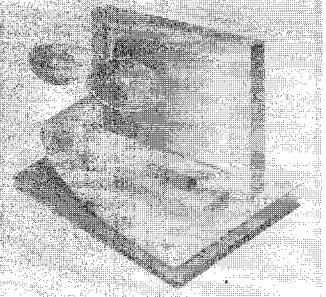


OLED 조명재료 기술동향 (1)



홍영규 선임연구원, 신진국 본부장, 최주환 팀장 (전자부품연구원 전북인쇄전자센터)

1. 서론

1987년 Eastman Kodak의 Ching W. Tang 박사가 Tris (8-hydroxyquinolino)- aluminium (AlQ₃) 라는 유기분자와 형광염료를 이용하여 다이오드 형태로 처음 개발한 유기발광소자 [1] (Organic Light Emitting Diode ; OLED)는 전극사이에 놓인 유기물이 전류주입에 의해서 스스로 빛을 내는 소자로서 자체발광 특성으로 인해 기존의 LCD에 비해서 빠른 응답속도, 높은 발광효율, 넓은 시야각 및 선명한 색상 구현에 있어 유리하며 칼라필터 및 백라이트유닛이 필요 없기 때문에 초박형 디스플레이를 제조할

수 있으므로 차세대 디스플레이용 소재로서 각광받고 있다.

또한 1990년 Cambridge 대학의 Richard Friend 교수는 Polyphenylene Vinylene (PPV)라는 고분자를 이용하여 고분자 OLED를 개발하였는데 [2] 고분자물질의 경우 진공증착 과정이 필요한 유기분자와 달리 잉크젯 프린터와 같은 인쇄 장치를 이용하여 대기 중에서 직접인쇄방식을 통해 소자를 제조할 수 있으므로 대면적의 발광 소자를 저가에 제조할 수 있다는 장점이 있다.

그리고 1998년, Princeton 대학의 Forrest 교수는 인광염료인 Platinum Octaethyl Porphine (PtOEP) 분자를 이용한 OLED를 개발하였는데 [3] 인광 OLED는 여기된 전자의 일부만을 이용하는 형광 OLED와 달리 이론적인 에너지 효율이 최대 100% 까지 가능하여 발광효율을 획기적으로 개선시킬 수 있는 길을 열었다.

자체발광으로 색순도가 높고, 인쇄공정을 통한 저가 대면적 광원제조가 가능하며, 높은 발광효율의 광원을 제작할 수 있다는 장점은 OLED를 단숨에 차세대 백색광원의 대표주자로 만들어 놓았다. 전 세계 에너지 소비량의 20%가 조명으로 소모되며 기존의 고효율 광원인 형광등이 대표적인 환경오염물질인 수은을 사용한다는 점은 장기적으로 OLED가 환경 친화적인 고효율 광원의 자리를 차지할 것 이라는 예상의 밑바탕이 되고 있다. 또한 넓은 면 전체에서 빛을 발하는 면광원이라 눈부심이 없는 백색 OLED는 저전압 구동이 가능하며, 색 순도의 조절을

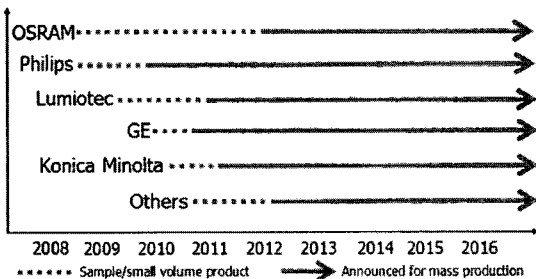


그림 1. Announced OLED Lighting Plans, Display Search '08.

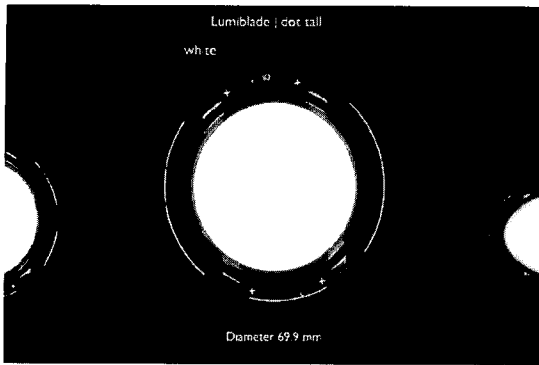


그림 2. Phillips에서 판매 중인 OLED 조명.

