

산학연 연구실 소개

포스텍 유기전자 연구실

(POSTECH Organic Electronics Laboratory, POEL)

경상북도 포항시 남구 효자동 포항공과대학교 리스트 3동 (우: 790-784)

전 화 : 054-279-2269 FAX: 054-279-8298

E-mail : cep@postech.ac.kr, Homepage : http://polymer.postech.ac.kr



연구책임자 | 박찬언 교수

포항공과대학교
화학공학과

1. 연구실 소개

본 연구실은 포항공과대학교 화학공학과 유기전자 연구실(POSTECH organic electronics laboratory)로 가볍고 유연한 차세대 전자소자를 구현하기 위하여 새로운 고분자 및 저분자 등 유기재료를 개발하고 소자에 적용 및 분석하는 연구를 수행하고 있다. 유기전자소자들 중에서도 구동 소자인 유기박막트랜지스터(organic field-effect transistors, OFETs)와 에너지 변환 소자인 유기태양전지(organic photovoltaic cells, OPVs) 분야를 주로 다루고 있다.

유기박막트랜지스터는 핵심소재인 유기반도체와 고분자 절연층으로 세분화하여 연구를 수행하고 있다. 첨가제 도입과 용매후처리 공정 등을 통하여 유기반도체의 자기조립특성을 조절시킴으로써 전하이동도를 향상시키고, 고분자 그래프트 이론을 이용한 공정 및 새로운 작용기를 가지는 고분자를 이용한 광경화 및 열경화 공정 등 다양한 기법을 고분자 절연층에 적용하여 절연 특성 및 동작수명을 획기적으로 개선시켰다. 최근에는 와이어 형태의 기판에 유기박막트랜지스터를 제작하는데 성공하였으며 이를 토대로 웨어러블 디바이스의 제작 및 응용가능성에 대한 가시적인 성과를 얻어 *Advanced Materials*, *Advanced Functional Materials* 등의 저널에 보고한 바 있다.

유기태양전지 분야에서는 낮은 효율을 향상시키기 위하여 서로 다른 흡수영역을 가진 세가지 유기물을 개발하여 광활성층에 도입, 태양광의 흡수파장대를 증가시키는 데 성공하였고, 이뿐만 아니라 고온안정성 확보를 위하여 치환된 작용기를 가지는 고분자재료를 이용하여 광활성층 내 분자

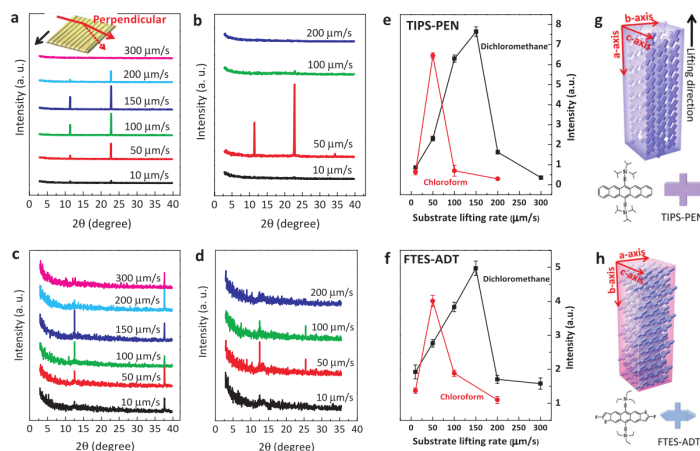


그림 1. (a~d) 유기반도체의 XRD 패턴: (a) TIPS-PEN/dichloromethane, (b) TIPS-PEN/chloroform, (c) FTES-ADT/dichloromethane, (d) FTES-ADT/chloroform, (e, f) 기판의 리프팅 속도에 따른 XRD 패턴의 세기변화, (g, h) 유기반도체 물질들의 결정구조.

구조를 제어하거나 결정성장을 조절하는 등의 방법으로 이에 관한 연구를 진행하고 있다.

이를 바탕으로 제작된 유기전자소자의 대기 중 동작수명을 향상시키기 위하여 보호피막층을 개발하고 있다. 단일 공정이 가능하면서 높은 수분차단특성을 가지는 유·무기 다층 보호피막층과 비가수분해성 졸-겔 반응을 적용한 용액공정용 유·무기 하이브리드 보호피막층 개발로, 수분차단특성 및 기계적 안정성을 확보한 유연한 보호피막층을 개발하는데 성공하였다.

