

저가 광소자용 무/유기 융합 소재기술 개발

글 _ 석상일
한국화학연구원

1. 서론

광 소자란 광을 단순히 전달, 분배 하는 수동형 소자로부터 광을 발생, 변환시키거나 광을 매개로 광을 제어 혹은 광으로부터 다른 에너지로 전환시키는 능동 소자를 통칭하여 말한다. 대용량, 초고속 인터넷과 무선 통신의 실현에는 다양한 용도의 수동/능동 광 소자가 사용되고 있는 것은 익히 잘 알려진 사실이다. 특히 각 가정까지 완전 광통신망의 구축에는 저가의 집적형 광 소자가 필요하며, 나아가 휴대폰, 컴퓨터 등 개개의 기기 내에서도 대용량 신호 처리를 위한 광 소자가 개발 되고 있다. 전기적 에너지로부터 광을 고효율로 만드는 LED, 태양광으로부터 전기적 에너지를 직접 얻는 태양전지와 광 신호를 전기적 신호로 바꾸는 이미지센서 혹은 포토디텍터도 광 소자에 속한다. 이로부터 현재의 산업과 생활을 지탱하는 다양한 장비/용품에 들어있는 광 소자에는 광의 기능과 특성을 제어하거나 에너지를 변환하여 광으로부터 전기적 에너지를 얻는 고효율 저가의 광·전 소재 개발이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

지금까지 광·전 기능을 주는 핵심 소재 부분은 주로 고가의 진공장비를 이용하거나 단결정 등 물리적 재료가공법에 의하여 제조되고 있다. 예상되는 바와 같이 이러한 물리적인 방법은 제조 공정이 가진 한계로 저가이며 고효율인 광 소자의 제조에 어려움을 가지고 있으므로 관련 산업의 발전이나 범용화에 장애 요인이 되고 있다. 최근에는 화학적으로 제조된 나노 사이즈의 입자가

벌크 소재에서 가지지 않는 새로운 특성이 발견되고, 이와 관련한 소재의 화학적 합성법이 개발됨에 따라 기존에 사용되고 있는 광 소자를 화학적 용액공정을 이용하여 더욱 저가이며, 효율이 우수한 광 소자의 개발을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 기존의 물리적인 방법으로 광 소자를 제조하는 공정에서 도달하기 어려웠던 대면적이거나, 투명하고 유연성을 가진 유기 기관의 사용 등에 있어서 탁월한 장점을 가진 화학적인 소재의 개발에 대한 중요성과 필요성이 크게 증가하고 있다. 이와 더불어 복합기능, 다기능 등이 요구됨에 따라 소재 자체도 무기물과 유기물을 단순히 복합화하는 차원을 벗어나 각 소재가 가진 장점만을 결합한 소재간 융합화/하이브리드화하는 움직임이 활발하다. 대표적인 예로 트랜지스트(TFT)에서 반도체부분은 무기물로 기타는 유기물로 혹은 그 반대로 하여 각 소재가 가진 특성의 극대화화 더불어 공정용이성을 함께 가지도록 연구를 추진하고 있다. 또한 용액 공정이 용이한 나노 사이즈의 무기 입자를 제조하는 과정에서 입자의 크기를 원자단위에서부터 제어가 가능하므로, 기존의 물리적 방법에 의하여 재료를 가공할 때 나타나지 않았던 특성이 어떤 임계 크기 이하로 더욱 작게 할 때 기존에 알려지지 않은 새로운 기능이 나타나거나, 기존의 특성이 극대화되는 새로운 현상도 발견되고 있다. 따라서 이러한 특성을 적극적으로 활용하면 가격은 저가이면서 특성은 매우 향상된 광 소자 혹은 기존에 존재하지 않았던 새로운 개념의 광 소자 개발도 가능하다. 특히 산업적인 측면에서 완제품 조립 기술은

기술의 평준화 속도가 매우 빠르게 진행되고 있는 상태로, 기술 차별화의 출발점이 고 효율, 고 신뢰성의 새로운 소재로부터 시작되는 경향이 더욱 심화되고 있는 상황이다. 이에 따라 첨단 산업의 창출뿐만 아니라 전통 산업의 고도화 측면에서도 용액 공정을 이용한 저가, 고효율 광 소자 제조 분야의 기술 흐름에 주목할 필요가 있다고 생각한다. 본 글에서는 앞에서 언급한 광 소자 중에서 저가의 고효율 태양전지 혹은 근적외 영역 포토디텍터 제조가 가능한 무/유기 융합 소재 기술에 한정하여 기술하고자 한다.

2. 기술현황

최근 에너지 가격의 급증과 지구 온난화 문제와 연관한 녹색 성장을 위한 청정 에너지원으로서 태양 에너지에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 태양 에너지를 직접 이용하는 중요한 수단중의 하나인 태양전지 (solar cell 또는 photovoltaic cell)는 광전효과(photovoltaic effect)를 이용해 태양광 에너지를 전기 에너지로 직접 변환시키는 장치이다. 태양전지의 대표는 실리콘 소재를 이용한 태양전지로서, 에너지 변환효율이 단결정인 경우 20% 이상이다. 그러나 실리콘계 태양전지는 기본 소재인 실리콘을 고순도로 정제하고 단결정화하는 제조 공정을 가지므로 태양 전지의 제작단가를 낮추는데 한계를 가지고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 무정형의 박막형 연구가 활발하게 진행 중이나 아직은 상대적으로

낮은 효율, 시간에 따른 효율 저하 등 여러 점에서 문제점을 가지고 있다.