통해 완전한 백색을 구현할 수 있어 오스람, 필립스, GE 등의 조명업체는 이미 시장진출을 선언하거나 시제품을 출시하여 판매하는 등 머지않아 OLED 조명제품이 시장에 선보일 것으로 기대되고 있다.

2. OLED의 특징

OLED가 조명으로 빛을 발하기 위해서는 발광물질을 필요로 한다. 이 발광물질은 외부 전원으로부터 공급받은 전자-홀 쌍의 결합으로 빛을 발하는데 이를 위해서 필요한 것이 전하를 공급하는 전극과 전하를 발광층까지 공급하는 전하수송층이다. 각 구성요소들은 최적의 조명을 구현하기 위하여 다른 형태로 설계될 수 있는데, 발광층의 경우 발광효율을 최대로 높일 수 있으며 동시에 원하는 색순도를 표현할 수 있는 물질의 선택이 중요하며 전하수송층은 전극으로부터 발광층까지 손실 없이 전하를 운송할 수 있도록 발광층과 전극사이에서 에너지 준위의 균형을 잡아줄 수 있으며 그 자체의 전하이동도가 큰 물질을 선택해야 한다.

또한 음극재료의 경우 일함수 값이 낮아서 전자 주입에 유리한 금속을 활용해야하고, 양극재료는 투명하며 전기전도도가 높은 재료를 선택해야한다. 여기에 추가적으로 필요한 부분이 밀봉구조이다. 유기 재료를 이용하여 만드는 소자는 재료가 수분이나 산

소에 취약하여 오동작이나 부분적인 영구결함을 만들 가능성이 매우 크기 때문에 소자의 안정적인 수명을 확보하기 위해서는 반드시 주변공기와의 접촉을 차단할 수 있는 재료를 활용한 밀봉공정이 필요하다.

조명과 디스플레이 소자 모두 그림 3과 같은 구조를 기본으로 OLED를 광원으로 활용한다는 점은 같지만 요구되는 특성에서 그 차이를 극명히 드러낸다. OLED를 이용하여 디스플레이 소자를 제조할 때는 고해상도의 화면을 구현하기 위해 정밀한 미세패턴이 필요하며 각각의 화소를 구동하기 위해서는 Transistor 구조를 만들어야 한다. 반면, OLED 조명

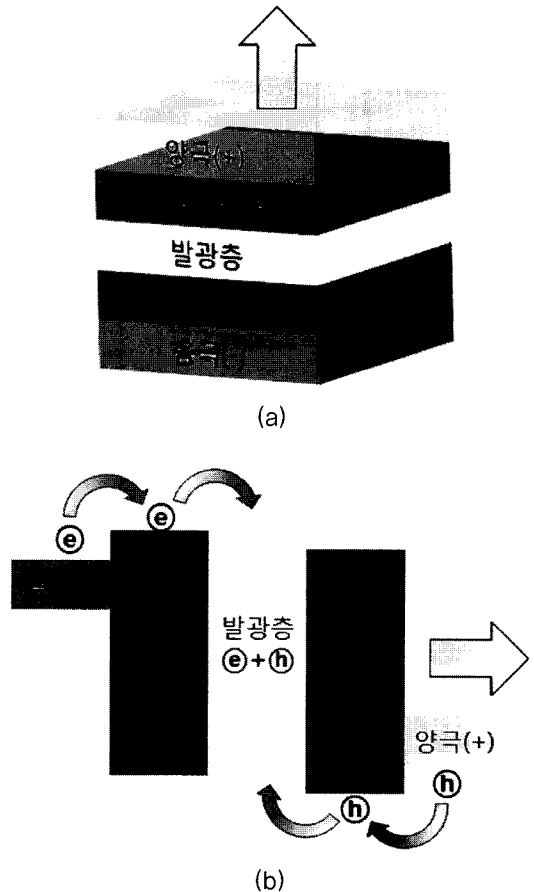


그림 3. OLED의 기본구조 (a) 및 동작원리 (b).



은 미세패턴이 필요 없으며 복잡한 소자구조를 제작할 필요가 없어 제조공정이 단순하다.

