

유기물 적층 구조에 따른 유기 발광 소자의 발광 특성에 관한 연구

A Study on the Emission Properties of Organic Electroluminescence Device by Various Stacked Organics Structures

노병규*, 김중연, 오환술

(ByeongGyu Roh*, JoongYeoun Kim, HwanSool Oh)

Abstract

In this paper, the single and double heterostructure organic light-emitting devices(OLEDs) were fabricated. The single heterostructure OLED(TYPE 1) is consisted of TPD as a HTL(hole transfer layer) and Alq₃ as an EML(emitting layer). The double heterostructure OLED(TYPE 2) is consisted of TPD as a HTL, Alq₃ as an EML and PBD as an ETL(electron transfer layer). The another double heterostructure OLED(TYPE 3) is consisted of TPD as a HTL, PBD as an EML and Alq₃ as an ETL. We obtained a strong green emission device with maximum EL emission wavelength 500nm in TYPE 3. When the applied voltage was 12V, the emission luminescence was 120.9cd/m². The chromaticity index of TYPE 3 was $x = 0.29$, $y = 0.50$. In the characteristic plot of current-voltage, TYPE 3 device was turned on at 6.9V. This voltage was a fairly low turn-on voltage. TYPE 1 and 2 device were turned on at 10V and 8.9V respectively. These types showed no good properties over that of TYPE 3.

Key Words: Organic Light-Emitting Device, Display, Electroluminescence Device

1. 서론

현재 상업적인 평판 발광소자로는 LCD (Liquid Crystal Device)가 주류를 이루고 있지만 광시야각, 응답 속도, 제조 비용 등의 문제점이 결점으로 지적되고 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 새로운 발광 소자 제작이 활발히 진행되고 있는데, 그 중에서 차세대 디스플레이로 각광을 받기 시작하는 것이 유기 발광 소자(Organic Light Emitting

Device: OLED 혹은 electro-luminescence device: ELD)이다. 유기 발광 현상은 1960년대 안트라센의 발광 현상의 발견으로 시작되어 1987년 Kodak사의 C.W. Tang에 의해 적층형 유기 발광 소자가 발표된 후 실용화의 가능성을 목표로 연구 개발이 더욱 활발히 진행되고 있다[1].

유기 발광 소자는 빠른 반응 속도와 뛰어난 내충격성 및 내구성, 광시야각 외에 온도 변화의 영향이 적은 특성을 갖고 있다. 최근에 고휘도화 및 고콘트라스트화, 컬러화 기술을 개선하는 한편 그동안 약점으로 지적되어 온 소자의 수명 연장 문제를 극복하기 위한 연구가 진행되어 최근에는 수명을 종전의 100시간 정도에서 3만~5만 시간까지 늘린 제품이 개발되고 있어 그 응용 범위가 폭넓어지고 있다[2-4].

*: 건국대학교 전자·정보통신공학과

(서울 광진구 화양동 1번지, Fax: 02-3437-5235,

E-mail: bgroh@kkucc.konkuk.ac.kr)

2000년 7월 25일 접수, 2000년 10월 30일 심사완료

그러나 아직까지 이러한 유기 발광 소자에 관한 발광 메커니즘이 정확히 규명된 것은 없고, 재료 측면에서만 연구 개발이 활발히 진행되고 있다[5].

현재 가장 특성이 좋은 녹색발광 물질은 Alq₃로 알려져 있는데 이 물질을 사용하여 일반적인 구조에서의 발광특성 보다 우수한 휘도와 동작전압을 갖는 개선된 구조를 제안한다. 즉, Alq₃를 이용한 세가지 구조의 유기 발광 소자를 다단계 진공 증착하여 제작하고 발광특성이 가장 좋은 구조를 제시하는 것이 본 논문의 목적이다.

