

# Atomic Layer Epitaxy(ALE) 방법으로 제작된 ZnS:Mn 박막전계발광소자의 전기, 광학적 특성

## (Electrical and Optical Characteristics of ZnS:Mn Thin-film Electroluminescent(TFEL) Devices grown by Atomic Layer Epitaxy)

李淳錫\*, 尹善侺\*\*, 林聖奎\*

(Soon-seok Lee, Sun-jin Yun, and Sung-kyoo Lim)

### 요 약

Atomic Layer Epitaxy(ALE) 장비로 ZnS:Mn TFEL 소자를 제작하여 전기, 광학적 특성을 조사하였다. 1 KHz의 정현파를 인가하였을 때, 피크 전압이 134 V에서 휘도가 급격히 증가하여 230 V에서 568 Cd/m<sup>2</sup>가 되었고, 발광 중심 파장은 577 nm였다. 사다리꼴 형태의 전압을 인가하여 소자의 capacitance-voltage(C-V), charge-voltage(Q-V), transferred charge-phosphor field(Q<sub>t</sub>-F<sub>p</sub>), luminance-conduction charge(L-Q<sub>cond</sub>), 및 threshold voltage-polarization charge(V<sub>th</sub>-Q<sub>pol</sub>)를 측정하였다. C-V, Q-V 특성에서 절연층과 형광층의 capacitance가 각각 14.0 nF/cm<sup>2</sup>, 24.3 nF/cm<sup>2</sup>됨을 확인하였다. 최대 전압 펄스폭의 지속시간이 0 에서 75 μsec로 증가할수록, Q<sub>pol</sub>의 양과 인가전압 0 V에서 계면에 형성된 전계의 세기도 함께 증가되어, 문턱 전압이 137 V에서 100 V로 감소하였다. 또한 L-Q<sub>cond</sub> 특성에서 발광되는 빛은 Q<sub>cond</sub>에 비례하여 Q<sup>+</sup><sub>cond</sub>가 1.3 μC/cm<sup>2</sup>에서 2.3 μC/cm<sup>2</sup>로 증가되었을 때, 휘도는 386 Cd/m<sup>2</sup>에서 607 Cd/m<sup>2</sup>로 증가되었다. V<sub>th</sub>-Q<sub>pol</sub> 특성에서 Q<sub>pol</sub>의 양이 증가할수록 V<sub>th</sub>가 감소함을 확인하였고, 그 폭은 최대 37 V까지 감소하였다.

### Abstract

The ZnS:Mn thin film electroluminescent(TFEL) devices fabricated by ALE system were investigated. Yellow-orange light emission was observed when the applied voltage exceeded 134 V and luminance increased sharply as the applied voltage increased. Luminance of 568 Cd/m<sup>2</sup> was obtained under 1 KHz sinusoidal voltage wave application at the peak applied voltage of 230 V. The peak wavelength of the emission was 577 nm. The C-V, Q-V, Q<sub>t</sub>-F<sub>p</sub>, L-Q<sub>cond</sub>, and V<sub>th</sub>-Q<sub>pol</sub> have been measured under the application of the trapezoidal wave with its pulse width varying 0 to 75 μsec. The phosphor and the insulator capacitance of the TFEL device under test were 24.3 nF/cm<sup>2</sup> and 9 nF/cm<sup>2</sup>, respectively. It was observed that the threshold voltage changed from 137V to 100V as the pulse width varied from 0 to 75 μsec. The L-Q<sub>cond</sub> characteristics showed that the light emission increased in proportion to the Q<sub>cond</sub>. The luminance increased from 386 Cd/m<sup>2</sup> to 607 Cd/m<sup>2</sup> when the Q<sup>+</sup><sub>cond</sub> increased from 1.3 μC/cm<sup>2</sup> to 2.3 μC/cm<sup>2</sup>. The V<sub>th</sub>-Q<sub>pol</sub> characteristics showed that the V<sub>th</sub> was inversely proportional to Q<sub>pol</sub>.

\* 正會員, 檀國大學校 電子工學科  
(Department of Electronics Engineering)

(Semiconductor Technology Division, ETRI)

接受日字:1997年8月28日, 수정완료일:1998年1月30日

\*\* 正會員, 韓國電子通信研究院 材料技術研究室

## I. 서 론

형광체가 외부로부터 에너지를 공급받아 전자를 여기시키고 다시 기저상태로 떨어지면서 그에 해당하는 에너지를 빛으로 방출하는 현상을 발광(luminescence)이라 말한다. 이때 외부 에너지의 종류에 따라 음극선발광(cathodoluminescence : CL), 빛발광(photoluminescence : PL), 열발광(thermoluminescence : TL) 및 전계발광(electroluminescence : EL)등으로 구분할 수 있다.

현재 대부분의 정보 표시장치로 사용되고 있는 cathode ray tube(CRT)는 CL 현상을 이용하여 만든 장치로 천연색의 재현과 제조 기술의 확보라는 측면에서는 성숙되어 있지만, 대면적으로 만들 경우 부피와 무게가 급격히 증가하는 단점을 가지고 있다. 이에 대한 해결책으로 연구되고 있는 것이 EL, CL 및 PL의 발광 현상 또는 액정의 빛 편광 특성을 이용하여 만든 EL Display(ELD), Field Emission Display(FED), Plasma Display Panel(PDP) 및 Liquid Crystal Display(LCD) 등의 평판 표시장치이다. 이 중에서 ELD는 완전 고체 소자(all solid state device)로서 사용 온도 범위가 넓고, 진동 및 충격에 강하므로 특수한 분야의 응용에 적합하다<sup>[1,2]</sup>. ELD는 metal / insulator / phosphor / insulator / metal의 박막 구조로 되어 있으며 형광체(phosphor)의 종류에 따라 서로 다른 가시광을 방출한다<sup>[3,4]</sup>. 현재 상용 ELD용 형광체는 CaS:Eu(적색), ZnS:Tb(녹색), CaGa<sub>2</sub>S<sub>4</sub>:Ce(청색) 및 ZnS:Mn(황색) 등이 사용되고 있다.

