

Alq₃에 기초한 유기 발광 소자에서 전기전도특성과 등가회로분석

정동희, 신철기, 이동규, 이준웅, 이석재*, 이원재**, 장경욱**, 김태완***

광운대학교, 연세대학교, 경원전문대학**, 홍익대학교***

Electrical Conduction Mechanism and Equivalent Circuit Analysis in Alq₃ based Organic Light Emitting Diode

Dong-Hoe Chung, Cheol-Gi Shin, Dong-Gyu Lee, Joon-Ung Lee, Suk-Jae Lee*, Won-Jae Lee**, Kyung-Wook Jang**, Tae Wan Kim***

Kwangwoon University, Yonsei University*, Kyungwon College**, Hongik University***

Abstract

We have studied a conduction mechanism and equivalent circuit analysis in Alq₃ based Organic Light Emitting Diode. The conduction mechanism in organic light emitting diode can be classified into three regions: ohmic region, space-charge-limited current (SCLC) region and trap-charge-limited current (TCLC) region depending on the region of applied voltage. Equivalent circuit model of organic light emitting diode can be established using a parallel combination of resistance R_p and capacitance C_p with a small series resistance R_s .

Key Words : organic light emitting diodes, conduction mechanism, equivalent circuit, ohmic region, space-charge-limited current, trap-charge-limited current.

1. 서 론

사람이 생활하는 공간에 필수적으로 갖추어져 있는 기기들 중의 하나가 바로 TV와 컴퓨터와 같은 장치이다. 이들은 꼭 필요하지만 많은 실내 공간을 차지한다. 따라서 기존의 디스플레이 장치보다 공간은 적게 차지하면서도 성능이 뛰어난 디스플레이 장치의 필요성이 대두되게 되었다. 이러한 시대적 필요성에 따라서 유기 EL의 연구가 또한 활발하게 진행되고 있다. 유기 발광 소자는 1987년에 Tang과 VanSlyke가 저분자를 이용하여 녹색 발광을 구현한 이후로 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

우리는 유기 EL 소자의 발광층으로서 많이 사용되고 있는 Alq₃(Tris(8-hydroxyquinolate Aluminun)의 전기 전도 특성과 등가 회로에 대하여 분석하였다. Ma Dongge 등은 에너지 준위와 Mott-Gurney 방정식을 사용하여 전압-전류 특성

을 설명하였다[1]. Sudipto Roy 등은 유기물 층의 등가 회로를 저항 성분과 전기 용량 성분으로 해석하였고[2], J. Pospisil 등은 실험을 통하여 유기물 층은 주파수와 인가 전압에 따라서 합성 임피던스의 구성 성분이 달라진다는 것을 발표하였다. 우리는 Alq₃의 두께 변화에 따른 전기 전도 특성과 합성 임피던스의 등가 회로에 대하여 연구하였다.

2. 실험

본 실험에서 소자의 구조는 ITO/Alq₃/Al로 하였다. 양극으로는 투명 전극으로 알려진 ITO(Indium-Tin-Oxide)를 사용하였고, Al을 음극으로 사용하였다. 전기 전도 특성과 합성 임피던스의 등가 회로 특성은 발광층은 많이 사용되고 있는 Alq₃를 이용하였다. Alq₃의 두께를 각각 60, 80, 100, 200,

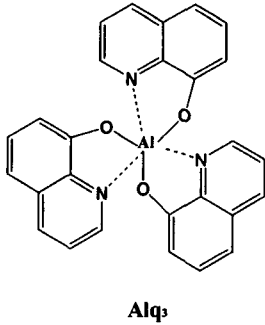


그림 1. Alq₃의 분자 구조.
Fig. 1. Molecular structure of Alq₃.

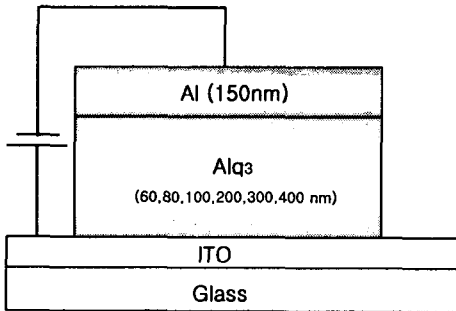


그림 2. ITO/Alq₃/Al의 소자 구조.
Fig. 2. Device structures of ITO/Alq₃/Al.

