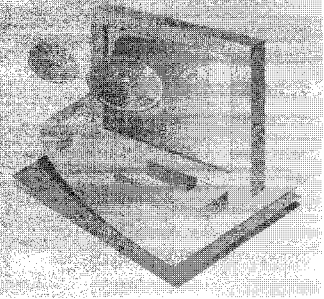


OLED 조명 개발 현황 및 이슈



이정의 책임연구원, 이종희 연구원, 조두희 책임연구원, 이주원 연구원, 추해용 책임연구원(ETRI OLED조명연구팀)

1. 서론

세계는 지금 기후변화에 의한 환경위기와 고유가에 의한 자원위기에 직면해 있다. 특히, 기후변화 문제는 연이은 기상재해를 유발하는 것은 물론 생태계 질서를 근본적으로 뒤흔들며 인류의 생존을 위협하고 있다. 이로 말미암아 국제사회에서 기후변화에 공동으로 대처하기 위한 노력이 최우선 국제의제로 논의되고 있다.

우리나라는 세계 10대 에너지소비국이다. 그런데, 이 에너지의 97%를 수입에 의존하고 있다. 향후 온실가스의 감축의무가 부과될 경우, 우리나라 경제가 안게 될 부담은 상상 이상일 수 있다. 이러한, 환경적, 사회적 변화에 대응하는 '저탄소 녹색성장 (Low Carbon Green Growth)'이 우리의 미래와 발전을 가늠하는 척도가 되고 있다.

전 세계는 온실가스의 배출을 줄이기 위한 방안의 하나로 에너지 소비의 약 20%를 차지하고 있는 조명의 고효율화를 위한 노력이 다각적으로 이루어지고 있다. 1879년 에디슨에 의하여 발명되어 현재까지 사용되고 있는 백열등은 저렴한 비용과 다양한 용도로 인하여 일반조명용 광원으로 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 효율 특성이 20 lm/W에 불과하여 세계 각국에서 사용규제를 논의하거나 의결하고 있다. 이에 반해 1938년에 개발되어 효율은 백열등의 7~8배인 형광등은 적은 열 발생과 낮은 전력 소모로 인하여 지금까지 꾸준히 사용되고 있으나, 수

은이 10~50 mg과 납 10.8~12.4%가 함유되어 있어 중금속 사용규제 (RoHS, WEEE)로 인하여 그 사용이 규제될 계획이다. 따라서 백열등과 형광등의 빈 자리를 채울 수 있는 친환경 차세대 조명으로 LED (Light Emitting Diode), OLED (Organic Light Emitting Diode)와 같은 반도체 광원을 이용한 고체 조명 (Solid State Light)의 개발이 주목 받고 있다.

LED와 OLED는 명칭에서는 유사성이 있지만, 그 특성과 제조방법 그리고 산업의 가치사슬 등에서 큰 차이점을 있다. 특히, LED가 점광원인데 반해 OLED는 면광원의 형태이므로, 조명제품에 매우 근접한 광원이라고 할 수 있다. 따라서 LED를 조명기구로 이용하는 데에는 여러 가지 효율의 감소를 겪지만 OLED의 광원효율은 거의 조명효율이라고 할

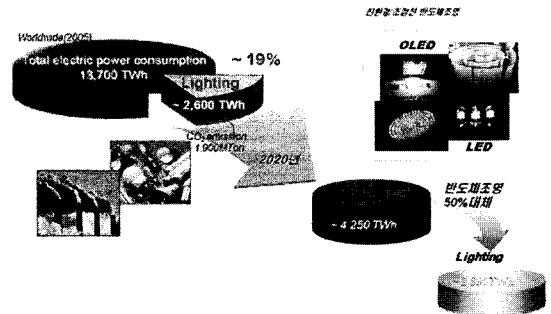






그림 1. 조명 에너지 소비 절감 예측도.

표 1. 광원별 면광원으로써의 비교.

구분 특징	OLED	LED	형광등	백열등
	면광원 	점광원 	선광원 	원광원 
광원효율 (lm/W)	50	100	100	20
연색성	> 80	80	80 ~ 85	100
수명 (시간)	> 20,000	100,000	20,000	1,000
Dimmable	Yes, efficiency increase	Yes, efficiency increase	Yes, efficiency decrease	Yes, but much lower efficacy
Safety	None to date	Very hot	Contains Hg	Very Hot
Noise	No	No	Yes	No
단가(\$/Klm)	20	100	10	1
+/-	다양한 형태 등기구화 효율 우수	고휘도 (신호등, 자동차, BLU..)	저렴한 가격	저렴한 가격

수 있을 정도로 조명기구 제작에 따른 효율감소가 미미하다고 할 수 있다. 이러한 이유로 광원으로서의 효율을 비교하면 LED가 우수하다고 할 수 있지만, 조명 기구의 효율을 비교하면 OLED 조명기구의 효율은 LED와 거의 유사할 것으로 예측할 수 있다. 또한, OLED광원은 기존 조명용광원이 가질 수 없는 얇고 가벼운 면광원의 특성 이외에도, 투명한 특성과 유연한 특성을 부여할 수 있다는 점에서 매우 높은 관심을 받고 있다. 물론 단기적으로는 얇고 가벼운 면광원의 특성을 이용한 조명이 주된 응용이 되겠지만, 추후 중기적으로 투명 또는 색가변 광원을 이용한 조명과 장기적으로 유연한 광원을 이용한 조명이 출현할 것으로 기대된다.