형광층을 성장시키기 위한 박막 성장 기술에는 물리 기상 증착(physical vapor deposition:PVD) 방법 및 화학 기상 증착 (chemical vapor deposition:CVD) 방법이 있다. PVD 방법에는 전자빔증착법(electron-beam deposition:EBD), multi-source deposition (MSD) 및 sputtering이 있으며 CVD 방법에는 metal-organic chemical vapor deposition(MOCVD), atomic layer epitaxy(ALE) 및 hydride-transport chemical vapor deposition(HTCVD) 등이 있다. 이들 중에서 Planar Systems에서는 EBD와 ALE 방법을 이용하여 양산용 ELD를 제작하여 판매하고 있다. ALE 방법을 이용하면 원자 단위의 두께를 조절, 성장시킬 수 있어 완벽한 step coverage가 가능하며

pinhole이 거의 없는 박막을 만들 수 있다. 현재 head-mounted display(HMD)에 응용이 예상되는 active matrix EL(AMEL) 형광층과 절연층은 성장과 천연색 ELD 제작을 위하여 ALE를 이용한 TFEL 소자의 제작이 필수적이나 아직도 국내에서는 이에 관한 연구가 보고된 바 없다.

본 논문에서는 국내에서는 최초로 ALE 방법으로 ZnS:Mn TFEL 소자를 제작하였으며 인가 전압의 크기에 따른 TFEL 소자의 휘도와 스펙트럼을 분석하였고, 형광층내의 발광 중심체 원자들과 충돌하여 발광 에너지를 공급하는 전자의 이동 전하량을 측정하여 소자 내부에서 일어나는 물리적 현상을 설명하였다.

## II. TFEL 소자의 제작 및 측정

### 1. TFEL 소자의 제작

TFEL 소자는 전계발광을 이용한 평판표시장치의 화소를 구성하는 소자로서 Al electrode / insulator / phosphor / insulator / ITO / glass substrate의 구조로 이루어져 있다. 금속 전극(Al)과 ITO 사이에 교류 전압을 인가하여  $V_{th}$ (threshold voltage)를 넘으면 형광층과 절연층 사이의 계면에 존재하는 전자들이 형광층 내부로 tunneling하게 되고, 운동 에너지를 얻어 발광 중심 원자들과 충돌하게 된다. 이 때 충돌 에너지에 의해 발광 중심 원자내의 전자들은 여기 되었다가 다시 기저 상태로 떨어지면서 발광 중심 원자에 따라 특정한 영역의 가시광을 발생시킨다. 충돌된 전자는 전계에 의해 다시 가속 받아 운동에너지를 얻은 후, 충돌을 되풀이 하다가 다른 쪽 계면에 포획된다. 교류 전압이 인가되므로 전압의 극성이 바뀌게 되면 계면에 포획된 전자는 다시 tunneling되고 원래의 계면에 도달하며 이와 같은 현상이 반복된다.

형광층 내부에서 발생된 빛은 insulator, ITO 및 glass substrate를 투과하여 우리가 볼 수 있게 되므로 투명한 유리 기판 위에 박막을 성장시켜야 한다. 그림 1의 구조를 갖는 TFEL 소자를 제작하기 위하여 ITO 박막이 이미 성막되어 있는 Corning 7059 유리 기판을 사용하였다. 이와 같은 유리 기판을 ALE 장비내에 놓고 AlCl<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>O gas를 교대로 공급, 반응시켜 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 절연층을 증착시켰다. 이때 절연층의 두께는 4000 Å 이었고, 증착온도는 500 °C로 유지시켰다. ZnS:Mn 형광층 역시 ALE 장비에 ZnCl<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>S

gas를 교대로 공급, 반응 및 증착시켰으며 두께와 증착온도는 각각 4000 Å 와 500 °C 였고, Mn의 농도는 0.3 mole % 이었다. 상부 절연층은 하부 절연층과 같은 증착조건에서 두께를 3000 Å 로 증착시켰다. Al 전극은 thermal evaporator를 이용하여 2000 Å 의 두께로 성장시켰으며 전극의 넓이는 1 cm<sup>2</sup> 였다.

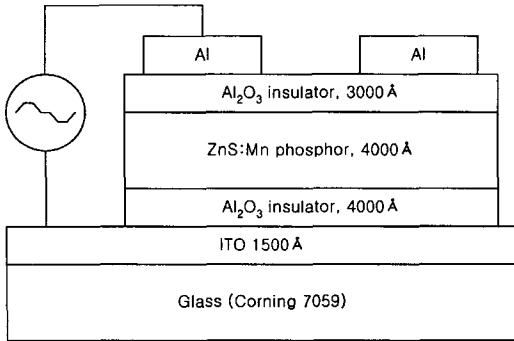
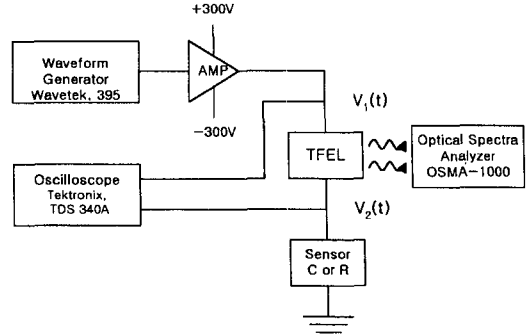


그림 1. 제작된 ZnS:Mn TFEL 소자의 구조  
Fig. 1. Cross section of prepared ZnS:Mn TFEL device.

