

산학연 연구실 소개

연세대학교 공과대학 신소재공학과 Nanopolymers Lab. (나노고분자연구실)

주소: (120-749) 서울특별시 서대문구 연세로 50 연세대학교 공과대학 신소재공학과

제2공학관 217호 박철민 교수 연구실

전화: 02-2123-2833, FAX: 02-312-5375

E-mail: cmpark@yonsei.ac.kr

Homepage: <http://www.nano-polymers.com>

연구책임자 | 박철민 교수
연세대학교

1. 연구실 비전 및 개요

나노고분자연구실(nanopolymers laboratory)은 2002년에 설립되어 창의적이고 지속적인 실험 정신을 바탕으로 유기재료의 나노 구조와 광전기 성능과의 연계성과 연관된 다양한 연구 분야로의 성장을 거듭하고 있다. 특히 21세기 과학의 패러다임인 nanotechnology를 기반으로 자기조립형 고분자를 적용한 유기, 유/무기 하이브리드 재료 및 소자의 개발에 관한 연구를 수행하고 있다. 본 연구실의 연구 주제는 크게 다음의 4가지로 구분된다. 1) 자기조립형 고분자 어셈블리를 이용한 기능성 나노 패턴 제조, 2) 용액공정을 기반으로 한 저차원 탄소 나노 소재 기능화 연구, 3) 강유전 고분자를 기반으로 한 고성능 비휘발성 메모리 연구 분야, 4) 교류 전압 하에서 구동하는 유기 발광 소재 및 이를 적용한 디스플레이/센서 연구가 이에 해당된다(그림1). 나노고분자연구실은 분자레벨의 디자인에서 시작하여 이들의 집합체(assembly) 및 규칙적인 나노 패턴 제조, 그리고 나아가 이들 나노구조와 기능성 소재와의 유기적 융합을 통한 혁신적인 웨어러블 전자소재 및 소자 개발을 추구하고 있다. 이러한 핵심적인 원천 융합 기술개발을 통하여 최근 6년간 평균 IF 7이상의 SCI총 74편을 발표하였으며 41건의 특허 출원 및 등록하였다. 나아가 현재는 삼성전자 미래기술육성센터가 지원하는 '소재기술 분야' 사업, 그리고 미래창조과학부 '중견연구자지원사업(도약연구)'와 같은 대규모 과제를 수행하고 있다.

2. 현재 진행중인 주요 대표 연구 내용 소개

2.1 자기조립형 고분자/유기 어셈블리를 이용한 나노 패턴 제조 연구

본 연구실에서는 유기반도체 기반의 전계 트랜지스터 어레이를 구성하기 위하여 반드시 요구되는 유기반도체층의 마이크로 패턴제조기술을 개발하였다. 효과적인 반도체층의 패턴닝은 소자 간 간섭을 줄여주며, 고집적화를 위해 필수적이다. 유기반도체의 전기적 성능이 기존의 무기물

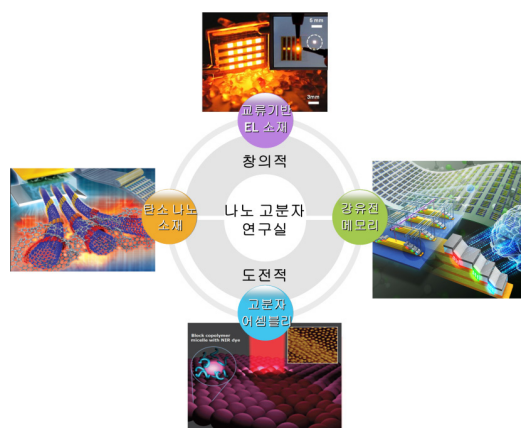


그림 1. 나노고분자연구실 주요 연구 개요.

기반의 반도체와 비교하여 열악한 점을 고려할 때, 이들 성능을 향상시키는 것은 중요하며, 이를 위해 단결정 유기반도체의 적용이 필요하다. 하지만 이들 단결정 반도체의 대면적 성장, 그리고 패턴닝은 유기소재의 분자 간 정렬제어 및 이들 결정의 효과적인 에칭 기술을 요구하며, 이를 위해 본 연구에서는 selective contact evaporation printing이라는 새로운 제조기술을 도입하여 유기결정성장을 제어하여 대면적으로 단결정 유기반도체를 제조하고 이를 압력과 열을 이용하여 선택적으로 에칭하는 새로운 개념의 패턴제조 기술을 소개하였다(*Adv. Mater.*, **23**, 3398 (2011)). PDMS의 선택적 Contact에 의한 단결정 TIPS-pentacene의 위치 선택적 기화 조건을 조절함으로써, 우수한 반도체 성능을 유지하는 TIPS-pentacene의 대면적 패턴 및 소자 어레이 제조가 가능함을 보였다(그림 2). 이와 같은 유기반도체 단결정 프린팅 기술은 현재 연구 결과보다 확장, 발전될 것이다. 즉 고효율의 용액공정 기반 인쇄 전자소재로 이용되기 위한 트랜스퍼 기술, 결합제어 기술 그리고 인터페이스 제어기술들이 접목되어, 고성능의 인쇄전자 소자가 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

