

OLED의 발광원리 및 백색구현기술

신백균 · 오범환 · 이승걸 (인하대학교 IT공과대학 교수)

1 개 요

지난 200여 년간 현대 문명을 뒷받침해왔던 에너지 및 산업동력원은 과도한 화석연료 비중의 소비가 한계점에 다다르고 천연자원의 고갈 및 온실가스에 의한 환경오염 등의 폐해로 인하여 인류뿐만 아니라 지구상 모든 생명체의 존립을 위협하는 상황을 직면하고 있다. 이에 전세계 국가정책과 산업발전전략은 청정에너지 · 환경을 지향하는 그린 테크놀로지 (Green Technology)의 선점에 사활을 걸고 있으며, 조명산업 · 기술분야에서도 향후 기술시장의 패권은 저전력소모 및 친환경을 화두로 하는 신조명광원의 개발 및 응용에 집중되고 있다.

인류문명의 발달사는 조명광원 개발의 발자취와 궤적을 같이하여 왔으며, 백열전구의 상용화로 촉발된 전기에너지 활용 조명기술은 눈부신 발전을 거듭해 온 끝에 기존 광원의 한계를 극복하여 그린 조명을 실현하는 것이 가능한 LED(Light Emitting Diode) 조명기술의 본격적인 상용화를 눈앞에 두고 있으며, OLED(Organic Light Emitting Diode, 유기발광 다이오드)와 나노기술기반 FED(Field Emission Device, 전계발광소자) 등도 차세대 광원으로 대두되고 있다.

OLED는 유기물 박막에 전계를 가하여 전류를 흘려주어 빛을 발하는 전계발광(Electro-Lumines-

cence)을 하는 소자로 LED와 유사한 발광기구로 동작하고 있으며, “친환경-인간-광”이 교감하는 그린 소사이어티를 지향하는 미래정보사회 진입의 선도적 역할을 할 것으로 기대되고 있어 새로운 라이프스타일의 창조와 녹색신성장동력산업의 성공모델의 하나로 자리매김할 것으로 전망된다. 현재 OLED는 자체발광, 고속응답, 광시야각, 초박형, 고화질, 내구성 및 넓은 동작온도범위의 장점을 살려 평판디스플레이 및 플렉서블 디스플레이로서 응용되어 본격적인 상용화가 시작되고 있다. 조명용 광원으로는 WOLED (White Organic Light Emitting Diode)로 개발되어 초박형 및 플렉서블 기판 사용의 가능성 및 점광원 · 선광원 · 면광원 등 다양한 형태의 제작이 가능한 장점 등으로 인해 향후 조명시장에서 기존 응용분야뿐만 아니라 새로운 응용분야의 개척이 가능하다. 또한, WOLED는 현재 신조명광원으로 각광을 받고 있는 LED가 점광원 구현으로만 제약받고 있는데 반해 별도의 구조체를 사용하지 않고도 선광원 및 얇고 투명한 면광원으로 구현하는 것이 가능하며 임의의 형태로 디자인하는 것이 용이하여 다양한 응용제품과 특수 · 예술조명과 같은 고부가가치 신조명의 창출에 적합하다.

본 해설에서는 상기와 같은 장점과 가능성을 가지고 있는 신조명광원으로서의 WOLED의 이해를 돕기 위해 무기물질로 구성되는 LED와 유사하지만 엄

연한 차이점을 갖는 유기물질의 발광원리의 기초와 백색발광 구현을 위해 제안되어 개발되고 있는 소자 구조 및 구현기술 등을 소개하고자 한다.

