

## ITO/Alq<sub>3</sub>/Al의 유기 발광 소자에서 바이어스 전압과 주파수에 따른 전기적 특성

정동희\*, 김상길\*\*, 허성우\*\*, 김광집\*\*\*, 송민중\*\*\*\*, 홍진웅\*, 이준웅\*\*\*\*, 김태완\*\*  
광운대학교\*, 홍익대학교\*\*, 한양대학교 교육대학원\*\*\*, 광주보건대학\*\*\*\*, 한국전기전자재료학회\*\*\*\*\*

### Voltage and frequency dependent electrical properties in organic light-emitting diodes of ITO/Alq<sub>3</sub>/Al

Dong-Hoe Chung\*, Sang-Keol Kim\*\*, Sung-Woo Hur\*\*, Kwang-Jip Kim\*\*\*,  
Min-Jong Song\*\*\*\*, Jin-Woong Hong\*, Joon-Ung Lee\*\*\*\*\*, Tae Wan Kim\*\*  
Kwangwoon Univ.\*, Hongik Univ.\*\*., Hanyang Univ.\*\*\*, Kwangju Health College\*\*\*\*, KIEEME\*\*\*\*\*

#### Abstract

Complex impedances with frequency and voltage variation were analyzed in ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al device structure. At low frequency, complex impedance is mostly expressed by resistive component, and at the high frequency by capacitive component. Also, we have evaluated resistance, capacitance and permittivity.

**Key Words** : Organic light-emitting diodes, Impedance, equivalent circuit

#### 1. 서 론

유기 발광 소자는 1987년에 Tang과 VanSlyke가 저분자를 이용하여 녹색 발광을 구현한 이후로 많은 연구가 진행되어 오고있다[1]. 가장 적합한 디스플레이 장치를 개발하기 위하여 전기 전도 모형을 해석하고 등가 회로에 대한 분석이 필요하게 되었다. 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[3]. 우리는 Alq<sub>3</sub>의 유전율을 계산하여 보고 유기물 층에 주파수와 인가 전압을 변화시켜서 합성 임피던스의 저항 성분과 전기 용량 성분을 비교하여 보았다.

#### 2. 실험

본 실험에서 양극으로는 투명 전극으로 알려진 ITO(Indium-Tin-Oxide)를 사용하였고, Al을 음극으로 사용하여 소자의 구조를 ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al로 하였다. 양극으로 사용한 ITO 기판은 표면 저항이 15 Ω/□이고 두께가 170 nm로 삼성 코닝사에서 제조하였다. 유기물 층으로 사용한 Alq<sub>3</sub> (tris (8-hydroxyquinolate) aluminum)는 TCI사의 제품으로 분자량은 459.44이며 베이스 압력 5×10<sup>-6</sup> torr의 진공도에서 열 증착하였다. 음극으로 사용한 Al도 베이스 압력 5×10<sup>-6</sup> torr의 진공도에서 열 증착하였으며 두께는 150 nm이다. 소자의 발광 면적은 15mm<sup>2</sup>로 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 Aglient 4294A, precis-

ion Impedance Analyzer를 이용하였다.

임피던스 분석은 전압 의존성과 주파수 의존성을 분석하였다. 주파수 의존성을 알아보기 위하여 주파수를 각각 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 그리고 100 kHz로 고정하고, 전압의 측정 범위를 -5~+22 V까지 변화시키면서 측정하였다. 그리고 전압 의존성을 알아보기 위하여 바이어스 전압을 +4 V와 +18 V고 각각 고정시키고 주파수를 40 Hz~100 MHz로 변화시키면서 측정하였고, OSC =100 mV로 일정하게 유지하였다. 한편, 두께의 확인과 굴절율의 측정은 PLASMOS ellipsometer을 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

유기 발광 소자의 유기물 층에 대하여 병렬 등가 회로로 가정하고, 전기적으로 저항 성분  $R_p$ 와 전기 용량 성분  $C_p$ 가 결합된 회로로 구성할 수 있다. 그림 1과 2는 ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al 소자를 합성 임피던스 성분으로 측정된 결과이다.