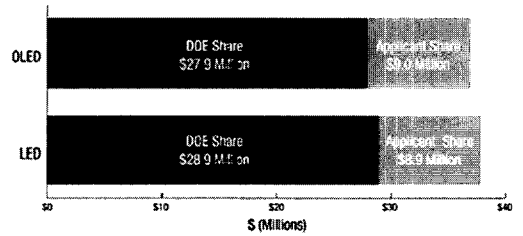
2. 국내 · 외 기술개발 동향

미국, 유럽, 일본 등의 선진국은 OLED조명 기술 확보를 위한 전략적 투자자가 이루어지고 있다. 각 국가별 기술 개발 현황을 살펴보면 다음과 같다.

미국은 에너지성 (DOE : Depart Of Energy)의 지원 하에 'Next Generation Light' 프로젝트의 일환으로 고체 조명의 기술개발이 이루어지고 있다. 1999년부터 시작된 프로젝트의 초기에는 LED 핵심기술 개발에 한정되어 있

었으나, 2000년부터 OLED연구도 병행해서 이루어져 왔다. 지금까지 전체 투입연구비의 약 46 %를 OLED조명의 핵심기술 개발을 위한 연구에 투입하면서 2015년까지 100 lm/W의 효율과 10 \$/klm 가격을 목표로 Philips, GE, OSRAM, Universal Display Co., Dow Corning Co.,와 Princeton Univ. 등의 17개 기관이 참여하여 2009년 현재에 25개의 세부 프로젝트가 진행 중에 있다.













유럽은 오스람, 필립스를 중심으로 컨소시엄이 형성되어 광원의 고효율화, 저가격화, 투명광원 개발, Roll-to-Roll 공정 및 소재 개발을 위한 프로젝트들이 수행되



Total Contract Value of Projects: \$74.8 million* (51 projects)
 • OLED: \$36.9 million (25 projects)
 • LED: \$37.8 million (26 projects)

그림 2. 미국, 'Next Generation Lighting' 프로젝트 과제 현황.

표 2. 각 국가별 프로젝트 현황.

Country	Project Details	UDC	GE	
USA	• DOE project : - "Next Generation Lighting" - 1999~2015년, 100lm/W, 10\$/klm - 전체투입연구비의 46.8% 투자			
EU	• EU project : - OLEDEU.eu, ComboLED, 등 8개 국제 수명중 - 안방근 20Meuro 투입 - Osram, Philips, Siemens등 참여	Philips 	Osram 	Siemens 
Japan	• NEDO project : - NEDO주관, 2004~2011년, 43억엔 투입	Konica Minolta 	Matsushita/RIOE  	
Korea	• 조명용 면광원 개발 - 생기원등, 광원 고효율화 • 조차기 유기면광원 조명 개발 - 삼성관대 등, 저가격 광원 • 원광/감성형 OLED 면조명 개발 - ETRI 등, 감성조명용 광원	생기원 	ETRI 	ETRI 

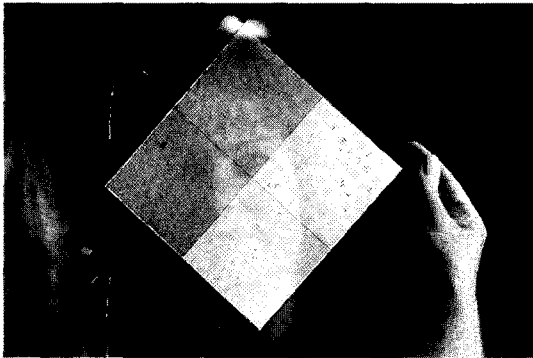


그림 3. 유럽, OLLA 프로젝트 OLED광원.

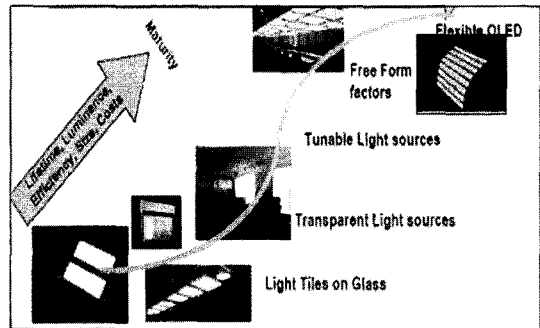


그림 4. 독일, IPMS의 OLED조명 기술 로드맵.

고 있다. 특히, OLLA (Organic Light Emitting Diodes of ICT & Lighting Applications) 프로젝트는 2004년 10월에서 2008년 8월까지 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 면적의 광원으로 50 lm/W의 효율과 70이상의 연색성 및 10,000시간의 수명 특성을 갖는 백색 OLED조명 개발을 목표로 Philips, Seimens, Osram-OS, Novaled, Merck 등 유럽 8개국 24개 협력기관들이 참여하여 성공적으로 수행을 완료하였다.

OLLA 프로젝트의 후속으로 OLED100.eu 프로젝트가 2008년 9월부터는 진행되어 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 의 면적으로 100 lm/W의 효율과 100 euro/ m^2 이하의 가격을 갖는 OLED조명 개발을 목표로 3년 동안 30 M\$의 연구비를 투입하고 있다.

독일은 교육연구부 (BMBF) 후원 하에 OPAL (Organic Phosphorescent Diodes for Applications on the Lighting Market) 프로젝트가 Osram, Philips, Aixtron AG, Seimens CT, Applied Materials 등을 중심으로 고효율의 OLED 광원을 수 € cents/ cm^2 가격으로 생산할 수 있는 기술 개발을 목표로 추진되고 있다.

