

대면적 고효율 백색 OLED 면광원 기술 개발 동향



박종은 선임연구원 (KITECH 나노전자소자팀) · 신동찬 교수 (조선대 신소재공학과)

1. 서론

전 세계적으로 에너지관련 문제가 이슈가 되고 있는 가운데, 빛과 관련된 에너지 소모가 생산되는 총 전력의 20% 정도를 차지하고 있다. 대부분 형광 튜브와 백열전구가 광원으로 사용되며, 전체 사용전력량의 40% 정도를 차지하고 있다. 백열전구는 에너지의 90% 정도를 열로 방출하여 약 10% 에너지 효율을 보이며, 형광램프는 70% 정도의 에너지 효율을 보인다. 따라서 에너지 효율적인 측면에서 전구의 사용은 자제되어야 한다. 많은 과학자들이 에너지 효율이 높은 반도체를 이용한 발광다이오드(LEDs)를 수십 년 동안 연구해왔다. 무기물로부터 만들어진 R, G, B LED 들은 이미 상업화되어 신호등, 자동차 전조등, 일반조명 등으로 사용되고 있다. 하지만, 무기 백색 LED는 일반적인 광원으로 사용하기에는 고가이므로 (표 1), 유기 반도체에 기초한 LED가 새로운 경쟁자로 떠오르고 있다.

OLED (Organic Light Emitting Diodes)는 유기 재료에 전계를 인가하여 전기에너지를 빛으로 바꾸어주는 소자로서 자체발광, 고속응답, 광시야각, 초박형, 고화질, 내구성, 넓은 온도 범위 등 디스플레이로서 필요한 모든 요소를 갖추고 있어 가장 이상적인 디스플레이로 각광받고 있다 [1, 2]. 또한, OLED는 2차원 면광원의 형태로 구현할 수 있을 뿐

아니라, 선광원 및 면광원의 형태로 구현될 수 있으며, 특히 두께를 아주 얇게 할 수 있고, 플렉서블 기판을 사용하면 다양한 모양의 조명기기를 만들 수 있으므로, 기존 조명기기를 대체할 수 있을 뿐 아니라 새로운 형태의 조명시장을 창출할 수 있다. 또한, 교토의정서, RoHS, WEEE 등 환경규제가 시행되는 2010년경을 기준으로 해서 친환경조명인 OLED가 형광등 조명시장을 잠식하며 성장할 것으로 예상된다 (그림 1).

백색유기발광소자 (WOLED)는 1995년 Yamagata 대학의 Kido 교수팀이 적색, 녹색, 청색 발광 특성을 갖는 발광층을 적층하여 백색 발광 특성을 보

표 1. 여러 조명용 광원 특성 비교 (출처 : IDTechEx).

	Bulbs	Tubes	LEDs	OLEDs
Full color	—	×	○	○
Flexibility	×	×	×	○
Environment friendliness	×	×	—	○
Large area	×	×	×	○
Power (W)	60	20	5.4	< 4
Operating voltage (V)	High	High	4	< 2.5
Switching speed	Slow	Slow	Fast	Fast
Lifetime (Kh)	1	10	100	20
Cost (\$/Klm)	0.6	0.73	150	100

고한 이래로 고효율, 장수명 특성을 가지며 색순도가 우수한 소재 및 소자 개발을 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다 [3-13]. WOLED는 앞서 설명한 바와 같이 대면적 고품질의 OLED 디스플레이로의 응용성뿐만 아니라 LCD 백라이트와 일반조명 등의 다양한 응용 가능성으로 인하여 국내·외 연구자들에 의하여 본격적인 연구가 이루어지고 있다 (그림 2). 특히, WOLED를 일반조명으로 활용하고자 하는 연구는 선진국을 중심으로 활발하게 이루어지고 있다. 일반조명으로 가장 많이 사용되고 있는 백열등의 효율이 12~17 lm/W이나, 현재 Konica Minolta社에서 보고되고 있는 WOLED 효율은 64 lm/W로 보고되기도 하였다. 이와 같은 추세라면 2025년에는 고체

상태 광원을 이용한 조명이 일반적으로 사용되어 조명의 사용에 의한 에너지 소비의 약 29%가 감소될 수 있을 것으로 기대된다.