최근에는 분자 설계에 의한 화학적 합성법으로 재료의 구조를 손쉽게 변형할 수 있어 우수한 광전 특성의 발현이 가능하며, 스피로코팅 혹은 인쇄공정과 같은 저가의 용액 공정을 통하여 태양전지의 제작 단가를 획기적으로 낮출 수 있는 유기박막형 태양전지의 연구가 활발하다. 그러나 유기박막 태양전지의 경우 아직까지 약 5% 정도의 에너지변환 효율이 보고되고 있으며, 통상의 가동 조건에서 소재의 열화에 의한 빠른 성능저하가 일어나는 근본적인 문제가 있다. 이에 반하여 TiO₂ 나노 입자를 기반으로 하는 염료감응 태양전지의 경우 저가 제조공정이 가능하면서 약 12% 정도의 높은 에너지변환 효율이 보고되어 있어 상용화 가능성이 가장 높다. 그러나 액체상의 전해질 사용으로 전해질의 누수에 따른 문제점과 장기 안정성에 의한 신뢰성 부족으로 상업화가 늦어지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 수년 전부터 아래 Fig. 1과 같이 기존의 염료를 CdSe, PbS 등과 같은 양자점 나노 입자로 바꾸고, 액체전해질을 홀 전도성 유기재료로 대체한 형태의 소위 무/유기 융합소재를 이용한 태양전지의 제조 연구가 활발하다. 본 글의 저자도 이와 같은 개념을 이용하여 저가이며 고효율인 태양전지와 근적외선(Near-IR 혹은 Shortwave IR) 감지 능력을 가진 포토디텍터 및 이미지 센서 연구가 진행 중이다.

상기에서 간단하게 언급한 바와 같이 무/유기 융합 소재를 이용한 태양전지는 기존의 순수 무기계 태양전지가

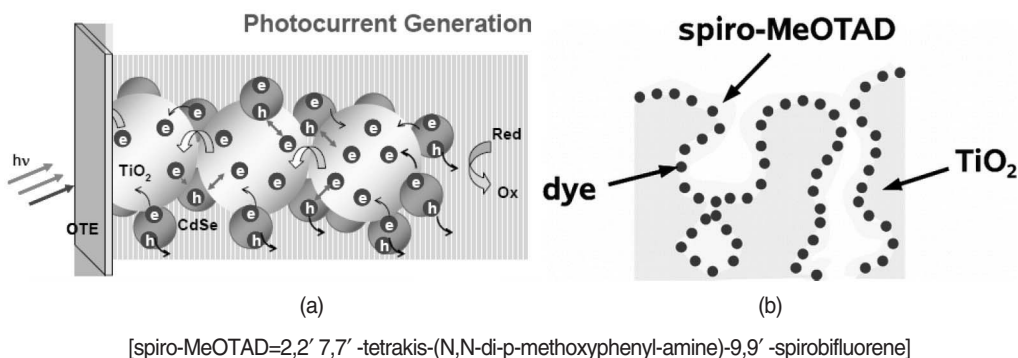


Fig. 1. Schematic diagram of CdSe sensitized solar cell, and spiro-MeOTAD as hole conductor.

가지지 못하는 다양한 장점을 포함하고 있지만, 상업화의 열쇠는 우수한 에너지 변환 효율을 갖는 소재의 개발에 있다고 하겠다. 다시 말해서 용액공정(스핀 코팅, 스크린 프린팅, 인쇄공정 등)으로 저가의 태양전지 및 근적외선 포토디텍트 개발에 필요한 핵심 소재는 광을 흡수하는 반도체 양자점 나노 입자와 반도체 양자점 나노 입자가 광을 흡수하여 생성한 전자-정공쌍에서 전자 받게 층으로서 TiO₂, ZnO 등의 다공성 나노 입자 층 및 홀 받게 층으로서의 홀 전도성 유기물 등이 있다.

여기서 반도체 양자점 나노 입자에 대하여 좀더 자세히 설명하면 다음과 같다. 반도체적인 거동을 가지는 재료가 일정 크기 이하로 작아지게 되면(exiton Bohr 반경 이하) 존재하는 전자 혹은 홀이 물질속에 강하게 구속되어 양자효과를 가지게 된다. 양자효과가 나타나는 크기 이하로 작아 지게 되면 이때 그 재료가 가진 고유의 전자적 특성도 변화하게 되는데, 예를 들어 Fig. 2에서 보는 바와 같이 고유의 밴드 갭을 가진 CdSe반도체가 입자 크

기에 대응하여 밴드 갭도 연속적으로 변화하게 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 각 소재 별 입자의 크기 조절로 이용 가능한 파장대역을 나타낸 것이다. 다시 말해서

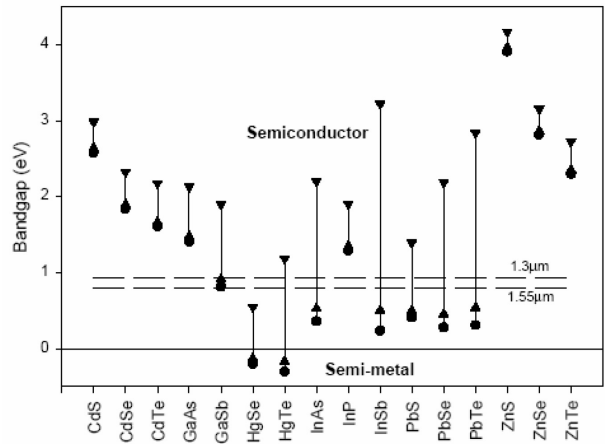


Fig. 3. Possible range of band gap for various semiconductors.

