

용액 공정을 통한 그래핀 양자점 삽입형 유/무기 하이브리드 태양전지 제작

김영준, 박병남*
홍익대학교 신소재공학과

Graphene Quantum Dot Interfacial Layer for Organic/Inorganic Hybrid Photovoltaics Prepared by a Facile Solution Process

Youngjun Kim, Byoungnam Park*

Department of Materials Science and Engineering, Hongik University

요 약 최근 태양전지의 Donor/Acceptor 계면에 그래핀 양자점을 완충 층으로 삽입하여 광 전환 효율을 향상시킨 많은 연구 결과들이 보고되었다. 그래핀 양자점은 그래핀 단일 층이 여러 겹 쌓여서 구성된 수 나노미터 크기의 물질로, 양자 제한 효과에 의한 밴드갭 조절이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 대부분의 그래핀 양자점을 활용한 연구에서 레이저 분쇄나 수열 처리 등과 같은 복잡하고 접근성이 떨어지는 용액 공정들이 박막 형성에 사용되고 있다. 본 연구에서는 Indium tin oxide(ITO)/TiO₂/Poly(3-hexylthiophene)(P3HT)/Al 구조로 구성된 태양전지의 Donor/Acceptor 계면에 그래핀 양자점을 단순한 초음파 처리를 통해 용매에 분산시켜 박막 공정에 사용하였음에도 불구하고, 단락 전류를 1.26×10⁻⁵ A/cm²에서 7.46×10⁻⁵ A/cm²으로, 곡선인자(Fill factor)를 0.27에서 0.42로 향상된 결과를 확인하였다. 이러한 결과를 트랜지스터 구조의 소자를 활용한 전기적 성질 확인과 순환 전압-전류법을 통한 에너지 레벨 분석 및 가시광 흡수 스펙트럼 분석 등을 통하여 고찰하였다. 본 연구 결과를 통해 그래핀 양자점 용액 공정이 복잡한 처리 공정 없이도, 보다 폭넓게 활용 가능할 것으로 예상된다.

Abstract This paper reports that the electronic properties at a P3HT/TiO₂ interface associated with exciton dissociation and transport can be tailored by the insertion of a graphene quantum dot (GQD) layer. For donor/acceptor interface modification in an ITO/TiO₂/P3HT/Al photovoltaic (PV) device, a continuous GQD film was prepared by a sonication treatment in solution that simplifies the conventional processes, including laser fragmentation and hydrothermal treatment, which limits a variety of component layers and involves low cost processing. The high conductivity and favorable energy alignment for exciton dissociation of the GQD layer increased the fill factor and short circuit current. The origin of the improved parameters is discussed in terms of the broad light absorption and enhanced interfacial carrier transport.

Keywords : Buffer Layer, Graphene Quantum Dot, Interface, Photovoltaics, P3HT, Solar Cell, TiO₂

1. 서론

유/무기 하이브리드 태양전지는 무기물의 높은 유전율, 용액 공정을 통한 낮은 공정비용, 환경 친화성 등의

장점을 가지고 있어 차세대 태양전지로 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3]. 유/무기 하이브리드 태양전지에 사용되는 유기물 중에서, 전도성 고분자로 잘 알려진 P3HT는 좁은 밴드갭(~1.9 eV)에 따른 태양광 영역의 높

본 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구과제(No.2015R1A6A1A03031833)와 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구과제(No.2016R1D1A1B03933262)의 성과입니다. 또한 이 논문은 2018학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다.

*Corresponding Author : Byoungnam Park (Hongik Univ.)

Tel: +82-2-320-1631 email: metalpbn@hongik.ac.kr

Received April 5, 2018

Revised (1st May 2, 2018, 2nd May 16, 2018)

Accepted June 1, 2018

Published June 30, 2018

은 광 흡수와 용액 공정을 통한 박막 형성이 가능하다는 큰 장점을 갖고 있다[4]. 하지만 대부분의 유기물이 갖는 전기적 성질과 낮은 유전율 등의 한계 때문에 낮은 광 전환 효율이 문제로 대두되고 있다[5-7]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 표면 처리, 이온 도핑, 다공성 구조 제작 등 다양한 방법들이 연구되고 있다[8-9]. 위와 같은 방법들은 태양 전지에서 여기자가 분리되는 Donor/Acceptor 계면에서 전하의 분리와 이동을 개선하는 것에 목적을 두고 있다.