또한 제품에서 요구되는 특성을 보면 디스플레이 소자의 경우 R, G, B 색상의 개별적인 구현이 필요하며, 빠른 응답속도와 넓은 시야각 및 명암의 대비비가 중요한 반면 조명은 높은 효율 및 휘도, 정확한 백색의 구현, 낮은 가격의 실현이 중요하다. 밝기를 예로 들면 현재 생산되는 LCD 모니터의 경우 250-300 cd/m² 정도 이면 밝은 편에 속하나, 조명의 경우는 1000 cd/m² (~3140 lm/m²)가 기준이 되고 있으며 미국 에너지부가 2009년 발간한 로드 맵에 따르면 2014년에는 10,000 lm/m² (~3200 cd/m²)를 실현할 수 있을 것으로 예상되고 있다 [4].

3. WOLED용 발광재료

WOLED (White OLED)의 기본요소인 발광재료는 형광재료와 인광재료 두 가지로 구분되는데 두 재료의 차이는 발광 Mechanism의 차이에서 온다. 발광재료에 전자와 홀이 주입되어 엑시톤 (전자-홀쌍)이 형성이 될 때 두 가지 여기상태로 존재하는데 스핀이 0인 Singlet State와 스핀이 1인 Triplet State가 형성된다. 이 때 Singlet State로 여기된 전자는 Ground State로 전이가 쉽게 일어나며 빛을 발하는데 이 현상을 형광이라 한다. 반면 Triplet State로 여기된 전자는 스핀이 0인 Ground State로 쉽게 전이되지 못하고 시간간격을 두고 천천히 빛을 방출하게 되는데 이를 인광이라 한다. 2001년 Princeton 대학의 Forrest 교수가 Spin-orbit Interaction 확률이 높은 무거운 금속원자가 중심에 있는 인광분자인 (ppy)₂Ir(acac)를 이용하여 내부 양자효율이 100%에 가까운 인광 OLED를 보고하여 [5] 인광재료에 대한 관심을 불러일으켰다.

OLED를 조명으로 활용하려면 백색발광이 필요하므로 적절한 비율로 R, G, B를 발광하는 구조를 제작하여 백색발광을 구현하는 일이 필요하다. 기술적으로는 단일층에 발광물질들을 혼합하거나 다층구조의 OLED를 만드는 방법이 있으며 이 외에도 에너지가 높은 청색 OLED에 형광물질을 적층하여 백색

을 만들어내는 방식 등이 있다. 이 중에서 다층구조의 WOLED는 각 발광층을 독립적으로 조절할 수 있다는 장점이 있어 일반적인 구조로 자리를 잡고 있는 형국이다.

3.1 형광재료

발광재료로 최초로 개발된 Kodak의 AlQ₃은 대표적인 녹색형광체로 알려져 있으며 일본의 산요전기에서는 Coumarin이 도핑된 TPBA를 이용하여 외부양자효율 10%인 녹색형광 OLED를 발표한 바 있다 [6]. 적색발광체로는 Rubrene과 Kodak에서 개발한 DCM 형광체가 잘 알려져 있으며 청색 발광체는 Idemitsu Kosan의 Distyryl 유도체가 잘 알려져 있다.

형광소재는 효율이 인광소재에 비해 떨어지지만 소자의 안정성이나 개별색의 구현이 우수하여 조명보다는 디스플레이용으로 활용되는 추세이다. 2009년 특허청의 AMOLED 재료부문 특허분석에 따르면, 저분자 형광발광재료의 특허가 전체의 50%를 차지하며 정공주입 및 수송재료 20%, 인광발광재료 15% 전자주입 및 수송재료 15%로써, 전자주입수송재료보다는 발광재료에, 인광재료보다는 형광재료에 집중하고 있는 것으로 나타났다. 주요 다출원 기업으로는 일본의 형광재료부문의 강자인 Idemitsu Kosan이 23.5%로 선두를 차지하여 형광발광소재의 응용방향을 짐작케 한다. 실 예로 2008년 Idemitsu Kosan은 소니와 공동으로 내부양자효율이 28.5%인 남색 (Deep Blue) 형광 OLED의 개발에 성공함으로써 R, G, B 중 가장 에너지 소비가 큰 청색 OLED의 에너지효율을 끌어올려 대형 디스플레이용 OLED 개발을 앞당길 수 있게 되었다.