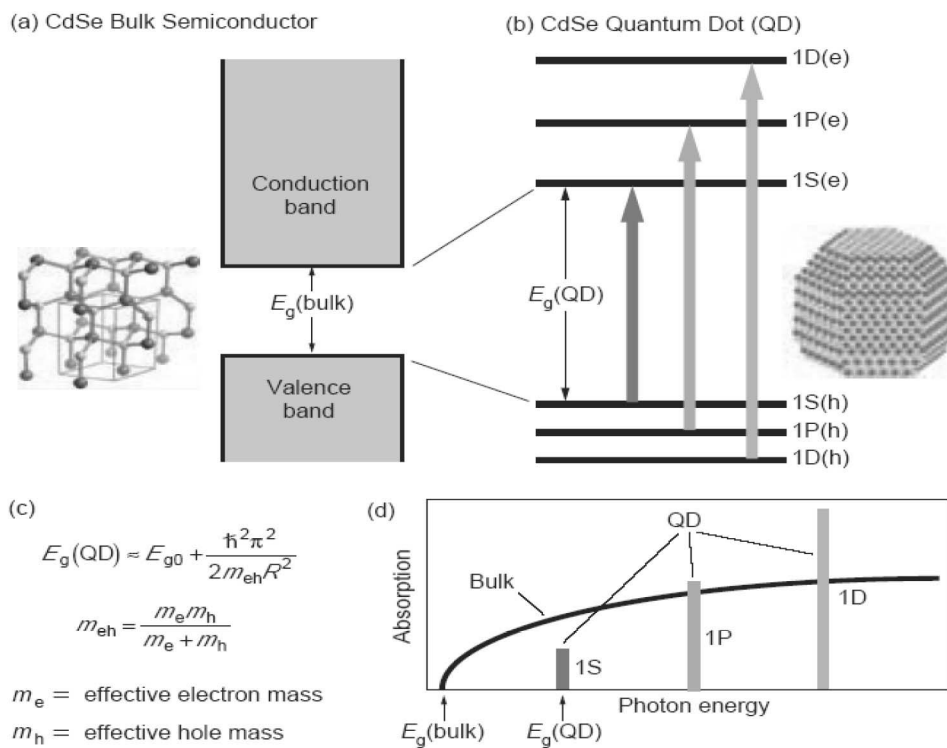


Fig. 2. Band gap of CdSe with particle size under quantum confinement. (출처 : Los Alamos Science NO 28, 214(2003))

물질 고유의 밴드 갭을 중심으로 입자의 크기를 조절하면 일정한 범위까지 동일 물질을 이용하여 흡수 혹은 발광되는 파장의 조절이 가능하다는 의미이다. 결론적으로 반도체 입자의 크기 조절로 특정 파장의 빛을 내는 발광 혹은 검출을 위한 광 소자의 개발이 가능하다. 이러한 연구의 가능성은 1990년대 후반부터 다양한 반도체 소재에 대하여 화학적인 입자 성장법으로 다양한 크기/모양의 콜로이드형 반도체 양자점의 제조법이 개발된 것에 힘입은바 크다. 특히 콜로이드 양자점 나노 입자는 입자 크기 및 분포, 표면 구조 제어 등이 비교적 유연하게 제어 혹은 대처가 가능하고, 프린팅, 스핀 코팅 등 저가격화가 유리한 용액 공정 적용이 가능하여 특성은 높고 가격은 저렴한 신 개념의 광 소자 개발에 매우 유용하다.

현재까지 문헌을 통하여 발표되고 있는 양자점 나노 입자 혹은 전기 전도성 유기물과 융합한 태양전지 혹은 포토디텍터 관련 광 소자 연구를 간단히 살펴보면 다음과 같다. 2002년 이스라엘 Hebrew 대학 나노 기술 센터의 N. Tessler 교수 그룹은 Science지에 공액 고분자와 InAs 나노 입자를 이용하여 Near IR 영역에서 전기적으로 발광하는 다이오드를 구현하였다고 보고하고 있다. 반도체 양자점 나노입자를 이용한 태양전지 연구는 UC Berkely의 Alivisatos 교수 그룹이 매우 활발하게 진행 중이며, 2002년 Science지에 공액 고분자의 일종인 Regioregular poly(alkylthiophene)과 CdSe 나노 막대를 혼합한 형태의 광전 소자를 개발하여 외부 양자 효율이 54%, 태양에너지 전환효율 1.7%를 달성하여 많은 관심을 받았다. 또한 2005년 10월 역시 Science지에 발표한 내용에 의하면 화학적 방법으로 합성된 콜로이드형 CdSe와 CdTe 양자점 나노 입자를 다층 박막으로 구성하여 공기 중에서 안정하며 변환 효율이 약 3%인 태양전지에 대하여 보고하고 있다.

한편 반도체 나노 입자와 소재 융합을 통하여 고효율 저가 태양전지 혹은 포토디텍터 소자 구현에 있어서 핵심 소재중의 하나인 전기 전도성 유기물은 1977년 폴리아세틸렌의 도핑을 통해 전기 전도도를 급격히 증가시키는 현상이 발견되었고, 이러한 공로를 인정받아 UC Santa Barbara의 A.J. Heeger 교수, UPenn의 A.G. McDiarmid 교

수 및 일본의 H. Shirakawa 교수는 2000년 노벨 화학상을 공동으로 수상하였다. 전도성 유기물과 달리 도핑을 하지 않은 반도체 고분자는 1990년 영국 캠브리지 대학의 R. Friend 교수팀에 의해 PPV[poly(p-phenylene vinylene)]을 이용한 고분자 발광소자 (PLED, Polymer Light Emitting Diode)의 발명과 함께 세계적인 주목을 받게 되었다. PLED의 성공으로 인해 반도체 고분자를 이용한 다양한 응용이 시작되었는데 유기태양전지도 그 중 하나이다. 또한 TiO₂ 복합물 유기 광전소자 연구는 1999년 네덜란드의 Salafsky 그룹에서 PPV precursor와 TiO₂ 나노 입자를 복합화하여 광전소자를 제작하였으나, 에너지 전환효율이 0.1%에 미치지 못하였으며, 2003년 네덜란드의 Janssen 교수 그룹에서 줄-겔 방법으로 공액 고분자와 TiO₂ 복합체 제조를 시도하였으며, 0.18%의 에너지변환 효율을 얻었다. 또한, 영국의 Cambridge 대학 등에서 카본 나노튜브를 이용한 유기 광전소자의 개발을 시도하고 있으나 낮은 효율로 인하여 많은 연구가 필요한 실정이다. 이와 같이 고분자/무기 복합체 태양전지의 경우 아직까지 효율 및 기타 특성이 많이 낮은 수준이지만, 최근 대두된 양자점을 이용한 태양전지의 경우 1.7% 정도의 효율을 보여주어 향후 지속적인 연구에 의해 효율 증대가 일어날 것으로 예상된다.