미국, 유럽, 일본에서는 이러한 WOLED의 가능성을 일찍부터 인식하여 GE, Philips, Osram, Simens 등의 조명업체는 OLED를 차세대 조명으로 선정하여 연구개발 투자를 진행하고 있으며 최근에는 50 lm/W 이상의 우수한 특성을 나타내는 시제품을 발표하고 있다. 또한 이들 국가에서는 정부차원에서 각각 Solid State Lighting, OLLA, NEDO 프로젝트가 수행되고 있다. 국내는 산자부에서 'OLED 기술을 이용한 조명용 면광원 기술개발' 프로젝트를 통하여 연구가 수행되고 있다.

본 글에서는 백색광의 개요와 백색유기발광소자의 기술동향과 응용에 대하여 살펴보고자 한다.

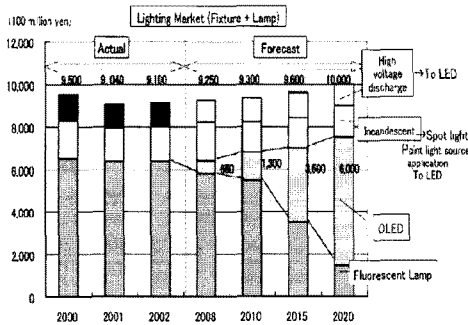


그림 1. OLED 조명 시장 전망 (출처 : Tokki, Fine-tech Japan 2005 Seminar).

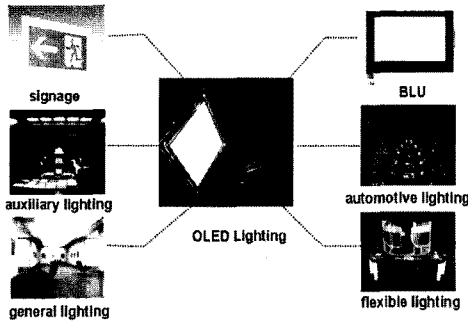


그림 2. 백색 OLED 조명의 응용제품.

2. 국·내외 기술개발 동향

2.1 국외기술개발 동향

조명을 위한 WOLED 시제품이 GE, Philips, OSRAM, Simens, NEC, 마츠시타 등의 조명 회사를 중심으로 발표되고 있다. 미국은 1999년부터 Department of Energy (DOE) (표 2)의 지원으로 미국 전체 에너지의 20%를 소비하고 있는 조명용 에너지 절약을 위해 진공 조명을 고체조명으로 대체하

표 2. DOE와 OLLA 프로젝트 Roadmap 비교.

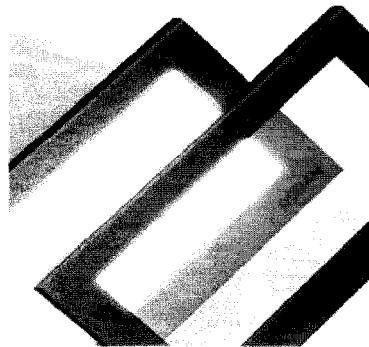
subject	Impact / Focus	Goals / Milestones							
		DOE 2002	OLLA 2004	DOE 2007	OLLA 2007	DOE 2012	OLLA 2010	DOE 2017	OLLA 2018
Lifetime, (hrs)	Degradation processes understood / controlled	100	10,000	6,000	20,000	10,000	40,000	20,000	60,000
Color rendering index (CRI)	Quality of light approaching / exceeding lightbulbs	85	78	85	80	98	85	98	90
Power efficiency (lm/W)	Competition with existing sources	5	20	50	50	100	80	> 100	120
Operational voltage, (V)	Large area illumination	12		6		4		<4	
Fabrication costs (\$/sq m)	Replacement of fluorescent lamps	120		60		40		30	

기 위한 Next Generation Lighting 프로젝트가 수행되고 있으며 이중 19개의 OLED 프로젝트에 전체 연구비의 55%인 33.8억불이 투입되고 있다.

