

용액 공정 백색 유기발광 재료

이재민

1. 서론

Eastman Kodak의 Tang과 VanSlyke가 1987년에 최초로 진공 증착형 유기발광다이오드(Organic Light-Emitting Diode; OLED)를 발표한지¹ 21년이 지난 오늘날, OLED는 LCD(Liquid Crystal Display)가 주도해 온 평판디스플레이(Flat Panel Display; FPD) 산업 분야에서 LCD를 넘어설 새로운 대안으로 큰 주목을 받고 있다. 또한 1990년에는 Cavendish Lab.의 Burroughes 등이 공액 고분자(conjugated polymer)를 이용한 고분자발광다이오드(Polymer Light-Emitting Diode; PLED)를 처음으로 선보임으로써, 진공 증착이 아닌 용액 공정을 통해서도 이러한 OLED를 만들 수 있는 새로운 가능성을 열었다.² 이에 더하여 한 가지 더 주목할 만한 성과로서, 1994년 야마가타 대학의 Kido 그룹에서는 OLED를 이용하여 가시광선 전 영역을 아우르는 백색광을 구현할 수 있음을 보고하였다(그림 1).³

OLED는 기본적으로 두 전극(양극과 음극) 사이에 빛을 낼 수 있는 유기물이 박막(~100 nm) 형태로 끼여있는 구조로 이루어지며, 이 유기막을 어떤 방식으로 형성하는가에 따라 크게 진공 증착형 또는 용액 공정형으로 구분이 된다. OLED는 소자 구조 자체적인 특징으로 인해 매우 얇고 가벼운 화면의 구현이 가능하고, 자체 발광을 하기 때문에 응답 속도가 빠르며, 특히 두루마리와 같은 플렉서블(flexible) 소자 및 인쇄 공정을 통한 저가격 대량 생산에 적합하다는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 정교한 유기/고분자 합성을 통해 OLED 소자 특성 향상에 필요한 신물질의 개발이 지속적으로 이루어지고 있다는 점도 이 분야의 빼놓지 말아야 할 장점이다. 이에 따라 최근에는 휴대폰 내/외장, mp3 플레이어 및 PMP 플레이어의 디스플레이 등 고성능의 소형 디스플레이를 중심으로 OLED의 채용이 늘고 있으며, 지난해에는 한정된 수량이지만 SONY에서 11인치 크기의 OLED TV 제품도 시장에 선을 보였다. 하지만 여전히 소자의 대형화, 장수명화 등에서 OLED가 헤쳐나가야 할 난관이 많이 남아있으며, 이는 소자 구조 및 제조 공정 등에서의 개선과 함께, 특히 요구되는 특성을 만족시키기 위한 새로운 재료의 개발이 매우 필요하다고 할 수 있다.

초기 OLED의 연구/개발 과정에서는 주로 빛의 삼원색인 적, 녹, 청의 단일 파장대 발광 특성이 우수한 소재 및 소자의 개발에 주력해 왔으며, 이를 각각 미세 패터닝함으로써 풀칼라 디스플레이에 적용하는

방식이 보편적이었다. 물론 이러한 방식이 현재까지도 유효하기는 하지만, 대면적 OLED의 제작에 있어서 백색유기발광다이오드(White OLED; WOLED)와 칼라필터를 이용하여 풀칼라 디스플레이를 구현하려는 노력도 기존 방식의 대안으로 진행되고 있다(그림 2). 그리고, LCD 역시 고화질, 경량화, 박형화 등 경쟁력 향상을 위한 노력의 일환으로, 기존의 Back-Light Unit(BLU)을 새로운 백색 면광원으로 대체하기 위한 연구/개발이 적극적으로 진행되고 있다. 이와 같은 디스플레이에서의 백색 광원에 대한 필요성에 더하여, 21세기 들어 심각하게 대두되고 있는 에너지 절감 및 환경 보전의 이슈에 대응하기 위한 조명(lighting) 분야의 노력 또한 새로운 고효율 무공해 조명 장치의 개발에 집중되고 있는 것이 현실이다.

이에 본 총설에서는 최근 들어 디스플레이 및 조명 등 다양한 분야의 응용이 기대되는 WOLED의 연구/개발 현황에 대해 간략히 알아보고, 특히 그 중에서도 소자의 대형화 및 저가격화에 장점이 있는 용액 공정 WOLED 및 관련 소재 기술에 대해 정리해보도록 하겠다.

2. WOLED의 연구/개발 현황

WOLED의 응용 분야는 크게 디스플레이와 조명의 두 분야로 나누어 볼 수 있는데, 같은 백색광이라도 디스플레이나 또는 조명이나의 응용 분야에 따라 고려해야 할 점이 달라진다. 예를 들어 디스플레이로의 응용을 위해서는 WOLED의 발광 스펙트럼이 빛의 삼원색인 적, 녹, 청 세 파장의 피크를 각각 포함하고 있는 것이 유리한 반면, 조명



이재민

1999 KAIST 화학과(학사)
 2001 KAIST 화학과(석사)
 2005 KAIST 화학과(박사)
 2005~ LG화학 기술연구원 선임연구원
 2007 한국화학연구원 소재재료연구센터 선임연구원
 현재

Solution Processable White Organic Light-Emitting Materials

한국화학연구원(KRICT) 소재재료연구센터(Jaemin Lee, Device Materials Research Center, Advanced Materials Division, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT), P.O Box 107, Sinseongno 19, Yuseong-gu, Daejeon 305-600, Korea) e-mail : jminlee@kRICT.re.kr