그런데 여기서 주목하여야 사항 중의 하나로 태양 에너지의 거의 반은 적외선 영역에 존재하므로 적외선까지 포함하여 전기적 에너지를 얻는다면 태양전지의 효율은 크게 증가할 것이다. 예로서 1cm² 크기의 실리콘 태양전지로 태양광으로부터 직접 얻을 수 있는 전기에너지가 0.01W이지만, 동일한 크기의 적외선 포토볼타익 셀(infrared photovoltaic cell)은 이론적으로 1W를 생성시킬 수 있는 것으로 알려졌다. 특히 미국의 재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory)의 Norzik 박사는 적외선 영역에서 광을 흡수하는 PbS(e)계 나노 입자는 흡수된 포톤 에너지가 충분히 큰 경우 다중 여기(multiple excitons)가 가능하여 이론적인 태양에너지의 변환효율이 65% 이상으로서, 지금까지 알려진 태양전지의 약 2배 이상의 효율을 가진 태양전지의 제조가 가능하다고 언급하고 있다. 실제로 Los Alamos National

Laboratory의 Victor Klimov는 PbSe 양자점 나노 입자로부터 다중 여기 현상을 실험적으로 관찰 보고하였다.

2003년 캐나다 토론토 대학 Sargent 교수 그룹에서는 Advanced Materials 지에 화학적으로 제조된 PbS 양자점 나노 입자를 이용하여 CMOS compatible 광소자 제조를 목표로 1000 ~1600 nm 영역에서 전기적으로 발광하는 나노 소재를 공액 고분자 매질에 PbS 나노 입자의 나노 분산체로부터 제조하였다고 보고하고 있다. 그 후 2006년 7월에는 Nature지에 아래 Fig. 4와 같이 금속으로 된 두 전극 사이에 PbS 양자점 나노 입자를 용액공정으로 스프린코팅하여 초고감도 광검출 소자의 제조가 가능하다고 보고하고 있다.

또한 2009년 3월에는 ACS Nano지에 유독성의 Cd 혹은 Pd를 포함하지 않는 In₂S₃ 나노 입자를 광 흡수층으로 사용한 포토디텍터 소자에 대하여 보고하고 있다. 이상으로부터 양자 효과와 같은 광전 가능성을 가진 무기 반도체 나노 입자와 전기 전도성을 가진 유기재료를 융합하고 이의 계면 제어 및 3차원적인 구조 제어에 의해 저가이면서 특성이 우수한 태양전지 및 포토디텍터와 같은 광 소자의 제조가 가능하다는 것을 알 수 있다. 나아가 기존의 물리적 방법으로는 구현이 어려운 대면적 소자 제조, 유기물 기관 활용 등 무/유기 원천소재 개발을 통

하여 신기능/복합기능이 도입된 신개념의 저가 광 소자 제조가 가능하리라 생각한다.

3. 기술의 내용

앞의 기술현황에서 언급한 바와 같이 용액공정이 가능한 무/유기 소재를 이용한 태양전지 혹은 포토디텍터와 같은 광전소자(optoelectronic devices) 적용 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이것은 2000년 초반부터 활발하게 진행된 반도체 나노 입자의 화학적 합성법 개발 및 물리적 물성에 대한 기술적 진보에 따른 자연스런 현상이다. 태양전지와 포토디텍터는 둘다 광 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 것이지만, 궁극적인 목표 물성은 크게 다르다. 태양전지는 에너지(power)를 발생시켜야 하지만, 포토 디텍터는 에너지를 소모하여도 광이 입사되기 전·후의 전기적 신호 차이가 크면 된다. 아래 Fig. 5는 광을 감지하는 서로 다른 방식을 나타낸 것으로 태양전지와 같은 다이오드 방식과 외부 바이어스가 인가된 상태에서 광에 의한 전기전도도 변화를 감지하는 방식으로 나눌 수 있다.

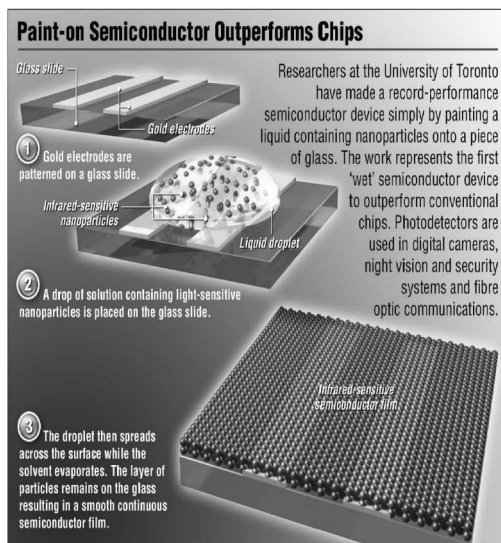
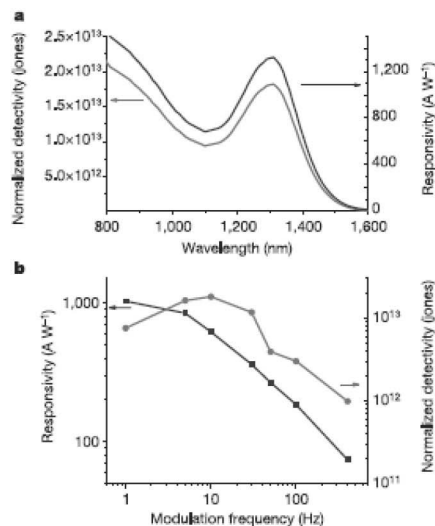


Fig. 4. Ultrasensitive solution-cast quantum dot photodetectors.



