

후막 전계발광소자의 전기적 등가 모델링

Electrical Equivalent modeling of Powder Electroluminescent Device

이종찬, 박대희

원광대학교 전기공학부

Jong-chan Lee, Dae-hee Park

School of Electrical Engineering Wonkwang University

Abstract

In this paper, to implement the electrical equivalent modeling of powder electroluminescent device, capacitance equation of device was chosen. The conventional structure device which have dielectric and phosphor layer between electrodes, and the single emission structure device which means that dielectric and phosphor were mixed between electrodes, were investigated. As a result, It was possible to make the equation that is transferred capacitance to phosphor layer, and using measured brightness efficiency and conductivity of devices was calculated.

1. 서 론

전계발광(Electroluminescence, EL) 현상은 형광체에 MV/cm 이상의 고전계가 가해지면 가속된 고에너지의 전자가 형광체 내부에 첨가된 발광층의 전자를 충돌 여기시켜 천이 될 때 일어나는 광 방사현상을 총칭한다 [1]. 이 현상은 에너지이론, 결정이론 등의 고체이론과 결정분광학의 도움으로 연구에 큰 진보가 되어왔으며, 빛의 투과도와 전기 전도도가 높은 전극재료 개발과 반도체 박막기술의 개선과 함께 1950년대 후반부터 실질적인 응용소자에 대해 연구개발 되어왔다. EL 소자는 능동형 고체 발광소자로서 휘도, 색대비, 시야각, 응답속도, 내환경 등이 뛰어난 특성을 지니면서, 동시에 얇고 가벼우며, magnetic radiation이 없고, X-ray 발생이 없는 장점을 함께 지닌다. 최근에는 대형 평판 표시장치로 EL을 이용한 가능성이 높다는 것을 인식하고 EL 소자에 관하여 많은 연구가 되고 있으며, 발전을 이루고 있다 [2~3]. 현재 EL 소자의 재료에 대한 관심은 화학 양론적 조성을 얻어낼 수 있는 공정법의 개발과 다른 종류의 발광재료와 적어도 두 층 이상의 적층구조를 형성하여 결정성이나 구조성을 개선시키는 방향으로 이루어지고 있다. 즉 결정성과 유전특성이 우수한 하부층을 형성하고 여기에 상부 주 발광층을 형성하므로써 주 발광층의 성능을 향상시킬 수 있다는 것과 적층 구조를 이용하여 다수의 계면 상태를 유발하고 그 효과의 하나로서 EL 발광과정

에서 일차전자로 작용하는 계면 포획 전자수를 증가시킬 수 있다는 것이다. 즉 EL 소자 구조 설계시에 유전층/발광층을 연속적층하여 휘도와 효율을 크게 향상시키는 방법이다 [4]. 응용화에서는 반도체 박막, 후막 공정기술과 유전체, 형광체, 전극 재료의 특성을 바탕으로 박막 전계발광소자(Thin film electroluminescent device, TFELD)는 매트릭스 구동 형태의 표시소자가 실현화 되었지만, 후막 전계발광소자(Powder electroluminescent device, PELD)는 단순공정 기술과 더불어 비발광성 표시소자의 저휘도 backlight로만 이용되어 왔다.

후막 전계발광(EL)소자의 등가 모델링은 제작공정 및 소자의 특성 평가의 정현화미비로 인하여 부족한 상황이다. 본 논문에서는 후막 전계발광(EL)소자의 전기적 등가 모델링을 구현하기 위하여, 소자의 용량적인 수식을 채택했다. 그리고 전극 사이에 유전층/형광층을 갖는 전형적인 소자 구조와 유전층과 형광층이 혼합된 단일 발광층 구조의 소자들을 평가하였다. 특히 형광층에 전달되는 캐패시턴스를 수식화하였고, 측정된 휘도를 이용하여 소자의 효율과 전도도를 계산하였다.

2. 등가회로 모델링

AC로 동작하는 PELD는 전형적으로 그림 1에 나타난 바와 같이 서로 직교하는 두 전극사이에 삽입된 형광층 / 유전층 구조로 구성되어 있다. 그림 1에 보이는 PELD에 대한 이상적인 등가회로는

그림2와 같다.