300, 그리고 400nm로 제작하였다. 그림 1은 본 실험에서 사용한 유기물의 분자 구조를 나타내고 있고 그림 2는 ITO/Alq₃/Al의 소자 구조를 나타내고 있다. 소자의 발광 면적은 15mm²로 하였다.

소자의 전압-전류 특성은 Keithley 236 source-measure unit, 617 electrometer 그리고 Si-photo diode (Centronics Co. OSD100-5T)를 이용하여 측정하였고, 임피던스 분석은 Agilent 4294A precision Impedance Analyzer를 이용하였다. 또한, 두께의 확인과 굴절율의 측정은 PLASMOS ellipsometer을 이용하여 측정하였다.

전압과 주파수에 따른 임피던스 변화를 분석하였다. 인가 전압의 의존성을 알아보기 위하여 주파수를 각각 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 그리고 100 kHz로 고정하고, 전압의 측정 범위를 변화시켜 가면서 측정하였다. 그리고 주파수 의존성을 알아보기 위해서는 바이어스 전압을 고정시키고 주파수를 40 ~ 10⁶MHz로 변화시키면서 측정하였다.

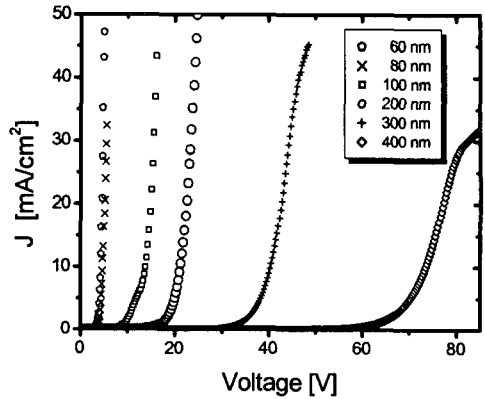


그림 3. ITO/Alq₃/Al 소자 구조에서 두께 변화에 따른 전압-전류 특성.

Fig. 3. Current density-voltage characteristics with thickness variation in ITO/Alq₃/Al device structure.

3. 결과 및 고찰

그림3은 Alq₃의 각각의 두께에 따른 전류-전압 특성을 나타내고 있다.

Ma Dongge 등은 유기물의 전기 전도 특성을 Ohmic 영역, 공간 전하 제한 전류(SCLC) 영역 그리고 트랩 전하 제한 전류(TCLC) 영역등으로 설명하였다. 각각의 모형에서 두께, 전압 그리고 전류에 따른 관계식은 다음의 식으로 설명된다.

$$J_{Ohmic} = en_0\mu \frac{V}{d} \quad (1)$$

$$J_{SCLC} = \frac{9}{8} \epsilon\mu \frac{V^2}{d^3} \quad \text{or} \quad J_{SCLC} = \frac{9}{8} \epsilon\theta\mu \frac{V^2}{d^3} \quad (2)$$

$$J_{TCLC} = \frac{V^{m+1}}{d^{2m+1}} \quad (3)$$

식 (1)은 Ohmic 영역, 식 (2)는 공간 전하 제한 전류 영역 (SCLC), 그리고 식 (3)은 트랩 전하 제한 전류 (TCLC) 영역을 나타내고 있다. 식 (2)의 공간 전류 제한 영역에서 전류가 일정할 때 log (V) vs log (d)의 관계식에서 기울기는 약 1.5가 된다.

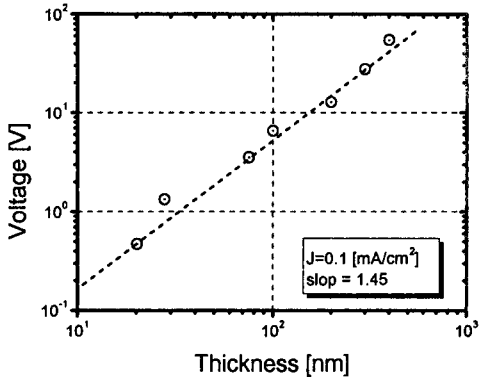


그림 4. SCLC 영역에서 Alq₃의 두께 변화에 따른 전압 vs 전류 특성.

