

산학연 연구실 소개(1)

# 서강대학교 화공생명공학과 전자 및 이온소재 연구실

## (Electronic and Ionic Materials Engineering Lab. (ELIMEL), Sogang University)

주소: 서울 마포구 백범로 35 서강대학교 리치과학관 611호 (우: 04107)  
 전화: 02-705-8474, E-mail: kangms@sogang.ac.kr  
 홈페이지: <https://sites.google.com/view/mskangroup>



연구책임자 | 강문성 교수  
 서강대학교 화공생명공학과

### 1. 연구실 소개

최근 디스플레이 분야의 혁신은 새로운 발광소재 개발을 바탕으로 이루어졌다. 높은 효율로 전기 에너지를 빛으로 전환하는 유기발광소재 개발이 ‘OLED 디스플레이’의 발전을 이끌었고, 높은 양자 효율과 우수한 색순도를 갖는 양자점소재 개발이 ‘퀀텀닷 디스플레이’의 발전을 이끌고 있다. 본 ‘전자 및 이온소재 연구실’은 2012년 설립 후 i) 양자점 반도체 나노결정 및 유기발광체를 포함한 발광소재의 물리적 특성 이해, ii) 포토리소그래피에 기초한 발광소재의 초미세 패터닝 공정개발, 그리고 iii) 새로운 구동원리 기초한 새로운 형태의 광전자소자를 개발하는 연구를 수행해왔다(그림 1).

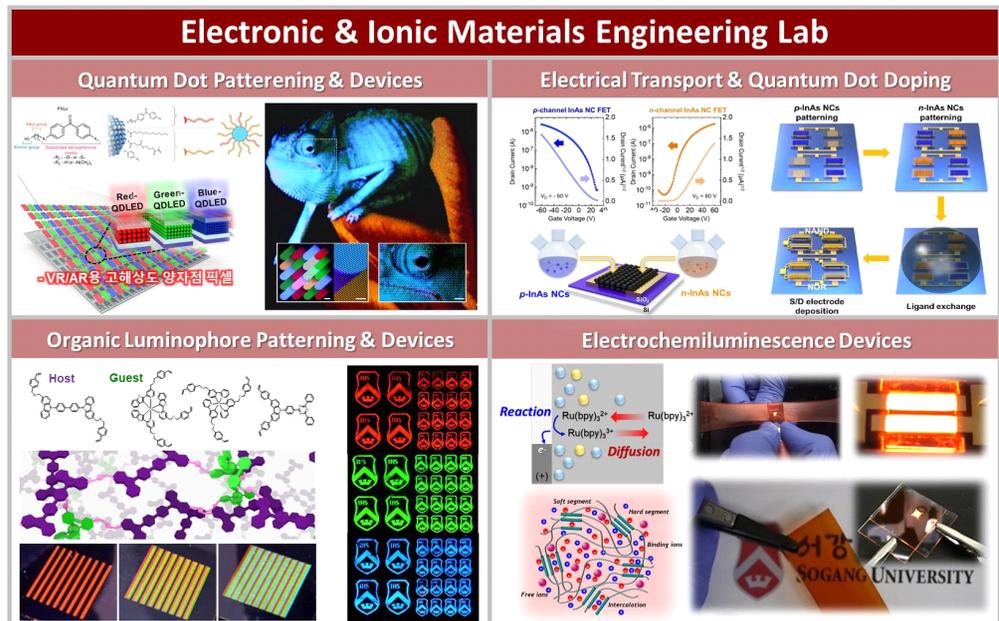


그림 1. “전자 및 이온소재 연구실”의 주요 연구분야.

## 2. 주요연구분야

### 2.1 포토리소그래피 기반 초고해상도 양자점 패터닝 공정 연구

높은 양자효율과 우수한 색순도를 갖춘 양자점을 디스플레이 장치에 활용하기 위해서는, 화소 단위로 소재를 정밀하게 패터닝하는 기술이 필수적이다. 특히, 가상현실(virtual reality, VR) 및 증강현실(augmented reality, AR) 구현을 위한 근안 디스플레이(near-eye display) 장치에 양자점을 활용하려는 시도가 활발해짐에 따라, 마이크로미터 수준의 초고해상도로 양자점을 패터닝할 수 있는 공정에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해, 이미 반도체 및 디스플레이 산업에서 널리 사용되는 포토리소그래피 기반의 양자점 패터닝 공정이 가장 유망한 방법으로 제안되고 있다. 그러나 기존의 포토리소그래피 공정을 양자점 박막에 직접 적용할 경우, 공정 과정에서 양자점이 화학적 물리적으로 손상될 수 있으며, 특히 핵심적인 소재의 광학적 특성이 저하될 수 있다는 한계가 있다.

