

청색 유기 발광소자 (OLED)의 기술 동향

김종찬
(연세대학교 디스플레이융합공학부)

1. 서론

유기 발광 소자 (OLED)에서 빛을 내는 발광층 (Emissive Layer)은 소자 내에서 빛을 발생시키는 핵심 구성 요소로, 호스트 (host) 및 도펀트 (dopant)로 이루어져 있다. 호스트는 발광층 부피의 대부분을 이루고 있는 물질인데, 발광층 내로 주입된 전자와 정공이 잘 이동하도록 돕는 역할을 한다. 도펀트는 호스트로부터 전자, 정공 혹은 엑시톤 (Exciton, 전자와 정공이 결합된 준입자)을 전달받아 높은 효율 및 색순도로 빛을 발생시키는 물질을 말한다. 이렇듯 유기 발광 소자의 색상은 도펀트에 의해 결정이 되기 때문에, 도펀트는 유기 발광 소자의 구성 요소 중 매우 중요한 부분을 차지하고 있으며 많은 연구가 진행되었다.

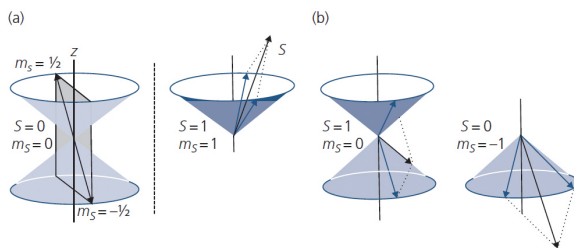


그림 1. 각각 1/2 스핀 양자수를 갖는 전자 두 개로 형성된 엑시톤의 벡터 표현 모식도. (a) 총 스핀 양자수 $S=0$ 을 갖는 단일항 및 (2) $S=1$ 을 갖는 삼중항 엑시톤 상태를 나타냄^[2]

1987년 C.W.Tang과 S. A. VanSlyke^[1]의 발

명으로 개발된 OLED는 상용화되기에는 너무 낮은 효율 (외부 양자 효율~1%)을 가지고 있었다. OLED의 효율은 주로 내부 및 외부 양자효율 (Internal and External Quantum Efficiency)이 사용되는데, 내부 양자효율 (IQE)이란 전자 한 개를 주입하였을 때 몇 개의 광자가 발생하는지를 나타내는 값이며, 외부 양자효율 (EQE)은 주입한 전자 대비 발생한 광자 중 몇 개가 우리가 볼 수 있는 외부로 방출되는지를 나타내는 값이다. OLED는 처음 발명된 이후, 한동안 내부 양자효율이 25 %로 제한되어 있었는데, 이는 전기 발광 (electroluminescence)의 경우 발생하는 엑시톤이 1:3의 비율로 단일항 (Singlet) 및 삼중항 (Triplet)으로 발생 (그림 1)하며, 이 중 스핀 각운동량 보존에 의해 단일항 엑시톤만이 일반적인 유기물에서 바닥 상태로 전이하며 빛을 발광할 수 있었기 때문이다. 하지만 1998년 S.R. Forrest 교수 연구진이 중금속 원자가 형성된 인광 발광 유기 도펀트를 발명하였고, 이후 OLED는 상용화되었다. 이는 중금속 입자의 무거운 질량으로 인해 강해진 스핀 오비탈 커플링 (Spin-orbit coupling) 현상으로 삼중항 엑시톤도 바닥 전이가 가능해짐으로써, 100 %의 내부 양자효율이 달성 되었기 때문이다. 더 나아가 2012년 C. Adachi 교수 연구진이 지연 형광을 이용한 새로운 인광 발광 메커니즘을 개발하면서^[4] 현재까지도 높은 효율과 색순도를 보이는 다양한 방식의 인광 도펀트가

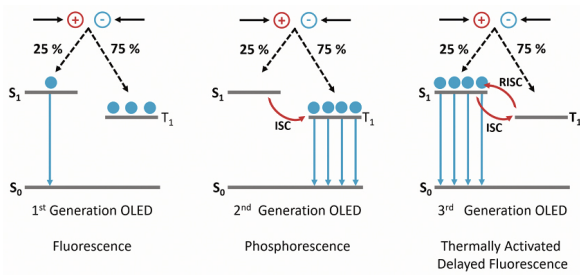


그림 2. (a) 형광 도펀트, (b) 중금속 발광 도펀트, 그리고 (c) 지연 형광 도펀트의 동작 메커니즘

개발되고 있다 (그림 2).

이렇듯 인광 도펀트의 발명은 높은 전력 효율의 OLED 디스플레이를 가능하게 하며 OLED 상용화에 큰 역할을 하였지만, 아직 상용화된 OLED 패널은 완벽한 풀컬러 인광 발광을 이용하지 못하고 있다. 이는 픽셀을 이루는 세 가지 색인 적색, 녹색 및 청색 중 아직 청색 소자의 경우 상용화될 정도로 긴 수명을 지니는 인광 도펀트를 이용한 소자가 개발되지 않았기 때문이다. 따라서 본 기사에서는 청색 인광 OLED 소자가 상용화되지 못하고 있는 근본적인 이유부터 현재까지 연구자들에 의해 제시된 다양한 해결방안까지 다루 볼 것이다.