GE는 청색 발광으로부터 컬러 변환층 (Color Conversion Medium : CCM)을 이용하여 백색을 도출해내는 Down Conversion 방법으로 대면적의 조명 프로토타입을 발표하였다. 청색의 빛과 양자효율 98%의 페릴렌 염료 (Perylene Dye) 및 양자효율 약 85%의 Y(Gd)AG:Ce 형광체를 이용하였다. 색좌표 0.36/0.36의 백색 OLED는 61 × 61 cm² 면적에서 발광하며 1000 cd/m² 밝기에서 15 lm/W 이상의 발광효율을 지니고 있다. 최근에는 세계 최초로 Roll-to-roll 제조 공정을 이용한 OLED 조명 생산에 성공했다고 밝혔다. OLED 조명 상품화가 실현되기 위해 요구되는 저비용 OLED 조명 소자의 개발을 가능케한 계기를 제공하였다. UDC 역시 미국 DOE의 지원을 받아 백열등과 형광등을 대체할 조명용 WOLED의 연구개발을 진행하고 있으며 2007년에는 R, G, B 인광물질을 이용하여 다층 인광물질 발광층으로 구성된 고효율의 WOLED를 발표하였다. 색좌표 0.38/0.39, 1000 cd/m² 밝기에서 60 lm/W (Out-coupling 포함)의 발광효율과 20,000 시간의 수명을 가지는 소자를 제작하였다.

유럽의 경우 여러 조명 업체가 컨소시엄을 이루어 진행 중인 OLLA (Organic LED for Light Application) 프로젝트를 기반으로 조명용 백색 유기전기발광소자의 상업화에 전력을 기울이고 있다. Philips, Axitonix, IMN, Merck, IPMS, Novalded, Osram, Imec 등의 조명, 장비, 및 소재 관련 업체들이 컨소시엄을 이룬 OLLA 프로젝트는 백색 유기전기발광소자를 광원으로 사용하기 위해 각기 특정 분야에 역량을 가지고 있는 업체들이 공동으로 백색 발광용 유기 재료, 백색광을 위한 소자 구조, 대면적 저가 공정용 장비 연구를 수행하고 있고 현재 우수한 연구결과를 보이고 있다. Novalded는 PIN OLED를 이용하여 청색 형광 발광물질과 적색/녹색 인광 발광물질을 적층시켜 백색을 구현하였다. 1000 cd/m² 밝기에서 3.29 V의 구동전압과 35 lm/W의 발광효율을 나타내었으며, 색좌표 0.43/0.44, CRI 90 그리고 100,000 시간의 수명을 나타내었다. 또한,

Novalded는 Philips와 공동으로 최근 PIN 기술을 이용하여 5 × 5 cm² 면적에서 32 lm/W의 높은 효율과 색좌표 0.47/0.45을 보였으며, 1000 cd/m² 밝기에서 CRI 88과 20,000시간의 수명을 나타내었다. Osram은 1000 cd/m² 밝기에서 20 lm/W 이상의 발광효율을 지니고 있는 투명한 백색 OLED를 발표하였다 (그림 3). 색좌표 0.396/0.404의 백색 OLED는 90 cm²에 가까운 면적에서 발광하며 현재의 투명도는 55%이나 앞으로 제품이 더 개발됨에 따라 75%까지 상승될 것으로 기대되고 있다. 또한, Osram은 46 lm/W의 효율과 5,000 시간의 수명, 1000 cd/m²의 밝기를 지닌 백색 OLED를 개발하였다. 이번에 개발



(a)



(b)

그림 3. Osram (a) 투명 백색 OLED (b) 100 cm² 크기의 백색 OLED.

된 100 cm² 크기의 백색 OLED는 색좌표 0.46/0.42, CRI 80인 조명이다.

일본은 2003년부터 NEDO (신에너지종합개발기구) 프로그램 중 하나로 OLED를 육성하고 있다. Yamagata 대학과 IMES사가 공동으로 조명용 고휘도 백색 OLED를 MPE (Multi-Photon Emission) 방식의 OLED 소자를 이용하여 R, G, B 소자를 적층시키는 방식으로 (0.32, 0.34)의 색좌표를 갖는 소자 적층 방식의 백색 OLED 소자를 발표하였으며, 28 × 28 cm², 6 × 8 cm² 면조명을 시연하였다. Konica-Minolta社와 UDC社가 공동으로 여러 층에서 발광이 일어나는 다층발광 방식의 64 lm/W의 고효율 백색 OLED 발표하였으며 1000 cd/m² 밝기에서 10,000시간의 수명을 나타내었다. 그 외 일본에서는 Idemitsu Kosan, SONY 등에서 조명을 위한 소재 및 소자를 개발 중이다 (그림 4).