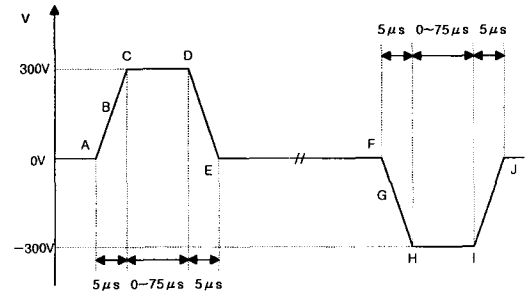
2. 특성 측정

1) 측정 시스템

제작된 TFEL 소자의 전기, 광학적 특성을 측정하기 위하여 그림 2-(a)의 측정 system을 이용하였다. 인가 전압의 크기에 따른 휘도는 1KHz의 정현파를 공급하여 측정(Minolta, CS-100)하였다. 소자의 C-V, Q-V 및 Q<sub>t</sub>-F<sub>p</sub> 특성은 그림 2-(b)와 같은 사다리꼴 형태의 전압을 인가하여 전압의 기울기가 일정한 각각의 순간에 capacitance, 및 charge의 양을 쉽게 측정할 수 있도록 하였다. 인가 전압의 상승 시간, 하강 시간은 5 μsec로 일정하게 유지시켰고, 최대 전압의 펄스폭 지속 시간은 0 ~ 75 μsec 동안 변화시켜 이 시간 동안의 전하, 휘도 등의 변화를 관찰하였다. 전체적인 주기는 1 msec로 유지시켜 1 KHz의 주파수로 측정하였다. 이를 위하여 임의 파형 발생기(Wavetek, 395)로 부터 신호를 입력받아 ±300 V까지 증폭 시킨 후 TFEL 소자에 공급하였다. TFEL 소자의 capacitance와 charge의 양을 계산하기 위하여 센서를 TFEL 소자에 직접 연결하였다. 전체 전압(v<sub>1</sub>(t))과 센서 전압(v<sub>2</sub>(t))은 오실로스코프(Tektronix, TDS 340A)로 받아 처리하였고, 발광되는 빛의 스펙트럼은 Optical Spectra Analyzer(삼성, OSMA-1000)로 측정하였다.



(a)



(b)

그림 2. (a) TFEL 소자의 전기, 광학적 특성 측정 회로 및 (b) 인가 전압의 파형

Fig. 2. (a) Circuit for electrical, optical measurement of TFEL devices and (b) applied voltage.

2) C-V 측정

TFEL 소자의 전압 크기에 따른 capacitance의 변화는 그림 2-(a)의 측정 시스템에서 센서 capacitor 또는 센서 resistor를 연결하여 측정할 수 있다. 센서 resistor를 사용할 경우 TFEL 소자의 capacitance<sup>[5]</sup>는

$$C = \frac{i(t)}{dV_{EL}/dt} \tag{1}$$

으로 표시되며, capacitor를 사용할 경우는 센서에 충전된 전하량과 TFEL 소자에 유기된 전하의 양이 같다는 것으로부터

$$C = \frac{dQ_s}{dV_{EL}} = C_s \frac{dV_s}{dV_{EL}} \tag{2}$$

로 표시된다. 여기서 Q<sub>s</sub>, C<sub>s</sub>, 및 V<sub>s</sub>는 각각 센서에 유기된 전하, 센서 capacitance 및 센서 전압이다. 위의 (1) 또는 (2)식 중 하나를 TFEL 소자에 걸린 전압에 대하여 얻어 C-V 특성 곡선을 찾아내었다.

3) Q-V 측정

TFEL 소자의 인가 전압 크기에 따른 전하의 변화

는 소자의 휘도에 직접적으로 영향을 미친다. 소자내의 전하는 형광층의 유전 분극에 의한 변위전하(displacement charge,  $Q_d$ )와 인가 전압이 문턱 전압( $V_{th}$ ) 이상될 때에만 생성되는 이동 전하(transferred charge,  $Q_t$ )로 나눌 수 있다. 소자에 전압이 인가되면 위의 2 가지 전하의 합이 형광층과 절연층의 계면에 유기되며 이 양은 센서 capacitor에 충전된 전하의 양과 같다.

$$Q_{EL} = C_s V_s \tag{3}$$

전체 전하중에서 이동 전하 다음과 같은 수식으로 표시되고<sup>[6]</sup>

$$Q_t = \left( \frac{C_i + C_p}{C_i} \right) C_s V_s - C_p V_{EL} \tag{4}$$

형광층의 전계 또한 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$F_p = \frac{1}{d_p} \left( V_{EL} - \frac{C_s V_s}{C_i} \right) \tag{5}$$

여기서  $C_i$ 와  $C_p$ 는 각각 절연층과 형광층의 capacitance이고,  $d_p$ 는 형광층의 두께이다. 식 (4)과 식 (5)으로 부터 형광층의 이동 전하( $Q_t$ )와 전계( $F_p$ )를 찾았다.