3.2 인광재료

인광발광재료는 고효율의 조명을 만들 수는 있지만 그 동안 안정적인 청색발광소재의 부재로 청색은 형광소재를 사용하고 적색과 녹색은 인광소재를 이용하는 하이브리드 형태의 소자개발이 진행되어 왔다. 그러나 최근 들어 지속적인 인광소재의 개발로 고효율의 인광 WOLED가 개발됨에 따라 조명재료는 인광재료가 점차 주도하고 있다. 형광재료보다

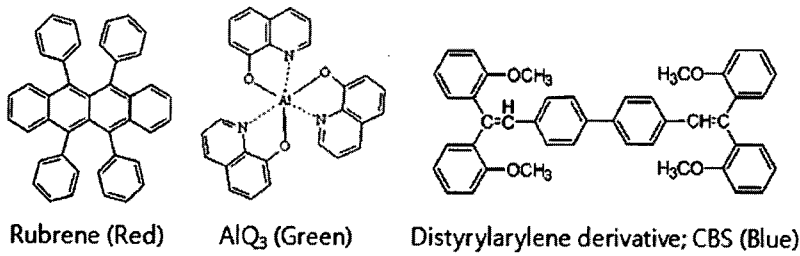


그림 4. 저분자 형광재료.

효율이 좋음에도 불구하고 인광재료의 일차적인 개발목표는 효율향상이다. 이는 조명과 디스플레이의 차이이기도 하다.

고효율의 OLED 인광재료에 관한 원천특허는 대부분 Southern California 대학의 Thompson 교수와 Princeton 대학의 Forrest 교수가 발표한 기술들로 현재 미국의 UDC가 그 특허를 보유하고 있다. 잘 알려진 녹색 인광재료는 Ir(ppy)₃이 있으며, 적색 인광재료로는 Ir(btp)₂(acac), Ir(bt)₂(acac)가 있다. 저분자 재료 기술 분야에서 가장 어려운 기술 분야로 청색 인광 도펀트 기술이 대표적으로 알려져 있는데 특성이 가장 우수하다고 알려져 있는 청색 인광재료는 역시 Thompson 교수와 Forrest 교수가 발표한 Flrppy와 Flrpic 등이 있다

인광발광 재료 분야의 대표주자인 미국의 UDC는 2007년 고효율의 인광 WOLED 재료개발을 앞당기기 위해 일본의 Idemitsu Kosan과 공동개발에 합의하였고, 최근 형광등 수준에 육박하는 효율의 다층형 인광 WOLED를 제조하였으며 2008년에는 100 lm/W 이상의 효율을 내는 조명을

개발했다고 발표하였다. 또한 2009년 Dresden 공대의 Reineke는 Novaled社와 함께 적색 발광층에 TCTA:Ir(MDQ)₂(acac), 청색 발광층에 TPBi:Flrpic, 그리고 녹색 발광층에 TPBi:Ir(ppy)₃을 이용하여 형광등의 효율과 같은 90 lm/W의 다층구조 인광 WOLED를 발표하였다

[7]. 불과 몇 년 사이에 WOLED의 효율이 15-20% 수준에서 형광등과 동일한 수준으로 올라서는 것은 청색발광재료의 효율향상이 영향을 미쳤음이 분명하다. 2007년 Novaled社는 WOLED가 효율 35 lm/W를 기록했음을 발표하면서 "When associated with a proper phosphorescent blue, we are confident of reaching 100 lm/W combined with a long lifetime in the near future" 라고 언급한 지 2년 후 90 lm/W를 기록하였다.