2.2 국내 기술개발 동향

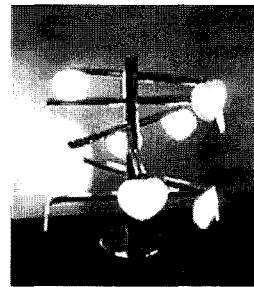
한국에서는 “OLED 기술을 이용한 조명용 면광원 기술개발”이 2006년 차세대신기술개발사업 지원 대상 과제로 선정되어 2013년까지 정부지원금 136억, 민간 67억 등 203억 원을 투입해 OLED 조명 연구가 진행되고 있다. 이번 연구에는 금호전기, 삼성 SDI 등 8개 기업과 한국생산기술연구원 등 4개 연구기관, 조선대 등 3개 대학이 참여하고 1000 nit에서

표 3. OLED 기술을 이용한 면발광 조명개발사업 Roadmap.

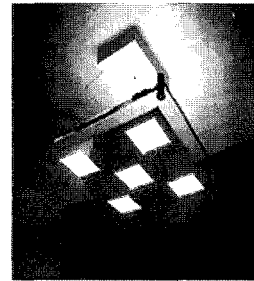
Product Roadmap	Key technology	Schedule		Signage		General Lighting		
		Schedule		Signage		General Lighting		
		1 st step	2 nd step	2 nd step	3 rd step	2 nd step	3 rd step	
sub project		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1	Low voltage driving	< 5 V @ 1000 nit		< 3 V @ 1000 nit				
2	High efficiency white source	50 lm/W 70 CRI		80 lm/W			< 2.5 V @ 1000 nit, @ 100 lm/W	
3	Ultra-slim encap. Tech.	8,000 h < 1.2 mm		10,000 h < 1.0 mm			20,000 h < 0.8 mm	
	Out-coupling efficiency enhancement	> × 1.8 @ 1000 nit		> × 1.8 @ 1000 nit				
4	Organic material & process tech. for wet process	monochromatic 30 lm/W		monochromatic 40 lm/W			monochromatic 50 lm/W	



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. Lighting Fair 2007에 전시된 일본 회사 OLED 조명 (a) Matsushita OLED 조명 어레이, (b) IMES 하트모양 OLED 조명, (c) NEC 조명, (d) IMES 고휘도 OLED 조명.

구동전압 2.5 V 이하, 효율 100 lm/W, 수명 20,000 hr (표 3)을 목표로 진행 중에 있다.

자체 발광형, 저 소비전력, 넓은 구동온도, 디자인 자유도 등의 OLED 특성을 이용한 면발광 조명기구 개발을 목표로 필수적인 요소 기술 (그림 5)을 4개의 세부 과제로 나누어 각 세부 주관기관별로 수행하고 있다.

우선, OLED소자의 구동전압을 낮추기 위해 전극, 유기소재, 계면 기술, PIN 소자구조들에 대한 연구가 진행 중에 있다. 조선대학교의 신동찬 교수 연구팀은 양극으로 사용되는 산화물투명전극의 일함수를 조절하는 기술을 개발하였다. ZnO나 ITO 등의 투명전극의 상부에 금속이온을 도핑하여 일함수를 조절할 수 있음을 보였다. 이러한 방법은 투명전극의 표면 50 nm 정도에만 금속이온을 형성하기 때문에 투과도의 손실을 줄이면서도 우수한 저항특성을 가질 수 있다. 그림 6은 ZnO 투명전극에 P와 B 이온을 주입하여 일함수가 변화하는 결과를 보여주고 있다. 동시에 한국생산기술연구원 (KITECH) 나노전자소자팀은 대면적 OLED패널 (150 mm × 150 mm)에서 발생하는 IR Drop (불균일한 발광)을 최소화하기 위해서 TCO에 Metal 이층배선을 패터닝하여 소자를 제작하는 기술 (그림 7)을 개발하고 있다. 이를 통해 현재 27% IR Drop이 발생한다고 보고되고 있으며 향후 15%이하로 낮출 수 있을 것으로 전망된다.