그림 1은 주파수 변화에 따른 임피던스 크기를 나타내고 있다. 주파수가 낮은 100 Hz에서는 임피던스의 크기가 약 110k $\Omega$ ~200 k $\Omega$ , 1 kHz에서는 35 k $\Omega$ , 10 kHz에서는 3.5 k $\Omega$ , 그리고 100 kHz에서는 350  $\Omega$ 이다.

그림 2에서는 주파수의 변화에 따른 위상각  $\theta$ 의 변화를 보여주고 있다. 100 Hz의 0 V에서 위상각은 약 -74°이다. 그러나 전압이 증가함에 따라서 점차적으로 위상각이 0°로 접근한다. 따라서 전압이 낮으면  $C_p$ 의 영향으로 용량성의 특성을 나타내고 전압이 증가하여 발광하게 되면 저항  $R_p$ 의 특성을 나타낸다. 주파수가 1 kHz가 되면 비발광 영역은 거의  $C_p$ 의 특성을 갖으나 발광 영역에서는 위상각이 약 -45°로써 저항  $R_p$ 의 특성과  $C_p$ 의 특성을 동일하게 나타낸다. 그러나 100 kHz에서는 전압 변화에 관계없이 위상각이 -89°로써 일정한  $C_p$ 의 특성을 나타낸다. 그림 1과 2에서 알 수 있듯이 저주파 영역에서는 저항  $R_p$ 의 영향이 크게 작용하고 주파수가 증가하여 100 kHz가 되면  $R_p$ 의 영향은 거의 무시되고  $C_p$ 의 특성만 나타난다.

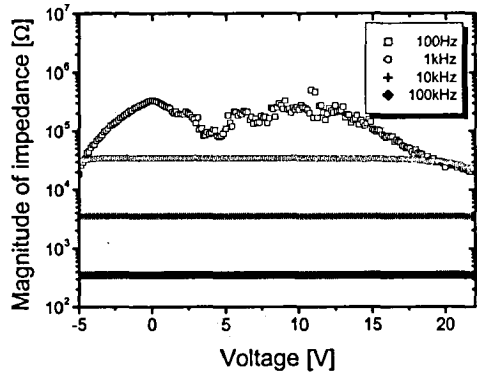


그림 1. ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al 소자 구조에서 주파수 변화에 따른 임피던스 크기.

Fig. 1. Magnitude of impedance with frequency variation in ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al device structure.

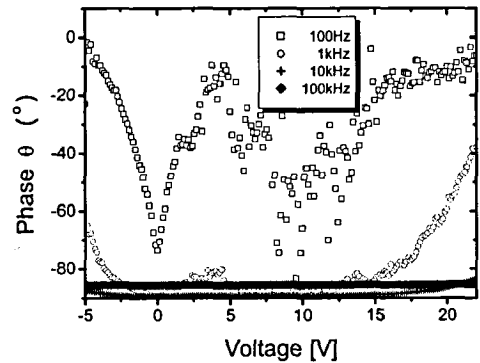


그림 2. ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al 소자 구조에서 주파수 변화에 따른 위상각  $\theta$ .

Fig. 2. Phase  $\theta$  with frequency variation in ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al device structure.

그림 1과 2의 합성 임피던스를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_p}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p \quad (1)$$

여기서  $R_p$ 와  $C_p$ 는 그림 3과 4로 측정되었다. 식 (1)에서 합성 임피던스를 구하면

$$Z = \frac{R_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} - j \frac{\omega R_p^2 C_p}{1 + (\omega R_p C_p)^2} \quad (2)$$

이다. 식 (2)에서  $\tau = R_p C_p$  라고 정의하면,

$$Z = \frac{R_p}{1 + (\omega\tau)^2} - j \frac{\omega R_p \tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (3)$$

이다. 식 (3)에서 임피던스의 크기  $|Z|$ 와 위상각  $\theta$ 을 구하면,

$$|Z| = \frac{R_p}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (4)$$

$$\theta = -\tan^{-1}(\omega\tau) \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 이용하여 ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al 구조에 대하여 측정된 임피던스의 크기와 위상각이 그림 1과 2이다.