그 외에 다수의 프로젝트가 컨소시엄 형태로 진행되고 있으며, Osram, Seimens 등 4개국 7개 기관이 참여하여 저가격의 OLED광원 개발을 목표로 하는 ComboLED 프로젝트와 Roll-to-Roll 기술로 저가격의 OLED 개발을 목표로 VTT, CSEM, INM, UPM, Hansaprint, Ciba, PolyIC社가 참여하고 있는

ROLLED 프로젝트와 Philips, OTB, IMEC 등 15개 기관이 참여하여 지능형 PLED조명을 위한 저가격, Roll-to-Roll, 대면적 공정기술 개발을 목표로 하는 Fast2light 프로젝트, 그리고 Philips, IAPP 등 10개 기관이 참여하여 2세대급 OLED 조명용의 100 lm/W 소자구조 개발을 목표로 하는 Aevion 프로젝트 등이 수행되고 있다.

영국은 정부의 지원 하에 TOPLESS (Thin Organic Polymer Light Emitting Semi-conductor Surfaces) 프로젝트가 2008년부터 2010년까지 3년 동안 £3.3M의 연구비가 투입되어 수행되고 있으며 영국의 대표 조명회사인 Thorn Lighting을 중심으로 Sumation, Durham 대학 등이 참여하여 Polymer 소재를 기반으로 하여 20 lm/W의 백색 OLED 개발을 목표로 한다.

일본은 산업기술총합개발기구 (NEDO)/산업기술 진흥기구 주관으로 미쯔비시중공업과 IMES 등의 OLED조명 관련업체들이 컨소시엄을 형성하여 참여하며 BLU (Back Light Unit) 및 일반조명용 OLED광원 개발을 목표로 2004년 4월부터 2011년 3월까지 43억 엔의 연구비가 투입되고 있다.

한편, 우리나라는 2006년부터 지식경제부 지원과 생산기술연구원의 주관으로 2013년 100 lm/W를 목표로 조명용 OLED 면광원 개발 프로젝트가 진행 중에 있다. 2008년까지 1단계 50 lm/W를 달성하고 지금은 2단계에 접어들어 기업 중심으로 80 lm/W와

부분조명 상용화를 목표로 진행 중에 있다. 또한, 2009년에는 지식경제부의 지원과 한국전자통신연구원 주관으로 OLED광원의 투명 및 주색가변성을 구현하기 위한 새로운 과제를 시작했다. 이 과제에서는 투명광원과 색가변광원을 개발하고, 이를 이용한 감성조명의 개발을 목표로 하고 있다. 한편, 2007년부터 2010년까지 에너지관리공단의 지원으로 저가격 OLED조명의 개발 과제가 성균관대의 주관으로 진행 중에 있다.

3. 기술 개발 이슈

OLED조명을 위한 광원은 기술적으로 효율, 수명, 대면적 공정성을 확보하는 것이 중요한 것이라고 할 수 있다. 먼저, 조명용광원에 있어서 효율은 Power Efficiency 또는 Luminous Efficacy (lm/W)가 중요하다. Luminous Efficacy는 주어진 발광 스펙트럼에서 내부양자효율, 1/구동전압, 그리고 광추출효율과 비례관계가 있으므로 이들을 높이기 위한 연구가 필요하다. 내부양자효율은 인광소자 등과 같이 고효율 소재를 활용하는 등의 발광층에 대한 엔지니어링을 통해서 100%에 가까운 효율을 얻을 수 있고, 구동전압은 전극과 유기층과의 계면엔지니어링 및 발광층에서의 전하주입장벽 및 전하트랩핑을 조절하여 낮출 수 있다. 한편, 광추출효율은 유기박막모드와 기

판모드에 의한 광손실을 줄이기 위한 층간 필름의 개발이 중요하다. 수명은 재료, 소자구조, 봉지구조 등 모든 부분과 관련된 것으로 디스플레이용으로는 상당수가 이미 해결되었지만, 조명용 스펙에서는 좀 더 향상된 결과가 필요하다. 상용화에 있어서 가장 중요한 이슈는 제조가격이 될 것으로 예상되는데, 단위면적당 패널의 제조가격을 혁신적으로 낮출 수 있는 제조공정의 개발이 필수적으로 선행되어야 한다. 따라서 이러한 이슈들에 대하여 조금 더 상세한 설명을 덧붙이고자 한다.

3.1 OLED 발광층

고효율 백색 OLED소자는 조명용 광원을 위한 핵심 기술이다. 백색 OLED는 소자 구조에 따라서 Stack구조, 단일 발광층 구조, Horizontal RGB, Down Conversion으로 나눌 수 있는데, 보통의 경우 제조가 용이하고 고효율을 얻을 수 있는 Stack 구조를 사용하게 된다. 또한, 사용하는 소재에 따라서는 형광, 인광, 그리고 하이브리드 백색 OLED로 나눌 수 있다. 형광소재를 사용하는 경우에는 소자 안정성 면에서는 우수하지만 고효율을 얻는데 한계를 가지고 있는 문제가 있으며, 인광소재를 사용하는 경우에는 고효율을 얻을 수는 있지만, 안정적인 청색 소재가 없다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 두 가지 소재의 문제점을 상호 보완하고자 하는 노력으로 청색은 형광소재를 사용하고 그 외의 색상은 인광소

표 3. 소재별 백색 OLED의 분류.