앞서 언급한 일련의 방법으로, 그래핀 양자점을 태양 전지의 Donor/Acceptor 계면에 완충 층으로 삽입하여 효율을 개선한 연구들이 여러 차례 보고되었다[10-11]. 그래핀 양자점은 그래핀 단일 층이 여러 겹 쌓여서 구성된 수 나노미터 크기의 물질로, 양자 제한 효과에 의한 밴드갭 조절이 가능하다는 장점을 가지고 있다[12]. 이와 더불어 그래핀 양자점은 탄소 기반의 물질로써, 친환정성과 다양한 화학적 처리 등의 활용이 가능하다는 장점을 갖고 있어 태양 전지, 발광 다이오드, 연료 전지 등 폭넓은 분야에서 그래핀 양자점에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[10, 13-14]. 하지만 그래핀 양자점이 대부분의 용매에 대하여 분산성이 낮아, 용액 공정으로 활용함에 있어 균일한 박막 형성이 어렵다. 이를 개선하기 위하여 레이저 분쇄, 수열 합성, 전기 분해 등 다양한 방법들을 이용하고 있지만 공정의 복잡함과 수득률에 한계가 있다[15-16]. 본 연구에서는 그래핀 양자점을 단순한 초음파 처리로 분산하여 용액 공정에 사용하였음에도 불구하고 그래핀 양자점 삽입에 따라 태양전지의 단락 전류와 곡선 인자가 향상된 결과를 확인하였으며, 그 이유를 그래핀 양자점의 전기 전도도, 에너지 레벨 및 흡광 스펙트럼 분석을 통하여 고찰하였다.

2. 본론

2.1 완충 층의 역할 및 개요

태양전지는 Donor 층에서 태양광을 흡수하여 생성된 여기자는 확산하여 Donor/Acceptor 계면에서 전자와 정공으로 분리되어 이동하면서 기전력이 발생된다. 따라서, Donor/Acceptor 계면은 여기자의 분리가 일어나는 계면으로 태양전지의 성능을 결정짓는 핵심이 되는 위치이다. 본 연구에서는 앞서 언급한 Donor/Acceptor 계면

에 여기자의 분리와 전하의 이동 및 전달을 돕기 위하여, 그래핀 양자점을 완충 층으로 삽입하였다.

종래의 그래핀 양자점을 완충 층으로 활용한 연구에서는 그래핀 양자점을 레이저 분쇄, 전기 분해 등과 같은 복잡한 공정을 통해 사용하였다[15-16]. 이는 그래핀 양자점의 낮은 분산성 때문에 균일하지 못한 박막 형성으로 인하여 발생하는 전하의 트랩 등과 같은 부작용을 개선하고자 함이다. 하지만 본 연구에서는 그래핀 양자점이 갖는 높은 전기 전도도, Donor-Acceptor와의 적절한 에너지 레벨, 가시광 영역의 광 흡수 등에 주안점을 두어, 간단한 초음파 처리를 통한 용액공정으로 형성한 그래핀 양자점의 박막으로도 완충 층으로써 사용할 수 있음을 확인하였다.

2.2 실험방법

그래핀 양자점 합성을 위하여 그래핀 산화물(Graphene oxide) 시트 0.1 g을 농축된 황산 20 mL와 질산 60 mL에 담가 실온에서 20시간 동안 산화 처리한 후, 초음파 발생기를 사용하여 80°C에서 20시간 초음파 처리하였다. 이후, 배기가스 회수 장치가 설치된 노(Furnace)에서 350°C로 1시간 동안 소성하여 산을 제거하였다. 합성된 물질을 40 mL의 증류수에 분산시켰다. 이어서, 검은 현탁액을 미세 다공성 나일론 막(0.22 μm)을 통해 여과하여 갈색 용액을 수득 하였다. 이 용액을 투석봉(컷오프 분자량 2000 Da)에서 밤새 투석하여 그래핀 양자점을 얻었다. 최종적으로 수득한 그래핀 양자점의 크기는 4~5 nm 이다.