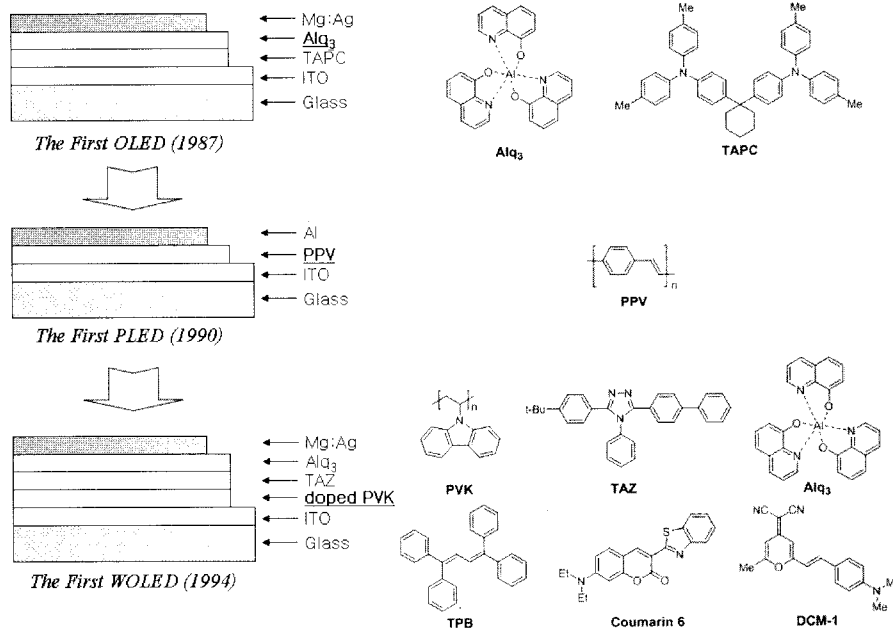


그림 1. 초기 OLED 연구에서의 주목할 만한 성과.



그림 2. 2005년 삼성전자가 WOLED와 칼라필터를 이용해 구현한 당시 세계 최대 크기의 OLED.

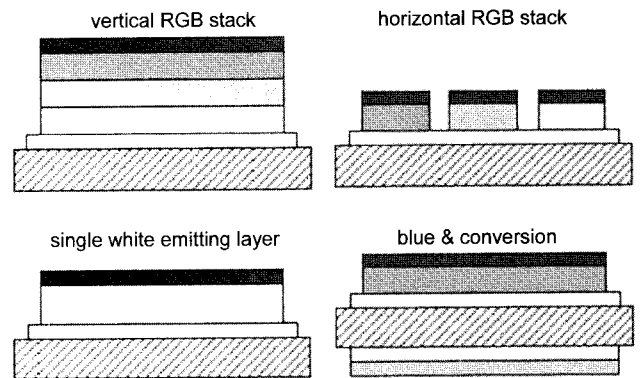


그림 3. OLED의 백색 발광 방법.

용 WOLED는 가능한 한 가시광선 영역의 넓은 범위를 포함함으로써 자연광에 가까운 백색을 나타내는 것이 중요하다. 또한 일반적으로 디스플레이에 비해서 조명의 경우 사용하는 밝기가 더 밝고 사용 시간이 더 길기 때문에, 조명의 경우 더 높은 수준의 소자 효율 및 수명이 요구된다.

이에 따라 OLED에서 백색광을 구현하기 위한 다양한 기술적 시도들이 보고되었고, i) 가장 널리 쓰이는 방법으로 삼원색 또는 보색이 각각 발광하면서 이를 수직으로 조합하는 수직 적층, ii) 이와 유사하나 수직 방향 대신 수평 방향으로 각 색을 배열한 후 이들을 조합하는 수평 배열, iii) 하나의 발광층에서 전체적으로 백색광을 발광하는 단일층 발광, iv) 청색 발광과 형광체에 의해 변환된 장파장 빛의 조합을 이용하는 파장 변환 등이 대표적인 WOLED 구현 방법이다(그림 3). 또한, 발광층을 형성하는 방법에 따라 진공 증착형과 용액 공정형으로 나눌 수도 있다. 진공 증착형의 경우 주로 수직 적층 방식이 많이 쓰이며, 용액 공정형의 경우 주로 단일층 발광 방식이 많이 쓰이고 있다. 최근 언론 보도에 따르면 영국의 MicroEmissive Displays(MED)에서 제조한 초소형 디스플레이가 Vuzix AV230 XL이라는 비디오 헤드셋에 적용이 되었다고 하는데, MED는 Sumation의 백색 발광 고

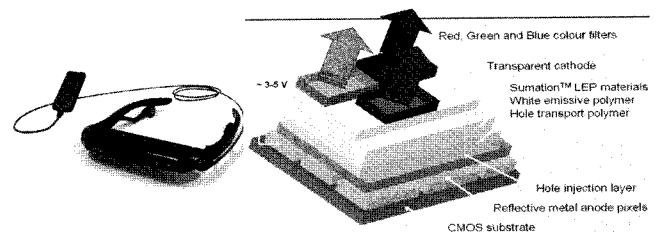


그림 4. Vuzix AV230XL 제품 이미지 (좌) 및 MED의 디스플레이 구조 (우).

분자와 칼라필터를 이용해 용액공정으로 초소형 디스플레이를 구현하는 것으로 알려져 있다(그림 4).⁴ 이는 비록 작은 규모일지라도 공액 고분자에 기반한 WOLED가 디스플레이 분야에 적용되기 시작했다는 점에서 WOLED 분야 전체에 큰 의미를 부여한다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 올 상반기에 Universal Display Corporation(UDC)에서는 자사의 인광(phosphorescence) 소재 기술을 이용하여 사상 최초로 100 lm/W의 효율을 넘어선 WOLED를 발표함으로써 WOLED가 조명 분야에서도 충분한 경쟁력이 있음을 보여주었다.

이미 세계 각국에서는 이러한 WOLED 관련 연구/개발에 많은 투

자가 이루어 지고 있는데, 특히 유럽의 경우, 2004년부터 시작된 OLLA 프로젝트를 통해 차세대 조명용 WOLED 연구를 선도해왔으며,⁵ OLLA 프로젝트의 종료와 함께 올해 9월부터 새로 시작된 OLED100.eu 프로젝트는 WOLED의 고효율(100 lm/W), 장수명(> 100,000 h), 대면적(100 cm×100 cm), 저가격화(100 €/m²)에 본격적으로 도전하고 있다.⁶ 또 다른 프로젝트인 CombOLED는 대면적의 투명한 저가 조명을 목표로 올해 1월부터 시작되었고,⁷ 몰두를 공정을 통한 대면적 발광 고분자 조명 호일(foil)의 구현을 위한 Fast2Light 역시 올해 2월부터 진행되고 있다.⁸ 영국 정부도 2007년부터 Project TOPLESS를 통해 고성능 백색 발광 고분자의 개발 및 대면적 단일 픽셀 소자의 구현을 위한 연구에 지원을 하고 있다. 미국 역시 DOE (Department of Energy)의 주도로 신개념 고체 광원 연구에 많은 투자를 하고 있으며 WOLED와 관련해서는 대표적으로 UDC가 프로젝트를 수행 중에 있다. 국내에서도 WOLED를 이용한 조명 연구가 일부 진행되고 있으나 아직 초기 단계로 발광 소재 개발과 같은 원천 기술에 대한 연구/개발이 절실한 상황이다.