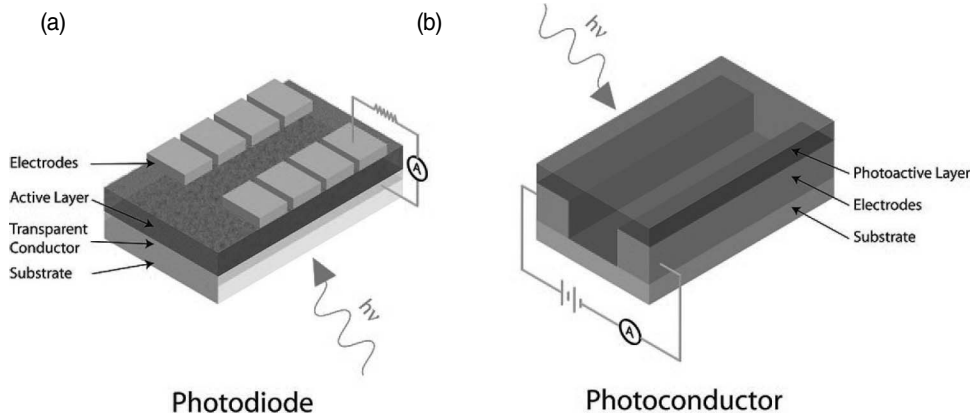


Fig. 5. Schematic representation of (a) a photodiode typical of the photovoltaics discussed in the text with a bulk heterojunction active layer and (b) a photoconductor used for photodetection. (ACS Nano, 3, 2009, 261)

상기 그림에서 보인 나노 입자 기반의 포토디텍터는 순수한 나노 입자를 금속으로 된 두 전극 사이에 스펀 코팅하거나, 전도성 고분자와의 혼합체를 유기 태양 전지 처럼 구성된 형태로 아직 감지 능력이 떨어지거나 고전압을 항상 두 전극 사이에 인가하여야 하는 문제점이 있다. 본 글의 저자가 현재 연구하고 있는 방식은 염료감응 태양전지의 구조를 응용한 형태로 TiO_2 혹은 ZnO 나노 입자로 구성된 다공성 광 전극에 근적외선 감지 능력을 가진 나노 입자를 제어된 위치에 제어된 양 만큼 도입하고, 이러한 무기 복합 표면에 홀전도성 유기물을 접촉한 무/유기 융합소재를 기반으로 한 근적외선 감지 포토 디텍터 제조용 소재를 개발하고 있다. 이 방법은 흡수파장대역이 다른 양자점 나노 입자를 가진 층을 서로 적층하여 RGB가 가능한 칼라 이미지 센서 제조도 가능하리라 생각한다. 본 글의 저자가 연구하는 근적외선 포토디텍터 및 이미지 센서의 기술 현황을 살펴보면 향후 다음과 같은 장점으로 인해 그 기술의 수요가 크게 증가할 것으로 생각한다. 파장대가 약 1000-1600 nm 대역(Shortwave IR=SWIR)의 근적외선은 눈에 보이지는 않지만 Fig. 6 과 같이 어두운 밤에도 상당량이 존재하고 있다는 것을 알 수 있다.

이것은 SWIR대역을 볼 수 있는 포토디텍터 혹은 이미지 센서가 제조된다면 매우 밝은 영상을 밤에도 얻는

것이 가능하다는 뜻이며, 실제로 Fig. 7에서 보는 바와 같이 다른 파장대역과 구별되는 매우 선명한 영상을 얻을 수 있어 군사, 보안, 내부검사, 의료 이미지 등 다양한 분야에 적용이 가능하다. 특히 SWIR은 가시광선에서 사용되는 광학계를 그대로 사용할 수 있고 냉각이 필요 없기 때문에 상대적으로 소형화/저가화가 가능하다. 상기에서 설명한 양자점 기반 무/유기 융합 소재를 이용하면 광 흡수 파장대가 서로 다른 입자를 사용하여 SWIR 및 가시광 이미지 센서도 저가로 쉽게 제조가 가능하리라

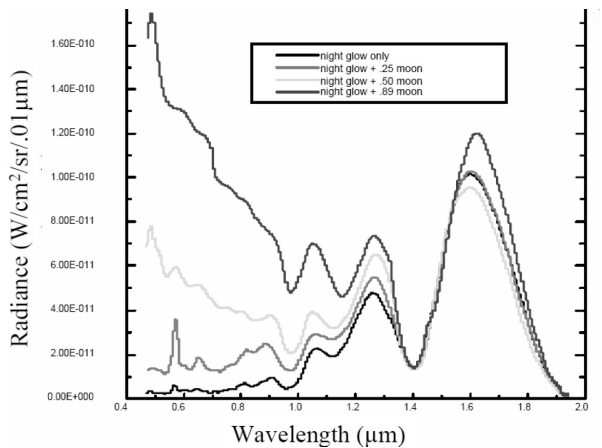


Fig. 6. Radiance of night sky. (source: Vatsia, Mirshri, L. "Atmospheric Optical Environment", Research and Development Technical Report ECOM-7023, September (1972))

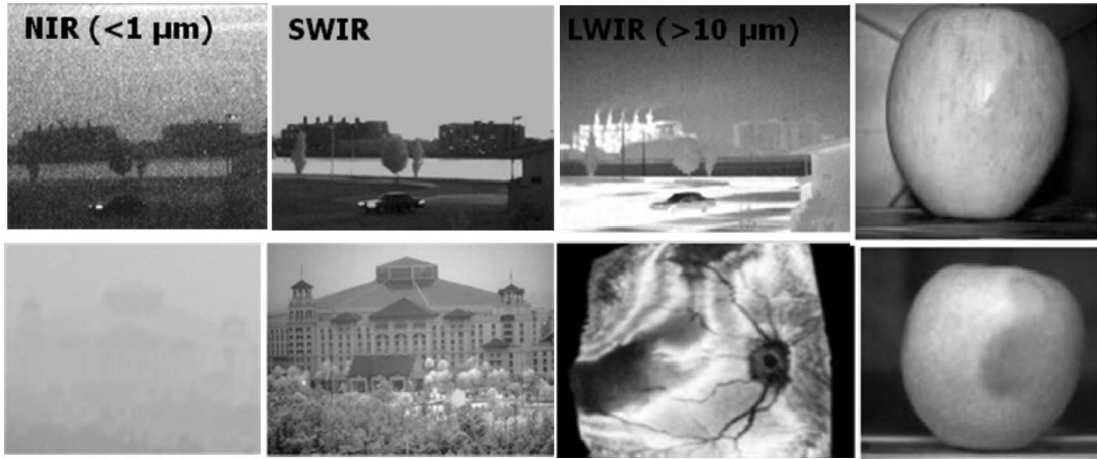


Fig. 7. Imaging through SWIR.