그래핀 양자점의 에너지 레벨을 알아보기 위하여 전기화학 셀(Electrochemical cell)을 구성하여 순환 전압-전류법 측정을 진행하였다. 구성된 전기화학 셀은 그래핀 양자점을 Drop casting한 Pt disc를 작업 전극으로, Pt wire를 상대 전극으로, 3.0 M Ag/AgCl을 기준 전극으로 사용하였다. 전해질은 TBAP(Tetrabutylammonium perchlorate)를 ACN(Acetonitrile)에 0.1 M 농도로 녹여 사용하였으며, 에너지 준위 환산은 2 mM 농도의 Ferrocene의 반파 전위를 통하여 계산하였다. 순환 전압-전류법 측정은 50 mV/s 의 전압 주사 속도로 IVIUM사의 Pocketstat을 이용하여 측정하였다.

태양전지 제작을 위하여 유리 위에 ITO가 증착된 기판을 아세톤-메탄올-증류수 순으로 초음파 세척기를 이용하여 각 10분씩 세척하여 사용하였다. Acceptor로 사

용한 TiO₂ 층은 0.1 M TIP(Titanium isopropoxide)가 Ethanol과 Acetic acid가 5:1 부피 비율로 섞여있는 용매에 분산된 용액을 마그네틱 바를 이용하여 1시간 동안 교반한 후, 2,000 rpm으로 60초 동안 스핀 코팅하여 형성하였다. 코팅된 박막은 150℃의 Hot plate 위에서 10분간 건조 시킨 후, 전기로를 이용하여 500℃(승온 속도:15℃/min)에서 30분간 소결하였다. 소결된 TiO₂ 층 위에 그래핀 양자점을 1,500 rpm으로 40초 동안 스핀 코팅하여 증착하였다. 전면 증착이 될 수 있도록, 위의 조건으로 5번 다중 코팅을 통해 그래핀 양자점 층을 형성하였다. 그래핀 양자점 용액은 1.5 mg/ml의 농도로 Ethanol에 30분간의 초음파 처리를 통하여 분산시켜 사용하였다. 이후, Ar 기체로 채워진 글러브 박스로 옮겨와 10 mg/ml 농도로 Chloroform에 분산된 P3HT 용액을 1,500 rpm으로 60초 동안 코팅하여 Donor 층을 형성하였다. 마지막으로 열 기상 증착법을 이용하여 Al 전극을 100 nm 증착하였다. 태양전지 활성 영역(Active area)이 0.09 cm²의 면적을 갖도록 제작하였다. 태양 전지의 전류-전압 특성은 글러브 박스 안에서 백색 광원을 이용하여 17 mW/cm²의 조사 강도 하에 HP4145B 모델의 Parameter analyzer를 사용하여 측정하였다. 그래핀 양자점 합성을 제외한 모든 물질은 Sigma-Aldrich사의 제품을 사용하였다.

2.3 결과 및 고찰

그래핀 양자점의 전기적 성질을 확인하기 위하여, 트랜지스터 구조를 이용해 측정된 그래핀 양자점 박막의 전류-전압 곡선을 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 그래핀 양자점의 크기는 5 nm 이하로 부피 대비 표면 비율이 높아 표면의 결함에 따른 전하의 트랩 등에 의한 낮은 전기 전도도가 예상되지만 Fig. 1에서 보듯이 상당히 높은 전기 전도도를 보인다. 또한 전압 주사 방향을 바꾸어 측정하여도 이력곡선(Hysteresis)이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로 미루어 보아, 그래핀 양자점은 수 nm의 입자임에도 불구하고 표면 결함에 의한 전하의 트랩에 의한 전기적 성질 저하가 상대적으로 적은 것으로 보인다.

딥 코팅 방법으로 형성된 그래핀 양자점 박막의 AFM(Atomic force microscopy) 결과를 Fig.2에 나타내었다. 딥 코팅으로 형성된 박막이 균일한 층 형태가 아닌 입자들이 응집된 3차원 형태로 성장하였음을 이미지를 통해 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용된 그래핀 양

자점 용액은 초음파 처리만을 통해 용해하여 분산성이 높지 않고 일부 응집되는 현상을 보였다.