### III 결과 및 검토

#### 1. TFEL소자의 광학적 특성

TFEL 소자의 휘도-인가전압(luminance-voltage:L-V) 특성은 TFEL 소자를 이용한 ELD의 구동 회로를 구성하는데 매우 중요하다. 정현파, 1 KHz의 전압을 인가하여 인가 전압의 크기에 따른 휘도와의 관계를 그림 3에 나타내었다. 134 V 이하에서는 휘도가 매우 작지만, 134 V에서부터 휘도가 급격히 증가하다가 174 V 부터는 서서히 포화되는 특성을 나타내고 있다. 이와 같은 특성으로부터 제작된 TFEL 소자의 문턱 전압이 134 V임을 알 수 있었다. 문턱 전압보다 96 V 높은 230 V에서 최대 휘도 568  $Cd/m^2$ 가 되었다.

TFEL 소자로부터 발광되는 빛은 등황색이었으며 그림 4에 발광되는 빛의 스펙트럼을 나타내었다. 발광 중심파장은 577 nm였고 스펙트럼 분포가 넓어 ZnS:Mn 형광체의 일반적인 특성과 일치한다. 577 nm에

서 발하는 빛은  $Mn^{2+}$  이온의 전자가  $^4G$  준위에서  $^6S$  준위로 떨어지면서 그에 해당하는 에너지가 빛으로 방출하기 때문에 나타난 것이다. 이때의 CIE 좌표는  $x=0.52, y=0.47$ 이었다.

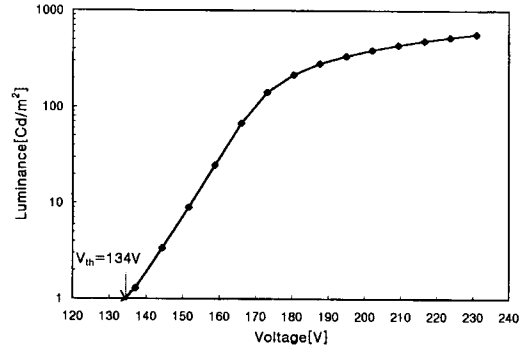


그림 3. ZnS:Mn TFEL소자의 L-V 특성  
Fig. 3. L-V characteristics of ZnS:Mn TFEL devices.

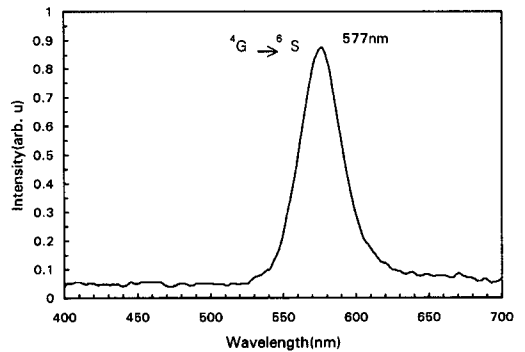


그림 4. ZnS:Mn TFEL 소자의 발광 스펙트럼  
Fig. 4. Emission Spectra of ZnS:Mn TFEL Devices.

#### 2. TFEL 소자의 전기적 특성

##### 1) C-V 특성

절연층/형광층/절연층의 구조로 되어 있는 TFEL 소자의 capacitance는 문턱 전압 이하에서 절연층 capacitance  $C_i$  와 형광층 capacitance  $C_p$ 의 합으로 나타나며, 문턱 전압 이상에서는 형광층이 breakdown 되어 절연층만의 capacitance  $C_i$  로 나타난다. 그림 5는 소자에 인가된 최대 전압이 215 V이고, 펄스 폭의 지속시간이 75  $\mu sec$ 일 때에 실험적으로 측정된 ZnS:Mn 소자의 C-V 특성이다. 그림 5는 센서 capacitor(960 nF)를 연결하여 측정된 결과이지만, 저항(9.8  $\Omega$ )을 연결했을 때도 동일한 결과를 얻었다. C-V 특성 곡선으로부터 문턱 전압이 100 V임을 알

수 있으며, 문턱 전압 이하에서의 capacitance는 9.0 nF/cm<sup>2</sup> 였고, 문턱 전압 이상에서는 14.3 nF/cm<sup>2</sup>이 었다. 이것으로부터 형광층 capacitance C<sub>p</sub>는 24.3 nF/Cm<sup>2</sup>, 절연층 capacitance C<sub>i</sub>는 14.3 nF/Cm<sup>2</sup>임을 알 수 있다. 그림 5의 C-V 특성에서 인가 전압이 최 대치가 될 때, capacitance의 급격한 증가는 제작된 소자의 capacitance가 증가되는 것이 아니라 C-V 특 성을 구하기 위하여 사용된 식 (1)의 분모인 dV<sub>EL</sub>/dt 값이 인가 전압이 최대가 될 때에는 "0" 이 되기 때 문에 생기는 오류이다. 위와 같은 이유로 그림 5의 C-V 특성 곡선은 dV<sub>EL</sub>/dt가 "0" 이 아닌 부분에서 만 그 의미를 갖는다.

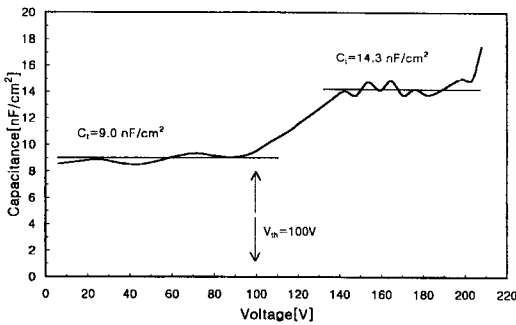
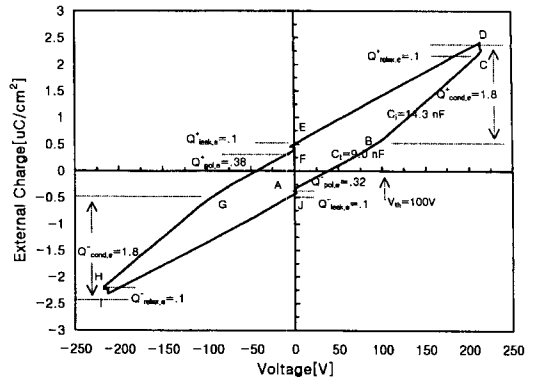


그림 5. ZnS:Mn TFEL소자의 C-V 특성  
Fig. 5. C-V characteristics of ZnS:Mn TFEL devices.

