근적외선 검출 소자용 홀이동성 유기물 합성기술

글 _ 김백진
한국생산기술연구원

1. 서론

유기반도체 재료는 1940년대 후반부터 시작하여 매우 많은 실험과 이론적인 연구가 진행되어 왔으나 실제 응용에 대한 실적은 매우 부족하였다.

1970년대 후반에 특정한 유기물에 도핑 과정을 통하여 전기전도도가 구리에 가깝게 도달될 수 있다는 것이 알려진 이후 전기 전자 소재로서의 유기 반도체 재료에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 유기 반도체의 특성은 성형성이 섬유나 필름 형태로 용이하고 경량성, 유연성, 비선형 광학 특성, 전도성, 높은 분극성 저렴한 생산비 등을 갖는 화합물을 비교적 쉽게 형성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서 새로운 박막 기능성 전기전자 및 광소자의 개발이 가능하다. 따라서 새로운 박막 기능성 전기전자 및 광소자의 개발이 가능하다는 점을 들 수 있다. 예를 들어 전자파 차폐막, 커패시터, OLED, 유기박막 트랜지스터, 유기태양전지 등의 유기 반도체를 이용한 응용연구의 연구는 계속 확장 되고 있다.

특히 유기 태양전지재료의 경우, 태양광을 전기에너지로 전환시키는 태양전지의 효율을 높이기 위해서는 입사된 빛에 의해 물질내에서 생성되는 광 전하들의 생성 효율이 높아야 할 뿐아니라 이들 전하들이 전기에너지로 전환되는 효율이 높은 신소재의 개발이 가장 중요한 사항이다. 기존의 태양전지는 실리콘 단결정이나 비정질 실리콘, GaAs, CdS/CdTe 등의 무기반도체 재료를 사용하였으나 상온에서 박막 형성이 용이하면서 대면적 공정이 가능한 박막형 유기태양 소재 개발이 가속화 되고 있다.

최근 근적외선 검출용 소자개발에 대한 산업적인 요구가 점점 더 많아지고 있다. 특히 로봇분야, 의료용, 군사용으로 많이 사용될 것으로 기대된다. 근적외선 검출의 구동 원리는 태양전지의 구동 원리와 동일하며, 실제 홀이동성 유기물질로 사용할 수 있는 후보 물질 역시 유기태양전지에 사용하는 물질과 유사하다고 할 수 있다. 다만 유기태양전지와는 달리 양자점과의 밴드캡 메칭이 반드시 고려되어야 하며, 일함수(work function) 값을 1X10-4(cm^2/Vs) 이상의 값을 가져야 한다. 따라서 본 투고의 내용은 유기태양 전지에 사용되는 홀이동물질의 기술 동향을 위주로 설명하였다.

2. 기술의 현황

최근 에너지 가격의 급증과 지구 온난화 문제와 연관하여 청정 에너지원으로서 태양전지에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 태양전지는 광전효과 (photovoltaic effect)를 이용해 태양광 에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 장치이다. 태양전지의 대표는 실리콘 태양전지로서 에너지 변환 효율이 20% 이상이다. 그러나 실리콘계 태양전지는 기본 소재인 실리콘의 제조공정상 태양전지의 제작 단가를 낮추는데 큰 어려움을 가짐에 따라 저가공정이 가능한 유기태양전지가 새롭게 연구되기 시작했다. 유기태양전지는 유기반도체를 이용해 재료의 구조를 손