2. 실험 방법

유기 발광 소자의 광학적 및 전기적인 특성을 조사하기 위해서 세 가지 형태의 유기 발광 소자를 제작하였다. 정공 전송층으로 TPD(N, N'-diphenyl - N,N' - bis - (3 - methylphenyl) - [1,1' - biphenyl] - 4,4' - diamine), 발광층으로는 Alq₃(Tris - (8 - hydroxyquinoline))를 사용한 TPYE 1의 2층 구조와 정공 전송층으로 TPD를, 발광층 또는 전자 전송층으로 PBD(2 - (4 - biphenyl) - 5 - (4 - tert - butylphenyl) - 1,3,4 - oxadiazole), Alq₃를 사용한 TPYE 2와 TPYE 3의 3층 구조를 다단계 진공 증착법으로 유기 발광 소자를 제작하였다. 본 실험에 사용된 양극(+) 전극과 기판은 모두 ITO(indium - tin - oxide)가 코팅된 유리이며, ITO의 면저항과 막 두께는 각각 5Ω/□과 120nm 이었다. ITO 식각 공정은 클래스(class) 1,000인 청정실에서 대기 상태로 제작하였다. 면저항 측정은 MM200W인 Four Point Probe 측정 장비를 이용하였다. 음극 전극은 모두 Al을 사용하였다. 제작시 유기물의 열적 결함을 줄이기 위해 이중 보트와 다단계 증착 방법을 사용하였다.

유기 발광 소자의 전기적, 광학적 특성을 조사하기 위하여 소자의 층을 구성하고 있는 단분자 유기물의 에너지띠와 단분자 유기물 내에서 캐리어 전송 능력 및 캐리어가 다른 유기물로 주입되게 하기 위한 에너지 장벽 높이등을 고려하여 2층 또는 두 종류의 3층 소자로 총 세 가지 형태의 유기 발광 소자를 제작했다. 제작된 첫 번째 소자인 TYPE 1은 ITO/TPD/Alq₃/Al의 구조로 제작했으며, 양전극 사이에 삽입된 단분자 유기물 재료의 역할을 살펴보면 양극/정공전송층/발광층/음극으로 구성된 가장 기본적인 구조이다. 두 번째 소자인 TYPE 2는 ITO/TPD/Alq₃/PBD/Al의 구조로 되어 제작했으며, 양쪽 전극으로부터 주입되

는 캐리어인 전자와 정공을 발광층 내에서 재결합의 확률을 높이기 위하여 캐리어가 구속되도록 소자를 제작해 TYPE 1과 비교했다. 이 구조에 전계를 걸어주게 되면 PBD층의 에너지띠가 기울어지고 PBD층의 두께가 충분히 얇다면 전자가 PBD층을 터널링하여 발광층으로 주입되고 동시에 정공에 대해서는 PBD층이 방지층(blocking layer)으로 동작하여 발광층에 전자, 정공을 구속하여 재결합을 높이기 위해 채택하였다. 세 번째 소자인 TYPE 3은 ITO/TPD/PBD/Alq₃/Al의 구조로 제작했으며, 전자 전송층과 정공 전송층을 모두 사용하였고 TYPE 1과 TYPE 2의 소자와 비교하였다. 각각 소자의 에너지띠를 그림 1~그림 3에 도시하였다[6,7].

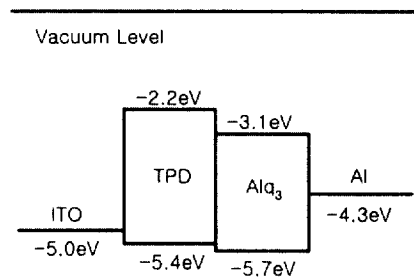


그림 1. TYPE 1(ITO/TPD/Alq₃/Al)의 에너지띠

Fig. 1. Energy band of TYPE 1 (ITO / TPD/Alq₃/Al)

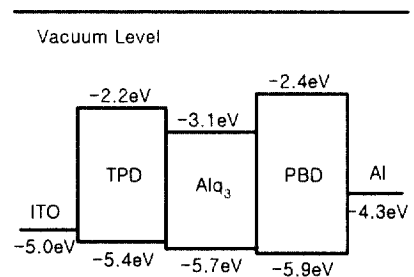


그림 2. TYPE 2(ITO/TPD/Alq₃/PBD/Al)의 에너지띠

Fig. 2. Energy band of TYPE 2 (ITO/TPD/Alq₃/PBD/Al)