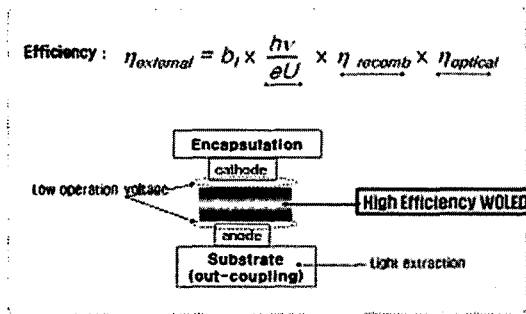


그림 5. 조명용 OLED 광원의 연구 범위.

	Stack WOLED		Hybrid WOLED
	Fluorescence WOLED	Phosphorescence WOLED	
EML structure			
Pros	<ul style="list-style-type: none"> • Materials • Stability 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> • Materials • Efficiency • Stability
Cons	<ul style="list-style-type: none"> • Efficiency 	<ul style="list-style-type: none"> • Blue material • Stability 	-



재를 사용하는 하이브리드 방식의 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근의 고효율 인광소자의 구조는 다음 그림 6과 같이 정공주입/수송층과 전자주입/수송층 이외에 두 층의 발광층을 기본 골격으로 하고 있다. 이 때 발광층은 p-Type 호스트와 n-Type 호스트로 이루어지며 각각의 호스트는 높은 정공주입과 전자주입 장벽을 가지는 HOMO/LUMO 구조를 가진다. 이러한 구조는 흡사 LED의 PN 정선과도 같은 구조라고 할 수 있으며, 재결합영역을 두 호스트의 계면으로 제한함으로써 전류 손실을 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이때 재료적으로 요구되는 것은 전기화학적/열적 안정성 이외에도 호스트의 삼중항 에너지가 청색 인광 도판트의 것보다 높으며, 정공이동도나 전하이동도가 너무 낮지 않아야 한다. 여기에 높은 전하이동도를 가지면서 삼중항 에너지가 청색 인광 도판트의 것보다 높은 정공수송층 또는 전자수송층 소재가 있다면 소자 구조를 설계하는데 많은 자유도를 제공할 수 있게 된다.

독일 드레스덴 공대의 Leo 교수 그룹에서는 TcTa와 TPBi로 이루어진 발광 호스트들과 FIrpic 등의 인광 도판트들을 이용하여 백색 OLED를 구성하였고, 13-14 %의 외광 효율 및 30-33 lm/W의 Luminous Efficacy를 얻었다. 일본 야마가타 대학의 Kido 교수 그룹에서는 새로운 넓은 삼중항 에너지를 갖는 n-

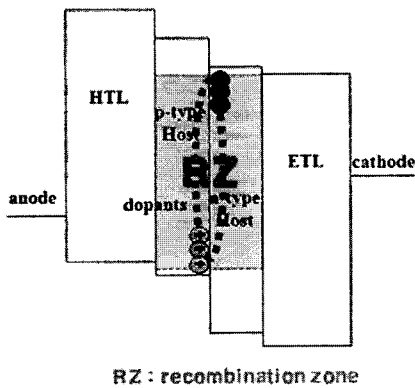


그림 6. 두 층 발광층을 갖는 인광 백색 OLED의 소자 구조.

type 호스트와 전자수송재료를 개발하여 44 lm/W의 효율을 달성하였다. 한편 ETRI에서도 새로운 n-type 호스트를 적용하여 37-46 lm/W 효율을 달성하여 보고하기도 하였다.

이와 같이 고효율 인광 백색 OLED의 개발은 새로운 넓은 삼중항 에너지를 갖는 소재의 개발이 관건이라고 할 수 있다. 호스트뿐만 아니라 정공수송층과 전자수송층에서도 기존의 전하 이동도와 안정성을 유지하면서 청색 인광 도판트의 삼중항 에너지를 소멸시키지 않도록 넓은 삼중항 에너지를 갖는 것이 중요하다. 또한, 공정성을 확보하기 위한 도판트의 수를 줄이는 것 역시 중요한 이슈이다. 기존의 디스플레이용 도판트가 넓은 색재현 범위를 확보하기 위하여 좁은 스펙트럼을 갖는 도판트를 선호하였다면, 조명용 도판트는 작은 도판트의 수로 높은 연색지수를 확보할 수 있도록 넓은 스펙트럼을 갖는 도판트를 선호하게 된다. 따라서 기존 디스플레이용 OLED소재의 개발과는 별개의 방향으로 조명용 OLED소재의 개발이 절실히 요구된다고 할 수 있다.

한편, 하이브리드 백색 OLED는 앞서 설명한 인광 백색 OLED에서 안정성에 가장 큰 문제를 제공하는 청색을 형광으로 대체한 소자이다. 하이브리드 백색 OLED는 다시 형광층의 삼중항을 사용할 수 있는 Triplet Harvesting타입과 그렇지 않는 Direct Recombination타입으로 나눌 수가 있다.

먼저, Triplet Harvesting타입은 이론적으로 모든 전류를 빛 에너지로 바꿀 수도 있다는 점에서 매우 매력적인 방법이다. 즉, 인광 백색 OLED와 같은 효율을 얻을 수 있으면서 소자 안정성도 확보할 수 있기 때문에 OLED 소자 연구자들의 많은 관심의 대상이 되어 왔다. 이러한 타입의 소자가 작동하는 원리는 다음 그림 7과 같이 형광층에서 대부분의 재결합이 일어나고, 따라서 형광층의 단일항 엑시톤에 의한 청색 발광을 얻게 된다. 형광층 재결합 영역에서 사용되지 않은 삼중항은 에너지 이동 (Diffusive Transfer)에 의해서 인광층으로 이동하여 녹색과 적색의 인광 발광을 얻게 된다. 이러한 원리로 25%의 단일항은 형광층의 청색발광으로, 나머지 75%의 삼중항은 인광층의 녹/적색 발광으로 변환되어 100%의 전환효율을 얻을 수도 있게 된다.