자기조립 고분자의 어셈블리 기술과 관련해서는 최근 두 가지 종류의 말단관능화 고분자(end-functionalized polymer), mono-end-sulfonated polystyrene(SPS)와 mono-end-aminated poly(ethylene oxide)(APEO)를 이용하여, 혼합비율에 따른 박막상태에서의 초분자조립(supra-molecular

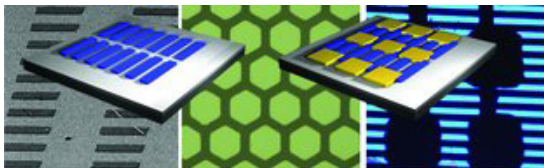


그림 2. 단결정 유기 반도체의 대면적 프린팅 방법을 이용한 유기 소자 개발 연구.

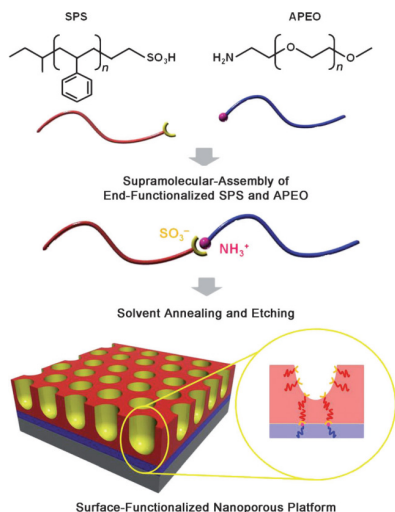


그림 3. 초분자 자기 조립을 이용한 기능성 나노다공성 박막 제조.

assembly) 거동을 관찰, 규명하고 특정한 비율에서 형성되는 나노크기의 기공성 박막을 제조하여 이의 응용 가능성 보고 하였다(*Chem. Eur. J.*, **18**, 15662 (2012)). 말단 술폰산(sulfonic acid)과 아민(amine)의 비공유결합형 이온결합을 이용하여 기존의 블록 공중합체와 같은 자기조립 패턴제조가 가능함을 증명하였으며, 나아가 이온결합의 가역적 제어를 통하여 손쉽게 다공성 나노박막 제조가 가능함을 소개하였다. 더불어 나노기공 표면에 잔류하는 기능성 말단기를 활용하여 금속나노입자 제조 등 기능이 추가된 나노박막제조에 성공하였다(그림 3). 최근에는 이들 말단기 반응을 덴드리머형 고분자에 적용하여, 나노기공의 크기를 더욱 세밀하게 제어할 수 있는 공정을 개발하였다(*ACS Macro Lett.*, **3**, 1112 (2014)).

2.2 플렉서블 강유전 비휘발성 메모리 연구

본 연구실에서는 전압에 따라 분극제어가 가능한 강유전 고분자를 기반으로 한 비휘발성 메모리 연구를 지속적으로 진행하고 있다. 최근에는 유기전계 트랜지스터 소자구조와 강유전 고분자를 접목한 비휘발성 메모리 개발을 주도하고 있다. 특히 트랜지스터의 게이트 전압을 제어하여 여러 상태의 강유전 고분자 분극을 프로그램 할 수 있는 방법을 개발하고, 이를 이용하여 1개의 소자에 여러 정보를 담을 수 있는 멀티레벨 비휘발성 강유전 고분자 메모리 소자를 최초로 개발하였다(*Adv. Mater.*, **24**, 5904 (2012)). 현재 비휘발성 메모리의 대부분을 차지하고 있는 플래시 메모리의 경우 절연막에 주입되는 전하량을 조절하여 멀티 레벨 메모리 칩을 양산하고 있다. 이것은 물론 실리콘을 기반으로 한 무기물 소자이며 기계적 유연성이 요구되는 메모리를 위해서 본 연구실이 개발한 고분자 기반의 멀티레벨 소자의 활용이 클 것으로 예상된다. 강유전 고분자를 이용한 비휘발성 메모리의 경우 절연막 내에서의 직접적인 전하의 움직임 없이 강유전체의 잔류 분극을 통하여 소자가 동작하기 때문에 그 안정성