생각한다. 또한 SWIR과 가시광 이미지 센서와의 결합도 용이하여 서로 보완적인 이미지 영상을 얻을 수 있는 새로운 개념의 이미지 센서도 저가로 제조가 가능할 것이다. 이렇게 되면 어두운 밤이나 안개 등으로 시야 확보가 어려운 상황의 자동차 안정성 확보용으로도 사용이 가능할 것으로 예상된다.

4. 기술의 핵심

본 기술에서 주로 기술한 저가 광소자 즉 태양전지 혹은 포토디텍터를 무/유기 융합소재를 이용하여 용액공정으로 제조하기 위해서는 고효율 소자 동작에 필요한 여러 요구 조건을 만족하는 핵심 소재의 개발이 무엇보다

도 중요하다. Fig. 8은 무/유기 융합소재를 이용한 광전 소자 구성의 기본 개념과 광에 의해 발생된 전자와 홀을 외부로 끌어내기 위한 각 소재간 밴드 갭 매칭을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 핵심소재는 원하는 파장 대역의 빛을 흡수하는 양자점 나노입자, 양자점 나노 입자를 지지하고 계면에서 양자점 나노입자가 생성한 전자를 흡수하는 다공성 광 전극 및 홀 전도성 유기물이다. 이러한 핵심 소재를 이용하여 신뢰성 있고 재현성 있는 물성을 가진 소자를 제조하기 위해서는 광 전극/양자점 나노 입자의 3차원 배열 기술, 각 소재간 계면 특성 제어기술이 핵심 기술로서 개발이 필요하다.

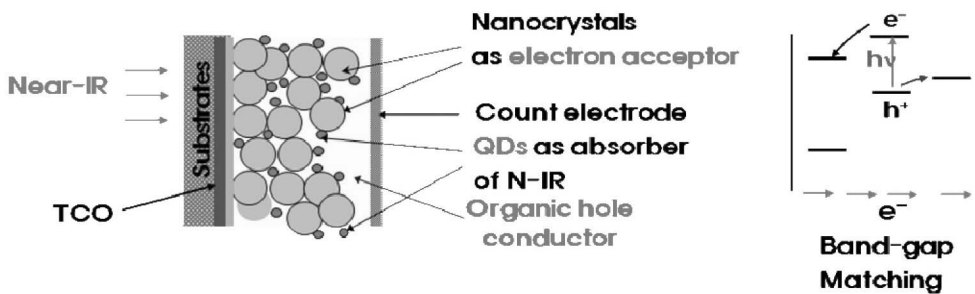


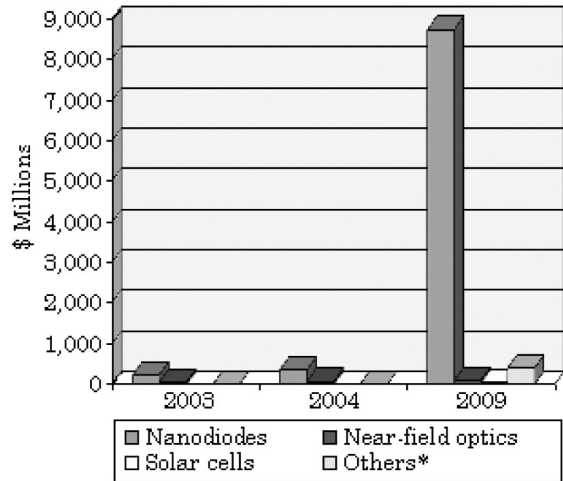
Fig. 8. Schematic diagram for N-IR photodetector, and band-gap matching among key materials.

5. 파급효과

세계의 광소자 시장은 Fig. 9의 세계의 광 소자 연도별 시장추이와 같이 2004년의 4억 2000만 미국 달러에서 연간 평균 성장률 85.8%로 급성장하여 2009년에는 93억 2500만 미국 달러에 달할 것으로 예측("Nanotechnology for Photonics": Business Communications Company, Inc.) 하고 있다. 물론 이 중에서 LED가 차지하는 비중이 절대 다수를 차지하고 있지만 태양전지 및 포토디텍터를 포함한 광전 소자의 시장도 크게 증가 할 것으로 예측된다. 실제로 2005년 일본 광산업협회(http://www.oitda.or.jp)에서 조사한 자료에 의하면 Table 1에 보인 바와 같이 포토 디텍터의 일본 시장만 3천5백억엔 이상이며 연 평균 성장률도 10%가 넘고 있다는 것을 알 수 있다. 이로부터 본 글에서 언급한 용액 공정이 가능한 무/유기 융합소재를 이용하여 보다 가격이 저렴하면서 특성이 우수한 광소자의 제조 기술이 개발 된다면 새로운 용도 개발 등에 의하여 그 수요가 크게 증가 할 것으로 예상된다.

6. 전망

새로운 소재를 이용한 새로운 소자의 개발은 전 세계



(* : Includes optical switches, nanophotonics ICs, Holographic memory, optical amplifiers and add/drop filters) (source : Business Communications Company, Inc.)

Fig. 9. Global market for optoelectronic devices.