쉽게 변형할 수 있어 우수한 광전특성을 발현시킬 수 있으며 스크린 프린팅과 같은 저가의 공정개발을 통해 태양전지의 제작 단가를 낮출 수 있는 가능성이 매우 높다고 하겠다. 그러나 유기박막태양전지의 경우 유기반도체를 이용해 재료의 구조를 손쉽게 변형할 수 있어 우수한 광전특성을 발현시킬 수 있으며 스크린 프린팅과 같은 저가의 공정개발을 통해 태양전지의 제작 단가를 낮출 수 있는 가능성이 매우 높다고 하였다. 그러나 유기 박막 태양전지의 경우 현재까지 약 5% 정도의 에너지 변환효율이 보고 되고 있는데, 실리콘계 태양전지와 비교하면 약 1/4 이하의 낮은 수준으로 아직 실용화에는 문제가 있다. 특히 유기계 태양전지는 실제 상황에서 소재의 열화에 의한 빠른 성능저하가 일어나는 근본적인 문제가 있다. 이에 반하여 나노 입자를 기반으로 하는 염료감응 태양전지의 경우 저가 제조고정이 가능하면서 약 12% 정도의 높은 에너지 전환효율이 보고돼 있어 상용화 가능성이 가장 높다. 그러나 액체상의 전해질 사용으로 전해질의 누수에 따른 문제점과 전극으로 사용하는 TiO_2 나노 입자를 고온으로 처리하여야 하는 단점으로 인해 상업화가 늦어지고 있다. 최근에는 양자점 나노 입자를 이용한 태양전지 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

2.1. 국내 연구동향

유기태양전지에 대한 외국의 빠른 성장과 비교해서 국내 연구는 매우 늦게 시작되었다. 초기의 유기 태양전지에 대한 연구는 부산대학교 연구팀에 의해 이루어졌다. 이들은 반도체 고분자인 MEH-PPV와 C_{60} 유도체인 PCBM이 1:1 비율로 섞인 복합재를 이용한 태양전지에서 단색광(30mW/cm^2, 532nm) 하에서 1.2%의 효율을 보고하였고[1], MEH-PPV와 PCBM의 비율을 1:3으로 바꿈으로써 같은 조건에서 2.3%의 에너지 변환효율을 보였다[2]. 이들의 연구 시작과 더불어 2001년에는 인하대 연구팀도 유기 태양전지에 대한 연구 결과를 발표하기 시작하였는데, 단분자인 CuPc와 C_{60}의 double layer구조를 이용하여 백색광(white light, 30mW/cm^2)하에서 0.81%의 에너지 변환효율을 보였다[3]. 그리고 2003년에는 P3OT와 C_{60}의 복합재를 이용하여 단색광(500nm, 1.3mW/cm^2)에서 1.74%의 에너지 변환효율을 달성하였다[1]. 이러한 초기의 연구들에 힘입어 최근에는 대학을 중심으로 유기 태양전지에 대한 연구가 확대되고 있는데, 광주 과기원, 충남대학교 등에서도 최근 1~2년 사이에 연구를 시작하고 있다. 한국화학연구원, KIST 등의 출연(연)에서도 역시 1~2년 사이에 부분적으로나마 연구를 시작하였다. 이 중에서 KIST팀은 ITO/TiO_2/MEH-PPV/PEDOT:PSS/Au 구조의 유기-무기 하이브리드 태양전지를 제작하였고, 이들의 소자는 A.M. 1.5 조건에서 0.44%의 에너지 변환효율을 보였다[4]. 이렇듯, 현재 국내에서 개발되고 있는 유기 태양전지의 효율은 A.M. 1.5 기준에서 1%대이다.

2.2. 선진국 수준과의 비교

위에서 기술한 바와 같이, 현재 국내의 유기분자형 태양전지에 대한 연구 역사는 선진국에 비해 매우 짧은 편이다. 하지만, 유기 태양전지와 비슷한 분야인 유기 발광소자(Organic/Polymer Light Emitting Display, OLED/PLED)에 대한 연구가 지난 10여 년간 국내에서도 활발히 진행되어 왔으며 그 수준 또한 상당하다고 보여진다. 따라서 이러한 기술을 유기 태양전지 개발에 응용한다면 선진국과의 기술 격차는 매우 빠른 시간 내에 줄일 수 있을 것으로 보인다. 또한 신물질이나 신소재 합성기술, 소자 제작기술 등 기반이 되는 기술들도 이미 국내 수준이 상당한 수준에 도달해 있기 때문에 본 분야에 보다 적극적인 연구개발 투자가 이루어질 경우 이러한 예측은 무리가 아니라고 생각된다. 현재 선진국과 국내의 기술 수준을 비교한다면 다음 정도로 추정할 수 있겠으나, 실용화를 위해 선진국 또한 지속적으로 연구개발이 필요하며 초기 연구개발 단계에 있는 분야이기 때문에, 지금부터라도 국내 연구개발이 활성화될 경우 이 수치 차이는 큰

