

유기 반도체를 기반으로 하는 태양전지



김경곤
이화여자대학교
화학나노과학과

서론

최근 정보 전자산업의 급속한 발전과 함께 차세대 디스플레이로서 플렉시블 디스플레이에 대한 관심이 급증하고 있다. 이 디스플레이는 마음대로 휘거나 접을 수 있고 곡면으로 제작이 가능하여 모바일 유비쿼터스 환경을 충실히 구현할 수 있을 것으로 기대된다. 가볍고 깨지지 않으며 저가의 요구를 만족하기 위해서는 기판에서부터 주요 반도체 재료에 이르기까지 플라스틱이나 저분자의 유기물 재료를 활용하는 것이 필수적이다. 이에 따라 최근 들어 핵심이 되는 유기물 반도체(organic semiconductor) 재료와 이를 이용한 소자들에 대해서도 다양한 연구와 관심이 기울여지고 있는데, 앞의 차세대 디스플레이를 위한 유기 발광소자(organic/polymeric light emitting diode)와 유기 전계 트랜지스터(organic field effect transistor)를 위시하여, 유기 반도체 레이저(organic laser), 유기 태양전지(organic photovoltaic cell)등이 대표적인 예가 될 수 있다.

이와같이 유기물 반도체는 반도체로서의 특성을 지니고 있으면서도 유기물 자체의 손쉬운 가공성과 저렴성, 다양성을 함께 갖추고 있어 기술적 성숙도만 만족이 된다면 앞으로 이들 소자 분야에서 핵심적인 재료로 사용될 것으로 예상된다. 유기물 재료를 사용하여 소자를 제작할 때 spin cast, ink-jet, micro-contact printing 등 저가의 박막 및 대면적 소자제작 방법을 응용할 수 있으며, 또한 roll-to-roll 방법이 가능한 플렉시블 소자의 제작이 가능하므로 전자 소자의 공정과정을 단순화하여 제작 단가를 현저하게 낮출 수 있다.

이런 의미에서 그동안 무기계 실리콘 재료에 거의 전적으로 의지해 현재 원료 수급문제, 경제성 문제에 봉착해 있으며, 디스플레이나 정보통신 분야에서처럼 신개념의 저가 소재에 대한 필요성이 커지고 있는 태양전지 분야에서도 장기적으로는 경제성 있는 유기계 소재가 매력적인 소재로 대두되고 있다.

본 론

유기 박막 태양전지 구조와 작동 원리

일반적인 태양전지의 구조는 양극/활성층/음극으로 이루어진다. 양극은 투명유리위에 빛의 투과성이 좋으며 전기전도도가 높으며 일함수가 높아 정공(hole)을 잘 받아들일 수 있는 Indium tin oxide(ITO) 가 널리 쓰이고 있으며, 음극은 일함수가 작아 전자(electron)를 전기도선으로 잘 뽑아낼 수 있는 칼슘(Ca) 이나 알루미늄(Al)이 많이 사용되고 있다. 활성층은 태양전지에서 가장 중요한 태양빛을 받아 정공과 전자를 발생시키고 이렇게 생성된 정공과 전자를 각각 양극과 음극으로 전달시키는 역할을 하며, p형과 n형 유기반도체 물질로 이루어져 있다. 이러한 구조를 가진 태양전지 소자에서 전류 움직임을 1 태양광 세기(1 sun)하에 전압을 가하면서 측정하게 되는데 그 전류-전압 특성 곡선으로부터 광전변환효율(η , Power conversion efficiency)을 구할 수 있다. 그림 1에 있는 가상의 전류-전압 곡선에서 x-축과 만나는 점을 개방전압(V_{oc}), y-축과 만나는 점을 단락전류밀도(J_{sc}), 마지막으로 이 두 인자

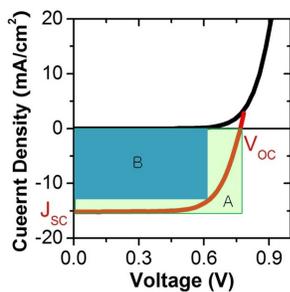


그림 1. 태양전지 소자의 전류-전압 곡선 및 태양광전력 효율 계산

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} \\ &= \frac{J_{\text{max}} V_{\text{max}}}{P_{\text{input}}} \\ &= \frac{J_{\text{sc}} V_{\text{oc}} FF}{P_{\text{input}}} \\ &\quad (FF = B / A) \end{aligned}$$

의 곱으로 얻을 수 있는 이론적인 최대전력($J_{sc} \times V_{oc}$) 과 실제 얻을 수 있는 최대 전압(V_{max}) 과 최대 단락전류(J_{max})의 곱에 의해 결정되는 실제 가용 최대전력($J_{max} \times V_{max}$)의 비에 의해 결정되는 충전계수(FF)라는 인자의 곱으로 광전 변환효율이 구해진다.