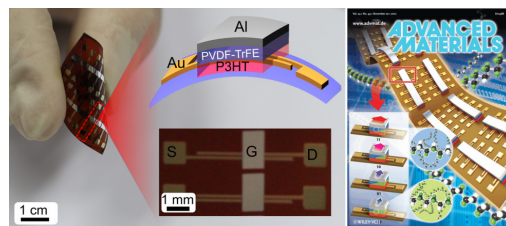


그림 4. 멀티레벨 플렉서블 고분자 강유전체 메모리 관한 연구.

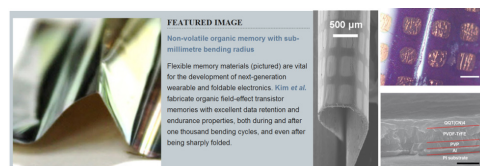


그림 5. 폴더블 비휘발성 메모리 연구.

이 다른 유기물 기반 메모리와 비교하여 매우 우수하며, 이는 연구결과에서도 성공적으로 증명되었다(그림 4). 본 연구는 해당 이슈의 내부 표지로 선정되어 소개되었다.

고분자 기반의 메모리 소자가 갖는 최대 장점은 기계적 유연성을 확보할 수 있다는 점이며, 관련하여 최근 연구에서는 용액공정이 가능한 새로운 유기반도체와 강유전 고분자를 적용하여 제조된 유기 트랜지스터 메모리 소자가 극한적인 기계적 변형 후에도 안정적인 메모리 특성을 가지는, 소위 폴더를 메모리 소자를 보고하였다(*Nat. Commun.*, **5**, 3583 (2014), 그림 5). 특히 강유전 고분자 박막과 유기반도체의 기계적 정합성은 나노인텐테이션 및 나노스크래치 실험을 통하여 정량적으로 분석되었으며, 이를 통해 향후 다층 박막형 유연 유기전자소자 설계를 위한 새로운 방법론 또한 제시하였다. 이전까지 유연 비휘발성 메모리는 수 밀리미터 수준의 휘어짐 특성을 가지고 있으며 이는 차세대 웨어러블 전자소자에 적용되기에 제한적이었다. 또한 근본적으로 소자 내 반도체 물질 및 절연막 물질에 대한 기계적 특성에 대한 정량적 연구는 전무한 상태였다. 개발된 강유전 고분자 메모리 소자는 기존의 휘어지는 비휘발성 유기 메모리와 달리 기계적 소성 변형이 일어난 후에도 안정적인 전기적 특성과 1,000회의 반복적인 소성 변형 후에도 우수한 안정성을 보였다. 또한 유기 반도체와 강유전체 고분자 박막의 경도, 탄성 및 소성계수등을 나노인텐테이션 실험을 통해서 확인하고, 나아가 이들 박막 간의 계면 정합성은 나노스크래치 실험을 통하여 정량적으로 분석하였다. 극한 기계적 변형 하에서 구동할 수 있는 차세대 웨어러블 소자개발에 큰 기여를 한 것으로 평가되어 해당 이슈의 featured image article로 선정되어 소개되었다.

2.3 탄소 나노 재료를 응용한 연구

본 연구실의 또 다른 분야는 용액공정 기반의 나노소재/자기조립 고분자 복합박막 제조 및 이를 이용한 광전자 소자의 응용연구이다. 지난 10여년 간 단일벽 탄소나노튜브(single wall carbon nanotube, SWNT)를 용액상에서 효율적으로 분산시킬 수 있는 분산제 연구를 진행하고 있으며, 특히 자기조립형 블록 공중합체 마이셀, 그리고 공액고분자

를 포함 하는 블록 공중합체 분산제 개발은 대표적이다. 성공적으로 분산, 안정화된 SWNT/PS-*b*-PPP(polystyrene(PS) and poly(para-phenylene)(PPP)) 복합 잉크를 반도체 채널층으로 사용하는 전계효과트랜지스터를 개발하였다. 기존의 반도체 나노튜브만을 분리하여 반도체층으로 사용하는 방법과 달리, 금속과 반도체 혼합 나노튜브를 별도의 분리공정 없이 사용하여 높은 이동도 및 점멸비를 갖는 소자를 구현할 수 있었다는 점에서 매우 의의가 크다(*Adv. Funct. Mater.*, **20**, 4305 (2010)). 이는 박막 내의 금속과 반도체 나노튜브 간의 쇼트키배리어(Schottky Barrier, SB)에 기인한 소자구동 현상으로 향후 소자를 설계하는데 보다 큰 재료 및 공정 선택의 자유도를 제공한다는 점에서 활용도가 높을 것으로 예상된다. 본 연구는 해당 이슈의 Frontispiece 표지로 선정되어 소개되었다.