Table 1. 유기분자형 태양전지의 기술수준

항 목	선진국	국 내
물질 분자 설계 기술	100	50
물질 합성 기술	100	80
활성 박막 제조 기술	100	50
소자 설계 기술	100	60
전극 및 소자 제작 기술	100	70
물성 및 특성 평가 기술	100	80

문제가 아니라고 생각된다.

2.3. 해외 연구동향

2002 캘리포니아주립대학교 버클리의 재료공학과 Alivisatos 교수는 공액고분자인 regioregular poly alkylthiophene와 CdSe 나노막대를 블랜드하여 광전소자를 개발해 외부양자효율 54% 태양에너지 전환효율 1.7%를 달성 했다고 보고했다.

2005년 10월에는 CdSe 나노막대를 블랜드하여 광전소자를 개발한 알리비사토스 (P. Alivisaos) 교수 그룹에서 화학적 방법으로 합성된 콜로이드형 CdSe 와 CdTe 양자점 나노 입자를 다층 박막으로 구성하여 공기 중에서 안정하면서 변환효율이 약 3%인 태양전지 제조에 대하여 보고하고 있다. 이와 더불어 양자점 나노 입자로부터 초고효율 태양전지의 가능성에 주목한 연구들이 최근 일부 발표되고 있다. 실제로 태양에너지의 거의 반은 적외선 영역에 존재하며 적외선으로부터 전기적 에너지를 얻는다면 태양전지로 태양광으로부터 직접 얻을 수 dLT는 전기에너지가 0.01W이지만 동일한 크기의 적외선 포토볼타익셀 (infrared photovoltaic cell)은 이론적으로 1W를 생성시킬 수 있는 것으로 알려졌다.

기존의 유기 반도체만을 이용한 유기 태양전지뿐만 아니라, electron acceptor를 새로운 무기계 물질로 대체하여 사용하려는 시도가 최근에 진행되고 있다. 이는 기존의 electron acceptor로 사용되는 유기 반도체들이 대체로 낮은 전자 이동도를 가지고 있어 이를 전자이동도가 큰 물질로 대체함으로써 극복하려는 것이다. 이러한 새로운 형태의 유기 태양전지는 재료의 종류에 따라 다음과 같이 다시 세 가지로 구분 할 수 있다.

2.3.1. 공액 고분자/무기 나노입자 (혹은 나노막대) 복합재 태양전지

무기성 나노입자나 나노막대를 electron acceptor로 사용하는 유기 태양전지 구조가 최근에 보고되었다. 1996년 Cambridge University의 Neil Greenham은 반도체 고분자인 MEH-PPV와 무기성 CdSe 나노입자의 복합재를 이용하여 양자 사이의 PICT 현상 및 태양전지로의 응용연구를 처음으로 보고하였다[5]. 그 뒤 미국 UC Berkeley의 Alivisatos 교수팀에서는 P3HT와 CdSe 나노입자, 나노 막대의 복합재 박막에 대한 연구 결과를 계속 발표하였는데, 2002년에 이들 복합재의 블렌드를 이용한 태양전지에서 1.8%의 에너지 전환 효율을 보임으로써 세계적으로 상당한 반향을 일으켰다[6]. 이러한 새로운 형태의 태양전지는 높은 광전하 생성율을 가지는 유기물의 특성과 무기 입자의 높은 전자 이동도(electron mobility)를 이용하여 기존 유기계 태양전지에서 문제가 되었던 전자의 수송능력을 향상시킨 것이다. 현재, 그 효율은 2%에 조금 못 미치지만, 유기 태양전지의 문제점을 향상시키려는 새로운 시도로 볼 수 있다. 따라서, 앞으로도 새로운 재료 개발 여부에 따라 두 물질의 장점을 살린 유기-무기 하이브리드 태양전지는 많은 가능성을 가지고 있다고 할 수 있다. 덧붙여, 여기에 사용되는 무기 입자들은 나노 크기를 가지고 있으므로, 유기 태양전지의 분야를 nano electronics의 한 분야로 보게 되는 새로운 접근이라고도 할 수 있다.

