

## High brightness property of Powder Electroluminescent Device using ZnS:Cu

李鐘燦\*, 朴大熙\*\*

(Jong-chan Lee, Dae-hee Park)

**Abstract** - In this paper, to fabricate the AC powder electroluminescent device (PELD) with high brightness, new structure that constructed single emissive layer between electrodes was proposed. Dielectric and phosphor material were BaTiO<sub>3</sub> and ZnS:Cu respectively. Fabricated AC powder EL devices were estimated by optical and electrical properties of EL spectrum, brightness, CIE coordinate system, transferred charge density and EL emission wave in time domain. With above results, we found that brightness of newly proposed AC powder EL device was 2754 cd/m<sup>2</sup> at 100V, 400 Hz and compared with conventional device structure.

**Key Words** :High brightness, Powder EL, Electrical properties, Charge density

### 1. 서 론

전계발광(Electroluminescence, EL) 현상은 발광다이오드(Light emitting diode, LED)와 레이저 다이오드(Laser diode, LD) 같이 전류로 발광하는 주입형 EL과 전계로 발광하는 진성 EL로 구분되며, 일반적으로 EL은 진성 EL을 일컫는 경우가 많다. EL은 형광체에 수 MV/cm 이상의 고전계가 가해지면 가속된 고 에너지의 전자가 형광체 내부에 첨가된 발광 중심의 전자를 충돌 여기시켜 천이 될 때 일어나는 발광현상이다 [1~3]. 이 현상은 에너지와 결정이론 등의 고체이론과 결정분광학의 도움으로 연구개발에 진보가 되어왔으며, 빛의 투과도와 전기 전도도가 높은 전극재료 개발과 반도체 박막 기술의 개선과 함께 1950년대 후반부터 실질적인 응용소자에 대해 연구개발 되어왔다.

EL 소자는 능동형 고체 발광소자로서 휘도, 색대비, 시야각, 응답속도, 내환경 등이 뛰어난 특성을 갖고, 동시에 얇고 가벼우며, magnetic radiation이 없고, X-ray 발생이 없는 장점을 함께 지닌다. 최근에는 대형 평판 표시장치로 EL을 이용할 가능성이 높아 많은 연구가 진행되고 있다 [4~8].

전기적으로 용량 특성을 가지는 EL 소자는 제작 방법, 구조, 공급전원 등에 따라 여러 형태로 분류된다. 특히 형광층의 두께에 따라 후막 EL 소자(Powder EL Device, PELD)와 박막 EL 소자(Thin film EL device, TFELD), 공급 전원에 따라 AC, DC 형태로 구분된다.

EL소자의 기본 구조는 MIS(Metal/Insulator/Semiconductor), MSI(Metal/Insulator/Semiconductor/Insulator)로 구

분되고 [9], 사용되는 유전체는 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>를 많이 사용해 왔으나, 최근에는 BaTiO<sub>3</sub>, PbTiO<sub>3</sub>와 같이 높은 유전율을 가지는 세라믹 유전체를 사용하여 문턱전압이 낮은 소자가 제조되고 있다. 형광체는 황화 아연(ZnS)이나 알칼리 토금속의 황화물 (SrS, CaS) 등의 매트릭스 물질에 희토류 금속이나 전이금속, 또는 그들의 할로겐화합물을 활성제로 미량 첨가하여 사용한다. 투명전극은 SnO<sub>2</sub> 또는 ITO(indium tin oxide)를 유리판이나 투명필름에 증착하여 만든 것을 사용한다.

현재 EL 소자의 휘도 향상 연구는 두 층 이상의 적층구조를 갖고 층의 결정성이나 층의 구조를 개선시키는 방향으로 진행되고 있으며, 또한 결정성과 유전특성이 우수한 하부층을 갖게 하여 주 발광층의 성능을 향상시키고 있다. 소자의 적층 구조를 이용하면 다수의 계면 상태를 갖게 되고 그 효과로 EL 발광과정에서 일차전자로 작용하는 계면 포획 전자수를 증가시킬 수 있다 [10~14].

본 논문에서는 고휘도의 Powder EL소자를 구현하기 위하여 기존의 배면전극 / 유전층 / 형광층 / 투명전극 구조를 변경하여, 형광체와 유전체를 같은 비율로 혼합한 단일 발광층 구조의 소자를 제안하였다. 소자들의 평가는 EL 스펙트럼, 휘도, CIE 좌표, 발광파형, 이동전하밀도등과 같은 광학적, 전기적인 특성을 측정하였다. 또한 단일층의 구조를 갖는 EL소자의 인가전압에 따른 EL 발광과 이동전하밀도를 측정하고, 발광현상을 검토하였다.