모든 시편은 ITO 식각 전에 초음파 세척기 속의 탈이온수(D.I. water)속에서 10분간 세척하고 메탄올과 에탄올로 세척한 후 공기 방울 세척기(bubble bath)에서 3분 동안 초기 세척을 실시하고 질소기

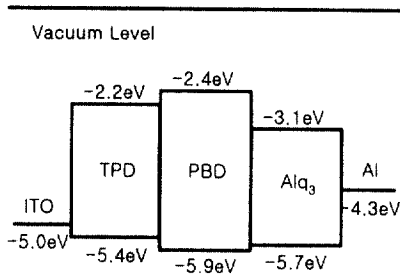


그림 3. TYPE 3(ITO/TPD/PBD/Alq₃/Al)의 에너지띠

Fig. 3. Energy band of TYPE 3 (ITO/TPD/PBD/Alq₃/Al)

체(N₂ gas)로 건조시켰다. 감광액(photo-resist: PR)의 접착력을 좋게 해주기 위해 HMDS(hexamethyldisilane)를 도포했다. 감광액의 도포는 스피너 코터를 사용하여 3500RPM으로 45초간 회전시켰으며, 얻은 두께는 2 μ m로 하였다. 여기서 사용된 감광액은 포지티브(positive) AZ7220으로 도포량은 1ml였다.

소프트베이크(soft-bake)는 90 $^{\circ}$ C에서 30분간 실시하여 잔류 용제를 제거하였고, 노광(exposure)은 수은 램프를 이용한 자외선을 12초 동안 쬐어 주었다. 현상(development)은 AZ300 100% 현상액으로 70초 동안 현상하였으며, 하드베이크(hard-bake)는 60 $^{\circ}$ C에서 30분간 실시하였다. ITO 식각은 10:1:2의 비율로 HCl:HNO₃:D.I. water를 혼합한 용액에서 4분간 실시하였다. 감광액의 제거는 감광액 제거제(stripper)인 AZ700액 속에서 30분간 담궈 완전히 제거시켰다.

ITO가 패터화된 유리 기판을 초기 세척한 후 위에서 제안된 세 가지 유기 발광 소자들을 제작하였다. 단분자 유기물 재료를 패터화된 유리 기판에 진공 증착 방법으로 증착하였다. 단분자 유기물 재료는 열과 습기에 매우 민감하기 때문에 단분자 유기물 재료에 열을 직접 가하지 않도록 하기 위해서 알루미늄 보트(Al₂O₃-boat)를 사용하여 열적 결합을 최소화하였다. 또한 가급적 공기 중의 습기에 노출되지 않도록 한 번의 진공으로 두 종류의 단분자 유기물 재료를 진공 증착시켰다. 타겟(target)과 소스(source) 사이는 15cm이었다. 음극 전극용 금속은 공기 중에서 산화에 강한 알루미늄(Al)을 선택했다. 고진공 상태인 진공 증착기에서 알루미늄을 증착시켜 최종적으로 유기 발광 소자를 완성하였다. 이 때 사용된 진공도는 유기물과

금속 모두 5×10^{-6} torr의 고진공이었다.