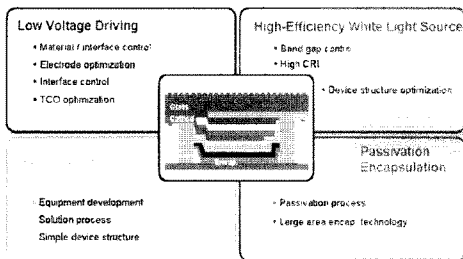


그림 5. OLED 소자구조 및 요소기술.

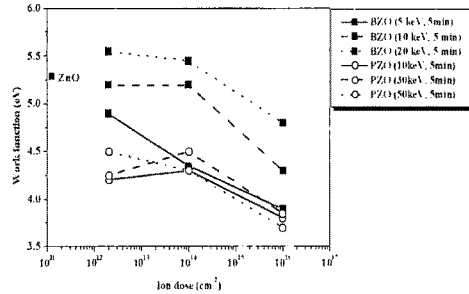
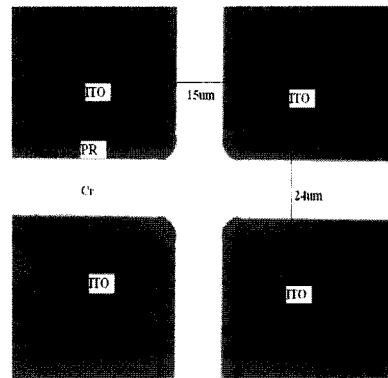
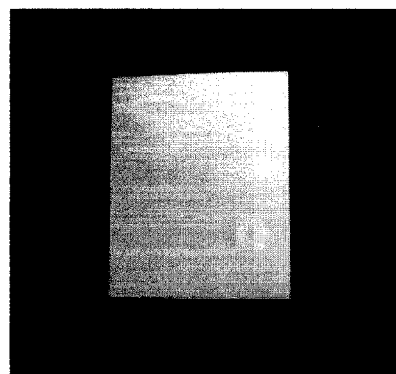


그림 6. 이온 주입에 의한 일함수의 특성 (조선대).



(a)



(b)

그림 7. 한국생산기술연구원에서 개발 중인 (a) IR Drop 최소화를 위한 보조배선 구조, (b) 150 mm × 150 mm 형광 OLED 발광 사진.

고효율 백색 OLED 소자 기술 개발은 다층 유기 박막의 구조 개발 및 최적화, 다층 유기박막의 구조에 있어서 단일 적층 (Single Stack), 다층 적층 (Multi Stack or Tandem), CCM (Color Conversion Medium) 방식 연구, 청색 형광 OLED와 녹/적색 인광 OLED를 결합시킨 하이브리드 백색 OLED를 개발, 청록색 인광 OLED와 주황색 인광 OLED가 결합된 두 파장 백색 OLED 개발 등을 통해 추진 중이다. 전자통신연구원 (ETRI) 투명전자소자팀은 최근 미국 San Francisco에서 열린 2008 MRS Spring Meeting에서 청색 및 오렌지색 인광 소재를 이용하여 고효율 백색 OLED 소자 특성을 보고하였다. ETRI는 OLED의 효율을 높이기 위해, 전하 수송을 원활히 하면서 또한 전하/엑시톤 속박 기능을 가지는 중간층들을 발광층과 정공수송층 (또는 전자수송층) 사이 계면에 도입하였고, 이를 통해 외광효율 향상법 없이 100 cd/m²에서 색좌표 (0.40, 0.45), 외부양자효율 21%, 전력 효율 43 lm/W에 이르는 특성 (그림 8)을 보고하였다.