향후, 유기박막트랜지스터와 유기태양전지는 기존 평판 전자소자의 한계를 뛰어넘는 가볍고 유연하며 충격에 강한 차세대 웨어러블, 플렉시블 유기전자소자의 개발을 위한 핵심 역할을 할 것이다. 따라서 본 연구실의 연구결과들이 미래의 혁신적인 유기전자소자 산업의 발전에 기여할 것으로 기대하고 있다.

2. 주요 연구분야

2.1 유기박막트랜지스터

유연전자소자의 상용화를 위해서는 스위칭 소자로 사용하는 트랜지스터의 전하 이동도가 높아야 되고 트랜지스터의 제조공정이 간단해야 한다. 또한 유기박막트랜지스터를 상용화 하기 위해서는 소자의 우수한 구동안정성을 확보해야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구실에서는 유기 반도체의 자기조립에 관한 연구나 구동안정성을 확보할 수 있는 유기 절연층을 개발하는 것에 초점을 맞추고 있다.

2.1.1 유기반도체

유기반도체 물질의 결정화도와 결정의 균일성은 유기박막트랜지스터의 성능을 결정하는 데 가장 핵심적인 역할을 한다. 따라서 본 연구실에서는 유기반도체의 자기조립 특성을 향상시키기 위해 딥코팅 등의 공정을 이용하거나 용매의 증발속도를 조절하는 등의 노력을 기울였다. 딥코팅 공정에서의 결정성은 기판의 리프팅 속도나 용매의 끓는점, 공정온도 등을 이용하여 조절할 수 있다. 우선적으로 평면 기판 위에 형성된 반도체 박막의 X-ray diffraction(XRD) 패턴을 분석하고 이에 따른 트랜지스터 소자의 전하 이동도를 비교하여, 그 공정조건을 최적화하였고 딥코팅을 이용해 형성된 유

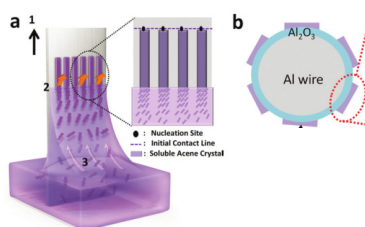


그림 2. (a) 딥코팅에서 결정 성장의 개념도, (b) 딥코팅을 통해 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 와이어기판 위에 성장한 저분자 반도체의 단면.

기반도체의 결정구조가 소자의 성능에 직접적인 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 또한 최적화된 공정조건에서 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 와이어를 기판으로 하는 유기트랜지스터를 제작하였다. 그 결과 원통형의 기판 위에서도 $1.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 높은 전하 이동도를 나타내었고 본 결과는 웨어러블 전자기기 분야의 토대가 될 핵심적인 성과라고 판단할 수 있다. 또한 용매의 증발속도를 조절하여 유기반도체의 자기조립 특성을 향상시키기 위해 첨가제로써 끓는점이 높은 클로로나프탈렌(CN)을 고-결정성고분자/저-결정성고분자/무정형고분자 반도체 용액에 소량 첨가하여 용매의 증발속도를 낮추었다. 첨가제는 유기반도체 자체의 결정 특성에 따라 다르게 나타나는데 특히 적당한 자기조립 성질을 가지는 결정성 고분자의 결정 형성을 크게 향상시키게 된다. 유기박막트랜지스터의 성능을 측정한 결과, 저-결정성 고분자 용액이 첨가제에 의해 이동도가 가장 많이 증가되었다.

2.1.2 유기 절연층

유기 절연층 물질의 경우, 낮은 누설 전류, 높은 정전 용량 등 기본적으로 절연층이 가져야 하는 기본적인 조건에 더하여, 유기 반도체와의 계면에서 트랩을 최소화할 수 있도록 표면을 형성하는 것이 중요하다. 유기 절연층으로는 주로 고분자가 사용되고 있는데, 고분자는 기본적으로 15% 이상의 자유부피를 가지고 있기 때문에 밀도가 작아서, 절연층으로 사용했을 경우 누설 전류가 매우 커지는 등 절연 특성이 떨어지게 된다. 두께를 두껍게 하여 누설 전류를 감소시킨다

