

ITO/TPD/Alq₃/Al 유기발광소자의 등가회로 분석

안준호, 오용철, 홍진웅, 이준웅, 송민중*, 김태완**

광운대학교, 광주보건대학*, 홍익대학교**

Equivalent-Circuit Analysis of Organic Light-Emitting Diodes in ITO/TPD/Alq₃/Al

Joon-Ho Ahn, Yong-Chul Oh, Jin-Woong Hong, Joon-Ung Lee and Min Jong Song*, Tae Wan Kim**
Kwangwoon University, Kwangju Health College*, Hongik University**

Abstract

We have investigated equivalent-circuit analysis of organic light-emitting diodes in ITO/TPD/Alq₃/Al. Complex impedance Z of the device was measured in the frequency range of 40Hz~1MHz. We are able to interpret the frequency-dependent response in terms of equivalent-circuit model of contact resistance R_s in series with two parallel combination of R_{TPD} , C_{TPD} and R_{Alq_3} , C_{Alq_3} .

Key Words : organic light-emitting diodes, equivalent-circuit, impedance, double-layer

1. 서론

1963년 M. Pope 등이 안트라센 단결정에서 유기 발광 현상을 관찰한 이후, 유기발광소자 분야의 많은 연구가 진행되었다. 특히 1987년 C.W. Tang과 VanSlyke가 저분자 Alq₃를 이용한 녹색 발광을 구현하였고[1], 1990년 캠브리지 대학교의 Friend 등이 고분자 PPV를 이용한 녹색 유기발광을 구현하였다.

소자의 발광은 주입된 전자와 홀의 재결합으로 인해 발생되며, 주입 메커니즘, 이동 메커니즘, 재결합 과정 등이 유기발광소자에서는 매우 중요하다. 소자의 전도메커니즘을 이해하기 위해 dc와 ac의 전류-전압 특성을 연구하는 것이 필요하다. dc 전류-전압 특성은 소자의 저항응답을 알 수 있고, ac 전류-전압 특성은 인가 전압에 대한 저항성과 용량성 응답을 알 수 있다.

Sudipto Roy 등은 유기물 층의 등가회로를 저항 성분과 전기용량성분으로 해석하였다.[2] 임피던스는 소자에 대한 설명과 전기적 특성 해석에 대한 기초를 제공한다.

또한 J. Pospisil 등은 실험을 통하여 유기물 층은 주파수와 인가전압에 따라서 합성 임피던스의 구성 성분이 달라진다는 것을 발표하였다.[3]

그리고 J. Drechsel 등은 주파수와 전기용량에 대해 (1) 감소영역(낮은 전도성-높은 완화시간), (2) 벌크영역(높은 전도성과 낮은 완화시간), (3) 접촉저항영역의 세 부분으로 나누었다.[4]

본 논문에서는 유기발광소자의 소자의 전압, 주파수에 의존하는 임피던스에 대해 알아보고, 저항과 축전기로 구성된 소자의 등가회로 모형을 구성하고자 한다.

2. 실험

유기물 층으로 사용한 Alq₃(tris(8-hydroxy-quinolate)aluminum)는 TCI사의 제품으로 분자량은 459.44이며 베이스 압력 5×10^{-6} torr의 진공도에서 열 증착하였다.

소자의 전압-전류 특성은 Keithley 236 source-measure unit, 617 electrometer 그리고 Si-photo diode(Centronics Co. OSD100-5T)를 이용하여 측

정하였고, 임피던스 분석은 Agilent 4294A, Precision Impedance Analyzer를 이용하였다.

전압과 주파수에 따른 임피던스를 측정하였다. 주파수 의존성을 알아보기 위하여 주파수를 각각 100Hz, 1kHz, 10kHz, 100kHz로 고정하고, 전압의 측정범위를 -6~14V까지 변화시키면서 측정하였다.

전압 의존성을 알아보기 위하여 바이어스 전압은 -4, -2, 0, 2, 4, 8, 12V로 인가하면서, 각각의 인가 전압에서 주파수를 40Hz~100MHz로 변화시키면서 측정하였고, 교류 진폭은 100mV로 일정하게 유지하였다.