유기태양전지 소자 내에서 전류의 형성 과정을 설명하면, 그림 2에서 볼 수 있듯이 일함수가 작은 전극 물질과 큰 전극 물질을 전기적으로 연결하면, 이 두 물질 사이의 페르미 레벨(Fermi level)이 평준화되면서 두 전극 사이에 놓인 활성층 내에 내부확산전위(built-in potential)가 형성된다. 이 때 태양광(photon) 이 활성층에 의해 흡수되면 활성층 물질(주로 p형 물질) 내에 짝을 이루고 있던 전자들이 여기(excited) 되면서 정공과 전자가 형성된다. 이 때 정공과 전자가 서로 쿨롱힘에 의해 전기적으로 묶인 상태인 엑시톤(exciton, hole-electron pair) 이 형성되는데 이 엑시톤은 p형과 n형 물질의 계면으로 램덤워크 확산(random walk diffusion) 을 하면서 이동했을 때 p형 유기물질과 n형 유기물질의 에너지 준위인 HOMO(the highest occupied molecular orbital)과 LUMO(the lowest unoccupied molecular orbital)준위들의 차이에 의해 분리하게 된다. 효과적인 엑시톤의 분리를 위해서는 p형과 n형 물질의 각 에너지준위 간 차는 0.3eV 이상이

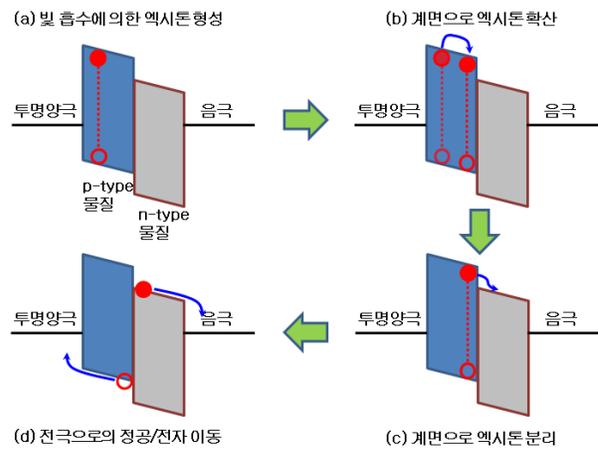


그림 2. 태양전지내에서 단계별 정공과 전자의 생성 과정. 정공은 빈 적색원, 전자는 채워진 적색원으로 표기되었으며 접점은 쿨롱 힘에 의해 서로 묶인 상태를 보여주고 있으며 청색화살표는 엑시톤, 정공, 전자의 움직임을 나타낸다.

필요하다고 알려져 있다. 이렇게 분리된 자유 정공과 전자는 내부확산전위에 의해 정공은 양극으로 전자는 음극으로 움직이게 되어 외부로 전류가 흐르게 된다.

다음으로 활성층의 구조에 대해 좀 더 자세히 살펴보면 그 형태에 따라 크게 두 가지로 나뉜다. 첫째는 초기 연구 단계에서 쓰인 이층박막(bilayer) 형이고 두 번째는 벌크 헤테로정션(bulk heterojunction) 형이다(그림 3). C. W. Tang 은 1986년에 세계 최초로 1%의 효율을 보이는 이층 박막형 태양전지를 발표했다.^[1] 이 때는 진공증착을 통해 p형 물질과 n형 물질을 개별적인 층으로 나누어 태양전지를 만들었다. 하지만, 엑시톤의 정공과 전자가 재결합하는데 100 피코초(피코초는 10^{-12} 초임) 정도 밖에 걸리지 않아 엑시톤 확산 거리(exciton diffusion length)는 약 10 나노미터(nm) 밖에 되지 않는다는 점과 이러한 이층박막형 태양전지는 p형과 n형 물질간의 접촉 면적이 한계가 있어 자유 정공과 전자의 형성에 한계를 드러낸다.^[2] 이 한계를 극복하기 위해 이 p형과 n형 물질을 적절히 섞여진 벌크헤테로정션형 유기태양전지가 개발되었다. 특히 1995년 A. J. Heeger 그룹에 의해서 진공 증착에 비해 공정비가 훨씬 저렴한 용액 공정으로 이 벌크헤테로정션 형태의 태양전지가 효율 향상에 크게 도움이 된다는 사실이 발표되

었다.^[3] 현재의 유기태양전지 연구는 이 벌크헤테로정션형을 널리 사용하고 있다.