2.3.2. 공액 고분자/탄소 나노 튜브 복합재 태양전지

새로운 형태의 탄소인 C_{60}을 이용한 태양전지의 성공 이후, 비슷하게 새로운 소재로 부각되고 있는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)를 유기태양전지에 이용하려는 시도에도 관심을 가지게 되었다. CNT는 그 자체가 튜브 형성 조건에 따라 반도체 혹은 도체의 특성을 띄게 되어 최근에 많은 연구가 되고 있는 물질이다[7]. 특히, CNT의 뛰어난 전도도를 이용한 나노 전자소자로의 응용은 많은 이점을 가지고 있으리라 여겨진다. 1999년

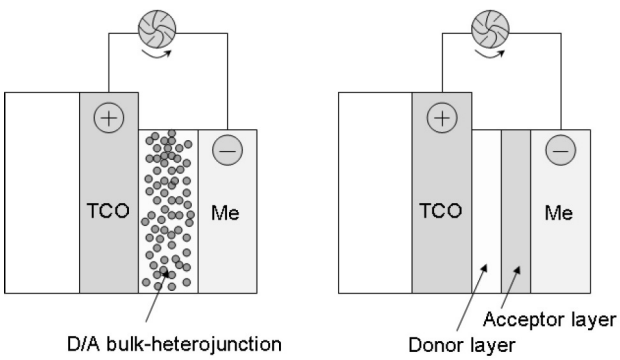

Fig. 1. 유기분자형 태양전지의 도식적인 구조; (a) bulk heterojunction 구조, (b) donor-acceptor double layer 구조.

Cambridge University의 H. Ago는 multiwall carbon nanotube (MWNT)와 PPV의 다층 구조로 된 유기 태양전지를 제조하여 처음으로 그 결과를 발표하였다[8]. 이 때의 효율은 0.08% 정도로 그리 높지 않았으나, 그 가능성은 매우 높게 평가 되었다. 최근에 역시 Cambridge University의 E. Kymakis는 single wall nanotube와 P3OT의 복합재를 이용한 태양전지를 시도하였는데, 이때의 에너지 변환효율은 A.M. 1.5 조건에서 0.06% 정도를 나타내었다[9].

2.3.3. 공액 고분자/TiO 복합재 태양전지

TiO_2는 매우 오랫동안 연구되어온 산화물 반도체로서 화학적 안정성과 높은 광활성으로 인하여 광촉매 등의 물질로 사용되어 왔다. 태양전지 분야에서는 90년대 초반 M. Gratzel에 의해 TiO_2와 색소(dye)를 이용한 이른바 Dye sensitized solar cell (DSSC)의 개발 이후 많은 관심을 받게 되었다[10]. 반도체 고분자를 이용한 태양전지의 개발에서도 TiO_2를 electron acceptor로 사용하는 방안이 연구되었다. 1998년 J.S. Salafsky가 PPV와 TiO_2의 복합재를 이용하여 태양전지를 제조한 이후[11], TiO_2 층 위에 반도체 고분자를 정공 수송층(hole transport layer, HTL)으로 사용하며, TiO_2/semi-conducting polymer 구조의 태양전지에 대한 연구가 Johaness Kepler University의 Sariciftci 그룹과 UC Santa Cruz의 S. Carter 그룹에 의해 진행되었다. LIOS 그룹에서는 nano crystalline TiO_2 박막 위에 polythiophene 유도체를 HTL로 이용하였다. 이렇게 제작된 소자의 에너지 전환 효율은 백색광(100mW/cm^2) 하에서 최고 0.16% 정도의 값을 보였다[12]. 이와 비슷하게 UC Santa Cruz의 A.J. Breeze는 TiO_2 layer 위에 M3HT-PPV와 CN-ether-PPV의 블렌드를 코팅하여 전자-정공의 분리를 증가시켰는데, 백색광(100mW/cm^2)하에서 0.6%의 에너지 전환 효율을 얻었다[13]. 최근에는 mesoporous TiO_2 층위에 반도체 고분자인 P3HT를 채워 넣는 방법을 이용한 태양전지가 Stanford University에서 시도되었는데, 이들은 단색광(33mW/cm^2, 514nm)하에서 1.2%의 에너지 변환효율을 가짐을 보고하였다[14,15]. 이러한 bilayer 구조의 태양전지 이외에도 TiO_2의 precursor와 MDMO-PPV를 블렌드하여 복합재를 제작한 결과가 도출 되었다.