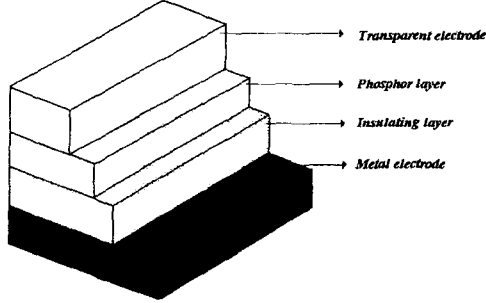


그림 1 일반적인 PELED의 구조

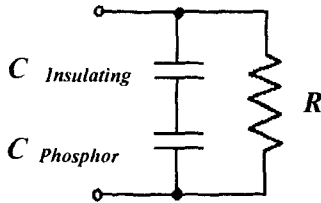


그림 2 PELED의 등가회로

2.1 전압-캐패시턴스를 이용한 이상적 등가 모델링

PELED의 등가회로에서 인가전압의 크기가 발광 문턱전압 이하인 경우 인가전압 V_{Total} 는

$$V_{Total} = V_{Phosphor_layer} + V_{Insulating_layer} \quad (1)$$

이다. 한 개의 사각파형 전압이 인가된 경우를 가정하면 초기에 전압은 용량적으로 분배되어 형광층에 인가되는 전압 $V_{PL_initial}$ 와 $V_{IL_initial}$ 는 각각

$$V_{PL_initial} = V_{Total} \cdot \left(\frac{C_{IL}}{C_{IL} + C_{PL}} \right) \quad (2)$$

$$V_{IL_initial} = V_{Total} \cdot \left(\frac{C_{PL}}{C_{IL} + C_{PL}} \right) \quad (3)$$

이다. 여기서 $C_{PL} = \frac{\epsilon_{PL} \cdot A}{t_{PL}}$, $C_{IL} = \frac{\epsilon_{IL} \cdot A}{t_{IL}}$

이고 A 는 소자의 면적, ϵ 는 형광체, 유전체의 유전률, t 는 각 층의 두께이다.

인가전압이 발광 전압 이상인 경우, 즉 $V_{PL_initial}$ 가 문턱전압 $V_{PL_threshold}$ 이상인 경우에는 형광층 내부로 순간적 전하가 흐르면서 빛이 방출되고 형광층에 인가된 전압이 발광 문턱 값으로 환원될 때까지 유전체가 충전된다. 각 층에 인가되는 최종전압 V_{PL_final} 와 V_{IL_final} 는 식 (4)과 식

(5)로

$$V_{PL_final} = V_{PL_threshold} \quad (4)$$

$$V_{IL_final} = V_{Total} - V_{PL_threshold} \quad (5)$$

주어진다. 발광시 형광체에서 유전체로 전달되는 전압 ΔV 는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_{IL_final} - V_{IL_initial} \\ &= V_{PL_initial} - V_{PL_final} \\ &= V_{PL_initial} - V_{PL_threshold} \end{aligned} \quad (6)$$

발광이 발생하는 외부 문턱전압을 $V_{Total_threshold}$ 로 나타내면 ΔV 는 아래의 식 (7)로 표현되는데

$$\Delta V = (V_{Total} - V_{Total_threshold}) \cdot \left(\frac{C_{IL}}{C_{IL} + C_{PL}} \right) \quad (7)$$

이 ΔV 에 해당하는 전하량 ΔQ 는 식 (8)으로

$$\Delta Q = C_{IL} (V_{Total} - V_{Total_threshold}) = \int_0^{\tau} I_{PL} dt \quad (8)$$

주어진다.

이와 같은 상황에서 동일한 진폭과 극성을 갖는 두 번째 사각파형 전압을 인가하는 경우 형광층에 인가되는 초기 전압 $V_{PL_second_initial}$ 는 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{PL_second_initial} &= V_{Total} - V_{IL_previous} \\ &= V_{Total} - (V_{Total} - V_{PL_threshold}) \\ &= V_{PL_threshold} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에 따르면 전도현상이 일어나지 못하고 EL현상이 일어나지 않는다. 그러나 동일진폭의 반대극성의 펄스전압이 인가되고 계면과 내부 유전체에 포획되어 있던 잔류 전하 Q 가 감소되지 않았다고 가정하면, 형광층에 인가된 초기전압 $V_{PL_second_initial}$ 와 최종전압 $V_{PL_second_final}$ 는 각각 식 (10)

$$\begin{aligned} V_{PL_second_initial} &= \frac{\Delta Q}{C_{IL} + C_{PL}} \\ &+ V_{Total} \cdot \frac{C_{IL}}{C_{IL} + C_{PL}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V_{PL_second_final} &= V_{PL_threshold} \\ &= V_{Total_threshold} \cdot \frac{C_{IL}}{C_{IL} + C_{PL}} \end{aligned} \quad (11)$$

과 (11)으로 주어진다. 여기서 식 (6)에 (10), (11)을 대입하면 유전체로 전달된 전압은 식 (12)와 같이 된다.

