

DC 스퍼터링 증착에 의한 Al 전극을 갖는 전계발광소자 제작

Fabrication of the Electroluminescence Devices with Al electrode deposited by DC sputtering

윤 석 범*
(Seok-Beom, Yoon)

Abstract

We successfully fabricated OLED(Organic Light Emitting Diodes) with Al cathodes electrode deposited by the DC magnetron sputtering. The effects of a controlled Al cathode layer of an Indium Tin Oxide (ITO) / blended single polymer layer (PVK : Bu-PBD : dye) / Al light emitting diodes are described. The PVK (Poly(N-vinylcarbazole)) and Bu-PBD (2-(4-biphenyl-phenyl)-1,3,4-oxadiazole) are used hole transport polymer and electron transport molecule respectively. We found that both current injection and electroluminescence output are significantly different with a variable DC sputtering power. The difference is believed to be due to the influence near the blended polymer layer / cathode interface that results from the DC power and H₂O in a chamber. And DC sputtering deposition is an effective way to fabricate Al electrodes with pronounced orientational characteristics without damage occurring to metal-organic interface during the sputtering deposition.

Key Words(중요용어) : electroluminescence, DC magnetron sputtering, PVK, Bu-PBD, dye

1. 서 론

유기 단분자 및 유기 고분자를 이용한 접합 발광 다이오드로부터 고 효율의 전기발광 현상이 발표된 이후, 유기물 전계발광 소자는 다양한 색상의 빛을 내는 평판 디스플레이로의 잠재적인 사용가능성 때문에 많은 주목을 받고 있다. 이러한 유기 단분자는 낮은 구동 전압과 높은 휘도를 낼 수 있으며 고분자를 이용한 π 결합된 고분자는 높은 양자효율을 내는 발광소자의 발광층으로 사용될 수 있어 많은 연구가 이 분야로 진행되어 왔다.^[1-6]

또한 활성층 내에서 전자-정공 재결합에 따른 여기 발광의 중요한 요소는 다층으로 구성된 이중 접합 구조가 양자 효율에 중요한 역할을 하고 소자 성능을 개선시킴을 밝힌 바 있다.^[7,8] 이러한 다층구조의 유기발광소자는 제작 공정이 복잡하고 각 층 형성 과정에서 챔버 내에 잔류하는 H₂O 성분의 침투로 인하여 소자 성능의 저하가 일어난다. 이러한 단점을 보완하고 빠른 시간에 소자를 제작하기 위하여 단층구조의 유기 발광 소자가 제작되었으며 랩탑 컴퓨터의 후면광으로 사용할 수 있는 백색 발광 소자를 발표하기도 하였다.^[9]

일반적으로 적당한 유기물의 선택과 함께 음극 전극과 양극 전극으로부터 주입되는 유효 반송자와 발광층 내에서 전자-정공 쌍의 재결합에 따른 효과들이 유기물 전계발광 소자의 중요한 요소들로 인식되었다. 이러한 연구 결과들로부터 반송자

* 공주문화대학교 광전자통신과
(충남 공주시 옥룡동 326, Fax: 0416-856-0740)
E-mail : sbyoon@munhwa.kongju-c.ac.kr
1999년 8월 16일 접수, 1999년 11월 18일 심사완료

의 주입에 영향을 미치는 음극 전극 선택에는 낮은 일 함수를 갖는 금속 물질로 나타났고 이들 중에는 칼슘, 알루미늄, 마그네슘:은 합금 금속 등이 중요한 음극 전극으로 사용되었다.^[10]