Fig. 4. Current density–thickness characteristics with Alq₃ thickness variation in SCLC region.

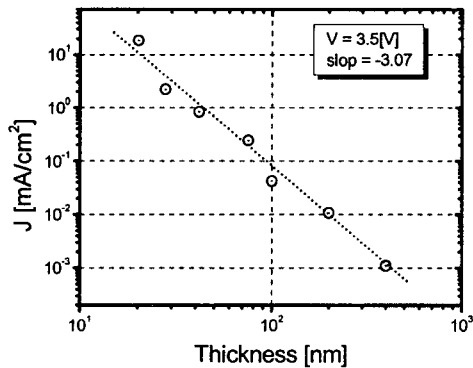


그림 5. SCLC 영역에서 Alq₃의 두께 변화에 따른 두께 vs 전류 특성.

Fig. 5. Voltage–thickness characteristics with Alq₃ thickness variation in SCLC region.

그림 4에서 실험적인 데이터에 의한 기울기 값은 약 1.45로써 이론적인 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 전압이 일정할 경우 식 (2)을 로그 함수로 나타내면 전류와 두께의 관계식에서 기울기는 약 -3의 값을 갖는다. 그림 5에서 실험적인 값은 약 -3.07로 이론적인 값과 거의 일치한다.

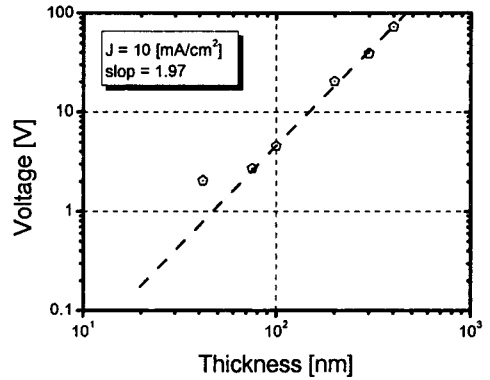


그림 6. TCLC 영역에서 Alq₃의 두께 변화에 따른 두께 vs 전류 특성.

Fig. 6. Voltage–thickness characteristics with Alq₃ thickness variation in TCLC region.

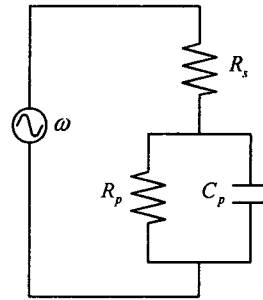


그림 7. ITO/Alq₃/Al 소자 구조의 등가 회로.

Fig. 7. Equivalent circuit of Device structures of ITO/Alq₃/Al device structure.

식 (3)은 트랩 전하 제한 전류 영역(TCLC)에서 전압, 전류 그리고 두께 특성을 나타내고 있다. TCLC 영역에서 전류 밀도가 일정할 경우 $\log(V)$ vs $\log(d)$ 의 기울기는 이론적으로 약 2의 값을 갖으며 실험적으로 분석한 값은 약 1.97으로 분석되었다. 따라서 유기 발광 소자의 전기 전도 메커니즘은 이론적인 값과 실험적인 값이 거의 일치함을 알 수 있다.

ITO/Alq₃/Al의 두께 변화에 따른 등가 회로를 분석하기 위하여, 유기 발광 소자의 발광층을 그림 7과 같은 등가 회로로 가정하였다. 일반적으로 유기물 층의 등가회로는 작은 직렬 저항 R_s 와 큰 병렬 저항 R_p 그리고 병렬 커패시턴스 C_p 로 분석할

수 있다. 여기서 R_s 는 ITO 박막과 유기물 층의 직렬 저항, R_p 는 발광층 bulk 내부의 저항 성분, 그리고 C_p 는 발광층 내부의 bulk 커패시턴스로 가정한다.