그림 3은 ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al 구조에서 Alq<sub>3</sub> 유기물의 등가 회로에 대한  $R_p$  성분을 나타내고 있다. 저주파 영역에서는 0 V에서 저항값이 1 M $\Omega$ 인 피크 값을 갖으며, 전압이 증가함에 따라서 저항은 작아진다. 주파수가 증가할수록  $R_p$ 의 값이 작아져서 100 kHz에서는 모든 전압 범위에서 약 4.5 k $\Omega$ 의 저항 성분을 나타낸다.

그림 4는 ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al의 소자에서 등가 회로에 대한  $C_p$  성분을 나타내고 있다. 100 Hz에서는 전기 용량  $C_p$  성분보다 저항 성분  $R_p$ 가 주된 성분이므로 전기 용량  $C_p$  성분이 불규칙하다. 그러나 1 kHz 이상의 고주파에서는  $C_p$ 가 거의 일정하다. 본 연구에서 분석한 전기 용량은  $C_p \approx 4.5$  nF이다. 전기 용량은 다음의 수식으로 나타낼 수 있다.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (6)$$

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (7)$$

여기서,  $A$ 는 Alq<sub>3</sub>의 면적( $15 \times 10^{-6} \text{m}^2$ ),  $d$ 는 Alq<sub>3</sub>의 두께(112 nm),  $\epsilon_r$ 은 Alq<sub>3</sub>의 비유전율,  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율이다. 식 (6)과 (7)을 이용하여 Alq<sub>3</sub>의 비유전율을 구하면  $\epsilon_r = 3.79$  이고 굴절율을  $n = 1.94$ 이다. 한편 ellipsometer을 이용하여 측정된 굴절율은 1.71로써 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 5는 주파수 변화에 따른 전압-전류 특성을 나타내고 있다. 측정된 직류  $I$ - $V$  특성과 비교하여 보면, 100 Hz가 가장 유사하고, 주파수가 증가함에

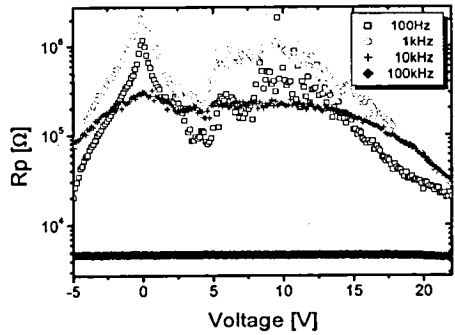


그림 3. 주파수 변화에 따른 저항 성분  $R_p$   
Fig. 3. Resist component  $R_p$  with frequency variation.

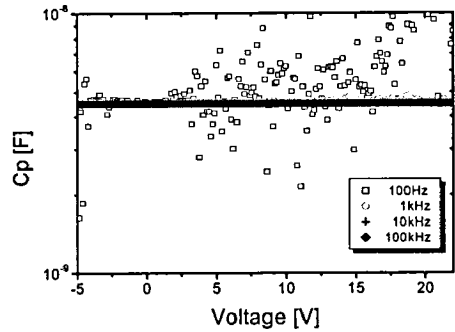


그림 4. 주파수 변화에 따른 전기 용량  $C_p$   
Fig. 4. Capacitance  $C_p$  with frequency variation.

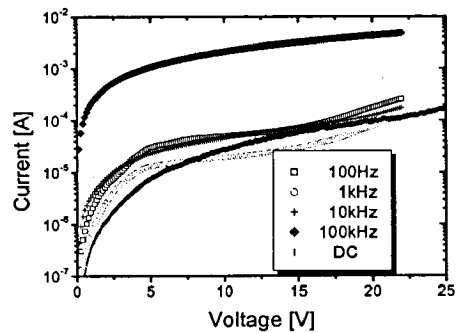


그림 5. 주파수 변화에 따른 전압-전류 특성.  
Fig. 5. Current-voltage characteristics with frequency variation.