### 2. 실 험

#### 2.1 소자제작

EL소자 제작은 그림 1과 같은 스프인코팅법을 이용하였고, 형광층과 유전층의 두께조절은 분산용매의 혼합비, 회전시간 및 회전토크 등을 제어하여 제작하였다. 형광층과 유전층의

\* 正 會 員 : 圓光大學 電氣·電子工學部 博士課程

\*\* 正 會 員 : 圓光大學 電氣·電子工學部 副教授

接受日字 : 1998년 10월 30일

最終完了 : 1999년 3월 19일

두께는 각각 40 $\mu$ m로 5%이내의 두께 평탄도를 얻을 수 있었다. 이때 사용한 분산용매는 Cyanoresin(CR-S, Shin-Etsu Chemical Co.Ltd)과 N.N-Dimethylformamid(Junsei Chmerical Co. Ltd)를 1 : 2.5 비율로 혼합하여 이용하였다. 소자의 역학적 지지대 및 발광의 전면 역할을 하는 투명전극은 ITO 필름(300 $\Omega$ /□, Toray 125L)을 사용하였고 배면전극은 실버페이스트(silver paste)를 사용하였다. 후막 형성 후 50 $^{\circ}$ C의 오븐에서 10분간 건조시켰다.

일반적인 EL소자의 층구조는 그림2(a)와 같이 형광층과 유전층으로 되어 있다. 각 소자의 층 구조는 ZnS:Cu (99.9%, Sylvania) 형광층과 BaTiO<sub>3</sub> 유전층이 각각 40 $\mu$ m인 그림 2 (a)의 WK-A 구조와 형광체와 유전체를 같은 비율로 혼합하여 80 $\mu$ m의 단일 발광층만을 갖는 그림 2 (b)의 WK-B구조로 제작하였다.

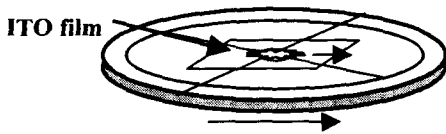


그림 1 스펀코팅법의 구성도  
Fig. 1 Schematic diagram of spin coating method

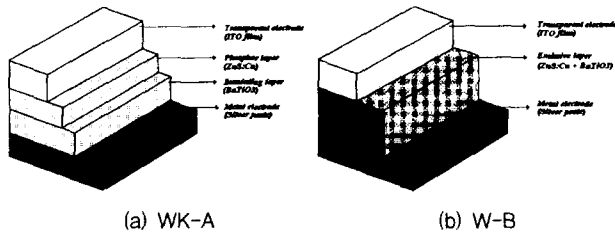


그림 2 Powder EL소자의 구조 (a) WK-A, (b) W-B  
Fig. 2 Structure of Powder EL device (a) WK-A, (b) W-B

2.2. 측정장치

EL소자의 스펙트럼 측정은 발광된 빛을 Spectro- meter (PSI, Darsa-2000)로 분광, 측정하고 PC에서 EL 스펙트럼, CIE 좌표와 휘도를 데이터화 하고, 이때 소자를 발광시키기 위한 인가 전압은 사각파형으로 AC 0~300V (400~20,000 Hz)로 변화 가능한 장치를 사용하였다.

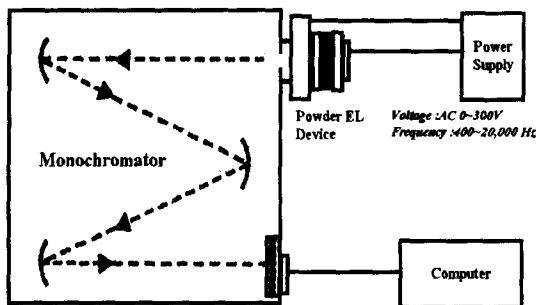


그림 3 EL 발광스펙트럼 측정 장치도  
Fig. 3 Schematic of the instruments for EL spectrum

또한 EL소자의 발광파형의 인가전압의 의존성을 평가하고, 인가전압 파형의 변화에 따른 명확한 발광특성을 조사하기 위하여 양에서 음의 신호로 변화할 때 zero 점을 갖는 사각파형 전압을 EL소자에 인가하였고, 발광되는 빛을 PM tube (Atago Bussan, K-20)로 받아 오실로스코프에 입력하고 저장하였다.