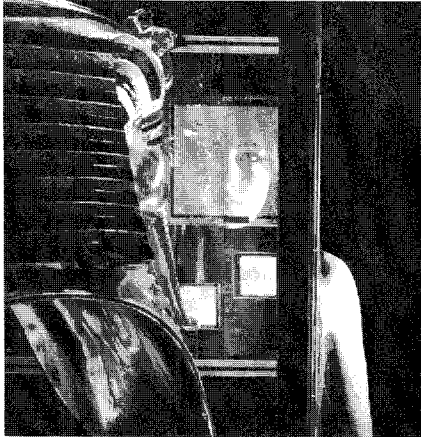


그림 1. 친환경 저전력소모 예술·감성조명이 가능한 WOLED (OSRAM OS)

2. WOLED의 발광원리와 발광효율

WOLED의 발광원리를 이해하기 위해서는 먼저 적색(R)·녹색(G)·청색(B) 단색발광소자인 OLED의 발광원리를 소개할 필요가 있으며, 외부에서 인가된 전계에 의해 여기 되어 전류를 생성하는 전자와 정공이 재결합되어 기저상태로 되돌아가는 과정 중 여분의 에너지를 빛으로 발산하는 LED와 외견상 유사하지만 물질 내부적으로는 전혀 다른 원리(그림 2)를 갖는 OLED의 발광원리를 살펴보아야 한다.

OLED의 구성 물질은 저분자(Small Molecule) 및 고분자(Polymer) 유기물질로서, 그 내부 전하량이 상대적으로 매우 적어 엄밀한 기준에서는 거의 절연체에 가까운 매우 낮은 전기전도도를 보이고 있음에 반해, 무기물질로 구성되는 LED는 전자 또는 정공의 다수캐리어가 다량으로 물질 내부에 존재하고 전기전도도가 비교적 높은 p-n 반도체의 접합체이다. 또한 유기물질은 무기물질과 달리 반데르발스(van

der Waals) 힘을 매개로 하는 분자결합체로 구성되고 분자의 고립성이 유지되어 밴드형성이 거의 발생되지 않는 차이점을 갖는다. 이처럼 전기적 절연체에 가까운 유기물질로 구성되는 OLED에서는 양극/유기층/음극 간에 상당히 높은 에너지 장벽이 존재하며, 그 수준은 무기반도체에서라면 전하의 주입이 거의 불가능한 정도이다. 하지만, 유기물질을 100 [nm] 이하로 얇게 하면 10[V] 이하의 전압에서도 그 내부에 10⁶[V/m] 정도의 강한 전계가 작용하고 양극과 음극으로부터 각각 정공과 전자가 유기물질 내부로 주입되는 것이 가능하다. 강한 전계에 의해 유기물질 내부로 주입된 전자와 정공은 유기물질 특유의 좁은 밴드폭 사이로 전도하여 이동하는 것이 가능하며 1[A/cm²] 이상의 높은 전류밀도도 쉽게 발생시킬 수 있다.

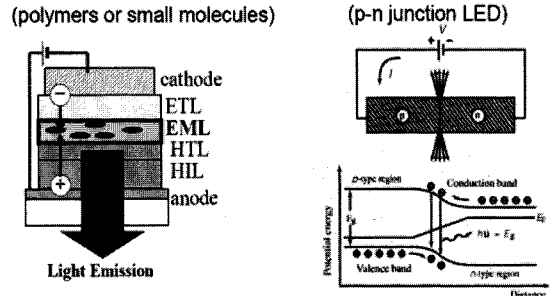


그림 2. LED와 OLED의 발광원리의 유사점과 차이점

유기박막으로의 정공 및 전자의 주입을 높은 에너지 효율로 가능하게 하려면 양극/유기물/음극 계면에서 에너지 장벽을 낮출 필요가 있으며 이를 위해 정공 주입층(Hole Injection Layer: HIL) 및 전자주입층(Electron Injection Layer: EIL)이 삽입되고, HIL 및 EIL을 통하여 주입된 정공과 전자가 발광층(Emission Layer: EML)으로 유효히 이동할 수 있도록 정공수송층(Hole Transfer Layer: HTL) 및 전자수송층(Electron Transfer Layer: ETL)이 삽입된 것이 일반적인 저분자 유기층을 사용한

OLED의 기본구조이다. 분자량이 큰 고분자 (Polymer) 유기층을 사용한 OLED에서도 HIL과 EIL을 삽입하는 경우가 있지만, 일반적으로는 그림 3에서 보는 바와 같이 단층형으로 설계하고 있다.