2. 청색 인광 도펀트의 열화 메커니즘

인광 발광 물질의 사용은 전력 효율을 4배 향상 시키며 내부 양자효율을 100 %로 만들어 OLED 상용화의 길을 열었지만, 인광을 이용한 발광은 형광 발광 대비 엑시톤 바닥 전이 시간을 증가시키는 결과를 가져왔다. 형광 엑시톤의 경우 바닥 전이가 수 나노 초 (nanosecond)인데 반하여, 인광 엑시톤의 경우는 삼중항의 바닥 전이가 스핀 금지된 전이이기 때문에 바닥 전이가 일반적으로 수십 밀리 초 (millisecond)에 이른다. 강한 스핀 오프탈 커플링을 이용한 중금속 발광 도펀트나 활발한 시스템간 교차 (Intersystem crossing, ISC)를 활용한 지연 형광 도펀트 (thermally-assisted-delayed fluorescence, TADF)의 경우 바닥 전이가 수백 나노 초에서 수 마이크로 초 (microsecond)까지 짧아지지만 이 경우에도 형광 도펀트에 비해 수백에서 수천 배 전이 시간이 길

다. 이렇듯 긴 엑시톤 바닥 전이 시간은 도펀트의 수명에 치명적인 결과를 가져오는데, 이는 도펀트의 열화 (degradation) 메커니즘이 엑시톤 바닥 전이 시간과 관련이 깊기 때문이다.

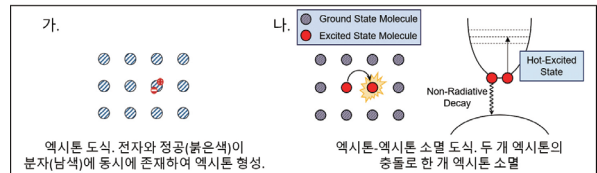


그림 5. 엑시톤 소멸 현상 모식도

엑시톤 소멸 (EEA, exciton-exciton annihilation) 현상이란 엑시톤끼리 충돌하여 발생하는 과열 엑시톤 (hot exciton)이 에너지를 광자 이외의 에너지로 잃으며 발생하는 현상이다.^[5] 이는 무기물 반도체에서 발생하는 Auger recombination 현상과 유사한 현상이라고 이해된다. 엑시톤 소멸 현상이 발생하는 경우, 두개의 엑시톤의 충돌에 의해 한 개의 엑시톤 에너지만 발광되고, 남은 한 개 엑시톤의 에너지는 비발광 결합(non-radiative recombination)으로 방출된다. 비발광 결합으로 방출된 에너지 중 일부의 에너지는 분자의 결합 에너지를 파괴하는 데에 사용되는데, 대략 5×10^8 번에 한 번 정도 주기로 분자의 깨짐 현상이 발생한다. 엑시톤 소멸 현상은 엑시톤의 밀도가 높을수록 빈번하게 일어나기 때문에 엑시톤 밀도를 줄이는 것은 소자의 수명 연장에 매우 중요한 요소이다.

엑시톤 소멸 현상으로 인한 도펀트 분자의 파괴를 억제하기 위해서는 두 가지 요소를 감소하면 된다. 첫 번째는 엑시톤의 에너지이다. 픽셀을 구성하는 적색, 녹색 및 청색 중 적색에서 청색 소자로 갈수록 엑시톤의 에너지가 증가한다. 특히 청색 엑시톤의 경우, 표 1에서 보이듯 원자간 결합 에너지와 비슷하기 때

표 1. 원자에 따른 결합 에너지

Bond	BE(eV)	Bond	BE(eV)
C-C	3.64	N-N	1.69
C-H	4.28	N-O	2.08
C-O	3.71	N-H	4.05
C-N	3.04	O-O	1.51
C-F	5.03	H-H	4.52

문에 분자 결합을 파괴할 확률이 녹색이나 적색에 비해 훨씬 높다. 따라서 청색 소자의 경우 엑시톤 소멸 현상에 의한 분자 결합 파괴 현상이 더 빈번하게 일어난다. 청색 소자의 다른 색 대비 빠른 휘도 감소는 결국 패널의 번인 현상으로 이어지게 된다. 분자가 파괴되면 두 가지 측면에서 악영향이 있는데, 1. 발광하는 도펀트의 개수가 줄어드는 것, 2. 분자가 깨진 리간드 (ligand) 부분에 발생하는 결합 상태 (defect state)에 소자 내의 전하들이 trap 되는 것이다. 소자 내의 발광하는 분자들의 수가 적어지는 것은 같은 빛을 내기 위해 다른 분자들이 더 빈번한 발광을 해야 하는 것이고, 이는 결국 도펀트 분자의 단위 시간당 엑시톤 밀도를 상승시켜 더 빈번한 엑시톤 소멸 현상을 야기한다. 또한, 발생된 결합 상태에 의한 전하들의 trap은 발광층의 도펀트에 같은 전하의 수를 주입하기 위해 더 많은 전하를 밖에서부터 주입해야 하는 결과를 야기하여 결국 동일 휘도를 위해 더 높은 구동 전압을 필요로 하게 한다. 이는 전력 효율을 감소시키며, 증가된 주입 전하의 양은 엑시톤 소멸 현상 중 하나인 엑시톤-폴라론 소멸 현상 (exciton-polaron annihilation)의 주원인이 되어 소자의 수명을 더욱 단축한다.