따라서 점점 다른  $I-V$  특성을 나타낸다. 특히 100 kHz의 경우에는, 측정된 직류  $I-V$  특성과 전혀 다른 값을 나타낸다.

한편, 유기물 층의 병렬 등가 회로는

$$\dot{Z} = Z' + jZ'' \quad (8)$$

$$Z' = \frac{R}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad Z'' = -\frac{\omega\tau R}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다.

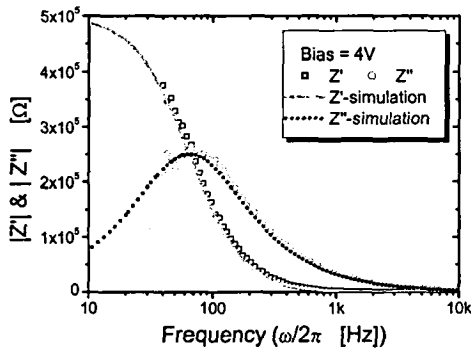


그림 6. 바이어스 전압에 따른 병렬 등가 회로.  
Fig. 6. Parallel equivalent circuit with bias voltage.

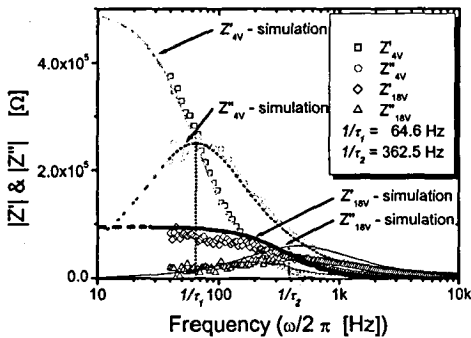


그림 7. 전압 변화에 따른 실수부와 허수부.  
Fig. 7. Real part and imaginary part with voltage variation.

그림 7은 식 (8)과 (9)로 표현되는 것으로써 바이어스 전압(bias voltage)이 4 V일 때 주파수 변화에 따른 실수부와 허수부 임피던스를 나타내고 있다. 바이어스 전압이 증가함에 따라서  $Z'$ 와  $Z''$

은 저항 성분이 작아져서 절대값은 작아진다. 주파수가 증가하면  $1/\tau$ 가 증가하고, 따라서  $1/\tau$ 가 오른쪽으로 이동하게 된다.

그림 8의 저주파 영역에서 실수부의 크기  $Z'$ 는 바이어스 전압 4 V에서는 약 500 kΩ이다. 같은 저주파 영역에서 18 V의 바이어스 영역에서는 실수부  $Z'$ 가 약 100 kΩ으로 약 1/5로 작아졌다.  $1/\tau$ 의 크기는 바이어스 전압이 4 V일 때는 64.6 Hz이고 18 V에서는 362.5 Hz로 증가하였다.

#### 4. 결론

ITO/Alq<sub>3</sub>(100nm)/Al 구조 소자의 임피던스 분석을 통하여 등가 회로를 구성하여 보았다. 병렬 등가 회로에서 주파수 의존성을 보면, 100 Hz에서는 주로 저항 성분의 특성이 회로의  $I-V$  특성을 결정짓는다. 그러나 주파수가 증가함에 따라서 전기 용량 성분이 주로 회로의 특성을 결정한다. 또한 ellipsometer을 이용하여 측정된 유전율과 임피던스 분석을 통한 유전율을 계산하여 보았다. 그리고 바이어스 전압의 증가에 따라서 병렬 등가 회로의 임피던스가 감소하는 반면에  $1/\tau$ 가 오른쪽으로 증가함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년 산업자원부 지원 과제(고효율 고분자 EL 재료의 개발)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 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.