발광층에서는 양극 및 음극으로 주입되어 흘러들어 오는 정공 및 전자가 재결합하여 여기자(exciton)를 생성하고, 생성된 여기자는 전자의 스핀구조가 다른 일중항(singlet)과 삼중항(triplet)의 두 가지가 있으며, 일중항 여기자는 형광발광(Fluorescence)에 기여하고 삼중항 여기자는 인광발광(Phosphorescence)에 기여한다. 발광된 빛은 유기박막과 ITO 같은 투명전도체를 사용하는 양극을 거쳐 외부로 방출된다. 일중항 및 삼중항 여기자는 발광층 내에서 1 : 3의 비율로 생성되므로, 발광체가 형광발광만을 할 경우에 내부양자효율(internal quantum efficiency)는 최대 25[%]로 제한된다.

이를 경우 외부 전계에 의한 전류가 발생할 수는 있지만 디스플레이나 광원응용에 필요한 발광은 유효히 이루어지지 않으므로 발광효율이 낮아지게 된다. 내부 발광양자수율은 수율이 높은 적절한 유기물질을 사용하여 높일 수 있다. 전하균형과 내부발광양자수율의 경우에는 현재 거의 100[%] 수준의 개선이 달성되었으나, 여기자생성효율과 광방출효율은 아직 낮은 수준이어서 향후 획기적인 개선이 필요한 요인들이다.

현재 OLED에서 여기자생성효율이 낮은 것은 일중항 여기자에 의한 형광발광이 가능한 물질의 개발은 최고 수준에까지 이루어졌지만 삼중항 여기자에 의한 인광발광이 가능한 물질의 개발이 아직 어렵기 때문이며, 따라서 향후 OLED 발광효율의 개선은 인광발광의 활용으로 집중되고 있다. 광방출효율은 발광층에서 생성된 빛이 EML/HTL/HIL 등의 유기물질을 거치면서 굴절되어 소실되는 원인에 의해 낮아지게 되며 현재 20[%] 수준의 낮은 값에 머물고 있다. 광방출효율의 개선이 이처럼 어려운 이유는 EML·HTL·HIL 등의 유기물질과 및 투명전도체인 ITO와 같은 양극물질의 개발 및 선택이 우선적으로 정공 및 전자의 주입과 수송 효율 등의 전기적 성질에 초점을 맞추고 있기 때문이며, 내부양자효율을 높이기 위한 전기적 특성의 개선과 광방출효율을 높이기 위한 광학적 특성의 개선을 동시에 달성하기가 기술적으로 불가능하기 때문이다. 결과적으로 인광발광을 사용하지 못하는 OLED의 경우 전체적인 외부 양자효율은 최대 5[%] 수준이 될 수밖에 없다.

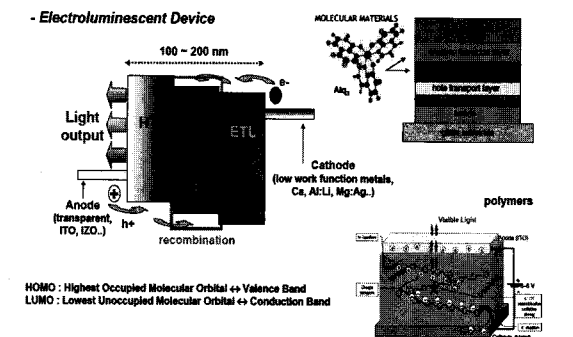


그림 3. OLED의 발광원리와 저분자 및 고분자 OLED의 구조

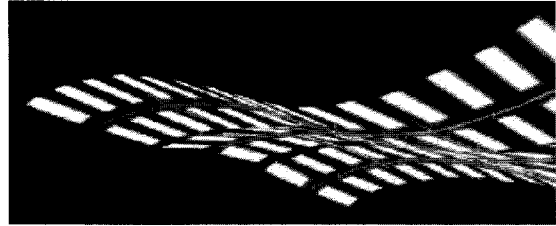
OLED가 평판디스플레이나 조명광원으로 사용될 경우 가장 중요한 성능인자인 발광효율(Light Emission Efficiency)은 전하균형, 내부발광양자수율, 여기자생성효율 및 광방출효율의 네 가지 요인으로 결정된다. 전하균형은 정공과 전자의 주입·수송 계수 및 정공·전자의 재결합 확률로 결정되며 유기물 내부로 주입되는 정공과 전자의 개수가 불균형을

의 개발에서는 이 두 가지 요인의 개선이 필수적이다.