본 연구실에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 양자점 표면의 유기 리간드 간 가교 반응을 활용하는 방법론을 연구했다. 특히, 자외선 노광 시 인접한 양자점의 유기 리간드가 화학적으로 직접 결합하여 가교된 양자점 네트워크 구조를 형성할 수 있도록 하는 광가교 첨가제 기반의 양자점 광패터닝 공정(직접포토리소그래피, direct photolithography)을 최초로 개발하였다. 광가교 첨가제가 포함된 양자점 박막을(포토 마스크를 이용하여) 자외선으로 선택적으로 노광하면, 노광된 영역에서는 이웃한 양자점의 리간드 간 가교 반응이 일어나고, 반대로 노광되지 않은 영역은 가교가 진행되지 않는다. 그러면 양자점 박막의 가교된 부분과 되지 않은 부분의 화학적 성질 차이를 통해 패턴을 선택적으로 현상할 수 있다. 본 연구실에서는 이러한 간단한 공정만으로 1,000 ppi 이상의 고해상도 RGB 양자점 패턴을 형성하는 기술을 구축하였다. 또한, 광가교 첨가제의 화학적 구조를 정밀하게 설계하여 가교 반응으로

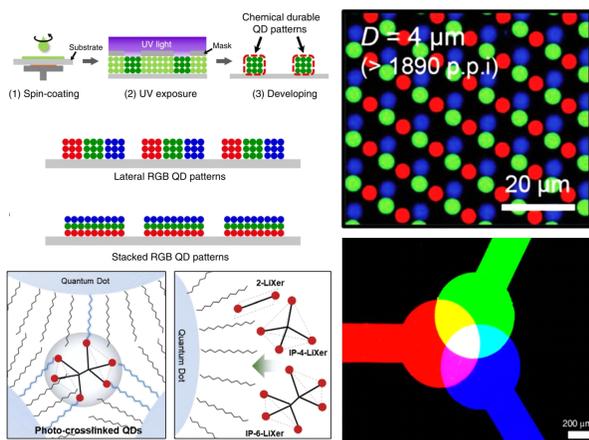


그림 2. 광가교 첨가제를 활용한 초고해상도 양자점 직접포토리소그래피 공정.

인한 양자점의 발광 특성 저하를 완전히 억제하는 동시에, 보다 높은 정밀도로 패터닝할 수 있는 공정을 개발하였다. 이를 바탕으로 3,000 ppi 이상의 초고해상도 패터닝 기술을 구현하였다(그림 2).

추가적으로, 이웃한 유기 리간드 간 직접 광가교 반응을 유도할 수 있는 리간드(광가교 리간드)를 개발하고, 이를 활용하여 최대 15,000 ppi의 초고해상도 RGB 양자점 패턴을 구현하는 공정을 개발하였다(그림 3). 이 방법은 광가교 첨가제를 사용하는 기존 방식과 달리, 별도의 첨가물 없이 양자점 자체만으로 패터닝이 가능한 소재 기술로, 공정 과정에서 양자점의 우수한 광학적 특성을 보다 효과적으로 보존할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 연구에서 구현한 15,000 ppi 해상도는 AR/VR용 디스플레이에서 요구되는 수천 ppi 수준을 뛰어넘는 성능을 제공하며, 이를 통해 양자점을 차세대 초고해상도 디스플레이에 적용할 수 있는 기반을 마련하였다고 할 수 있다.

### 2.2 고해상도 OLED 유기발광체 패터닝 공정 연구

OLED 디스플레이를 근안 디스플레이 장치에 도입하기 위해서는 마찬가지로 유기소재를 마이크로미터 수준의 초고해상도로 정밀하게 패터닝할 수 있는 새로운 공정 개발이 필요하다. 이는 기존의 마스크/열증착 기반 공정 방식에서는 마스크 규격의 한계로 인해 구현 가능한 화소 크기가 10 마이크로미터 수준으로 제한되기 때문이다.