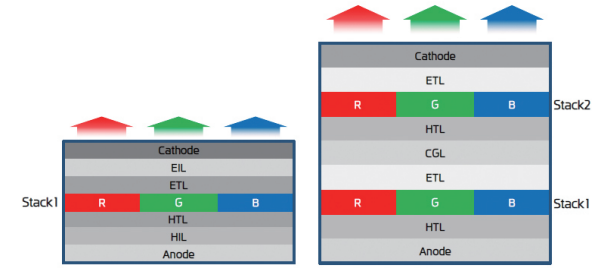
두 번째는 엑시톤의 밀도이다. 엑시톤의 밀도를 감소시키는 방법으로는 크게 발광층의 부피를 증가시키는 것과 엑시톤의 바닥 전이 시간을 감소시키는 것이 있다. 이는 마치 기차역 플랫폼에 가득 들어찬 사람의 수를 줄이는 방법으로 역의 크기를 키우거나 배차시간을 감소시켜 단위 시간당 더 많은 기차가 들어오게 하는 것으로 생각할 수 있다. 이러한 효과를 위한 소자 구조의 설계는 다음 섹션 3에서 조금 더 자세히 다루도록 한다.

3. 엑시톤 소멸 현상 억제 방식

1) 탠덤 방식

앞서 언급했듯 발광층의 부피를 증가시키면, 즉 더 두꺼운 발광층을 가지는 소자는 얇은 경우에 비해 엑시톤의 밀도가 감소하여 엑시톤 소멸 현상을 억제할 수 있다. 또한, 발광층이 두꺼워질수록 OLED 소자

싱글 스택과 투스택 탠덤 구조 차이



자료: 키움증권 리서치센터

그림 3. 단일 발광층 OLED (좌)와 탠덤 OLED (우)

는 더 많은 도펀트 분자들을 포함하기 때문에 더 높은 휘도의 빛을 낼 수 있고, 일정 휘도를 달성하기 위해 각 도펀트 분자가 발생해야 하는 광자의 수가 감소하여 소자의 수명이 증가한다. 하지만 전하 이동도가 높지 않은 유기물의 특성상 너무 두꺼운 발광층은 높은 저항으로 인해 전력 효율이 크게 감소하게 된다. 따라서 이를 극복하기 위해 여러 개의 OLED를 직렬 연결하는 Stacked OLED 구조가 발명되었다. 여러 개의 OLED 소자가 단순 직렬로 연결된 stacked OLED는 소자의 개수가 여러 개이기 때문에 같은 휘도를 내기 위해 각 소자가 발광해야 하는 빛의 휘도가 감소하는 장점이 있다. 하지만 단순 직렬 연결된 소자는 최상층 및 최하층에 있는 전극을 제외한 모든 소자의 전극이 높은 투명도를 가져야 한다는 것과 적층된 소자의 개수만큼 전극의 수가 계속 증가한다는 단점이 존재한다. 이러한 stacked OLED의 단점을 극복하기 위해 탠덤 (tandem) OLED 구조가 등장하였는데, 이는 여러 개의 발광층 및 전하 수송층으로 구성된 OLED 내의 셀들을 전하 생성층 (charge generation layer, CGL)으로 이어 연결하여 전극이 음극 및 양극만 필요하도록 만든 소자 구조이다. 탠덤 구조는 stacked OLED 방식 대비 훨씬 단순한 전극 구조를 가지면서도 소자의 적층으로 인한 소자의 구동 수명 및 휘도의 증가가 가능해지기 때문에, 차세대 고휘도 OLED에 필수적인 소자 구조이다.

2) graded doping 방식

일반적인 유기물은 전자의 전하 이동도가 정공에 비해 수십에서 수백 배까지의 차이를 보이는 경우가 많다. 따라서 정공의 경우, 정공 차단층 (hole

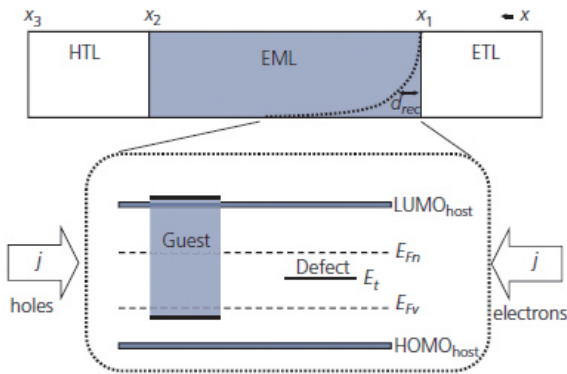


그림 4. OLED 발광층의 내부의 엑시톤 형성을 나타내는 모식도 및 에너지 다이어그램. d_{rec} 는 엑시톤이 결합 영역의 두께를 대략적으로 나타냄. 모식도의 발광층의 엑시톤 형성이 정공 차단층 쪽으로 쏠려있는 것을 나타내고 있다.