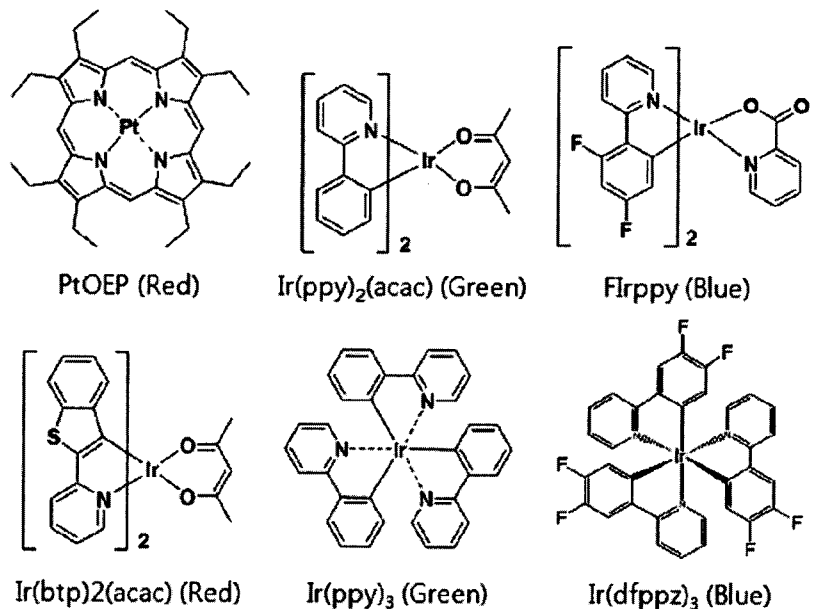


그림 5. 인광 Dopant의 분자구조.



UniversalwOLED Data	WHITE PLED PERFORMANCE WITHIN ENERGY STAR CATEGORIES			
	2700 K	3000 K	3500 K	4000 K
Efficiency	68 lm/W	64 lm/W	60 lm/W	54 lm/W
Color Rendering Index (CRI)	79	80	76	77
Color Temperature (K)	(0.47, 0.43)	(0.44, 0.42)	(0.42, 0.41)	(0.40, 0.40)
Initial Luminance (nits)	2680 K	3080 K	3270 K	3275 K
Lifetime (HRS)	17,000 HRS	14,000 HRS	12,000 HRS	7,000 HRS

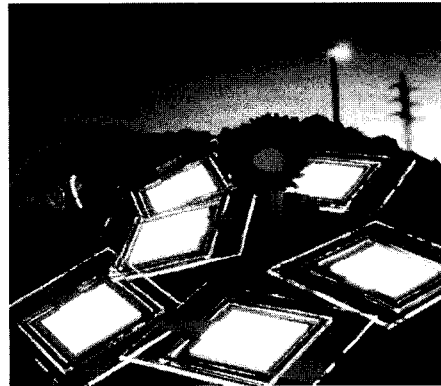
Sample Performance Data. This data uses a - 2 x light outcoupling enhancement factor with an initial luminance of 1,000 nits. Lifetime data, LT70, is measured as the time to 70% of initial luminance of 1,000 nits under accelerated conditions at room temperature. The acceleration factor (to extrapolate to L0 = 1000 nits) is 1.3.

그림 6. UDC에서 개발한 인광 OLED 조명의 성능지표.

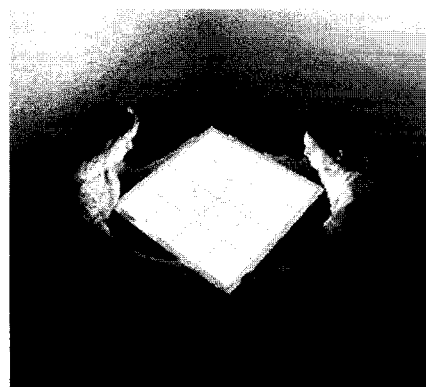
3.3 고분자 OLED

고분자 OLED 재료는 인쇄방법을 사용하여 소자 제작이 가능하다는 점 때문에 대면적화 및 저가제조 측면에서 저분자형 OLED보다 유리하다. 고분자 물질을 이용하는 OLED는 주로 고분자를 Host로 사용하고, 저분자를 도핑하여 사용한다. 1995년에 Yamagata 대학의 Kido 교수는 단일층의 PVK에 저분자 형광염료인 TPB (청색), Coumarin (녹색), DCM1 (적색)을 도핑함으로써 최대 휘도 4,100 cd/m²인 고분자 WOLED를 개발한 바 있으며, GE는 SID 2005에서 청색 고분자 OLED와 양자효율 98%인 Perylene Dye 및 85%인 Y(Gd)AG:Ce 형광체를 이용하여 청색 빛을 백색으로 변환하는 색변환 방식의 고효율 색변환 WOLED 조명을 발표하였고 2008년에는 Roll-to-Roll 방식으로 제조한 Flexible 조명을 선보이기도 했다.