본 연구실에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 유기발광층 박막에 감광성을 부여하고, 이를 앞서 설명한 직접포토리소그래피에 적용하여 수 마이크로미터 수준의 OLED 화소를 형성하는 기술을 개발하였다. 특히, 감광성 부여를 위해 광중합이 가능한 기능기를 유기발광 소재에 직접 결합시켜,

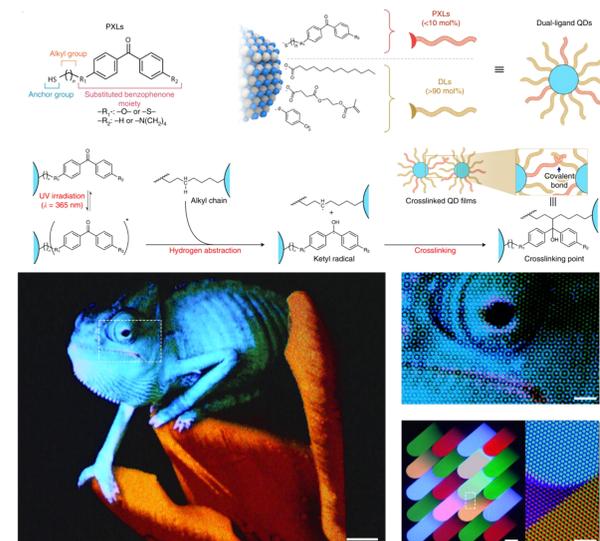


그림 3. 광가교 리간드를 활용한 양자점 직접포토리소그래피 공정.

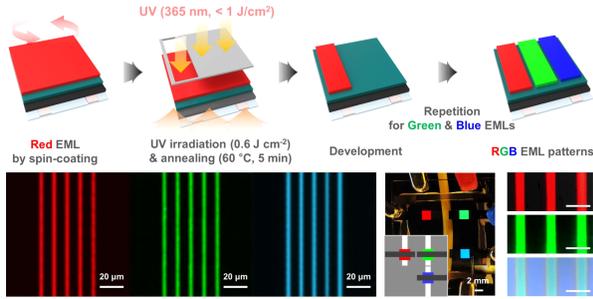


그림 4. 고해상도 OLED 유기발광소재 직접포토리소그래피 공정.

유기발광소재 본연의 물성 저하 없이, 낮은 공정온도와 적은 UV 조사량 조건 하에서도 미세패턴 형성이 가능한 공정을 확립하였다. 이를 통해 2 마이크로미터급 초고해상도 미세 패턴을 갖는 OLED 픽셀을 구현할 수 있었다(그림 4).

본 연구실에서는 유기발광소재를 패터닝하는 또 다른 공정으로, 포토레지스트를 활용한 리프트오프(lift-off) 방식을 적용하여 마이크로미터 수준의 픽셀을 형성하는 기술(간접 포토리소그래피, indirect photolithography)을 연구하고 있다. 이 방식은 유기발광 소재를 직접 UV에 노출시키거나 식각 공정을 거치지 않고도 정밀한 패턴을 구현할 수 있다는 장점이 있다. 해당 기술에서 포토레지스트는 단순히 패턴 형성에 활용될 뿐만 아니라, 반복 공정을 통해 RGB 화소를 제작하는 과정에서 이미 형성된 유기발광소재 패턴을 보호하는 역할도 수행한다. 이를 통해 유기발광 소재가 후속 용액 공정에 노출되어 손상되는 문제를 방지할 수 있으며, 보다 안정적인 패터닝이 가능하다(그림 5).

이렇게 개발중인 공정들은 3,000 ppi 이상의 초해상도 화소 제작을 가능하게 하여 마이크로 OLED 디스플레이를 포함한 차세대 디스플레이 산업에 새로운 방향을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

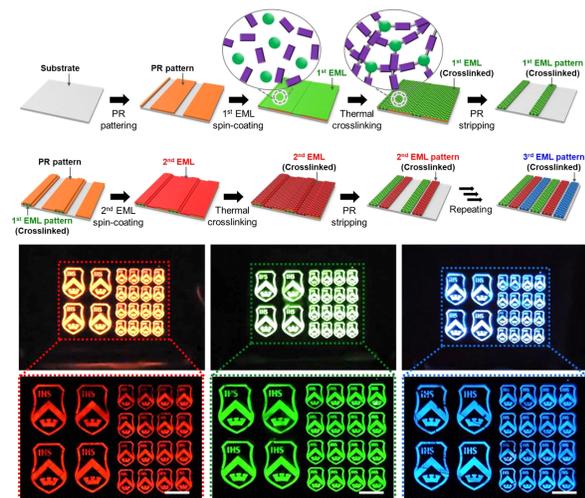


그림 5. 고해상도 OLED 유기발광소재 간접포토리소그래피 공정.