표 1에 최근에 발표된 대표적인 WOLED의 성능을 정리하였고,⁵ 그림 5에 UDC에서 발표한 WOLED의 효율 발전 추이를 나타내 보았다.⁹ 표와 그림에 보고된 성능은 모두 진공 증착형 소자의 결과로, 단시일 내에는 진공 증착형 WOLED가 우선 제품화되었지만, 향후 계속되는 연구/개발을 통해 용액 공정형 WOLED 역시 공정성, 저가격, 대형화 등의 장점을 내세워 그 뒤를 이을 것으로 기대된다. 이어지는 본 총설에서는 용액 공정형 WOLED에 대해 조금 더 자세히 알아보도록 한다.

표 1. 최근 발표된 대표적 WOLED의 성능

기관	연도	효율 (@ 1,000 cd/m ²)	수명 (@ 1,000 cd/m ²)	발광 타입 적, 녹, 청
Novaled/Philips	2006	32 lm/W	20,000 h	P, P, F
Konica-Minolta	2006	64 lm/W	10,000 h	P, P, P
The OLLA-Project	2007	25 lm/W	5,000 h	P, P, F
Idemitsu Kosan	2007	17 lm/W (@ 10 mA/cm ²)	30,000 h	F, F, F
Osram	2008	46 lm/W	5,000 h	P, P, F
Novaled	2008	35 lm/W	100,000 h	P, P, F
The OLLA-Project Philips/Novaled	2008	51 lm/W (80 lm/W) [*]	> 10,000 h	P, P, F
UDC	2008	(102 lm/W) [*]	8,000 h	P, P, P

*Measured with macro-extractor.

(P : 인광, F : 형광).

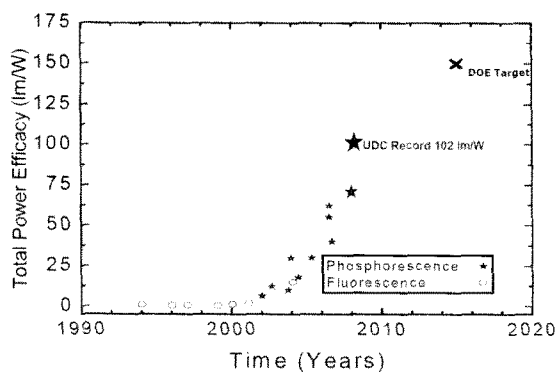


그림 5. WOLED의 효율 발전 추이.

3. 용액 공정을 통한 WOLED 개발

3.1 단일 고분자 백색 발광

최초의 PLED 구동에서 발광층으로 쓰인 PPV((poly(*p*-phenylene vinylene)) 유도체에 이어, 폴리플루오렌(poly(fluorene), PF)은 청색 발광이 가능하고, 다양한 comonomer 도입을 통한 발광 스펙트럼 조절이 용이하다는 점에서 PLED 발광층의 기본 물질로 각광 받게 되었다. 백색 발광의 경우도 마찬가지로, 이러한 PF back-bone을 기본으로 하고 소량의 추가 comonomer를 공중합하는 방식으로 다양한 고분자가 합성되었다. 우선 PF의 청색에 삼원색의 나머자인 녹색과 적색 발광을 하는 구조를 각각 도입해서 3색 발광을 통해 백색을 구현한 몇몇 예를 그림 6에 나타내 보았다.¹⁰⁻¹⁴ 그림에서 각 화학 구조마다 이를 이용한 WOLED 소자의 CIE xy 색좌표 값, 소자 효율, 그리고 사용한 발광 물질의 공중합 비율을 함께 표시하였다.

Triphenylamine을 포함하는 phenylenevinylene oligomer[그림 6(a)]와 naphthalimide[그림 6(b)~(d)], 그리고 fluorene-benzothiadiazole oligomer[그림 6(e)~(f)] 등이 고분자 내에서 녹색 발광을 하게 되고, 적색 dye로 잘 알려진 DCM(4-(dicyanomethylene)-2-methyl-6-[*p*-dimethylamino]styryl)-4*H*-pyran) 유도체[그림 6(a)] 및 thiophene-benzothiadiazole oligomer[그림 6(b)~(f)] 등이 고분자 내에서의 적색 발광을 위해 도입되었다. 또 이와 유사하지만 녹색과 적색을 모두 포함하는 대신, PF의 청색에 청색의 보색인 황색 발광 구조가 도입된 2색 발광 타입의 발광 고분자 구조를 그림 7에 나타내 보았다.¹⁵⁻²⁰ Triphenylamine을 포함하는 naphthalimide 구조[그림 7(a)], triphenylamine-benzothiadiazole oligomer[그림 7(b)~(c)], DCM 유도체[그림 7(d)], quinacridone 유도체[그림 7(e)], phenothiazine계 cyanovinylene 화합물[그림 7(f)] 등이 황색 발광 comonomer로 사용되었다. 그림에 나타난 대부분의 구조에서 triphenylamine이 도입된 것을 알 수 있는데, 이는 색상 조절 뿐만 아니라 triphenylamine을 통해 PF 고분자의 정공 전달 특성을 향상시키기 위한 이유도 있다고 볼 수 있다. 마찬가지로 그림 6(e)에서는 정공뿐만 아니라 전자의 이동에서도 균형을 맞추기 위하여 전자 전달 특성이 우수한 oxadiazole을 고분자에 함께 도입한 것을 알 수 있다. 그리고 그림 6(b)~(d)와 그림 7(a)의 화학 구조를 자세히 살펴 보면, 동일한 구조의 naphthalimide moiety가 사용되었지만, conjugated main-chain에 연결되는냐 또는 non-conjugated side-chain에 연결되는냐에 따라 황색 또는 녹색으로 발광한다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 6(e)와 그림 7(c)에서는 diphenylamine이 아닌 dimethylamine이 치환된 naphthalimide가 도입되었는데, 이는 PF보다 형광 효율이 높은 일종의 청색 dopant로 작용하여, PF 자체를 청색으로 사용하는 것에 비해 WOLED의 효율을 향상시킬 수 있는 것으로 보고되었다.