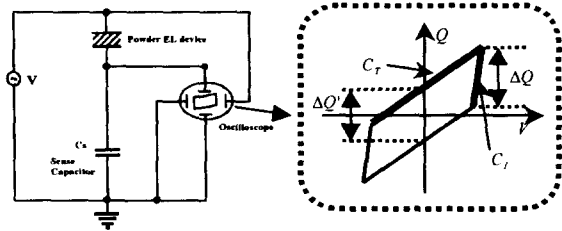


그림 4 이동전하밀도 측정을 위한 Sawyer-Tower 회로  
Fig. 4 Sawyer-Tower's circuit for measurement about transferred charge density

EL소자 내부 층간의 전하밀도는 그림 4와 같은 Sawyer-tower 회로를 이용하였다. Sawyer-tower 회로에서 Cs는 소자의 캐패시터보다 100배 정도 큰 캐패시터를 EL소자에 직렬로 연결하여 사용하였다. 실제로 사용한 Cs의 용량은 60 nF이다. 이 회로에 전압이 인가되면 EL소자의 전극면에 있던 전자가 형광층으로 주입되면서 형광층이 도체로 작용한다. 따라서 유전층과 전극사이의 계면에 전하가 축적되어 양단의 전압이 변화된다. 이때 유전층의 전압 변화량과 등전위차로 Cs 캐패시터에 전압 변화를 가져오게 된다. 회로상에서 캐패시터 양단에 걸린 전압을 오실로스코프 Y축에 연결하고 인가전압(V)을 X축에 연결하면 인가 전압(V)과 축적된 전하량(Q)의 관계 도형을 얻을 수 있다. 이러한 인가전압(V)과 전하량(Q)의 관계도형에서 소자 내부의 이동 전하량을 계산할 수 있다. 이 Q-V 도형으로부터 V가 0인 곳에서의 Q의 변화량으로 결정되는 전하밀도  $\Delta Q' = \Delta V_s C_s / A$  와, 유전층의 캐패시턴스 Ci, 형광층의 캐패시턴스 Cp 그리고 전체 소자의 캐패시턴스 Ct를 결정한다. Ct와 Ci는 Q-V 도형에서 기울기  $dQ/dV$ 로 정해진다. 첫번째 기울기는 전체 캐패시턴스 Ct를 나타내며, 두번째 기울기는 유전층의 캐패시턴스 Ci이다. 따라서 형광층의 캐패시턴스는

$$\frac{1}{C_P} = \frac{1}{C_T} - \frac{1}{C_I} \tag{1}$$

로 계산된다.

실제로 이동전하밀도  $\Delta Q$ 는 Q-V 도형에서 나타난 두 기울기의 끝단 모서리에서 측정되는 축적 전하량의 차이 값이지만 모서리에서의 정확한 측정이 곤란하므로  $\Delta Q'$ 를 측정하여 다음과 같은 관계식으로 결정한다.

$$\Delta Q = \Delta Q' \times a \cong \Delta Q' \times \frac{C_I + C_P}{C_I} \tag{2}$$

3. 실험 결과 및 검토

3.1. EL 스펙트럼과 CIE 좌표

제작된 두 종류의 EL소자들의 인가전압을 AC 100V로 고

정하고 주파수를 400~20,000Hz로 변화하면서 EL 스펙트럼을 측정하였다. 그림 5는 WK-A,B 소자의 EL스펙트럼 측정 결과이다. 스펙트럼 영역은 green과 blue 발광준위를 갖는 500.4nm와 462.2nm에서 존재하였다. EL 스펙트럼은 인가주파수가 높아짐에 따라서 강도가 증가하고 있음을 알 수 있으며, 특히 WK-B의 강도는 WK-A에 비하여 높은 강도를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 형광층과 유전층 계면에 축적된 전자에 의해 생성된 전계보다 형광체 주위를 둘러싸고 있는 유전체의 전하축적에 의한 전계가 형광체에 더 큰 에너지 전달을 한 것으로 사료된다.