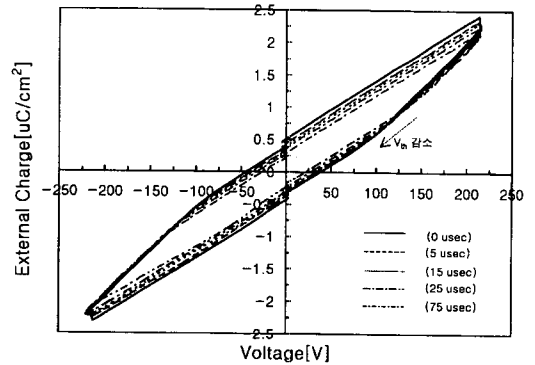
2) Q-V 특성

그림 6에는 TFEL 소자에 주파수 1 KHz의 사다리꼴 형태의 전압을 인가하여 최대 전압이 215 V, 펄스 폭의 지속시간이 0, 5, 15, 25 및 75 μsec 일 때, 소 자의 2 단자에서 측정된 Q-V 특성을 나타내었다. 그림 6-(a)은 펄스 폭의 지속시간이 75 μsec 일 때의 특성으로 인가 전압이 215 V까지 증가되면서 전압의 크기에 따라 전하의 기울기가 다른 2 가지 영역이 존 재한다. Q-V 곡선에서 볼 때, 인가 전압 100 V를 전 후로 하여 특성 곡선의 기울기가 변화하며 이는 곧 문턱 전압의 값이 100 V임을 알 수 있다. 작은 ca-pacitance를 가지는 100 V 이하의 영역은 형광층이 breakdown되기 전이므로 절연층 capacitance C<sub>i</sub>, 형 광층 capacitance C<sub>p</sub>의 합으로 되어 있으며 곡선의 기울기로부터 9 nF/cm<sup>2</sup>임을 알 수 있다. 또한 100 V 이상에서는 형광층이 breakdown되어 절연층만의 capacitance C<sub>i</sub>를 가지며 기울기로부터 14.3 nF/cm<sup>2</sup>

임을 얻었다. 이는 그림 5에서의 결과와 동일한 값이다.



(a)



(b)

그림 6. ZnS:Mn TFEL소자의 Q-V 특성 (a) 펄스폭 75 μsec, (b) 펄스폭 0 ~ 75 μsec  
Fig. 6. Q-V characteristics of ZnS:Mn TFEL devices. (a) pulse width 75 μsec, (b) pulse width 0 ~ 75 μsec

그림 6-(a)에서 A ~ J 까지의 문자는 그림 2-(b) 인가 전압의 파형에 표시된 점의 위치를 표시한 것이 고, Q<sup>+</sup>, Q<sup>-</sup>는 소자의 Al 전극에 유기된 전하를 의미 하며, 아래 첨자 e는 TFEL 소자의 Al과 ITO 전극 에서 측정된 양을 의미한다.

Conduction charge Q<sub>cond,e</sub>는 양 또는 음의 전압이 인가되고 있는 동안, 형광층의 이동 전하에 의해 Al 전극에 유기된 전하이며, 그 크기는 1.8 μC/cm<sup>2</sup>였다. Relaxation charge Q<sub>relax,e</sub>는 양 또는 음의 최대 전압이 지속되고 있는 동안에 유기된 전하로 0.1 μC/cm<sup>2</sup>이었다. 또한 leakage charge Q<sub>leak,e</sub>는 0 V를 유지하고 있는 동안에 계면에 포획된 전자가 이탈되어 나타나는 전하로 0.1 μC/cm<sup>2</sup>이었으며 polarization charge Q<sub>pol,e</sub>은 인가 전압의 극성이 변화되기 전까지

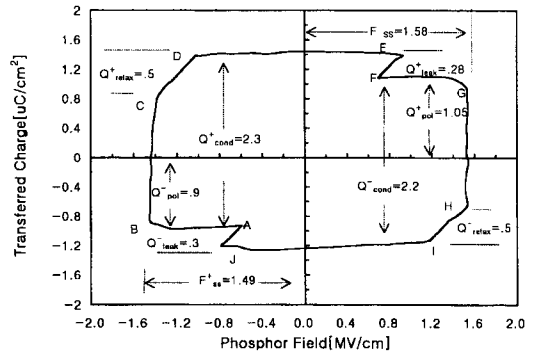
Al 전극에 존재하는 전하로 양의 전압이 인가될 때에는  $0.32 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 음의 전압이 인가될 때에는  $0.38 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 가 남아 있었다.