위에서 말한 3가지 기본적인 층들 이외에도 양극과 활성층 사이에서 정공의 원활한 수송을 도와주는 정공수송층(hole transporting layer)와 음극과 활성층 사이에서 전자의 원활한 수송을 도와주는 전자수송층(electron transporting layer)이 흔히 도입된다. 정공수송층의 대표적인 예로는 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)(PEDOT:PSS)와 copper phthalocyanine (CuPc)가 있으며, 전자수송층으로는 lithium fluoride(LiF)와 2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline(BCP) 등이 있다.

유기 박막 태양전지에서 중요한 인자들

일반적인 태양전지에서 빛에 의해 형성되는 엑시톤의 양은 바로 물질의 흡광 계수에 의해 결정된다. 실리콘은 흡광 계수가 낮아 그 태양전지소자의 두께가 수백 마이크로에 달하지만 유기물질은 훨씬 높은 흡광 계수를 가지고 있어 그 소자를 약 100 나노미터 두께로 만들 수 있다는 큰 장점이 있다. 한 예로 흔히 현재까지 유기태양전지에서 가장 많이 사용되고 있는 물질인 poly(3-hexylthiophene) (P3HT)은 약 $10^4/cm$ 의 흡광계수를 가지며, 흡광계수가 매우 큰 유기염료 분자 구조를 변형하여 p형 유기물질로 개발하려는 연구노력이 진행되고 있다. 다음으로 넓은 태양광 흡수 영역을 가진 물질이 중요하다. 현재 가장 효율이 좋은 물질은 약 800 nm 정도까지의 빛을 흡수하고 있으며, 이 흡수영역의 확산으로 인해 더욱 더 많은 엑시톤의 생성이 가능하다. 또한 효과적인 엑시톤의 자유 정공과 전자들로 만들기 위해서는 위에서 설명한대로 적절한 p형과 n형 물질간의 에너지 준위 배열이 필요하다. 이렇게 빛 흡수와 전공/전자간의 분리를 통해 형성된 자유 정공/전자의 효과적인 전달을 위해서는 p형과 n형 물질의 정공/전자 전달 능력이 중요하다. 현재 높은 효율을 보이는 p형 물질의 정공 이동도(mobility)는 약 $10^{-3} \sim 10^{-5} cm^2/V \cdot s$ 이며, n형 물질의 전자 이동도는 약 $10^{-3} cm^2/V \cdot s$ 정도 이다.

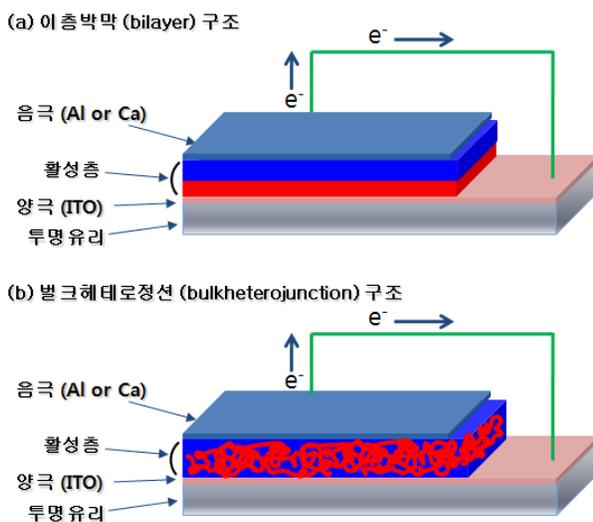


그림 3. 유기태양전지의 구조. (a) 이층박막 (bilayer) 구조 및 (b) 벌크헤테로정션 구조. 활성층은 p형 물질 (빨간색) 과 n형 물질 (파란색) 로 이루어져 있다.