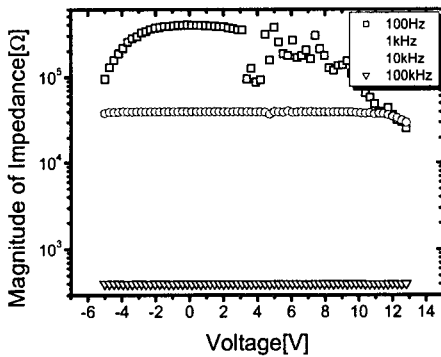


그림 1. ITO/TPD(40nm)/Alq₃(60nm)/Al 소자 구조에서 주파수를 고정시킨 상태에서 인가전압에 따른 임피던스 크기.

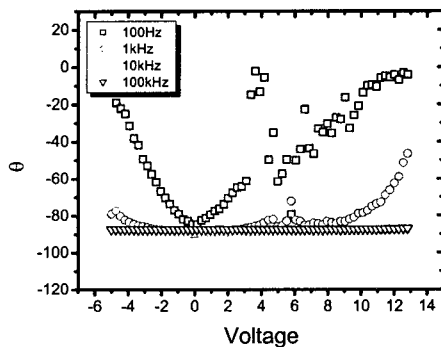


그림 2. ITO/TPD(40nm)/Alq₃(60nm)/Al 소자 구조에서 주파수를 고정시킨 상태에서 인가전압에 변화에 따른 위상각.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 주파수 변화에 따른 임피던스 크기를 나타내고 있다. 주파수가 낮은 100Hz에서는 임피던스 크기가 약 100kΩ~300kΩ, 1kHz에서는 30kΩ, 10kHz에서는 3kΩ, 100kHz에서는 300Ω이다.

그림 2에서는 주파수의 변화에 따른 위상각의 변화를 보여주고 있다. 100Hz에서는 0V에서 약 -83°의 위상각을 보여주고 있으며, 전압이 증가함에 따라 위상각이 0°로 접근한다. 따라서 전압이 낮으면 C_p의 영향으로 용량성의 특성을 나타내고 전압이 증가하여 발광하게 되면 저항 R_p의 특성을 나타낸다. 주파수가 1kHz가 되면 비발광영역은 거의 C_p의 특성을 갖게 되나, 발광 영역에서는 위상각이 약 -40°로써 저항 R_p의 특성과 C_p의 특성이 거의 동일하게 나타난다. 그러나 10kHz와 100kHz

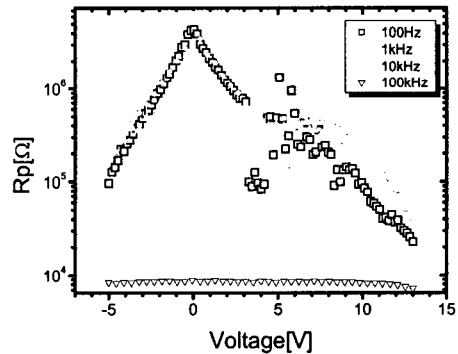


그림 3. 주파수를 고정시킨 상태에서 인가전압에 따른 저항성분 R_p

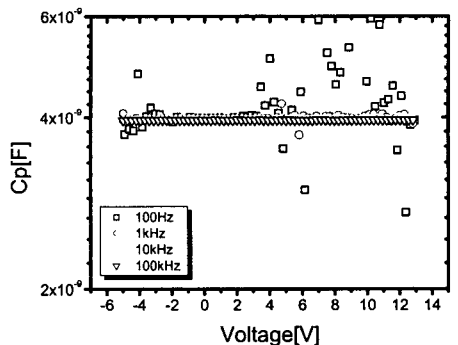


그림 4. 주파수를 고정시킨 상태에서 인가전압에 따른 전기용량 C_p

에서는 전압의 변화에 관계없이 위상각이 -85° 로써 일정한 C_p 의 특성을 나타낸다.

그림 1과 2에서 알 수 있듯이 저주파 영역에서는 저항 R_p 의 영향이 크게 작용하고 주파수가 증가하여 100kHz가 되면 R_p 의 영향은 거의 무시되고 C_p 의 특성만이 나타나게 된다.