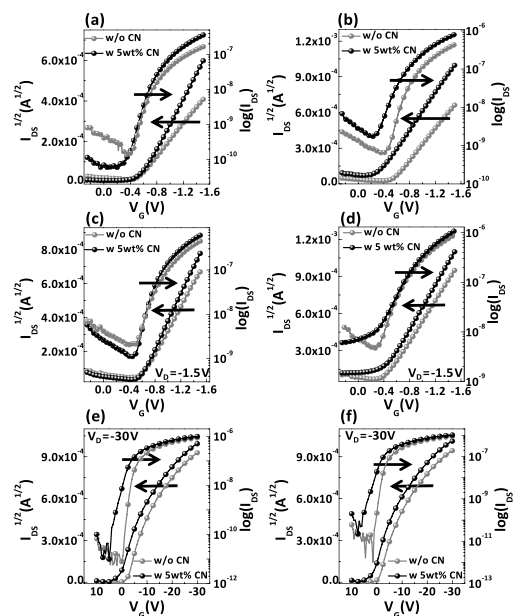


그림 3. (a, b) 열처리 전/후 저-결정성 고분자 트랜스퍼 커브, (c, d) 열처리 전/후 고-결정성 고분자 트랜스퍼 커브, (e, f) 열처리 전/후 무정형 고분자 트랜스퍼 커브; 저-결정성 고분자/고-결정성 고분자 소자는 ZrOx 를 절연층으로 사용, 무정형 고분자 소자는 SiO_2 를 절연층으로 사용.

하더라도 정전 용량이 매우 떨어지기 때문에, 유기박막트랜지스터의 구동 전압이 증가하게 되어 전력 소모가 커지는 또 다른 문제가 생기게 된다. 본 연구실에서는 저전압 구동이 가능하면서도 절연 특성이 우수한 고분자 절연층을 형성하기 위하여 고분자의 블렌딩 시스템을 도입하였다. 고분자 블렌드 용액을 통해 박막을 형성하여, 상분리에 의해 소수성 고분자가 표면 위로 올라오도록 유도하여 유기 반도체와의 계면 트랩을 최소화할 수 있는 구조가 되었다. 또한 절연 특성이 뛰어난 친수성 고분자는 아래쪽에 위치하여 계면 트랩과 상관없이 절연 특성을 크게 증가시키는 역할을 하였다. 그 결과 표면 물 접촉각 100° , 2 MV/cm 의 강한 전기장에서 10^{-7} A/cm^2 의 낮은 누설전류밀도를 유지하는 절연층이 형성되었으며, 5 V 이내에서 $1.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 의 전하이동도를 가지는 유기박막트랜지스터를 제작하는 데 성공하였다. 이 밖에도 본 연구그룹에서는 절연층의 표면 작용기 변화를 통한 소자의 안정성 구현, 저온공정 광패터닝, 절연층 내의 계면 트랩에 대한 연구를 진행하고 있다.

2.2 유기태양전지

고효율의 유기태양전지를 구현하기 위하여 광활성층의 태양광 흡수영역을 늘이는 것이 중요하며 이에 대한 노력으로 낮은 밴드갭의 신물질 개발 및 탠덤형의 유기태양전지 도입을 하고 있다. 신물질의 합성에의 실험적인 소자결과와 탠덤형 유기태양전지에서 금속산화물을 포함한 각 층에 대한 제어의 복잡함을 해소하고자, 본 연구실에서는 서로 다른 태양광 흡수영역을 가진 세 가지 유기물을 광활성층에 도입하여 태양광의 흡수파장대를 증가시키기 위한 노력을 하였다. 가시광 영역을 흡수하는 전자주게 고분자와 풀러렌 계열의 전자받게로 이루어진 벌크 헤테로 구조의 유기광활성층에 대해 상호보완적 흡수영역을 가진 안트라센 계열의 저분자를 도입하였고, 유기광활성층 내의 광학적, 전기화학적 특성 및 포폴로지 분석을 통해 기존의 유기태양전지의 한계를 극복하였다. 도입한 안트라센 계열의 저분자는 광활성층 내에

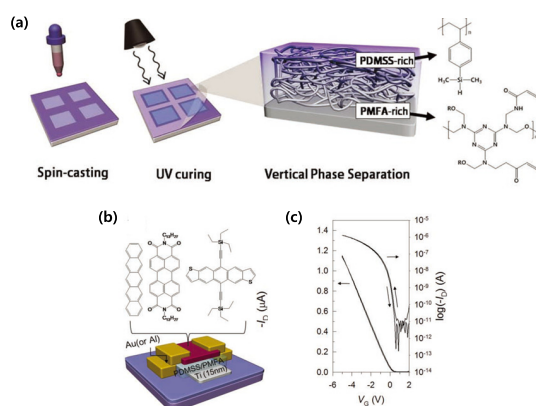


그림 4. (a) 고분자 블렌드 절연층의 형성, (b) 유기박막트랜지스터 구조 및 (c) 트랜스퍼 커브.