그림 7에서 발광층의 합성 임피던스를 구하면,

$$Z = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + j\omega C_p}$$

$$= [R_s + \frac{R_p}{1 + (\omega\tau)^2}] - j [\frac{\omega\tau R_p}{1 + (\omega\tau)^2}] = Z - j Z' \quad (4)$$

여기서, $\tau = R_p C_p$ 라고 하면

$$Z = [R_s + \frac{R_p}{1 + (\omega\tau)^2}], \quad Z' = \frac{\omega\tau R_p}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (5)$$

이 된다. 식 (5)는 다음과 같은 식(6)과 같은 원의 방정식으로 표현할 수 있다.

$$[Z - (R_s + \frac{R_p}{2})]^2 + [Z']^2 = [\frac{R_p}{2}]^2 \quad (6)$$

식 (6)은 중심 $(R_s + R_p/2, 0)$ 에서 반지름 $R_p/2$ 를 갖는 원의 방정식으로 설명하며 이를 $Z - Z'$ 평면에 나타내고 Cole-Cole 반원이라고 부른다.

그림 8은 ITO/Alq₃(100nm)/Al의 구조에서 얻어진 실수부와 허수부를 나타내고 있다. 바이어스 전압은 각각 12V와 18V를 인가하였고, 40 ~ 10⁶Hz 범위의 주파수를 인가하면서 측정하였다. 일반적으로 그림 8은 ITO/Alq₃(100nm)/Al의 구조 Cole-Cole 반원을 나타내고 있으며 실선은 시뮬레이션의 결과 값이고 사각형은 실험적인 분석 값이다. 원호의 반지름은 바이어스 전압 12V가 18V보다 더 크게 도시된다.

그림 8의 분석 결과, ITO와 유기물 계면의 접촉 저항 R_s 는 약 25Ω으로 분석되었다. 그리고 유기물 bulk 내부의 병렬 저항 R_p 값은 바이어스 전압 12V에서 689.2kΩ이고, 18V에서는 72.9kΩ으로 분석되었다. 또한 유기물 bulk 내부의 병렬 커패시턴스 C_p 는 바이어스 전압에 관계없이 약 4.5nF 값을 갖는다.

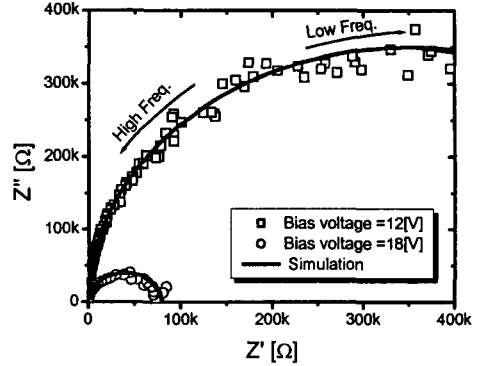


그림 8. ITO/Alq₃(100nm)/Al 소자 구조의 Cole-Cole 반원.

Fig. 8. Cole-Cole semicircular of ITO/Alq₃(100nm)/Al device structure.

4. 결론

유기 발광층으로 많이 사용되고 있는 Alq₃의 두께를 서로 다르게 하여 전기 전도 특성을 분석하였다. 분석의 결과 이론적인 기대값과 실험적인 측정값이 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 발광층의 등가 회로를 알아보기 위하여 소자의 구조를 ITO/Alq₃(100nm)/Al로 하여 비교 분석하여 보았다. 그 결과 원의 방정식과 잘 일치하는 Cole-Cole 반원을 얻을 수 있었고 발광층 내부의 등가 회로를 구할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Ma Dongge and I. A. Hummelgen, "Charge carrier mobility in electroluminescent alternating block copolymers", J. Appl. Phys., Vol. 86, No. 6, pp. 3181-3186, 1999.
- [2] Sudipto Roy, S. Kundu, S.K. Roy, Amlan J. Pal, "Impedance characteristics of layer-by-layer electrostatic self-assembled films of evans blue", Materials Chemistry and Physics, Vol. 77. p. 784, 2002.