작은 유기물 분자에 기반을 둔 전계발광 소자이거나 다중체에 기반을 둔 전계발광 소자로서, 이러한 유기물 전계발광 소자는 주로 밴드 구조 모델을 사용하여 설명하였으나^[11-12] 이러한 밴드 구조 모델로의 설명은 아직 정확히 규명되지 못하였다. 이러한 이유중의 하나로써 Gao 등이 Poly(p-Phenylene Vinylene) (PPV)의 표면에서 많은 양의 산소를 갖고 있어 유기물 전계발광 소자의 음극전극 금속과 활성층 계면에서의 역할이 무엇보다도 중요함을 밝힌 바 있다.^[13] Jeglinski 등은 ITO / Poly(p-Diethynylene Phenylene Diphenylene Vinylene) (PDEPDPV) / 알루미늄 전계발광 다이오드 소자에서 음극 전극과 다중체의 계면에서 결합 상태의 존재로 인하여 페르미 레벨이 고정되어 전기적인 대칭 현상이 나타남을 발견하였다.^[14] 또한 Bromas 등은 많은 양의 산소 분위기의 진공 챔버 내에서 칼슘 음극 전극을 증착한 전계발광 소자의 전계발광 특성이 고진공의 분위기에서 증착한 칼슘 음극 전극을 갖는 전계발광 소자에 비하여 낮은 전기적 특성을 나타냄을 밝힌 바 있다.^[15] 최근에는 Fou 등이 다중체와 알루미늄의 경계면에 절연 PolyMethacrylic Acid (PMA) 버퍼층을 넣은 전계발광 소자에서 전자의 주입 효율이 우수함을 발표하였다.^[16] 또한 거의 대부분의 연구가 열 진공 증착 방법을 이용한 음극 전극의 증착을 하였으나 Suzuki 등은 처음으로 고주파 마그네트론 스퍼터링 방법을 이용하여 마그네슘:은 (Mg:Ag) 합금 음극 전극의 증착을 시도하였고 마그네슘과 은의 비율에 따른 유기물 전계발광 소자의 전기적 특성 및 물리적 특성을 발표하였다.^[17] 그의 연구에 따르면 일반적인 열 진공 증착에 비하여 스퍼터링 방법에 의하여 증착된 음극 전극의 전계발광 소자가 우수한 재현성을 가지며 빛의 세기가 우수함을 나타내었다.

F. Li 등은 Al_2O_3 버퍼층을 갖는 유기물 전계발광 소자에서 버퍼층의 두께를 12Å 이내의 두께로 조절하면 알루미늄 음극 전극만을 갖는 유기물 전계발광 소자보다 낮은 임계전압과 높은 EL 세기를 갖는다고 보고한 바 있다.^[18]

본 연구에서는 낮은 일 함수를 갖는 알루미늄을 사용하여 음극 전극을 DC 스퍼터링으로 형성한

유기물 전계발광 소자의 전기적 광학적 효과를 관찰하였다. 이때 사용된 DC 스퍼터링의 전력에 따른 소자의 특성과 특히 고전적인 열 진공 증착 방법을 사용하여 제작된 알루미늄 음극 전극 유기물 발광소자를 비교하였다. 또한 일반 열 진공 증착 방법 보다 DC 스퍼터링 증착 방법을 이용하여 알루미늄 아래층에 버퍼층으로 Al_2O_3 층을 얻기가 용이하여 2층 구조의 음극 전극 층을 형성하여 유기물 소자를 제작하였다.

II. 실험방법 및 결과

본 연구에서 사용된 유기물 전계발광 소자의 분자구조를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 활성층에 사용될 유기물은 정공 전달에 사용된 다중체로 PVK(Poly(N-vinylcarbazole)), 전자 전달 유기물은 Bu-PBD (2-(4-biphenyl)-5-(4-tert-Butylphenyl)-1,3,4-oxadiazole), 발광색소 유기물은 전자와 홀의 재결합 과정 중에 발광되는 파장을 갖도록 C6 (Coumarin-6) 및 TPB를 각각 사용하였다. 이때 사용한 C6 및 TPB (1,1,4,4-tetraphenyl-1,3-butadiene)는 각각 녹색과 청색의 파장을 나타내는 색소로써 PVK, Bu-PBD 및 색소 분자의 농도를 조절하여 각각의 발광 파장을 얻도록 하였다. 제작에 사용된 유리기판은 표면 저항이 30 Ω/□ 인 ITO가 증착된 그라스를 사용하였다.