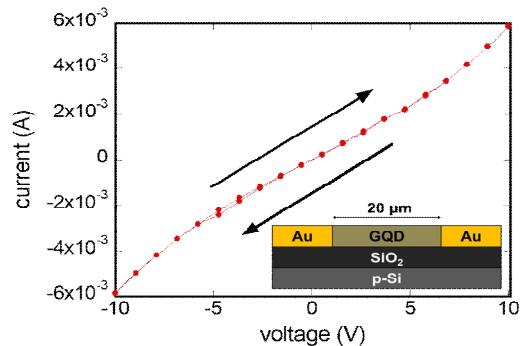


Fig. 1. The current-voltage curves of a graphene quantum dot(GQD) film. The inset shows a schematic diagram of the test device structure. (width : 5 mm, length : 20 μm)

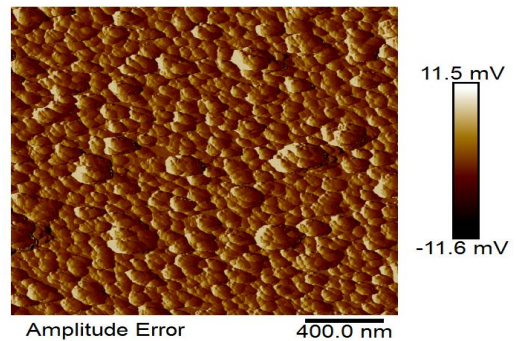


Fig. 2. AFM image of GQD film on the SiO₂ substrate.

그래핀 양자점의 에너지 레벨 분석을 위하여, 순환 전압-전류법을 통해 측정된 전압-전류 곡선을 Fig. 3(a)에 나타내었다. 그래핀 양자점의 산화에 대한 Onset 전위는 Ag/AgCl 기준 전극에 대하여 1.24 V, 환원에 대한 Onset 전위는 Ag/AgCl 기준 전극에 대하여 -1.16 V에서 나타났다. 그래핀 양자점의 Onset 전위를 진공 에너지 준위를 기준으로 하는 HOMO(Highest occupied molecular orbital)와 LUMO(Lowest unoccupied molecular orbital) 준위를 환산하기 위하여 Ferrocene의 반파 전위를 측정 한 그래프를 Fig. 3(b)에 표시하였다. Ferrocene의 반파 전위인 0.44 V는 진공 속 자유 전자의 에너지 준위(0 eV)를 기준으로 -4.8 eV에 해당하므로, 순환 전압-전류법을 통해 계산된 그래핀 양자점의 HOMO 에너지 준위는 -5.6 eV, LUMO 에너지 준위는 -3.2 eV이다. [17-18]

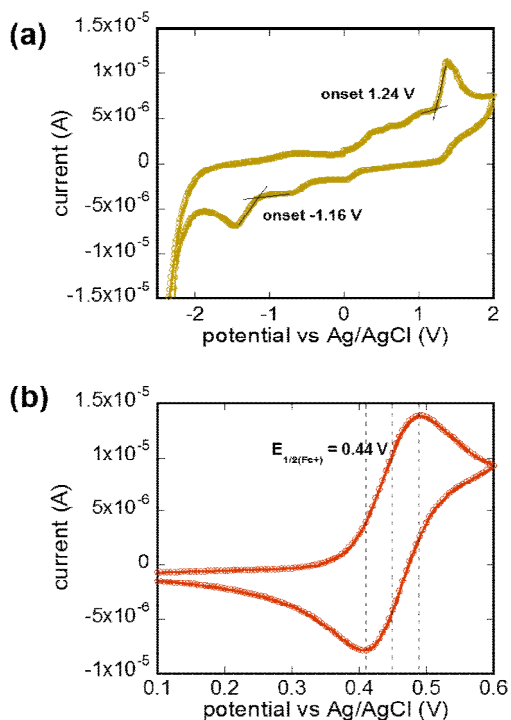


Fig. 3. Cyclic voltammogram of GQD (a) and ferrocene (b) obtained at potential scan rate of 50 mV/s.