Table 1. Optoelectronics Industry in Japan

| Product Items | 2004FY Production Actual (in million yen) | Growth Rate (%) | 2005FY Production Estimate (in million yen) | Growth Rate (%) | 2006FY Production Prospect (in million yen) | Growth Rate (%) |
|--|---|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|
| Optical Communications Equipment | 204,066 | ▲1.2 | 193,843 | ▲5.0 | 251,582 | 29.8 |
| Trunk System (including MUX) | 53,880 | ▲3.7 | 82,395 | ▲12.2 | 83,087 | 0.8 |
| Metro System | 34,462 | 29.4 | 43,131 | 25.2 | 47,963 | 11.2 |
| Access System | 31,574 | ▲10.2 | 22,201 | ▲29.7 | 61,015 | 174.8 |
| Optical LAN, Wireless LAN | 20,501 | 23.4 | 24,048 | 17.3 | 24,880 | 3.3 |
| Picture Transmission (CATV, CCTV, etc.) | 11,755 | 94.5 | 8,660 | ▲26.3 | 19,882 | 129.0 |
| Optical Fiber Amplifier | 11,304 | ▲19.2 | 12,721 | 12.5 | 14,055 | 10.3 |
| Others | 590 | ▲22.9 | 690 | 16.9 | 690 | 0.0 |
| Optical Disk | 703,138 | ▲31.1 | 639,024 | ▲9.1 | 665,368 | 4.1 |
| Equipment | 585,266 | ▲34.8 | 529,068 | ▲9.6 | 552,682 | 4.5 |
| Read only (CD, MD, DVD) | 353,095 | ▲30.8 | 329,595 | ▲6.7 | 329,029 | 2.9 |
| Recordable (MD, MD, CD, DVD) | 232,171 | ▲39.6 | 199,473 | ▲14.1 | 213,653 | 7.1 |
| Medium | 69,967 | ▲7.3 | 65,995 | ▲4.2 | 72,965 | 8.9 |
| Write-once (CD, DVD) | 39,930 | ▲19.2 | 34,500 | ▲14.9 | 34,700 | 2.1 |
| Rewritable (MD, MO, CD, DVD) | 30,037 | ▲19.2 | 32,995 | 9.8 | 38,269 | 16.0 |
| Others (Optical Head, Processing & Inspection Equipment) | 47,905 | 1.7 | 42,961 | ▲10.3 | 39,721 | ▲2.4 |
| Optical IC Equipment | 1,741,965 | ▲4.4 | 1,684,741 | ▲3.3 | 1,576,731 | ▲4.4 |
| Printers | 141,152 | ▲1.0 | 136,088 | ▲3.6 | 118,328 | ▲13.1 |
| Digital MFR (EAX, Copy, MFP) | 307,285 | ▲19.5 | 212,058 | ▲11.0 | 246,069 | 15.3 |
| Bar Code Reader | 20,049 | ▲22.7 | 22,021 | 9.9 | 22,839 | 3.7 |
| Image Scanners | 25,811 | ▲5.4 | 30,258 | 17.2 | 41,056 | 35.7 |
| Digital Still Camera | 822,194 | ▲28.5 | 848,531 | 3.2 | 738,222 | ▲13.0 |
| Digital Video Camera | 418,964 | ▲28.8 | 428,922 | 2.4 | 402,879 | ▲4.1 |
| Others | 5,110 | 42.4 | 5,675 | 12.4 | 7,338 | 28.8 |
| Display Equipment | 1,155,337 | 14.8 | 1,341,956 | 16.2 | 1,461,746 | 8.9 |
| Flat Panel Display | 950,949 | 29.5 | 1,151,563 | 21.1 | 1,257,743 | 9.2 |
| LCD | 549,800 | 47.8 | 752,247 | 36.8 | 810,304 | 7.7 |
| PDP | 395,719 | 10.8 | 393,473 | ▲0.6 | 441,963 | 12.3 |
| Others(LED) | 5,430 | 10.7 | 5,543 | 2.1 | 5,516 | ▲0.3 |
| Projection Display | 188,332 | ▲27.6 | 173,920 | ▲7.6 | 175,673 | 0.9 |
| Large Screen (60 inches or more) | 16,056 | 91.2 | 16,767 | 4.4 | 28,430 | 69.6 |
| Laser Processing Equipment | 244,461 | 16.5 | 291,944 | 19.4 | 330,352 | 13.2 |
| CO ₂ Lasers | 59,514 | 38.7 | 69,351 | 16.5 | 74,321 | 7.2 |
| Solid State Lasers | 33,398 | ▲0.8 | 37,783 | 13.1 | 44,486 | 17.7 |
| Excimer Lasers | 147,550 | 20.3 | 180,050 | 22.0 | 206,050 | 14.4 |
| Others | 3,989 | 20.1 | 4,760 | 19.0 | 5,495 | 15.4 |
| Medical Laser Equipment | 8,805 | ▲2.6 | 9,008 | 2.3 | 9,193 | 2.1 |
| Optical Sensors | 192,410 | ▲48.6 | 199,011 | 3.4 | 235,999 | 18.4 |
| Optical Measuring Instrument | 7,608 | ▲13.4 | 8,232 | 7.4 | 7,714 | ▲6.3 |
| Optical Fiber Splicers | 9,800 | 34.9 | 8,260 | ▲15.7 | 8,767 | 6.1 |
| Sub Total for Optoelectronics Equipment | 4,267,250 | ▲3.9 | 4,376,019 | 2.5 | 4,647,052 | 3.9 |
| Light Emitting Devices | 381,047 | ▲18.6 | 390,683 | 2.5 | 418,555 | 7.1 |
| Laser Diodes | 101,224 | ▲18.6 | 103,913 | 2.7 | 107,846 | 3.8 |
| Long Wavelength (1.3, 1.55 μm) | 13,857 | 7.8 | 22,635 | 63.3 | 24,228 | 7.0 |
| Short Wavelength (0.65, 0.78, 0.83 μm) | 2,786 | ▲8.2 | 7,703 | ▲6.6 | 7,700 | ▲0.1 |
| For Pumping (0.98, 1.48 μm) | 2,786 | ▲8.2 | 2,918 | 4.7 | 3,594 | 23.2 |
| Others | 2,086 | 13.2 | 1,512 | ▲29.9 | 2,223 | 48.0 |
| Gas Lasers | 40,307 | 22.0 | 42,797 | 6.2 | 46,754 | 9.2 |
| Solid State Lasers | 4,440 | 35.6 | 8,750 | 7.0 | 6,340 | ▲25.5 |
| LEDs | 235,076 | 11.8 | 239,523 | 1.8 | 257,615 | 9.7 |
| Photo Detectors | 341,205 | 8.9 | 350,609 | 4.5 | 386,084 | 10.3 |
| Optical Diodes | 95,978 | ▲22.2 | 95,530 | 11.9 | 49,702 | ▲48.3 |
| Optical Fibers | 90,844 | 5.134 | 91,021 | 0.2 | 95,830 | ▲0.7 |
| Optical Fiber Cables | 5,134 | 9.7 | 5,509 | 7.3 | 5,669 | 1.1 |
| Intrae Fibers, etc. | 22,349 | 11.1 | 22,287 | ▲0.3 | 23,064 | 3.5 |
| Optical Connectors | 25,965 | 16.6 | 34,788 | 34.0 | 39,149 | 12.5 |
| Optical Passive Devices | 1,991,999 | 12.6 | 1,928,606 | ▲3.3 | 2,038,637 | 5.8 |
| Display Devices | 1,758,419 | 12.8 | 1,677,267 | ▲4.6 | 1,695,283 | 1.1 |
| LCD (Panel, Module) | 205,442 | 12.8 | 233,031 | 13.4 | 320,368 | 37.5 |
| PDP (Module) | 14,332 | ▲7.3 | 13,847 | ▲3.3 | 20,456 | 46.7 |
| EL | 4,008 | ▲1.7 | 2,361 | ▲41.1 | 2,830 | 22.2 |
| Others | 291,133 | 56.9 | 375,176 | 28.9 | 425,566 | 13.5 |
| Hybrid Optical Devices | 91,424 | 7.9 | 92,288 | 0.9 | 97,150 | 5.3 |
| Others (Optical Circuit, Micro-Optics, etc.) | 60,357 | ▲3.2 | 53,793 | ▲10.9 | 53,721 | ▲0.1 |
| Sub Total for Optoelectronics Components | 3,299,917 | 11.9 | 3,351,815 | 1.6 | 3,591,482 | 7.1 |
| Total for Optoelectronics Products | 7,567,167 | 2.4 | 7,727,834 | 2.1 | 8,138,504 | 5.3 |