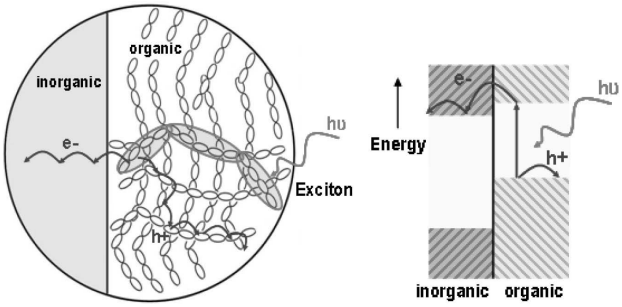

Fig. 2. NIR 영역의 감지소자의 전자와 전공(hole) 이동 기구.

근적외선 감지소자에 적용하기 위해서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 근적외선 exciton 들이 전자와 정공으로 나뉘게 된다. 이때 QD (quantum dot)가 전자를 sensing하여 wide band gap을 갖는 무기입자를 통해 이동하게 되며, 반면 전공은 공액구조를 갖는 유기물을 따라서 이동하게 된다.

전하수송 재료는 정공수송과 전자수송 재료로 나눌 수 있는데 넓게는 전하 주입도 포함된다. 전공 수송재료는 양극으로부터 정공을 주입하기 위해 이온화 포텐셜이 작은 전자공여성 분자가 사용된다. 주로 트리아릴아민을 기본 골격으로 하는 정공 이동도가 방향족 디아민 트리아민 및 테트라아민 유도체가 많이 사용된다.

3. 기술상의 문제점

유기 태양전지는 최근 10여 년간 급속도로 발전한 분야다. 특히, 최근 3년간 유기 태양전지의 효율은 A.M. 1.5 조건에서 3~4%에 이르고 있다. 이러한 괄목할 만한 성장은 donor-acceptor heterojunction 이라는 개념의 도입에 힘입은 바가 크다. 하지만, 상용화를 위한 효율을 얻기 위해서는 더 많은 개선이 이루어져야 될 것이고 이와 더불어, 실제 사용에 있어서 극복해야 할 여러 문제점들이 있다. 그것을 정리하면 다음과 같다.

3.1. 광 안정성 (Stability, Life Time)

현재 가장 많이 지적되고 있는 부분이 유기물 자체가 가지는 광 안정성 문제이다. 대부분의 유기물은 자외선에 쬐었을 경우 광산화(photo-oxidation) 현상이 일어나게 되는데, 오랫동안 빛에 노출되면 유기물의 색이 변하고 효율이 급격히 떨어지는 문제점이 있다. 현재 사용되고 있는 PPV 계열의 경우, 이러한 문제점이 두드러지게 나타난다. 이를 극복하기 위해 비교적 안정한 물질인 polythiophene (PT)과 polyfluorene (PF)계 물질이 최근에 많이 연구되고 있다[16]. 전자는 band gap이 작은 (E_g < 2eV) 물질이고 후자는 band gap이 큰 (E_g > 2eV) 물질이다. 따라서, PT의 경우는 태양전지로 사용하기에는 무리가 없으나, PF의 경우 band gap이 크므로 사용하기에는 무리가 따른다. 그러므로, PF의 경우 low band gap을 가진 물질과 co-polymer의 형태로 합성을 하여, PF의 안정성을 그대로 유지하면서 태양전지용 물질로 이용하는 방안이다[17]. 또 한 가지 방안으로 소자나 모듈 제조 시 자외선 blocking 층을 상부에 적층하여 유기물의 안정성을 향상시키는 방안도 고려될 수 있을 것이다.