$$\Delta V' = 2 \cdot (V_{Total} - V_{Total_threshold}) \cdot \left(\frac{C_{IL}}{C_{IL} + C_{PL}} \right) \quad (12)$$

결국 극성이 바뀌는 AC 사각파형 전압을 계속 해서 인가하는 경우 $\Delta V'$ 크기의 전압이 전달된다. AC 사각파형 전압 구동시 정상상태에서 형광층에 전달되는 전압과 전하량은 각각 식 (13), (14)로 주어진다.

$$\Delta V = 2 \cdot (V_{Total} - V_{Total_threshold}) \cdot \left(\frac{C_{IL}}{C_{IL} + C_{PL}} \right) \quad (13)$$

$$\Delta Q = 2 \cdot C_{IL} (V_{Total} - V_{Total_threshold}) \quad (14)$$

이전 논문[5]에서 새롭게 제안한 유전체와 형광체를 같은 비율로 혼합한 단일 발광층 구조의 소자는 각각의 층이 존재하지 않기 때문에 식 (13)과 (14)에 나타난 형광층으로 전달되는 캐패시턴스 항을 소자의 단일층 캐패시턴스 항으로 단순화하여 식 (15), (16)과 같이 소자의 내부 전압, 전하량을 나타낼 수 있다.

$$\Delta V \cong 2 \cdot (V_{Total} - V_{Total_threshold}) \cdot C_{Total} \quad (15)$$

$$\Delta Q \cong 2 \cdot C_{Total} (V_{Total} - V_{Total_threshold}) \quad (16)$$

2.2 PELED의 휘도와 전도도 계산

형광층 표면에 공급되는 전력과 형광층의 효율 η 가 주어지면 이로부터 휘도를 계산할 수 있다. 그림 3 (a)에서와 같이, 전계에 대한 발광 패턴은 원형 구조를 갖는다. 또한, 많은 소자들이 배열로 이루어진 하나의 화소는 비록 정사각형홀로 패턴닝되어 있지만, 실제 발광 패턴은 거의 원에 가까워서 이에 대해서도 같은 휘도계산법을 적용할 수 있다. 위치 r 인 지점에서 미소 면적 dS 의 전류밀도와 전위가 각각 $J(r)$ 와 $V(r)$ 라면, 이로 인한 광속(F : luminous flux)은

$$\begin{aligned} F &\equiv \eta P(r) \\ &= \eta I(r)V(r) \\ &= \eta J(r)V(r) dS \quad [\text{lumen}] \end{aligned} \quad (17)$$

로 주어진다. 여기서, η 와 $P(r)$ 는 각각 형광층의 효율(lumen/W)과 방출된 전자에 의해 형광층 표면으로 공급되는 전력을 나타낸다. 발광부 전면에 의한 광속을 F_T 라고 하면,

$$\begin{aligned} F_T &= \eta \int_S J(r)V(r) dS \\ &= 2\pi\eta \int_0^d r J(r)V(r) dr \quad [\text{lumen}] \end{aligned} \quad (18)$$

가 된다. 여기서 d 는 발광부의 반경이다.

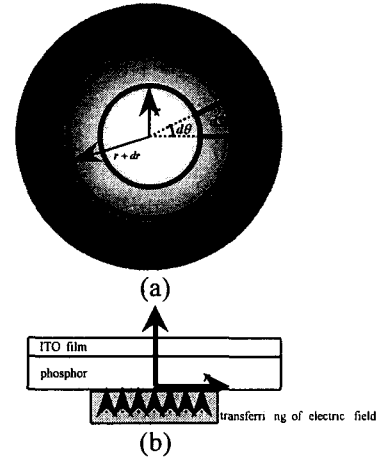


그림 3 형광층의 휘도 계산을 위한 개략도: (a) 윗면, (b) 옆면

따라서, 총 광속으로부터 휘도를 계산하는 식은 다음과 같아진다.

$$L \cong \frac{F_T}{\pi A} = \frac{2\eta}{A} \int_0^d r J(r)V(r) dr \quad [\text{cd/m}^2] \quad (19)$$

여기서, A 는 발광부의 면적을 가리키며, πd^2 와 같다. 식 (19)는 형광층에 공급되는 전력이 위치의 함수로 주어졌을 때의 휘도를 계산하는 일반식이다. 만약, 형광체 표면에 공급되는 단위 면적당 공급되는 전력, 즉 전력밀도가 위치에 무관하게 거의 일정하다면,

$$L = \frac{\eta J V}{\pi A} \int_S dS = \frac{\eta}{\pi A} IV \quad [\text{cd/m}^2] \quad (20)$$

과 같은 휘도 관계식이 얻어진다.