마지막으로 중요한 요인은 바로 p형과 n형 물질간의 몰폴로지이다. 벌크헤테로정선 구조에서 약 10 nm 정도의 폭으로 p형 물질과 n형 물질이 서로 분리되어 있어 두 물질간 접촉 면적을 최대화하며, 이 분리된 각각의 영역이 p형 물질은 양극 쪽으로 n형 물질은 음극 쪽으로 적절히 이어지는 구조를 가지고 있을 때 최대한 전류로 이끌어낼 수 있다. 이러한 구조를 인위적으로 잘 조절해내기 위해 흔히 열이나 용매를 이용한다. 적절한 온도와 용매의 선택은 효율 향상에 크게 도움이 된다. 더욱 더 높은 효율을 위해서 p형과 n형 물질이 섞인 용액에 첨가제를 넣은 경우가 종종 있다.

유기 박막 태양전지 연구 동향

고분자/플러렌 유도체 태양전지

유기태양전지에서 현재 가장 고효율은 고분자를 p형 물질로 쓰고 플러렌 유도체인 [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester(PC₆₁BM) 또는 [6,6]-phenyl-C₇₁-

butyric acid methyl ester(PC₇₁BM)을 n형 물질로 사용했을 때 나오고 있다. 그림 4에 최근 5년간 학계에 발표된 높은 효율을 보인 고분자 태양전지를 이루는 고분자의 화학 구조를 나타내었다. 2005년 P3HT 고분자는 합성법의 발달에 의해 태양전지에 적합한 분자량을 가지게 되고, 또한 n형 물질인 PC₆₁BM과의 적절한 몰폴로지(morphology)를 가능토록 하는 열어닐링(thermal annealing) 및 용매어닐링(solvent annealing) 법이 개발되면서 그 효율은 증가하였다. 특히 알루미늄 전극을 활성층 위에 증착한 후 열어닐링을 했을 때 5%에 도달할 수 있다는 사실은 2005년에 A. J. Heeger 그룹과 D. Carroll 그룹에서 비슷한 시기에 보고되었다.^[4,5] 그 이후 더욱 더 많은 연구가 이 P3HT라는 고분자에 대한 연구가 진행되었지만, 그 효율의 향상은 고분자의 흡수파장 영역이 약 650 nm정도 밖에 되지 못하고, HOMO 준위가 5.2eV로 높아서 개방전압(V_{oc}) 값이 0.6 V밖에 이르지 못한다. 이로 인해, 태양광을 더욱 넓은 파장 영역을 흡수할 수 있는 신물질의 개발에 과학계는 더