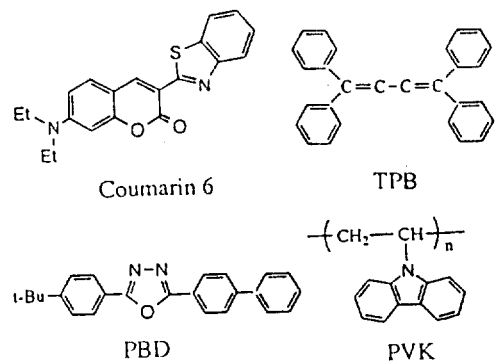


그림 1. PVK, Bu-PBD, C6 및 TPB 재료의 분자 구조

Fig. 1. Molecular structure of PVK, Bu-PBD, C6 and TPB materials

그림 2는 색소가 혼합된 PVK : Bu-PBD의 혼합 용액을 스프인 코팅하여 제작된 단층 위에 DC 스퍼

터링 방법을 사용하여 알루미늄 음극 전극 층을 형성한 소자의 단면을 나타내었다. ITO가 입혀진 유리 판에 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 로 ITO를 식각하여 소자 패턴을 형성한다. 이때 형성된 패턴은 양극 전극으로 사용되며, 패턴 형성된 ITO 유리판을 합성세제가 담긴 초음파 용기에 넣어 30초, 3번 세척한 후,

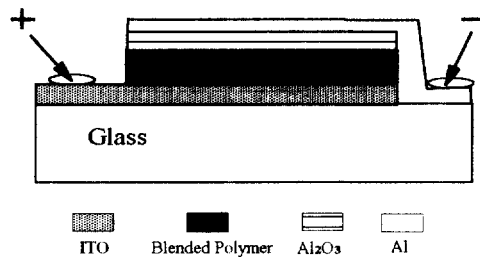


그림 2. 본 연구에서 사용한 유기물 발광 다이오드 구조

Fig 2. The structure of a typical organic LED described in this work.

순수에서 합성세제를 제거한다. 세척된 ITO 유리기판을 50°C의 아세톤 및 에탄올로 3분간 세척하며 위의 세척 공정은 G. E. Johnson 등이 사용한 세척 공정을 이용하였다.^[19] PVK를 200mg, Bu-PBD를 (200-x)mg, 유기물 색소는 0.5mg의 양으로 10ml의 THF (Tetrahydrofuran) 용제에 혼합하여 0.4 μm 폴리프로필렌 필터에 여과시킨다. 여과된 혼합 유기물을 공기 중에서 패턴 형성된 ITO 유리판 위에 2500 rpm으로 20초 동안 스프인 코팅하여 단층 유기물 박막을 얻는다. 스프인 코팅 후에 단층 유기물 박막이 코팅된 ITO 유리판을 1시간, 60°C의 오븐에 넣어 박막을 다결정화 한다. 다결정화 과정 중에 공기중의 산소와의 접촉을 줄이기 위하여 오븐 속을 진공 상태로 유지시켰다. 이때 얻어진 혼합 단층유기물층 박막의 두께는 Tencor 알파스텝 200 장비를 이용하여 측정된 결과 3000Å 이었다. 혼합 단층유기물 박막을 형성한 후, 알루미늄 음극 전극 금속의 증착은 CNC ID-3500 저 전력 DC 스퍼터링 시스템을 사용하였다. 2000Å 두께의 알루미늄 음극 전극을 얻기 위하여 챔버 내의 아르곤 압력은 1.6 mTorr, DC 스퍼터링 전력은 각각 0.1W/cm² (OLED1), 0.8W/cm² (OLED2) 및 1.6 W/cm² (OLED3)을 사용하였으며 이때 알루미늄 금속 증착율은 DC 스퍼터링 전력에 따라 각각 1Å/sec, 7Å/sec 및 13Å/sec 이내에

서 조절하였으며 사용된 색소는 TPB이었다. 또한 초록파장을 내는 C6 색소 혼합 단층 발광소자의 알루미늄 전극은 1.6 mTorr의 아르곤 압력과 0.8 W/cm²의 스퍼터 전력 및 7A/sec의 증착율로 형성하였다. 또한 진공 증착 시스템으로는 CVC SC4500 Thermal/E-gun 진공 증착 시스템을 사용하였으며 5×10^{-6} Torr에서 15Å/sec 로 조절하여 알루미늄을 증착하였으며 증착 두께는 2000Å이었다 (Thermal).