전자부품연구원 (KETI)은 WOLED 봉지용 유·무기막 개발 및 성막공정 개발, 고신뢰성 Hybrid Type 봉지기술개발, 유무기 복합 Passivation Layer와 Glass 부착기술개발, 박막 Getter 재료 개발 및 코팅 기술 개발, 내충격성을 고려한 봉지 구조 등 소자 수명향상을 위한 봉지 기술을 개발하고 있다. 두께 1.1 mm의 초슬림 봉지 기술을 개발하여 Ca를 이용

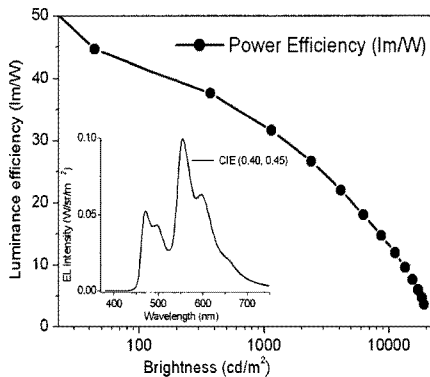
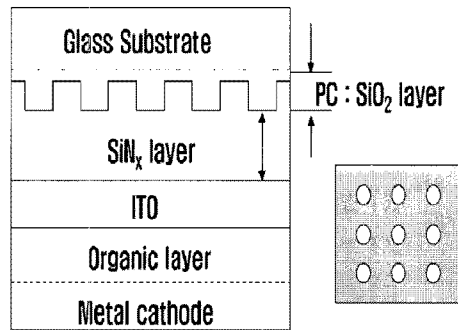


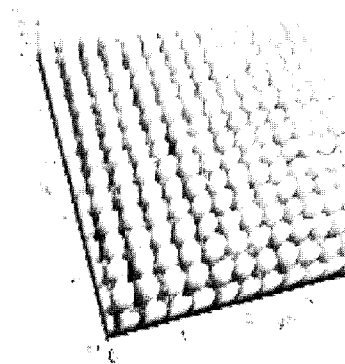
그림 8. 전자통신연구원의 고효율 백색 OLED 소자 특성.

하여 Passivation 막의 투습율을 평가하였으며 봉지 후 Dark Spot이 발생하지 않음을 선보였다.

한국광기술원 (KOPTI)은 외광 효율을 향상하기 위해 2D 광자결정 (Photonic Crystal) 구조, 레이저 홀로그래프 리소그래피를 이용한 광자결정, 마이크로 캐비티 및 렌즈어레이 결합형 발광 소자 등을 연구하고 있다. 나노임프린팅 방법을 적용하여 OLED용 유리 기판에 나노 Scale 광결정 (Photonic Crystal) 패턴을 형성하여 외광효율 1.6배 향상을 보고 하였다. 최근 국내의 NND장비를 활용하여 UV-경화방식으로 광효율에 향상에 필요한 패턴을 형성하는 공정을 확립하였다. 그림 9는 형성된 패턴을 보여주는 SEM



(a)



(b)

그림 9. 한국광기술원에서 개발중인 외광효율향상을 위한 2D Photonic Crystal 구조.

사진으로 Lattice Const. 간격은 600 nm, Diameter: 200 nm, Depth 400 nm 이다. 또한 미래 저가형 용액 공정 기반의 OLED 소자를 제작하여 단색에서 28.8 lm/W와 CRI: 64.5를 보고하고 있다.

이외에도 전략기술개발사업을 통해 청색 인광재료와 용액공정기반 OLED 공정 기술이 개발 중에 있다. 차세대성장동력사업을 통해서도 주로 유기소재 개발이 진행 중이고 부품소재개발사업에서는 주로 백색 유기소재 개발이 진행되고 있다. 이러한 정부 프로젝트를 통하여 개발된 핵심 기반기술을 특허화하고 국내 조명 관련 기업에 이전함으로써 중요 조명 관련 업체를 활성화하고 국내 취약 시장인 부품소재산업의 활성화를 도모할 수 있을 뿐만 아니라 미래 전자 공학의 핵심인 유기전자 소자 분야 기반 기술 확보가 기대된다.

3. 향후 전망 및 결론

21세기 들어서 환경과 에너지는 국가의 생존과 직결되는 문제로 인식되고 있다. OLED 조명은 친환경 소자이면서도 에너지 절약에서 탁월한 효과를 거둘 수 있다. 이러한 특징으로 선진국들은 이미 1990년대부터 OLED조명을 국가의 전략 R&D로 정하고 많은 투자를 하고 있다. 국내는 선진국보다는 10년 정도 늦게 관련 연구개발이 시작이 되었다. 그러나 국내의 디스플레이 관련 기술의 발전과 관련 전후방 산업인프라 구축으로 한국의 OLED 조명에서도 단기간에 성장할 가능성을 가지고 있다. OLED 조명산업이 국가의 새로운 성장동력산업이 될 수 있도록 연구자들의 많은 관심, 정부의 적극적인 지원, 기업의 참여가 절실하게 요구되고 있다.