그래핀 양자점의 광 흡수 영역을 알아보기 위하여 측정된 그래핀 양자점 용액의 자외선-가시광선 흡광 스펙트럼을 Fig. 4(a)에 표시하였다. 그래핀 양자점은 파장이 짧을수록 흡광도가 증가하는 경향을 보이며, 가시광 영역에서 흡수가 일어남을 알 수 있다. Fig. 3에서 계산된 그래핀 양자점의 에너지 레벨을 기반으로, 그래핀 양자점 층이 삽입된 P3HT 태양 전지의 에너지 레벨 모식도를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 그래핀 양자점의 HOMO 레벨은 -5.6 eV, LUMO 레벨은 -3.2 eV로, 전자친화도와 이온화 에너지가 P3HT보다 크고 TiO_2 보다 낮은 위치에 있어, Fig. 4(a)의 흡광 스펙트럼으로 확인된 그래핀 양자점의 가시광 영역의 광 흡수가 전류로 변환될 수 있다. 따라서, 그래핀 양자점이 완충 층 역할뿐만 아니라 광 흡수 층으로도 역할을 할 수 있음을 알 수 있다.

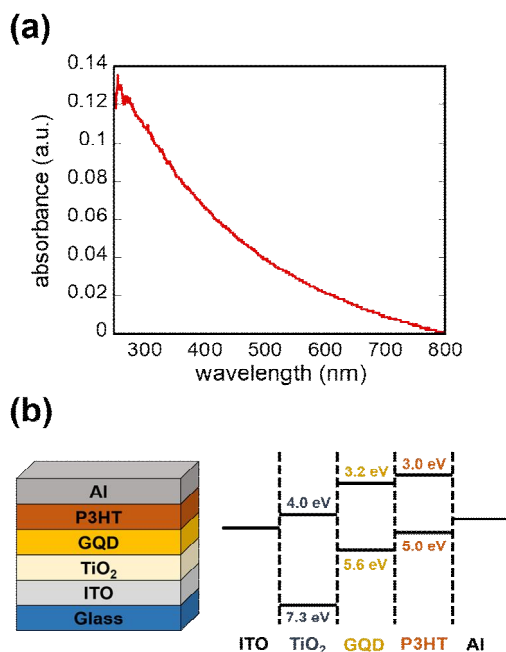


Fig. 4. (a) Ultraviolet-visible absorption spectra of GQDs. (b) Device structure and energy diagram of P3HT/GQDs/ TiO_2 solar cell.

그래핀 양자점 층의 삽입 여부에 따른 P3HT/ TiO_2 태양 전지의 전류-전압 곡선 그래프를 Fig. 5에 표시하였다. 그래핀 양자점이 삽입되지 않은 시편의 개방 전압은 -0.27 V, 단락 전류는 1.26×10^{-5} A/cm², 곡선 인자는 0.27이고 그래핀 양자점이 삽입된 시편의 개방 전압은 -0.28 V, 단락 전류는 7.46×10^{-5} A/cm², 곡선 인자 0.42이다. 그래핀 양자점이 TiO_2 와 P3HT 계면에 그래핀 양자점이 삽입됨에 따라 개방 전압은 일정하게 유지되고 곡선 인자와 단락 전류가 크게 향상되었음을 확인할 수 있다. 이처럼 P3HT와 TiO_2 계면에서 그래핀 양자점이 낮은 분산성으로 인하여 계면 결함 형성 요인이 될 수 있음에도 불구하고 태양 전지 효율이 개선되었다는 점은 매우 놀라운 결과이다. 이러한 결과는 앞서 전류-전압 곡선 측정 결과와 흡광도 스펙트럼에서 확인된 그래핀 양자점의 높은 전기전도도와 추가적인 태양광 흡수 때문으로 보인다.

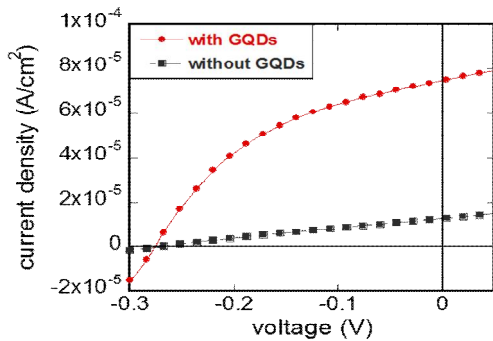


Fig. 5. Current density-voltage curves of the P3HT/TiO₂ solar cell with and without GQDs.