또한 Al₂O₃ 버퍼층을 얻기 위한 DC 스퍼터링 조건으로 아르곤 압력은 3.1 mTorr, 스퍼터링 전력은 0.8 W/cm², 증착율은 0.3 Å/sec으로 하였으며 20Å 두께를 얻었다. 5:19 sccm의 비율로 Ar:O₂ 개스를 혼합하여 3.1 mTorr로 하여 Al₂O₃ 버퍼층을 형성한 후 O₂를 차단하고 Ar 개스 분위기에서 바로 알루미늄 음극 전극을 형성하였다. 이때 사용한 증착 조건은 챔버 내의 아르곤 압력 1.6 mTorr, 스퍼터 전력 0.8W/cm² 및 7A/sec의 증착율로서 하였으며 2000 Å 두께의 전극을 얻었다. 전기적 측정을 위하여 HP41501 펄스발생기와 HP4155A 반도체 파라미터 분석장비를 컴퓨터와 연결하여 자동화하였고 UDT PIN10D 일리핀 포토다이오드를 사용하여 소자의 광전류를 측정하였다. 또한 동작 전압 인가 시에 전류주입에 따른 발광특성의 광학적 측정을 위해 EL (Electro -luminescence) 측정장비를 사용하였다. 측정 과정에서 사용한 여기광원은 457.9 nm의 아르곤 이온 레이저이며 초점거리 f가 0.75m인 SPEX 모노크로메터를 사용하였다.

일반적으로 제작된 소자는 공기중의 산소와 결합하여 소자의 수명을 단축시키는 치명적인 결함을 가지고 있으며 금속과 유기물 박막의 계면에서 반응이 일어나는 단점을 지니고 있어 밀봉 상태의 아르곤 가스 분위기에서 소자의 측정이 이루어진다.^[20] 그러나 본 연구에서는 제작된 유기물 전계발광소자의 음극 전극이 공기에 안정된 전극으로 동작되도록 알루미늄 증착 후에 유기물 발광소자 전면에 진공 그리스를 입혀 공기와 유기물 소자와의 접촉을 차단하였으며 제작된 유기물 전계발광 소자를 상온의 공기 중에서 측정하였다.

그림 3(A)는 알루미늄 음극 전극 금속의 증착을 하기 전에 CNC ID-3500 저 전력 DC 스퍼터링 시스템의 챔버 내에서의 잔류 가스 측정값으로 그림 3에서 X 축의 16, 17, 18 및 40에서 얻은 값은 각각 잔류 O, HO, H₂O 및 N의 상대적 크기로써 챔버 내에서 H₂O가 다른 가스에 비하여 많이

존재하였다. 이는 챔버 내에서 진공을 고 진공으로 유지할 경우 H₂O가 산소나 수소에 비하여 상대적으로 쉽게 챔버 밖으로 뿜히지 않음을 알 수 있고 이러한 잔류 H₂O가 음극 전극 금속의 증착시에 다중체의 표면에 놓이어서 유기물 전계발광 소자가 동작할 경우에 다중체와 반응하여 소자의 수명을 단축시킨다. 챔버 내의 H₂O를 충분히 없애기 위하여 30분 이상 고진공(5×10⁻⁷ Torr 이상)을 유지하여 최대한 H₂O를 제거하였으며 그림 3(B)에 나타내었다. Y. Yang 등은 공기 중에 놓인 유기물 전계발광 소자의 다중체가 공기와 반응하여 다중체 표면에서 반응이 일어나 소자의 전기적 특성을 저하시킴을 이미 밝힌 바 있다.^[21,22] 그러나 대부분의 진공 증착 시스템에서 사용하는 챔버의 풀링 시스템은 기본적으로 저온의 물을 순환함으로써 챔버 내의 H₂O 잔류량이 많아 음극 전극 금속 증착

과정 중에 유기물과 산소와의 반응이 일어나므로 DC 스퍼터링을 이용한 본 실험에서는 5×10⁻⁷ Torr 이상의 높은 진공도를 유지하며 음극 금속을 증착한다.