각 소자들의 발광은 전압이 인가되면 계면에 포획되었던 전자가 형광층 내로 터널 주입되고, 이 주입된 전자가 형광층에 걸린 강한 전계에 의하여 가속되며 이 가속된 전자가 국소화된 Cu<sup>+</sup> 발광중심을 충돌 여기 또는 이온화 시키고 여기 전자 또는 이온화 된 Cu<sup>+</sup>에 포획된 전자가 바닥상태로 전이되면서 발광한다. 특히 1,000Hz를 기준으로 주파수가 증가함에 따라 발광 중심인 Cu의 발광 준위가 green에서 blue로 변함을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 Cu원자 주위의 결정 불안정이 주파수를 높임으로써 점차 정현화 되면서 Cu원자 주위에 불안정한 영향을 주는 전자의 필드가 약화여지기 때문이라고 추측할 수 있고, 또한 Cu의 blue 발광준위가 고전계 에너지에서 천이 되는 전계발광 특성을 확인할 수 있었다.

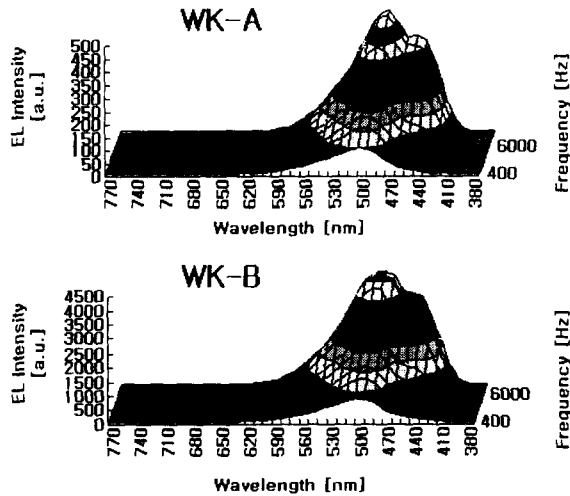


그림 5 EL 스펙트럼 AC100V, 400~20,000Hz: WK-A, WK-B 구조  
Fig. 5 EL spectrum AC100V, 400~20,000Hz: Structure of WK-A, WK-B

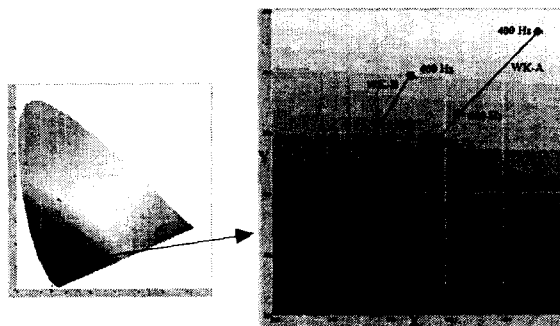


그림 6 CIE 좌표 AC100V, 400~20,000Hz: WK-A, WK-B 구조  
Fig. 6 CIE coordinate system AC100V, 400~20,000Hz: Structure WK-A, WK-B

그림 5에서 EL 스펙트럼의 결과를 CIE 좌표상에 나타내면 그림 6과 같다. 주파수가 증가함에 따라 발광 중심인 Cu 원자 주위에 안정화 밀도의 형성으로 인하여 고 에너지의 영역에 이르고 이 결과로서 CIE 좌표에서도 green 영역에서 blue영역으로 이동함을 알 수 있다. 특히 WK-B 모델은 기존 구조의 소자에 비하여 저 주파수(400Hz)에서도 고 에너지의 blue 영역에 존재하였고, 주파수 증가에 따라서 에너지의 변화율이 크게 나타남을 CIE 좌표상으로도 알 수 있었다.

### 3.2. EL 발광파형

다음은 일정 전압하에서 WK-A, WK-B 각 소자의 발광 파형을 통하여 계면의 특성을 평가하였다. 그림 7은 WK-A와 WK-B 소자에 100V, 400Hz의 사각파의 전압을 인가하였을 때 발광파형을 측정한 것이다. 소자의 발광파형은 전압이 상승할 때(P1)와 하강할 때(P2) 그리고 WK-A 모델과 WK-B 모델로 각각 나누어서 설명할 수 있다. WK-A 모델의 경우 그림 8 (a)에 나타난 바와 같이 소자에 전압이 인가되면 유전층과 형광층의 계면에 포획되었던 전자가 형광층 내로 터널링되고, 이 주입된 전자가 형광체에 걸린 강한 전계에 의하여 가속된다. 이 가속된 전자가 Cu 발광중심을 충돌 여기 또는 이온화시키고, 여기 전자 또는 이온화된 Cu<sup>+</sup>에 포획된 전자가 바닥상태로 전이되면서 발광하는 것이다. 전압이 하강할 경우는 전압 상승시 형광층에 주입된 자유전자가 양(+극) 계면에 축적되고, 이 축적된 전자는 인가된 전압이 떨어지면서 형광층 내부에 전압이 상승할 때와는 반대 방향의 내부 전계를 형성한다. 이 전계에 의하여 얇은 준위에 포획되었던 전자가 여기 되고 발광을 일으킨다.