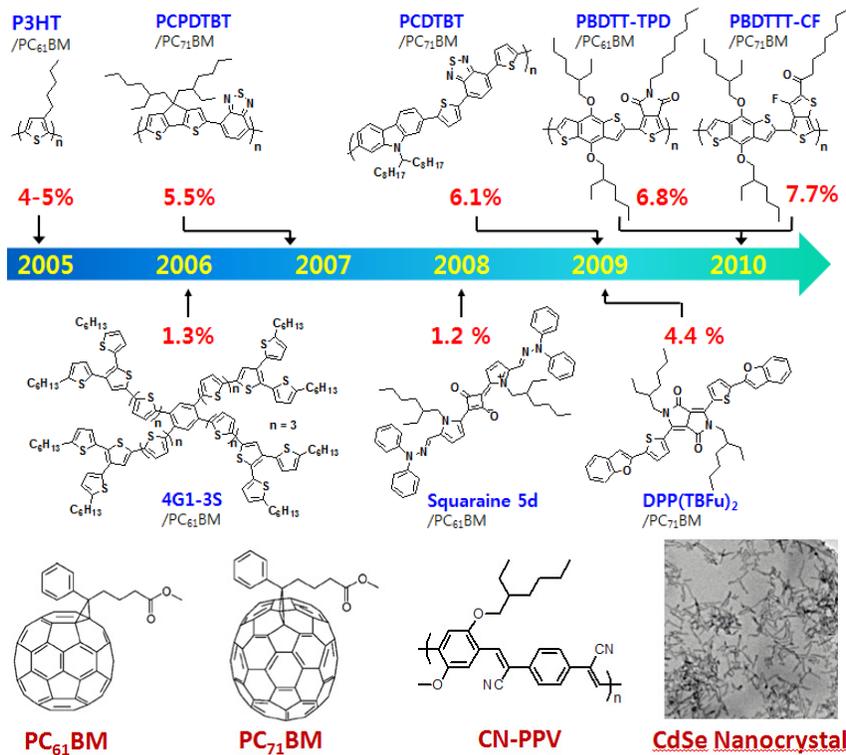


그림 4. 용액공정 가능 유기태양전지용 p형 물질의 화학구조 및 연도별 효율 향상 추이와 용액공정 가능 유기태양전지용 n형 물질의 화학구조



속 박차를 가하게 되었다. 이러한 노력은 결실로 이어지고 있으며, 2007년부터 PCPDTBT,^[6] PCDTBT,^[7] PBDTT-TPD, PBDTTT-CF^[8] 등의 작은 밴드갭 고분자들이 만들어 졌으며, 효율은 해가 거듭될수록 증가해서 현재 9.3% 정도까지 발표 되고 있다.^[9] 이러한 물질 개발은 단지 대학에서만 일어나는 것이 아니라 선도적인 외국기업과 동시에 진행되고 있으며, 2011년 12월 말 기준 세계 공인 최고 셀효율은 Solarmer energy, inc.에서 발표한 8.13%와 Konarka technologies, inc.에서 발표한 8.3%로 알려져 있다.

이러한 고분자와 짝을 이루는 n형 물질로 PC₆₁BM과 PC₇₁BM(그림 4) 이 널리 사용된다. 이 두 물은 에너지 준위는 거의 같으나 흡광계수와 영역 측면에서 PC₇₁BM이 더욱 뛰어나서 낮은 밴드갭을 가지는 고분자들과 짝을 이뤄 높은 효율을 내는 경우가 흔히 있다. 하지만 항상 그렇지 않은 이유는 이 n형 물질들과 이루는 몰폴로지의 적절성 등 때문에 각 물질에 따라 둘 중의 한 물질이 더 좋은 짝을 이루게 된다.

단분자/단분자 태양전지

유기박막 태양전지를 구현하는 다른 방법으로는 광활성층 재료로 단분자 형태의 유기 반도체를 사용하는 것이다. 유기 단분자 태양전지는 분자량이 일정한 유기 단분자를 광활성층 재료로 사용하기 때문에 재료 합성과 물리적 특성의 조절이라는 측면에서 큰 장점을 지니고 있다. 또한, 재료의 고순도 정제가 용이하기 때문에 생산 재현성(batch-to-batch variation)이 우수하며 이는 유기박막 태양전지 소자 특성의 재현성의 확보를 가능하게 해 주며 향후 유기박막 태양전지의 상용화라는 관점에서 유기 단분자 태양전지가 상대적인 우수성이 있다고 할 수 있다. 단분자를 기반으로 하는 유기박막 태양전지는 재료의 물리적 특성에 따라 진공증착 공정뿐만 아니라 코팅 또는 프린팅 기반의 용액 공정을 이용하여 소자를 제작할 수 있는 장점이 있다. 또한, 다층막 형성이 용이하기 때문에 적층형 구조의 태양전지를 쉽게 구현할 수 있으며 태양전지 효

율을 향상시킬 가능성이 매우 크다. 그러나, 단분자 기반의 유기박막 태양전지는 현재까지 고분자 기반의 유기박막 태양전지 소자에 비해서 단위소자에서 낮은 에너지 변환 효율을 보이고 있다. 이는 고분자에 비해 단분자 유기 재료가 가시광선 영역에서 낮은 광흡수율을 보이며 전하이동도 특성이 상대적으로 부족한 단점이 있다. 그리고, 나노 네트워크에 기반한 벌크 이종접합 구조의 광활성층의 구현이 용이하지 않아 전하의 분리 및 이동 과정에서 손실을 보이고 있다. 즉, 단분자 기반의 유기박막 태양전지의 에너지 변환 효율을 향상시키기 위해서는 가시광 영역에서의 높은 광흡수율과 및 전하이동도가 향상된 신규 재료의 개발이 필수적이며 유기 단분자의 나노구조를 제어하는 기술을 확립하여야 한다.

용액공정용 단분자 전자공여체 재료는 기존의 p-형 고분자 반도체 재료에서 사용되고 있는 분자구조를 기초로 하여 활발하게 개발이 진행되고 있다. 단분자 전자공여체는 고분자에 비하여 상대적으로 짧은 공액 결합의 길이를 가지고 있기 때문에 적절한 분자 설계를 통하여 흡광파장의 영역과 흡광계수를 향상시켜야 한다. 또한, 단분자 전자공여체의 필름 morphology와 전자수용체와의 계면 특성을 최적화하여야만 에너지 변환 효율을 향상시킬 수 있다. 다양한 구조가 시도되었으나 최근 push-pull 구조를 이용한 유기단분자 재료가 높은 효율은 나타내고 있다. Push-pull 구조의 단분자 전자공여체 재료는 전자 밀도가 풍부한 전자 공여(electron-donating) 유기 구조와 전자 밀도가 부족한 전자 수용(electron-withdrawing) 유기 구조가 공유결합으로 연결된 화합물이다. 용액공정용 push-pull 구조의 단분자 전자공여체를 설계 및 합성하기 위해서는 재료의 광학적, 전기적 특성을 결정하는 전자공여 및 전자수용 유기구조의 선택이 중요하다. 또한, 광활성층 필름을 제작하기 위해 사용되는 유기용매에 대한 높은 용해도와 최상의 필름 morphology를 구현할 수 있는 치환기의 선택이 필요하다.