이상의 PF 공중합 고분자는 모두 형광(fluorescence) 발광체를 공중합 comonomer로 사용하였다는 공통점이 있다. 하지만 형광 재료의 낮은 양자 효율로 인하여 고효율 소자의 구현에 어느 정도 한계가 있기 때문에, 인광(phosphorescence) 발광체를 공중합 comonomer로 도입하여 고분자 WOLED에 적용하는 시도가 최근 들어 보고되고 있다. 그림 8에 최근에 발표된 인광 comonomer를 이용한 백색 발광 고분자의 구조를 나타내었다.²¹⁻²⁴ 모두 iridium complex를 적색 인광 발광체로 사용하고 있으며, 고분자의 side-chain[그림 8(a)~(b)] 또는

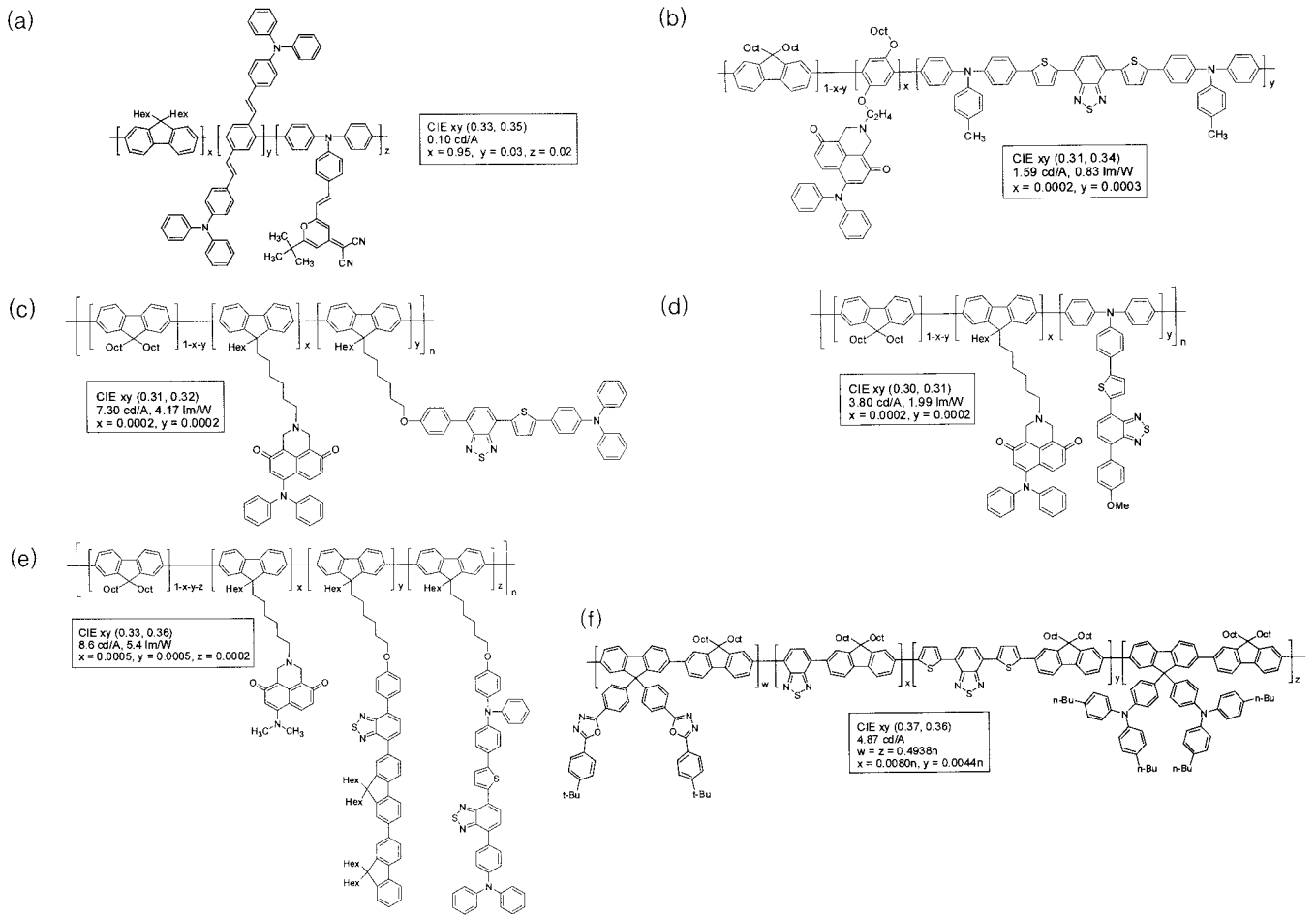


그림 6. 적, 녹, 청 타입의 백색 발광 고분자.

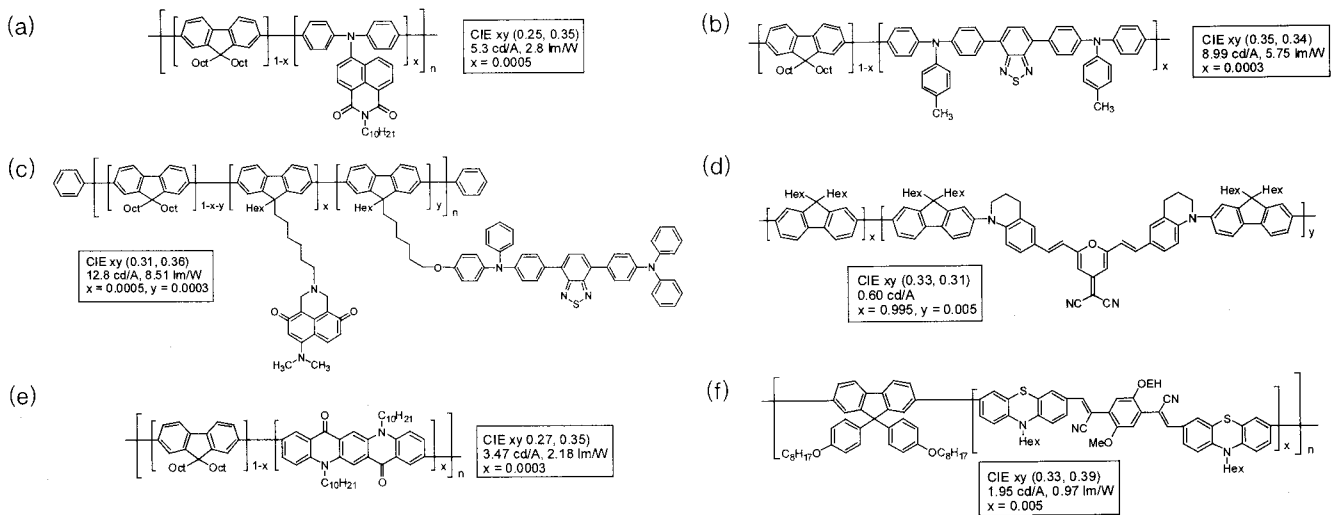


그림 7. 황, 청 타입의 백색 발광 고분자.