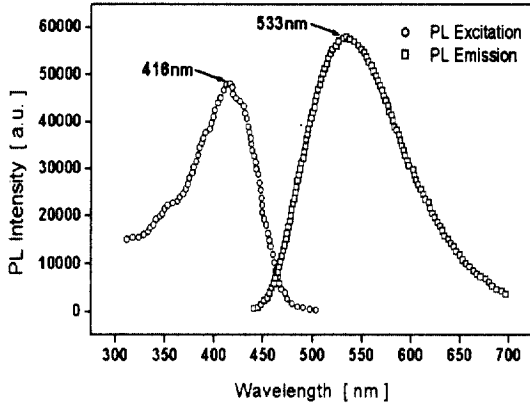
3. 결과 및 고찰

진공 증착기로 증착된 각각의 유기물층의 두께는 소자의 성능을 크게 좌우한다. 유기 발광 소자를 구성하는 각 단분자유기물의 총 두께는 약 50nm정도이고 평탄도가 우수해야만 효율이 좋은 소자를 제작할 수 있다[8]. 따라서 각각의 단분자 유기물과 알루미늄을 증착할 때 진공 증착기의 증착 조건에 변화를 주어 최대 50nm정도가 되도록 두께를 조정하였다. 두께 측정용 시료는 유리 기판 위에 증착시켜서 측정을 하였다. 이 때 두께 측정용 장비는 Tencor사의 AlphaStep 500이었다. 증착된 단분자 유기물들의 두께는 TPD 50nm, Alq₃ 70nm, PBD 55nm정도이고 음극 전극으로 사용되는 알루미늄의 두께는 약 70nm이었다. 유리 표면의 거칠기가 적층된 유기물의 표면 상태에 영향을 준다는 사실을 고려해 볼 때 유기물의 평탄도 및 스텝커버리지(step coverage)가 비교적 우수하였으나 알루미늄의 평탄도는 다소 떨어지는 면을 보였다.

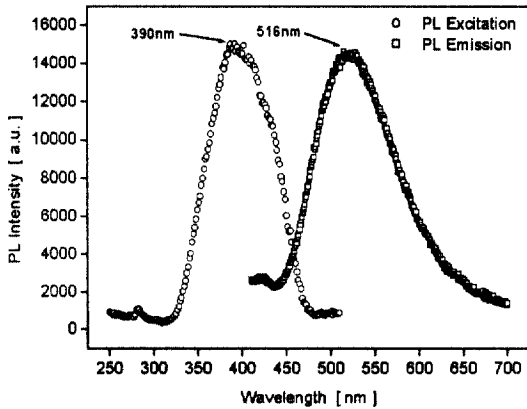
그림 4. TYPE 2의 FE-SEM 단면도($\times 20,000$)

Fig. 4. The FE-SEM cross-section of TYPE 2 ($\times 20,000$)

그림 4는 모든 층이 존재하는 TYPE 2의 유기 발광 소자의 단분자 유기물이 적층된 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope)단면도이다. 그림에서 볼 수 있듯이 각각의 단분자 유기물이 뚜렷한 경계면을 형성하면서 적층되어졌다.



(a)



(b)

그림 5. (a) Alq₃의 광발광과 (b) TPD층이 추가된 경우 광발광

Fig. 5. (a) PL spectra of Alq₃ and (b) PL spectra of inserted TPD layer

가장 기본적인 구조인 TPYE 1의 유기 발광 소자의 광학적 특성을 고찰해서 기본적인 발광현상을 살펴보았다. 그림 5(a)에서 보는 것처럼 Alq₃는 416nm 근처에서 광흡수에 의해 전자가 높은 들뜬 준위로 여기되어짐으로써 단파장에서 최대 피크를 보이고 있다. 순차적으로 533nm 근처의 장파장 쪽으로 전자의 에너지 준위가 이동됨으로써(transfer) 바닥상태의 정공과 재결합하여 손실된 에너지가 발광 현상을 일으킨다. 즉 장파장 쪽에서 최대 피크를 보이는 발광 현상을 보이고 있다. 이로부터 Alq₃의 광발광은 가시 광선 영역의 녹색 발광을 일으킬 것으로 사료된다. 또한 그림 5(b)는 TPD층

을 추가하였을 경우로 390nm 근처에서 전자가 들뜬 준위로 여기 되었다가 516nm의 최대 발광 파장을 얻었다.

그림 6은 TYPE 1, 2, 3의 EL 발광 스펙트럼을 나타낸 것으로 각각의 값들을 정규화한 것이다. 그림 7은 TYPE 1, 2, 3의 유기 발광 소자의 색좌표를 보여주고 있다. 소자 측정은 대기 상태에서 진행되었고, 12V의 인가 전압에 대한 발광 파장 대역을 보여주고 있다.