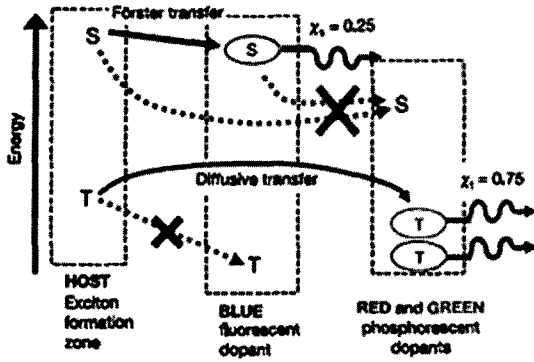


그림 7. Triplet Harvesting형 하이브리드 백색 OLED의 작동 원리.

이러한 소자에서 중요한 사항은 재결합 영역을 형광층으로만 한정할 수 있도록 제어하는 것과 삼중항 엑시톤이 인광층에서만 발광할 수 있도록 에너지 이동을 조절하는 것이다.

이와 같은 현상은 미국 Forrest 그룹에서 처음 실현되어 보고되었는데, 그 효율은 10% 정도의 외부 양자효율로 그다지 높지 않았으나, 최초로 Triplet Harvesting타입이 구현되었다는 데 그 의의가 있다고 할 수 있다.

이러한 타입의 하이브리드 소자는 독일 드레스덴 대학의 Leo 그룹과 ETRI에서도 연이어 보고되었는데, 드레스덴 대학에서는 넓은 삼중항 갭을 갖는 청색 소재 (4P-NPD)를 이용하여 15.2%의 외부양자효율을 보고하였고, ETRI에서는 넓은 삼중항 갭과 높은 효율을 보이는 청색 호스트와 소자 구조를 이용하여 18%의 양자효율을 보고하였다. 그러나 이러한 원리의 소자는 까다로운 작동 조건으로 인하여 실질적으로 사용하기 어렵다는 문제점을 가지고 있었다. 즉, 형광층의 삼중항 엑시톤을 최대한 손실 없이 인광층으로 이동시켜야 하는데, 이러한 경로는 형광층에서의 비발광 프로세스에 의해서 소멸되거나 인광층에서 형광층으로 다시 이동하여 소멸되는 등의 소멸 경로와 경쟁하여야 한다. 이 때, 다른 소멸 경로보다 우리가 원하는 경로를 빠르게 생성하는 조건에 대한 정보가 부족하여, 소자를 설계하고 예측하는

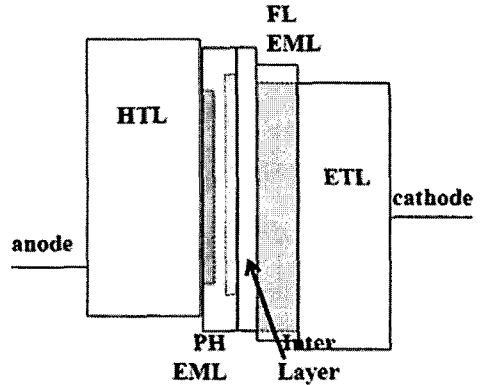


그림 8. Direct Recombination형 하이브리드 백색 OLED의 구조 예.

것이 불가능하여, 현실적으로 소자를 구현하는 것이 매우 어렵게 된다.

이러한 문제점으로 Direct Recombination타입에 대한 연구가 필요로 하게 되었다. 이 타입의 소자는 재결합 영역이 형광층과 인광층에 모두 형성될 수 있도록 조절하여 형광과 인광으로부터 모두 발광을 얻어내는 방법이다. 앞선 Triplet Harvesting타입에 비해 청색 형광층의 삼중항 엑시톤을 사용할 수 없기 때문에 효율은 낮을 수 있지만, 다양한 소재를 활용할 수 있고, 또한 소자를 설계 하는데 있어 많은 자유도를 갖는 구조라고 할 수 있다. 이러한 타입의 소자에서는 형광층과 인광층을 분리하는 중간층 (Interlayer)의 역할은 매우 중요한데, 이는 재결합 영역을 형광층과 인광층에 걸쳐서 형성되도록 조절하는 역할을 할 뿐만 아니라, 인광 발광층의 삼중항 엑시톤이 형광층으로 이동하여 소멸되는 것을 막아주는 기능을 하게 된다.

ETRI에서는 Direct Recombination타입의 하이브리드 백색 OLED를 이용하여 15%의 외부양자효율과 25-27 lm/W의 Luminous Efficacy를 보고한 바 있다. 또한, Philips에서도 ETRI의 결과와 유사하게 24-26 lm/W의 효율을 달성하였으며, 수명의 경우 1000 nit에서 10,000시간 정도인 것으로 보고 하였다. 이와 같이 안정적인 인광 청색이 개발되기 전까지는 하이브리드 백색 OLED, 특히 Direct Recombination



타입이 단기적으로는 백색 OLED의 Solution이 될 것으로 예측되고 있다.