main-chain에 iridium complex를 도입하였다[그림 8(c)~(d)]. 한 가지 주목할 만한 것은, 그림 6(f)와 그림 8(b)는 같은 연구 그룹에서 각각 발표한 결과로, 적색 발광체 부분이 thiophene-benzothiadiazole oligomer(형광) 또는 iridium complex(인광)인 점을 제외하고는 그 밖의 monomer들은 모두 동일한 것을 알 수 있다. 두 물질의 소자 특

성을 단순 비교해 보았을 때, 형광의 경우 4.87 cd/A의 최대 효율을 나타낸 것에 비해, 인광의 경우 8.2 cd/A로 거의 두 배 가까운 효율의 증가를 확인할 수 있었는데, 이를 통해 인광 발광체를 도입하는 방법이 백색 발광 고분자의 효율을 향상시키는데 유효한 방법 중 하나라는 점을 알 수 있다.

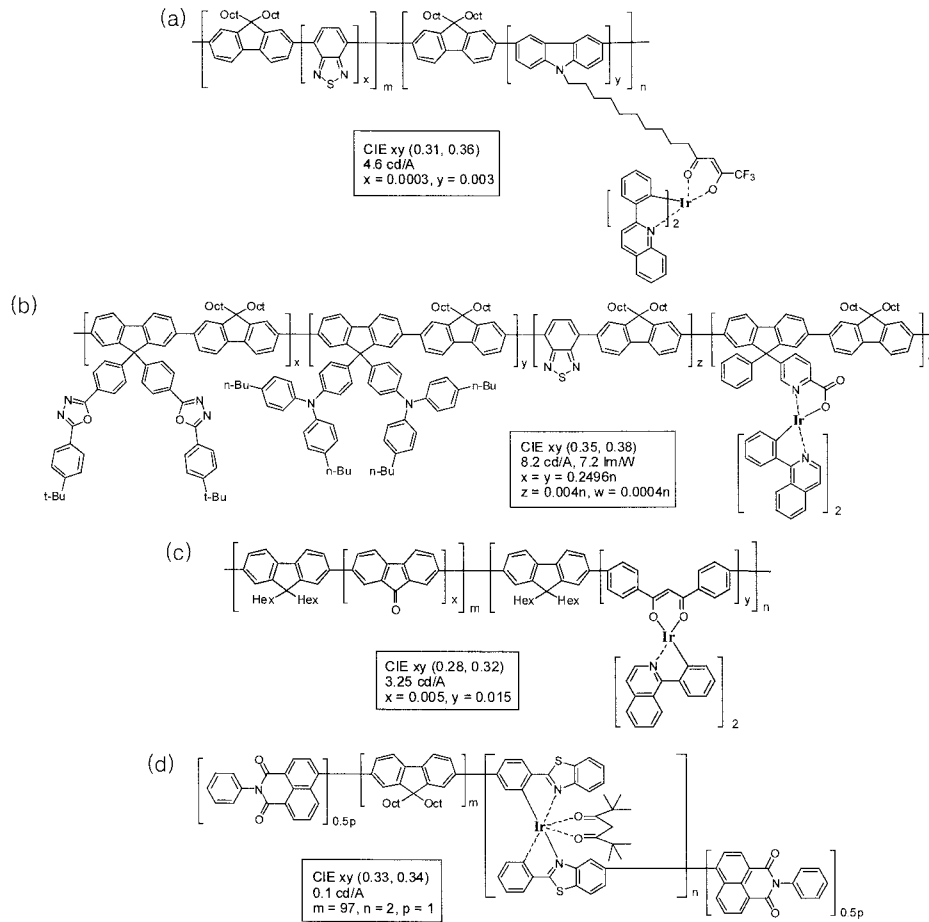


그림 8. 인광 발광체를 포함하는 백색 발광 고분자.

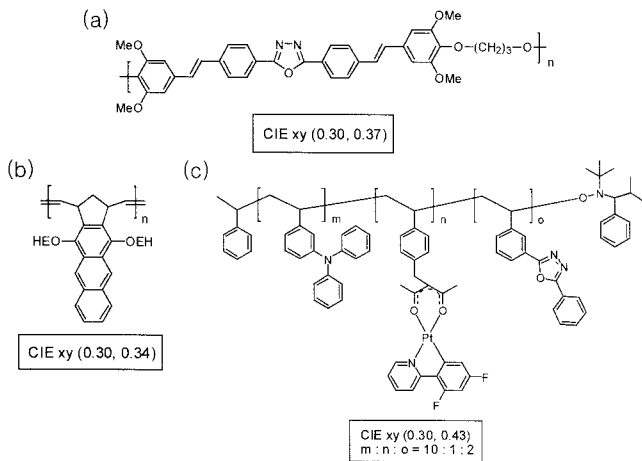


그림 9. Poly(fluorene)계 이외의 백색 발광 고분자.