그림 6-(b)은 펄스 폭의 지속시간이 0, 5, 15, 25 및  $75 \mu\text{sec}$ 일 때의 TFEL 소자의 Al과 ITO 전극에서 측정된 Q-V 특성이다. 5 개의 곡선을 비교하면 펄스 폭의 지속시간이 길어질수록 전하의 기울기가 변하는 문턱 전압의 크기가 작아짐을 알 수 있으며, relaxation charge  $Q_{\text{relax},e}$ , polarization charge  $Q_{\text{pol},e}$ 은 증가되었다. 펄스 폭의 지속시간이 길어질수록 문턱 전압의 감소는 지속시간이 증가되어  $Q_{\text{relax},e}$ 가 증가되고, 인가 전압이 다시 0 V가 되었을 때  $Q_{\text{pol},e}$ 가 증가되었기 때문에 나타난 현상이다.  $Q_{\text{pol},e}$ 는 계면 준위에 포획된 전자에 의해 나타난 전하이며 인가 전압의 극성이 변화될 때, 변화된 전압과 같은 극성으로 동작하므로 polarization charge가 증가될 수록 외부 인가 전압이 낮은 상태에서 형광층은 breakdown된다. 지속시간이 0, 5, 15, 25 및  $75 \mu\text{sec}$ 일 때, 소자 외부에서 측정된 각각의  $Q_{\text{pol},e}$ 은  $0.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $0.25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $0.3 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $0.33 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  및  $0.38 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  이었으며, 이때의 문턱 전압도 각각 137 V, 123 V, 116 V, 107 V 및 100 V로 감소되었다.

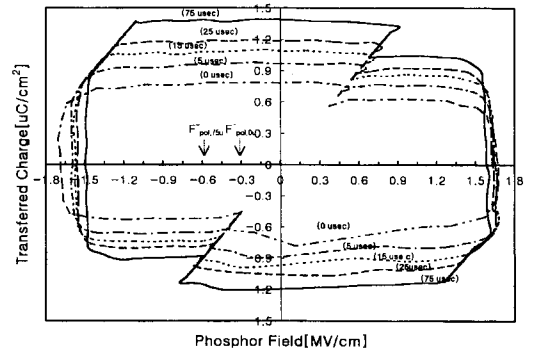
그림 7에 주파수 1 KHz의 사다리꼴 형태의 전압을 인가하여 최대 전압이 215 V, 펄스 폭의 지속시간이 0 ~  $75 \mu\text{sec}$  동안 변화될 때 형광층 내부만을 이동하는 이동 전하  $Q_t$ 와 전계  $F_p$  와의 관계를 나타내었다. 그림 7-(a)은 펄스 폭의 지속시간이  $75 \mu\text{sec}$  일 때의 특성으로  $F_{\text{ss}}$ 는 정상상태의 형광층 전계 (steady-state phosphor field)이며, 양의 전압이 인가될 때에는  $1.49 \text{ MV}/\text{cm}$ , 음의 전압이 인가될 때에는  $1.58 \text{ MV}/\text{cm}$ 로 나타났다. 외부 전압이 증가되고 있는 상태에서 형광층의 전계가 일정한 것은 인가된 전압이 증가되는 만큼, 한쪽 계면에 포획된 전자가 tunneling 되어 다른 쪽 계면에 다시 포획되고 포획된 전자에 의해 형광층의 전계를 감소시키기 때문이다. 이때 나타내는 전계를 field-clamping이라 한다.

Conduction charge  $Q_{\text{cond}}$ 는 전압이 인가되고 있는 동안에 형광층을 이동하는 전하의 양으로 발광 중심과 충돌하여 빛을 발하는 주된 전하이다. 양의 전압이 인가되고 있는 동안은  $2.3 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 음의 전압이 인가되고 있는 동안은  $2.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 의 전하가 이동하였다. Relaxation charge  $Q_{\text{relax}}$ 는 최대 전압이 지속되고 있

는 동안에 이동하는 전하의 양으로, 양 또는 음의 전압이 유지되고 있는 동안은  $0.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이 이동하였다. Leakage charge  $Q_{\text{leak}}$ 는 0 V를 유지하고 있는 동안에 계면에 포획된 전자가 이탈되는 양이다. 전압이 음에서 양으로 변하는 동안에 이탈된 전하는  $0.3 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 양에서 음으로 변하는 동안에 이탈된 전하는  $0.28 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이었으며 계면 준위가 얕을 수록, 계면에 많은 전자가 포획될 수록 많은 전자가 이탈된다.



(a)



(b)

그림 7. ZnS:Mn TFEL소자의  $Q_t$ - $F_p$ 특성 (a) 펄스폭  $75 \mu\text{sec}$ , (b) 펄스폭 0 ~  $75 \mu\text{sec}$   
Fig. 7.  $Q_t$ - $F_p$  characteristics of ZnS:Mn TFEL devices. (a) pulse width  $75 \mu\text{sec}$ , (b) pulse width 0 ~  $75 \mu\text{sec}$

또한 polarization charge  $Q_{\text{pol}}$ 은 인가 전압의 극성이 변화되기 전까지 절연층과 형광층 계면에 포획된 전하이다. 양의 전압이 인가될 때에는  $0.9 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 음의 전압이 인가될 때에는  $1.05 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이 남아 있었다. 여기에서  $Q_{\text{cond}}$ 는 클수록,  $Q_{\text{leak}}$ 는 작을수록 좋은 전계 발광소자가 된다.