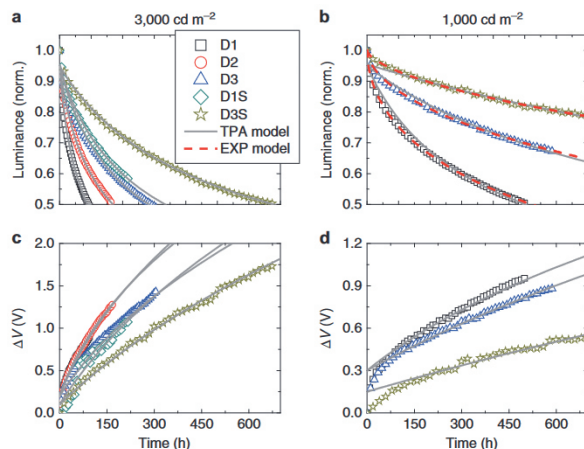
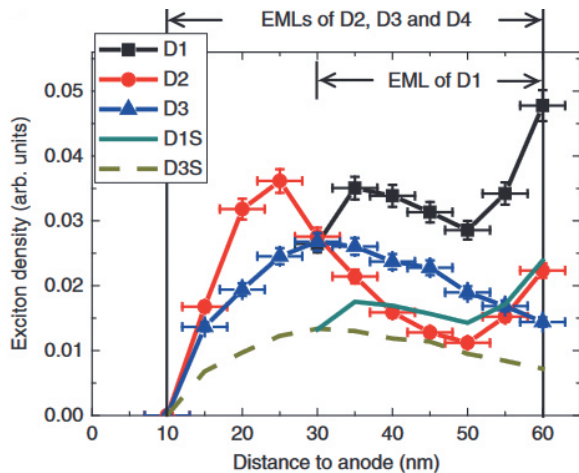


그림 5. 기존 소자 대비 (D1) Graded doping을 이용하여 (D3) 엑시톤 발생 지역을 균일화한 측정 결과 (상), 결과적으로 증가한 소자 수명 (하)

blocking layer)을 통해 정공들이 발광층을 지나 반대쪽으로 더 이상 진행하지 않고 발광층 내에 머무르면서 계속 결합을 시도하도록 돕는다. 따라서 OLED 소자의 발광층 내에서는 엑시톤이 형성되는 위치가 한쪽으로 쏠려있는 경우가 많다. 특히 대부분의 유기물은 정공보다 전자가 훨씬 느리게 이동하기 때문에 일반적으로 발광층-전자 수송층 계면에서 생성되는 엑시톤이 형성되는 양이 반대의 경우보다 크다. 이렇게 엑시톤의 형성이 비대칭적으로 일어나 발광층 내부의 국소적인 부위에 집중되게 되면 앞서 섹션 2에서 언급한 엑시톤끼리의 충돌이나 엑시톤과 폴라론의 충돌에 의한 엑시톤 소멸현상이 빈번히 발생한다. 이는 소자의 수명에 치명적인 결과를 불러오기 때문에, 발광층 내의 엑시톤 형성을 균일하게 만드는 것이 청색 소자의 수명을 연장하는 것에 있어 매우 중요한 부분이다.

Zhang et al.^[6]은 이러한 엑시톤 형성의 쏠림 현상을 해결하기 위해 graded doping이라는 개념을 이용해 청색 소자의 수명을 약 10배 연장하였다. Graded doping 방식은 발광층 내에서 빠르게 움직이는 정공을 수송하는 도펀트 분자의 도핑 농도를 정공 수송층에서부터 지속적으로 감소시켜나가 정공의 이동 속도를 발광층-정공 차단층 계면 쪽으로 갈수록 감소시키는 방식을 말한다. 이를 통해 정공이 발광층-정공 차단층 계면에 극단적으로 적층 되는 현상을 방지하여 발생하는 엑시톤 소멸 현상을 억제하는 결과를 가져왔다.

3) 엑시톤 매니저 방식

엑시톤의 생성 지역을 균일하게 만들어 엑시톤의 국지적인 높은 밀도를 감소하는 앞선 방식과는 다르게, Lee et al.^[7]은 엑시톤 끼리의 충돌로 인해 발생하는 과열 엑시톤 (hot-exciton)의 에너지를 발광 도펀트를 대신하여 파괴되어주는 매니저 도펀트를 이용해 소자의 수명을 증가시켰다. 이때, 매니저 도펀트는 발광 도펀트보다 높은 에너지를 가지지만 호스트보다는 낮은 에너지를 가져야 하며, 매니저 도펀트는 발광층에 낮은 비율로 도핑되어 소자의 발광 특성에는 영향을 최소화하면서 소자의 수명을 연장하였다.