이 밖에도 PF계 고분자로 대표되는 공액 고분자와는 다른 구조의 일부 고분자에서도 경우에 따라 백색 발광이 가능한 것이 보고된 바 있어 그림 9에 그러한 고분자의 구조를 나타내 보았다.²⁵⁻²⁷

3.2 블렌딩(Blending)에 의한 백색 발광

본 총설의 앞부분에 언급한 최초의 WOLED의 구조를 자세히 보면, 발광층이 하나의 물질이 아니라 정공 수송 고분자인 PVK(poly(*N*-vinyl carbazole))에 적, 녹, 청의 형광 dye들이 섞여 있는 것을 알

수 있다.³ 이렇게 기존에 이미 알려진 dye나 발광 고분자를 서로 조합함으로써 백색 발광층을 구성하려는 시도는 이미 오래 전부터 진행되어 왔다.²⁸ 그림 10에 최근에 보고된 고분자/고분자 블렌딩을 통해 WOLED를 구현한 예를 나타내었다.²⁹⁻³² 그림 10(a) 및 그림 10(d)에서는 각각 benzoselenadiazole 또는 DCM 유도체가 소량 공중합된 고분자(황색)와 benzoselenadiazole 또는 DCM 유도체가 전혀 없는 고분자(청색)의 블렌딩에 의해 2색 발광 WOLED를 구현하였다. 그림 10(b)에서는 그림 10(a)와 거의 유사하지만 benzoselenadiazole 대신에 benzothiadiazole을 사용함으로써 공중합 고분자가 황색이 아닌 녹색을 발광하게 되었고, 이 녹색 공중합 고분자와 적색 발광 Os(fppz), 그리고 원래의 청색 고분자를 함께 블렌딩하여 3색 발광 WOLED를 구현하였다. 그림 10(c)는 청록색 발광 고분자와 적색 발광 고분자의 블렌딩으로 WOLED를 구현할 수 있었다.

이러한 고분자/고분자 블렌딩 뿐만 아니라 최근에는 고효율 인광 dye를 고분자와 블렌딩하여 WOLED를 구현하는 방법이 많은 관심을 끌고 있다. 그 중에서도 특히 고효율 청색 인광 소재로 FIrpic(Bis(4,6-difluorophenyl)pyridinato-N,C2)picolinatoiridium)을 PVK에 블렌딩해서 많이 사용하고 있는데,^{33,34} PVK의 singlet excited state 에너지 준위가 높아 청색 인광 소재의 호스트로서 적당하고, 용액 공정을 통해 필름을 형성하기도 좋기 때문이다. 그림 11에 2002년 Forrest 그룹에서 발표한 PVK/인광 dye 블렌딩 WOLED의 소자 구조 및 물질의 화학 구조를 나타내었다. 이러한 PVK/FIrpic 소자의

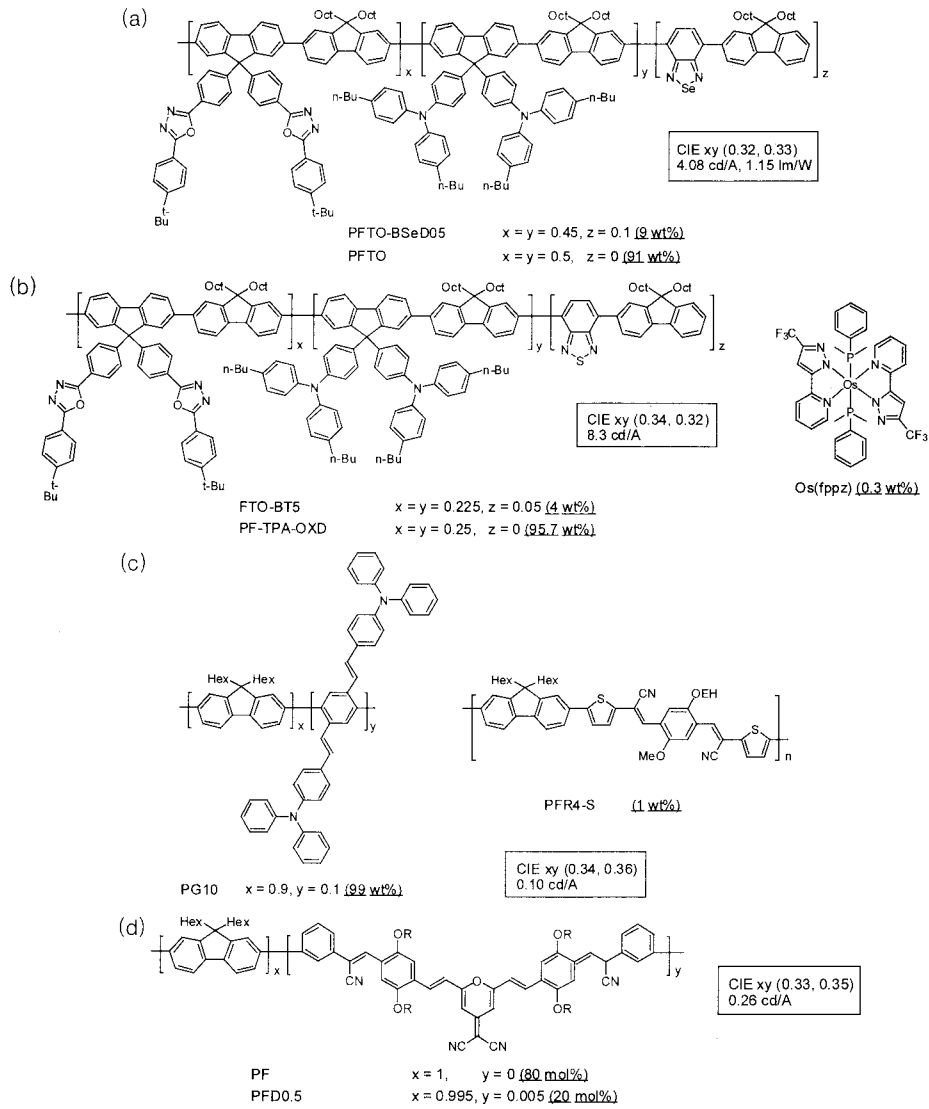


그림 10. 블렌딩 WOLED에 사용된 고분자.

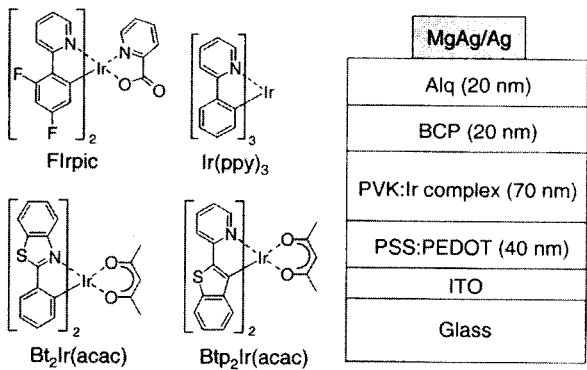


그림 11. PVK와의 블렌딩에 사용된 인광 물질의 화학 구조 및 이를 이용한 WOLED 소자의 모식도.