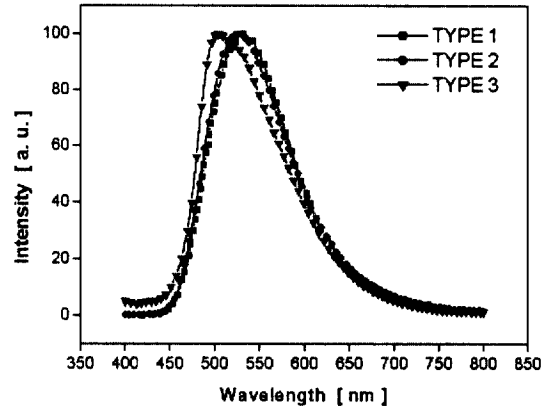


그림 6. TYPE 1, 2, 3의 전계 발광

Fig. 6. EL spectra of TYPE 1, 2, 3

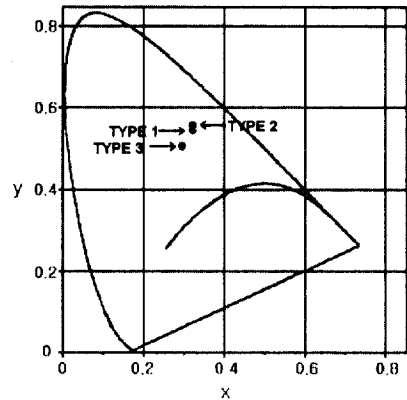


그림 7. TYPE 1, 2, 3의 색좌표

Fig. 7. The chromaticity of TYPE 1, 2, 3

그림 6에서 볼 수 있듯이 최대 피크치는 발광 최대파장 대역과 거의 비슷한 530nm 대역으로 녹색(yellowish green) 발광을 보이고 있으며 TYPE 2, 3의 최대 피크치는 각각 521nm(yellowish green), 500nm(green)이었다. TYPE 1과 2가 노란색 성분을 포함한 것에 비해서 TYPE 3의 경우 완

전한 녹색영역에서 동작하였다. 전계 발광 측정용 장비는 Minolta사의 CS1000 EL spectroradiometer 이었다.

TYPE 1의 경우 12V의 전압을 인가하였을 때 발광 휘도는 53cd/m²이었고 색좌표는 x=0.31, y=0.52로써 진한 녹색 발광을 하였다. 유리 기관이 다소 두껍기 때문에 측면으로 빛이 산란되는 현상이 많았다. TYPE 2의 경우 색좌표는 x=0.31, y=0.54이었고 TYPE 3의 경우에 색좌표는 x=0.29, y=0.50으로 모두 녹색에 해당되는 색좌표 값을 보였다.

또한 TYPE 2와 TYPE 3의 휘도는 각각 49.9cd/m²과 120.9cd/m²으로 TYPE 3의 구조가 TYPE 1과 TYPE 2에 비해서 두 배 정도 향상된 것으로 나타났다. 그림 8은 본 실험을 위해 제작된 TYPE 1의 발광 현상을 보여주고 있다.

그림 8. TYPE 1의 발광 사진

Fig. 8. Emission photography of TYPE 1

또한 전압을 인가할 때 시간이 지나면서 그림 9와 같이 검은점(dark spot) 현상이 발광 지역에서 생성된다. 이러한 점들은 소자 수명과 구동 전원에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

따라서 이러한 검은점들을 효과적으로 제거시킨다면 소자 수명과 작동 전압을 개선시킬 것으로 사료된다[9].

그림 9. OLED의 노쇠과정

Fig. 9. Degradation of OLED

유기 발광 소자에 순방향 바이어스가 걸렸을 때 전류-전압 곡선의 특성을 조사하여 유기 발광 소

자에서 일어나는 현상을 고찰해 보았다.

측정은 Hewlett - Packard사의 4145B semiconductor parameter analyzer를 사용하였고 대기 상태에서 시간별로 각각 측정하였다.