그림 4는 저전력 DC 스퍼터링 시스템을 사용하여 혼합 유기물 다중체의 표면에 알루미늄 음극 전극 금속을 증착한 후 X선 회절 측정을 한 결과이다. 그림에서 회절 각 2θ가 15 도에서 65 도에 범위에서 측정하였다. 특히 2θ가 38 도 부근에서 나타난 알루미늄 측정 값은 (111) 방향을 가지며 이는 H. Suzuki등이 언급한 바와 같이 스퍼터링 동안에 스퍼터 된 금속 입자가 0.2 - 10 eV의 높은 운동 에너지를 갖고 있어 다중체 위에 증착 될 때 일정한 방향성을 갖게 되며 이러한 방향성은 알루미늄 금속의 내구성을 유지하게 된다.^[17] 이러한 높은 운동 에너지를 갖는 금속 입자의 음극 전극 증착은 스퍼터링 동안에 다중체의 표면에 손상을 입힐 것이다. 일반적인 열 진공 증착 시스템을 사용한 유기물 전계발광 소자의 경우에 제작된 소자에 전압을 인가하면 오랜 시간동안의 소자동작 과정에서 음극 전극 알루미늄의 파괴현상은 L. M. Do 등에 의하여 알려졌다.^[22]

그림 3. 고진공 전 후의 DC 스퍼터링 챔버 내의 잔류 가스

Fig. 3. Residual gas in DC Sputtering Chamber before and after high vacuum

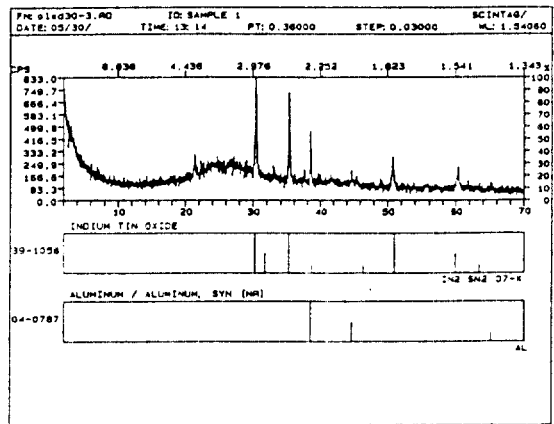


그림 4. DC 스퍼터링 방법으로 증착된 알루미늄 전극에서의 X 선 회절

Fig. 4. The X-ray diffraction data on the Al electrode fabricated by the DC Sputtering method

그러나 그림 5의 전류 밀도와 EL 세기의 측정값에서와 같이 음극 전극 금속이 다중체와의 계면에서 방향성을 갖는 금속 증착으로 인하여 일반적인 열

진공 증착에 비하여 높은 EL 세기를 나타내고 있음을 알 수 있으며 DC 스퍼터링 증착된 소자의 경우가 열 증착 방법에 의한 소자의 경우보다 오랜 시간 동안의 동작전압 인가 시에 안정된 동작을 하였다. 이러한 현상은 H. Suzuki 등이 RF 마그네트론 스퍼터링 방법에 의하여 증착한 마그네슘:은 합금 음극 전극 소자를 갖는 유기물 전계발광 소자와 일반적인 열 진공 증착 방법을 사용하여 측정된 EL 세기에서도 같은 결과를 얻었다.^[17] 이러한 결과로부터 일반적인 열 진공 증착 방법이 아닌 저 전력 DC 마그네트론 스퍼터링 방법을 사용하여 알루미늄 음극 전극을 증착할 경우에 증착 과정에서 높은 운동에너지를 갖는 알루미늄 입자가 반도체 보다 약한 결합으로 이루어진 다중체를 파괴하기보다는 다중체의 표면에서 일정한 방향성을 유지하며 증착된다. 따라서 제작된 유기물 전계발광 소자의 EL 세기는 열 진공 증착 방법에 의한 유기물 전계발광 소자에 비하여 높게 나타나며 안정된 동작을 한다. 그림 5에서는 0.8W/cm² 및 1.6W/cm²의 DC스퍼터링 전력을 이용한 알루미늄 음극 전극 유기 박막 소자가 일반적인 열 진공 증착 및 0.1 W/cm²의 DC 스퍼터링 전력을 사용한 알루미늄 음극 전극 박막의 유기 발광소자보다 더욱 우수한 특성을 나타내었다. 이러한 결과로부터