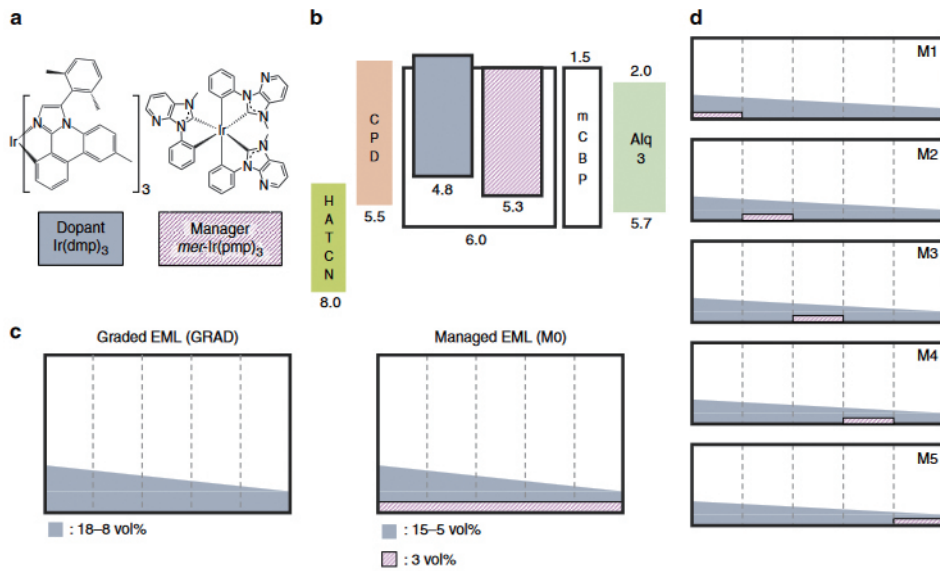


그림 6. 발광 및 매니저 도펀트의 (a) 분자 구조, (b) 소자 구조, (c) 기존의 graded 도핑된 발광층 구조 및 매니저를 포함한 발광층 구조, (d) 서로 다른 구역에 매니저를 포함한 발광층 구조

4) Purcell 효과를 이용한 방식

인광 발광 도펀트의 이용으로 형광 도펀트에 비해 길어진 엑시톤의 바닥 전이 시간은 엑시톤 간의 충돌 가능성을 높여 엑시톤 소멸 현상을 더 빈번하게 발생시킨다. 페르미 황금률 (Fermi's golden rule)에 따르면 물질의 여기 상태 (excited state)는 주변 광학적 환경에 매우 큰 영향을 받는다. 따라서 광학 현상인 퍼셀 효과 (Purcell effect)를 활용하여 발광층 내 엑시톤의 바닥 전이시간을 줄여 발광층 내의 엑시톤 밀도를 줄이는 방식이 최근 활발히 연구되고 있다.

퍼셀 효과 (Purcell effect)란 빛을 내는 물질이 광학적 공진기에 위치하였을 때 자발적 방출 비율 (spontaneous emission rate)이 증가하는 것으로, 양자 광학에서 이는 광학적 상태의 밀도 변화로 인해 발생하는 현상이라고 이해된다. 따라서 일반적으로 이 현상은 강한 광학적 미소 공진 효과 (microcavity effect)를 지니는 간섭계에서 발생하는데, 이는 계면의 높은 반사율로 인해 계면에서 반사된 빛과 발광체의 상호작용이 강화되어 미소 공진기의 광학적 고유모드 (eigenmode)에 해당하는 빛의 자발적 방출이 더 강화되기 때문이다. 따라서 미소 공진기의 존재 유무로 인해 변화한 자발적 방출의 비율을 퍼셀 인수 (Purcell factor)라고 하며, 그 값은 아래와 같이 표

현된다:

$$F_P = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda_{free}}{n} \right)^3 \frac{Q}{V}$$

여기서 λ_{free} 는 파장, n 은 굴절률, Q 와 V 는 각각 공진기의 품질 인자 (Quality factor) 및 모드 부피 (mode volume)이다. 품질 인자는 공진기에 저장된 에너지의 손실이 적을수록 높으며, 모드 부피는 빛이 갇히는 공진기의 부피를 나타낸다^[8].

Zhao et al.^[9]은 이러한 퍼셀 효과를 OLED에 활용하여 엑시톤의 바닥 전이 시간을 감소시켜 엑시톤 밀도를 줄이는 연구를 선보였다. 연구진은 OLED 하부에 분산 브래그 반사기 (Distributed Bragg Reflector)를 위치시켜 이와 음극 금속 전극 간의 강한 미소 공진기를 제작하고, 금속 표면에 존재하는 표면 플라즈몬 폴라리톤 (surface plasmon polariton, SPP) 모드와 주변 유전 물질의 엑시톤 간의 강한 커플링으로 이뤄진 폴라리톤 (polariton)^[10]을 이용하여 발광층 내 엑시톤의 바닥 전이 시간을 2.4배 단축하였다. 엑시톤 간의 충돌로 일어나는 소멸의 경우 엑시톤 두 개가 작용하기 때문에, 바닥 전

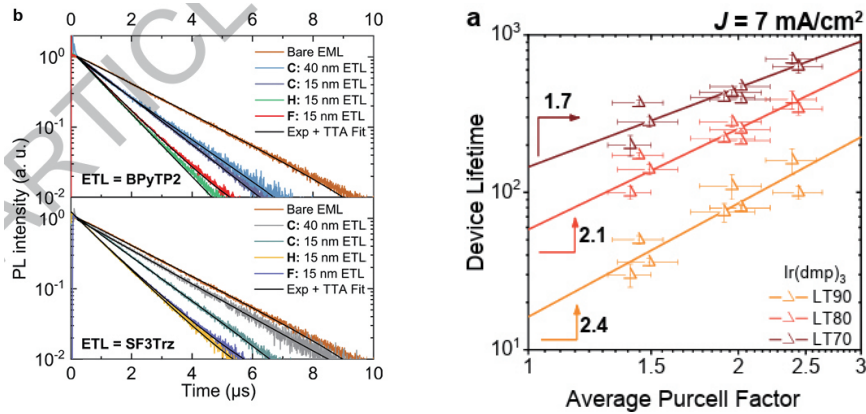


그림 7. 퍼셀 효과를 이용해 소자 내의 청색 발광 도펀트의 바닥 전이 시간이 감소하는 결과 (좌), 퍼셀 효과가 증가함에 따라 소자의 수명이 증가하는 결과 (우)