그림 7-(b)은 펄스 폭의 지속시간이 0 ~  $75 \mu\text{sec}$ 일 때의 형광층 내부의 이동 전하  $Q_t$ 와 전계  $F_p$ 와의 관계를 나타내었다. 그림 7-(a)와 다른 점은 펄스

폭의 지속시간이 증가할수록 형광층의 field-clamping 이 양의 전압이 인가될 때에는 0.2 MV/cm, 음의 전압이 인가될 때에는 0.1 MV/cm 정도 감소하였다. 이와 같은 감소는 계면의 비슷한 준위에 많은 전하가 포획될수록, 포획된 같은 극성의 전하끼리 발발력이 작용하여 감소한 것으로 판단된다. 또한 펄스 폭의 지속시간이 증가할수록  $Q_{relax}$ 가 증가하는 것을 선명하게 보여주고 있으며,  $Q_{relax}$ 의 증가에 따라  $Q_{pol}$ 의 양도 증가하였다. 양의 전압 펄스 지속시간이 0 에서 75  $\mu$  sec로 증가되는 동안, 형광층 내부의  $Q_{cond}^+$ 는 1.3  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>에서 2.3  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>로,  $Q_{relax}^+$ 는 매우 작은 양에서 0.5  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>로,  $Q_{leak}^+$ 는 0.2  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>에서 0.28  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>로, 및  $Q_{pol}^+$ 은 0.6  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>에서 1.05  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>으로 각각 증가하였다.  $Q_t$ - $F_p$  곡선의 가로축은 형광층만의 전계이므로, 이 전계에 형광층의 두께를 곱한 후, 부호를 반대로 취하면 형광층의 전압을 얻을 수 있다. 펄스 폭의 지속시간이 75  $\mu$  sec일 때 polarization charge에 의한 전계( $F_{pol, 75\mu}$ )는 -0.6 MV/cm, 펄스 폭의 지속시간이 0  $\mu$  sec일 때의 polarization charge에 의한 전계( $F_{pol, 0\mu}$ )는 -0.3 MV/cm였다. 여기에 TFEL 소자의 형광층 두께가 4000 Å 임을 고려하면, 양의 전압이 인가되기 전에  $Q_{pol}^-$ 의 증가에 의해 형성된 형광층의 내부 전압은 12 V에서 24 V로 증가되었다. 이와 같은 현상은 TFEL 소자에 전압이 인가되었을 때, 형광층에 걸릴 전압을 형성된 전압만큼 감소시키는 효과를 얻어 소자의 문턱 전압을 낮추는 역할을 한다.

그림 8에 형광층의 conduction charge  $Q_{cond}$ 와 휘도와의 관계를 나타내었다. conduction charge가 증가될 수록 휘도도 함께 증가하는 비례관계가 있음을 알 수 있다. 이는 conduction charge가 증가할 수록 많은 전자가 형광층내에서 운동에너지를 얻어 발광 중심 충돌하여 에너지를 형광체에 공급하기 때문이다. 매우 밝은 TFEL 소자를 제작하기 위해서는 매우 많은 conduction charge가 필수적이다.

그림 9는 형광층의 계면에 포획된 polarization charge  $Q_{pol}$ 와 TFEL 소자의 문턱 전압  $V_{th}$ 과의 관계를 나타내었다.  $Q_{pol}$ 가 증가할 수록 문턱 전압( $V_{th}$ )이 감소하는 특성을 나타내고 있다. 이는 펄스 폭의 지속시간이 증가됨에 따라 계면 준위에 포획된 전자의 수가 증가되어  $Q_{pol}^-$ 이 0.5  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>에서 0.9  $\mu$  C/cm<sup>2</sup>으로 증가되었으며, 이 전하는 형광층의 내부 전압

을 12 V에서 24 V로 증가시켜 외부 인가 전압의 문턱 전압을 감소시키는 현상을 설명하고 있다.

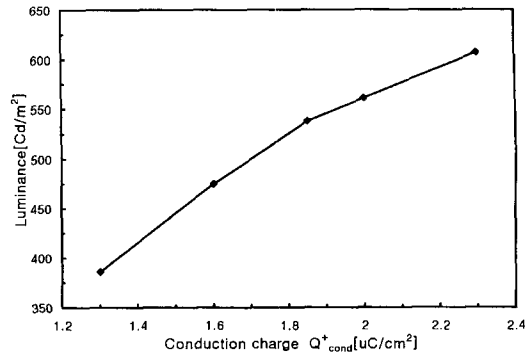


그림 8. ZnS:Mn TFEL소자의 휘도와  $Q_{cond}$   
Fig. 8. The dependence of luminance on  $Q_{cond}$  of ZnS:Mn TFEL devices.

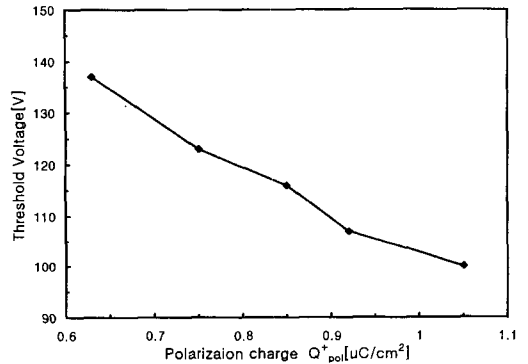


그림 9. ZnS:Mn TFEL소자의  $Q_{pol}$ 와 문턱 전압  $V_{th}$   
Fig. 9. The dependence of  $V_{th}$  on  $Q_{pol}$  of ZnS:Mn TFEL devices.

#### IV. 결론

ALE 장비로 ZnS:Mn 박막 전계발광 소자를 제작하여 전기, 광학적 특성을 조사하였다.

상, 하 절연층로는  $Al_2O_3$ 를 사용하였고, 두께는 각각 3000 Å과 4000 Å 이었다. ZnS:Mn 형광층의 두께는 4000 Å 이었으며, Mn의 농도는 0.3 mole %였다. 정현파, 1KHz의 전압을 인가한 결과, 134 V에서 휘도가 급격히 증가하여 230 V에서 최대 휘도가 568 Cd/m<sup>2</sup>가 되었다. 발광하는 빛의 최대 파장은 577 nm였고, 발광 파장이 넓어 일반적인 ZnS:Mn 형광체의 발광 특성과 일치하였다.