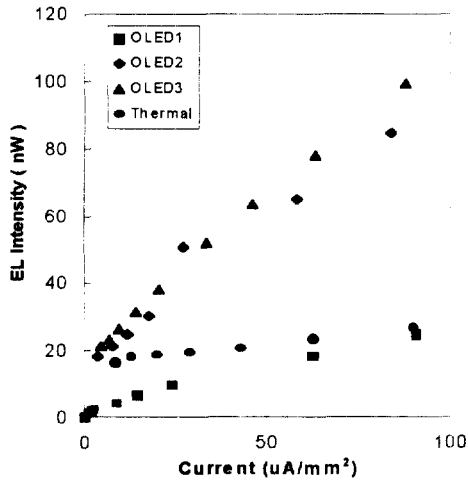


그림 5. DC 스퍼터링 및 열 진공 증착 방법으로 각각 제작된 ITO/PVK:PBD:TPB/Al 유기물 전계발광 소자의 EL 세기 대 전류밀도
 Fig. 5. The EL Intensity - Current plots for the ITO / PVK:PBD:TPB / Al Organic LED fabricated by the DC Sputtering and thermal evaporation methods, respectively

DC 스퍼터링 증착 방법이 열 진공 증착보다 우수함을 알 수 있다. 0.1W/cm²의 저 전력의 경우는 소자 제작에 부적합한 제작 조건임을 얻었다.

그림 6에서는 혼합 단일층 유기물 위에 증착된 알루미늄의 음극 전극만을 갖는 유기물 전계발광 소자와 혼합 단일 유기물 층위에 Al₂O₃ 버퍼층과 알루미늄을 각각 저 전력 DC 스퍼터링 방법으로 증착한 유기물 전계발광 소자의 전압 전류 특성 곡선이다. 그림에서와 같이 Al₂O₃ 층이 존재할 경우에 Al₂O₃ 층이 없는 유기물 전계발광 소자의 경우와 비교하여 임계전압이 높게 나타난다. 이 경우는 Al₂O₃ 층이 너무 두꺼워서 음극 전극에서 유입되는 전자를 Al₂O₃ 층에서 터널링 되지 못하게 하여 전자의 유입을 낮추는 결과를 나타낸다. 이러한 현상은 일반적인 터널링 현상으로도 쉽게 설명되며 버퍼층이 두꺼우면 산화 장벽을 가로지르는 전압 강하가 크게되고 주어진 총 전압에서 주입된 전류는 낮아진다. 이러한 결과로부터 낮은 발광특성을 나타내며 그림 7에 EL 측정에 의한 상대적인 세기를 나타내었다.

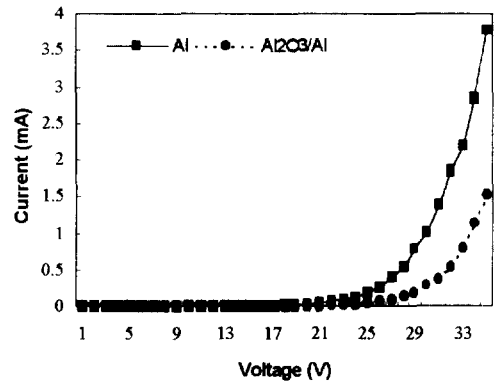


그림 6. 각각 ITO/PVK:PBD:C6/Al 과 ITO/PVK:PBD:C6/Al₂O₃/Al 의 유기물 전계발광 소자에서의 전압-전류 특성곡선
 Fig. 6. The Current - Voltage plots for the ITO /PVK:PBD:C6/Al and ITO/PVK:PBD:C6 /Al₂O₃/Al Organic LED Device

그림 7에서 발광 파장이 500 nm 부근에서 피크 값을 갖는 녹색의 전계발광 특성을 나타내고 있다. 그림의 EL 스펙트럼에서와 같이 Al₂O₃ 버퍼층을 갖는 유기물 전계발광 소자에서의 피크 값이 알루미늄 음극 전극만을 갖는 유기물 전계발광 소자에

비하여 낮은 EL 세기를 나타내고 있다. 그림 6과 그림 7로부터 20Å 두께의 Al₂O₃ 버퍼층을 갖는 Al₂O₃/Al 음극 전극을 갖는 유기물 전계발광 소자가 Al 음극 전극의 유기물 전계발광 소자에 비하여 높은 임계 전압과 낮은 EL 세기를 나타내었다.