3.2. 유기물의 낮은 전하 이동도 (Mobility)

유기 태양전지의 효율을 제한하는 큰 문제 중의 하나는 bulk 상태에서 유기물의 전자, 정공의 낮은 이동도(electron/hole mobility)이다. 유기물은 분자구조 상으로나 결정 구조적으로 결함이 많아 전하 이동도가 무기물에 비해서 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 예를 들면, 반도체 고분자(semiconducting polymer)/C_{60}의 경우 매우 높은 전자-정공 분리효율에도 불구하고 광전류가 낮은 이유가 이러한 전하의 낮은 이동도 때문이라고 여겨지고 있다. 고분자/유기 박막 내에서의 전하의 이동도를 향상시키기 위해서는, 우선 현재 반도체 고분자 또는 유기 반도체에서의 문제점인 정공의 이동도에 비해 상대적으로 낮은 전자의 이동도를 고려하는 점이다. 이를 위해서 고분자 내에서 사슬과 사슬 사이의 상호 작용을 연구하고 또한 박막 제작 시 유기 박막의 morphology 개선을 통하여 소자 형태에서 전극의 계면 문제를 개선시켜야 한다[18]. 이는 박막 형성 시 용액의 농도, 박막 형성 후 후처리 등을 통하여 향상시킬 수 있다. 이와 더불어 소자 형태에서 전극과 유기 박막 사이의 전하 주입의 원활함을 위하여 전극과 박막 사이에 buffer layer를 첨가하는 방법 등을 사용할 수 있다. 그 대표적인 물질로, 전도성 고분자인 poly(ethylene-dioxy thipophene): polystyrene sulphonic acid (PEDOT:PSS)가 많이 사용되고 있다[19].

3.3. 태양광 스펙트럼 대비 유기물의 비효율적 광에너지 흡수대

유기 태양전지 제조용 물질 중 metallo-pthalocyanine 단분자가 어느 정도 태양광 스펙트럼에 다가서 있지만, 현재 유기 태양전지에 사용되는 상당수의 물질들은 태양광 스펙트럼을 충분히 흡수할 수 있는 파장대를 가지고 있지 않다. 만약 태양광을 충분히 흡수할 수 있는 흡수대의 물질을 사용한다면 더 많은 광전하를 형성시킬 수 있을 것이고, 따라서 높은 효율의 유기 태양전지를 만들 수 있을 것이다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 반도체 고분자인 PPV 계열은 광흡수대와 AM 1.5 스펙트럼의 일부만 흡수한다. 따라서, 광흡수율이 높은 donor 물질을 개발하는 것이 고효율의 태양전지를 제작하는 또 하나의 관건이라고 하겠다. 현재 많이 사용되고 있는 MEH-PPV나 MDMO-PPV보다는 band gap이 낮은 polythiophene계 등 안정성도 좋고 광흡수 범위도 넓은 물질들을 적극적으로 개발할 필요가 있다. 특히 유무기 하이브리드에 유기물은 spiro compound 등이 이용되고 있다.