그림 10은 TYPE 1 유기 발광 소자의 전류전압 특성곡선으로 소자 제작 직후, 30분, 60분, 90분 경과 후의 결과로서 시간이 오래 경과될수록 소자의 특성이 악화되고 있는 것으로 나타났다. TYPE 2, 3경우에도 동일한 열화 특성이 나타났다.

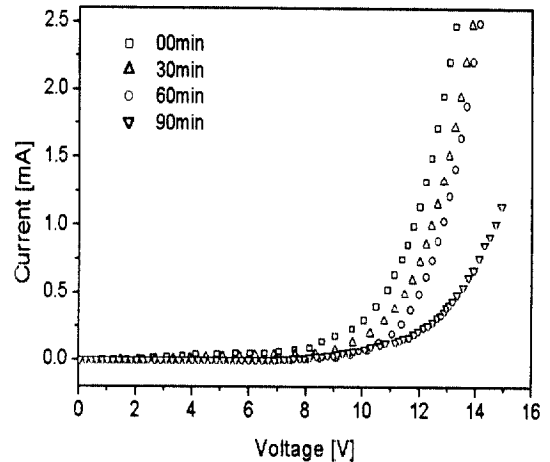


그림 10. TYPE 1의 유기 발광 소자의 전류 전압 특성 곡선

Fig. 10. Current-voltage characteristics of TYPE 1 OLED

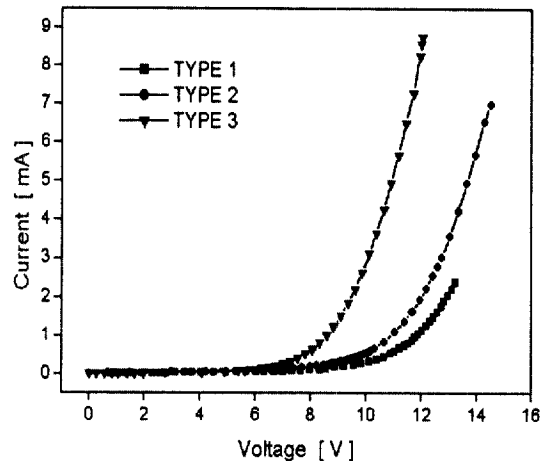


그림 11. 각 TYPE의 전류 전압 특성 비교

Fig. 11. Comparison of each OLED's current-voltage characteristics

또한 그림 11은 각각의 세가지 종류의 유기 발광 소자를 제작 직후 전류 전압 특성을 비교한 것으로 TYPE 3, TYPE 2, TYPE 1의 순서로 낮은 전압에서 발광을 시작하였다.

또 각각의 유기 발광 소자의 턴온 전압과 전류 밀도 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1. 제작된 유기 발광 소자의 턴온전압과 전류 밀도 특성

Table 1. The turn-on and current density characteristics of the fabricated OLEDs

	TYPE 1	TYPE 2	TYPE 3
턴온전압 (V)	10	8.9	6.9
전류밀도 (A/m ²)	1.56	1.69	4.54

TYPE 2의 소자는 발광층 내에서 캐리어를 구속시킬 수 있고 양쪽 극에서 주입되어지는 캐리어의 이동도를 뛰어나게 하기 위한 최적화시킨 구조로 설계되었으나 전류 전압 특성이 TYPE 1과 TYPE 3의 소자와 비교하면 소자 성능이 TYPE 1보다는 동작전압이 낮고 TYPE 3보다는 동작전압이 높은 특성을 보이고 있다.

TYPE 3의 소자가 세 TYPE의 소자 중에서 가장 낮은 전압에서 동작을 하였다. 이러한 원인은 소자 성능에 영향을 미치는 요소 중의 하나인 정공과 전자의 양이 유기 발광 소자 내에 균형적으로 주입이 이루어졌고 이로 인해 TPD에 의해 운송된 정공과 Alq₃를 지나 PBD에 의해 공급되는 전자가 재결합할 확률이 더 높아졌기 때문으로 사료된다.