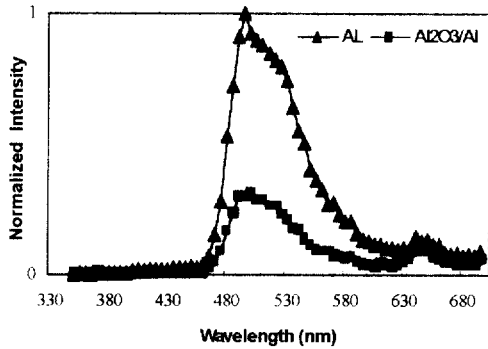


그림 7. 각각 ITO/PVK:PBD:C6/Al 과 ITO/PVK:PBD:C6/Al₂O₃/Al의 유기물 전계발광 소자에서의 EL 스펙트럼

Fig. 7. The EL spectrum of the ITO/PVK:PBD:C6/Al and ITO/PVK:PBD:C6/Al₂O₃/Al Organic LED Device

한편 F. Li등은 Al 진공증착 후 공기중에 Al을 노출시켜 Al₂O₃ 버퍼층을 형성하였으며 유기물 전계발광 소자에서 버퍼층의 두께를 12Å 이내의 두께로 조절하면 알루미늄 음극 전극을 갖는 유기물 전계발광 소자 보다 낮은 임계전압과 높은 EL 세기를 갖고 12Å 이상의 두께를 갖는 버퍼층을 갖는 유기물 전계발광 소자에서는 알루미늄 음극 전극을 갖는 유기물 전계발광 소자 보다 높은 임계 전압과 낮은 EL 세기를 얻었다고 발표^[18] 하여 DC 스피터링을 사용하여 챔버 내에서 형성한 Al₂O₃ 버퍼층을 갖는 결과와 잘 일치 하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 단층 혼합 유기물 발광층 표면 위에 저 전력 DC 스피터링 방법을 사용하여 알루미늄 음극 전극을 증착한 유기물 전계발광 소자를 제작하였다. 또한 일반적인 열 증착 방법을 통하여 형성한 알루미늄 음극 전극을 갖는 유기물 전계발광 소자를 제작하였다. 단층 유기물 발광영역 표면에 저전력 DC 스피터링 방법을 사용하여

Al₂O₃ 버퍼층 및 알루미늄 층을 차례로 증착한 2층 음극 전극을 갖는 유기물 전계발광 소자를 제작하였다.

저 전력 DC 스피터링 방법으로 증착된 알루미늄 음극 전극은 일반적인 열 진공 증착 방법에 비하여 일정한 방향성을 갖는 안정된 알루미늄 음극 전극을 제공하며 높은 EL 세기를 나타낸다. 이러한 결과로부터 DC 스피터링 방법을 사용하여 음극 전극층을 형성한 유기물 전계발광 소자는 일반적으로 사용하는 열 진공증착 방법에 의한 유기물 전계발광 소자보다 우수한 특성을 얻을 수 있을 것으로 사료되며 향후 다양한 금속 합금층을 DC 스피터링 방법을 이용하여 제작할 수 있을 것이다.

또한 DC 스피터링 방법을 사용하여 Al₂O₃ 버퍼층 및 알루미늄 음극층을 차례로 증착한 유기물 전계 발광 소자에서는 알루미늄 음극 전극만을 갖는 유기물 전계 발광 소자에 비하여 높은 임계 전압과 낮은 EL 세기를 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescence diodes", Appl. Phys. Lett. 51, pp. 913, 1987
- [2] A. R. Brown, D. D. C. Bradley, J. H. Burroughes, R. H. Friend, and N. C. Greenham, "PPV Light Emitting diodes :Enhances electroluminescent efficiency through charge carrier confinement", Appl. Phys. Lett. 61 (23), pp. 2793, 1992
- [3] Laura B. Smilowitz, "Conjugated polymers : Modern Electronic Materials", IEEE Circuit and Devices Magazine, pp. 19, January, 1994.
- [4] A. Wu and M. A. Kakimoto, "LEDs Based on PPV and Polyimide LB Films.", Advanced Material, pp. 812, No.9, 1995
- [5] Ardie D. Walser, Igor Sokolik, Richard Priestley, and Roger Dorsinville, "Dynamics of Photoexcited states and charge carriers in organic thin films : AlQ₃", Appl. Phys. Lett. pp.1677, 1996
- [6] D. Ammermann, A. Bohler, S. Dirr, H.