적으로 활발히 연구되고 있는 분야이지만 실제 산업적으로 활용되기 위해서는 극복해야 될 점들이 많다. 본 글에서 핵심 소재 중의 하나로 언급한 양자점 나노 입자는 크기를 조절함으로써 밴드 갭을 쉽게 조절할 수 있고 양자화된 상태가 가진 높은 선택성 등 여러 장점들을 조합하면 기존의 소자보다 매우 향상된 성능의 소자를 제작할 수 있다. 하지만 양자점을 소자에 적용할 때 공통적인 문제점들은 양자점의 크기, 모양, 그리고 크기 분포의 제어가 불충분하여 이론적으로 예상된 바와는 다른 결과도 출된다는데 있다. 또한 서로 이질적인 무기물과 유기물을 상호 융합/결합하여 각각의 소재가 가진 장점을 충분히 활용하기 위해서는 무-유기 소재의 계면 특성을 정밀하게 제어할 필요가 있다. 특히 소자의 신뢰성과 특성의 재현성을 위해서는 용액법으로 제조한 3차원 구조물의 제어도 매우 중요하다. 이로부터 화학/물리/재료/전자 전문가들의 상호 보완적인 유기적인 협조와 공동 연구가 원활하게 이루어진다면 본 글에서 서술한 저가의 광 소자 특히 태양전지, 포토디텍터를 저가의 용액 공정으로 제조가 가능하리라 생각한다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업으로 진행중이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. N. Tessler, V. Medvedev, M. Kazes, S. Kan, and U. Banin, "Efficient Near-Infrared Polymer Nanocrystal Light-Emitting Diodes", *Science* **295** 1506-08 (2002).
2. M. Achermann, M. A. Petruska, D. D. Koleske, M.

- H. Crawford, and V. I. Klimov, "Nanocrystal-Based Light-Emitting Diodes Utilizing High-Efficiency Nonradiative Energy Transfer for Color Conversion", *Nano Lett.*, **6** [7] 1396-400(2006).
3. R. Zia, J. A. Schuller, A. Chandran, and M. L. Brongersma, *Material Today's*, **9** [7-8] 20 (2006)
4. W. U. Huynh, J. J. Dittmer, and A. Paul Alivisatos, "Hybrid Nanorod-Polymer Solar Cells", *Science*, **295** 2425-27 (2002).
5. I. Gur, N. A. Fromer, M. L. Geier, and A. Paul Alivisatos, "Air-Stable All-Inorganic Nanocrystal Solar Cells Processed from Solution", *Science*, **310** 462-65 (2005).
6. M. C. Hanna, R. J. Ellingson, M. Beard, P. Yu, O. I. Micic, and A. J. Nozik, "Quantum Dot Solar Cells: High Efficiency through Multiple Exciton Generation" : <http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37036.pdf>.
7. G. Konstantatos, I. Howard, A. Fischer, S. Hoogland, J. Clifford, E. Klem, L. Levina, and E. H., Sargent, "Ultrasensitive Solution-cast Quantum Dot Photodetectors", *Nature*, **442** 180-83 (2006).
8. Kevin M. Noone and David S. Ginger, "Doping for Speed: Colloidal Nanoparticles for Thin-Film Optoelectronics", *ACS Nano*, **3** 261 (2009)
9. The fourth future vision (This time) November, 2004: Future vision of the optoelectronics industry- <http://www.oitda.or.jp/index-e.html>.

●● 석상일



- 경북대학교 자연과학대학 화학과 학사
- 서울대학교 대학원 무기재료공학과 박사
- 코넬대학교 재료공학과 박사후연구원
- 한국화학연구원 화학소재연구단 책임연구원
- KRICT-EPFL GRL 연구책임자