또한 발광층으로 주입되는 전자와 정공의 양을 증가시키면 구동 전압을 더욱 낮출 수 있을 것이다. TYPE 2의 소자인 경우, 양(+극) 쪽의 에너지 장벽이 0.4eV였고 음극 쪽의 에너지 장벽이 1.9 eV로써 음극 쪽에서 훨씬 큰 에너지 장벽 차이를 보였다. 따라서 음극쪽의 캐리어인 전자가 원활히 유기물로 공급되지 못한 것으로 사료되고 양(+극) 쪽에서 주입되어진 정공이 다수 캐리어가 되어서 음극과 근접한 부분에서 재결합이 일어나 소광 현상(quench)이 일어났다. PBD층의 두께를 충분히

얇게 제작하는 것이 용이하지 못하여 기대했던 전자의 터널링은 거의 발생하지 않은 것으로 사료되어진다. 이러한 목적을 위해서는 더욱 얇은 박막으로 PBD를 성장시켜야 할 것이다. 또한 TYPE 3의 경우는 Alq₃를 전자 전송층으로 사용한 TYPE 2의 소자보다 다소 낮은 턴온전압(turn-on voltage)을 보였다. 또한, 음극쪽의 에너지 장벽이 1.2eV로 TYPE 2보다는 쉽게 전자 전송층을 이동한 전자가 PBD의 에너지 장벽을 만나고 양극에서 주입된 정공과 PBD/Alq₃ 계면에서 재결합하였다고 사료되어진다. 이러한 현상은 이동도가 느린 전자가 음극에서 PBD/Alq₃ 계면에 도달하는 동안 양극으로부터 주입된 이동도가 빠른 정공이 TPD와 PBD층을 지나 PBD/Alq₃ 계면에서 전자와 재결합을 했기 때문이다. 또한 음극쪽에 충분히 낮은 일함수를 갖고 산화에 강한 음극금속을 사용하거나 정공 수송층과 음극 사이에 LUMO 준위가 낮은 전자 주입층을 사용한다면 보다 효율이 좋은 유기 발광 소자를 제작될 수 있을 것이다. 소자의 수명 개선을 위해 표면보호층(passivation)을 성막하지 않은 상태에서 각각의 유기 발광 소자에 턴온 전압을 인가하여 소자 수명을 측정 한 결과, TYPE 1의 경우 약 24시간, TYPE 2의 경우 약 2시간, TYPE 3의 경우 약 12시간으로써 TYPE 1의 소자가 가장 좋은 특성을 보였다. 이러한 원인은 TYPE 2와 TYPE 3에 사용된 PBD의 유리 전이 온도가 약 80°C로 낮아 소자가 쉽게 산화되어버리기 때문이다. 그러나 TYPE 1, 2, 3의 소자를 진공 포장한 후 72시간 경과 후에 측정 한 결과 소자를 제작한 직후의 특성과 거의 동일한 특성을 보였다.

4. 결 론

유기 발광 소자의 발광 효율을 향상시키기 위하여 서로 다른 세 형태의 TYPE 1, TYPE 2, TYPE 3의 2층 또는 3층 소자를 제작하여 유기 발광 소자의 전극/유기물, 유기물/유기물 계면에서 캐리어 주입에 의한 발광 특성을 조사하였다. 증착된 각각의 유기물과 음극으로 쓰인 알루미늄의 두께는 50nm로 하였다. 기본적인 구조를 갖는 TYPE 1의 경우, Alq₃의 PL 스펙트럼의 최대 발광 파장은 533nm이었고 TPD를 추가한 경우에는 390nm의 파장을 갖는 광원으로 516nm의 최대 발광 파장을 얻었다. 이는 TPD층을 추가함으로써 발광 파장대가 단파장대로 이동했음을 보인다. 즉,