- Johannes, and W. Kowalsky, "Multilayer OLED for Flat Panel Displays", *AEU Int. J. Electron. Commun.* 50, pp. 327, 1996
- [7] James R. Sheats, "Stacked OLED in full color", *Science* pp.191, 1997
- [8] Junji Kido, Masato Kimura, Katsutoshi Nagai, "Multilayer White LED Electroluminescent device", *Science*, Vol.267, pp. 1332, 1995
- [9] J. Kido, H. Shionoya, and Nagai, "Single layer white light emitting organic electroluminescent devices based on dye dispersed poly(N-vinylcarbazole)", *Appl. Phys. Lett.* 67, pp. 2281, 1995
- [10] I. D. Parker, "Carrier tunneling and device characteristics in polymer LED", *J. Appl. Phys.* 75, pp. 1656, 1994
- [11] P. E. Burrows, Z. Shen, V. Bulovic, D. M. McCarty, and S. R. Forrest, "Relationship between electroluminescence and current transport in organic heterojunction LED", *J. Appl. Phys.* 79, pp. 7991, 1996
- [12] G. L. J. A. Rikken, D. Braun, E. G. J. Staring, and R. Demandt, "Schottky effect at a metal-polymer interface", *Appl. Phys. Lett.* 65, pp. 219, 1994
- [13] Y. Gao, K. T. Park, and B. R. Hsieh, *J. Appl. Phys.* 73, 7894, (1993)
- [14] S. A. Jeglinski, O. Amir, X. Wei, Z. V. Vardeny, J. Shinar, T. Cerkevnik, W. Chen, and T. J. Barton, "Symmetric LED from poly(p-diethynylene phenylene) (p-diphenylene vinylene) derivatives", *Appl. Phys. Lett.* 67, pp. 3960, 1995
- [15] P. Bromas, J. Birgersson, N. Johansson, M. Logdlund, and W. R. Salaneck, *Synth. Met.* 74, 179, (1995)
- [16] A. C. Fou, O. Onitsuka, M. Ferreira, M. F. Rubner, and B. R. Hsieh, *J. Appl. Phys.* 79, (1996)
- [17] H. Suzuki and M. Hikita, "OLED with radio frequency sputter-deposited electron injecting electrodes", *Appl. Phys. Lett.* 68, 2276, (1996)
- [18] F. Li, H. Tang, J. Andereg, and J. Shinar, "Fabrication and electroluminescence of double layered OLED with the Al_2O_3/Al cathode", *Appl. Phys. Lett.* 70, pp. 1233, 1997
- [19] G. E. Johnson, K. M. Mcgrane, and M. Stolka, "Electroluminescence from single layer molecularly doped polymer films", *Pure & Appl. Chem.* 67, pp. 175, 1995
- [20] P. E. Burrows, V. Bulovic, S. R. Forrest, L. S. Sapochak, D. M. McCarty, and M. E. Thompson, "Reliability and degradation of organic light emitting devices", *Appl. Phys. Lett.* 65 (23) pp. 2922, 1994
- [21] Y. Yang, Q. Pei, and A. J. Heeger, "Efficient blue polymer LED from a series of soluble poly (paraphenylenes)", *J. Appl. Phys.* 79, pp. 934, 1996
- [22] L. M. Do, E. M. Han, Y. Niidome, and M. Fujihira, "Observation of degradation processes of Al electrodes in OLED by electroluminescence microscopy, atomic force microscopy, scanning electron microscopy, and Auger electron spectroscopy", *J. Appl. Phys.* 76, pp.5118, 1994