이 시간의 제공에 비례해서 소자의 수명이 줄어들게 된다. 그 결과 연구진이 선보인 구조를 가지는 소자의 수명이 5.3 배 증가했다. 또한, 강해진 미소공진 효과 때문에 소자의 색 순도가 증가하여 원래 CIE 좌표 (0.16, 0.26)로, 청록색을 띄던 소자의 발광 색이 CIE 좌표 (0.14, 0.14)으로 더 짙은 청색으로 변화했다. 이렇듯 강한 미소 공진 효과를 이용하여 엑시톤의 바닥 전이 시간을 감소하여 소자의 수명을 증가하는 것은 색순도와 소자의 수명을 동시에 개선하는 효과적인 방법이다.

5) aggregation을 막는 방식

OLED 내의 발광층은 호스트와 도펀트 물질로 나뉘어져 있으며, 도펀트 물질은 발광층 내의 매우 작은 비율을 구성한다. 이는 도펀트의 엑시톤이 서로 충돌하여 엑시톤 소멸 현상이 일어나는 것과 분자들이 서로 뭉쳐서 발생하는 높은 밀도의 포논 (Phonon)으로

인한 엑시톤의 비발광 결합으로 인한 자가소광 (self-quenching)을 방지하고자 함이다. 하지만 도펀트 물질의 발광층 내 조성비가 아주 낮은 경우를 제외하면 많은 경우 도펀트 물질들과 호스트 물질들이 증착 도중 서로 뭉치는 aggregation 현상이 빈번하게 발생한다.

Zhao et al.^[11]은 이러한 도펀트 분자의 뭉침 현상을 방지하기 위해 높은 유리 전이 온도 (glass transition temperature)를 가지는 두 번째 호스트 물질인 SiTrzCz2를 섞어 호스트를 구성하여 도펀트 뭉침을 방지하였다. 이렇게 방지된 도펀트의 뭉침 현상은 결과적으로 엑시톤 소멸현상을 감소 시켜 소자 성능의 향상을 불러왔다. 이러한 방식으로 연구진은 청색 소자의 효율을 2.2배, 수명을 2배 이상 증가시켰다.

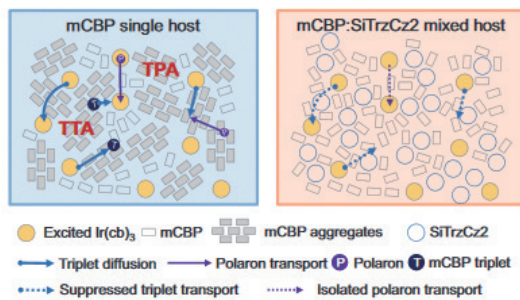
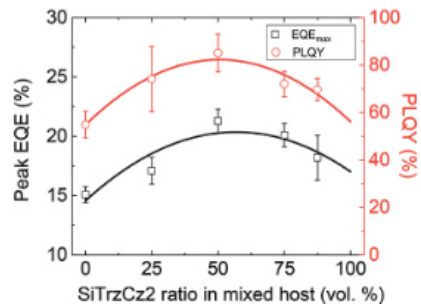


그림 8. 발광층 내의 도펀트의 뭉침 현상을 방지 원리 모식도 (좌), 뭉침 현상 방지 호스트의 비율에 따른 소자 효율 및 PLQY 변화 (우)



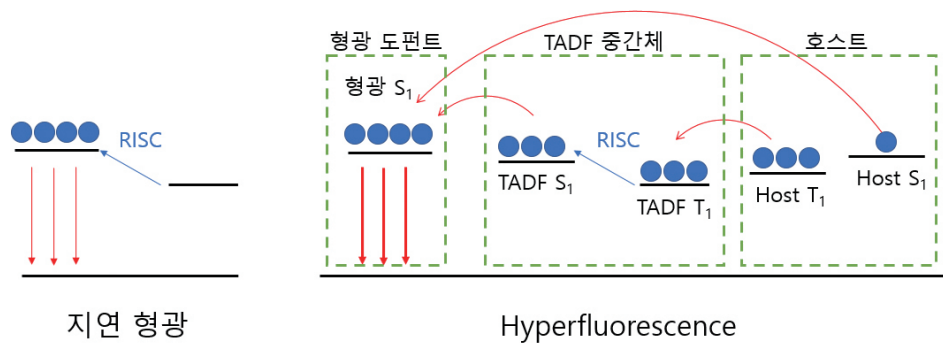


그림 9. 일반적인 TADF 발광층의 발광 과정 (좌) 및 Hyperfluorescence를 이용한 발광 과정 (우)