서 기존의 전자주게나 전자받게와 잘 섞이면서 여기된 엑시톤의 분리가 용이하게 일어날 수 있는 에너지 준위를 가지고 있다. 흡광영역에서도 $300\text{--}650 \text{ nm}$ 의 전 가시광영역을 흡수할 수 있었다. TEM 및 AFM 이미지 분석을 통하여 유기광활성층 내의 세 가지 상의 형태를 확인한 결과 분리된 전하의 이동경로가 잘 확보되어 있었다. 또한 XRD 분석을 통하여 안트라센 계열의 저분자가 고분자의 주사슬과 적절히 섞여있다는 사실을 확인할 수 있었다. 서로 다른 결정성을 보이는 안트라센 계열의 저분자들을 통하여 자기조립성이 강한 저분자는 다른 두 물질과의 블렌드에 불리하다는 사실을 알게 되었으며 결정성이 떨어지는 저분자는 오히려 다른 두 물질과의 친화성 면에서 뛰어나다는 사실을 알게 되었다. 따라서, 세 가지 광활성 물질을 도입한 유기태양전지에서 5.6% 의 광전변환효율을 보이면서 기존의 이성분의 유기태양전지보다 1.8 배 이상의 광전변환효율을 얻을 수 있었다.

2.3 수분차단성 보호피막층 개발

유기박막트랜지스터, 유기발광다이오드, 유기태양전지와 같은 유기전자소자의 경우 자외선, 휘발성 유기물, 산소, 수분 등과 같은 다양한 외부적 원인에 의해 쉽게 전기적 성능이 저하된다. 특히 수분은 유기반도체나 전극을 산화시키고 전하 트랩을 형성하는 등 유기전자소자의 전기적 성능을 저하시키는 매우 큰 원인이 된다. 때문에 유기전자소자를 수분 및 외부 환경으로부터 보호할 수 있는 고성능의 수분차단성 피막층이 필요하다. 최근까지 딱딱한 유리나 금속뚜껑을 이용한 보호피막방법을 사용하고 있지만, 플렉시블 전자소자에 관심이 더욱 고조되면서 현재 사용되고 있는 방법에 한계가 생길 수 밖에 없어 유연한 보호피막소재의 필요성이 대두되

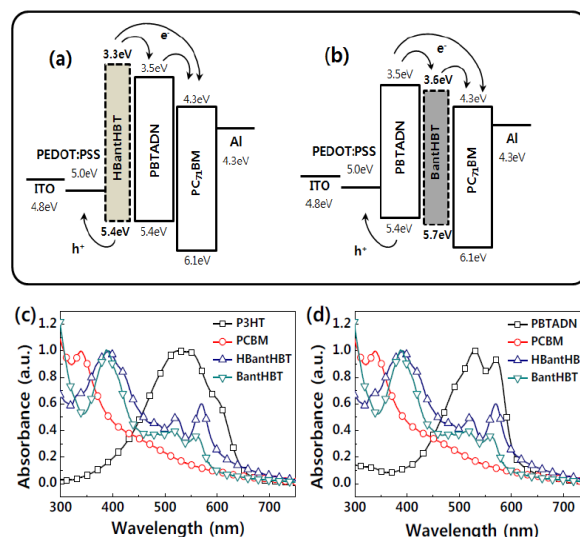


그림 5. (a-b) 안트라센 계열의 저분자, HBantHBT와 BantHBT를 포함한 유기태양전지의 광활성층 내에서의 각 물질의 에너지 레벨, (c-d) 서로 상호 보완적인 흡수 영역을 보이는 광활성층을 구성하는 물질.

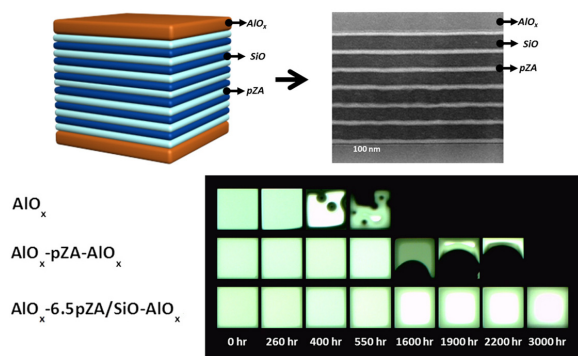


그림 6. AlO_x -6.5pZA/SiO- AlO_x 다층 박막 구조의 모식도와 EM 이미지 (위) 및 OLED 소자에 적용 후 보관 수명 측정 결과 (아래).

고 있다. 하지만 일반적인 고분자의 경우 $1\sim 100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 수준의 수분투과도를 가지고 있어 유기전자소자에 요구되는 수분투과도에 미치는 못한다. 그러므로 새로운 보호피막 소재를 개발하고 이를 유기전자에 적용하는 연구가 필요하다.