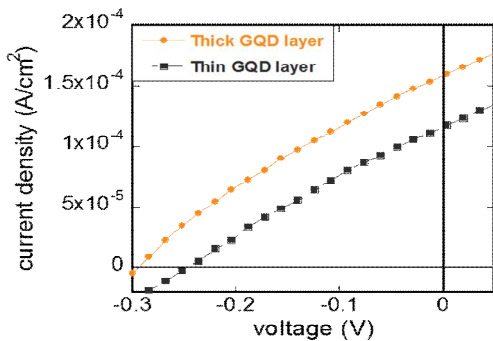


Fig. 6. GQD layer thickness dependent current density-voltage curves of the P3HT/GQDs/TiO₂ solar cell.

Fig. 6은 그래핀 양자점에 의한 개선 효과를 알아보기 위하여 그래핀 양자점을 추가로 코팅하여 측정된 태양 전지의 전류-전압 곡선이다. 그래핀 양자점을 5 회 스핀 코팅하여 제작한 시편은 개방 전압 -0.25 V, 단락 전류 $1.16 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, 곡선 인자 0.27로 10 회 스핀 코팅하여 제작한 시편의 개방 전압 -0.29 V, 단락 전류 $1.58 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, 곡선 인자 0.31로 그래핀 양자점을 추가로 코팅함에 따라 단락 전류가 향상되었음을 확인할 수 있다. 이 결과로 미루어보아 그래핀 양자점이 Donor 와 Acceptor 계면에 삽입됨에 따라 여기자 분리와 전하 이동의 방해 요소가 아닌 광 흡수와 전하 수송에 도움을 주고 있음을 재확인하였다. 이 결과는 최적화된 조건이 아니며, 그래핀 양자점의 두께 및 박막 형상의 조절에 따라 추가적인 효율 개선이 가능할 것이라고 예상된다.

3. 결론

본 연구에서는 그래핀 양자점을 종래 사용되어온 복잡한 공정 없이 간단한 초음파 처리를 통하여 용매에 분산하여 TiO₂와 P3HT가 Acceptor와 Donor로 구성된 유기 무기 하이브리드 태양 전지에 완충 층으로 삽입하여 제작하였다. 1. 그래핀 양자점이 5 nm 이하의 부피 대비 표면 비율이 높은 나노 입자임에도 불구하고 우수한 전기적 성질을 갖고 있음을 트랜지스터 구조를 이용한 전기적 특성 측정을 통하여 확인하였다. 2. 그래핀 양자점을 완충 층으로 삽입함에 따라 태양 전지의 단락 전류가 $1.26 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 에서 $7.46 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 로, 곡선 인자가 0.27에서 0.42로 크게 개선되었다. 3. 이를 그래핀 양자점의 가시광 영역에서의 흡광 스펙트럼과 에너지 레벨의 위치가 Acceptor와 Donor의 에너지 레벨의 중간 영역에 위치하는 것을 확인함으로써 고찰하였다. 앞서 언급하였듯이, 본 연구에서는 기존 연구와 달리 그래핀 양자점 용액을 단순한 초음파 처리만을 통해 분산하여 사용하였다. 그래핀 양자점의 낮은 분산성에도 불구하고, 그래핀 양자점 층이 Donor와 Acceptor의 계면에서 결함이나 방해 요소가 아닌 전하의 분리와 수송을 돕는 완충 층으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 일반적으로 낮은 분산성을 가진 용액을 통해 형성된 박막이 계면 결함 및 광 전환 효율의 제한 요소로 작용할 것으로 생각되지만, 그래핀 양자점은 전기적 성질이 우수하기 때문에 Donor/Acceptor와의 적절한 에너지 레벨을 구성하는 것만으로도 완충 층으로써 사용이 충분히 가능하다는 것을 확인하였다. 본 연구 결과로 미루어 보아, 그래핀 양자점 용액 공정이 복잡한 처리 공정 없이도, 보다 폭넓게 활용 가능할 것으로 예상된다.