성능을 향상시키기 위한 하나의 방법으로, GE에서는 PVK/Flrpic 필름을 형성한 후 solvent rinsing 과정을 통해 필름 위쪽 일부분만 Flrpic을 녹여내었다. 이를 통해 다층 구조가 형성되어 소자의 emission zone을 cathode로부터 이동시킬 수 있었고, rinsing 공정 후에 소자의 성능이 더 향상되는 것을 확인하였다(그림 12).³⁵ 또한, 최근에는

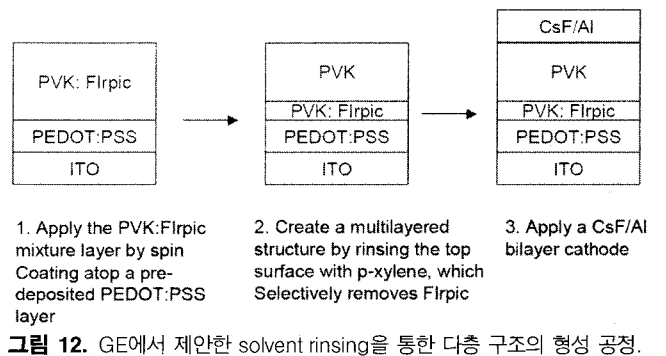


그림 12. GE에서 제안한 solvent rinsing을 통한 다층 구조의 형성 공정.

PVK 대신에 신규 합성된 bipolar molecular glass를 인광 호스트로 사용하여 Flrpic과 Os(fppz)를 블렌딩한 용액 공정형 WOLED가 보고되기도 하였다(그림 13).³⁶ 최근 들어 UDC 또는 DuPont 등에서 고분자가 아닌 저분자 인광 물질을 이용한 용액 공정 OLED를 보고하고 있고, 또 덴드리머 구조를 인광 물질에 도입함으로써 용액 공정성을 향상시킨 예도 있기 때문에, 이러한 새로운 용액 공정용 인광 재료의 개발과 함께 이를 이용한 용액공정 WOLED 역시 조만간

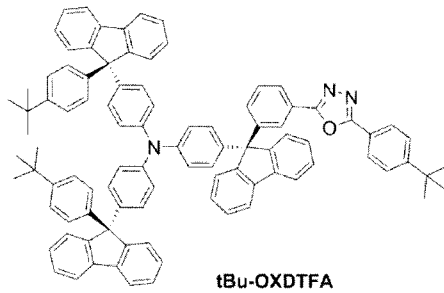


그림 13. 용액 공정형 신규 인광 호스트 물질.

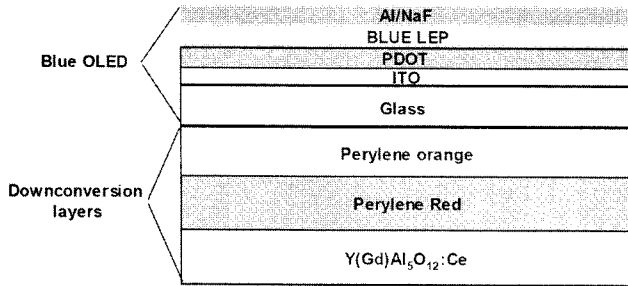


그림 14. GE에서 발표한 파장 변환 WOLED 소자의 모식도.

그 결과가 보고될 것으로 기대된다.

이 외에도 반응성 액정 발광 물질을 혼합하여 광경화를 통해 WOLED를 만들고, 특히 발광층의 액정성을 이용하여 편광된 백색광을 구현한 연구 결과도 최근에 발표되었다.³⁷

3.3 파장 변환에 의한 백색 발광

WOLED에서 소자 구동에 따른 색상의 변화는 반드시 해결이 되어야만 하는 매우 심각한 문제이다. 단일 고분자뿐만 아니라, 특히 불렌딩의 경우, WOLED 소자 구동 시 발생하는 열과 같은 외부적 요인에 반복적으로 노출되어 사용 시간이 지속됨에 따라 백색의 색순도가 감소할 수 있다. 이를 극복하기 위해, 청색 발광 소자와 형광체를 조합하는 파장 변환 방법이 연구되고 있다. 이 파장 변환 방법은 GE에서 처음으로 제안했으며,³⁸ 당시에 CDT의 PF계 청색 발광 고분자를 이용하여 PLED를 만들고, 유리기판 뒷면에 유기(perylen orange, perylene red) 및 무기 형광체(Y(Gd)AG : Ce)가 적층된 파장 변환층을 만들어 주었다(그림 14). 이후 OSRAM에서도 비슷한 방식으로 Flpic과 non-conjugated 고분자 호스트를 청색 발광층으로 사용하고 자체 제작한 nitridosilicate 형광체를 이용하여 WOLED를 구현한 바 있다.³⁹ 이러한 파장 변환 방식 역시 결국은 고성능 용액 공정 청색 발광층의 개발이 가장 핵심적인 이슈라고 할 수 있다.

4. 결론

소형 OLED의 시장 진입과 함께, 전 세계적으로 WOLED에 대한 연구는 더욱 활발히 진행되고 있다. 하지만 WOLED를 구현하는데 있어서 표준이 되는 공정 및 소자 구조가 아직 확정되어 있지는 않으며 여전히 다양한 시도들이 이루어지고 있는 상황이다. 본 총설에서는 그 중에서도 용액 공정을 통한 WOLED에 초점을 맞추고 WOLED 발광층에 적용 가능한 재료들을 중심으로 관련 기술 현황을 살펴보았

다. 신규 재료가 실제로 WOLED 제품에 채택이 되기 위해서는 백색광을 구현하는 것은 기본이고, 고효율, 장수명, 안정성 등 다양한 조건을 만족시켜야만 한다. 그런 측면에서 본 총설에서 살펴본 많은 재료들은 완벽한 후보 물질이라고 할 수는 없으며, 다만 성능 면에서 만족스럽지 못하더라도 새로운 재료를 구상하는데 있어서 긍정적인 자극이 될 수 있으리라 여겨진다. 본 총설에서 미처 다루지 못한 WOLED에 관한 그 밖의 자세한 내용에 대해 더 알고 싶다면 최근에 발표된 여러 논문들을 함께 참고하기를 권장한다.⁴⁰⁻⁴² 고성능 신규 재료의 개발과 함께 그 특성을 최대화할 수 있는 새로운 제조 공정 및 소자 기술 등이 함께 발전한다면 WOLED를 우리 일상 생활에서 볼 날도 그리 멀지 않을 것이다.