6) Hyperfluorescence 혹은 sensitizer 방식

Hyperfluorescence (HF) 방식은 발광층 내에서 발생한 삼중항 엑시톤을 TADF 도펀트를 통해 최종적인 발광체인 형광 도펀트로 전달하는 방식이다.^[12, 13] 호스트에서 발생한 단일항 또한 에너지가 낮은 곳으로 이동하는 발열 반응을 통해 에너지가 가장 낮은 형광 도펀트로 이동하기 때문에, HF 방식은 삼중항과 단일항 모두를 최종 발광체인 청색 형광 도펀트로 발광시키는 방식이다. 여기서 엑시톤의 중간 전달 역할을 하는 TADF 도펀트는 삼중항 엑시톤을 단일항 엑시톤 발광체인 형광 도펀트로 전달하는 역할을 하기 때문에 너무 많은 양을 도핑하면 자체 발광이 일어나게 된다. 또한, 최종적으로 엑시톤을 전달받아 색을 발생시키는 형광 도펀트도 너무 많은 양을 도핑하게 되면 형광 도펀트의 삼중항 엑시톤으로 손실되는 에너지가 증가하므로, 적당한 양을 조절해야한다.

HF의 가장 큰 장점은 넓은 반치폭 (Full-width at half-maximum, FWHM), 느린 엑시톤 바닥 전이, 낮은 진동자 강도 (oscillator strength) 등의 기존 TADF 도펀트가 가지는 발광 물질로 가지는 단점을 효율적인 광특성을 보이는 형광 발광 도펀트의 이용을 통해 극복할 수 있다는 점이다. 즉, 삼중항 엑시톤을 단일항 엑시톤으로 시스템간 교차 전환 시킬 수 있는 TADF 도펀트의 장점을 이용하면서도, 좁은 반치폭, 빠른 엑시톤 바닥 전이 및 강한 진동자 강도를 지니는 청색 형광 발광 도펀트를 사용하여 그 단점을 최대한 보완할 수 있는 것이다.

따라서 최근 이러한 우수한 발광 특성을 지니는 청색 형광 발광 도펀트에 대한 관심이 깊어지고 있는

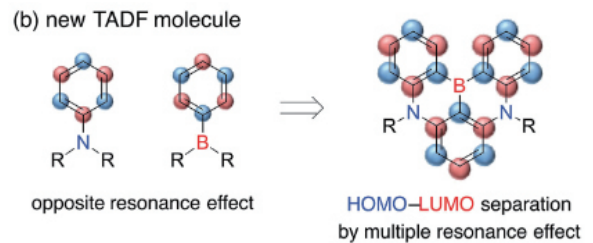


그림 10. B와 N 원자로 인하여 발생하는 Multi-resonance에 의한 HOMO-LUMO 분리

데, 그 대표적인 예가 Multi-Resonance TADF (MR-TADF) 발광 도펀트이다. 이는 2016년 Hatakeyama et al.이 발표한 새로운 TADF 발광 분자인데,^[14] 단일항-삼중항의 교환 에너지 (Singlet-triplet exciton exchange energy)의 최소화를 위해 전자 주개 (donor) 및 받개 (acceptor)의 분리가 필요하던 기존의 TADF 분자의 단점을 보완하기 위해 분자 구조를 단단 (rigid)한 polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) 형태로 만들었다. 이 분자 내에는 전자 받개 및 주개 역할을 하는 붕소 (Boron) 원자의 LUMO와 질소 원자의 HOMO가 매우 국소적으로 형성되어 교환 에너지를 작게 만들어, TADF와 유사하게, 빠른 스핀의 뒤집힘 (spin flip) 현상을 유도하여 높은 광발광 양자 효율 (photoluminescence quantum yield, PLQY)을 가능하게 하였다. 또한, MR-TADF 분자의 PAH 형태는 여기 상태 (S_1)와 바닥 상태 (S_0)의 진동 결합 (vibronic coupling)을 최소화하여 높은 발광 방출 및 좁은 반치폭을 가지는 우수한 발광 특성을 가지도록 하였다. 따라서 최근 MR-TADF를 다양한 파장대에서 발광할 수 있도록

하는 연구가 활발히 진행 중이며, 또한 이 분자들의 높은 엑시톤 밀도에서의 roll-off 현상을 억제하는 방법도 활발히 연구 중이다.

3. 결론

디스플레이 패널의 수요는 데이터의 활용이 늘어날 수록 점차 증가하는 추세이며, 기존의 TV나 스마트폰 등의 전통적인 사용처에서 벗어나 VR/AR, 자동차 전장 등 새로운 분야로의 확장이 가속화되고 있다. 따라서 늘어나는 수요와 요구되는 사양에 맞출 수 있는 고휘도, 장수명, 고색순도 및 고해상도를 가진 패널에 대한 수요는 갈수록 증가하고 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 물질 및 기술이 탐구되고 있지만, 현재 OLED를 넘어서는 뚜렷한 대안을 제시한 기술은 아직까지는 부족한 상황이다.