OLED를 평판디스플레이로 이용할 경우 발광층(EML)은 발광되는 빛의 파장이 각각 적색(R), 녹색(G) 및 청색(B)인 유기발광다이오드를 화소소자로 제작하고 수동 매트릭스(Passive Matrix: PM) 또는 능동 매트릭스(Active Matrix: AM) 방식으로 각 화소소자의 발광을 적절히 제어하여 구동하도록



Haptic AMOLED (삼성전자)



OSRAM Opto Semiconductor

그림 4. OLED의 평판디스플레이 및 조명광원 응용의 예

한다. OLED를 조명광원으로 이용할 경우에는 단색 LED와 마찬가지로 적색(R)·녹색(G)·청색(B)의 단색발광소자로 사용할 수도 있겠지만, 기본적으로는 백색발광소자(WOLED)로 제작한다. OLED의 평판 디스플레이 응용이나 조명광원 응용에서 모두 발광효율의 개선이 필수적이며, 앞에서 기술한 개선요인들은 양자에 동일하게 적용되고 있다. 그림 4는 OLED를 평판디스플레이 및 조명광원으로 응용한 예이다.

(Color Mixing) 방식이 있다. 파장변형 방식은 기존 조명광원이나 디스플레이 구현기술에서 오래전부터 사용해 온 기술로서, OLED 소자에서 방출되는 청색 파장 계열의 빛이 형광체를 여기시켜 백색을 구현하는 색변환(Color Conversion) 방식(그림 5 (a)) 등을 사용하며, 적층 또는 혼합방식을 사용하는 색상혼합 방식에 비해 제작공정이 간단하고 컬러 변환층의 조절로 연색성을 손쉽게 조절할 수 있다는 장점이 있다. 색상혼합방식은 적색(R)·녹색(G)·청색(G)의 세 가지 기본색상의 혼합(그림 5 (a), (b)) 또는 황색(Y)·청색(B)의 두 가지 기본색상의 혼합(그림 5 (c))으로 백색을 구현하는 기술로서 파장변환과 관련한 손실이 없고 고효율의 백색발광소자를 제작할 수 있는 장점이 있다.

3. WOLED의 구조와 백색구현방식

WOLED의 구조는 백색구현 방식에 따라 다양하게 가능하며 그림 5에 여러 가지 구현방식에 따른 기본구조가 나와 있다. 백색구현 기술은 크게 파장변형(Wavelength Conversion) 방식과 색상혼합

색상혼합방식에서는 적색(R)·녹색(G)·청색(G)