2011년 Bazan 연구팀은 분자 구조의 말단에 전자공여(donor)구조를 가지고있는 D-A-D-A-D 구조의 용액형

단분자 전자 공여체 재료 p-DTS(PTTh₂)₂(**13**)를 개발하였다. 신규 p-DTS(PTTh₂)₂전자공여체는 분자내에서 dithieno (3,2-b:2,3,-d)silole(DTS)이 전자공여 역할을 하고 pyridyl [2,1,3]thiadiazole이 전자수용 역할을 담당함으로써 두 유기구조간의 증가된 π-공액결합의 길이와 전자공여와 전자수용 구조간의 효과적인 전하분리 현상으로 700nm 이상의 장파장의 빛도 효과적으로 흡수가 가능하였다. 전자공여체 p-DTS(PTTh₂)₂와 전자수용체 PC₇₁BM을 광활성층으로 이용하여 벌크이종 접합구조로 제작한 유기박막 태양전지소자는 단락전류는 10.9mA/cm², 개방 전압은 0.70V, FF는 42%의 특성을 보여 3.2%의 효율을 달성하였다. 이후 전자 수용체 역할을 하는 분자구조를 pyridyl[2,1,3]thiadiazole에서 5-fluorobenzo[c]-[1,2,5,]thiadiazole로 변경하여 p-DTS(FBTTh₂)₂(**14**) 전자공여체를 개발하

였다. p-DTS(FBTTh₂)₂는 향상된 광흡수 능력과 더불어 산성 특성의 interlayer 재료에 대하여 강한 안정성을 보였다. p-DTS(FBTTh₂)₂전자공여체를 이용하여 제작한 유기박막 태양전지에서 단락전류는 12.8mA/cm², 개방 전압은 0.81V, FF는 68%를 기록하여 7.0%의 효율을 달성하였다 (그림 5).^[10,11]

Push-pull 구조의 용액공정용 단분자 전자공여체 유기 재료는 흡광파장과 흡광계수 특성을 비약적으로 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 재료의 합성 및 정제 관점에서 많은 장점을 지니고 있다. 또한, 최근 개발된 push-pull 구조의 단분자 전자공여체를 이용한 유기박막 태양전지 소자의 효율이 고분자 기반의 소자의 효율에 근접하는 결과를 보이고 있기 때문에 향후 push-pull 구조의 단분자 전자공여체 유기재료의 개발이 활발히 진행될 것으로 전망된다.

2006-2008년 사이에는 1% 정도의 효율로 머물러 있었으나 2008년부터 염료분자 구조를 이용한 DPP 계열의 단분자들은 3%정도의 효율을 보이기 시작했으며, 2009년에는 T.-Q. Nguyen 그룹에서 ITO/PEDOT:PSS/DPP(TBFu)₂:PC₇₁BM/AI 소자구조로 효율 4.5%를 이루었다. 만약 이 단분자를 이용하여 만든 태양전지의 효율이 더 높은 효율향상을 이루게 된다면 물질의 정제가 고분자에 비해 용이하고 재현성 있게 물질을 합성할 수 있기 때문에 유기태양전지의 상업화를 더욱 앞당길 수 있다는 가능성을 지니고 있다.