이 밖에도 성공적으로 분산된 공액고분자 블록 공중합체/SWNT 복합 나노잉크는 LCD 디스플레이의 핵심 부품인 액정배향필름으로 활용이 가능하였다. 기존의 polyimide기반의 배향필름과 비교하여 매우 우수한 액정 스위칭이 가능한 기능성 박막이 개발되었다. 또한 동일한 나노잉크는 전기저항의 변화에 기인한 저항메모리 소자, 근적외선 감지가 가능한 광검출소자 등 보다 다양한 유무기 복합전자소자로 활용될 수 있었다. 특히 최근 연구에서는 충전제의 분산 문제 및 배향상태, 계면저항을 해결하고 고집적 충전 설계를 통한 우수한 열전도율을 가지는 나노복합체를 제시하였다. 해당 연구에서는 자기조립 고분자로 분산된 나노튜브와 함께 열전도율이 높은 금속 마이크로 입자를 하이브리드하여 3상의 나노/마이크로 복합체를 제조하였다. 고분산된 탄소나노튜브가 복합체의 전가전도성 및 더욱 중요한 기계적 안정성을 제공하였으며, 고충진된 금속입자는 매우 높은 열전도성을 부여하였다(*Nanoscale*, **7**, 1888 (2015)). 탄소나노튜브는 금속 파티클 충전제들의 계면접촉을 높여주어, 기존의 연구와 차별화되는 높은 열전도율을 가지는 나노복합체를 제작할 수 있었다(그림 7). 본 연구를 통하여 나노 구조 제어가 가능한 우수한 열전도율을 가지는 고분자 복합재료를 제작 구현의 가능성을 제시함과 동시에 기존의 금속 및 세라믹 부품을 대체하여 다양한 산업에서 요구되는 핵심 열제어 소자에 적

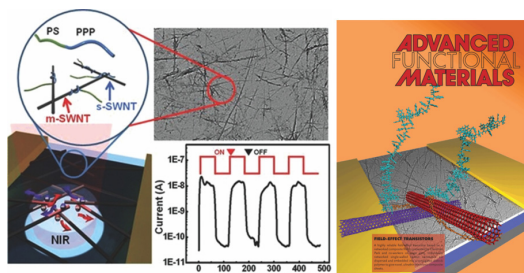


그림 6. 탄소나노튜브 네트워크를 이용한 유기 소자 개발에 관한 연구.

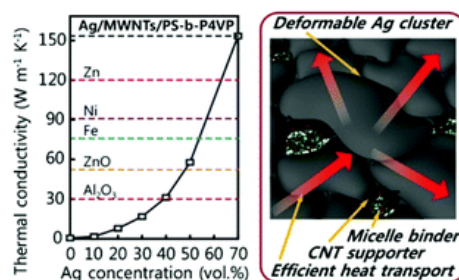


그림 7. 탄소 나노 소재를 이용한 고열전도성 나노복합체.

용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

2.4. 교류기반 발광 소재 응용에 관한 연구

유기 및 유무기 발광체를 기반으로 한 전기발광 소재/소자 연구 역시 활발히 진행 중이다. 특히 기존의 직류 구동형 자체발광 소자와는 달리 교류 전원 하에서 작동되는 소자 연구가 독창적으로 연구 중이다. 교류 구동의 경우 적어도 1층 이상의 절연층을 포함하는 소자로서, 양 전극에서의 전하 주입이 전기장에 의해 제어되는 독특한 소자구동 메커니즘을 가지고 있다. 산업적 측면에서 기존 LED 소자가 진공증착으로 형성된 다층구조를 가지고 있으며, 또한 일반 가정에서 사용하는 60 Hz, 220 V의 교류 전압을 LED 소자구동을 위하여 직류로 변환하여야 하는 점등을 고려할 때, 매우 단순한 소자구조와 직접적으로 교류를 사용한다는 점에서 큰 이점을 가지고 있다. 특히 용액공정을 기반으로 한 대면적 프린팅 기술과 접목된다면 더욱 활용도는 높을 것으로 전망되고 있다. 본 연구실에서는 최초로 고분자 발광층에 전하 주입 및 이동을 용이하게 하는 탄소나노튜브를 적용하여 기존 교류소자의 밝기 보다 100배 이상 높은 휘도를 갖는 소자를 개발하였다(Nano Lett., 11, 966 (2011)). 이후 발광층으로 용액공정이 가능한 CdSe@ZnS 양자점과 발광폴리머의 복합체를 적용하여, 밝기뿐만 아니라 색혼합 및 색제어가 가능한

교류소자를 제조하였다(Adv. Mater., 24, 4540 (2012)). 이를 통해 백색발광 교류소자를 개발하였다(그림 8).