형광체와 유전체가 혼합된 단일 발광층의 WK-B 소자는 유전층과 형광층의 계면에 포획된 전자의 터널링과 가속 전계에 의한 발광과는 다른 해석이 요구된다. 즉, 그림 9 (a)와 같이 소자에 전압이 인가되면 형광체와 유전체에 전자가 주입되고 1차적으로 Cu의 발광중심을 충돌여기 또는 이온화시키고 여기 전자 또는 이온화된 Cu<sup>+</sup>에 포획된 전자가 바닥상태로 전이되면서 발광한다. 2차적으로 유전체에 주입된 전자는 형광체 주변에 강한 전계 밀도를 만들어 Cu의 충돌여기 또는 이온화를 증대 시키고 Cu<sup>+</sup>로 전이를 돕는 것으로 사료된다. 전압이 하강할 경우는 발광중심의 얇은 준위에 포획된 전자가 유전체에 잔류 전하에 의하여 보다 강한 내부

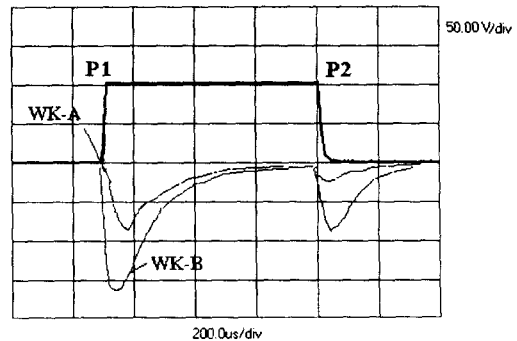


그림 7 EL 발광파형  
Fig. 7 EL emission waveform in time domain

전계를 형성되는 것으로 사료된다. 얇은 준위에 포획되었던 전자가 전도대로 방출되어 전도 전자가 되고 이들 전도전자가 이온화된 Cu<sup>+</sup>에 포획되어 바닥상태로 떨어지면서 전압이 하강시 발광을 설명할 수 있다. 이와 같은 각 모델의 해석적 관점에서 WK-B 모델이 전압 상승시 1,2차적 효과 및 전압 하강시 잔류전하에 의한 전계 효과가 WK-A 모델에 비하여 큰 것으로 인하여 시간변화에 따른 EL 발광과형이 큰 것으로 사료된다. 특히 전압 하강시 잔류 전하에 의한 전계 효과가 계면에 잔류 전하를 가지는 WK-A 모델에 비하여 3배 이상 큼을 확인할 수 있었다. 이상의 결과는 EL 스펙트럼과 CIE 좌표 결과와도 잘 일치한다.

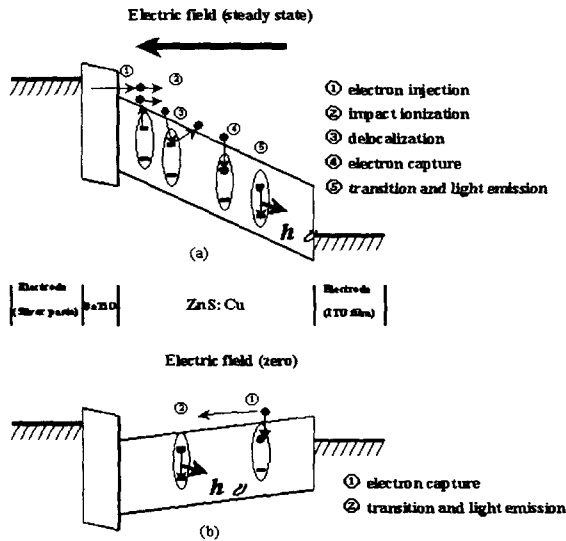


그림 8 WK-A 모델의 EL 발광 과정 : (a) 정상상태 (b) 전계가 0인 상태  
Fig. 8 EL process for WK-A model : (a) steady state (b) state of zero electric field