한편, 고효율 광원을 얻기 위해서는 구동전압도 매우 중요하게 되는데, 같은 광속이라도 낮은 전압에서 얻을수록 높은 효율을 얻을 수 있기 때문이다. 구동전압을 낮추기 위해서는 전극과 유기층 또는 유기층간의 전하 주입장벽 그리고 유기층의 전하 이동도가 중요한 변수가 되는 것으로 이에 대한 최적화 작업도 중요한 연구 과제라고 할 수 있다.

3.2 장수명 백색 OLED

조명용 백색 OLED는 디스플레이 OLED에 비해 높은 휘도나 높은 전류밀도에서 구동될 가능성이 크다. 따라서 기존 OLED에 비해 안정성이 더 강력하게 요구될 것으로 예상된다. 소자의 안정성은 소재, 소자구조, 봉지 등에 의해서 결정되는데, 기존 디스플레이용 OLED와 달라질 수 있는 부분이 소자구조 부분이 될 것이다.

특히, 적층형 (Tandem) 구조의 OLED는 조명용 백색 OLED의 장수명화를 위한 필수적인 선택이 될 수 있다. 적층형 OLED는 비록 효율면에서는 장점이 거의 없지만, 동일한 휘도를 얻는데 있어서 단층형 (Single Stack)의 소자에 비해 적층되는 소자의 수에 반비례하여 감소하기 때문에 많은 수명 향상을 이끌어 낼 수 있다. 물론 소자와 소자를 연결하는 연결층의 개발이 핵심적인 부분이 될 수 있는데, 이는 앞서

설명한 저전압 구동을 위한 p 도핑된 정공층과 n 도핑된 전자층을 주로 활용 할 수 있다. 따라서 앞서 제기된 문제점인 안정성과 공정 신뢰성의 확보가 Tandem 소자의 개발에 핵심적인 부분이 될 것으로 예상된다.

또한 소자 구조의 조합도 매우 중요한 부분이다. 여러 층의 소자가 적층 되면 마이크로 공진 효과는 더욱 심각해지는데, 이는 각각의 발광 색상과 두께 조절의 중요성을 인식시켜 준다. 따라서 각각 층에 균일하게 전압이 인가될 수 있는 소자 조합도 고려되어야 하는 부분이다.

필립스에서는 청색형광소자와 녹색 및 적색 인광 소자의 적층을 통한 Tandem 백색 OLED소자를 다음 그림과 같이 제작하여 26 lm/W의 효율을 얻은 바가 있다.

3.3 광추출 향상

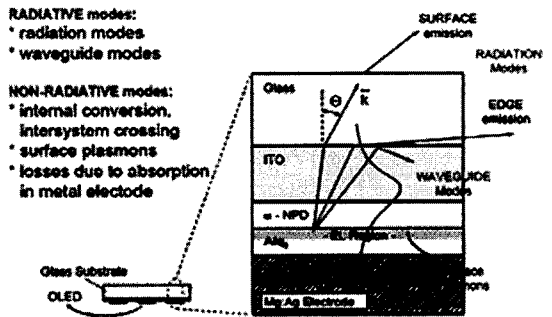


그림 10. 배면발광 OLED에서의 광추출 경로 (Phys. Rev. B, 58, 3730, 1998).

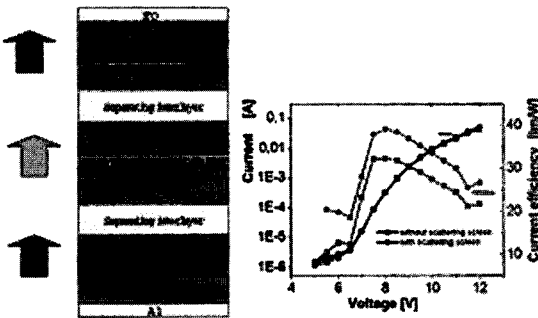


그림 9. Tandem 백색 OLED (Philips).

초기 OLED의 광추출 효율은 간단한 Ray Optics를 이용하여 약 20% 정도로 이해하고 있었으나, 최근 이를 상회하는 실험적인 결과들이 보고되면서 이에 대한 정밀한 이론적 고찰들이 연구되고 있다. 배면발광 OLED에서 생성된 빛은 표면으로 나와 외부로 방출되는 것과 손실되는 것이 있는데, ITO와 유기층 사이에서 Waveguide모드로 빠져나가거나 (Waveguided모드), 기판의 전반사로 인해 기판에