참고문헌

1. C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987).
2. J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown, R. N. Marks, K. Mackay, R. H. Friend, P. L. Burns, and A. B. Holmes, *Nature*, **347**, 539, (1990).
3. J. Kido, K. Hongawa, K. Okuyama, and K. Nagai, *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 815 (1994).
4. I. Underwood, A. Buckley, and C. Yates, IMID/IDMC '06 Digest, 105 (2006).
5. <http://www.olla-project.org>.
6. <http://www.oled100.eu>.
7. <http://www.comboled-project.eu>.
8. <http://www.fast2light.org>.
9. <http://www.universaldisplay.com>.
10. S. K. Lee, D. H. Hwang, B. J. Jung, N. S. Cho, J. Lee, J. D. Lee, and H. K. Shim, *Adv. Funct. Mater.*, **15**, 1647 (2005).
11. J. Liu, Q. Zhou, Y. Cheng, Y. Geng, L. Wang, D. Ma, X. Jing, and F. Wang, *Adv. Mater.*, **17**, 2974 (2005).
12. J. Liu, Z. Xie, Y. Cheng, Y. Geng, L. Wang, X. Jing, and F. Wang, *Adv. Mater.*, **19**, 531 (2007).
13. J. Liu, L. Chen, S. Shao, Z. Xie, Y. Cheng, Y. Geng, L. Wang, X. Jing, and F. Wang, *Adv. Mater.*, **19**, 4224 (2007).
14. C. Y. Chung, P. I. Shih, C. H. Chien, F. I. Wu, and C. F. Shu, *Macromolecules*, **40**, 247 (2007).
15. G. Tu, Q. Zhou, Y. Cheng, L. Wang, D. Ma, X. Jing, and F. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 2172 (2004).
16. J. Liu, Q. Zhou, Y. Cheng, Y. Geng, L. Wang, D. Ma, X. Jing, and F. Wang, *Adv. Funct. Mater.*, **16**, 957 (2006).
17. J. Liu, S. Shao, L. Chen, Z. Xie, Y. Cheng, Y. Geng, L. Wang, X. Jing, and F. Wang, *Adv. Mater.*, **19**, 1859 (2007).
18. S. K. Lee, B. J. Jung, T. Ahn, Y. K. Jung, J. I. Lee, I. Kang, J. Lee, J. H. Park, and H. K. Shim, *J. Polym. Sci. Polym. Chem.*, **45**, 3380 (2007).
19. J. Liu, B. Gao, Y. Cheng, Z. Xie, Y. Geng, L. Wang, X. Jing, and F. Wang, *Macromolecules*, **41**, 1162 (2008).
20. M. J. Park, J. Lee, J. H. Park, S. K. Lee, J. I. Lee, H. Y. Chu, D. H. Hwang, and H. K. Shim, *Macromolecules*, **41**, 3063 (2008).

21. J. Jiang, Y. Xu, W. Yang, R. Guan, Z. Liu, H. Zhen, and Y. Cao, *Adv. Mater.*, **18**, 1769 (2006).
22. F. I. Wu, X. H. Yang, D. Neher, R. Dodda, Y. H. Tseng, and C. F. Shu, *Adv. Funct. Mater.*, **17**, 1085 (2007).
23. K. Zhang, Z. Chen, C. Yang, Y. Tao, Y. Zou, J. Qui, and Y. Cao, *J. Mater. Chem.*, **18**, 291 (2008).
24. P. I. Lee, S. L. C. Hsu, and J. F. Lee, *J. Polym. Sci. Polym. Chem.*, **46**, 464 (2008).
25. Y. Z. Lee, X. Chen, M. C. Chen, S. A. Chen, J. H. Hsu, and W. Fann, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 308 (2001).
26. M. L. Tsai, C. Y. Liu, M. A. Hsu, and T. J. Chow, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 550 (2003).
27. P. T. Furuta, L. Deng, S. Garon, M. E. Thompson, and J. M. J. Frechet, *JACS*, **126**, 15388 (2004).
28. J. I. Lee, H. Y. Chu, S. H. Kim, L. M. Do, T. Zyung, and D. H. Hwang, *Optical Materials*, **21**, 205 (2002).
29. P. I. Shih, Y. H. Tseng, F. I. Wu, A. K. Dixit, and C. F. Shu, *Adv. Funct. Mater.*, **16**, 1582 (2006).
30. F. I. Wu, P. I. Shih, Y. H. Tseng, C. F. Shu, Y. L. Tung, and Y. Chi, *J. Mater. Chem.*, **17**, 167 (2007).
31. S. K. Lee, T. Ahn, N. S. Cho, J. I. Lee, Y. K. Jung, J. Lee, and H. K. Shim, *J. Polym. Sci. Polym. Chem.*, **45**, 1199 (2007).
32. B. Y. Hsieh and Y. Chen, *Macromolecules*, **40**, 8913 (2007).
33. Y. Kawamura, S. Yanagida, and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, **92**, 87 (2002).
34. J. I. Lee, H. Y. Chu, Y. S. Yang, L. M. Do, S. M. Chung, S. H. Ko Park, and C. S. Hwang, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, 9231 (2006).
35. J. Liu, Q. Ye, L. N. Lewis, and A. R. Duggal, *Proc. of SPIE*, **6695**, 66550Y (2007).
36. C. H. Chien, L. R. Kung, C. H. Wu, C. F. Shu, S. Y. Chang, and Y. Chi, *J. Mater. Chem.*, **18**, 3461 (2008).
37. A. Liedtke, M. O'Neill, A. Wertmüller, S. P. Kitney, and S. M. Kelly, *Chem. Mater.*, **20**, 3579 (2008).
38. A. R. Duggal, J. J. Shiang, C. M. Heller, and D. F. Foust, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 3470 (2002).
39. B. C. Krummacher, M. Mathai, F. So, S. Choulis, and V. E. Choong, *J. Display. Tech.*, **3**, 200 (2007).
40. B. W. D'Andrade and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **16**, 1585 (2004).
41. A. Misra, P. Kumar, M. N. Kamalasanan, and S. Chandra, *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, R35 (2006).
42. J. Y. Lee, S. H. Kim, and J. Jang, *KIC News*, **10**, 21 (2007).