참고 문헌

[1] J. Shinar, "Organic Light-Emitting Devices : A Survey," AIP press, 2004.
 [2] J. Kalinowski, "Organic Light-Emitting Diodes: Principles, Characteristics, and Processes," Marcel

Dekker, New York, 2005.

[3] Y. Sun, N. Giebink, H. Kanno, B. Wa, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, "Management of singlet and triplet excitons for efficient white organic light-emitting devices," *Nature (London)*, vol. 440, pp. 908-912, Apr. 2006.
 [4] G. Cheng, F. Li, Y. Duan, J. Feng, S. Liu, S. Qiu, D. Lin, Y. Ma, and S. T. Lee, "White organic light-emitting devices using a phosphorescent sensitizer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, pp. 4224-4226, June 2003.
 [5] H. Kanno, N. C. Giebink, Y. Sun, and S. R. Forrest, "Stacked white organic light-emitting devices based on a combination of fluorescent and phosphorescent emitters," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 023503-1-3, July 2006.
 [6] G. Cheng, Y. Zhang, Y. Zhao, S. Liu, and Y. Ma, "Improved efficiency for white organic light-emitting devices based on phosphor sensitized fluorescence," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, pp. 083512-1-3, Feb. 2006.
 [7] H. Kanno, Y. Sun, and S. R. Forrest, "White organic light-emitting device based on a compound fluorescent-phosphor-sensitized-fluorescent emission layer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 143516-1-3, Oct. 2006.
 [8] G. Schwartz, K. Fehse, M. Pfeiffer, K. Walzer, and K. Leo, "Highly efficient white organic light emitting diodes comprising an interlayer to separate fluorescent and phosphorescent regions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 083509-1-3, Aug. 2006.
 [9] G. Li and J. Shinar, "Combinatorial fabrication and studies of bright white organic light-emitting devices based on emission from rubrene-doped 4,4'-bis(2,2'-diphenylvinyl)-1,1'-biphenyl," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, pp. 5359-5361, Dec. 2003.
 [10] K. O. Cheon and J. Shinar, "Bright white small molecular organic light-emitting devices based on a red-emitting guest-host layer and blue-emitting 4,4'-bis(2,2'-diphenylvinyl)-1,1'-biphenyl," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 1738-1740, Aug. 2002.
 [11] R. S. Deshpande, V. Bulovi, and S. R. Forrest, "White-light-emitting organic electroluminescent devices based on interlayer sequential energy transfer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, pp. 888-890, Aug. 1999.

- [12] S.-H. Yang, M.-H. Liu, and Y.-K. Su, "Stable and highly bright white organic light-emitting diode based on 4,4', 4-tris(N-3-methylphenyl-N-phenyl-amino)-triphenylamine," *J. Appl. Phys.*, vol. 100, pp. 083111-1-4, Oct. 2006.
- [13] H. Choukri, A. Fischer, S. Forget, S. Chnais, M.-C. Castex, D. Ads, A. Siove, and B. Geffroy, "White organic light-emitting diodes with fine chromaticity tuning via ultrathin layer position shifting," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 183513-1-3, Nov. 2006.

저자약력



성명 : 박종운

◆ 학력

- 1999년
경희대 전자공학과 공학사
- 2001년
Univ. of Victoria 전자공학과
공학석사
- 2005년
McMaster Univ. 전자공학과
공학박사

◆ 경력

- 2007년 - 현재 KITECH 나노전자소자팀
선임연구원
- 2005년 - 2007년 Kyoto Univ. 연구원



성명 : 신동찬

◆ 학력

- 1991년
고려대 재료공학과 공학사
- 1993년
KAIST 재료공학과 공학석사
- 1997년
KAIST 재료공학과 공학박사

◆ 경력

- 1997년 - 2000년 KAIST-Michigan
Technological Univ. 연구원
- 2000년 - 2002년 Samsung SDI 선임연구원
- 2002년 - 현재 조선대 신소재공학과 조교수