또한 최근에는 발광체의 발광에너지 전달현상을 교류 소자에 적용하여 매우 높은 휘도를 갖는 full color 발광소자를 개발하였다. 이를 위해 형광고분자/다중벽카본나노튜브/블록 공중합체 미셀을 함유한 나노복합체를 제안하였으며, 저전압 구동을 위한 high k 절연체와의 접목을 통하여 수천 cd/m^2 의 휘도를 갖는 발광소자, 그리고 이를 유연 기판에 제조하여 최초로 유연성이 보장된 교류발광소자의 가능성을 제시하였다(ACS Nano, 7, 10809 (2013), 그림 9). 현재 더욱 높은 휘도와 소자효율 향상을 위한 연구가 진행되고 있으며, 또한 기능성 절연체 도입을 통하여 교류발광에 기반한 센서개발에 박차를 가하고 있다. 또한 전기장 하에서 구동되는 독특한 소자원리를 활용하여 직접적으로 전극과 접촉하지 않은 상태에서도 발광이 가능한, 즉 원거리 구동형 발광소자 등 기존의 직류 소자로 구현되기 어려운 기능성 발광소자의 가능성을 활발히 연구하고 있다.

3. 나노고분자연구실 구성원 소개

현재 본 연구실은 박철민 교수를 중심으로 연구원 1명, 박사후연구원 2명, 박사과정 8명, 석사 과정 6명, 학부 과정 2명이 각자 개인의 독창적이고 도전적인 연구주제를 바탕으로 실험을 진행 중이며 국내외 유수의 연구실과 협업을 통한 공동 연구 또한 활발히 진행 중이다. 본 연구실에서 석사 학위를 취득한 다수의 졸업생들은 MIT, Northwestern 대학 그리고 Stanford 대학과 같은 세계 일류 대학의 박사과정에 재학하고 있다. 최근에는 본 연구실에서 박사학위를 받은 후 Colombia 대학, IBM 연구소에서의 박사 후 연구과정을 거친 졸업생이 처음으로 국내 대학 교수로 임용되었으며 이 밖에도 다수의 박사학위 졸업생들이 LG화학, LG전자, SK 그리고 삼성전자 등 대기업 연구소를 중심으로 재직 중이며 일부는 정부 출연 연구소에서 활발한 연구를 진행하고 있다. 이처럼 본 연구실은 연구 개발과 더불어 창의적인 인력양성 측면에서도 뛰어난 경쟁력을 가지고 있다.

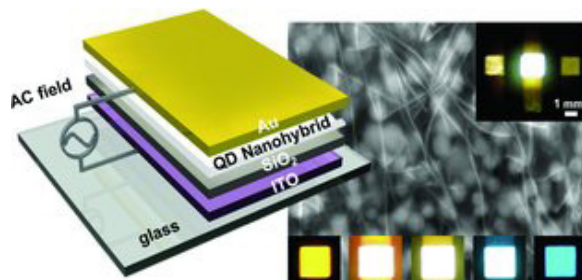


그림 8. 양자점 복합체를 이용한 교류기반 발광 소자.

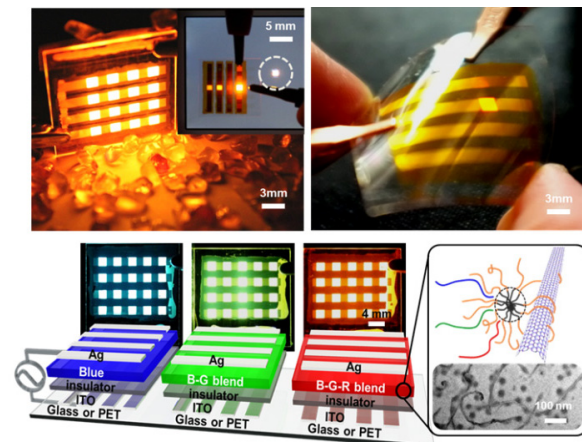


그림 9. 발광고분자 블렌드를 통한 FRET 교류기반 고성능 발광소자 연구.



〈나노고분자연구실 구성원〉