그림 1과 2의 합성 임피던스를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$Z = Z_1 + Z_2 = \left[\frac{R_{TPD}}{1 + (\omega R_{TPD} C_{TPD})^2} + \frac{R_{Alq_3}}{1 + (\omega R_{Alq_3} C_{Alq_3})^2} \right] - j \left[\frac{\omega R_{TPD}^2 C_{TPD}}{1 + (\omega R_{TPD} C_{TPD})^2} + \frac{\omega R_{Alq_3}^2 C_{Alq_3}}{1 + (\omega R_{Alq_3} C_{Alq_3})^2} \right] \quad (1)$$

그림 3은 ITO/TPD(40nm)/Alq₃(60nm)/Al 구조에서 TPD/Alq₃ 유기물 등가회로에 대한 R_p 성분

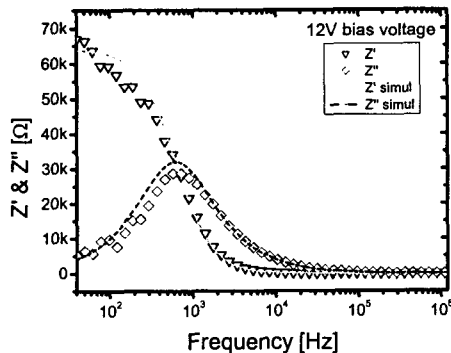
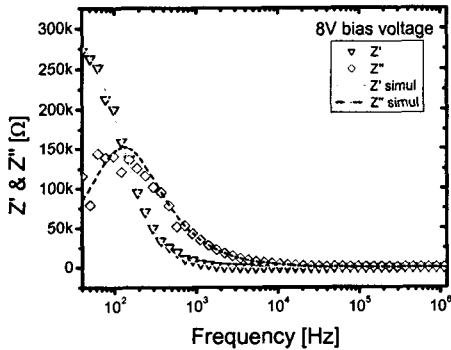
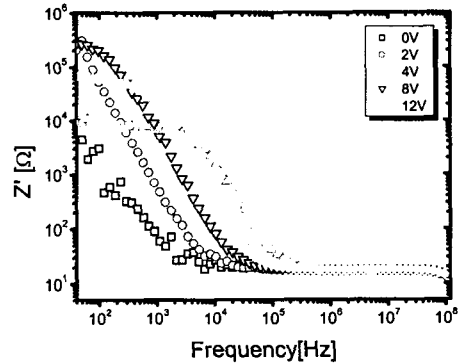


그림 5. 8V와 12V를 인가한 상태에서 주파수에 따른 실수부와 허수부 임피던스 Z' 과 Z''

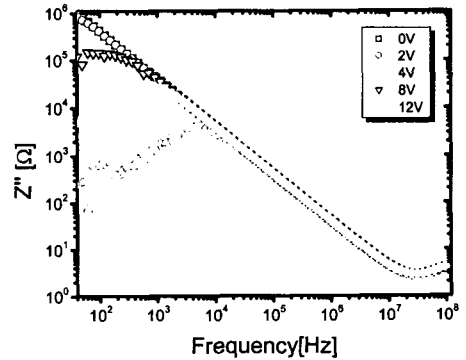
을 나타내고 있다. 저주파 영역에서는 0V에서 저항값이 5MΩ의 피크값을 가지며, 전압이 증가함에 따라 저항은 작아진다. 주파수가 증가할수록 R_p 값이 작아져서 100kHz에서는 모든 전압 범위에서 약 8kΩ의 저항성분을 나타낸다.

그림 4는 ITO/TPD(40nm)/Alq₃(60nm)/Al의 소자 구조에서 등가회로에 대한 C_p 성분을 나타내고 있다. 100Hz에서는 전기용량 C_p 성분보다 저항성분 R_p 가 주된 성분이므로 전기용량 C_p 성분이 불규칙하다. 그러나 1kHz이상의 고주파에서는 C_p 가 거의 일정하다.

한편, 유기물 층의 병렬등가회로는



(a)



(b)

그림 6. ITO/TPD(40nm)/Alq₃(60nm)/Al 소자에 전압을 인가한 상태에서 주파수에 따른 실수부(a)와 허수부(b) 임피던스 Z' 과 Z''

$$Z = Z' + Z'' \quad (2)$$

$$Z' = \frac{R_{TPD}}{1 + (\omega R_{TPD} C_{TPD})^2} + \frac{R_{Alq_3}}{1 + (\omega R_{Alq_3} C_{Alq_3})^2} \quad (3)$$

$$Z'' = -\left[\frac{\omega R_{TPD}^2 C_{TPD}}{1 + (\omega R_{TPD} C_{TPD})^2} + \frac{\omega R_{Alq_3}^2 C_{Alq_3}}{1 + (\omega R_{Alq_3} C_{Alq_3})^2} \right] \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 Z' 과 Z'' 은 각각 실수부와 허수부 임피던스를 나타낸다.