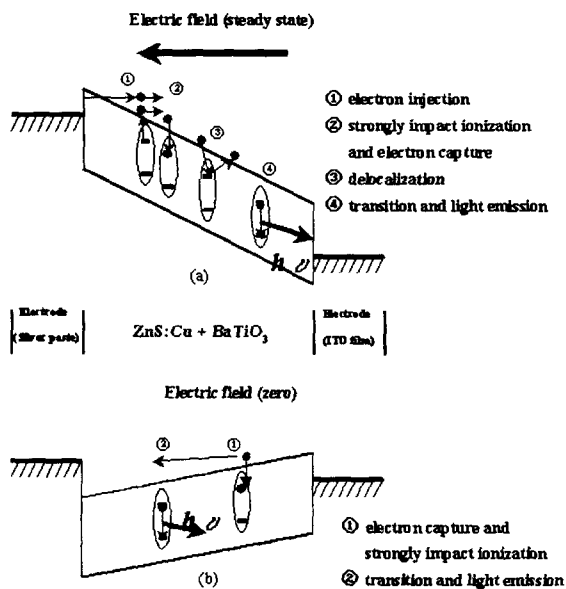


그림 9 WK-B 모델의 EL 발광 과정 : (a) 정상상태 (b) 전계가 0인 상태  
Fig. 9 EL process for WK-B model : (a) steady state (b) state of zero electric field

### 3.3. 이동전하밀도와 휘도

그림 10은 소자의 이동전하밀도와 휘도를 일정 400Hz 주파수하에서 전압 0 ~ 200V범위의 전압의존성을 측정한 결과이다. WK-A, B 소자 모두 전압증가에 따라 소자의 이동전하밀도와 휘도는 증가했다. 인가전압이 증가하면 계면의 더욱 깊은 준위에 포획되어 있던 전자도 방출되어 형광층에 주입될 수 있어 이동전하밀도는 증가된다. 따라서 이동전하밀도가 증가되면 발광중심을 충돌 여기 시키는 전자의 수가 증가되므로 발광 휘도는 이동전하밀도에 비례하여 증가된다. 이 결과에서 특히 WK-B 소자는 60V 이상이 되면 전압이 증가함에 따라 발광 휘도가 급격히 증가되다가 120V 이상에서는 3981 cd/m<sup>2</sup>를 나타내며 완만히 증가하였다. 이동전하밀도는 발광 휘도와 비례하여 60V의 인가 전압부터 증가하였다. 이러한 사항은 WK-B 모델의 EL 스펙트럼 및 발광과형의 광학적 특성 결과와 마찬가지로 유전층 계면에서 형광체로 유기 시키는 전계 메커니즘 보다 형광체 입자 주위에서 직접적으로 유기 시키는 전계가 더욱 이동전하밀도와 발광 휘도를 증가시키는 요인으로 사료된다.

