지재로서의 역할 뿐만 아니라 빛의 투과율을 향상시키는 ARC 역할도 동시에 할 수 있음을 확인하였다. 특히 전자주개 물질들의 흡광 영역인 300-400 nm에서 기존 ITO 기판 대비 3.55%의 투과도 향상을 보였다. 이는 추후에 TFE가 ARC 코팅 또는 투명태양전지기술 개발에 활용될 수 있는 가능성을 보여준다. 새로운 박막 소재와 증착 공정조건의 추가적인 연구를 통해 TFE가 유연하고 투명한 유기태양전지의 개발에 기여할 수 있는 기술이 될 것으로 사료된다.

감사의 글: 이 과정은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

이해상충: 저자는 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

1. Wu, J.; Gao, M.; Chai, Y.; Liu, P.; Zhang, B.; Liu, J.; Ye, L. Towards a Bright Future: The Versatile Applications of Organic Solar Cells. *Mater. Reports Energy* **2021**, *1*, 100062.
2. Burlingame, Q.; Ball, M.; Loo, Y. L. It's Time to Focus on Organic Solar Cell Stability. *Nat. Energy* **2020**, *5*, 947-949.
3. Kojima, T.; Yanagisawa, T. The Evaluation of Accelerated Test for Degradation a Stacked A-Si Solar Cell and EVA Films. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2004**, *81*, 119-123.
4. Zhang, H.; Ding, H.; Wei, M.; Li, C.; Wei, B.; Zhang, J. Thin Film Encapsulation for Organic Light-Emitting Diodes Using Inorganic/Organic Hybrid Layers by Atomic Layer Deposition.

5. Meyer, J.; Görrn, P.; Bertram, F.; Hamwi, S.; Winkler, T.; Johannes, H. H.; Weimann, T.; Hinze, P.; Riedl, T.; Kowalsky, W. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ Nanolaminates as Ultrahigh Gas-diffusion Barriers Strategy for Reliable Encapsulation of Organic Electronics. *Adv. Mater.* **2009**, *21*, 1845-1849.
6. Seo, S. W.; Jung, E.; Chae, H.; Cho, S. M. Optimization of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ Nanolaminate Structure for Thin-Film Encapsulation of OLEDs. *Org. Electron.* **2012**, *13*, 2436-2441.
7. Oh, J.; Shin, S.; Park, J.; Ham, G.; Jeon, H. Characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ Laminated Films Deposited by Ozone-Based Atomic Layer Deposition for Organic Device Encapsulation. *Thin Solid Films* **2016**, *599*, 119-124.
8. Nehm, F.; Dollinger, F.; Klumbies, H.; Müller-Meskamp, L.; Leo, K.; Singh, A.; Richter, C.; Schroeder, U.; Mikolajick, T.; Hossbach, C.; Albert, M.; Bartha, J. W. Atomic Layer Deposited TiOx/AlOx Nanolaminates as Moisture Barriers for Organic Devices. *Org. Electron.* **2016**, *38*, 84-88.
9. Bulusu, A.; Behm, H.; Sadeghi-Tohidi, F.; Bahre, H.; Baumert, E.; Samet, D.; Hopmann, C.; Winter, J.; Pierron, O.; Graham, S. The Mechanical Reliability of Flexible ALD Barrier Films. *Dig. Tech. Pap. - SID Int. Symp.* **2013**, *44*, 361-364.
10. Choi, E. Y.; Kim, J.; Lim, S.; Han, E.; Ho-Baillie, A. W. Y.; Park, N. Enhancing Stability for Organic-Inorganic Perovskite Solar Cells by Atomic Layer Deposited Al_2O_3 Encapsulation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2018**, *188*, 37-45.
11. Li, S.; Ye, L.; Zhao, W.; Zhang, S.; Mukherjee, S.; Ade, H.; Hou, J. Energy-Level Modulation of Small-Molecule Electron Acceptors to Achieve over 12% Efficiency in Polymer Solar Cells. *Adv. Mater.* **2016**, *28*, 9423-9429.
12. Yao, L.; He, J. Recent Progress in Antireflection and Self-Cleaning Technology - From Surface Engineering to Functional Surfaces. *Prog. Mater. Sci.* **2014**, *61*, 94-143.
13. Paquin, F.; Rivnay, J.; Salleo, A.; Stingelin, N.; Silva, C. Multi-Phase Semicrystalline Microstructures Drive Exciton Dissociation in Neat Plastic Semiconductors. *J. Mater. Chem. C* **2015**, *3*, 10715-10722.
14. Son, H. J.; Park, H. K.; Moon, J. Y.; Ju, B. K.; Kim, S. H. Thermal Degradation Related to the PEDOT:PSS Hole Transport Layer and Back Electrode of the Flexible Inverted Organic Photovoltaic Module. *Sustain. Energy Fuels* **2020**, *4*, 1974-1983.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.