고분자를 이용하여 고효율의 OLED 조명을 만들기 위해서는 고분자를 호스트로 하고 저분자 인광재료를 도핑하는 방식의 개발이 주를 이루였었는데, 고분자와 인광 Dopant의 결합은 도핑의 복잡함과 높은 전류밀도 하에서 발광효율이 빠르게 감소되는 문제점을 해결해야 하는 과제가 남겨져 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 2003년 인광분자가 결합된 고분자를 제조하여 단일층 발광 고분자로 빛을 내는 구조가 제안되어 제조공정은 단순해 졌으나 효



(a)



(b)

그림 7. 독일 Dresden 공대의 인광 WOLED (a)와 GE의 고분자 WOLED.

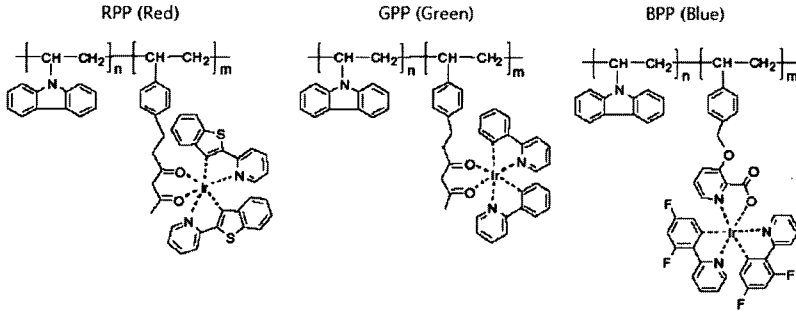


그림 8. 인광분자가 고분자에 도입된 인광 고분자.

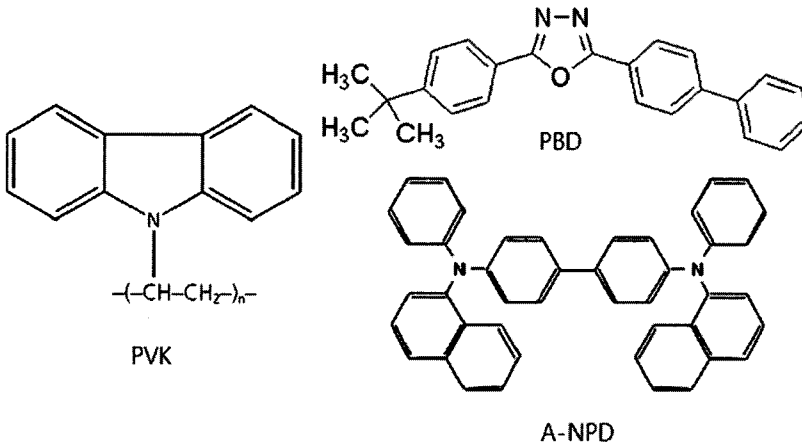
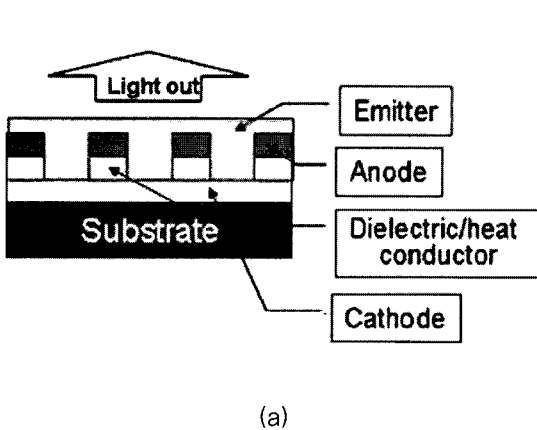


그림 9. 고분자 (PVK) 호스트의 전도도를 개선하기 위해 도입된 전도성 분자 (PBD : 전자, α -NPD : 홀).

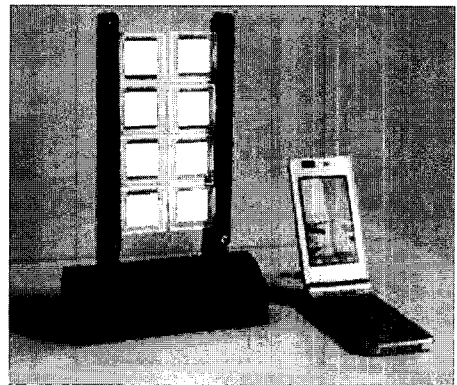
율은 제자리 수준이었다.