사다리꼴 형태의 전압을 인가하여 C-V, Q-V,  $Q_t$ - $F_p$ , L- $Q_{cond}$  및  $V_{th}$ - $Q_{pol}$ 을 측정하였다. C-V 특

성으로부터 TFEL 소자의 breakdown 전압( $V_{th}$ )은 100 V임을 확인하였고 capacitance는 breakdown 전에는  $9.0 \text{ nF/cm}^2$ , breakdown 후에는  $14.3 \text{ nF/cm}^2$ 가 되어, 형광층 capacitance  $C_p$ 는  $24.3 \text{ nF/cm}^2$ , 절연층 capacitance  $C_i$ 는  $14.3 \text{ nF/cm}^2$ 이었다. Q-V 특성에서 전압에 따른 전하의 기울기가 2 가지 영역이 있는 것을 확인하였고 Q-V 특성에서 얻은  $V_{th}$ ,  $C_i$  및  $C_p$ 는 C-V특성에서 얻은 결과들과 일치한다. 또한 최대 전압의 펄스폭 지속시간이 0 ~ 75  $\mu\text{sec}$ 로 증가됨에 따라  $Q_{relax,e}$ 가 증가되어  $Q_{pol,e}$ 도 증가되는 것으로 나타났다. 또한  $Q_{pol,e}$ 의 증가에 따라 계면에 형성된 전계가 증가되어 문턱 전압이 감소되었다.  $Q_i$ - $F_p$  특성에서 형광층의 field-clamping 전계  $F_{ss}$ 는 양과 음의 전압이 인가되었을 때 약간 다른 특성을 나타내었지만, ZnS:Mn TFEL 소자의 일반적인 값 1.5 MV/cm와 거의 일치하였다. 또한 최대 전압의 펄스폭 지속시간이 0 ~ 75  $\mu\text{sec}$ 로 증가됨에 따라  $Q_{pol}$ 이  $0.5 \mu\text{C/cm}^2$ 에서  $0.9 \mu\text{C/cm}^2$ 로 증가되어 인가 전압의 극성이 변화되기 전 0 V에서 포획된 전자에 의한 형광층의 전압이 12 V에서 24 V로 증가되었다. L- $Q_{cond}$  특성에서 발광된 빛의 휘도는 이동 전하량과 정확히 비례함을 알 수 있었으며,  $V_{th}$ - $Q_{pol}$  특성에서  $Q_{pol}$ 의 양이 많을 수록 문턱 전압은 감소하였다.

감사의 글

※ 본 연구는 전자통신연구원의 지원에 의해 이루어진

연구 결과임.

참고 문헌

[ 1 ] E.Soininen, M.Lepänen, R.Tornqvist, and J.Viljanen, "Recent progress in color thin-film EL displays," *EL '94 Digest*, pp. 19-20, 1994

[ 2 ] R.Khormaei, S.Thayer, K.Ping, C.King, G.Dolny, A.Ipri, F-L.Hsueh, R.Stewart, T.Keyser, G.Becker, D.Kagey, and M.Spitzer, "High-resolution active-matrix electroluminescent display," *SID 94 Digest*, pp. 137-139, 1994

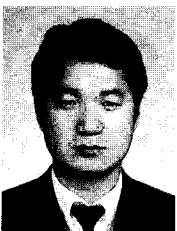
[ 3 ] Reiner H. Ma  $\mu$  Ch, "Electroluminescence based on rare earth alkaline-earth-sulfides," *EL'94 Digest*, pp. 17-18, 1994

[ 4 ] Y.A.Ono, *Electroluminescence*, Encyclopedia of Applied Physics, vol. 5, VCH Publishers Inc., Japan, 1992

[ 5 ] R.C. McArthur, J.D. Davidson, J.F. Wager, I. Khormaei, and C.N. King, "Capacitance-voltage characteristics of alternating-current thin-film electroluminescent devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, no. 19, pp. 1889-1891, 1990

[ 6 ] E.Bringuier, "Charge-transfer in ZnS-type electroluminescence," *J. Appl. Phys.*, vol. 66, pp. 1314-1325, 1989

저자 소개



李 淳 錫(正會員)  
1964년 10월 25日生. 1987년 2월 단국대학교 전자공학과(학사). 1989년 2월 단국대학교 대학원 전자공학과(석사). 1994년 9월 단국대학교 대학원 ~ 현재 전자공학과(박사과정). 1989년 2월 ~ 1995년 3월 국방과학연구소 연구원. 주관심분야는 Electroluminescent Display, Plasma Display Panels, Phosphors

尹 善 偲(正會員)  
현재 한국전자통신연구원 재료기술연구실 책임 연구원

林 聖 奎(正會員)  
1953년 8월 6日生. 1977년 2월 서울대학교 공과대학 전자공학과(학사). 1979년 2월 서울대학교 대학원 전자공학과(석사). 1993년 6월 Oregon State University 전기 및 Computer 공학과(박사). 1979년 3월 ~ 1981년 1월 해군사관학교 전자공학과 교관. 1981년 5월 ~ 1982년 2월 삼성전자 반도체사업부 주임연구원. 1982년 3월 ~ 현재 단국대학교 전자공학과 전임강사, 조교수, 부교수, 교수. 1995년 9월 ~ 현재 단국대학교 부설 정보 디스플레이 연구소 소장. 1986년 9월 ~ 1987년 1월 University of Arizona 연구교수. 1987년 2월 ~ 1987년 8월 Oregon State University 연구교수. 1993년 6월 ~ 현재 Member of Phi Kappa Phi. 주관심분야는 Design and Fabrication of Optical Interference Filter, Electroluminescent Displays, Plasma Display Panels, Plasma Assisted Liquid Crystal (PALC) Displays