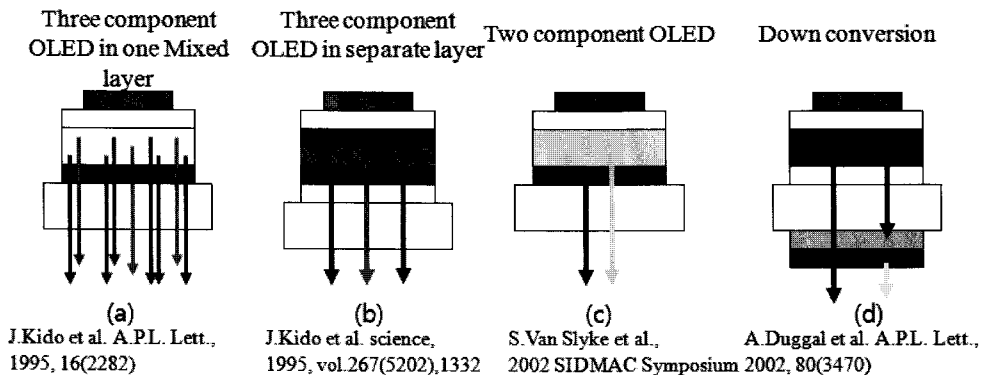


그림 5. WOLED의 백색구현방식

발광재료가 혼합된 고분자 발광층 사용하는 다층형(그림 5 (a))이 있으며 다층형(그림 5 (b), (c))에 비해 제작공정이 간단하고 저렴하다는 장점이 있으나, 정공·전자의 주입효율과 수송효율을 개선할 수 있는 HIL, HTL, ETL, EIL 기능층과 전하균형을 위한 정공차단층(Hole Blocking Layer: HBL) 및 전자차단층(Electron Blocking Layer: EBL) 등을 사용하는 다층형에 비해 발광효율이 낮다는 단점이 있다. 이에 반해 다층형의 경우에는 제작공정이 복잡하여 생산단가가 비싸다는 단점이 있다. 색혼합방식은 이외에도 적색(R)·녹색(G)·청색(B)으로 단색발광을 하는 독립적인 OLED 소자를 순차적으로 적층시켜 백색을 구현하는 소자적층방식의 WOLED(Stacked OLED: SOLED) 등도 있다.

이상과 같이 소개한 조명용 광원으로서의 WOLED에서는 우선적으로 백색의 색순도를 조명에 적합하도록(CIE x, y=0.4, 0.4) 구현하고 발광효율을 형광등 또는 LED에 대항할 수 있는 100~150 [lm/W](휘도 1,000[cd/m²] 기준) 수준으로 향상시키는 것은 물론 수명의 향상 및 연색성의 조절가능성이 요구된다. 조명광원으로서의 성능향상과 더불어 중요한 것은 WOLED의 장점을 살릴 수 있는 플렉서블 광원제작 기술의 개발과 저가의 대면적 제작기술이라 하겠다. 또한 WOLED가 상용화되기 위해서는 수분과 외부불순물에 약한 유기물질을 보호하기 위한 박막형 및 필름형 봉지(Encapsulation) 기술의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) 지식경제부, "OLED산업 녹색성장 전략", 2009.09.
- (2) 한국특허정보원, "백색 OLED 소자-기술 및 시장·특허분석 보고서", 2006.09.
- (3) H.S. Nalwa(Ed.), "Handbook of Organic Electronics and Photonics-Electronic and Photonic Devices", American Scientific Publishers, 2008.
- (4) W. Brütting (Ed.), "Physics of Organic Semiconductors", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2005.
- (5) 장지근, "유기전자공학", 청문각, 2006.06.

- (6) 강원호·장원정, "유기EL 디스플레이의 기초와 응용", 성안당, 2006.02.
- (7) H. Klauk(Ed.), "Organic Electronics-Materials, Manufacturing and Application", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2006.

◇ 저 자 소 개 ◇



신백균(申白均)

1967년 1월 16일생. 1990년 인하대학교 졸업. 1992년 인하대학교 졸업(석사). 2000년 독일 Univ. Erlangen-Nürnberg 졸업(박사). 현재 인하대학교 전기공학부 부교수. 인하대학교 IT공과대학 부학장. 지식경제부 지역혁신센터(RIC) 인하대학교 열플라즈마 환경기술연구센터 참여교수. 한국조명전기설비학회 평의원.



오범환(吳範煥)

1963년 7월 21일생. 1985년 서울대학교 졸업. 1987년 서울대학교 졸업(석사). 1993년 Univ. Texas, Austin 졸업(박사). 현재 인하대학교 정보통신공학부 교수. 한국과학재단 우수연구센터(ERC) 인하대학교 OPERA(집적형 광자기술연구센터) 참여교수. 인하대학교 BK21 지능형 유비쿼터스 물류기술사업단 참여교수. ETRI/KRISS 초빙교수 역임.



이승길(李升杰)

1960년 1월 5일생. 1982년 인하대학교 졸업. 1984년 KAIST 졸업(석사). 1987년 KAIST 졸업(박사). 현재 인하대학교 정보통신공학부 교수. 한국과학재단 우수연구센터(ERC) 인하대학교 OPERA(집적형 광자기술연구센터) 참여교수. 인하대학교 BK21 지능형 유비쿼터스 물류기술사업단 참여교수. Northwestern Univ. 교환교수. Univ. Arizona 방문교수. 인하대학교 IT공과대학 부학장 역임.