또한 고분자 OLED의 경우 발광효율을 증대시키기 위해서는 전도도의 개선도 필요하다. 전하공급이 수월하지 않은 경우 구동전압이 불필요하게 높아지는 결과를 초래하여 결과적으로 효율을 저하시키는 원인이 되기도 한다 [8].

2009년 Showa Denko K.K. (SDK)와 SRI International은 효율 30 lm/W 인 인광 고분자 WOLED를 인쇄공정을 이용하여 개발하였다. SDK는 기존의 필름형태의 적층구조와 달리 cavity 구조를 만들어 빛의 손실을 최소화할 수 있는 구조를 만들어 고효율을 실현했다고 발표했다. 인광재료의 발광효율 30 lm/W는 본격적인 효율



(a)



(b)

그림 10. SDK와 SRI가 개발한 인광 고분자 WOLED.

증가가 시작되었다는 증거라 할 수 있다. SDK는 2015년 까지 150 lm/W를 목표로 인쇄형 인광 고분자 WOLED 조명을 개발할 것이라고 밝히고 있다.

4. 조명성능의 향상을 위한 주변재료의 최적화

OLED에서 생성된 빛은 표면으로 나와 외부로 방출되는 것과 손실되는 것이 있는데, ITO ($n \sim 2$) 층과 유리기판 ($n \sim 1.4$)의 굴절률 차이로 인해 전반사가 일어나서 빛이 빠져나오지 못하고 기판에 갇히는 현상이 손실의 대표적인 예이다. 2009년 Dresden 공대에서 발표한 WOLED의 경우 이러한 손실을 최소화 하기 위해 굴절률이 크고 ($n=1.78$) 피라미드 모양인 유리기판을 사용하였다.

대면적의 조명을 만들 수 있다는 OLED의 장점은 투명전극의 높은 면저항으로 인한 전압강하 때문에 희석이 될 가능성이 있다. 위치에 따라 불균일한 전계의 영향으로 조명의 밝기가 불균일해지는 현상을 막기 위해서는 보조배선 전극을 만들거나 작은 크기의 단위조명을 어레이형태로 배열하는 일이 필요하다. 실제로 대부분의 대형 OLED 조명들이 작은 면적의 단위조명들의 배열에 의해 만들어지고 있다. 그러나 OLED 조명의 가격경쟁력을 고려하면 잉크

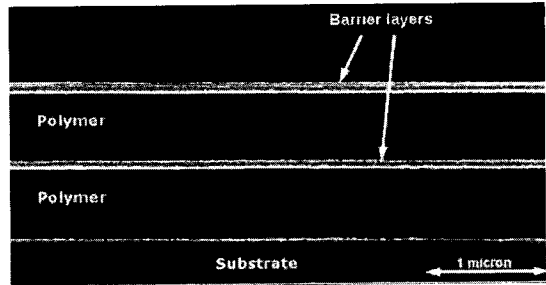


그림 12. VITEX社의 박막봉지구조.

젯 프린터 등의 프린팅 방법을 활용하여 표면에 보조배선 전극을 패터닝 하는 방법이 유리할 것으로 판단된다.

수분이나 산소에 취약한 유기조명은 약간의 수분만으로도 부분적인 오동작이나 영구결함을 초래하여 조명소자의 수명을 급격히 단축시킬 수 있다. 따라서 소자의 안정적인 수명을 확보하기 위해서는 반드시 주변공기와의 접촉을 차단 할 수 있는 봉지공정이 필요하다. 기본적으로 봉지는 무기박막 (SiO_2 또는 Al_2O_3)만으로 충분하지만, 무기박막 제조과정에서 결함의 발생은 피할 수 없기에 유기박막으로 이를 보완하는 구조로 만들고 있다.

그림 12와 같은 다층구조의 박막봉지는 전면으로는 완벽하게 산소나 습기를 차단할 수 있으나 측면방향으로의 차단효과가 취약한 문제점을 안고 있다. 따라서 안정적인 장수명의 OLED 조명을 위해서는 측면을 산소나 습기로부터 보호할 수 있는 공정 또는 재료의 개발이 필수적이다.