4. 전망

지금까지 유기 태양전지의 원리와 개발 현황, 문제점 등을 짚어보았다. 소자의 종류에 따라 그 특성이 다양하지만, 효율은 대체적으로 2~3% 정도에 이르고 있다. 이 값은 실리콘 태양전지에 비교하면 외형상 아직 매우 낮은 값이지만, 유기계 태양전지의 커다란 경제적, 기술적인 가능성을 고려할 때 극복할 수 있는 차이라고 여겨진다. 최근 10년 이내에 수십배 이상 외적인 효율이 증가한 만큼, 현재의 수준보다 2배 정도만 기술 진보가 이루어진다면 급속한 실용화의 바람을 탈 것으로 여겨진다. 이와 같은 예측은 유기 태양전지와 비슷한 구조인 유기발

광 소자의 최근 발전속도와 상용화 상황을 고려해볼 때 전혀 근거가 없는 것이 아님을 알 수 있다. 또한 유기 태양전지의 현재 단계는 기술적으로 그 수준이 초기 개발 단계이므로, 국내의 산업적 기반과 연구개발 수준을 고려해 볼 때 집중적으로 연구가 이루어진다면, 수년 이내에 세계적인 수준에도 이를 것이라고 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업으로 진행중이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim, H., Lee, K., Park, Y., Suh, H., 2003a, J. Korean Phys. Soc. 42, pp. 183-186.
2. Kim, H., Joo, Y.J., So, W.W., Moon, S.J., 2003b, Proc. The 5th Korean Battery Society Meeting (Daejon).
3. Ahn, Y.-J., Kang, G.-W., Lee, C.H., 2002, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 377, pp.301-304.
4. Song, M.Y., Kim, J.K., Kim, K.J., Kim. D.Y., 2003a, Synth. Met. 137, pp. 1387-1388.
5. Greenham, N.C., Peng, X., Alivisatos, A.P., 1996, Phys. Rev. B 54, pp17628-17637.
6. Huynh, W.U., Dittmer, J.J., Alivisatos, A.P., 2002, Science, 295, pp.2425-2427.
7. Dekker, C., 1999, Phys. Today, May, pp.22-28.
8. Ago, H., Petritsch, K., Shaffer, M.S.P., A.H., Friend, R.H., 1999, Adv. Mater, 11, pp. 1281-1285.
9. Kiline, R.J., McGehee, M.D., Kadnikova, E.N., Liu, J., Frechet, J.M.J., 2003, Adv. Mater. 15, pp. 1764-1768.
10. O' Regan, B., Gratzel, M., 1991, Nature, 353, pp.737-739.
11. Salafsky, J.S., Lubberhuizen, W.H., Schropp, R.E.I., 1998, Chem. Phys. Lett. 290. pp.297-303.
12. Gebeyehu, D., Brabec, C.J., Sariciftci, N.S., Vangeneugden, D., Kiebooms, R., Vanderzande, D., Kienberger, F., Schindler, H., 2002, Synth. Met. 125, pp.279-287.
13. Breeze, A.J., Schlesinger, Z., Carter, S.A., Horhold, H.H., Tillmann, H., Ginley, D.S., Brock, P.J., 2001, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 4108, pp.57-61.
14. Coakley, K.M., McGehee, M.D., 2003b, appl. Phys. Lett. 83, pp.3380-3382.
15. Coakley, K.M., Liu, Y., McGehee, M.D., Frindell, K.L., Stucky, G.D., 2003a, Adv. Funct. Mater. 13, pp.301-306.
16. Pacios, R., Bradley, D.D.C., Nelson, J., Brabec, C.J., 2003, Synth. Met. 137, pp.1469-1470.
17. Dhanabalan, A., van Duren, J.K.J., van Hal, P.A., van Dongen, J.L.J., Janssen, R.A.J., 2001 Adv. Funct. Mater. 11. pp255-262.
18. Shaheen, S.E., Brabec, C.J., Sariciftci, N.S., Padinger, F., Fromherz, T., Hummelene, J.C., 2001, Appl. Phys. Lett., 78, pp.841-843.
19. Zhang, F., Johansson, M., Andersson, M.R., Hummelen, J.C., Ingandas, O., 2002, Adv. Mater. 14, pp.662-665.

김백진

- 1987 홍익대학교 화학공학과 (학사)
- 1991 연세대학교 화학공학과 (석사)
- 2004 서울대학교 응용화학부 (박사)
- 1992~현재 한국생산기술연구원 수석연구원