따라서 가까운 미래에도 앞으로 상당한 시간 동안에도 최신 디스플레이에 이용될 기술로는 OLED가 가장 유력하다. 가장 큰 이유는 기존의 양산 공정을 그대로 이용하기 때문이며, 이외에도 다양한 폼팩터(form factor), 진공 증착 공정을 이용한 고수율의 대면적 공정, 높은 광효율 등 다양한 장점을 들 수 있다. 하지만 OLED도 아직 완전한 기술이 아니며, 특히 이 글에서 언급된 청색 인광 소자의 수명 문제는 번인 현상, 낮은 전력 효율 등의 문제를 야기하기 때문에 매우 심각한 문제이다. 따라서 청색 OLED 소자 수명 문제의 해결은 결국 OLED 기술이 디스플레이의 주도권을 얼마나 유지할 수 있는지를 결정할 것이다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 이번 내용에서 언급된 소자 관점의 문제 해결뿐 아니라 소재의 개선도 필수적이다. 따라서 이를 위한 OLED 소재 및 소자 엔지니어들의 협업이 필수적이다.

OLED가 가진 수명 문제를 타개하기 위해 제시되고 있는 새로운 방식으로 자발광 QD LED, 마이크로 LED 등이 시도되고 있지만 아직 현재 상용화까지는 어려움이 존재한다. 특히 대형패널의 경우 현재 LCD와 OLED를 대체할만한 디스플레이 기술이 없는 것이 현재 실정이다. 향후 미래 기술인 VR/AR과 차량용 디스플레이, 그리고 현재 높은 부가가치를 지닌 산

업인 스마트폰, 모니터, 태블릿, TV 시장에서 OLED 기술의 중요성은 점점 더 증대되고 있으며, 한국은 현재 중국 및 기타 국가들과 치열한 경쟁을 벌이고 있는 상황에 있다. 따라서 청색 OLED 수명 문제의 조속한 해결은 향후 한국이 디스플레이 패권을 지켜나가는 상황을 유지하는 것에 매우 중요한 요소가 될 것이다.

참고문헌

- [1] Organic electroluminescent diodes, C. W. Tang, S. A. VanSlyke, Applied Physics Letters, 51, 12 (1987).
- [2] Organic Electronics: Foundations to Applications, Oxford University Press, S. R. Forrest (2020).
- [3] Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices, M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson, S. R. Forrest, Nature, 395, 151-154 (1998).
- [4] Highly efficient organic light-emitting diodes from delayed fluorescence, H. Uoyama, K. Goushi, K. Shizu, H. Nomura, C. Adachi, Nature, 492, 234-238 (2012).
- [5] Intrinsic luminance loss in phosphorescent small-molecule organic light emitting devices due to bimolecular annihilation reactions, N. C. Giebink, B. W. D'Andrade, M. S. Weaver, P. B. Mackenzie, J. J. Brown, M. E. Thompson, S. R. Forrest, Journal of Applied Physics, 103, 4 (2008).
- [6] Tenfold increase in the lifetime of blue phosphorescent organic light-emitting diodes, Y. Zhang, J. Lee, S. R. Forrest, Nature Communications, 5, 5008 (2014)
- [7] Hot excited state management for long-lived blue phosphorescent organic light-emitting diodes, J. Lee, C. Jeong, T. Batagoda, C. Coburn, M. E. Thompson, S. R. Forrest, Nature Communications, 8 (2017).
- [8] On the trade-off between mode volume and quality factor in dielectric nanocavities optimized for Purcell enhancement, G. İşiklar, P. T. Kristensen, J. Mørk, O. Sigmund, R. E. Christiansen, Optics Express, 30, 26, 47304-47314 (2022).
- [9] Stable blue phosphorescent organic LEDs that use polariton-enhanced Purcell effects, H. Zhao, C. E. Arneson, D. Fan, S. R. Forrest, Nature (2023).
- [10] Exciton-polariton condensates, T. Byrnes, N. Y. Kim, Y. Yamamoto, Nature, 10, 803-813 (2014).
- [11] Control of Host-Matrix Morphology Enables Efficient Deep-Blue Organic Light-Emitting

- Devices, *Advanced Materials*, 35, 12, 2210794, H. Zhao, J. Kim, K. Ding, M. Jung, H. Ade, J. Y. Lee, S. R. Forrest (2023).
- [12] High-efficiency organic light-emitting diodes with fluorescent emitters, *Nature Communications*, H. Nakanotani, T. Higuchi, T. Furukawa, K. Masui, K. Morimoto, M. Numata, H. Tanaka, Y. Sagara, T. Yasuda, C. Adachi, 5, 4016 (2014).
- [13] Stable pure-blue hyperfluorescence organic light-emitting diodes with high-efficiency and narrow emission, *Nature Photonics*, C.-Y. Chan, M. Tanaka, Y.-T. Lee, Y.-W. Wong, H. Nakanotani, T. Hatakeyama, C. Adachi, 15, 203-207 (2021).
- [14] Ultrapure Blue Thermally Activated Delayed Fluorescence Molecules: Efficient HOMO-LUMO Separation by the Multiple Resonance Effect, T. Hatakeyama,* K. Shiren, K. Nakajima, S. Nomura, S. Nakatsuka, K. Kinoshita, J. Ni, Y. Ono, and T. Ikuta, *Advanced Materials*, 28, 2777-2781 (2016).

저자약력

김종찬



- 2014년 ~ 2021년 : Ph.D., University of Michigan, Electrical Engineering and Computer Science
- 2021년 ~ 2022년 : Postdoc, UC Berkeley, Lawrence-Berkeley National Lab
- 2023년 ~ 현재 : 연세대학교 디스플레이 융합공학부 조교수

• 관심분야 : 차세대 Exciton 기반 나노 소자, 초현실 디스플레이