5. 결론

OLED 조명의 상용화에 가장 중요한 부분인 효율은 대부분 발광재료에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 인광재료의 도입, 삼색 광원 사이의 에너지 효율 밸런스, 전도도의 증대에 따른 구동전압의 감소가 함

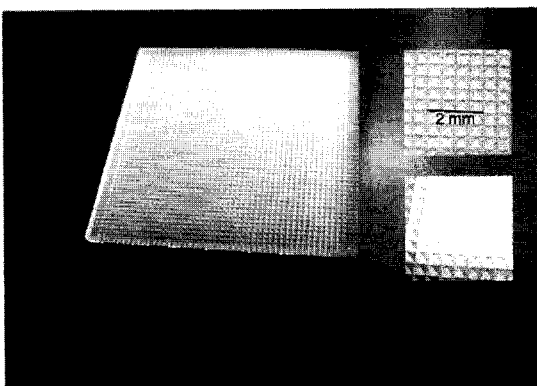


그림 11. 발광 손실을 줄이기 위한 Nolaed의 전반사 방지 유리판.

게 이루어져야 비로소 효율 높은 조명이 만들어진
다. Novalcd, SDK 등이 시도한 광 추출 효율의 증대
를 위한 설계도 효율 증대에 중요한 이슈가 될 수 있
다. 여기에 자연스러운 색의 재현력, 균일한 대면적
발광, 시간에 따른 성능의 저하정도가 OLED 조명의
상품성을 평가하는 기준이 될 것이다.

참고 문헌

- [1] C. W. Tang, S. A. VanSlyke, Organic electroluminescent diodes, 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. Burn, A. B. Holmes, Light-emitting diodes based on conjugated polymers, Nature 347, 539 (1990).
- [3] M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson & S. R. Forrest, Highly efficient phosphorescent emission from organic electroluminescent devices, Nature 1998, 395, 151-154 Nature 395, 151 (1998).
- [4] Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap, U. S. Department of Energy, 2009.
- [5] Chihaya Adachi, Marc A. Baldo, Mark E. Thompson, and Stephen R. Forrest, Nearly 100% internal phosphorescence efficiency in an organic light-emitting device, J. Appl. Phys. 90, 5048 (2001).
- [6] Kenji Okumoto, Hiroshi Kanno, Yuji Hamaa, Hisakazu Takahashi, and Kenichi Shibata, Green fluorescent organic light-emitting device with external quantum efficiency of nearly 10%, Appl. Phys. Lett. 89, 063504 (2006).
- [7] Sebastian Reineke, Frank Lindner, Gregor Schwartz, Nico Seidler, Karsten Walzer, Björn Lüsser & Karl Leo, White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency, Nature 459, 234 (2009).
- [8] D.-H. Lee, J.S. Choi, H. Chae, C.-H. Chung and S.M. Cho, Highly efficient phosphorescent polymer OLEDs fabricated by screen printing, Displays 29, 436 (2008)

저자|약력



성 명 : 홍영규

◆ 학 력

- 1993년 전북대 물리교육과 이학사
- 1995년 전북대 대학원 물리학과 이학석사
- 2000년 전북대 대학원 물리학과 이학박사

◆ 경 력

- 2000년 - 2008년 한국표준과학연구원 Post Doc. 전자부품연구원 전북인쇄전자센터 선임연구원
- 2009년 - 현재



성 명 : 신진국

◆ 학 력

- 1991년 서울대 무기재료공학 공학사
- 1993년 KAIST 재료공학 공학석사
- 1998년 KAIST 재료공학 공학박사

◆ 경 력

- 2001년 - 2002년 LG종합기술연구원 선임연구원 전자부품연구원 책임연구원 나노기술집적센터 소장 전자부품연구원 전북인쇄전자센터 본부장
- 2002년 - 현재
- 2007년 - 현재
- 2007년 - 현재



성 명 : 최주환

◆ 학 력

- 1991년 전북대 물리학과 이학사
- 1996년 Univ. of Massachusetts 물리학과 이학석사
- 2000년 Univ. of Massachusetts 물리학과 이학박사

◆ 경 력

- 2004년 - 2005년 전북대 Post. Doc.
- 2005년 - 2006년 전북대 나노기술집적센터 선임연구원
- 2005년 - 현재 전북대학교 겸임교수
- 2006년 - 현재 전자부품연구원 전북인쇄전자센터 팀장