고분자/고분자 태양전지

활성층을 모두 고분자로 하는 것은 재료나 공정 측면에서 뛰어나 가격을 많이 낮출 수 있다. 또한 p형 고분자 뿐만 아니라 n형 고분자 또한 가시광 영역의 빛을 흡수할 수 있으며 개방전압이 높다는 장점들이 있다. 가장 최신 발표된 결과는 2009년 J. M. J. Frechet 그룹에서 분자량이 높고 분자량분포지수가 낮은 고순도 p형 고분자 poly[3-(4-n-octyl)-phenylthiophene(POPT)]를 Grignard metathesis (GRIM)이라는 방법으로 합성하여 n형 고분자인 CN-PPV와 태양전지 소자를 만들어 2%의 효율을 낸 것이다.^[12] 이 상대적으로 낮은 효율을 향상시키려는 노력은 계속되고

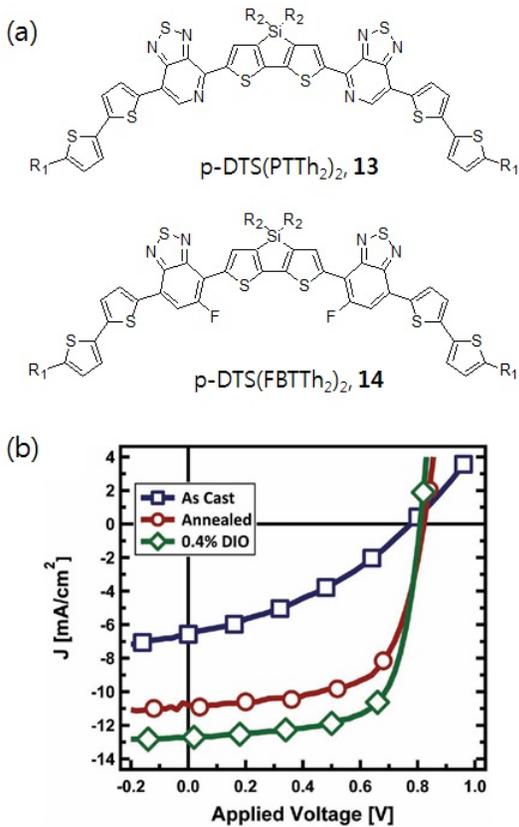


그림 5. (a) D-A-D-A-D 구조의 용액공정용 전자공여체 재료의 화학 구조, (b) p-DTS(FBTTh₂)₂전자공여체를 이용한 유기박막 태양전지의 전류-전압 특성

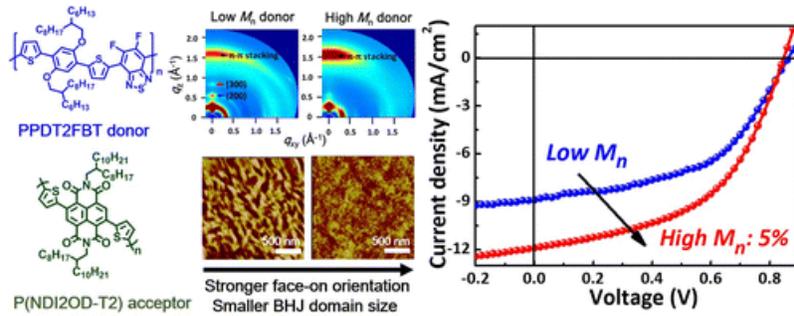


그림 6. semi-crystalline한 p형 고분자와 Naphthalene diimide 기반의 n형 고분자를 이용한 고분자/고분자 태양전지

있으나 p형 고분자와 n형 고분자 사이에 상분리를 조절하기가 어렵다는 큰 단점을 지니고 있다. 최근 카이스트 김범준 교수팀과 부산대학교 우한영 교수팀이 분자량이 조절된 semi-crystalline한 p형 고분자와 Naphthalene diimide 기반의 n형 고분자를 이용하여 5% 이상의 변환 효율을 나타내는 고분자/고분자 태양전지를 구현하였다 (그림 6).^[13]