### 2.3 양자점 기반 적외선-가시광선 광전기상향전환 광전자 소자 연구

눈에 보이지 않는 적외선 신호를 가시광선 신호로 변환하는 기술은 야간 투시, 생체 영상, 보안 시스템 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이에 사용되는 기존의 장치는 적외선 감지 센서, 신호 처리 장치, 그리고 가시광선 출력 장치가 개별적으로 제작된 후 조립되는 방식으로 구성된다. 본 연구실에서는 이러한 기능을 하나의 일체형 소자로 구현할 수 있는 새로운 개념의 광전자 소자를 연구하고 있다. 이는 광전기상향전환소자(optoelectric upconversion device)로, 장파장의 적외선을 전기에너지의 도움을 받아 단파장의 가시광선으로 변환하는 장치로, 적외선을 흡수하는 광검출 다이오드(photodiode)와 가시광선을 방출하는 광발광 다이오드(light-emitting diode)를 적층한 새로운 형태의 탠덤 소자(tandem device) 구조를 활용하여 구현할 수 있다.

본 연구실에서는 이러한 탠덤 소자의 두 가지 활성층에 적절한 광특성을 갖는 두 종류의 양자점 소재를 도입하여, 높은 양자효율로 근적외선 광자를 가시광선 광자로 변환하는 장치를 개발하였다. 또한, 기존의 광검출 다이오드/광발광 다이오드 2층 구조를 넘어, 광발광 다이오드/광검출 다이오드/광발광 다이오드로 구성된 3층식 탠덤 소자를 양자점 소재 기반으로 최초로 개발하였으며, 이를 통해 소자의 양자효율을 증폭시키는 연구를 수행하고 있다(그림 6).

### 2.4 양자점 도핑 및 전기적 특성 분석

다양한 반도체 장치들이 기본적으로 p형 반도체와 n형 반도체의 조합으로 이루어져 있음을 고려할 때, 양자점을 비롯한 반도체 나노결정을 각종 광전자소자에 적용하려면 반도체 소재의 전기적 극성을 제어하는 기술이 필수적이다. 소량의 불순물을 도입하여 반도체의 전기적 극성을 조절하는 도핑(doping) 기술은 실리콘을 비롯한 벌크 반도체에서 널리 사용되는 핵심기술이지만, 나노 크기의 양자점에 이를 적용하려는

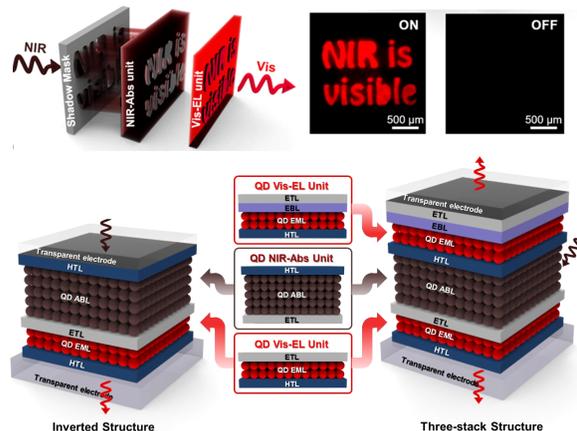


그림 6. IR-to-Vis 광전기상향전환소자를 통한 적외선 신호의 가시화.

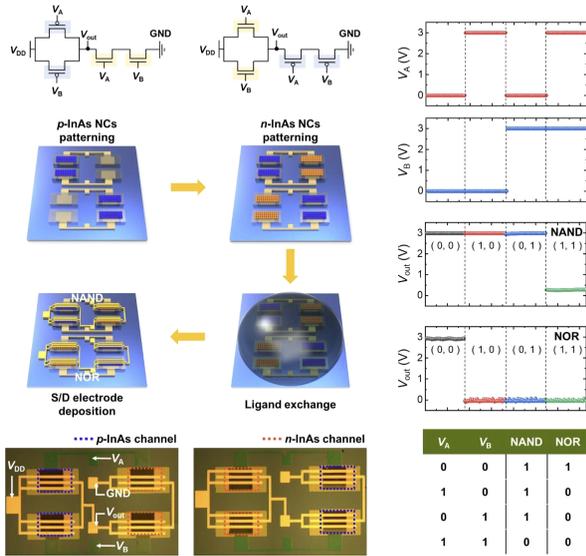


그림 7. InAs 기반 p형, n형 반도체 및 이를 통한 논리회로 구현.

연구는 아직 초기 단계에 머물러있다.