간히는 (Substrate Guided모드) 현상들이 그 대표적인 예이다. 물론 금속전극의 표면 플라즈몬 효과로 인한 손실 등도 있지만 위의 손실에 비하면 미미한 수준이라고 할 수 있다. 이러한 손실의 원인은 ITO/유기층과 (굴절률 약1.8) 기판 (굴절률 약1.4) 또는 기판 (굴절률 약1.4)과 공기 (굴절률 1.0) 간의 높은 굴절률 차이에서 찾을 수 있다. 이론적 계산에 의하면 일반적인 배면발광 OLED는 외부로 나오는 광량이 약 20 %, Waveguided모드 약 45 %, Substrate Guided모드 약 35 % 나타난다. 따라서 대부분의 빛이 외부로 나오기 보다는 손실 메커니즘에 의해 소멸된다고 할 수 있다. 기존 디스플레이용 OLED에서는 Pixel Blur나 공정성 등의 이유로 외부로 향하는 빛을 늘이는 방법이 매우 제한적일 수밖에 없었다. 그러나 조명용 OLED광원에서는 높은 효율의 달성이 매우 중요한 사항이므로 다양한 방법으로 광추출 효율을 높이는 노력을 하고 있다. 먼저, Substrate Guided모드를 줄이기 위한 방법으로는, 마이크로렌즈 어레이나 산란을 유도하는 여러 형태의 박막들을 기판과 공기 사이에 형성하는 방법들이 시도되고 있다. 이러한 시도는 사용되는 재료나 박막구조에 따라서 광추출효율은 달라질 수 있으므로 이에 대한 최적화가 필요하다. Waveguided모드를 줄이기 위한 방법으로는 고굴절률의 기판을 사용하거나, 기판과 ITO 사이에 산란층을 도입하는 방법 등이 보고 있다. 또한, 마이크로공진 효과를 높일 수 있는 박막을 삽입하여 광추출을 높일 수도 있다. 이와 같이 Substrate Guided모드와 Waveguided모드를 줄일 수 있는 방법을 모두 동원한다면 현재의 효율보다는 2배 이상, 장기적으로는 3배 이상까지도 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 앞서 소개한 백색 OLED의 효율은 소자 효율의 증가 없이도 50-70 lm/W에 이르며, 장기적으로는 70-100 lm/W에 다다를 것이다. 물론 소자 효율의 증가를 고려한다면 이보다 더 높은 광원 효율을 예상할 수 있다. 따라서 광추출효율이 우수할 뿐만 아니라 공정성이 역시 우수하여 낮은 가격으로 제조가 용이한 박막들의 개발이 절실하며, 이에 대한 많은 연구자들의 관심이 필요한 상황이다.

3.4 대면적 광원

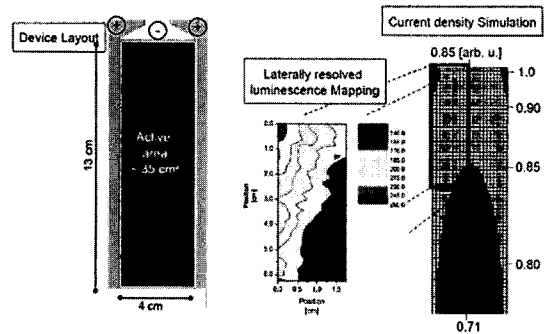


그림 11. OLED에서의 면적에 따른 휘도분포의 예 (Siemens, 2005).

OLED광원은 투명한 전극을 통하여 빛이 방출되는 특성을 가지는데, 보통 투명전극은 광투과도는 80-90 %로 높지만 면저항이 10 ohm/sq 이상으로 높은 단점이 있다. 따라서 작은 면적의 광원에서는 큰 문제가 없지만 광원의 면적이 커짐에 따라서 전극에서 멀어질수록 전압강하가 심하게 일어나고 효율의 감소가 발생한다. 이러한 휘도 불균일과 효율의 감소를 최소화시키기 위해서는 투명전극의 면저항을 낮추는 방법과 함께 보조배선전극을 형성하는 방법이 이용되고 있다. 먼저, 면저항을 낮추는 방법으로는 투명 산화물 박막 중간에 흡수가 낮은 얇은 금속 박막을 삽입하는 방법이 많이 사용되고 있는데, 비록 투과도에서는 약간의 손실이 발생하지만 면저항은 2-3 ohm/sq 수준까지 개선할 수 있는 것으로 알려져 있다. 보조배선은 단순한 공정으로 높은 효율을 얻을 수 있도록 다양한 구조 및 방법이 연구되고 있으며, 테스트 소자의 90 % 이상의 효율을 유지할 수 있는 것으로 알려져 있다.

대면적 광원화의 또 다른 방법은 타일구조이다. 타일구조는 전압강하를 낮출 뿐 아니라 필요 시 광원 서브모듈을 교체할 수 있어서 광원 수명 및 수율 관리에 유리하게 한다. 따라서 손쉬운 광원의 교체가 매우 중요한 사항이 될 것으로 사료된다.

한편, 대면적화에 있어서 광원의 발열문제는 점



점 중요해 지고 있다. 특히, 고휘도로 사용되어야 하는 OLED광원에서는 더욱 발열문제가 심각할 것으로 예측되며 이에 대한 적절한 대응이 요구된다. 다행히 OLED광원은 LED광원에 비해 발열은 매우 미미한 상황이지만 광원의 효율 및 수명을 고려한다면 간과해서는 안 될 사항이다. 기존의 광원에서는 광원의 뒷면에 LED 광원에서 주로 개발되고 있는 방열필름을 주로 사용하고 있지만, 보다 좋은 방열특성을 얻기 위해서는 봉지공정과 융합된 방열 Solution이 개발되어야 할 것이다.

실을 최소화하는 등의 또 다른 노력이 이루어져야 한다.

이제 주변에서 OLED조명을 볼 수 있는 날이 그리 멀지 않은 것 같다. 그러나 너무 조급한 나머지 성숙하지 않은 기술로 제품을 출시하여 시장의 신뢰를 잃지 않는 주의를 필요로 한다. 지속적인 기술 개발로 제품의 완성도를 빠르게 높여 가고, 아울러 OLED광원의 특성을 살릴 수 있는 새로운 조명디자인을 적극적으로 발굴하여 새로운 미래 조명시장을 창조해 나가야 할 것이다.