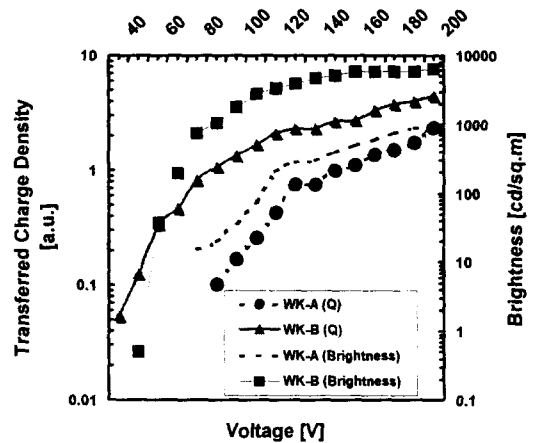


그림 10 이동전하밀도와 휘도  
Fig. 10 Transferred charge density and brightness

## 4. 결 론

후막 전계발광 소자의 고휘도화를 위한 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존의 배면전극 / 유전층 / 형광층 / 투명전극 구조(WK-A)를 갖는 소자를 형광체와 유전체를 같은 비율로 혼합한 단일층의 구조(WK-B)로 고휘도를 얻을 수 있었다.
- 2) 단일층 구조의 WK-B소자는 WK-A에 비하여 EL스펙트럼은 9배 높은 강도를 나타냈고, 각각의 EL소자는 상용 전원 (100V, 400Hz)에서 WK-A 모델은 208 cd/m<sup>2</sup>를, WK-B 모델은 2754 cd/m<sup>2</sup>를 나타냈다.
- 3) 이 같은 구조 변경에 따른 휘도의 향상은 WK-A 소자에서 유전층의 계면으로 유입되어 형광체의 발광중심에 작용하는 전계에 비하여 단일 발광층의 WK-B 구조에서는 유전체가 형광체를 둘러싸서 유효 전계를 증대시킴으로 EL 소자의 발광에 효과적인 것으로 평가되었다.
- 4) EL 발광특성과 이동전하밀도 측정을 통하여 WK-A, WK-B의 발광원리를 비교하면, 전압 상승시 1차적으로 Cu의

발광중심을 충돌여기 또는 이온화 시키고 여기 전자 또는 이온화된 Cu'에 포획된 전자가 바닥상태로 전이되면서 발광특성과 2차적으로 유전체에 주입된 전자는 형광체 주변에 강한 전계 밀도를 만들어 Cu의 충돌여기 또는 이온화를 증대 시키고 Cu'로 전이를 돕는 특성을 갖는 것으로 사료된다. 전압하강시는 잔류전하에 의한 전계 효과가 WK-A 모델에 비하여 큰 것으로 인하여 EL 발광과형이 큰 것을 확인하였다.

**감사의 글**

본 연구는 원광대학교 1998년 교내 연구비와 정보통신부 지원 원광대학교 창업지원센터의 입주업체 WDT(Wonkwang Display Technology) 지원에 의해 수행되었습니다.

**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 characteristics 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] J. Y. Zhang, P. F. Gu, Xu Liu and J. F. Tang, "Low-voltage thin-film electroluminescent devices with low-resistivity stacked insulators", *Journal of Applied Optics*, Vol. 36, No. 3, pp.545~550, 1997

[6] A. Zeinert, C. Barthou, P. Benalloul and J. Benoit, "Transient measurements of the excitation efficiency in ZnS-based thin film electroluminescent devices", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 35, No. 7, pp.3909~3913, 1996

[7] Kristiann Neyts, "Numerical simulation of charge transfer and light emission in SrS:Ce thin-film electroluminescent devices", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 43, No. 9, pp. 1343~1350, 1996

[8] M. Ylilammi, "Analytical circuit model for thin film electroluminescent devices", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 41, No. 7, pp. 1227~1232, 1995

[9] H. Kitai, "Solid state luminescence", Chapman & Hall, pp. 133~134, 1993

[10] D. N. Waters, "Intensity of emitted light from powder phosphors : the effects of light absorption and scattering in the powder matrix", *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, Vol. 7, No. 2, pp.61~65, 1996

[11] M. H. Oh, "Development of next-generation flat panel display technology", KIST research report, pp. 43, 1993

[12] J. K. Lee, D. S. Yoo, S. Handy and M. F. Rubner, "Thin film light emitting devices from an electroluminescent ruthenium complex", *Applied Physics Letters*, Vol. 69, No. 12, pp. 1686~1688, 1996

[13] A. Boudghene Stambouli, S. Hamzaoui and M. Bouderbala, "Blue emitting ACPEL devices based upon ZnS:Tm,Li", *Thin Solid Films*, Vol. 283, No. 1~2, pp. 204~208,1996

[14] S. Gupta, J. C. McClure and V. P. Singh, "Phosphor efficiency and deposition temperature in ZnS:Mn A.C. thin film electroluminescence display devices", *Thin Solid Films*, Vol. 299, No. 1~2, pp. 33~37, 1997

**저 자 소 개**



**이 증 찬 (李 鐘 燦)**

1972년 8월 13일생. 1997년 원광대 공대 전자공학과 졸업. 1999년 동대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전자재료공학과 박사과정

Tel : (0653) 850-6349

E-mail : chaos@gaebyok.wonkwang.ac.kr



**박 대 희 (朴 大 熙)**

1954년 11월 10일생. 1979년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 오사카대학 대학원 졸업 (공학박사).1979년~1991년 LG 전선 연구소 선임연구원.1991년~현재

원광대학교 공과대학 전기·전자공학부 부교수

Tel : (0653) 850-6349

E-mail : parkdh@wonkwang.ac.kr