본 연구실에서는 i) 양자점 나노결정의 성장 과정에서 이중원소를 도입하는 도핑 기술과 ii) 이미 합성된 양자점에 후처리를 통해 이중원소를 도입하는 도핑 기술을 연구하고 있다. 이를 통해 이중원소의 도입 여부에 따라 각각 p형과 n형의 전기적 극성을 갖는 InAs 양자점을 개발하였다. 개발된 p형 및 n형 양자점을 박막 트랜지스터(thin film transistor)에 적용하고, 이를 조합하여 보완형(CMOS) 논리 회로(NOT, NOR, NAND 등의 기본 논리 소자)를 구현하였다(그림 7).

### 2.5 전기화학 기반의 발광현상 및 소자연구

전기화학 기반의 발광소자는 기존의 전계발광소자와는 다른 새로운 메커니즘을 이용하여 발광하는 전자소자이다. 이 소자는 전기화학 반응 계면에서 생성된 발광체의 산화종과 환원종이 전자교환을 하며 형성된 들뜬 상태의 발광체가 바닥상태로 돌아가면서 빛을 방출하는 원리를 따른다(그림 8). 이러한 원리를 기반으로 하는 전기화학발광소자(electrochemiluminescence device)는 발광체, 발광체가 녹아있는 전해질 용액, 그리고 산화/환원 반응을 유도할 두개의 구동 전극만으로도 제작이 가능하여 기존 전계발광소자에 비해 제작 공정이 단순하며, 형태 가변형 발광소자 등 차세대 발광소자로서의 응용에도 용이하다는 장점을 갖는다.

그러나, 전기화학발광소자는 외부로 빛을 효과적으로 추출하기 위해 투명전극이 필요하며, 일반적으로 사용되는 산화물 기반의 투명전극은 지속적으로 환원 전위에 노출될 경우 쉽게 손상되는 문제가 있다. 이에 따라, 기존 전기화학

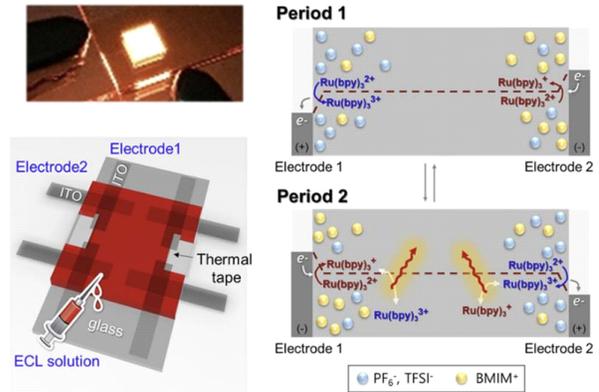


그림 8. 전기화학기반의 발광소자의 구동 메커니즘.

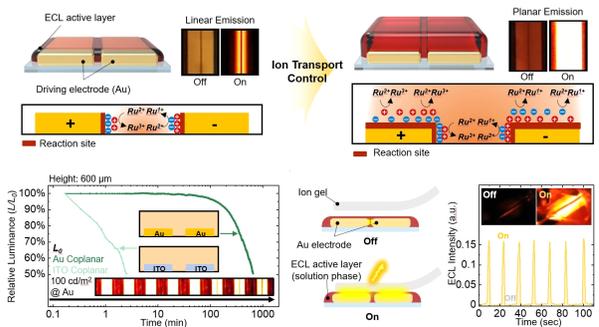


그림 9. 투명 전극이 없이 구현된 전기화학 기반 발광소자와 이를 통한 소자 구동 안정성 향상.

발광소자는 구동 안정성이 매우 낮다는 치명적인 단점을 가진다.

본 연구실에서는 다양한 소자 구조를 도입하고, 이에 따라 형성되는 전기 이중층(electric double layer, EDL)의 형태를 제어하여 투명전극의 손상을 완화하거나, 투명전극 없이도 효과적으로 발광이 가능한 전기화학발광소자를 개발하는 연구를 수행하고 있다. 이를 통해 소자의 구동 안정성을 크게 개선하는 데 집중하고 있다(그림 9).

### 3. 연구실 현황 및 비전

지난 14년간 “전자 및 이온소재 연구실”은 이러한 연구 성과를 바탕으로, 앞으로도 양자점 및 유기발광체 기반 연구를 심화하고자 한다. 특히, 고해상도 디스플레이 구현을 위한 초고해상도 패터닝 기법 개발, 나노 반도체 결정의 전기적 특성 분석 그리고 새로운 원리에 기초한 소자 설계 등에 집중할 계획이다. 앞으로도 본 연구실은 전자 및 이온소재 기반의 새로운 패러다임을 제시하며, 차세대 기술 혁신을 선도하는 연구실이 되기 위해 지속적인 연구와 협력을 이어갈 것이다.