형광층의 전도도는 형광체 자체의 발광 메커니즘을 이해하는 데에 중요한 요소이다. 게다가 PELED의 경우에 전도도는 광학적 특성과 결부되어 EL특성에 영향을 미치므로, 소자의 전도도를 계산하는 방법에 대하여 생각하게 되었다. 형광층의 전도도 측정은, 단순히 전도성 기판 위에 증착된 형광층과 금속판을 얹고서 직접 측정하는 것 외에 다른 방법이 없었다. 하지만, 이러한 방법은 금속판에 가해지는 압력에 따라 막의 구조가 영향을 받아 전도도가 변하게 된다. 특히 본 논문에서 새롭게 제시한 유전체와 형광체를 같은 비율로 혼합한 단일 발광층 구조의 PELED는 위와 같은 방법론 신뢰할 만한 값을 얻기 어렵다. 이런 문제를 극복하기 위해, 간접적인 계산 방법을 생각하게 되었다. 기존 구조의 WK-A 모델의 PELED 휘도는 식 (20)으로부터 다음과 같이 사용 가능 하다.

$$L \cong \frac{\eta}{\pi A} V_{EL} I_{EL} \quad [\text{cd/m}^2] \quad (21)$$

여기서, V_{EL} 와 I_{EL} 은 각각 PELED에 인가되는

전압과 전류를 가리킨다.

유전층과 형광층, 각층의 계면으로 인한 전압 강하를 고려하면, 위의 식은 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L = \frac{\eta}{\pi A} V_{EL} I_{EL} \quad (22)$$

$$= \frac{\eta}{\pi A} (V_{EL} - R_i I_{EL}) I_{EL}$$

여기서, R_i 는 소자내부의 유효 저항으로 $R_i = T / \sigma A$ 이다. 식 (22)에서, PELD의 휘도를 고정된 전압하에서 측정하면 전류에 대해 2차 함수로 주어지고, 고정된 전류하에서 측정하면 전압에 대해 1차 함수로 나타난다. 유효저항의 식을 이용하여 PELD의 전도도를 계산하면

$$\sigma = \frac{t I_{EL}}{A V_{EL}} \quad (23)$$

가 된다. 여기서, t 는 소자의 두께이고, A 는 소자의 발광 면적이다.

3. 결 론

본 논문에서 유추한 계산식을 유전층과 형광층으로 각각 구성된 소자와 단일 혼합층 구조의 소자의 실험[5] 데이터에 적용하면 표 1과 같다. 후막 전계발광소자의 휘도와 효율, 전도도의 관계에서 전극사이에서도 역시 유전층과 형광층이 혼합된 단일층 구조의 소자가 더 낫은 결과를 갖았다. 또한 이와 같은 결과는 광학적인 측정과 소자의 구조에 따른 전기적인 해석에 유용할 것으로 생각된다.

표1. 휘도를 이용한 소자의 전도도

항목	유전층/형광층 구조	단일 발광층 구조
전류 [A]	0.01	0.025
전압 [V _{rms}]	70.7	70.7
휘도 [cd/m ²]	208	2754
효율 [lm/w]	0.29	1.08
두께 [mm]	80×10 ⁻⁶	80×10 ⁻⁶
면적 [mm ²]	3.14×10 ⁻⁴	3.14×10 ⁻⁴
전도도 [Ω ⁻¹ m ⁻¹]	3.6×10 ⁻⁵	9.00×10 ⁻⁵

[참 고 문 헌]

[1] B. M. Sinel'nikov, T. V. Ishchenko, L. N. Krivosheeva, A. B. Sautiev, A. A. Mikhalev and V. M. Ishchenko, "Electroluminescence character-

istics of Mn-doped ZnS-ZnTe solid solutions", *Inorganic Materials*, Vol. 32, No. 9, pp.947~949, 1996

[2] Wang Zong-Xin and Felix Cardon, "A method for evaluating the frequency characteristics of ac thin film electroluminescent devices", *Journal of Applied Physics*, Vol. 28, pp. 2144~2149, 1995

[3] Yuri Nakatani and Takeo Suzuki, "Light waveform in time domain and relaxation mechanism of ZnS:Cu,Br dispersive electroluminescent devices", *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-letters*, Vol. 35, N. 12B, pp. 1669~1672, 1996

[4] L. Yourukova, K. Kolentsov, A. Rachkova, N. Koprinarov, G. Pchelarov, M. Konstantinova, R. Stefanov, "Investigation of a.c. electroluminescent structures with fullerene inclusions", *Synthetic Metals*, Vol. 77, pp. 43~45, 1996

[5] 이종찬, 박용규, 박대희, "ZnS:Cu를 이용한 후막 전계발광소자에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 121~124, 1998