4. 향후 전망

최근 들어 Nature지를 통하여 드레스덴 대학(獨)이 광추출 기술을 통하여 124 lm/W의 효율을 갖는 백색 OLED광원 개발결과를 발표함으로써 OLED조명의 조기 상용화 가능성을 한층 밝게 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 차세대 조명인 LED조명과 달리, OLED조명은 인간 친화적이고 감성적인 광원으로 시장에 진입하여 실내용 조명으로 백열등과 형광등의 빈자리를 태워갈 것으로 기대되고 있다.

일본 야노경제연구소의 보고에 따르면, OLED조명 시장규모는 2012년에 100억 엔을 초과하여 기하급수적으로 시장이 증가하며 2015년에는 540억 엔에 달할 것으로 예측하고 있다.

OLED조명의 상용화를 위해서는 효율 이외에도 수명, 스펙트럼 특성, 색안정성, 대면적화 등이 중요한 이슈이며 이에 대한 관심도 높여 나가야 할 것이다. 또한, 제조단가 면에서 경쟁력을 가질 수 있는 제조공정의 개발이 무엇보다도 중요할 것으로 예상된다. 기존 조명용 광원과의 가격 경쟁력 확보를 위해서 제조공정을 간단히 하고, 사용하는 재료의 손

표 4. OLED 조명 패널 시장규모 예측.

(단위: 억엔)

년도	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
금액	20	30	80	120	190	310	540

자료원: 야노경제연구소

참고 문헌

- [1] S. Reineke, F. Lindner, G. Schwartz, N. Seidler, K. Walzer, B. Lussem, K. Leo, Nature, 459, 234 (2009).
- [2] G. Schwartz, S. Reineke, T. C. Rosenow, K. Walzer, K. Leo, Adv. Funct. Mater., 19, 1319 (2009).
- [3] G. Gaertner, H. Greiner, Proc. of SPIE, 6999, 69992T-1 (2008).
- [4] V. Bulovic, V. B. Khalfin, G. Gu, P. E. Burrows, D. Z. Garbuzov, S. R. Forrest, Phys. Rev. B, 58, 3730 (1998).
- [5] V. Bulovic, V. B. Khalfin, G. Gu, P. E. Burrows, D. Z. Garbuzov, S. R. Forrest, Phys. Rev. B, 58, 3730 (1998).
- [6] Y. Sun, N. C. Giebink, H. Kanno, B. Ma, M. E. Thompson, S. R. Forrest, Nature, 440, 908 (2006).
- [7] H. Loebel, V. van Elsbergen, H. F. Boerner, C. Goldmann, D. Bertram, S. Grabowski, SPIE 7415-45 (2009).
- [8] J.-J. Kim, S.-Y. Kim, SPIE 7415-39 (2009).
- [9] J.-I. Lee, J. Lee, J. Lee, J. -H. Shin, C.-S. Hwang, H. Y. Chu, SPIE 7415-33 (2009).
- [10] J. Lee, J.-I. Lee, J. Lee, J. Y. Lee, D. M. Kang, W. Yuan, S.-K. Kwon, H. Y. Chu, J. Information Display, 10, 92 (2009).
- [11] T. Matsumoto, T. Nakada, J. Endo, K. Mori. N. Kawamura, A. Yokoi, J. Kido, SID 03 Digest, 979 (2003).
- [12] P. A. Levermore, M. S. Weaver, M. Hack, J. J. Brown, LED/OLED Lighting Tech. Expo, L7-1 (2009).
- [13] F. Creuzet, LED/OLED Lighting Tech. Expo, L7-2 (2009).

[14] A. Mikami, LED/OLED Lighting Tech. Expo, L7-3 (2009).

[15] Y.-S. Tyan, US DOE SSL Manufacturing Workshop (2009).

[16] J.-I. Lee, J. Lee, H. Y. Chu, ICEL7, OR 5a-1 (2008).

저자약력



성명 : 이정익

- ◆ 학력
- 1992년 KAIST 화학과 이학사
- 1994년 KAIST 화학과 이학석사
- 1997년 KAIST 화학과 이학박사

- ◆ 경력
- 1998년 IBM Almaden Research Center Post. Doc.
- 1999년 - 현재 ETRI OLED 조명연구팀 책임연구원



성명 : 이종희

- ◆ 학력
- 2002년 KAIST 화학과 이학사
- 2004년 KAIST 화학과 이학석사
- 2007년 KAIST 화학과 이학박사

- ◆ 경력
- 2007년 - 현재 ETRI OLED 조명연구팀 연구원



성명 : 조두희

- ◆ 학력
- 1987년 한양대 재료공학과 공학사
- 1989년 KAIST 재료공학과 공학석사
- 1996년 일본 경도대학 재료공학과 공학박사

- ◆ 경력
- 1998년 - 현재 ETRI OLED 조명연구팀 책임연구원



성명 : 이주원

- ◆ 학력
- 2001년 선문대 물리학과 이학사
- 2003년 경희대 대학원 물리학과 이학석사
- 2006년 경희대 대학원 물리학과 이학박사

- ◆ 경력
- 2007년 Dept. of Materials Engineering, Auburn University, Post. Doc.
- 2008년 - 현재 ETRI OLED 조명연구팀 연구원



성명 : 추혜웅

- ◆ 학력
- 1987년 경희대 물리학과 이학사
- 1989년 경희대 대학원 물리학과 이학석사
- 2008년 경희대 대학원 정보디스플레이학과 공학박사

- ◆ 경력
- 1989년 - 현재 ETRI OLED 조명 연구팀 책임연구원(팀장)