그림 5는 식 (3)과 (4)로 표현되는 주파수에 따른 실수부와 허수부의 임피던스를 나타내고 있다. 주파수가 증가함에 따라서 Z 과 Z' 은 저항성분이 작아져서 절대값이 작아진다. 주파수가 증가하면 $1/\tau$ 가 증가하고, 따라서 $1/\tau$ 가 오른쪽으로 이동하게 된다. (약 200Hz → 700Hz)

그림 6(a)는 주파수에 따른 실수부 임피던스이다. 낮은 주파수(<100Hz)에서는 4V 이상의 전압이 주파수에 대해 독립적인 모습을 보이고, 전압이 증가할수록 주파수에 독립적인 영역이 8V일 때 10^2 Hz, 12V일 때 10^3 Hz로 늘어가는 것을 볼 수 있다. 주파수가 증가할수록 실수부 임피던스 Z 가 감소하는 것을 볼 수 있고(감소영역), 두 번째 평탄면에 이르기 전 갑작스런 감소(벨크영역)가 나타나고 이후 주파수에 대해 다시 독립적인 영역으로 나타난다. 이때 주파수의 범위는 오른쪽으로 이동하여 10^8 Hz 정도이다.

그림 6(b)는 주파수에 따른 허수부 임피던스의 측정값이다. 전압에 따라 강하게 의존하는 것을 알 수 있고, 처음에는 주파수가 증가함에 따라 임피던

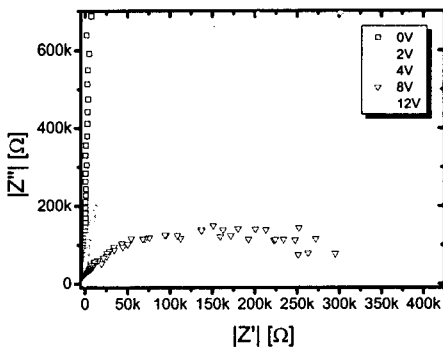


그림 7. ITO/TPD(40nm)/Alq₃(60nm)/Al 소자에 전압을 인가한 상태에서 주파수에 따른 임피던스의 Cole-Cole 그림.

스도 증가하다가 최대점을 지나면서 낮아져 더 높은 주파수에 이르러 다시 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 전압이 높아짐에 따라 임피던스가 줄어드는 것을 알 수 있다.

그림 7은 주파수에 따른 임피던스의 Cole-Cole 반원을 그린 것이다. 발광영역에서 갑자기 원의 반지름이 작아지는 것을 볼 수 있었다.

그림 6과 7에서 4V가 다른 전압과 다른 현상을 보이는 것은 전류-전압 특성 중 부성특성에 의한 현상이라 생각된다.

4. 결론

지금까지 ITO/TPD/Alq₃/Al의 합성 임피던스에 대해 알아보았다. 저주파 영역에서는 저항 R_p 의 영향이 크게 작용하고 주파수가 증가하여 100kHz가 되면 R_p 의 영향은 거의 무시되고 C_p 의 특성만이 나타나게 된다. 또한 주파수가 증가하면 $1/\tau$ 가 그래프 상에서 오른쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 4V에서의 특성이 다른 전압에서와 다른 것은 부성특성으로 기인된 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] C.W Tang and S.A. VanSlyke, "Organic Electroluminescent Diodes", Appl. Phys. Lett. Vol. 51, p. 913, 1987.
- [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.
- [3] J. Pospisil, J. Honskus, J. Fahrnich, P. Hlidek, P. Toman, "Optical and electrical properties of poly(p-phenylene vinylene) light emitting diodes", Journal of Luminescence, Vol. 72, p. 522, 1997.
- [4] J. Drechsel, M. Pfeiffer, X. Zhou, A. Nollau, K. Leo, "Organic Mip-diodes by p-doping of amorphous wide-gap semiconductors: CV and impedance spectroscopy", Synth. Metals. Vol. 127, p. 201, 2002.