References

- [1] Graetzel, Michael, et al., "Materials interface engineering for solution-processed photovoltaics.", *Nature*, 488.7411 (2012): 304.
- [2] de Freitas, Jilian Nei, João Paulo de Carvalho Alves, and Ana Flávia Nogueira., "Hybrid Solar Cells: Effects of the Incorporation of Inorganic Nanoparticles into Bulk Heterojunction Organic Solar Cells.", *Nanoenergy*. Springer, Cham, 2018. 1-68.
- [3] Reeja-Jayan, B., and A. Manthiram., "Influence of polymer - metal interface on the photovoltaic properties and long-term stability of nc-TiO₂-P3HT hybrid solar

- cells.", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94.5 (2010): 907-914.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.01.021>
- [4] Reeya-Jayan, B., and A. Manthiram., "Influence of polymer - metal interface on the photovoltaic properties and long-term stability of nc-TiO₂-P3HT hybrid solar cells.", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94.5 (2010): 907-914.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.01.021>
- [5] Shoaee, Safa, et al., "Acoustic enhancement of polymer/ZnO nanorod photovoltaic device performance.", *Advanced materials*, 26.2 (2014): 263-268.
DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201303304>
- [6] Baran, Derya, et al., "Reducing the efficiency - stability - cost gap of organic photovoltaics with highly efficient and stable small molecule acceptor ternary solar cells.", *Nature materials*, 16.3 (2017): 363.
- [7] Dang, Minh Trung, Lionel Hirsch, and Guillaume Wantz., "P3HT: PCBM, best seller in polymer photovoltaic research.", *Advanced Materials*, 23.31 (2011): 3597-3602.
DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201100792>
- [8] Ahmad, Muhammad Shakeel, A. K. Pandey, and Nasrudin Abd Rahim., "Advancements in the development of TiO₂ photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell (DSSC) applications. A review.", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77 (2017): 89-108.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.129>
- [9] Seo, Ji Youn, et al., "Boosting the Efficiency of Perovskite Solar Cells with CsBr Modified Mesoporous TiO₂ Beads as Electron Selective Contact.", *Advanced Functional Materials* (2018).
DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201705763>
- [10] Zhu, Zonglong, et al., "Efficiency enhancement of perovskite solar cells through fast electron extraction: the role of graphene quantum dots.", *Journal of the American Chemical Society*, 136.10 (2014): 3760-3763.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ja4132246>
- [11] Qin, Yuancheng, et al., "Top-down strategy toward versatile graphene quantum dots for organic/inorganic hybrid solar cells." *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3.4 (2015): 637-644.
DOI: <https://doi.org/10.1021/sc500761n>
- [12] Li, Liang-shi, and Xin Yan., "Colloidal graphene quantum dots.", *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1.17 (2010): 2572-2576.
DOI: <https://doi.org/10.1021/jz100862f>
- [13] Gupta, Vinay, et al., "Luminescent graphene quantum dots for organic photovoltaic devices.", *Journal of the American Chemical Society* 133.26 (2011): 9960-9963.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ja2036749>
- [14] Li, Yan, et al., "Nitrogen-doped graphene quantum dots with oxygen-rich functional groups." *Journal of the American Chemical Society*, 134.1 (2011): 15-18.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ja206030c>
- [15] Bacon, Mitchell, Siobhan J. Bradley, and Thomas Nann., "Graphene quantum dots.", *Particle & Particle Systems Characterization*, 31.4 (2014): 415-428.
DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.201300252>
- [16] Sakamoto, Junji, et al., "Two Dimensional Polymers: Just a Dream of Synthetic Chemists.", *Angewandte Chemie International Edition*, 48.6 (2009): 1030-1069.
DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.200801863>
- [17] Gritzner, G., and J. Kuta., "Recommendations on reporting electrode potentials in nonaqueous solvents (Recommendations 1983).", *Pure and applied chemistry*, 56.4 (1984): 461-466.
DOI: <https://doi.org/10.1351/pac198456040461>
- [18] Bredas, J. L., et al., "Chain-length dependence of electronic and electrochemical properties of conjugated systems: polyacetylene, polyphenylene, polythiophene, and polypyrrole.", *Journal of the American Chemical Society*, 105.22 (1983): 6555-6559.
DOI: <https://doi.org/10.1021/ja00360a004>

김 영 준(Youngjun Kim) [정회원]



- 2016년 2월 : 홍익대학교 신소재공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 홍익대학교 대학원 신소재공학과 (공학석사)

<관심분야>
환경/화공/에너지

박 병 남(Byoungnam Park) [정회원]



- 2001년 8월 : 연세대학교 금속공학과 (공학사)
- 2008년 5월 : University of Wisconsin-Madison 재료공학과 박사 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 홍익대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>
환경/화공/에너지