활성층 외의 다른 소자구성층에 대한 연구

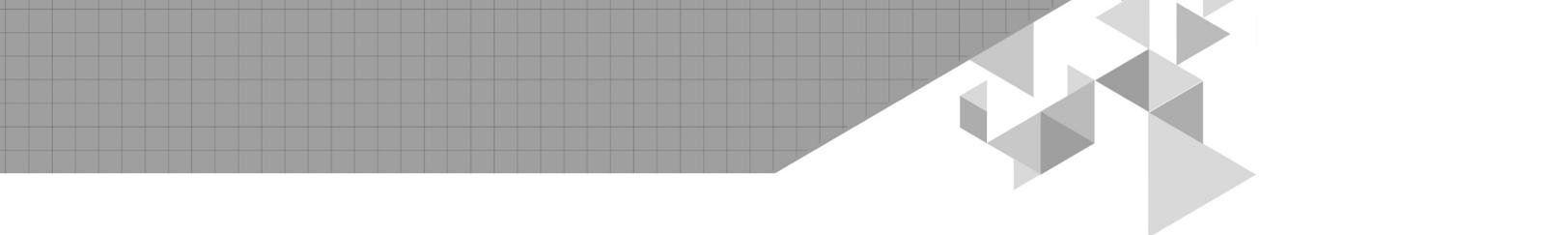
현재 유기태양전지에서 가장 중요한 활성층 외에도 다양한 소재 개발에 대한 연구가 동시에 진행되고 있다. 먼저 정공수송층으로 널리 사용되고 있는 PEDOT:PSS층은 약산성이어서 장기안정성에 문제를 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 중성적이며 더욱 안정적인 다른 금속산화물(MoO₃, V₂O₅, NiO, WO₃ 등)으로 PEDOT:PSS층을 대체하려는 연구가 진행되고 있다. 한 예로 2008년 T. J. Marks 그룹에서 NiO층의 경우 효율을 P3HT:PC₆₁BM 활성층을 사용한 경우 효율이 5.2%로 향상되고 소자의 구동이 더욱 안정적이라는 것이 발표되었다.^[14] 하지만 현재 이러한 금속산화물은 고가의 장비를 이용해야 하기 때문에 상업화를 위해서 더욱 저렴한 방법으로 금속산화물을 제작하려는 연구가 현재 진행 중이다. 또한 점점 가격이 오르고 있는 ITO 기판을 더욱 저렴한 투명전극으로 대체하려는 연구가 진행되고 있다. 주로 금속나노선(Ag, Cu, CuO) 또는 나노물질(carbon nanotube, graphene 등)을 이용한 기술들이 개발되고 있다.

결론

유기 반도체 소재를 기반으로 하는 태양전지는 진공공정이나 고온 공정을 필요로 하는 무기 박막 태양전지에 비해 공정의 용이성 및 경제성 면에서 볼 때 장점이 있다. 그러나 상대적으로 낮은 변환효율 및 장기 안정성 문제가 상업화에 가장 큰 걸림돌이며 특히 장기안정성 문제를 시급히 해결해야 하며 많은 연구자들이 이를 해결하기 위해 다양한 조건에서의 열화메커니즘을 규명하고 이를 해결하기 위하여 소재 및 소자구조 등 다양한 방법으로 시도를 하고 있다.

참고문헌

- [1] C. W. Tang, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 183 (1986).
- [2] S. R. Forrest, *MRS Bull.*, **30**, 28 (2005).
- [3] G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, A. J. Heeger, *Science*, **270**, 5243, 1789 (1995).
- [4] W. Ma, C. Yang, X. Gong, K. Lee and A. J. Heeger, *Adv. Func. Mater.*, **15**, 1617 (2005).
- [5] M. Reyes-Reyes, K. Kim, D. L. Carroll, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 083506 (2005).
- [6] Z. Zhu, D. Waller, R. Gaudiana, M. Morana, D. Mühlbacher, M. Scharber, C. Brabec, *Macromolecules*, **40**, 1981 (2007).
- [7] S. H Park, A. Roy, S. Beaupr, S. Cho, N. Coates, J. S. Moon, D. Moses, M. Leclerc, K. Lee, A. J. Heeger,

- 
- Nature Photonics*, **3**, 297 (2009).
- [8] H.-Y. Chen, J. Hou, S. Zhang, Y. Liang, G. Yang, Y. Yang, L. Yu, Y. Wu, G. Li, *Nature Photonics*, **3**, 649 (2009)
- [9] S.-H. Liao, H.-J. Jhuo, Y.-S. Cheng, S.-A. Chen, *Adv. Func. Mater.*, **25**, 4766 (2013).
- [10] Z. B. Henson, G. C. Welch, T. van der Poll, and G. C. Bazan, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 3766 (2012).
- [11] T. van der Poll, J. A. Love, T. -Q. Nguyen and G. C. Bazan, *Adv. Mater.*, **24**, 3646 (2012).
- [12] T. W. Holcombe, C. H. Woo, D. F. Kavulak, B. C. Thompson, J. M. Fr chet, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 14160 (2009).
- [13] H. Kang, M. A. Uddin, C. Lee, K.-H. Kim, T. L. Nguyen, W. Lee, Y. Li, C. Wang, H. Y. Woo, B. J. Kim, *J. Am. Chem. Soc.*, **137**, 2359 (2015).
- [14] M. D. Irwin, D. B. Buchholz, A. W. Hains, R. P. H. Chang, T. J. Marks, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **105**, 2783 (2008).