본 연구실에서는 고성능 보호피막층 소재 및 공정개발에 관한 연구에 매진하고 있다. PEALD, PECVD, thermal evaporation, sputter 등의 진공 기반 증착 방식을 통해 SiN_x , SiO_2 , SiO , Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , poly zinc acrylate, a-CH 등의 무기물 및 유기물을 나노 단위로 증착하여 필름의 특성을 평가하고 공정 조건 최적화를 통하여 최종적으로는 수분 및 산소 투과 방지 특성이 우수한 필름을 만들고, 개발한 필름을 유기 디바이스에 적용하여 소자의 수명 및 안정성 확보를 하는 것을 목표로 실험을 진행하고 있다. 유/무기 다층 박막의 경우 무기 박막의 defect를 유기박막이 decoupling시켜 주어 수분의 침투 경로를 증가시킬 수 있으며, 또한 bending stress 감소 효과까지 볼 수 있다. 무기/무기 다층 박막의 경우 무기층 계면에서의 packing density 향상을 통하여 얇은 두께에서도 수분 투과 방지 특성을 향상시킬 수 있으며 유/

무기 다층 박막의 한 부분으로도 적용할 수 있다는 많은 장점을 가지고 있다. 공정 조건 최적화 및 적층 구조 분석을 통하여 수분 투과 방지 특성을 향상시킨다면 플렉시블 전자 소자의 상용화에 크게 기여할 수 있을 것이라 생각된다.

용액공정에 기반한 보호피막층 기술에서는 저온 용액공정과 하부 유기층에 손상을 주지 않는 용매 및 공정을 사용하면서 고성능의 필름을 제조하는 것이 이슈이다. 유기 혼성형의 보호피막층을 비가수분해성 졸겔법을 이용하여 제조하면 위 문제를 해결할 수 있으므로 용액공정용 보호피막층 개발에 있어 적합한 방법이 될 수 있다. 비가수분해성 졸겔법은 별도의 용매를 사용하지 않기 때문에 유기박막트랜지스터 소자에 적용했을 때 소자의 전기적 성능이 저하되지 않으면서 기체차단성이 높은 필름을 제조할 수 있다. 개발한 보호피막층을 소자에 적용했을 때 소자의 구동수명을 100일 가량 유지할 수 있었고 수분투습도 또한 상당히 낮은 수준임을 ($\sim 10^{-2} \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) 확인하였다. 이외에도 저온 공정이 가능한 금속산화물 필름을 개발할 경우 진공공정으로 제조된 필름 못지 않은 성능을 가지는 보호피막층을 개발할 수 있을 것으로 기대하여 현재 이부분에 대한 연구를 진행중이다.

3. 유기전자 연구실 현황

포스텍 유기전자 연구실은 2014년 현재까지 박사 20명, 석사 31명 졸업생을 배출하였으며, 현재 박찬연 교수를 중심으로 박사과정 10명, 석사과정 1명으로 구성되어 유기전자공학 분야에 관련한 다양한 연구를 수행하고 있다. 그 결과 최근 5년간 86편의 SCI 논문을 출판하였고, 국내외 학술발표를 134회 하는 등 유기전자공학 분야에서 우수한 연구 성과를 이룩하였다. 박찬연 교수는 이러한 유기전자공학 분야의 연구실적을 인정받아 2014년 한국고분자학회 주최의 제 2회 LG 화학 고분자학술상을 수상하였다.

4. 유기전자연구실 구성원 소개

 박찬연(Chan Eon Park) 연구책임자 전 공 : 고분자 및 유기 전자재료 e-mail : cep@postech.ac.kr	 안태규(Tae Kyu An) 박사과정 e-mail : tott22@postech.ac.kr	 차효정 (Hyojung Cha) 박사과정 e-mail : sunflower@postech.ac.kr
 황지현(Jihun Hwang) 박사과정 e-mail : firsteye@postech.ac.kr	 박선욱(Seonuk Park) 박사과정 e-mail : sunpower61@postech.ac.kr	 김지예(Jiye Kim) 박사과정 e-mail : jiiiiiye@postech.ac.kr
 김래호(Lae Ho Kim) 박사과정 e-mail : poelmascot@postech.ac.kr	 김유진(Yu Jin Kim) 박사과정 e-mail : youjinfall@postech.ac.kr	 정용진(Yong Jin Jeong) 박사과정 e-mail : jyj0311@postech.ac.kr
 김예별(Yebyeol Kim) 박사과정 e-mail : yebyeol@postech.ac.kr	 김경훈(Kyunghun Kim) 박사과정 e-mail : kyunghunkim@postech.ac.kr	 백용화(Yonghwa Baek) 석사과정 e-mail : seoul@postech.ac.kr