에너지가 높은 쪽으로 이동하고 있음을 보인다. 이러한 현상은 TPD에 의한 들뜬 준위 에너지가 이동된 것으로 사료된다. TYPE 1의 경우 12V 전압 인가시 발광 휘도는 53cd/m^2 이었고 색좌표는 $x=0.31$, $y=0.52$ 로써 녹색 발광을 하였다. TYPE 2의 경우 색좌표는 $x=0.31$, $y=0.54$ 이었고 TYPE 3의 경우에 색좌표는 $x=0.29$, $y=0.50$ 으로 모두 녹색에 해당되는 색좌표 값을 보였다. 또한 TYPE 2와 TYPE 3의 휘도는 각각 49.9cd/m^2 과 120.9cd/m^2 으로 TYPE 3의 구조가 TYPE 1과 TYPE 2에 비해서 두 배 정도 향상된 것으로 나타났다. 이것은 알루미늄/Alq₃의 에너지 장벽은 TYPE 2 소자의 음극/전자 전송층 계면에 비해 낮아서 보다 많은 수의 전자가 전자 수송층을 통과한다. 그러나 PBD층의 에너지 장벽이 1.7eV로 전자는 더 이상 PBD층으로 주입되지 못한다. 이 때 양극에서 넘어온 정공은 전자보다 이동도가 빠르므로 전자가 PBD/Alq₃ 계면에 도달하는 동안 이미 PBD층을 지나 PBD/Alq₃ 계면에서 전자와 재결합을 일으켜 발광하게 된다. 대기 상태에서 유기 발광 소자에 턴온 전압을 인가하여 소자 수명을 측정한 결과, TYPE 1의 경우 약 24시간, TYPE 2의 경우 약 2시간, TYPE 3의 경우 약 12시간으로써 TYPE 1의 소자가 가장 좋은 특성을 보였다. 이러한 원인은 TYPE 2와 TYPE 3에 사용된 PBD의 유리 전이 온도가 80°C 정도로 낮아 소자가 쉽게 산화되어 버리기 때문이다. 소자 제작후 표면 보호층을 형성해 준다면 소자의 수명을 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문에서는 일반적인 유기 발광 소자 구조인 ITO/TPD/Alq₃/Al구조보다 더 우수한 전기적, 광학적 특성을 갖는 ITO/TPD/PBD/Alq₃/Al구조를 제시하였다.

참 고 문 헌

[1] C. W. Tang and S. A. Van Slyke, Appl. Phys. Lett., Vol. 51, No. 12, pp. 913-915, 1987.
 [2] James R. Sheats, Homer Antoniadis, Mark Hueschen, William Leonard, Jeff Miller, Ron Moon, Daniel Roitman, Andrew Stocking, "Organic Electroluminescent Devices", Science, Vol. 273, p. 884, 1996.
 [3] Dirk Ammermann, Achim Bohler, Siegfried Dirr, Hans-Hermann Johannes, and Wolfgang

Kowalsky, "Multilayer Organic Light Emitting Diodes for Flat Panel Displays", AEU Int. J. electron. Commun., 50. No.5, pp. 312-333, 1996.

- [4] I. D. Parker, "Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes", J. Appl. Phys., Vol. 75, No. 3, pp. 1656-1666, 1994.
 [5] 筒井 哲夫, "有機EL研究開發の現状と動向", 月刊ディスプレイ10月別冊 有機ELディスプレイ, pp. 16-27, 1998.
 [6] 佐野 健志, "色素ドーブ有機EL素子における高效率化と長壽命化", 月刊ディスプレイ10月別冊 有機ELディスプレイ, pp. 16-27, 1998.
 [7] Mitsuru Asano, Tadahiro Nakazawa, Kentaro Ueda, Shizuo Fujita and Shigeo Fujita, "Optical Properties of Aluminumquinoline-Oxadiazole Codeposited Luminescent Layers", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 37, pp. 6233-6236, 1998.
 [8] J. Kido, H. Shinoya, and K. Nagai, "Single-layer white light-emitting organic electroluminescent devices based on dye-dispersed poly(N-vinylcabazole)", Appl. Phys. Lett. Vol. 67, No. 16, pp. 2281-2283, 1995.
 [9] G. E. Johnson, K. M. Mcgrane, and M. Stolka, "Electroluminescence from single layer molecularly doped polymer films", Pure & Appl. Chem. Vol. 67, pp. 175-182, 1995.